

*УЧБ*  
МИНИСТЕРСТВО НА ОТБРАНАТА  
ВИСШЕ ВОЕННОМОРСКО УЧИЛИЩЕ "Н.Й.ВАЩАРОВ"

Н. Ангелов Б. Абрахамян А. Доврамаджиев  
Л. Дънков М. Недев С. Чакъров

# ЕЛЕКТРОТЕХНИКА



Варна

2006



МИНИСТЕРСТВО НА ОТБРАНАТА

---

ВИСШЕ ВОЕННОМОРСКО УЧИЛИЩЕ „НИКОЛА ЙОНКОВ ВАПЦАРОВ“

НИКОЛАЙ АНГЕЛОВ

АТАНАС ДОВРАМАДЖИЕВ

МАРИН НЕДЕВ

БОХОС АПРАХАМЯН

ЛЮБОМИР ДЪНКОВ

СТАМЕН ЧАКЪРОВ

---

# ЕЛЕКТРОТЕХНИКА

---

ВАРНА • 2006 г.



# СЪДЪРЖАНИЕ

<b>ПРЕДГОВОР</b> .....	15
<b>РАЗДЕЛ I. ФИЗИЧЕСКИ ОСНОВИ НА ЕЛЕКТРОТЕХНИКАТА</b> .....	17
Въведение .....	17
<b>Първа глава. ОСНОВНИ ЕЛЕКТРИЧЕСКИ И МАГНИТНИ ВЕЛИЧИНИ</b> .....	19
1.1. Електрически заряд, ток, напрежение, мощност и енергия .....	19
1.2. Закон на Ом .....	22
1.3. Магнитно поле. Закон на Ампер .....	24
1.4. Закон на Фарадей .....	31
1.5. Електрическо поле .....	33
1.6. Уравнения на Максвел .....	38
1.7. Сила на взаимодействие между заредени тела .....	40
<b>Втора глава. ЕЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИ МАТЕРИАЛИ</b> .....	42
2.1. Електрически свойства на газовете .....	42
2.2. Електрически свойства на течностите .....	43
2.3. Електрически свойства на твърдото тяло .....	44
2.3.1. Метали .....	44
2.3.2. Полупроводници .....	46
2.3.3. Изолатори .....	50
2.3.4. Свърхпроводимост. Свърхпроводящи материали .....	56
2.4. Магнитни материали .....	59
<b>РАЗДЕЛ II. ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ВЕРИГИ</b> .....	66
<b>Трета глава. ЕЛЕКТРИЧЕСКА ВЕРИГА И НЕЙНИТЕ ЕЛЕМЕНТИ. ПОСТОЯННОТОКОВИ ВЕРИГИ</b> .....	66
3.1. Електрическа верига и нейните елементи .....	66
3.1.1. Основни понятия. Елементи на електрическата верига .....	66
3.1.2. Изобразяване на електрическите вериги .....	69
3.2. Линейни електрически вериги за постоянен ток .....	72
3.2.1. Основни положения и съотношения .....	72
3.2.2. Свързване на елементите на веригата .....	75
3.2.3. Анализ на сложни електрически вериги .....	83
3.2.4. Режим на работа на електрическата верига .....	84
<b>Четвърта глава. ЛИНЕЙНИ ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ВЕРИГИ ЗА ПРОМЕНЛИВ ТОК</b> .....	86
4.1. Общи положения .....	86



4.1.1. Променливотокови синусоидални величини .....	86
4.1.2. Средни и ефективни стойности на синусоидалните величини .....	88
4.1.3. Представяне на синусоидалните е.д.н., ток и напрежение чрез комплексни числа (символичен метод) .....	89
4.1.4. Закони на Ом и Кирхоф в комплексна форма .....	92
4.2. Синусоидални ток и напрежение в пасивните елементи на електри- ческата верига .....	93
4.2.1. Резистор .....	93
4.2.2. Индуктивна бобина .....	95
4.2.3. Кондензатор .....	99
4.3. Свързване на елементите на променливотокова верига .....	102
4.3.1. Верига с последователно съединени участъци с активно съп- ротивление, индуктивност и капацитет .....	102
4.3.2. Верига с успоредно съединени участъци с активно съпротив- ление, индуктивност и капацитет .....	106
4.4. Резонансни явления в електрическите вериги .....	108
4.4.1. Понятие за резонанс в електрическите вериги .....	108
4.4.2. Резонанс на напреженията .....	108
4.4.3. Резонанс на токовете .....	111
4.5. Мощност при променливия ток. Фактор на мощността .....	113
4.6. Анализ на линейни електрически вериги за променлив ток .....	116
4.6.1. Пресмятане на прости (неразклонени) променливотокови ве- риги .....	116
4.6.2. Пресмятане на сложни (разклонени) променливотокови вериги .....	116
4.7. Трифазни вериги .....	120
4.7.1. Общи положения .....	120
4.7.2. Свързване „звезда“ .....	122
4.7.3. Свързване „триъгълник“ .....	126
4.7.4. Мощност на трифазна верига .....	128
4.7.5. Сравнение между трифазната и еднофазна системи .....	129
4.8. Преходни процеси в линейни електрически вериги за постоянен ток ...	131
4.8.1. Общи положения .....	131
4.8.2. Преходни процеси в R, L вериги за постоянен ток .....	134
4.8.3. Преходни процеси в R, C вериги за постоянен ток .....	137
4.9. Електрически филтри .....	141
4.9.1. Високочестотен филтър .....	142
4.9.2. Нискочестотен филтър .....	144
4.9.3. Lentов филтър .....	144
4.9.4. Режекторен филтър .....	145

**П е т а г л а в а. МАГНИТНИ ВЕРИГИ С ПОСТОЯННО МАГНИТОДВИ-  
ЖЕЩО НАПРЕЖЕНИЕ .....** 147

5.1. Общи положения .....	147
5.1.1. Магнитни вериги. Видове .....	147



5.1.2. Закони на Кирхоф за магнитните вериги .....	148
5.2. Анализ на магнитни вериги .....	149
5.2.1. Линейни магнитни вериги .....	149
5.2.2. Нелинейни магнитни вериги .....	151
<b>РАЗДЕЛ III. ЕЛЕКТРОННИ СХЕМИ .....</b>	<b>154</b>
<b>Шеста глава. ПОЛУПРОВОДНИКОВИ ПРИБОРИ .....</b>	<b>154</b>
6.1. p-n преход. Полупроводников диод .....	154
6.2. Транзистори. Принцип на действие. Основни свойства .....	158
6.3. Тиристори .....	160
<b>Седма глава. ОСНОВНИ ТРАНЗИСТОРНИ СХЕМИ .....</b>	<b>163</b>
7.1. Транзисторен ключ .....	164
7.2. Емитерен повторител .....	165
7.3. Транзисторен източник на ток .....	168
7.4. Усилвател с общ емитер .....	169
7.5. Усилватели .....	170
<b>Осма глава. ОПЕРАЦИОННИ УСИЛВАТЕЛИ .....</b>	<b>172</b>
8.1. Основни свойства на операционните усилватели (ОУ) .....	172
8.2. Инвертиращ усилвател с ОУ .....	173
8.3. Неинвертиращ усилвател с ОУ .....	174
8.4. Диференциален усилвател с ОУ .....	175
8.5. Други схеми с ОУ .....	176
<b>Девета глава. ПОЛУПРОВОДНИКОВИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ .....</b>	<b>179</b>
9.1. Основни понятия .....	179
9.2. Еднофазни изправители .....	180
9.3. Трифазни токоизправители .....	184
9.4. Управляеми изправители .....	185
9.5. Устройства за управление на управляеми изправители .....	188
9.6. Преобразователи на честота .....	190
<b>РАЗДЕЛ IV. ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ИЗМЕРВАНИЯ .....</b>	<b>196</b>
<b>Десета глава. МЕТОДИ ЗА ИЗМЕРВАНЕ И ГРЕШКИ ПРИ ИЗМЕР-</b>	
<b>ВАНИЯТА .....</b>	<b>196</b>
10.1. Методи за измерване .....	196
10.2. Грешки при измерванията .....	197
10.3. Източници на грешки .....	197
10.4. Статистика на грешките .....	199
10.5. Сумиране на грешките .....	201



<b>Единадесета глава. ЕЛЕКТРОМЕХАНИЧНИ ИЗМЕРВАТЕЛНИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ И УРЕДИ .....</b>	<b>204</b>
11.1. Метрологични характеристики на електроизмервателните уреди .....	204
11.2. Електромеханични измервателни механизми .....	209
11.3. Измерване на електрически величини с електромеханични измервателни уреди .....	220
11.3.1. Измерване на ток .....	220
11.3.2. Измерване на напрежение .....	222
11.3.3. Измерване на съпротивления .....	225
11.3.4. Измерване на мощност .....	227
<b>Дванадесета глава. ЕЛЕКТРОННИ ИЗМЕРВАТЕЛНИ УРЕДИ .....</b>	<b>231</b>
12.1. Електронни измервателни уреди с магнитоелектрически индикатор .....	231
12.1.1. Измерване на променлив ток с уред от магнитоелектрическата система .....	231
12.2. Цифрови измервателни уреди .....	234
12.2.1. Аналого-цифрови преобразуватели (АЦП) .....	235
12.2.2. Основни характеристики на цифровите волтметри и мултиметри .....	240
12.3. Осцилоскопи .....	242
12.3.1. Основна схема на осцилоскопа .....	243
12.3.2. Електроннолъчева тръба (ЕЛТ) .....	244
12.3.3. Вертикално отклоняваща система .....	245
12.3.4. Хоризонтално отклоняваща система .....	246
12.3.5. Осцилоскопи с два входа .....	247
12.3.6. Цифрови запомнящи осцилоскопи .....	249
12.3.7. Измерване с осцилоскоп .....	249
<b>РАЗДЕЛ V. АВТОМАТИЧНО УПРАВЛЕНИЕ .....</b>	<b>252</b>
<b>Тринадесета глава. СИСТЕМИ И ТЯХНОТО МАТЕМАТИЧЕСКО ОПИСАНИЕ .....</b>	<b>252</b>
13.1. Описание на системите в статичен режим .....	253
13.1.1. Статични модели .....	253
13.1.2. Линеаризация на статичните модели .....	257
13.2. Динамични модели на системите и елементите им .....	258
13.2.1. Динамични модели на електрически вериги .....	258
13.2.2. Динамични модели на механични системи .....	260
13.2.3. Модели на електромеханични системи .....	264
13.3. Представяне на динамичните модели в пространството на състоянията .....	266
13.4. Други начини за описание на динамичните модели .....	271
13.4.1. Преобразуване на Лаплас .....	271
13.4.2. Предавателни функции .....	272
13.4.3. Временни характеристики .....	276



13.4.4. Честотни характеристики .....	278
<b>Четиринадесета глава. АВТОМАТИЧНО УПРАВЛЕНИЕ .....</b>	<b>282</b>
14.1. Основни принципи за регулиране и управление .....	285
14.1.1. Регулиране по смущаващо въздействие .....	285
14.1.2. Регулиране по отклонението (грешката) .....	287
14.1.3. Комбинирани системи .....	289
14.2. Динамични модели на обекти от първи и втори ред .....	290
14.2.1. Позиционни звена .....	291
14.2.2. Интегриращи звена .....	299
14.2.3. Диференциращи звена и звено с чисто закъснение .....	304
14.3. Свързване на динамичните звена .....	308
14.3.1. Последователно свързване .....	308
14.3.2. Паралелно свързване .....	309
14.3.3. Насрещно-паралелно свързване .....	310
14.4. Устойчивост и качество на системите за автоматично управление .....	311
14.4.1. Устойчивост .....	311
14.4.2. Устойчивост на линейни системи с постоянни коефициенти .....	311
14.4.3. Алгебрични критерии за устойчивост .....	314
14.4.4. Честотни критерии за устойчивост .....	315
14.4.5. Критерий на Найквист .....	316
14.4.6. Критерий за устойчивост на Боде .....	320
14.4.7. Устойчивост на системи, представени в пространството на състоянията .....	322
14.5. Качество на системите за автоматично регулиране .....	323
14.5.1. Точност при типови въздействия .....	324
14.5.2. Оценка на качеството по кривата на преходния процес .....	326
14.5.3. Интегрални критерии за качество .....	328
14.5.4. Определяне на качеството по разположението на корените на характеристичния полином .....	330
14.6. Видове управление .....	331
14.6.1. Пропорционален закон за регулиране .....	331
14.6.2. Пропорционално-интегрален закон за управление .....	333
14.6.3. Диференциален закон за управление .....	335
14.6.4. Пропорционално-интегрално-диференциално (ПИД) управление .....	336
14.6.5. Приблизителни методи за настройка на ПИД регулатори .....	337
14.7. Синтез на системи за автоматично управление (САУ) .....	339
14.7.1. Синтез на САУ с помощта на логаритмичните честотни характеристики .....	339

<b>РАЗДЕЛ VI. ЕЛЕКТРИЧЕСКИ МАШИНИ И АПАРАТИ .....</b>	<b>342</b>
<b>Петнадесета глава. ПОСТОЯННОТОКОВИ МАШИНИ .....</b>	<b>342</b>
15.1. Принцип на действие и устройство на постояннотоковата машина .....	342
15.2. Електродвижещо напрежение и въртящ момент на постояннотоковите машини .....	348
15.2.1. Електродвижещо напрежение .....	348
15.2.2. Въртящ момент .....	349
15.3. Преобразуване на енергията в постояннотоковите машини. Комутация. Реакция на котвата .....	350
15.3.1. Преобразуване на енергията в постояннотоковите машини .....	350
15.3.2. Загуби в постояннотоковите машини и коефициент на полезно действие .....	353
15.3.3. Комутация .....	355
15.3.4. Реакция на котвата .....	357
15.4. Условни графични обозначения и класификация на постояннотоковите машини .....	358
15.5. Постояннотокови генератори .....	359
15.5.1. Постояннотоков генератор с независимо възбуждане .....	359
15.5.2. Постояннотоков генератор с паралелно възбуждане .....	361
15.5.3. Постояннотоков генератор със смесено възбуждане .....	363
15.6. Постояннотокови двигатели .....	364
15.6.1. Постояннотоков двигател с независимо (паралелно) възбуждане .....	364
15.6.2. Постояннотоков двигател с последователно възбуждане .....	368
15.6.3. Постояннотоков двигател със смесено възбуждане .....	370
<b>Шестнадесета глава. ТРАНСФОРМАТОРИ .....</b>	<b>371</b>
16.1. Принцип на действие и устройство на трансформатора .....	371
16.2. Ток на празен ход и заместваща схема на трансформатора .....	373
16.3. Определяне на параметрите на заместващата схема .....	378
16.4. Параметри на заместващата схема в относителни единици .....	382
16.5. Трифазни трансформатори .....	385
16.6. Специални трансформатори .....	387
16.7. Автотрансформатори .....	388
<b>Седемнадесета глава. СИНХРОННИ МАШИНИ .....</b>	<b>391</b>
17.1. Принцип на действие и устройство на синхронен генератор (СГ) .....	391
17.2. Въртящо се магнитно поле .....	396
17.3. Е.д.н. и реакция на котвата на СГ .....	399



17.4. Векторни диаграми на СГ .....	403
17.5. Мощност и електромагнитен момент на СГ .....	406
17.6. Характеристики на СГ .....	409
17.7. Паралелна работа на СГ .....	413
17.7.1. Включване на СГ към мрежата или друг СГ .....	414
17.7.2. Паралелна работа на СГ с мрежата .....	415
17.8. Синхронни двигатели .....	418
<b>Осемнадесета глава. АСИНХРОННИ МАШИНИ .....</b>	<b>421</b>
18.1. Устройство и принцип на действие .....	421
18.2. Описание на процесите в асинхронната машина .....	424
18.3. Енергийна диаграма и въртящ момент на асинхронната машина .....	427
18.4. Работни характеристики на асинхронната машина .....	432
18.5. Регулиране на честотата на въртене на асинхронните двигатели .....	433
18.6. Асинхронни двигатели с малка мощност .....	435
18.6.1. Еднофазни асинхронни двигатели .....	435
18.6.2. Асинхронни изпълнителни двигатели (АИД) .....	439
18.7. Селсини .....	440
<b>Деветнадесета глава. ЕЛЕКТРИЧЕСКИ АПАРАТИ .....</b>	<b>444</b>
19.1. Функции и предназначение на електрическите апарати .....	444
19.2. Класификация на електрическите апарати .....	444
19.3. Електромагнитни механизми .....	445
19.3.1. Електромагнитни сили между феромагнитни полюси .....	445
19.3.2. Статични характеристики на електромагнитните механизми .....	447
19.4. Електрически контакт .....	449
19.4.1. Общи сведения и определения .....	449
19.4.2. Явления при контактуването .....	451
19.5. Електрическа дъга .....	452
19.5.1. Общи сведения .....	452
19.5.2. Дъгогасителни устройства .....	454
19.6. Електрически апарати за управление .....	456
19.7. Електрически апарати за регулиране .....	463
19.8. Електрически апарати за контрол и защита .....	463
19.9. Електрически апарати за разпределителни уредби .....	465

<b>РАЗДЕЛ VII. ЕЛЕКТРООБЗАВЕЖДАНЕ НА КОРАБА .....</b>	<b>471</b>
<b>Двадесета глава. КОРАБНО ЕЛЕКТРООБЗАВЕЖДАНЕ И КОРАБНИ ЕЛЕКТРИЧЕСКИ СТАНЦИИ .....</b>	<b>471</b>
20.1. Видове корабно електрообзавеждане .....	471
20.2. Условия на работа на корабното електрообзавеждане. Правила и изисквания към него .....	473
20.3. Обща характеристика, основни понятия и видове корабни електрически станции .....	475
20.4. Параметри и качество на електрическата енергия .....	481
<b>Двадесет и първа глава. УПРАВЛЕНИЕ НА КОРАБНИТЕ ГЕНЕРАТОРИ .....</b>	<b>486</b>
21.1. Системи за възбуждане на генераторите .....	486
21.1.1. Принципи на построяване на системите за регулиране на напрежението на синхронните генератори .....	486
21.1.2. Системи за компаундирне. Основни съотношения и структура .....	488
21.1.3. Примери на схемни решения на системи за компаундиране ...	489
21.1.4. Коректори на напрежението в системите за компаундиране. Схемни особености и примери .....	492
21.2. Външни характеристики на системите за възбуждане .....	498
21.3. Безчеткови синхронни генератори и техните системи за възбуждане .....	502
21.4. Начално възбуждане и гасене на полето .....	505
21.4.1. Начално самовъзбуждане .....	505
21.4.2. Гасене на полето .....	507
21.5. Паралелна работа на корабните генератори .....	508
21.5.1. Общи сведения .....	508
21.5.2. Разпределение на реактивните товари между паралелно работещи генератори .....	510
21.6. Регулиране на честотата и разпределение на активните товари .....	515
21.6.1. Регулиране на честотата .....	515
21.6.2. Разпределение на активните товари .....	518
21.7. Включване на генераторите в паралелна работа .....	520
21.8. Устойчивост на паралелната работа на корабните синхронни генератори .....	525
21.9. Автоматично управление на корабните електрически станции .....	530
21.9.1. Предназначение и функция на уредбите за автоматизация .....	530
21.9.2. Елементна база и конструкция .....	532
<b>Двадесет и втора глава. ПРЕХОДНИ ПРОЦЕСИ В КОРАБНОТО ЕЛЕКТРОЗАХРАНВАНЕ .....</b>	<b>534</b>
22.1. Обща характеристика на задачите за изследване на преходните процеси в КЕС .....	534

22.2. Общи сведения за математичния апарат за изследване на преходните процеси в КЕС .....	537
22.3. Преходен процес при включване на товар към синхронен генератор с независимо възбуждане .....	540
22.4. Преходни процеси при включване на товар към синхронен генератор със система за възбуждане .....	542
22.5. Преходни процеси при късо съединение на корабните синхронни генератори .....	545
22.5.1. Обща характеристика .....	545
22.5.2. Анализ на процесите при симетрично късо съединение в синхронния генератор с независимо възбуждане .....	546
22.6. Защити в КЕС .....	548
22.6.1. Защита на основните елементи на корабните електроенергетични системи .....	550
22.6.1.1. Защита на мрежите .....	550
22.6.1.2. Защита на генераторите .....	552
22.6.1.3. Защита на трансформаторите .....	553
22.6.1.4. Защита на двигателите .....	553

## **Двадесет и трета глава. ИЗПОЛЗВАНЕ НА АКУМУЛАТОРИТЕ В СИСТЕМИТЕ ЗА КОРАБНО ЕЛЕКТРОЗАХРАНВАНЕ .....**

23.1. Корабни акумулаторни батерии .....	555
23.1.1. Кратка харктеристика на киселинните оловни акумулатори .....	555
23.1.2. Кратка характеристика на основните акумулатори .....	558
23.2. Зареждане и разреждане на акумулаторите .....	558
23.3. Устройства за зареждане на корабните акумулатори .....	560
23.4. Мерки за безопасност при обслужване на акумулаторите .....	564

## **Двадесет и четвърта глава. КОРАБНИ ЕЛЕКТРОЗАДВИЖВАНИЯ .....**

24.1. Основи на електрозадвижването .....	565
24.1.1. Основни сведения за корабните електрозадвижвания .....	565
24.1.2. Динамика на електрозадвижванията .....	568
24.1.2.1. Уравнение на движението на механична система .....	568
24.1.2.2. Привеждане на механичната система Д - ПМ - РО .....	569
24.1.3. Съвместна работа на електродвигател и работен орган .....	572
24.1.4. Установен режим на работа на електрозадвижването. Критерий за статична устойчивост .....	574
24.1.5. Режими на работа на двигателите .....	575
24.1.6. Регулиране на скоростта на въртене на електродвигателите .....	578
24.1.7. Режими на работа на електродвигателите .....	581
24.1.8. Необходими данни и избор на електродвигател .....	584
24.2. Управление на корабните електрозадвижвания .....	587



24.2.1. Общи понятия и обозначения .....	587
24.2.2. Схеми за управление на електрозадвижванията .....	590
24.2.2.1. Магнитен реверсивен/нереверсивен пускател .....	590
24.2.2.2. Релейно-контакторна схема за пускане на трифазен асинхронен двигател, чрез превключване на статорните намотки от схема „звезда“ в схема „триъгълник“ .....	591
24.2.2.3. Релейно-контакторна схема за управление на двускоростен трифазен асинхронен двигател .....	593
24.2.2.4. Честотно управление на асинхронен двигател .....	595
24.2.3. Пусков реостат .....	597
24.2.4. Електрозадвижваща система „генератор - двигател“ .....	598
24.3. Автоматизирано управление на корабните електрозадвижвания .....	600
24.4. Гребни електрозадвижвания (ГЕУ) .....	601
24.4.1. Основни понятия и видове ГЕУ, предимства и недостатъци .....	601
24.4.2. Особенности на корабните ГЕУ .....	604

## **Двадесет и пета глава. КОРАБНИ ЕЛЕКТРИЧЕСКИ СИСТЕМИ ЗА УПРАВЛЕНИЕ, БЕЗОПАСНОСТ И СВРЪЗКА .....**

25.1. Корабни телеграфни системи .....	609
25.2. Звукови и светлинни сигнализации .....	611
25.3. Корабни системи за телефонна свръзка .....	614
25.4. Магнитно поле на кораба .....	617
25.5. Магнитно поле на Земята .....	617
25.6. Основни характеристики на магнитното поле на кораба .....	618
25.7. Представяне на корабното магнитно поле .....	622
25.8. Измерване на магнитното поле на кораба .....	624
25.9. Формиране на магнитното поле на кораба .....	625
25.10. Компенсиране на магнитното поле на кораба .....	627

## **ЛИТЕРАТУРА .....**

## ИЗПОЛЗВАНИ УСЛОВНИ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- A* - площ
- a* - дължина, коефициент
- B* - магнитна индукция, реактивна проводимост
- b* - дължина, размер
- C* - електрически капацитет, константа на измервателен уред
- D* - диаметър, електрическа индукция
- d* - разстояние, размер, затихване
- E* - електродвижещо напрежение (е.д.н.), интензитет на електрическото поле
- e* - променливо е.д.н.
- F* - сила, магнитодвижещо напрежение (м.д.н.)
- f* - честота
- G* - активна проводимост
- g* - земно ускорение
- H* - интензитет на магнитното поле
- h* - височина
- I* - електрически ток
- i* - променлив ток, моментна стойност на тока
- J* - намагнитеност, инерционен момент
- j* - имагинерна единица
- K* - коефициент
- k* - коефициент
- L* - коефициент на самоиндукция, дължина на контур
- l* - дължина, разстояние
- M* - въртящ момент, коефициент на взаимна индукция
- m* - маса
- N* - брой проводници, брой на свободните заряди в полупроводник
- n* - пореден номер, брой
- P* - активна мощност, поляризация
- p* - моментна мощност
- Q* - реактивна мощност, качествен фактор
- q* - електрически заряд
- R* - активно съпротивление
- r* - радиус
- S* - площ, повърхност, привидна мощност
- T* - период, абсолютна температура
- t* - време
- U* - напрежение
- u* - променливо напрежение, моментна стойност на напрежението
- V* - обем, електрически потенциал
- v* - линейна скорост
- W* - работа, енергия

$w$  - моментна стойност на енергията, брой навивки  
 $X$  - реактивно съпротивление,  
 $x$  - променлива  
 $Y$  - комплексна проводимост  
 $y$  - модул на комплексната проводимост  
 $Z$  - комплексно съпротивление  
 $z$  - модул на комплексното съпротивление  
 $\vartheta$  - диелектрична възприемчивост  
 $\Lambda$  - магнитна проводимост  
 $\Theta$  - температура  
 $\Omega$  - ъглова честота (механична)  
 $\Psi$  - потокосвързване  
 $\Phi$  - магнитен поток  
 $\alpha$  - ъгъл  
 $\beta$  - ъгъл, коефициент на усилване по ток  
 $\chi$  - магнитна възприемчивост  
 $\delta$  - ширина на въздушна междина, изместване  
 $\varepsilon$  - диелектрична проницаемост  
 $\phi$  - променлив магнитен поток, моментна стойност на магнитния поток  
 $\gamma$  - ъгъл  
 $\eta$  - к.п.д.  
 $\varphi$  - ъгъл, фазов ъгъл  
 $\lambda$  - дължина на вълната  
 $\mu$  - магнитна проницаемост  
 $\nu$  - номер на висш хармоник  
 $\theta$  - ъгъл на натоварване на синхронен генератор, ъгъл  
 $\rho$  - специфично съпротивление, вълново съпротивление  
 $\sigma$  - повърхностна плътност на електрически заряд, средно квадратично отклонение  
 $\tau$  - полюсно деление  
 $\omega$  - ъглова честота  
 $\xi$  - коефициент на затихване  
 $\psi$  - фазов ъгъл, начална фаза

### Основни единици и символите им в Системата SI

килограм - *kg*

метър - *m*

секунда - *s*

ампер - *A*

келвин - *K*

кандела - *cd*

мол - *mol*

### Допълнителни единици

Радан - *rad*

стерадиан - *sr*



## ПРЕДГОВОР

Експлоатацията на съвременните военни и граждански кораби е немислима без доброто познаване на електрическите системи на кораба, осигуряващи нормалната работа на главния двигател, всички изпълнителни механизми и тяхното управление. Броят на корабите с електрически пропусивен комплекс през последните години нараства бързо, което още повече налага необходимостта от изучаването на всички аспекти на приложението на електротехниката на корабите.

Съдържанието на учебника съответства на учебните програми по дисциплините „Основи на електротехниката и електрониката“, „Електромеханика“, „Електрообзавеждане на кораба“ и „Електротехника“, които се изучават от курсантите и студентите от ВВМУ „Н. Й. Вапцаров“ и се базира на моделните курсове на Международната морска организация, съобразени с Конвенцията „STCW-95“ - част А, за обучението, сертифицирането и вахтената служба на морските лица.

Предвид необходимостта от по-задълбочени познания по електротехника, авторите са се постарали да обхванат всички важни раздели от тази обширна област. За по-голямата част от учебния материал, с цел да се направи изложението по-достъпно, са предложени решени примери и контролни въпроси. Някои от главите са с по-кратко съдържание, например в раздела „Електронни схеми“, но пренебрегването им би затруднило усвояването на други части от изложението.

Широкият кръг от въпроси, които учебникът обхваща, го прави полезен както за студентите и курсантите от електротехническите и неелектротехническите специалности на ВВМУ, така и за всички, които имат отношение към експлоатацията на корабното електрообзавеждане.

Учебникът е структуриран в седем раздела:

*Раздел първи* има за цел разширяването на познанията в областта на електромагнетизма и физиката на твърдото тяло, за да осигури разбирането на основните свойства на елементите на електрическите вериги (ЕВ), първичните измервателни преобразуватели, електрическите машини и др., и да се обяснят фундаменталните свойства на електротехническите материали.

*Раздел втори* представя основните елементи на ЕВ и методите за анализ на постояннотокови и променливотокови ЕВ. При разглеждането на променливотоковите ЕВ, наред с тригонометрични функции се използват комплексни числа и функции на комплексната променлива, което осигурява по-задълбоченото им изучаване. В този раздел, като основа за изучаването на трифазните електрически мрежи и системи, са включени още трифазните

вериги. Дадени са и някои основни понятия, свързани с филтрите и преходните процеси в ЕВ. Като неразделна част на електромагнитните устройства са разгледани магнитните вериги и накратко - методите за анализ с използване на еквивалентни електрически вериги със съсредоточени параметри.

**Раздел трети** представя основните понятия от електрониката и основните електронни схеми, които се използват в силовите електронни преобразуватели в корабните електрически системи (КЕС). Разделът осигурява изучаването на материала предимно в разделите по електрически измервания и КЕС.

**Раздел четвърти** проследява последователно грешките при измерванията, които имат съществено значение за измервателния процес, класическите електромеханични измервателни системи и широко използваните цифрови измервателни уреди. Отделено е внимание на измервателните системи и тяхната диагностика.

**Раздел пети** представя системния подход при описанието на различни устройства и използването му за описание и анализ на автоматизираните корабни системи. Изложението е относително самостоятелно и може да бъде полезно при възникване на необходимост от по-детайлно запознаване с динамиката на автоматизираните системи.

**Шести раздел** разглежда принципа на действие, устройството и режимите на работа на електрическите машини и апарати, които имат основно значение за работата на корабните електрически системи, вкл. някои машини с малка мощност, използвани в системите за управление.

**Раздел седми** представя изискванията към корабното електрообзавеждане, обусловени от морските условия на работа; въпросите, свързани с управлението на корабните синхронни генератори в електрическите станции; корабните електрозадвижвания; използването на акумулаторите в системата на корабното електрозахранване и някои корабни системи за безопасност и свързка. Тема на раздела е и намагнитването на кораба от земното магнитно поле и корабните електроенергетични машини, и начините за размагнитването му.

Учебникът не е освободен от недостатъците, които съпровождат колективните трудове, тъй като подходът и начинът на излагане на учебното съдържание са индивидуални за всеки автор. За тях ръководителят на авторския колектив доц. д-р. Н. Ангелов, който е и научен редактор на изданието, поднася своите извинения на читателите и ще приеме с благодарност всички забележки, относно подобряването на качеството на учебника.

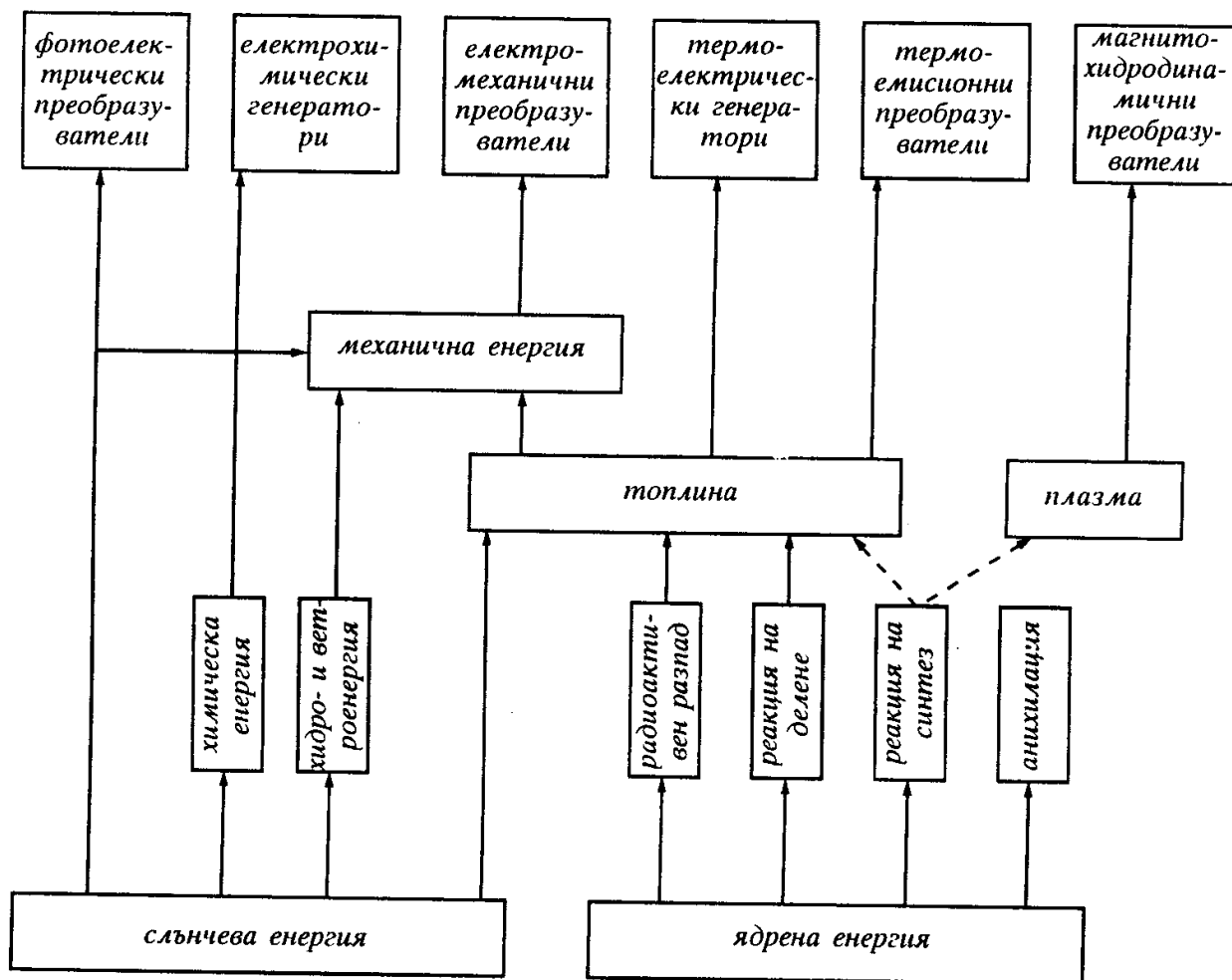
*Авторите*

# РАЗДЕЛ I. ФИЗИЧЕСКИ ОСНОВИ НА ЕЛЕКТРОТЕХНИКАТА

## ВЪВЕДЕНИЕ

Електрическата енергия е необикновен вид енергия. Тя е недостъпна за нашите сетива, освен косвено, не може да се запасява, поне засега, но може лесно да се предава на големи разстояния, да се получава и да се преобразува от и в други известни видове енергия - качества, които я правят незаменима в съвременния живот. Този вид енергия, освен силовия, има и още един, не по-малко важен аспект - информационен. Едва ли можем да си представим съвременния живот без комуникационни и управляващи системи.

Схемата на фиг. 1 представя видовете енергия, които могат да се преобразуват в електрическа. С малки изключения, посочените преобразувания



Фиг. 1. Преобразуване на енергията

У 1946<sup>17</sup>



са обратими.

На съвременните кораби енергията е закачена обикновено във вид на течно гориво и в химическите акумулатори. Последните играят ролята на резервни източници. Енергията на ядрения разпад се използва на някои от ледоразбивачите, самолетоносачите и подводниците.

Основните машини, преобразуващи енергията на горивото в електрическа, са дизел-генераторите и турбогенераторите, които посредством корабната разпределителна мрежа осигуряват захранване на всички електрически потребители.

В изложението на настоящия раздел са представени основните физически закони, свързани с протичането на електрически ток в различни среди и електромеханичното преобразуване на енергията.

## Първа глава

### ОСНОВНИ ЕЛЕКТРИЧЕСКИ И МАГНИТНИ ВЕЛИЧИНИ

#### 1.1. Електрически заряд, ток, напрежение, мощност и енергия

В природата съществуват два вида елементарни частици - електрони и протони, на които е присъщо особено свойство, наречено *електрически заряд*. Приема се, че зарядът на първите е отрицателен, а на вторите - положителен. Протоните, заедно с неутроните (частици със същата маса, но без заряд), образуват ядрото на атомите, а електроните - атомната обвивка, която съдържа същия брой заряди. В резултат на това атомите и молекулите на различните вещества са електронеутрални. За да се разделят положителните и отрицателните заряди е необходимо известно количество енергия (тъй като те се привличат със сила пропорционална на големината на зарядите и обратнопропорционална на квадрата от разстоянието между тях). Всъщност, задълбочените научни изследвания на електрическите явления започват след създаването на първите устройства, в които се създава възможност по химически път да се поддържа на единия електрод излишък от положителни заряди, а на другия - от отрицателни (А. Волта, 1799 г.). Ако указаните електроди се свържат посредством среда, съдържаща свободни заряди, в образувалия се електрически контур протича *ток - насочено движение на електрически заряди*. Ако се приеме, че проводящата среда е метал, свободните носители са електроните. На отрицателния електрод се поддържа излишък от електрони, а на положителния - недостиг, и поради това там остават неуравновесени положителни заряди. По такъв начин се осъществява непрекъснатата циркулация на електроните в контура за сметка на химическата реакция в източника. Прекратяването на реакцията води до прекратяване на протичането на ток. Естествено, колкото е по-голямо количеството заряди, преминаващи през напречното сечение на проводника за единица време, толкова по-голям е токът:

$$i = \frac{q}{t},$$

където  $i$  е ток,  $q$  - количество електрически заряд, а  $t$  - време.

В течностите и газовете съществуват свободни заряди от двата вида и при тях величината  $q$  представлява сума от зарядите с положителен и отрицателен знак. Независимо от това каква е средата, за положителна се приема посоката на движение на положителните заряди - от „плюс“ към „минус“.

В *системата SI* основните единици са: метър,  $m$ , килограм,  $kg$ , секунда,  $s$  и ампер,  $A$ . Чрез тях могат да се определят измервателните единици за всички останали електрически и магнитни величини. От горната формула следва, че

$$q = i \cdot t ,$$

следователно:

$$1A \times 1s = 1C , \text{ (Coulomb - Кулон) .}$$

Това означава, че ако по един проводник тече ток с големина 1 ампер, за 1 секунда през сечението на проводника ще премине заряд 1 кулон (ампер  $\times$  секунда = кулон).

### Пример 1.1:

Намерете тока през електрическа крушка при движение на зарядите с постоянна скорост, ако: **а)** заряд 60 кулона преминава за 4 секунди, **б)** заряд 15 кулона - за 2 минути, **в)**  $10^{22}$  електрона - за 1 час. Зарядът на електрона е:  $-1,602 \cdot 10^{-19} C$ .

**Решение:**

**а)**  $i = \frac{q}{t} = \frac{60C}{4s} = \frac{15C}{s} = 15A$  . (Когато токът е постоянен се използва главна буква  $I$ .);

$$\text{б) } i = \frac{15C}{(2.60)s} = \frac{0,125C}{s} = 0,125A ;$$

$$\text{в) } i = \frac{q}{t} = \frac{(10^{22} \text{ електрона}) \times (-1,602 \cdot 10^{-19} C)}{(1 \times 3600s)} = -0,445 \frac{C}{s} = -0,445A .$$

Енергията  $w$ , която осигурява източникът, за да поддържа преминаването на електрическите заряди  $q$ , е пропорционална на тяхното количество, а работата за пренасяне на единица заряд от единия електрод до другия се нарича *напрежение*,  $u$ :

$$w = q \cdot u$$

или

$$u = \frac{w}{q} .$$

Единицата за електричното напрежение е волт,  $V$ :

$$1V = \frac{1J}{1C} ,$$

т.е. 1 волт = 1 джаул / 1 кулон.

Напрежението може да се изрази още чрез понятието *потенциална разлика*. За да се изясни това понятие може да се използва аналогията с потенциалната енергия: Енергията, необходима да се издигне едно тяло, намиращо се на височина  $h_1$ , до височина  $h_2$ , е равна на разликата от стойностите на потенциалната енергия в двете точки, т.е.  $W = m.g.h_2 - m.g.h_1$ . Ако  $h_1 = 0$ , изразходваната кинетична енергия е равна на потенциалната за  $h_2$ . По аналогичен начин се определя и напрежението като разлика в работата за пренасяне на електрическите заряди до точките, между които то се определя, спрямо произволно избрана точка. Като правило, това е точката, в която потенциалът е равен на нула. Прието е потенциалът на земната повърхност да се счита за нула, т.е. ако една точка от електрическата верига се заземи, нейният потенциал ще бъде нула. Този въпрос е от изключителна важност за безопасността при работа с електрически инсталации.

---

### Пример 1.2:

Пълният заряд на един акумулатор е 50 амперчаса ( $A.h$ ), а напрежението 12 V. Да се определят: а) зарядът на акумулатора в кулони, б) запасената в него енергия в джаули.

### Решение:

$$a) q = 50 A \times 1h = 50 A \times 3600s = 180000 C ;$$

$$b) w = q.u = 180000 C \times 12V = 2160000 J .$$

Ако се използват горните равенства, работата и мощността могат да изразят по следния начин:

$$w = q.u = i.t.u = u.i.t ,$$

и

$$p = \frac{w}{t} = u.i ,$$

където  $p$  е мощността, равна на работата за единица време.

Единицата за мощност е ват,  $W$  :

$$1W = \frac{1J}{1s}$$

или

$$1W = 1V \times 1A = 1VA .$$

---



В представените дотук равенства е в сила предположението, че стойностите на напрежението, тока и мощността са постоянни. В общия случай те се изменят във времето и поради това при изчисляването им трябва да се използват операциите диференциране и интегриране. Например:

$$i = \frac{dq}{dt} ,$$

$$W = \int_{t_1}^{t_2} p \cdot dt = \int_{t_1}^{t_2} u \cdot i \cdot dt \quad \text{и т. н.}$$

## 1.2. Закон на Ом

През 1827 г. немският учен Г. Ом започва да изследва тока в различни метални проводници и зависимостта му от материала и от неговите размери. За да гарантира постоянство на приложеното напрежение, ученият използва вместо химичен елемент две термодвойки, едната от които се намира в топящ се лед, другата - в кипяща вода. За измерването на тока използва уред, основан на взаимодействието на проводници, по които протича ток. В резултат от проведените опити с различни проводници, Ом установява, че токът във веригата е

$$X = \frac{a}{(b + x)}$$

или, ако се използват съвременните общоприети означения:

$$I = \frac{E}{(R_i + R)} ,$$

където  $I$  е постоянен ток,  $E$  - *електродвижещото напрежение* на източника, а  $R_i$  и  $R$  - съответно вътрешното съпротивление на източника и съпротивлението на изследвания образец. Изведената зависимост се нарича *закон на Ом за цялата верига*. Ако се обозначи с  $U$  напрежението върху образца, токът ще бъде

$$I = \frac{U}{R}$$

- това е *законът на Ом за част от веригата*.

От горепосочените формули може да се получи израза

$$E = I(R_i + R) = I \cdot R_i + I \cdot R = I \cdot R_i + U ,$$

$$U = E - I \cdot R_i ,$$

известен като *закон на Ом за генератора*.

От последното равенство се вижда, че електродвижещото напрежение  $E$  представлява напрежението между изводите на източника, когато към него не е включен товар.

Ом установява още, че съпротивлението на образеца, или на *резистора*, може да се определи по формулата

$$R = \rho \frac{l}{S} ,$$

където  $l$  е дължината,  $S$  - сечението на проводника, а величината  $\rho$ , наричана *специфично съпротивление*, зависи от вида на материала. В статията на Г. Ом "Определяне на закона за провеждане на контактното електричество от металите" се дават числени стойности на измерените величини, които обаче не съответстват на съвременните единици от системата SI. Именно в тази система, в чест на откривателя на представения закон единицата за електрично съпротивление е наречена *ом*. Означава се с гръцката буква  $\Omega$ .

От горните формули следва, че когато токът в резистора при напрежение 1 волт е 1 ампер, съпротивлението е 1 ом, т.е.

$$R = \frac{U}{I} = \frac{1V}{1A} = 1\Omega .$$

За специфичното съпротивление се получава

$$\rho = \frac{R.S}{l} = \frac{1\Omega \times 1m^2}{1m} = \Omega.m ,$$

като в практиката понякога се използва и формулата

$$\rho' = \frac{R.S}{l} = \frac{1\Omega \times 1mm^2}{1m} = \frac{\Omega.mm^2}{m} .$$

В много случаи се налага да се отчита влиянието на температурата върху съпротивлението. За целта се въвежда температурен коефициент на съпротивлението,  $a$  и тогава:

$$R = R_0 [1 + a(T - T_0)] ,$$

където  $R_0$  е стойност на  $R$  при начална температура  $T_0$ .

---

### Пример 1.3:

Да се определи: *а)* съпротивлението на меден проводник със сечение  $0,5mm^2$  и дължина  $150m$ , ако е известно специфичното съпротивление на медта  $\rho = 1,72 \cdot 10^{-8} \Omega.m$  (при  $20^\circ C$ ); *б)* как ще се измени съпротивлението на проводника, ако температурата се повиши от  $20$  до  $45^\circ C$  при температу-

рен коефициент на съпротивлението  $\alpha = 0,000393 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  .

**Р е ш е н и е:**

а) съпротивлението на медния проводник ще се определи по дадената по-горе формула

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S} = \frac{(1,72 \cdot 10^{-8} \text{ } \Omega \cdot \text{m}) \times (150 \text{ m})}{0,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 5,16 \text{ } \Omega ;$$

б) съпротивлението на проводника при температура  $45^\circ\text{C}$  ще бъде:

$$R = R_0 [1 + \alpha(T - T_0)] = (5,16 \text{ } \Omega) \cdot [1 + (0,000393 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}) \times (45 - 20) \text{ } ^\circ\text{C}] = 5,21 \text{ } \Omega .$$

---

### 1.3. Магнитно поле. Закон на Ампер

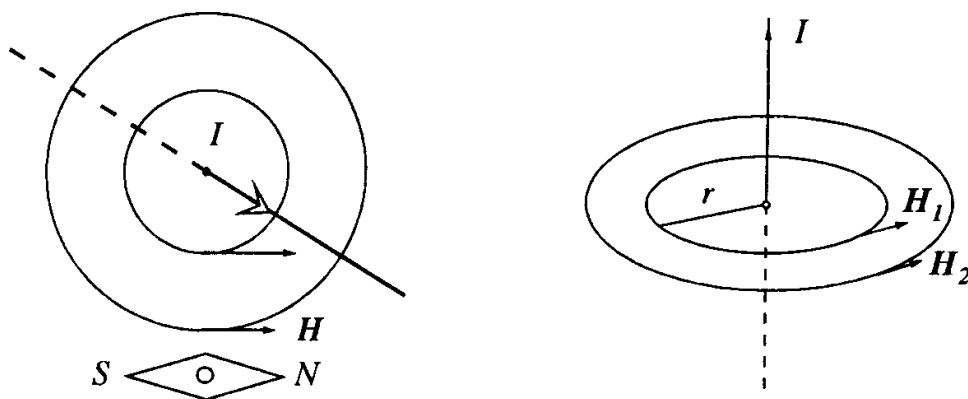
Магнитите явления и явленията, свързани с тях, са били известни още в древността, но решителната стъпка за изучаването им е направена през 1820 г., когато Х. Оерщед установява, че протичащият по проводник ток предизвиква отклонение на магнитната стрелка, разположена в близост до него. Ученият изследва действието на тока при различно взаимно положение на двата елемента и достига до важния извод, че около проводника се създава *вихрово поле*, чиято посока зависи от посоката на тока. Ако между проводника и стрелката се поставят стъкло, метал, смола, вода, дърво, керамика и камък, това не променя взаимодействието между тях (какъв ще бъде резултатът, когато се постави желязо, е обяснено в гл. 2). „Такова предаване на действието не е наблюдавано нито при обикновеното електричество, нито при „волтаичното“ електричество“ - отбелязва Оерщед. Научавайки за проведените опити, А. Ампер решава подробно да изучи това взаимодействие, за да определи силата му. Установява още, че магнитната стрелка може да се замени с втори проводник с ток и изказва предположението, че във всички случаи магнитното поле е резултат от протичането на токове в различни среди - обстоятелство, характерно и за магнитното поле на земята.

През 1825 г. Ампер написва фундаменталния си труд „Електродинамика“, в който анализира магнитното поле и силата на взаимодействието на прави проводници с ток, на кръгови проводници и на соленоиди, като привежда и формули за изчисляването им. Най-важна в случая е формулата за пълния ток

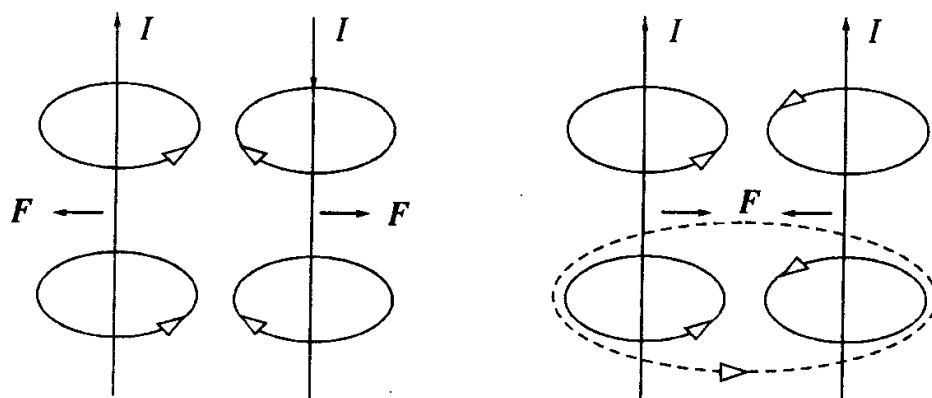
$$\oint_L \mathbf{H} d\mathbf{l} = I ,$$

в която  $H$  е интензитетът (напрегнатостта, силата) на магнитното поле, създавано от тока. Формулата се чете така: циркуляцията на вектора на магнитния интензитет по затворен контур  $L$  се равнява на тока, който пробожда контура.

Интегралът се решава лесно, ако разгледаме кръгов контур в равнина, перпендикулярна на безкрайно дълъг проводник, преминаващ през центъра на кръга (фиг. 1.1).



Фиг. 1.1. Определяне на магнитния интензитет



Фиг. 1.2. Взаимодействие на два проводника с ток

Векторът  $H$  е винаги насочен по допирателната, при което скаларното произведение добива следния вид.  $Hdl = H \cdot dl \cdot \cos(\widehat{H} \widehat{dl}) = H \cdot dl$ . Тъй като  $L = 2\pi r$ , следва:

$$\oint_L Hdl = H \cdot L = H \cdot 2\pi r = I,$$

откъдето

$$H = \frac{I}{2\pi r}.$$

**Посоката на  $H$  се определя по правилото на десния винт спрямо посоката на тока.**

При кръгов ток за  $H$  в центъра на кръга се получава

$$H = \frac{I}{2r} ,$$

а за кръгъл соленоид по неговата ос, при условие, че дължината му е значително по-голяма от радиуса:

$$H = n \cdot I ,$$

където  $n = \frac{N}{l_c}$  е броят на навивките  $N$  на единица дължина на соленоида.

Посочената стойност на  $H$  е приблизително същата за коя да е точка в соленоида, достатъчно отдалечена от неговите краища.

Както следва от горните формули, единицата за интензитет на магнитното поле е  $\frac{A}{m}$  - величина, която зависи само от тока и конфигурацията на системата.

**Силата**, с която се привличат или отблъскват два дълги паралелни проводника (фиг. 1.1), се определя по формулата

$$F = \frac{k \cdot 2(I_1 \cdot I_2) \cdot l}{d} ,$$

където  $k$  е коефициент, зависещ от системата единици,  $I_1$  и  $I_2$  - токовете в двата проводника,  $d$  - разстоянието между тях,  $l$  - участъкът от проводника, за който се изчислява силата. Всъщност, единицата за ток ампер се определя именно чрез тази сила, която трябва да бъде точно  $2 \cdot 10^{-7} \text{ N/m}$  (нютон на метър дължина), при условие, че  $d = 1 \text{ m}$  и по проводниците тече ток 1 А.

---

#### **Пример 1.4:**

Да се определи магнитният интензитет, създаван от прав, кръгъл и безкрайно дълъг проводник в равнината, перпендикулярна на проводника, в зависимост от разстоянието от оста на проводника, ако диаметърът му е  $d$ , а токът  $I$ . Магнитният интензитет да се изчисли на разстояние 2 и 8 mm от оста при условие, че диаметърът е 5 mm, а токът 5 А.

#### **Решение:**

Ако се приложи законът за пълния ток за контур с диаметър, по-голям

от този на проводника, за указаното разстояние  $r = 8 \text{ mm}$  се получава

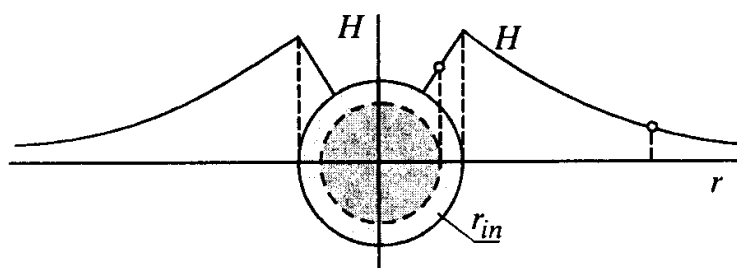
$$H = \frac{I}{2\pi r} = \frac{5}{2\pi \cdot 8 \cdot 10^{-3}} = 99,47 \text{ A/m} .$$

В самия проводник токът, обхващан от контур с радиус  $r_{in}$ , се определя както следва:

$$I_{in} = \frac{I}{\pi d^2 / 4} \cdot \pi \cdot r_{in}^2 = 5 \frac{2^2}{2,5^2} = 3,2 \text{ A} ,$$

а след заместване се получава

$$H_{in} = \frac{I_{in}}{2\pi r_{in}} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 5}{\pi (5 \cdot 10^{-3})^2} = 254,65 \text{ A/m} .$$



Както се вижда от получените формули, в проводника магнитният интензитет  $H$  е правопрпорционален на  $r_{in}$ , а вън от него - обратнопрпорционален на  $r$ . На повърхността на проводника и двете формули дават един и същ резултат.

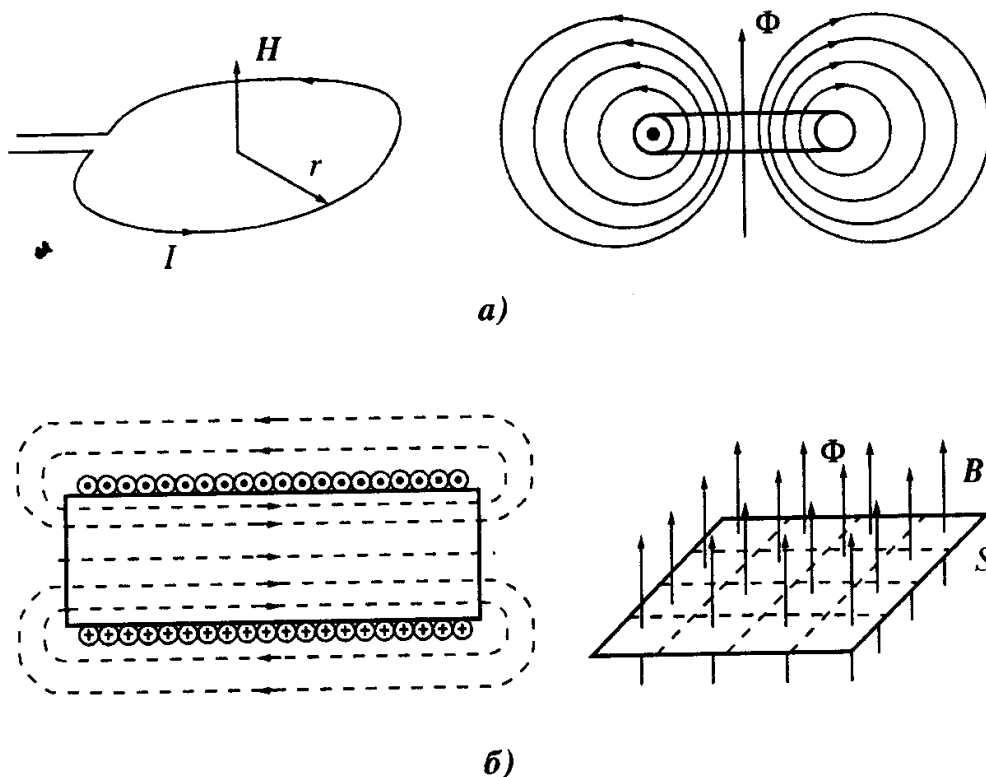
Обикновено задачата за определяне на силите на взаимодействие се свежда до такава, в която е зададено магнитно поле, независимо по какъв начин то се създава, и в това поле присъства проводник, по който тече ток.

В един соленоид например може да се създаде хомогенно магнитно поле, което се изобразява с помощта на паралелни линии, образуващи магнитен поток  $\Phi$ , пробощащ повърхнина  $S$ , разположена перпендикулярно на потока (фиг. 1.3). Тъй като полето е хомогенно, плътността на магнитния поток може да се установи по формулата

$$B = \frac{\Phi}{S} ,$$

или, в общия случай:

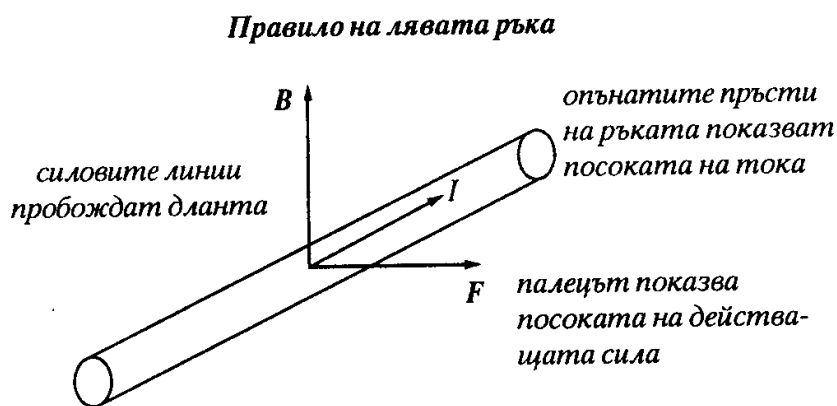
$$B = \frac{d\Phi}{dS}$$



Фиг. 1.3. Магнитен поток и плътност на магнитния поток

Ако в магнитно поле с индукция  $B$  се разположи проводник, по който тече ток  $I$ , както е показано на фиг. 1.4, върху него ще действа сила  $F$ , перпендикулярна на проводника и на  $B$ , и ще има големина  $F = I.l.B$ .

Посоката на  $F$  може да се определи по следното **правило на лявата ръка**:



Фиг. 1.4. Сила, действаща върху проводник с ток

Ако силовите линии на полето пробощдат дланта, а опънатите пръсти сочат посоката на тока в проводника, палецът показва посоката на действащата сила.

В общия случай за част от разглеждания проводник с ток  $I.dl$  в поле  $B$ , си-

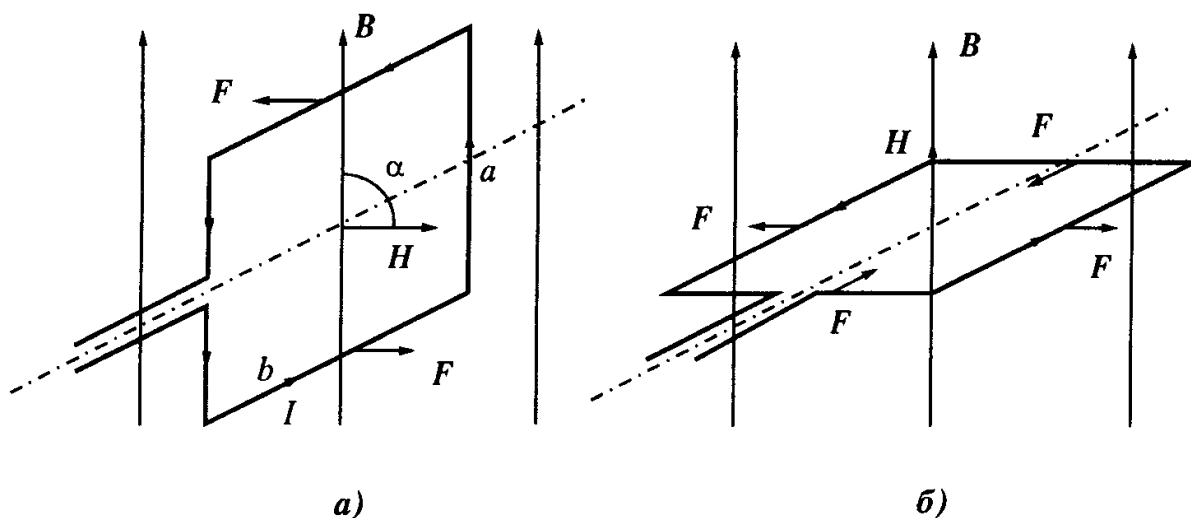


лата, действаща на тази част от него, се определя по формулата, известна като *закон на Ампер*:

$$dF = I.(dl \times B) .$$

В това векторно произведение  $dl$  има посоката на тока и положение, съвпадащо с това на участъка  $dl$ . Въз основа на него е формулирано и правилото на лявата ръка.

Ако се вземе рамка от проводник, по който тече ток, ориентирана както е показано на фиг. 1.5, и се приложи законът на Ампер, се вижда, че електромагнитните сили действат така, че създават въртящ момент, който завърта рамката в положение б, при което моментът е нула, а действащите сили се стремят да деформират рамката.



Фиг. 1.5. Създаване на въртящ момент

Както се вижда от фигурата, в първия случай магнитният интензитет  $H \perp B$  и моментът е максимален, а във втория  $H$  е успореден на  $B$  и моментът е нула, т.е. контурът се държи като магнитна стрелка. Очевидно

$$M = M_{max} \cdot \sin \alpha .$$

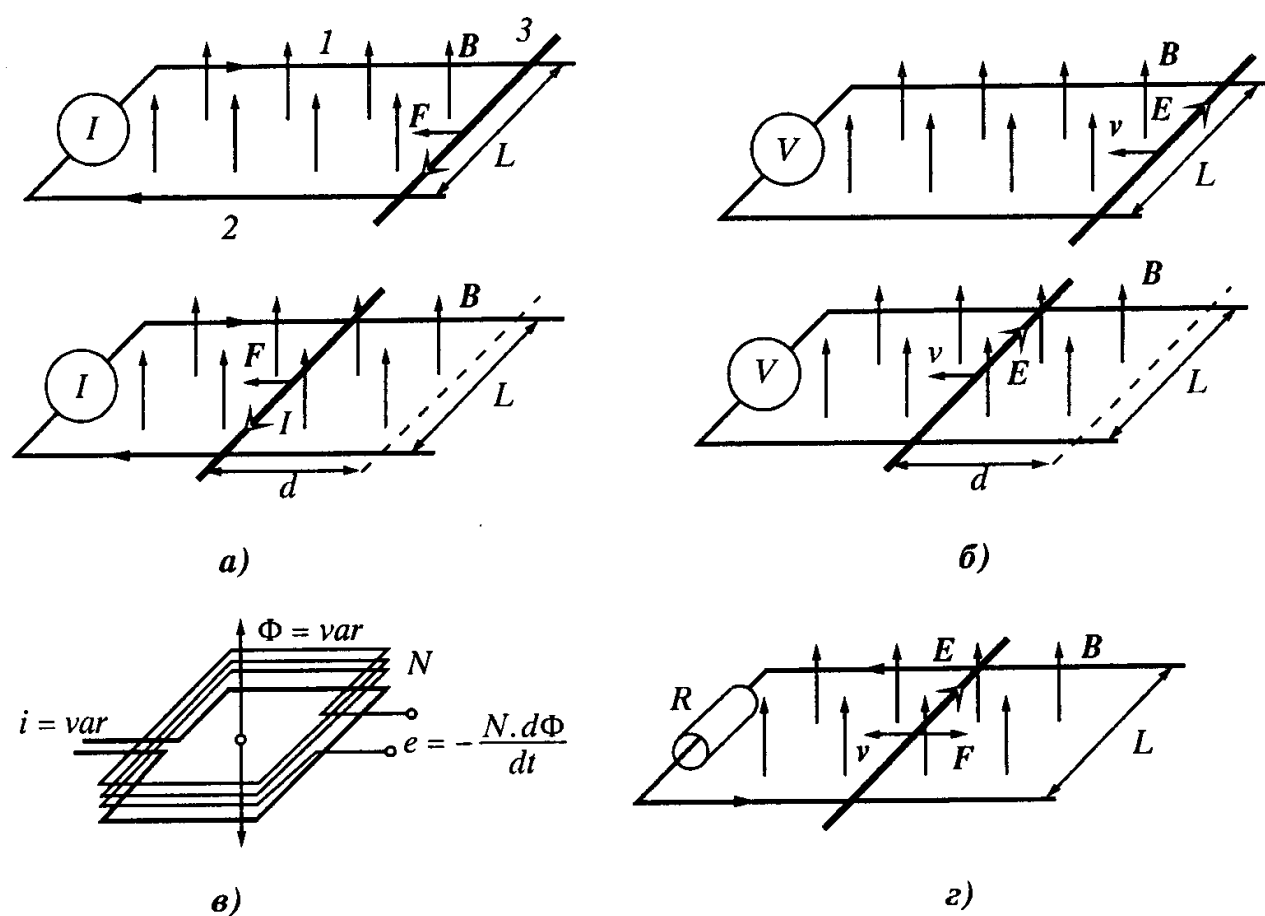
Ако размерите на рамката са  $(a \times b)$ , максималният момент ще се изчисли както следва:

$$M = 2.F.a/2 = 2.I.b.B.a/2 = I.B.S = I\Phi ,$$

където  $S = ab$  е площта на рамката, а  $BS = \Phi$  - магнитният поток я пробожда.

В разгледания случай магнитното поле е неподвижно. Ако то започне да се върти спрямо оста на рамката, последната ще следва полето и ще се върти синхронно с него - това е принципът на действие на синхронния двигател.

Опитната постановка на фиг. 1.6a представлява затворен контур, състоящ се от два прави неподвижни проводника (1, 2) и трети (3) - перпендикулярен на тях, който може да се движи наляво или надясно, и източник на ток  $I$ . Магнитното поле, пробощащо контура, е постоянно. Силата, действаща върху подвижния проводник, съгласно правилото на лявата ръка е насочена наляво и е  $F = I.L.B$ . Такава постановка може да се разглежда като постояннотоков линеен двигател. Движението на проводника ще зависи от големината на проточещата сила, например триенето  $F_{тр}$ . Ако  $F_{тр}$  и електромагнитната сила са равни ( $F = F_{тр}$ ), скоростта ще бъде постоянна, електрическата енергия, преобразувана в механична, ще бъде  $W = F.d$ , а мощността:  $P = F.v$ .



Фиг. 1.6. Създаване на сила и електродвижещо напрежение

Възможно е да възникне въпросът защо не продължава да се използва понятието магнитен интензитет ( $H$ ) за големината на магнитното поле. Причината е следната: Поражданият от тока магнитен интензитет въздейства върху средата, в която се създава, тъй като атомите на някои химически елементи имат свое магнитно поле, което се определя от спина и орбитал-

ното движение на електроните в атомната обвивка. Когато няма външно поле, векторите на магнитния интензитет на тези частици са произволно ориентирани и средата остава магнитно неутрална. При наличие на външно поле те се ориентират по него и го усилват, т.е. към  $H$  се добавя още едно поле -  $J$ , пропорционално, в общия случай, на  $H$ . Векторът  $J$  се нарича вектор на намагнитеност и може да се изрази по следния начин:

$$J = \chi \cdot H .$$

Тогава:

$$B = H + J = H + \chi \cdot H = (1 + \chi) \cdot H = \mu \cdot H ,$$

където  $\chi$  и  $\mu$  са, съответно, магнитната възприемчивост и магнитната проницаемост на материала. Тъй като за по-голямата част от използваните във всекидневния живот материали такова допълнително поле липсва или е много малко, всъщност  $B = H$ . Това равенство е вярно, когато се използва системата единици CGSM. В системата SI има коефициент на пропорционалност  $\mu_0$  (магнитна проницаемост на вакуума, с размерност Н/т (хенри/метър) и с оглед на това изразът добива вида

$$B = \mu_0 \cdot H .$$

В желязото, кобалта, никела и някои сплави допълнителното магнитно поле е голямо и може да превиши това, което го е създадо, стотици и хиляди пъти. Тези материали, наречени феромагнитни, имат изключително важно значение за електротехниката (по-подробно вж. гл. 2). В общия случай

$$B = \mu \cdot H ,$$

където  $\mu = \mu_r \cdot \mu_0$ , а  $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$  е безразмерна величина.

#### 1.4. Закон на Фарадей

След откритията на Оерщед и Ампер, М. Фарадей си задава следния въпрос: Ако токът създава магнитно поле, защо да не е възможно и обратното? Върху дъска той насновава меден проводник с хартиена изолация и над нея поставя друга, със закрепен по същия начин проводник. Когато по единия от проводниците тече постоянен ток, уредът който е свързан към другия проводник, не отчита нищо, освен незначително отклонение при включването и изключването на тока. Същият резултат се наблюдава и при преместването на едната дъска спрямо другата. Днес знаем, че тези отклонения са резултат от индуцирането на електродвижещо напрежение във

втория проводник при изменение на магнитното поле на първия, но на Фарадей са му били необходими около 5 000 опита, за да формулира закона и то във вид, който трудно бихме разбрали. Кратката и изящна формула, която използваме понастоящем, е въведена по-късно от Х. Херц:

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} ,$$

т. е. индуктираното в затворен контур е.д.н. е правопрпорционално на скоростта на изменение на *магнитния поток*  $\Phi$ , който пробощда контура.

Знакът „минус“ във формулата за е.д.н. е въведен по-късно от Х. Ленц и отразява факта, че посоката на индуктираното е.д.н. е такава, че ако  $\Phi$  нараства, то ще създава ток и магнитен поток, който се противопоставя на изменението на външното поле и, обратно, ако полето намалява, ще се стреми да запази неговата стойност. Проявява се един вид електромагнитна инерция.

В закона на Фарадей не е важно по какъв начин се изменя магнитният поток, пробощдащ електрическия контур. Това може да стане чрез изменение на тока, създаващ магнитното поле, или чрез преместване на контура или част от него така, че да се промени потокът, който го пробощда. Първият случай се реализира в електрическите машини (фиг. 1.6б), вторият - в трансформаторите (фиг. 1.6в). На фиг. 1.6б източникът на ток от фиг. 1.6а е заместен с уред за измерване на индуцираното напрежение (волтметър). Магнитното поле, пробощдащо контура, е постоянно. При движение на проводника наляво със скорост  $v = const$  след време  $\Delta t$  изменението на магнитния поток ще бъде  $\Delta\Phi = B \cdot \Delta S = B \cdot l \cdot \Delta x$ , следователно

$$e = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{B \cdot l \cdot \Delta x}{\Delta t} = B \cdot l \cdot v .$$

Посоката на индуктираното е.д.н. се определя по *правилото на дясната ръка*: *Ако силовите линии на полето пробощдат дланта, а палецът показва посоката на движение на проводника, опънатите пръсти указват посоката на е.д.н.* Това правило съответства на вече разгледаното векторно произведение за силата, действаща върху проводник с ток. Там проводникът е неподвижен, а в него в определена посока се движат свободните електрони и силата, действаща върху тях, се проявява като сила, действаща върху проводника.

Физическата същност на е.д.н. може да се обясни по следния начин:

Ако във формулата за силата заместим  $I = \rho_e \cdot S_{np} \cdot v$ , където  $\rho_e$  е плътността на свободните електрически заряди в проводника,  $S_{np}$  - неговото сечение, а  $v$  - скоростта на зарядите, ще се получи

$$dF = I \cdot (dl \times B) = \rho_e \cdot S_{np} \cdot v \cdot (dl \times B) .$$

В този израз посоката на вектора  $d\mathbf{l}$  се определя от посоката на тока в проводника  $3$ , т.е. от посоката на движение на електрическите заряди в него. В разглеждания случай (фиг. 1.6б) тази посока се задава от скоростта  $v$  и, следователно, местата на  $v$  и  $d\mathbf{l}$  могат да се разменят. Сега силата  $d\mathbf{F}$  ще действа върху зарядите в обема  $S_{np} \cdot dl$ . В целия обем те ще бъдат  $q = \rho_e \cdot S_{np} \cdot L$ , а силата  $\mathbf{F} = q \cdot (\mathbf{v} \times \mathbf{B})$ , където  $\mathbf{F}$  представлява електродвижеща сила, насочена по дължината на проводника  $3$  и осигурява движението на зарядите в електрическия контур. При отворена верига зарядите ще се натрупат на изводите „+“ и „-“, и волтметърът ще отчете напрежението между тях, което е равно на  $E$ . Ако волтметърът се замени с резистор  $R$ , през него ще протече ток  $I = E / R$ . Последният взаимодейства с магнитното поле и, от своя страна, създава сила, насочена срещу движението на проводника, т.е. срещу външната сила, преместваща проводника със скорост  $v$ . При равенство на двете сили скоростта е постоянна,  $E$  - също, а генерираната електрическа мощност е  $P = R \cdot I^2 = E \cdot I$ . От друга страна,

$$F \cdot v = B \cdot L \cdot I \cdot v = B \cdot L \cdot v \cdot I = E \cdot I \quad ,$$

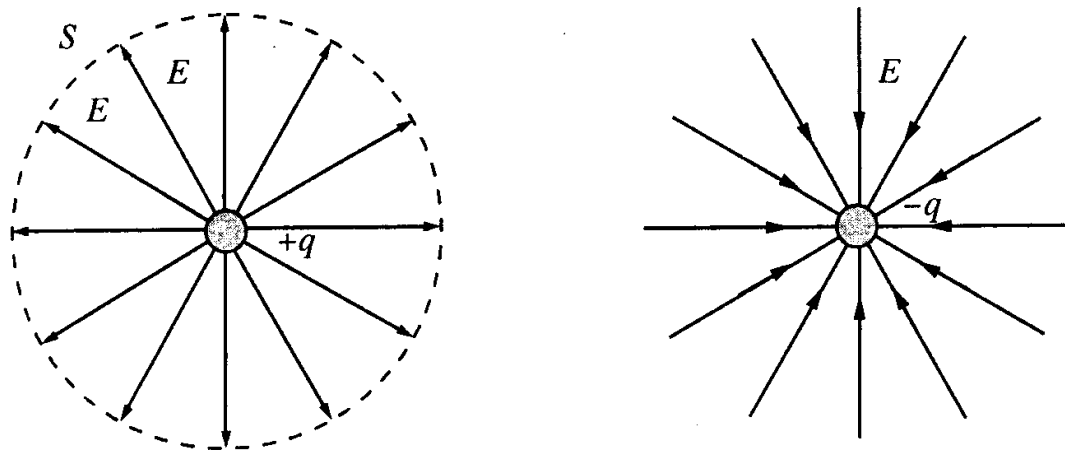
като това равенство илюстрира процеса на преобразуване на механичната мощност в електрическа, и обратно. В раздела „Електрически машини“ този процес е разгледан за конкретни машини.

### 1.5. Електрическо поле

Електрическото поле е изследвано широко и пълно още преди откритието на Оерщедт, но приложението му за решаване на електротехнически задачи настъпва на значително по-късен етап, когато Дж. Максвел съставя системата уравнения, описващи електромагнитното поле.

Ако в миналото е било добре известно, че при триене някои вещества се наелектризират и могат да привличат леки часлици, днес е известна причината - наличие в едното тяло на повече положителни заряди, а в другото - на повече отрицателни. Още през 1785 г. Кулон установява, че силата, с която се привличат или отблъскват две електрически заредени тела, е пропорционална на произведението на двата заряда и обратнопропорционално на квадрата от разстоянието между тях. За описание на електрическото поле се въвежда величината *електрически интензитет*, равен на силата, която действа на единичен заряд. Така както магнитният интензитет се определя от тока в проводника, електрическият се определя чрез големината на заряда. Тъй като обаче силовите линии на електрическото поле са насочени от центъра на заряда към безкрайност или към друг заряд (фиг. 1.7), плът-

ността на потока зависи освен от заряда, и от избраната повърхност  $S$ .



Фиг. 1.7. Силови линии на електрическото поле

Ако се отчитат диелектричните свойства на средата, трябва да се говори за електрическа индукция  $D$ , свързана с електрическия интензитет  $E$  посредством коефициента  $\epsilon$ , наричан *диелектрична проникваемост*:

$$D = \epsilon \cdot E .$$

Оттук

$$E = D / \epsilon ,$$

а във вакуум

$$E = D / \epsilon_0 .$$

Тогаво потокът на вектора  $D$  през затворена повърхност ще бъде

$$\Phi_E = \oint D \cdot dS = q$$

или

$$\oint E \cdot dS = \frac{q}{\epsilon_0} ,$$

като второто равенство се нарича *Теорема на Гаус*.

Интегралът се решава лесно, ако зарядът  $q$  е разположен в центъра на сфера - тогава на нейната повърхност  $E$  ще бъде постоянна величина:

$$\oint E \cdot dS = E \cdot 4\pi r^2 = \frac{q}{\epsilon_0}$$

или

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} .$$

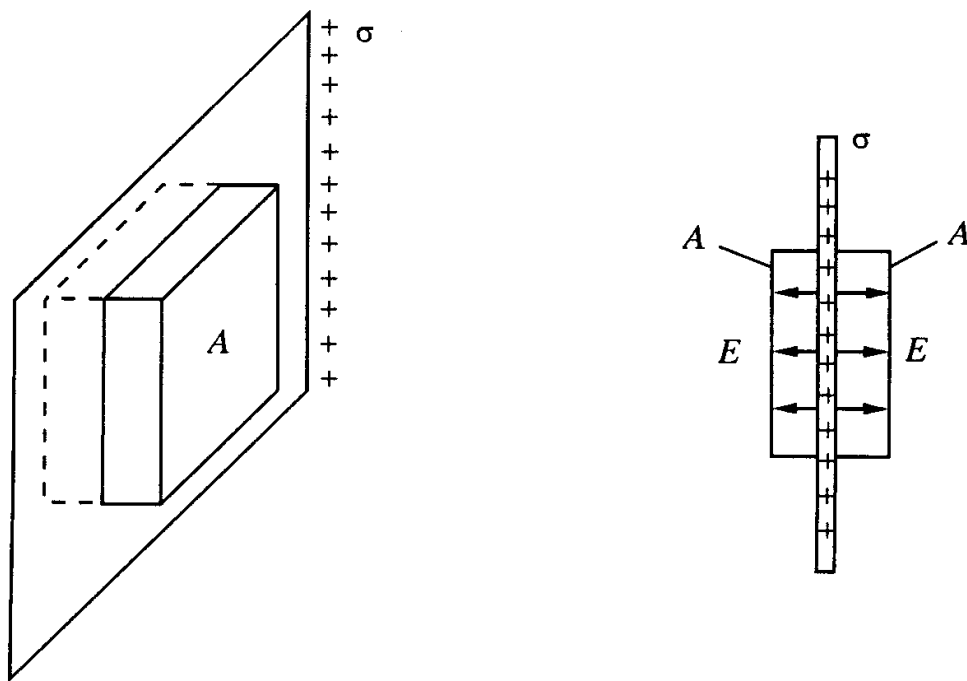
Ако метална пластина с дължина и ширина много по-големи от дебелината ѝ е заредена със заряд  $+q$ , той ще се разпредели равномерно по двете повърхности с плътност  $\sigma$  и силовите линии ще бъдат насочени перпендикулярно на пластината (фиг. 1.7)

Ако се приложи теоремата на Гаус като се използва затворена повърхност с формата на паралелепипед, както е показано на фиг. 1.8, може да се запише:

$$E \cdot A + E \cdot A = \frac{\sigma \cdot A}{\epsilon_0} ,$$

тъй като поток има само през стените, перпендикулярни на  $E$ , а тяхната площ е  $A$ . Следователно

$$E = \frac{\sigma}{2 \cdot \epsilon_0} .$$



**Фиг. 1.8. Определяне на интензитета на електрическото поле на заредена пластина**

Ако две пластини със заряд  $+q$  и  $-q$  са разположени много близо една до друга, на разстояние  $d$  (фиг. 1.9), полето между пластините ще бъде равно на сумата от полетата на лявата и дясната пластина, а от външната страна двете полета взаимно ще се унищожават ( $E_+ \approx E_-$ ).

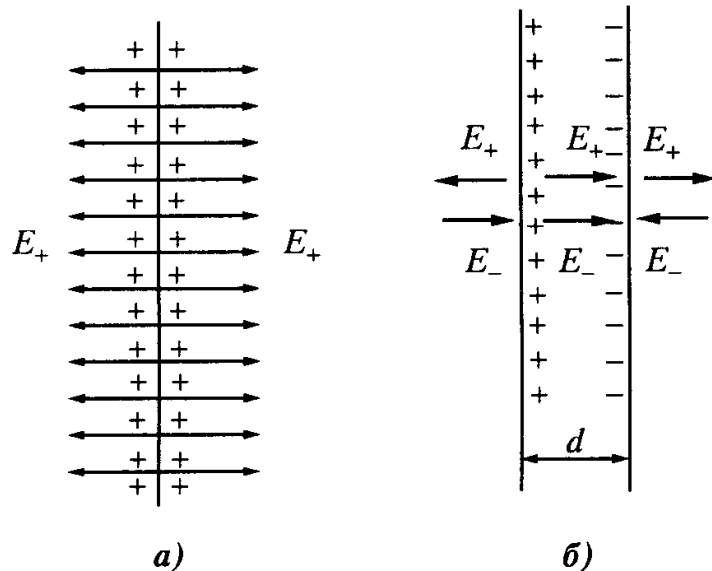
$E_+$  и  $E_-$  се определят посредством теоремата на Гаус, аналогично на



случая с една пластина. Тогава

$$E = E_+ + E_- = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad \text{или} \quad E = \frac{q}{\epsilon_0 A},$$

където  $\sigma = q/A$ .



Фиг. 1.9. Определяне на електрическия интензитет между две пластини

Устройството на фиг. 1.9б представлява кондензатор. Ако свържем този кондензатор с източник на постоянно напрежение  $U$ , например акумулатор, върху пластините ще се натрупат електрически заряди с противоположни знаци, а между тях ще се получи електрическо поле с интензитет  $E$ . Работата за пренасяне на единица заряд от едната пластина до другата в това поле е

$$W(l) = (\text{сила}) \times (\text{път}) = E \cdot d,$$

но, от друга страна, тази работа бе определена в т. 1.1 на настоящата глава още като потенциална разлика или напрежение, т.е.  $W(l) = U$ , следователно  $U = E \cdot d$ , откъдето за  $E$  може да се запише

$$E = \frac{U}{d}.$$

Единицата за интензитет на електрическото поле е  $V/m$ .

При заместване на  $E$  в последното равенство с израза  $\frac{q}{\epsilon_0 \cdot A}$ , получен по-горе, се получава

$$\frac{q}{\epsilon_0 \cdot A} = \frac{U}{d}$$

и

$$q = \left( \epsilon_0 \frac{A}{d} \right) \cdot U = CU,$$

където  $C = \epsilon_0 \frac{A}{d}$  се нарича *капацитет на плоския кондензатор* и показва

количеството заряд, което ще се натрупа в него при напрежение  $1V$ . Единицата за капацитет, както следва от формулата  $C = \frac{q}{U}$ , е фарад:  $\frac{1C}{1V} = 1F$ .

Капацитетът на кондензатора зависи от геометрията и разстоянието между пластините и от вида на диелектрика, разположен между тях.

В кондензатора се запасява енергия във вид на електрическо поле, създавано от електрическите заряди. Тя може да се изчисли по следния начин:

Ако се приеме, че работата за пренасяне на заряд  $dq$  от едната пластина на другата е  $dW = dq \cdot U$ , работата за зареждане на кондензатора със заряд  $q$  ще бъде

$$W = \int_0^q U \cdot dq = \int_0^q \frac{q}{C} \cdot dq = \frac{q^2}{2C}$$

или

$$W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2.$$

Тази работа е равна на енергията, запасена в него. Когато кондензаторът се откачи от източника, той остава зареден. Ако вместо източникът се свърже резистор, през него ще протече ток, при което кондензаторът ще се разрежи и енергията, отделена в резистора, ще бъде равна на запасената в кондензатора.

Очевидно е, че макар през кондензатора да не преминават електрически заряди, при зареждането и разреждането му протича електрически ток, като в първия случай полето между пластините нараства до  $\frac{U}{d}$ , а във втория спада до нула.

---

### Пример 1.5:

Да се определи капацитетът на въздушен кондензатор, който се състои от две паралелни пластини с размери  $1 \times 0,5$  cm, разположени на разстояние  $0,5$  mm. Да се определят: *а)* капацитетът на кондензатора, *б)* електрическото поле между пластините, електрическият заряд върху тях и запасената енергия, ако кондензаторът се свърже с акумулатор  $12$  V.

### Решение:

*а)* за определяне на капацитета се използва формулата  $C = \frac{\epsilon_0 \cdot A}{d}$ , където

то  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$ ,  $A = 1 \cdot 10^{-2} \cdot 0,5 \cdot 10^{-2} = 0,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ ,  $d = 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ :

$$C = \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,5 \cdot 10^{-4}}{0,1 \cdot 10^{-3}} = 4,43 \cdot 10^{-12} \text{ F/m} = 4,43 \text{ pF} \text{ (пикофарада);}$$

б) при захранващо напрежение  $12 \text{ V}$ :

- интензитет на полето:

$$E = \frac{U}{d} = \frac{12 \text{ V}}{0,1 \cdot 10^{-3} \text{ m}} = 120 \cdot 10^3 \text{ V/m}$$

(за сравнение - във въздуха електрическа искра в равномерно поле се получава при интензитет  $3000 \text{ kV/m}$ ),

- електрически заряд:

$$q = C \cdot U = (4,43 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}) \times (12 \text{ V}) = 53,16 \cdot 10^{-12} \text{ C}$$

(може да се определи количеството електрони, натрупани на едната плас-тина на кондензатора) и тъй като зарядът на един електрон е  $1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ , търсеното количество се определя както следва:

$$\frac{53,16 \cdot 10^{-12} \text{ C}}{1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}} = 3,315 \cdot 10^8 \text{ електрона,}$$

- запасена енергия:

$$W = \left(\frac{1}{2}\right) \cdot C \cdot U^2 = \left(\frac{1}{2}\right) \cdot 4,43 \cdot 10^{-12} \cdot 12^2 = 319 \cdot 10^{-12} \text{ J}.$$

## 1.6. Уравнения на Максвел

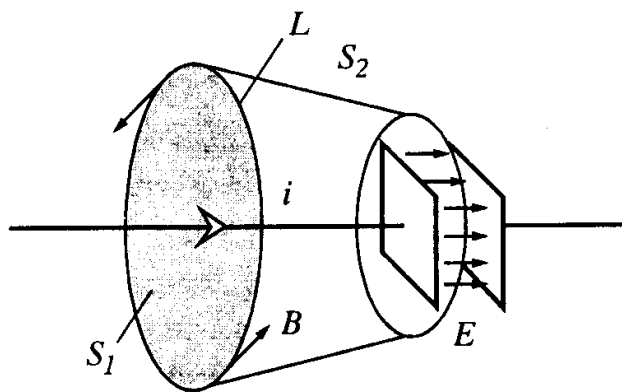
Разгледаните дотук явления са обобщени в уравненията на Максвел и дават пълна картина на електромагнитните процеси (фиг. 1.10).

От уравненията се вижда, че първото от тях представлява теоремата на Гаус, второто - закона на Фарадей, а третото показва, че силовите линии на магнитното поле са винаги затворени.

Уравнение IV е по-особено: Когато по проводника тече постоянен ток, то се преобразува в закон за пълния ток. Ако се разгледа обаче променливотокова верига, съдържаща кондензатор, уравнението може да се приложи и когато повърхността  $S$  преминава между пластините на кондензатора, т.е.

I.	Потокът на електрическия интензитет $E$ през затворена повърхност $S$ $\left( \oint_S E \cdot dS \right)$	=	заряда вътре в нея $\frac{q}{\epsilon_0}$	
II.	Циркулацията на вектора $E$ по затворен контур $C$ $\left( \oint_C E \cdot dl \right)$	= $\frac{d}{dt}$	поток на вектора $B$ през повърхността $S$ , ограничена от контура $C$ $\left( \int_S B \cdot dS \right)$	
III.	Потокът на вектора $B$ през затворена повърхност $S$ $\left( \oint_S B \cdot dS \right)$	= 0		
IV.	$c^2 \times$ Циркулация на вектора $B$ през затворен контур $L$ $\left( \oint_L E \cdot dl \right)$	= $\frac{d}{dt}$	поток на вектора $E$ през повърхността $S$ , ограничена от контура $L$ $\left( \oint_L E \cdot dS \right)$	+
	+		електрически ток, който пробожда $S$ $\frac{\dots}{\epsilon_0}$	

Фиг. 1.10. Уравнения на Максвел



Фиг. 1.11. Илюстрация към уравнение IV

тя се пробожда от вектора  $\frac{dE}{dt}$  (фиг. 1.11). Това е изключително важен резултат, понеже показва, че магнитно поле се създава при изменение на електрическото поле. От друга страна, изменението на магнитното поле (второто уравнение) създава циркулация на електрическото поле, което, от своя страна - на магнитното, и т.н. По този начин се създава електромагнитно

поле, което се разпространява в пространството без да са необходими нито заряди, нито токове - необходим е само източник на поле.

Видимата светлина представлява разпространение на електромагнитни вълни, благодарение на които е възможно съществуването на съвременните комуникации.

В уравнение IV коефициентът  $c$  е скоростта на светлината. Ако се умножат лявата и дясната страна на уравнението по  $\epsilon_0$ , отляво пред интеграла ще се получи коефициент  $c^2 \epsilon_0$ , който всъщност е  $\frac{1}{\mu_0}$ . Този резултат следва от закона за пълния ток, в който се превръща уравнението при липса на кондензатор ( $B = \mu_0 \cdot H$ ) и може да се провери с лекота като се заместят  $c$ ,  $\epsilon_0$  и  $\mu_0$  с техните числени стойности.

### 1.7. Сила на взаимодействие между заредени тела

Тъй като електрическият интензитет представлява сила, действаща с единичен заряд от страна на едно заредено тяло върху друго, не е трудно да се определи, например, силата, с която едната пластина на разгледания в т. 1.6 кондензатор действа върху другата, заредена с противоположен заряд.

Интензитетът на положителната пластина е  $E = \frac{q}{2 \cdot \epsilon_0 \cdot A}$ , а силата, с която

тя привлича отрицателната, е

$$F = -q \cdot E = \frac{-q^2}{2 \cdot \epsilon_0 \cdot A},$$

където знакът „-“ показва, че силата е насочена обратно на вектора  $E$  (привличане).

Същият резултат се получава, ако се използва формулата за запасената в кондензатора енергия. В случая силата на привличане се определя като се вземе производната от енергията по координатата  $x$ , перпендикулярна на пластините, т.е. по пътя на възможното преместване на отрицателно заредената пластина:

$$F = \frac{dW}{dx} = \frac{d}{dx} \left( C \cdot \frac{U^2}{2} \right) .$$

Като се използват вече изведените равенства  $q = C \cdot U$  и  $C = \frac{\epsilon_0 \cdot A}{x}$ , където  $d$  е заменено с  $x$ , след заместване за  $F$  се получава

$$F = \frac{d}{dx} \cdot \left( \frac{q^2}{2 \cdot C} \right) = \frac{d}{dx} \cdot \left( \frac{q^2 x}{2 \cdot \epsilon_0 \cdot A} \right) = \frac{q^2}{2 \cdot \epsilon_0 \cdot A} .$$

### Пример 1.6:

За разгледания в пример 1.5 кондензатор да се определи силата на привличане между двете пластини.

### Решение:

Тъй като  $q = 53,16 \cdot 10^{-12} \text{ C}$ ,  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$ ,  $A = 0,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ ,

$$F = \frac{q^2}{2 \cdot \epsilon_0 \cdot A} = \frac{(53,16 \cdot 10^{-12})^2}{2} \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,5 \cdot 10^{-4} = 3,19 \cdot 10^{-6} \text{ N} .$$

Тази сила е приблизително равна на силата, с която тежест от 0,325 mg действа върху медицински везни.

## В т о р а г л а в а

### ЕЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИ МАТЕРИАЛИ

Предмет на настоящата глава са материалите, които намират приложение в електротехническите устройства. В зависимост от предназначението им, тези устройства съдържат елементи, които трябва да провеждат електрически ток с минимални загуби ( $I^2R \rightarrow \min$ ) - напр. намотките на електрическите машини, линиите за пренасяне на електрическата енергия и др. Материалите, от които се изготвят тези елементи, се наричат *проводници*. Наред с посочените, се използват и елементи, чието предназначение е да изолират електропроводящите части една от друга и устройството като цяло, и да осигурят безопасност при работа с него. Те се изготвят от материали, които не провеждат електрически ток, т.е. имат много голямо електрическо съпротивление, и се наричат *изолатори*. Съществува и група от материали, които заемат междинно положение, наречени *полупроводници* и всички съвременни електронни елементи са изградени на тяхна основа.

През последните години бяха направени и някои важни открития, свързани с материалите, които при ниски температури преминават в свръхпроводящо състояние, т.е. електрическото им съпротивление е нула. Това са т.нар. *свръхпроводници*, които вече имат практическо приложение в някои електрически машини и апарати.

Съществува и група от материали, които са неотделима част от почти всички електромагнитни устройства (електрически машини и апарати, трансформатори и др.) - *магнитни материали*.

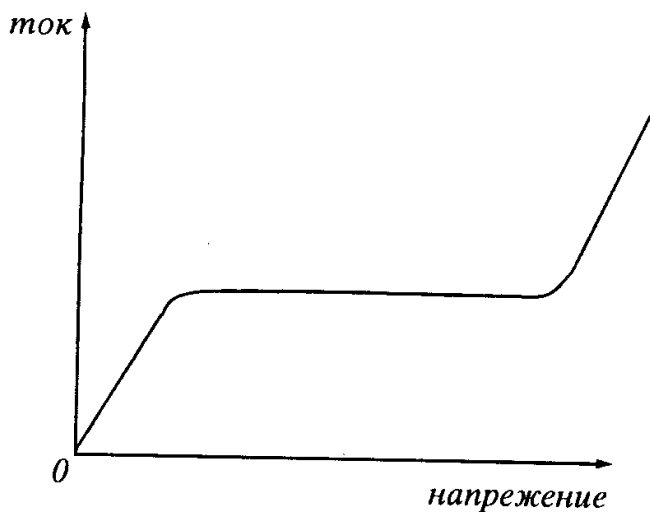
Нека разгледаме накратко физическата природа на *електрическите* и *магнитните* свойства на посочените материали.

#### 2.1. Електрически свойства на газовете

Газовите молекули при нормални условия са електрически неутрални, т.е. не съществуват свободни носители на електрически заряд и, следователно, газовете не провеждат електрически ток. Но ако в газовата среда се въведат електрони, движещи се с висока скорост, те могат да предизвикат йонизация на газовите молекули, при което последните се превръщат в положителни или отрицателни йони. В първия случай молекулата се лишава от един или няколко електрона, а във втория присъединява един или няколко електрона. По такъв начин в газа могат да съществуват едновременно



менно и двата вида заряди. Процесът на йонизация се съпровожда от процес на дейонизация, при което молекулите на газа се възстановяват. При условие че причината за йонизация продължава да действа, в газа се поддържа постоянно количество йони. Ако в един газов обем се създаде електрическо поле като се подаде напрежение към два електрода, електрическият ток ще се изменя, както е показано на фиг. 2.1. Токът ще нараства пропорционално на напрежението, докато в процеса се включат всички свободни заряди. След това токът остава постоянен. При високи напрежения



Фиг. 2.1. Електропроводност на газ в зависимост от напрежението

ния електроните се ускоряват до толкова, че придобитата кинетична енергия е достатъчна да предизвика лавинен процес на йонизация, при който газът се превръща почти изцяло в смес от електрически заряди. Това състояние се нарича *плазма*. Високата енергия на частиците определя и високата температура на плазмата. Когато по време на лятна буря наблюдаваме мълниите, ефектът от протичане на ток в канал, където атмосферният въздух се е превърнал в

плазма, е видим. Същото се наблюдава и при електродъговото заваряване и в електрическите превключватели. Стабилна плазма съществува в атмосферата на звездите, в която температурата е много висока.

Във високите слоеве на земната атмосфера, над 50 km, разределеният въздух е йонизиран във висока степен от космическите лъчи и, образно казано, образува проводяща сфера, която оказва влияние на разпространението на радиовълните.

## 2.2. Електрически свойства на течностите

Чистите течности - дестилирана вода, минерални масла, алкохол и др., не пропускат електрически ток. За протичането му в течности е необходимо наличие на йони, каквито например съдържат водните разтвори на киселините, основите и др. Ако към две пластини, потопени в течността, се приложи напрежение, към пластината, свързана с отрицателния полюс (*катод*), се насочват положителните йони, наречени *катиони*, а към положителния (*анод*) - отрицателните йони, наречени *аниони*. Към първата група се отнасят металните йони и водородният йон, а към втората - йоните на кисе-

линните остатъци и хидроксилните групи.

Протичането на електрически ток през такива течности е съпроводено от явлението *електролиза* - отделяне върху електродите на съставните части на разтворените в течността съединения. На катода положителните йони получават липсващите електрони, а отрицателните отдават излишните на анода. Тези течности се наричат *електролити* и представляват проводници от *втори* род. За разлика от металните проводници (от *първи* род) токът в тях е свързан и с пренос на вещество. Корозията на корабния корпус е пряко свързана с тези процеси, тъй като морската вода е добър електролит, а изработените от различни метали корабни детайли могат да станат причина за възникване на електрически ток в нея, вследствие на различните контактни потенциали на съответните метали.

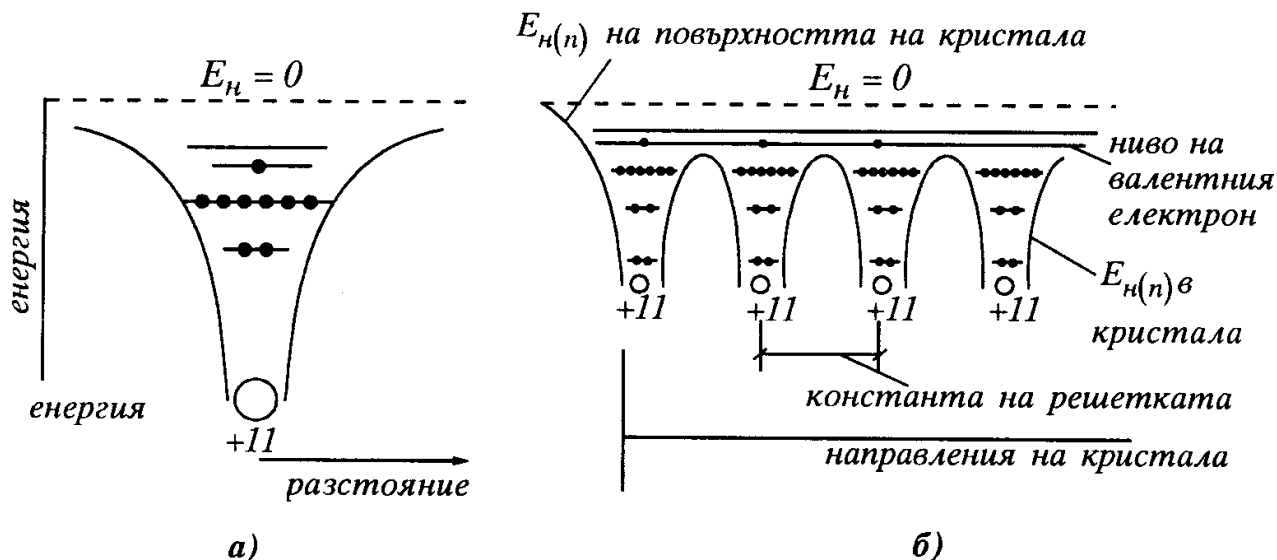
Образуването на йони във водните разтвори (т.нар. процес на електролитна дисоциация) е резултат от действието на полярните молекули на разтворителя. В молекулите на някои вещества е възможно центърът на сумарния отрицателен заряд да не съвпада с центъра на сумарния положителен заряд. Поради това молекулата може да се разглежда като електрически дипол, т.е. елемент, в единият край на който зарядът е положителен, а в другия край - отрицателен. Сумарният заряд, естествено, е нула. Под действието на полярните молекули на разтворителя молекулата на разтвореното вещество може да се разпадне на два йона - натриевият хлорид  $NaCl$  (готварската сол) например образува положителен йон  $Na^+$  и отрицателен йон  $Cl^-$ , т.е. първият се е лишил от валентния си електрон, а вторият е запълнил външната си електронна обвивка.

## 2.3. Електрически свойства на твърдото тяло

### 2.3.1. Метали

Електропроводността на твърдите тела е най-добре да се разгледа като се използват някои понятия на *зонната теория*, изградена на базата на квантовомеханическите представи за строежа на твърдите тела с кристална структура. Нека в началото разгледаме един изолиран атом на натрия, фиг. 2.2а.

В таблицата на Менделеев натрият е под номер 11, което означава, че има 11 протона в ядрото и 11 електрона в електронната си обвивка. Те образуват стабилна електронеутрална система. Електроните са разположени в няколко слоя, съгласно принципа на Паули. Най-слаба е връзката с ядрото на последния електрон, наречен валентен електрон. Електроните са разположени като в „потенциална яма“ и най-малко енергия е необходима за извеждане от нея на последния, валентния електрон. Именно от него зависят химическите, електрическите и оптичните свойства на натрия. Останалите електрони са достатъчно дълбоко в потенциалната яма и не могат да участ-



Фиг. 2.2. Създаване на свободни заряди при подреждане на атомите на натрия в едномерна решетка

ват в топлинни, оптични и други процеси. При подреждане на атомите в кристалната решетка (на фиг. 2.2б е показана едномерна решетка) максимумите на потенциалната енергия, вследствие влиянието на съседните атоми намаляват и валентните електрони се оказват извън потенциалните ями. Това означава, че те вече не са свързани със съответния атом, а могат свободно да се движат в кристала под действието на електрическо поле. На представената опростена схема е показано само едно ниво, на което са разположени всички валентни електрони. В действителност то се разслюва на толкова нива, колкото са атомите в кристала и на практика образува енергетична зона (оттук и понятието *зонна теория*). По подобен начин се създават свободни заряди и в кристалите на другите метали.

Специфичното съпротивление на металите зависи от количеството свободни електрони и скоростта на насоченото им движение,  $v$  при наличие на електрическо поле,  $E$ . Тази скорост е незначителна вследствие хаотичното движение на електроните в кристала и сблъсъка с атомите, при което след всеки удар ускоряването започва от нула. Тя е от порядъка на  $10^{-2} \text{ cm/s}$ . При увеличаване на температурата нараства скоростта на хаотичното движение на атомите, при което дължината на свободния пробег се ограничава обратнопропорционално на абсолютната температура. Това води до намаляване на времето за ускоряване на електроните под действие на електрическото поле и, следователно, до намаляване на средната скорост. А това означава увеличаване на специфичното съпротивление на проводника,  $\rho$  и обяснява дадената в гл. 1 формула. При снижаване на температурата топлинното движение на атомите отслабва, дължината на свободния пробег нараства и съп-

ротивлението намалява. При много ниски температури от порядъка на няколко келвина някои метали преминават в свръхпроводящо състояние, т.е. електроните могат да преминават по проводника, без да срещат съпротивление.

---

### Пример 2.1:

Даден е проводник с дължина  $1\text{ m}$  и диаметър на сечението  $2\text{ mm}$ . Броят на свободните електрони в единица обем от материала е  $10^{29}$  на  $\text{m}^3$ . Да се определи токът в проводника, ако скоростта на движението на електроните под действието на приложеното електрическо поле е  $19,9 \cdot 10^{-6}\text{ m/s}$ .

### Решение:

Токът се определя като количество електрически заряд  $q$ , което преминава за време от една секунда през сечението на проводника. Ако се сравнят електрическите заряди в кристалната решетка с електронен газ с определена плътност  $N/\text{m}^3$ , за единица време през сечението на проводника ще премине обем  $(\pi d^2/4) \cdot v = (\pi \cdot 0,002^2/4) \cdot 19,9 \cdot 10^{-6} = 0,625 \cdot 10^{-10}\text{ m}^3/\text{s}$ . Броят на преминалите за  $1\text{ s}$  електрони ще бъде:  $0,625 \cdot 10^{-10} \cdot 10^{29} = 0,625 \cdot 10^{19}$ , а пълният заряд:  $0,625 \cdot 10^{19} \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} = 1\text{ C/s} = 1\text{ A}$ .

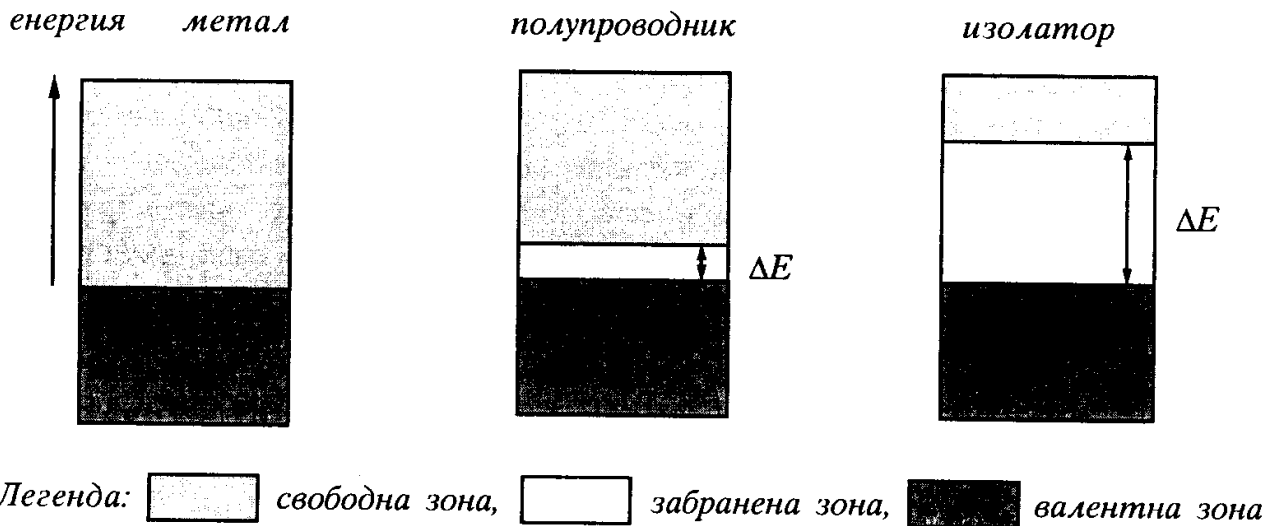
---

### 2.3.2. Полупроводници

Съществува група вещества, в които при подреждането на атомите в кристалната решетка валентните електрони участват в междуатомните връзки и за да станат свободни, е необходимо да получат допълнителна енергия с точно определена стойност, т.е. в скалата на енергията съществува забранена зона (фиг. 2.3). Ширината на зоната за типичните в тази група материали  $\text{Si}$  (силиций) и  $\text{Ge}$  (германий) е, съответно,  $1,12$  и  $0,67\text{ eV}$ . (Предвид формулата за енергията  $w = q \cdot u$  или  $1\text{ J} = 1\text{ C} \cdot 1\text{ V}$  и като се знае, че зарядът на електрона е  $1,602 \cdot 10^{-19}\text{ C}$ , става ясно, че величината  $1\text{ eV}$  е  $1/1,602 \cdot 10^{-19}$  пъти по-малка от  $1\text{ J}$ ).

При температури, близки до абсолютната нула, всички електрони са във валентната зона. С повишаването на температурата някои валентни електрони получават допълнителна енергия, вследствие на което могат да преминат забранената зона и, оказали се в свободната зона, да участват в електропроводимостта. Този тип проводимост се нарича *собствена*.

Възбуждането на електроните и преминаването им в свободната зона



Фиг. 2.3. Енергийни зони в твърдото тяло

се съпровожда и от обратния процес - връщане на някои от тях във валентната зона, наречен рекомбинация. При излизане на един електрон в свободната зона съответният атом се превръща в положителен йон, иначе казано, на мястото на електрона остава „дупка“, която се разглежда като положителен заряд с големина, равна на тази на електрона. При определена температура се установява равновесие между процесите на възбуждане и рекомбинация и концентрацията на свободните електрони е постоянна. При стайна температура концентрацията е значително по-ниска от тази на металите, поради което разглежданите материали се наричат *полупроводници*.

Както следва от гореизложеното, в полупроводниците с увеличаване на температурата електрическото съпротивление намалява, което съответства на увеличаването на концентрацията на свободните носители пропорционално на  $\exp\left(\frac{\Delta E}{2kT}\right)$ , където  $\Delta E$  е ширината на забранената зона. В същото време подвижността на носителите се променя слабо и почти не влияе на съпротивлението.

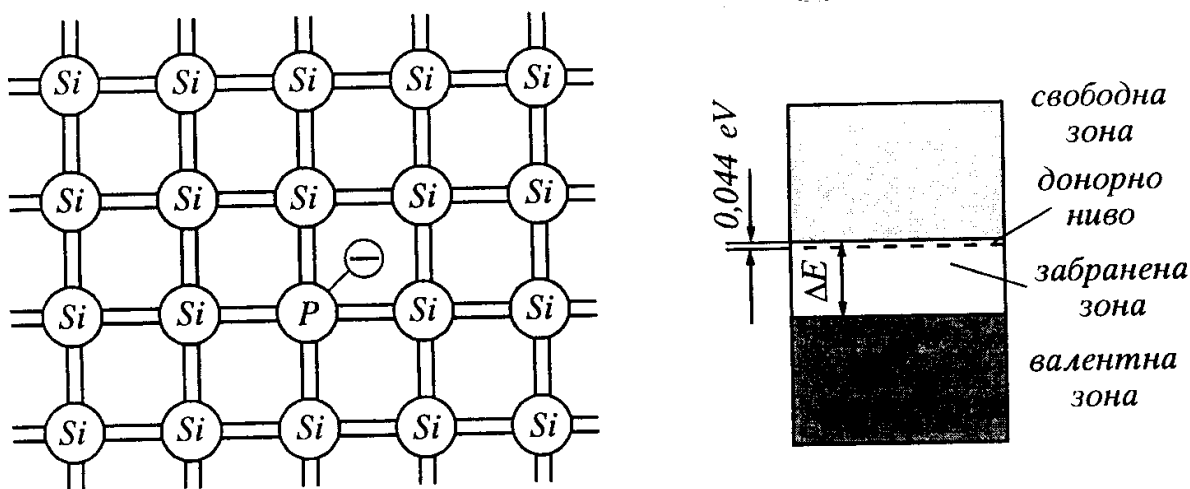
Собствената проводимост се проявява осезаемо при температури около  $75 \div 85 \text{ }^\circ\text{C}$  за *Ge* и  $150 \div 170 \text{ }^\circ\text{C}$  за *Si*.

Върху електрическата проводимост на полупроводника оказват влияние също и дефектите на кристалната решетка, и наличието на различни примеси.

Това, което прави полупроводниците незаменими за съвременната електроника, е проводимостта, обусловена именно от наличието на примесни атоми на елементите от трета и пета валентност.

Ако мястото на един атом *Si* се заеме от атом на фосфора (*P*), който е от пета валентност, четири от валентните електрони ще участват в между-

атомните връзки, а петият ще се окаже излишен и лесно може да стане свободен (фиг. 2.4). Наличието на такива примесни атоми създава допълнително енергетично ниво, разположено близо до тавана на забранената зона. Примесите от разглеждания тип се наричат *донори*, а нивото *донорно*. Енергията за преминаване от това ниво в свободната зона е малка - за внедрения в силициевия кристал фосфор тя е  $0,044 \text{ eV}$ . Количеството на примесните атоми обикновено е от порядъка на  $10^{15} - 10^{16} \text{ атома}/1 \text{ cm}^3$  и с тяхното увеличаване примесното ниво се доближава до свободната зона, като в крайна сметка може да се слее с нея. Свойствата на такива материали се доближават до тези на металите и затова се наричат полуметали.

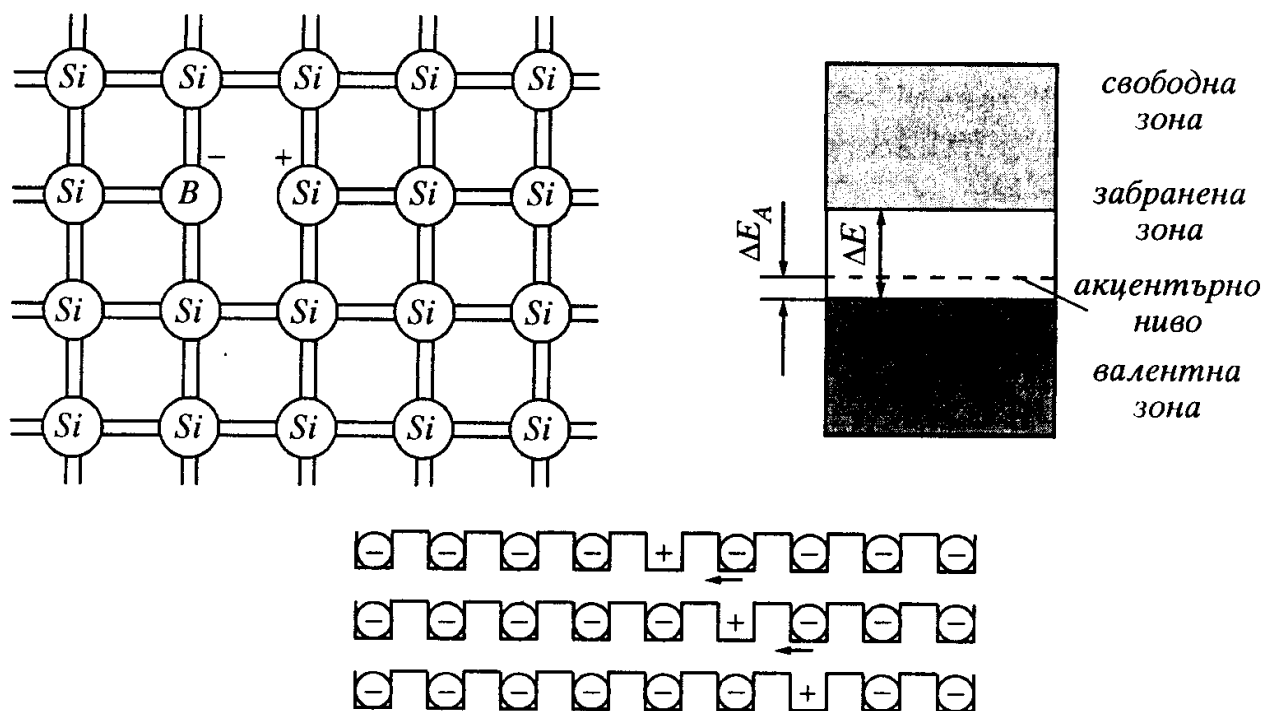


Фиг. 2.4. Влияние на акцепторните примеси

При стайни температури количеството на собствените носители в силиция е от порядъка на  $10^{10}$  в  $1 \text{ cm}^3$ , което означава, че свойствата на полупроводника ще се определят от примесите.

Тъй като в разглеждания материал основни носители са електроните, които са частици с отрицателен (negative) заряд, проводимостта се нарича електронна, т.е. от n-тип, носителите са от n-тип, както и полупроводникът.

При заместване на атом в кристалната решетка на силиция с атом от трета валентност, например *In* (индий) или *B* (бор), се получава недостиг от един електрон, за да се окомплектува една от четирите атомни връзки със съседните атоми. В тази ситуация е възможно преминаване на електрон от съседен атом, при което примесният атом се превръща в отрицателен йон. Този електрон се локализира на енергетично ниво близо до дъното на забранената зона и не участва в електропроводимостта. В същото време обаче, съседният атом остава без електрон и се превръща в положителен йон. Образува се „дупка“. Тя може да бъде запълнена с друг електрон от следващия атом, при което се образува нова дупка.



Фиг. 2.5. Влияние на донорните примеси

Както се вижда от фиг. 2.5, преместването на дупката всъщност представлява движение на един положителен заряд в посока, обратна на тази на отрицателните заряди. В този случай примесните атоми (наречени *акцептори*) генерират съответното количество дупки, които определят проводимостта на материала, т.е. тя е „дупчеста“ или p-проводимост (positive).

Електропроводимостта на примесните полупроводници се обуславя от два фактора: концентрацията на свободните носители на заряд (електрони или дупки) и тяхната *подвижност*, т.е. скоростта, с която те се движат под действието на електрическо поле с интензитет  $1 \text{ V/m}$  в полупроводника.

Подвижността на носителите в полупроводниците значително се различава от тази в металите. В металите, където концентрацията на свободните електрони е много по-голяма от тази в полупроводниците, те могат да се разглеждат като електронен газ, в който скоростта на топлинното движение на електроните многократно превишава скоростта на дрейфа под действие на електрическо поле. В полупроводниците тази концентрация е значително по-малка и дрейфовата скорост може да достигне големи стойности. Това се обяснява с по-силно изразените квантовомеханически свойства на процесите в полупроводниците. При стайна температура и концентрации от  $10^{13}$  до  $10^{16} \text{ атома/cm}^3$  подвижността се изменя незначително и има стойности  $1200 - 1400 \text{ cm}^2/\text{V.s}$  за електроните и  $400 - 500 \text{ cm}^2/\text{V.s}$  - за дупките. (Записът



на означението  $cm^2/V.s$  може да има и вида  $(cm/s) / (V/cm)$ , който съответства на даденото по-горе определение за подвижността.) При увеличаване на концентрацията тя бързо спада.

Подвижността на носителите има важно значение за бързодействието на полупроводниковите елементи в схемите за обработка на високочестотни сигнали.

Полупроводниковите материали са основата, на която са изградени електронните полупроводникови прибори - диоди, транзистори тиристорни и др. Принципът им на действие, устройство и характеристики са представени в гл. 6.

Освен силиция и германия, към полупроводниковите материали се отнасят и други химически елементи и съединения, кристалната структура на които обуславя наличието на забранена зона с ширина, непревишаваща 3 eV. Тази граница е условна. Веществата с по-широка забранена зона и запълнена валентна зона, са изолатори или диелектрици (вж. т. 2.4.3).

Полупроводниковите материали могат да се използват още като датчици за температура, механични деформации, магнитно поле (ефект на Хол), светлинен поток и др., които се основават на зависимостта на електрическата проводимост на полупроводника от посочените фактори.

### 2.3.3. Изолатори

Съществуват химически елементи и вещества с кристална структура, която обуславя широка забранена зона в енергийната диаграма (фиг. 2.2). Забранената им зона превишава 3 eV и в някои материали достига 8 eV. Това означава, че при нормална (стайна) температура няма свободни носители на заряд, тъй като енергията, необходима за преминаване на забранената зона, е много голяма. Следователно, при прилагане на напрежение към образец от такъв материал през него не протича ток. По тази причина разглежданите вещества се наричат изолатори и играят изключително важна роля в електротехническите устройства. Към тяхната група принадлежат кварцът, диамантът, слюдата, керамичните материали (поликристална структура) и др., както и немалко вещества с аморфна структура - стъкла, пластмаси и др.

При определени условия, обаче, протичането на ток през изолатора е възможно. Например при по-висока температура, при наличие на дефекти и примеси в структурата на материала може да се появят свободни носители на заряд. Наличието на относително високо напрежение може да доведе до локално прегряване и пробив в изолатора, където има участъци с по-голяма концентрация на дефекти и примеси. Друга причина за протичане на ток са някои повърхностни явления като замърсяване, намокряне със солена вода

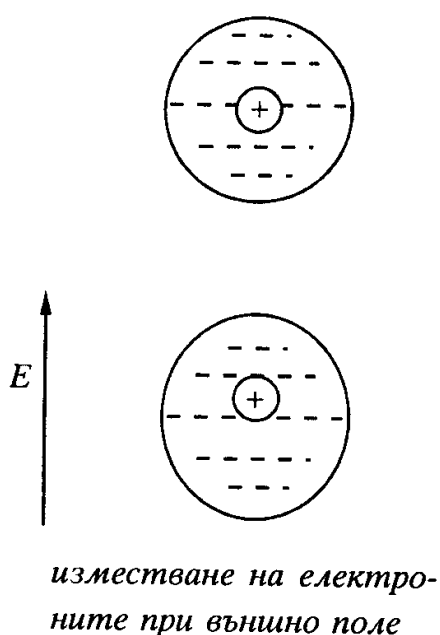
и др. Старееето на материалите също може да бъде причина за влошаване на изолационните свойства.

Това, че изолаторите не провеждат електрически ток, не означава, че те не реагират на действащо върху тях електрическо поле.

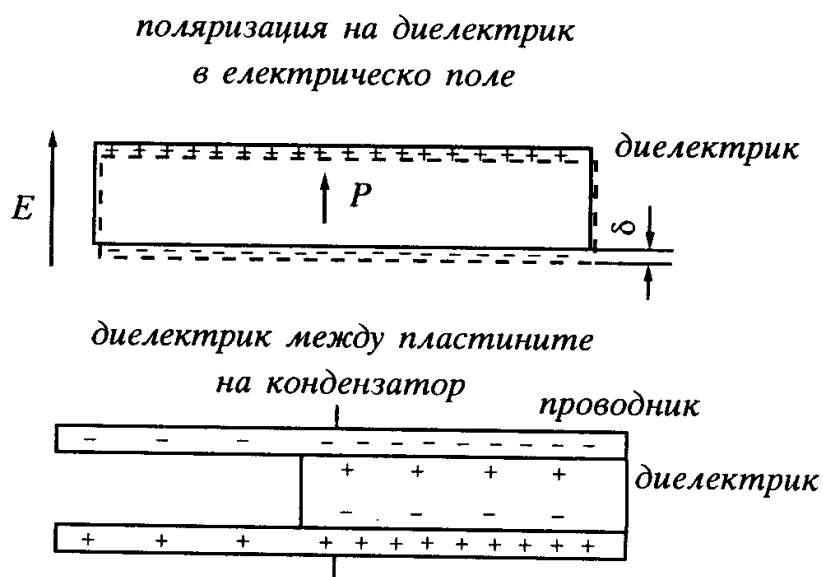
В един атом с равен брой положителни и отрицателни заряди под действието на електрическо поле става относително изместване на центъра на положителните заряди (+q) спрямо центъра на отрицателните заряди (-q) на разстояние  $\delta$  (фиг. 2.6) Това води до поляризация на атома и на средата, като цяло, и се оценява чрез *вектора на поляризация*:

$$P = N \cdot q_a \cdot \delta$$

където  $N$  е броят на атомите в единица обем,  $q_a$  - положителният или отрицателен заряд на един атом.



Фиг. 2.6. Поляризация на атома



Фиг. 2.7. Поляризация на диелектрик

Степента на поляризация е пропорционална на външното поле и се определя от  $\delta$ . Тя характеризира *диелектричните свойства* на разглежданите материали, които се наричат още *диелектрици*.

Ако се вземе пластина от диелектрик и се постави в електрическо поле  $E$ , вследствие поляризацията на двете повърхности (горе и долу) ще се получи зареден повърхностен слой с дебелина  $\delta$  и повърхностна плътност на т.нар. свързан (несвободен) заряд  $\sigma_{свър}$ . Ако площта на пластината е  $A$ ,

общият заряд на повърхността ще бъде

$$\sigma_{\text{свър.}} A = N \cdot q_a \cdot \delta \cdot A,$$

т.е.

$$\sigma_{\text{свър.}} = N \cdot q_a \cdot \delta$$

или

$$\sigma_{\text{свър.}} A = P$$

Векторът на поляризация има стойност, равна на повърхностния заряд, и вътре в диелектрика е насочен от „-“ към „+“. Неговата стойност може да се запише още както следва:

$$P = \vartheta \cdot \epsilon_0 \cdot E,$$

където  $\vartheta$  е коефициент на пропорционалност и се нарича диелектрична възприемчивост.

Ако между пластините на кондензатор, между които съществува поле  $E$  (фиг. 2.7), създадено от свободни заряди с повърхностна плътност  $\sigma_{\text{своб}}$ , се разположи диелектрик, последният ще се поляризира и резултантният заряд например при долната пластина ще стане:  $\sigma_{\text{своб}} - \sigma_{\text{свър}} = \sigma_{\text{своб}} - P$ .

Следователно

$$E = \frac{(\sigma_{\text{своб}} - P)}{\epsilon_0},$$

или

$$E = \frac{\sigma_{\text{своб}}}{\epsilon_0(1 + \vartheta)}.$$

Последното равенство показва, че полето в диелектрика в сравнение с това във вакуум се намалява  $(1 + \vartheta)$  пъти. Всъщност изразът  $1 + \vartheta = \epsilon_r$  представлява относителната диелектрична проницаемост на материала. Практическата ценност на този резултат е свързана с капацитета на кондензатора. Ако кондензаторът отначало се зареди като се свърже с източник на постоянно напрежение  $U$ , а след това се откачи и между пластините се постави диелектрик, това ще доведе до намаляване на свободния заряд на пластините и, съответно, до намаляване на  $E$  и напрежението между тях ( $U = E \cdot d$ ). При условие че кондензаторът остане включен, след поставяне на диелектрик ще се осъществи дозаредяване, за да се осигури условието  $U = E \cdot d$ . Това означава, че в кондензатора ще се акумулира  $\epsilon_r$  пъти по-голям заряд. Ако се повторят разсъжденията, довели до получаването на формулата за  $C$  (вж.

т. 1.2), но с тази разлика, че тук  $E = \frac{\sigma_{своб}}{\epsilon_r \epsilon_0}$ , се получава:

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 \cdot A}{d} .$$

---

### Пример 2.2:

Да се определи капацитетът на кондензатор, който се състои от две паралелни пластини с размери  $1 \times 0,5 \text{ cm}$ , разположени на разстояние  $0,5 \text{ mm}$ , ако между пластините има диелектричен слой от: а) кварцово стъкло, б) слюда, в) керамика. Относителната диелектрична проникваемост  $\epsilon_r$  на материалите е, съответно: 3,8; 6; 7 200.

### Решение:

За определянето на капацитета се използва формулата  $C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 \cdot A}{d}$ , където

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{F}{m}, \quad A = 1 \cdot 10^{-2} \cdot 0,5 \cdot 10^{-2} = 0,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2, \quad d = 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ m} .$$

а) кварцово стъкло:

$$C = \frac{3,8 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,5 \cdot 10^{-4}}{0,1 \cdot 10^{-3}} = \frac{16,83 \cdot 10^{-12} \cdot F}{m} = 16,83 \text{ pF (пикофарада)},$$

б) слюда:

$$C = \frac{6 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,5 \cdot 10^{-4}}{0,1 \cdot 10^{-3}} = \frac{26,58 \cdot 10^{-12} \cdot F}{m} = 26,58 \text{ pF} ,$$

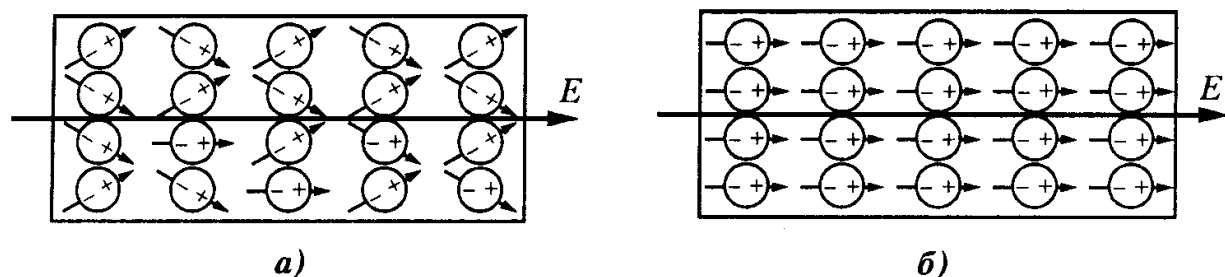
в) керамика:

$$C = \frac{7200 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,5 \cdot 10^{-4}}{0,1 \cdot 10^{-3}} = \frac{31,9 \cdot 10^{-9} \cdot F}{m} = 31,9 \text{ nF (нанофарада)} .$$

---

Подобно на разгледаната задача за въздушен кондензатор със същите размери, при зададеното напрежение могат да се изчислят заряда и натрупаната в кондензатора енергия, които ще се окажат  $\epsilon_r$  пъти по-големи.

Съществуват т.нар. полярни диелектрици, в които молекулите имат диелектричен момент, вследствие несиметрията в строежа им. Това е характерно за някои течности, например вода, минерално масло и др. Когато върху такава течност не действа външно електрическо поле, диполните моменти взаимно се компенсират и течността е електрически неутрална. При прилагане на външно поле диполите се ориентират по него (фиг. 2.8а).



Фиг. 2.8. Полярни диелектрици

Съществува и група диелектрици с кристална структура, в които има области на спонтанна поляризация. Те са наречени *електрически домени*. В тях, поради особеностите на структурата, се образува много силно електрическо поле, но независимо от това материалът остава електронейтрален, поради хаотичното разположение на векторите на поляризация на отделните области. При прилагане на външно поле тези вектори се ориентират в различна степен спрямо него (в действителност се преместват границите на електрическите домени, като тези със същата ориентация нарастват, други я променят, а трети изчезват). Такива материали се наричат *сегнетоелектрически*, по наименованието на веществото, в което за пръв път са установени посочените свойства - сегнетовата сол ( $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ). Друг представител на тази група е бариевият титанат ( $\text{BaTiO}_3$ ). В английската литература те се наричат *фероелектрически*, поради аналогията им с феромагнитните материали.

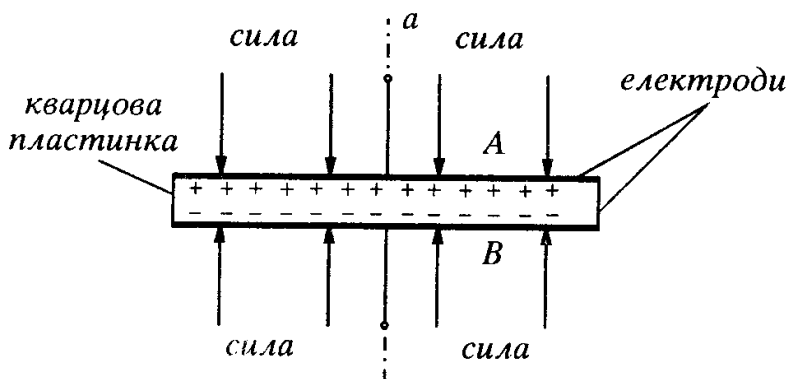
Описаните свойства се проявяват в определен температурен диапазон. Температурата, при която изчезват, се нарича температура на Кюри или точка на Кюри. По-важна е горната граница, която за сегнетовата сол е  $22,5^\circ\text{C}$ , а за бариевия титанат -  $125^\circ\text{C}$ . Над точката на Кюри тези вещества се превръщат в обикновени диелектрици.

Някои кристали (в т.ч. всички сегнетоелектрически) при деформация се поляризират. Явлението се нарича *прав пиезоелектрически ефект* или *пиезоефект*. Ако на пластинка, изрязана от кварцов кристал (фиг. 2.9) под точно определен ъгъл спрямо кристалографските оси, се металлизират двете повърхности *A* и *B*, при деформация на пластинката по оста *a* на електродите *A* и *B* ще се появи електрически заряд, който може да се определи по форму-

лата:

$$q = d_{11} \cdot F \quad ,$$

където  $d_{11}$  е пиезоконстанта на материала, а  $F$  - сила. За кварца  $d_{11}$  има стойност  $2,31 \cdot 10^{-12} \text{ C/N}$ , за бариевия титанат:  $190 \cdot 10^{-12} \text{ C/N}$ , а за материала PZT-4(5):  $289 (374) \cdot 10^{-12} \text{ C/N}$ .



Фиг. 2.9. Пиезоефект

Пиезоефектът се използва в практиката за измерване на деформации, предимно периодични, тъй като при статични деформации електрическият заряд не може да се задържи дълго на електродите.

Описаният процес е обратим, т.е. при подаване на електрическо напрежение към пиезопластинката

тя се деформира - явлението се нарича *обратен пиезоефект*. Следователно, при подаване на променливо напрежение на електродите повърхностите A и B ще трептят с честотата на приложеното напрежение.

Правият и обратният пиезоефекти са в основата на ултразвуковата техника и хидроакустиката. Една и съща пластинка може да се използва като излъчвател на механични трептения (ултразвукови вълни), които във водата се разпространяват със скорост  $1500 \text{ m/s}$ , и като приемник на отразените от някаква преграда вълни. Ако се измери времето от момента на излъчването до момента на приемането на отразения ултразвуков сигнал, може да се определи разстоянието до даден обект (хидролокация).

Изключително важно значение за съвременната електроника имат кварцовите резонатори. Ако към електродите на кварцова пластинка, закрепена по определен начин, се подаде променливо напрежение с честота, равна на собствената честота на трептене на пластинката, устройството ще се превърне в генератор на електрически трептения с много висока точност (например  $1 \text{ милион} \pm 3$  трептения в секунда).

### Пример 2.3:

Да се определи напрежението между електродите на пиезоелемент с диаметър 3 cm и дебелина 1 mm, върху който действа сила 100 N. Материалът е PZT-5. Относителната диелектрична проницаемост на тази пиезокерамика е 1 700.

### Решение:

Пиезоелементът може да се разгледа като кондензатор с капацитет  $C$ , върху пластините на който при деформация се натрупва заряд  $q$ . Тогава напрежението  $U$  ще се определи по формулата  $U = \frac{q}{C}$ . Следователно:

$$q = d_{33} \cdot F = \left( \frac{374 \cdot 10^{-12} \cdot C}{N} \right) \cdot (100 N) = 374 \cdot 10^{-10} C ,$$

$$C = \frac{\epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot A}{d} = \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1700 \cdot 7,07 \cdot 10^{-4}}{1 \cdot 10^{-3}} = 10,635 \cdot 10^{-9} F ,$$

където

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} F / m , \quad A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 9 \cdot 10^{-4}}{4} = 7,07 \cdot 10^{-4} m^2 ,$$

а за напрежението се получава

$$U = \frac{374 \cdot 10^{-10}}{10,635 \cdot 10^{-9}} = 3,52 V .$$

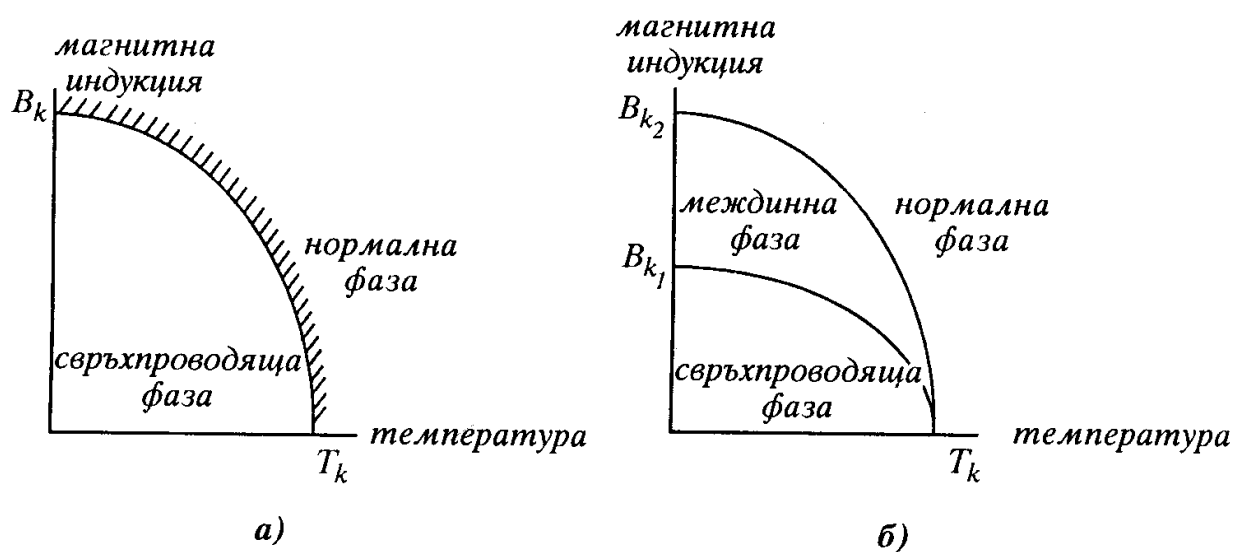
---

#### 2.3.4. Свръхпроводимост. Свръхпроводящи материали

• *Свръхпроводимост.* Явлението свръхпроводимост е открито през 1911 г. от холандския физик Камерлинг-Онес: В някои чисти метали при достигане на температура няколко келвина електрическото съпротивление става нула ( $\rho = 0$ ) и индуктирания в тях електрически ток не се променя в продължение на няколко години. Температурата на прехода от нормално в свръхпроводящо състояние се нарича критична температура. В 1933 г., изучавайки свръхпроводимостта, А. Мейснер установява, че в свръхпроводящия материал не прониква магнитно поле, т.е. при приближаване на постоянен магнит към образеца, в последния възникват повърхностни токове, които създават магнитно поле с противоположен знак, уравновесяващо външното поле. Т.е., този материал е идеален диамагнетик, тъй като в него  $\mu = 0$ . През 1950 г. е открит т.нар. изотопически ефект, според който критичната температура зависи от масата на изотопа на свръхпроводящия материал, което показва, че свръхпроводящото състояние е свързано по определен начин с кристалната решетка. През 1954 г. е създадена теорията БКШ (наречена на тримата

физици, работили в тази област: Бардин - Купер - Шрифер), която обяснява основните свойства на свръхпроводящото състояние. Според нея, при температури под критичната свободните електрони в свръхпроводника образуват електронни двойки, чиято енергия е по-ниска от енергията на два свободни електрона, а възникването на електронна двойка е резултат от обменното взаимодействие на електроните, в което по определен начин участват атомите на кристалната решетка. Това взаимодействие се нарича електрон-електронно взаимодействие, обусловено от фононите (кванти механична енергия, подобно на електромагнитните гама-кванти). В това състояние сдвоените електрони се придвижват по кристалната решетка, без да срещат съпротивление от типа, описан по-горе за нормалното състояние на *метален проводник*.

• *Свръхпроводящи материали*. Свръхпроводящото състояние на материала зависи освен от температурата, и от магнитното поле, в което се намира образецът (магнитното поле може да бъде създадено и от протичащия в образца ток). При по-ниска температура това състояние се запазва при по-силни полета. На фиг. 2.10а е показана фазовата диаграма на свръхпроводник от първи род (СП1), който притежава описаните свойства. Свръхпроводящата фаза в този случай се нарича още *фаза на Мейснер*.

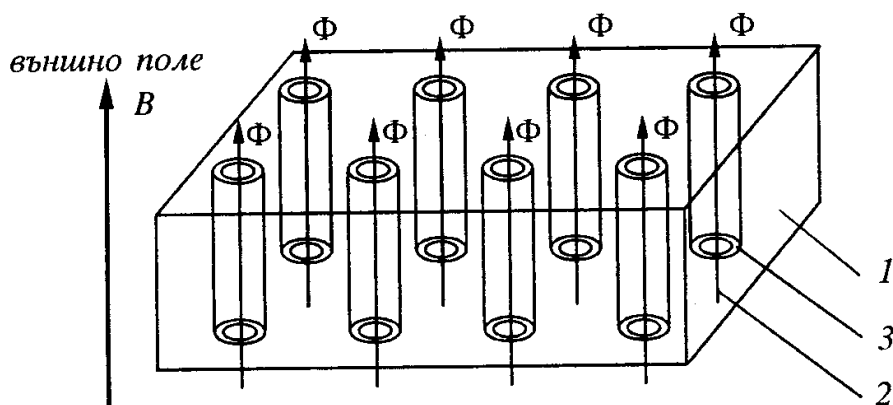


Фиг. 2.10. Фазови диаграми на свръхпроводник:  
а) от първи род; б) от втори род

През 1961 г. се появяват и първите свръхпроводящи сплави (например  $Nb_3Sn$ ), които образуват групата на материалите със свръхпроводимост от втори род (СП2). Те имат по-висока критична температура и критично поле и се характеризират с това, че преди да преминат от СП фаза в нормална, преминават през междинно състояние, наречено *фаза на Шубников*, при което в свръхпроводника прониква магнитно поле във вид на кванти на магнит-



ното поле (те могат да се разглеждат като тънки нишки нормална фаза, екранирани от токове в свръхпроводящата фаза, при което свръхпроводящото състояние се запазва). Получава се т.нар. междинна фаза (фиг. 2.10б и фиг. 2.11).



Фиг. 2.11. Свръхпроводник от втори род: 1 - квант на магнитния поток; 2 - екраниращ ток; 3 - свръхпроводяща фаза

При протичане на транспортен ток през образеца, например отляво надясно върху „нишките“ нормална фаза, по които магнитното поле преминава през образеца, действа сила, стремяща се да ги изтласка към повърхността (за разлика от случая на взаимодействие на проводник с ток и магнитно поле, при което полето е неподвижно, а се премества проводникът, тук, обратно, се преместват нишките). Вследствие на наличието на дефекти в материала (например дислокации), върху които „нишките“ се задържат, междинното състояние се запазва. При протичане на променлив ток, обаче, посоката на действащата сила се променя, а това води до допълнително преместване на нишките и, в крайна сметка, до появата на загуби на мощност, които, макар и незначителни, не могат да се пренебрегнат.

До 1986 г. най-високите критични температури ( $T_k$ ) на известните свръхпроводници не превишават 23-24 °К и за създаването им се използва течен хелий (4,2 °К) и неговите пари. Хелият е подходящ, но скъп газ за нискотемпературните (наричани още криогенни) уредби. Независимо от това, са разработени основните принципи за изграждане на електрически машини със свръхпроводящи намотки и са провеждани изпитания на първите прототипи на тези машини.

През 1986 г. Берндорц и Милер откриват СП материали с критична температура около 40 °К и това засилва интереса към създаването на нови свръхпроводници на базата на специални керамики с редкоземни елементи. За период от няколко години се създават материали с критична температура, достигаща 100 °К. Това означава, че за криогенните уредби може да се из-

ползва само течен азот, който се втечнява при  $77\text{ }^\circ\text{K}$  (цената му за един литър понастоящем е \$0,08). Съвременните свръхпроводници се изработват от съединения със сложен състав по специална технология и се нанасят върху лентата от сребро. Наложили са се два типа СП материали -  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  (BSCCO-2223), наричан още биско (bisco) и  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  (YBCO), наричан ипко (ipco). Те образуват групата на високотемпературните свръхпроводници, за разлика от вече описаните нискотемпературни свръхпроводници. Според някои съобщения вече е получена лента с критична плътност на тока  $10\text{ kA/mm}^2$  в течен азот - за сравнение, типичната плътност в нормалните електрически машини не превишава  $10\text{ A/mm}^2$ .

Вече са създадени и свръхпроводящи кабели, електрически машини и трансформатори със свръхпроводящи намотки от високотемпературни свръхпроводници.

#### 2.4. Магнитни материали

Магнитните материали се използват като магнитопроводи в трансформатори, реактори, бобини, релета и други устройства. Те представляват ферромагнитни сплави, основните компоненти на които са желязото, никелът и кобалтът. В електрониката, където се работи със слаби полета и високи честоти, се използват ферити - материали, изготвени на базата на соли на желязната киселина и двувалентен метал ( $\text{MeFe}_2\text{O}_4$  Me - Mn, Fe, Co, Ni, Zn, Cd и др.). Тяхното основно качество е високото електрическо съпротивление, което обуславя малки загуби на енергия при високи честоти.

Магнитните свойства на веществата се определят от магнитните свойства на атомите им, т.е. от техния *магнитен момент*.

В гл. 1 бе разгледан въртящият момент, който действа върху рамка с ток  $I$  в магнитно поле  $B$  и неговата максимална стойност бе определена като  $M = IBS$  ( $S$  - площ на рамката). Ако този момент се отнесе към единица магнитна индукция, величината  $m = IS$  ще представлява магнитния момент на разглеждания контур. В този смисъл един електрон, движещ се по кръгова орбита с радиус  $R$ , може да се разглежда като кръгов ток, който създава магнитен момент.

Възможни са следните случаи: Ако атомите или молекулите на едно вещество имат магнитен момент, то се нарича *парамагнитно*. Степента на намагнитване на веществото се определя от ориентацията на магнитните моменти спрямо външното магнитно поле. Такава намагнитеност зависи от температурата - при по-висока температура тя е по-слаба. Относителната магнитна проницаемост на тези материали е малко по-голяма от 1 и разликата е от порядъка на  $10^{-5}$ , т.е.  $\mu_r \geq 1$ . Такива са алуминият, магне-

зият, титанът, волфрамът.

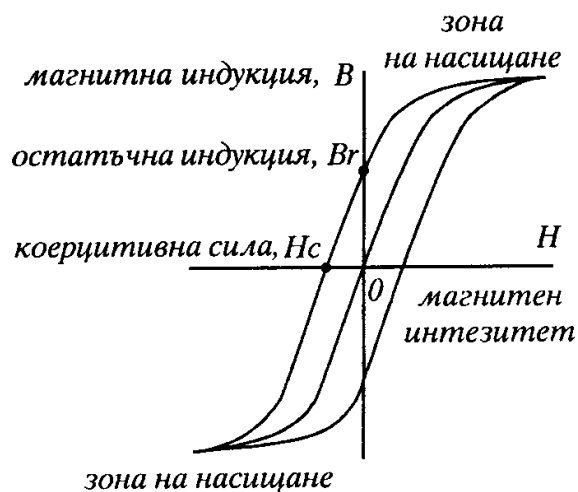
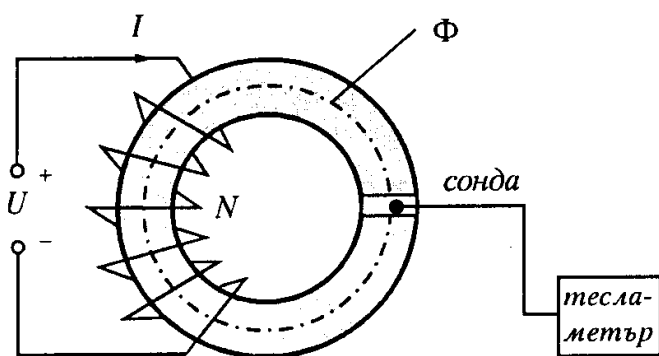
В случаите, когато атомите нямат постоянен магнитен момент, намагнитването става в противоположна на външното поле посока и не зависи от температурата. Такива вещества се наричат *диамагнитни*: относителната им магнитна проницаемост е по-малка от 1, а разликата е от същия порядък -  $\mu_r \leq 1$ . Към тях се отнасят медта, германият, среброто, златото.

Съществува и група вещества, наречени феромагнитни, в които под действието на вътрешни сили се образуват области на спонтанна намагнитеност - *домени*. В някои монокристали тези области са относително големи и могат да се наблюдават под микроскоп. В тях магнитните моменти на всички атоми са ориентирани в една и съща посока и създават силно поле. Фактът, че при липса на външно поле материалът е магнитно неутрален показва, че магнитните моменти на домените взаимно се компенсират. От друга страна, наличието на доменна структура обуславя висока  $\mu_r$  - от порядъка на стотици и хиляди,  $\mu_r \gg 1$ .

Какви процеси протичат в материала при намагнитване?

Нека разгледаме следния опит: Върху тор от феромагнитен (ФМ) материал е навит меден проводник, както е показано на фиг. 2.12. Токът в намотката създава магнитно поле с интензитет  $H$ . Под действието на това поле домените се ориентират по посока на  $H$  и по такъв начин резултантният магнитен поток се усилва. Процесът на намагнитване и размагнитване на материала се описва с помощта на графичната зависимост, представена на фиг. 2.13.

Ако постепенно увеличаваме тока, респективно  $H$ , и измерваме  $B$  с помощта на специална сонда, поставена в малък прорез в желязната сърцевина, ще установим, че при ниски стойности на  $H$  магнитната индукция



Фиг. 2.12. Тор от ФМ материал с намотка      Фиг. 2.13. Хистерезисна крива  $B(H)$

слабо нараства и това се дължи на нарастването на домените, ориентирани по външното поле, т.е. резултат е на преместването на техните граници. Това преместване е обратимо. При по-големи стойности на магнитния интензитет  $H$  този процес продължава, но преместването на границите е необратимо, тъй като е свързано с наличието на дефекти или примеси в кристалната решетка. При още по-голямо увеличаване на  $H$  домените, които са останали ориентирани, общо казано, на  $90^\circ$  и  $180^\circ$  спрямо полето, също се ориентират по него и настъпва *насищане*. При намаляване на тока, респективно на  $H$ , част от доменните граници се връщат в изходно или друго стабилно състояние, свързано с дефектите на решетката, а  $90^\circ$  и  $180^\circ$  градусните домени остават в новата си позиция. Когато  $H$  стане нула, образецът остава намагнитен и плътността на магнитния поток (магнитната индукция) в него не е нула, а има стойност  $B_r$ , наречена *остатъчна индукция*. За да се нулира  $B$  е необходимо да се приложи поле с обратна посока. Неговият интензитет се нарича *коерцитивен интензитет* или *коерцитивна сила*,  $H_c$ . Тази величина, както и остатъчната индукция, са важни характеристики на ФМ материал. Нарастването на  $H$  с обратен знак води до ново намагнитване на образца в противоположна посока, докато настъпи насищане. При намаляване на  $H$  до нула отново се достига до остатъчна индукция ( $-B_r$ ), която се анулира от поле с положителна посока. Описаният процес представлява един *хистерезисен цикъл*. Такъв се случва при всяка стойност на  $H$ , по-голяма от тази, която съответства на обратимите изменения на  $B$ . Важно е да се отбележи, че площта на хистерезисния цикъл е пропорционална на енергията за пренамагнитване на образца.

Съществуват материали, които се състоят от ФМ частици, които са толкова малки, че една частица представлява един домен, който винаги е намагнитен до състояние на насищане. В този случай намагнитването става само чрез завъртане на вектора на намагнитеност на отделните домени.

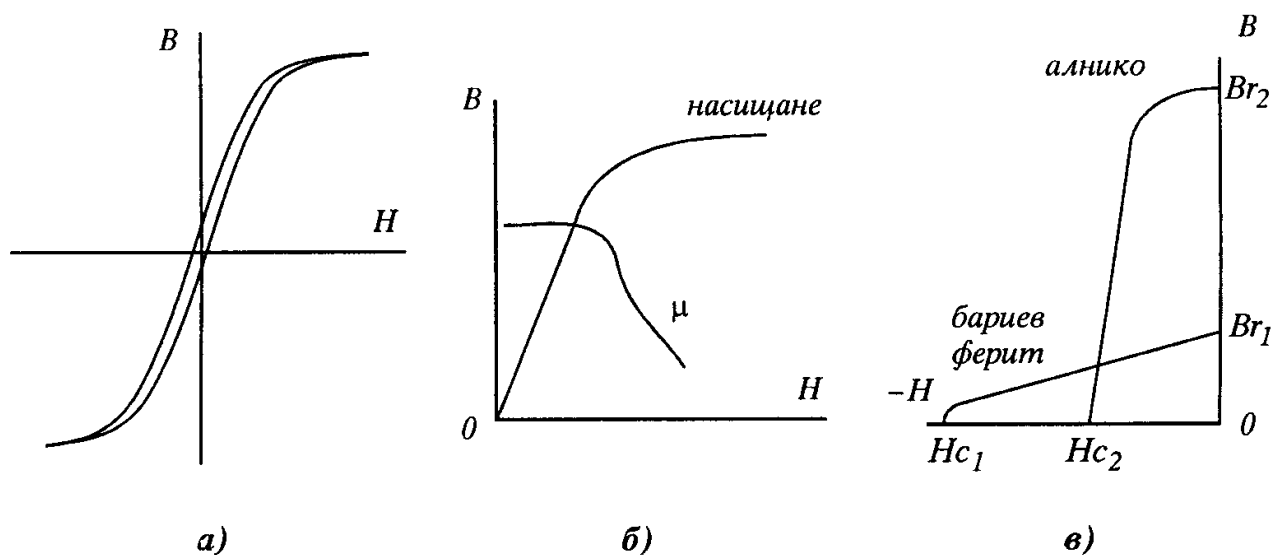
Както при диелектриците, така и тук за всеки материал има определена температура (температура на Кюри), при която доменната структура се разпада и ферромагнитните свойства се губят.

Стойностите на  $B_r$  за известните материали обикновено не превишават 1 Т (тесла), а тези на  $H_c$  са в границите от 0,16 А/м (супермалой) до 800 кА/м за някои съвременни материали. Този широк диапазон показва колко са чувствителни домените към структурата, вътрешните механични напрежения и деформации, и анизотропията на материала. При създаването на магнитни материали с висока магнитна проницаемост съществува стремеж границите на магнитните домени да могат да се движат свободно, без да се захващат от центрове на деформация, междукристалитни слоеве, примеси или празнини. Затова материалите трябва да бъдат чисти, без примеси и да имат кристална структура, без вътрешни напрежения и дефекти.

При разработване на материали за постоянни магнити стремежът е да се намали броя на доменните граници или максимално да се затрудни движението им, с цел да останат само процесите на въртене на вектора на намагнитеност, като те също трябва да бъдат затруднени.

Първият вид материали се наричат *магнитно мек*. На фиг. 2.14а е показана хистерезисната крива на магнитно мек материал.

От формулата  $B = \mu_r \mu_0 H$  и вида на хистерезисната крива следва, че относителната магнитна проницаемост не е постоянна величина, а зависи от магнитния интензитет - фиг. 2.14б. В силовите електромагнитни устройства се използва най-често средната почти линейна част, където  $\mu_r \approx const$ . Ако в разгледаната опитна постановка се приеме, че материалът е магнитно мек, а  $\mu_r = const$ , при известни стойности на тока, на  $\mu_r$  и размери на тора може да се установи проста формула за изчисляване на магнитния поток и магнитната индукция във ФМ сърцевина.



Фиг. 2.14. Хистерезисна крива на магнитно мек (а, б) и магнитно твърд материал (в)

При условие че плътността на магнитния поток по сечението  $S$  на магнитопровода (тора) е постоянна, то  $\Phi = B.S$  или  $\Phi = \mu_r \mu_0 H.S$ , откъдето

$$H = \frac{\Phi}{\mu_r \mu_0 . S}$$

От друга страна, по закона за пълния ток, при приетите опростяващи предположения, за циркулацията на вектора  $H$  по затворения контур  $L$  може да се запише

$$H.L = N.I,$$

където  $N$  е броят на навивките от меден проводник, а  $N.I = F$  е еквивалентният ток, който пробужда избрания контур - нарича се магнитодвижеща сила или магнитодвижещо напрежение (м.д.н.). След заместване и преобразуване в последното равенство се получава

$$F = H.L = H = \left( \frac{L}{\mu_r \mu_0 . S} \right) . \Phi = R_\mu . \Phi$$

или

$$F = R_\mu . \Phi .$$

Тази формула представлява *Закона на Ом за магнитните вериги*, а величината  $R_\mu = \frac{L}{\mu_r \mu_0 . S}$ , се нарича магнитно съпротивление, и в разглеждания случай е постоянна величина.

#### Пример 2.4:

Да се определят магнитният поток и магнитната индукция в тора, представен на фиг. 2.12, при условие че прорез за датчик няма. Броят на навивките е 50, токът в тях е 1 А, сечението на тора е  $2 \text{ cm}^2$ , дължината по средната магнитна линия  $L$  е  $10 \pi \text{ cm}$ , а относителната магнитна проницаемост е 500.

#### Решение:

За определяне на магнитния поток се използва законът на Ом за магнитните вериги, т.е.  $F = R_\mu . \Phi$ , където  $F = N.I = 50.1 = 50 \text{ A}$ ,

$$R_\mu = \frac{L}{\mu_r \mu_0 . S} = \frac{10\pi . 10^{-2}}{500 . 4\pi . 10^{-7} . 2 . 10^{-4}} = 2,5 . 10^6 \frac{\text{A}}{\text{Wb}} .$$

Тогава

$$\Phi = \frac{F}{R_\mu} = \frac{50}{2,5 . 10^6} = 20 . 10^{-6} = 0,2 . 10^{-4} \text{ Wb}$$

и за магнитната индукция се получава

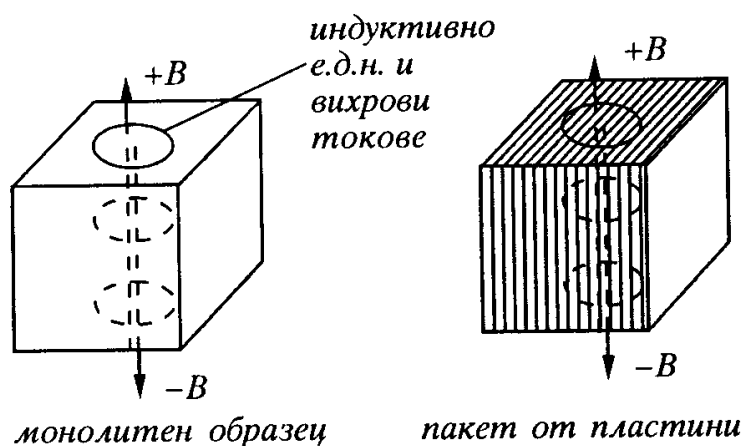
$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{0,2 . 10^{-4}}{2 . 10^{-4}} = 0,1 \text{ T} .$$

Ако в тора има прорез, както е на фигурата, тогава би трябвало да се отчете

и съпротивлението на въздушния участък, през който преминава магнитният поток, тъй като в него  $\mu_r = 1$ , а не на 500, което би се отразило съществено на резултата. Този въпрос се отнася до магнитните вериги и е разгледан в гл. 5.

Поради малката остатъчна индукция и коерцитивна сила загубите на мощност от пренамагнитване на магнитномеките материали са незначителни и могат да се използват в устройства с променлив магнитен поток, например трансформатори, което гарантира малки загуби на мощност от пренамагнитването на материала.

В този случай, обаче, има и още един фактор, свързан със загубите - наличието на вихрови токове в проводящия ФМ материал, какъвто е желязото и някои негови сплави. Изменящият се магнитен поток индуцира в проводника е.д.н. (второто уравнение на Максвел), което, от своя страна, създава ток, а неговото протичане по проводника създава загуби на мощност, пропорционални на  $I^2 R$ . За тяхното намаляване ФМ сърцевина се прави от отделни пластини, изолирани една от друга (фиг. 2.15) - така загубите от вихрови токове намаляват значително. Въпреки това, този начин не може да се приложи при честоти, по-високи от няколко десетки килохерца, тъй като съпротивлението на ФМ метали и сплави е от порядъка на  $10^{-8} \Omega.m$ .



Фиг. 2.15. Възникване на вихрови токове и начин за намаляването им

При по-високи честоти би трябвало да се правят или много тънки пластини, или да се използва много фин прах, което, от своя страна, води до увеличаване на коерцитивната сила и до намаляване на магнитната проницаемост. Както вече бе посочено, разработени са феромагнитни материали с високо електрическо съпротивление ( $0,1 \div 1.10^7 \Omega.m$ ), в

които вихровите токове са малки и могат да се пренебрегнат. Тези материали, за разлика от металите и металните сплави, имат друга кристална структура и технология за получаване. В технологичния процес изходните материали (окиси на различни метали) механически се смесват, смилат, формоват и изпичат при определени температурни режими, при което в следствие химическата реакция между зърната на отделните съставки се получава необходимия кристал. Съществуват методи за получаване на монокристали или на структури с определен размер на зърната на ферита, което, както бе

посочено, влияе на коерцитивната сила на материала. Феритите могат да се използват до честоти от порядъка на десетки гигагерци и повече. Коерцитивната сила е обикновено  $20-80 \text{ A/m}$ , а индукцията на насищане  $0,35-0,45 \text{ T}$ . Температурата на Кюри при тях достига  $400-500^\circ\text{C}$ .

Изключително важно значение за съвременните електротехнически устройства имат и т.нар. *магнитно твърди материали*, от които се изработват постоянни магнити. На фиг. 2.14в е показана онази част от хистерезисната крива, която се използва при пресмятане на системи с постоянни магнити, т.е. *кривата на размагнитване*. Магнитно твърдите материали имат коерцитивна сила от порядъка на стотици  $\text{kA/m}$  и остатъчна индукция  $0,3-1$  тесла. Към тях се отнасят сплавите  $\text{Co-Ni-Al}$  (кобалт - никел - алуминий) с остатъчна индукция  $1,0-1,3 \text{ T}$  и коерцитивна сила  $45-50 \text{ kA/m}$ ; температура на Кюри -  $1143^\circ\text{C}$ . Тяхна важна характеристика е и максималната магнитната енергия, запасена в единица обем на материала -  $(BH)_{\text{max}}$ , която се изразява в  $\text{kJ/m}^3$ .

Създадените през последното десетилетие постоянни магнити (ПМ) на базата на феритни материали превъзхождат неколkokратно летите магнити по коерцитивна сила, но им отстъпват по остатъчна индукция (вж. табл. 2.1) и, с изключение на 3, са и по-евтини, и достъпни.

Таблица 2.1

№	Материал	$B_r, \text{T}$	$H_c, \text{kA/m}$	$(BH)_{\text{max}}, \text{kJ/m}^3$
1.	Бариев ферит	0,365-0,4	230-270	24-28
2.	Бариево-стронциев ферит	0,370-0,4	240-290	24-30
3.	Фероремакс - NdFeB	0,80	600	128
4.	Кониал (алнико)	1,25	50	40

Технологията на производство позволява получаването на ПМ с необходимата форма в зависимост от приложението. В електрическите машини с малка мощност, например, постоянно магнитно поле може да се създаде с ПМ, вместо с помощта на бобина, захранвана с постоянен ток.

Тънки слоеве от магнитно твърд материал се използват в цифровите запомнящи устройства с магнитна лента и магнитни дискове. През последните години са разработени запомнящи устройства на основата на тънки слоеве с цилиндрични магнитни домени, намагнитени перпендикулярно на слоя, в които е възможно преместване на домените с електрически импулси. Паметите с цилиндрични магнитни домени са по-евтини от тези с въртящи се части и имат голям обем и бързодействие.



## РАЗДЕЛ II. ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ВЕРИГИ

### Трета глава

#### ЕЛЕКТРИЧЕСКА ВЕРИГА И НЕЙНИТЕ ЕЛЕМЕНТИ. ПОСТОЯННОТОКОВИ ВЕРИГИ

##### 3.1. Електрическа верига и нейните елементи

###### 3.1.1. Основни понятия. Елементи на електрическата верига

Електрическа верига се нарича съвкупността от устройства, предназначени за предаване, разпределение и взаимно преобразуване на електрическата (електромагнитната) и други видове енергия, ако процесите, протичащи в тях, могат да се опишат с помощта на понятията *електродвижещо напрежение (е.д.н.)*, *ток* и *напрежение*.

Отделните устройства, образувачи веригата, се наричат *елементи на веригата*. От тях основните са:

- *източници* - преобразуват някакъв вид енергия (химическа, механична и др.) в електрическа (акумулатори, генератори и др.);
- *консуматори* - преобразуват електрическата енергия в някакъв друг вид енергия (механична - двигатели, топлинна - термопреобразуватели и др.);
- *предаващи елементи* (звена), свързващи източниците с консуматорите - към тях се отнасят електрическите проводници, апаратите за контрол и управление и др.

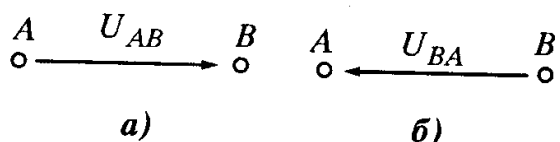
Елементите на електрическата верига изпълняват своето предназначение тогава, когато веригата е затворена и по нея протича електрически ток.

Електрическият ток, чиято големина и посока не се изменят с течение на времето, се нарича *постоянен ток* и се означава с  $I$ . Електрически ток, който изменя големината и посоката си във времето, се нарича *променлив ток*. Стойността на променливия ток в който и да е момент от времето на неговото изменение се нарича *моментна стойност на променливия ток* и се означава с  $i$ .

Една от основните величини, които характеризират условията в електрическата верига, е *електрическото напрежение*. Напрежението например между две точки  $A$  и  $B$  на част от електрическата верига е равно на разликата в електрическите потенциали на тези две точки, т.е.

$$U_{AB} = V_A - V_B ,$$

където  $V_A$  и  $V_B$  са потенциалите на т.  $A$  и т.  $B$ . Записаното по този начин напрежение означава, че  $V_A > V_B$ , което може да се укаже още със стрелка (фиг. 3.1), насочена от точката с по-висок потенциал  $A$ , към точката с по-нисък потенциал  $B$ . В случай, че  $V_B > V_A$ , стойността на  $U_{AB}$  ще бъде отрицателна. Например, ако  $V_A = 5\text{ V}$ , а  $V_B = 1\text{ V}$ ,  $U_{AB}$  ще бъде  $4\text{ V}$ . При стойности на  $V_A = 8\text{ V}$ , а на  $V_B = 12\text{ V}$ , напрежението  $U_{AB} = -4\text{ V}$ . Последното може да се запише с положителен знак, ако се разменят местата на индексите, т.е.  $U_{BA} = 4\text{ V}$ , а стрелката се насочи от т.  $B$  към т.  $A$ .

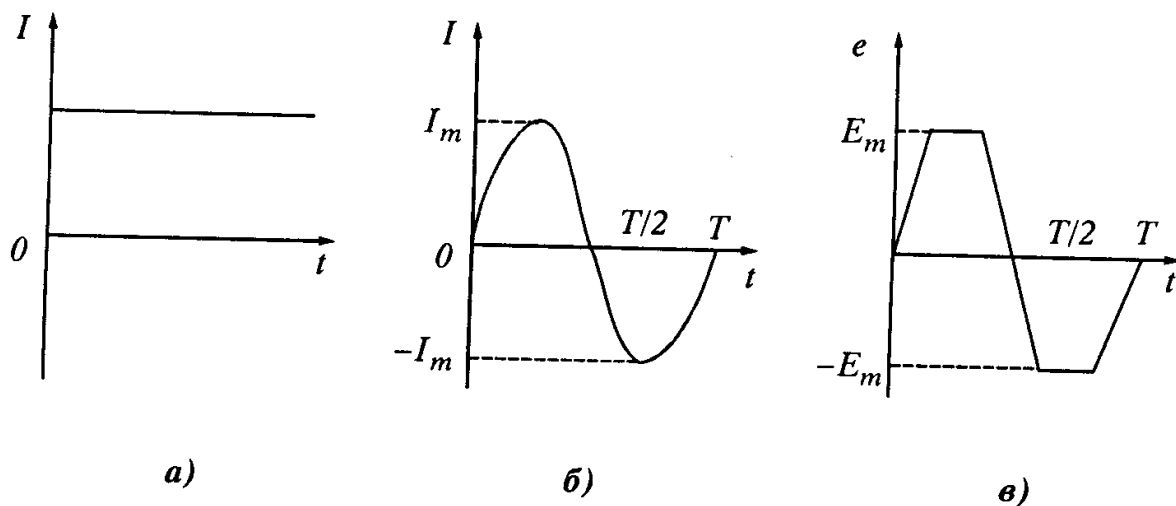


Фиг. 3.1. Напрежение на изводите на консуматор и източник на е.д.н.

Често вместо с индекси, на схемите посоките на напреженията се дават само със стрелки, при което точката с висок потенциал се избира произволно. При определена посока на напрежението токът в елемента, към който е приложено това напрежение, тече в посока от високия към ниския потенциал. Тази посока се приема за положителна. В източниците на напрежение посоката на е.д.н. най-често се определя със стрелка, както е показано на фиг. 3.6а.

Постоянният и променливият ток в една електрическа верига възникват под действието на е.д.н., създавано в източниците на електрическа енергия.

В съответствие със закона на изменение на електродвижещото напрежение се изменят и моментните стойности на тока и напрежението в различните участъци на веригата, т.е. могат да бъдат постоянни (означават се с  $E$ ,  $I$  и  $U$ ) или променливи (моментните им стойности се означават с  $e$ ,  $i$  и  $u$ ).



Фиг. 3.2. Различни форми на кривите на постоянен (а) и променлив ток (б), и несинусоидално е.д.н. (в)

В зависимост от това за какъв ток са предназначени, електрическите вериги се наричат, съответно, „електрическа верига за постоянен ток“, „електрическа верига за променлив ток“, „електрическа верига за несинусоидален ток“.

• **Параметри на елементите на електрическата верига**

Всеки елемент на електрическата верига притежава свойствата да поглъща електрическа енергия от веригата и да я преобразува в друг вид енергия (необратим процес), да създава свое магнитно и електрическо поле, чиято енергия може да се запаси и при определени условия да се възвърне обратно във веригата (обратим процес). За да се характеризират тези свойства, се въвежда понятието **параметър на елемента**.

Параметърът  $R$  (**съпротивление**) характеризира свойството на елемента да поглъща енергия от електрическата верига и да я преобразува в топлина (необратим процес).

Свойството на елемента на веригата да създава собствено магнитно поле, когато през него протича ток, се характеризира с параметъра  $L$  (**индуктивност**).

Параметърът  $C$  (**капацитет**) характеризира свойството на елемента да натрупва електрически заряди и да възбужда електрическо поле.

В най-общия случай всяко реално устройство притежава и трите параметъра  $R$ ,  $L$  и  $C$ , но на практика се използват специално създадени елементи (резистори, индуктивни бобини и кондензатори), чиято работа при определени условия с достатъчна точност може да се характеризира само с един параметър:  $R$ ,  $L$  или  $C$ . Нарушаването на зададените условия довежда до възникване на явления, характеризирани се и с други параметри.

Когато параметрите на елементите не зависят от протичащия в тях ток или от приложеното напрежение,  $R = const$ ,  $L = const$  и  $C = const$ , те се наричат **линейни**, а електрическа верига с такива елементи - **линейна**. В случай че това условие не е спазено, елементите са **нелинейни**, а веригата - **нелинейна**. В този раздел ще бъдат разгледани линейни електрически вериги.

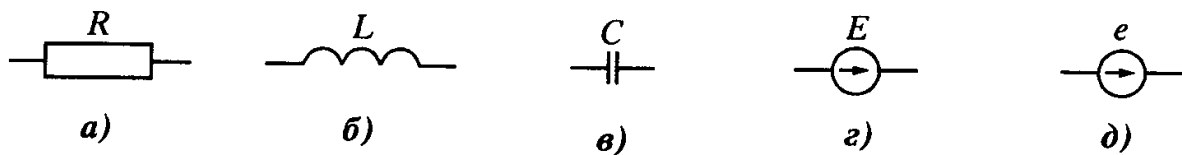
Основно свойство на източника на електрическа енергия е да създава и поддържа разлика в потенциалите на отделните участъци на веригата, както и да възбужда и да поддържа електрически ток в затворена верига. Това негово свойство се характеризира с параметъра  $E$  (**електродвижещо напрежение - е.д.н.**).

Елементите на веригата, чиято работа може да се опише с помощта на параметрите  $R$ ,  $L$  или  $C$ , се наричат **пасивни**. Терминът „пасивни“ подчертава, че тези елементи не могат да изпълняват своето предназначение, без да им въздействат странични източници.

Елементите на веригата, за описанието на чиято работа е необходимо

да се въведат освен пасивни параметри още и е.д.н., се наричат **активни**. Към активните елементи се отнасят всички източници на електрическа енергия и някои консуматори, описанието на процесите в които не може да се ограничи само с пасивни параметри (например акумулатор в режим на зареждане, електродвигател и др.).

Елементите на веригата, притежаващи само един параметър, се наричат **идеални**. Идеалният източник на енергия притежава само параметър  $E$  ( $e$ ), идеалният резистивен елемент (идеален резистор) - само параметър  $R$ , идеалният индуктивен елемент (идеалната индуктивна бобина) - само параметър  $L$ , идеалният капацитивен елемент (идеалният кондензатор) - само параметър  $C$ . На фиг. 3.3 са показани условните обозначения на идеални елементи:



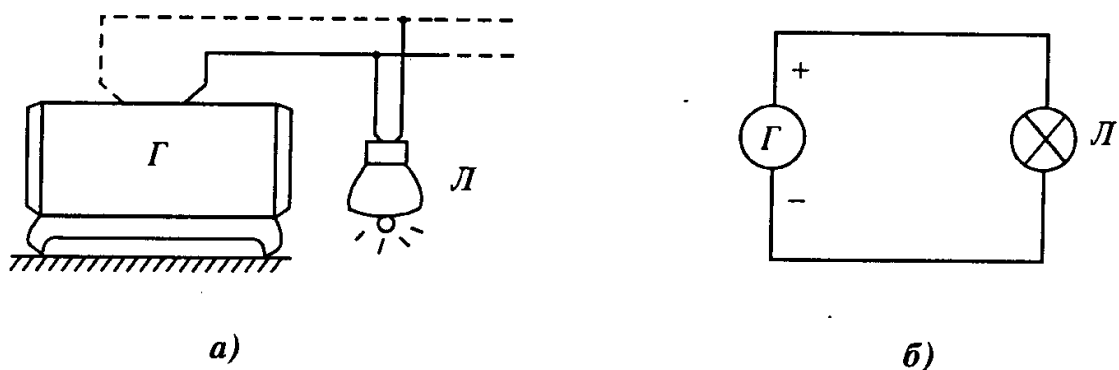
Фиг. 3.3. Обозначение на идеални елементи: а) резистивен; б) индуктивен; в) капацитивен; г) източник на е.д.н. за постоянен ток; д) източник на е.д.н. за променлив ток

### 3.1.2. Изобразяване на електрическите вериги

#### • Схеми на свързване

При изучаване на процесите в електрическите вериги (ЕВ), те се представят графично с помощта на схеми на свързване на отделните елементи, които се изобразяват посредством установени стандартни условни обозначения. Графичното изобразяване на веригите с помощта на условно обозначени елементи се нарича **схема на свързване** на веригата.

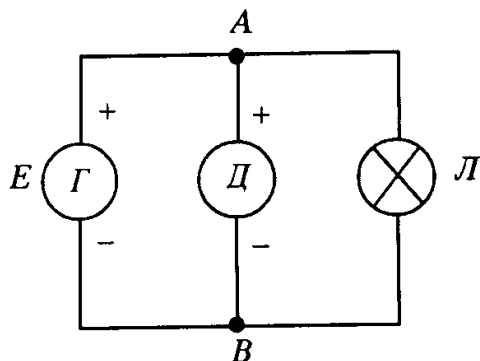
Съединение, при което по всички участъци протича един и същ ток, се нарича последователно съединение (свързване) на участъците. Всеки затворен път, преминаващ по няколко участъка, се нарича контур на електри-



Фиг. 3.4. Свързване на елементите в ЕВ

ческата верига. Веригата, чиято схема е показана на фиг. 3.4, е едноконтурна верига, състояща се от постояннотоков генератор и свързана към него електрическа лампа.

Участъкът от веригата, състоящ се от един или няколко последователно свързани елемента, се нарича *клон на електрическата верига*, а мястото на съединение на три и повече клона - *възел на електрическата верига*.



Фиг. 3.5. Схема на свързване на елементите на разклонена верига

Съединение, при което всички клонове са свързани към една двойка възли, се нарича успоредно съединение. Схемата от фиг. 3.5 има два възела А и В, към които са свързани генератор и два консуматора (електродвигател и електрическа лампа), свързани успоредно. При успоредно свързване към всички клонове е приложено едно и също напрежение.

Електрическа верига, съдържаща последователни и успоредни клонове, се нарича разклонена верига. Разклонената верига е *сложна* верига.

#### • Заместващи схеми

Изучаването на свойствата на електрическата верига и нейните елементи с отчитане на всички параметри е доста сложно, тъй като явленията, характеризиращи тези параметри в реалните устройства, са неразделни, но за опростяване на анализа на реалната верига тя се представя като съвкупност от идеални елементи.

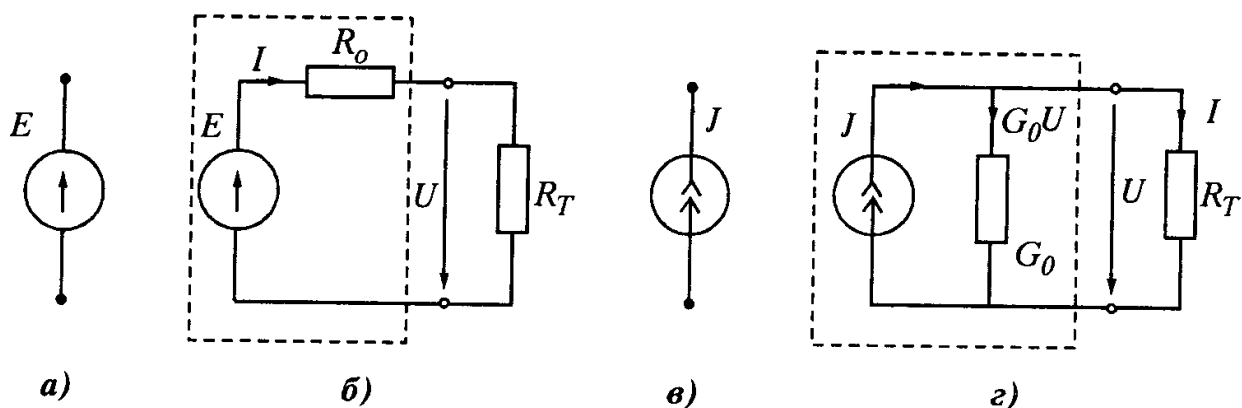
Графичното изображение на веригата с помощта на идеални елементи, чиито параметри са параметри на заместваните елементи, се нарича *заместваща* схема.

**Идеалният източник на е.д.н.** представлява източник, чието напрежение не зависи от големината на протичащия през него ток и характеризира електродвижещото му напрежение  $U = E = Const$ , а вътрешното му съпротивление  $R = 0$  (фиг. 3.6а).

**Идеалният източник на ток** представлява източник, чийто ток не зависи от напрежението и е равен на тока на късо съединение  $I_k$  на захранващия източник. Вътрешното съпротивление на такъв източник е безкрайно голямо,  $R = \infty$  (фиг. 3.6в).

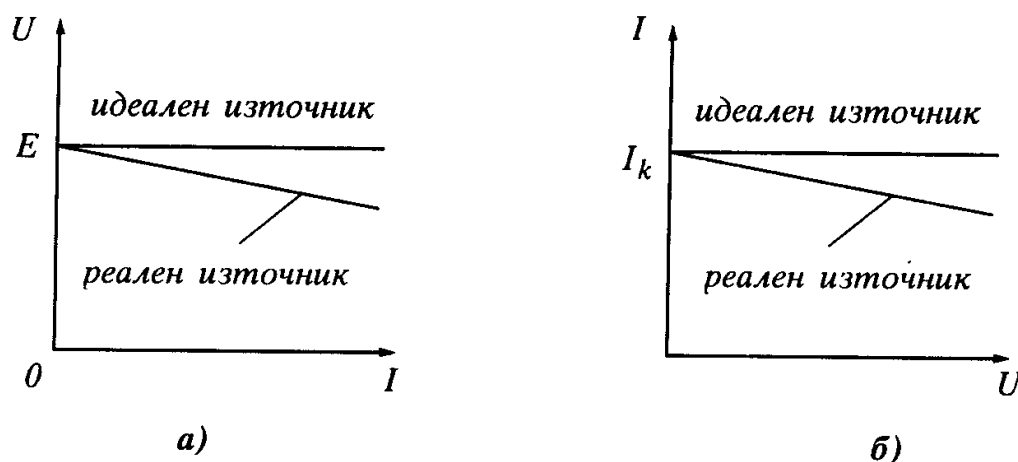
*Идеалните източници на е.д.н. и на ток са източници на безкрайна мощност, тъй като при увеличаване на тока в първия и на напрежението на втория източник теоретично техните мощности могат да нараснат до безкрайност.*

За отчитане на необратимия процес на превръщане на енергията в топлина от елементите на веригата, в заместващата схема се въвеждат резистивни елементи, а индуктивните и капацитивни елементи се въвеждат в случаите, когато трябва да се отчете влиянието на полетата.



Фиг. 3.6. Заместващи схеми на идеални и реални източници на е.д.н. (а, б) и на ток (в, г)

На фиг. 3.6б и 3.6г са показани еквивалентните заместващи схеми на реални източници, съответно, на напрежение и ток, а на фиг. 3.7 - техните волтамперни характеристики.

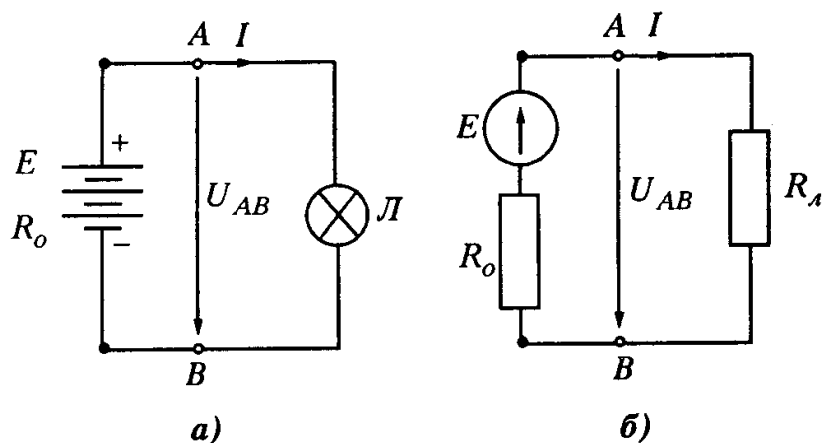


Фиг. 3.7. Волтамперни характеристики на идеален и реален източник на е.д.н. (а) и на идеален и реален източник на ток (б)

За еднозначност на описанието на процесите, протичащи в който и да е елемент в електрическата верига, е необходимо да се отчита не само стойността на тока и напрежението, но и техните посоки в разглеждания момент от време. Ако са дадени графиките на изменението на тока (фиг. 3.2) или неговото уравнение, по тях може да се съди за периодичната смяна на неговата посока, но посоката на тока през елемента в разглеждания момент от време е неизвестна. Поради това една от двете му възможни посо-

ки се избира за основна (положителна) и се указва на схемата със стрелка, т.е. за тези посоки обозначените величини са положителни. Ако стойностите на тези величини са отрицателни, техните действителни посоки са противоположни на посоките, приети за положителни.

На фиг. 3.8а е дадена схемата на свързване на проста верига за постоянен ток, състояща се от реален източник (акумулатор) и електрическа лампа, включена непосредствено към източника, а на фиг. 3.8б - нейната заместваща схема.



Фиг. 3.8. Схема на свързване на елементите на проста верига за постоянен ток (а) и нейната заместваща схема (б)

За положителна посока на тока се приема посоката на движение на положителните заряди, за положителна посока на е.д.н. - посоката на действие на страничните сили върху положителен заряд, а за положителна посока на напрежението - посоката на намаляване на потенциала.

Тъй като положителните заряди вътре в източника се движат по посока на действието на страничните сили, а в консуматора - по посока на намаляване на потенциала, то положителните посоки на тока и е.д.н. на източника, на тока и на напрежението на консуматора съвпадат.

Положителната посока на напрежението на изводите на източника е противоположна на положителната посока на тока през източника. Развиваната от източника мощност  $P = EI$  е положителна само при съвпадане на положителните посоки на е.д.н. и тока през източника.

## 3.2. Линеини електрически вериги за постоянен ток

### 3.2.1. Основни положения и съотношения

• **Закон на Ом за участък от електрическата верига, несъдържащ източник на е.д.н.**

Законът на Ом за участък от веригата без източник на е.д.н. установява връзката между тока и напрежението на този участък. Както бе посочено в раздел I (гл. 1, т. 1.2), зависимостта

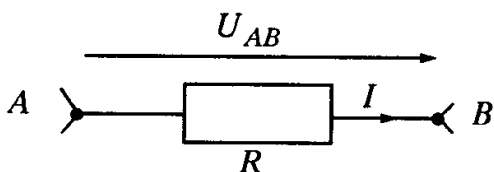
$$(3.1) \quad I = \frac{U}{R}$$

се нарича **закон на Ом за част от веригата, несъдържаща източник на е.д.н.** (в интегрален вид).

Приложен за участъка от веригата  $A - B$  със съпротивление  $R$  (фиг. 3.9):

$$I = \frac{U_{AB}}{R} \quad \text{или} \quad U_{AB} = IR$$

При указаната посока на тока през резистора от т.  $A$  към т.  $B$  (от по-високия потенциал към по-ниския) следва, че потенциалът на т.  $A$  е по-висок от потенциала на т.  $B$  с величината  $IR$ , където  $IR$  е **пад на напрежението върху резистора  $R$ , или просто напрежение върху  $R$ .**



Фиг. 3.9. Към Закона на Ом

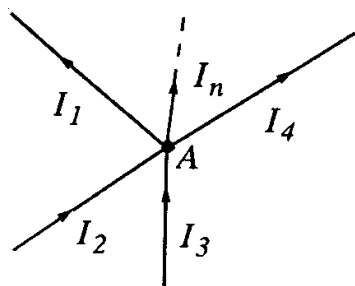
Положителната посока на пада на напрежение (посочена на фигурата със стрелка) съвпада с положителната посока на тока, протичащ през резистора (участъка с параметър  $R$ ).

### • Закони на Кирхоф

Тъй като една електрическа верига в много случаи съдържа значителен брой пасивни и активни елементи, за анализ на такава верига не е достатъчен само законът на Ом. За целта се използват **законите на Кирхоф** за токовете във възлите на електрическата верига (I закон) и напреженията в произволен контур на същата верига (II закон).

#### А. Първи закон на Кирхоф

**Първият закон на Кирхоф** е следствие от принципа за непрекъснатостта на електрическия ток. Той гласи: **Алгебричната сума от токовете през един възел на електрическата верига е равна на нула, или**



$$(3.2) \quad \sum_{\kappa=1}^n I_{\kappa} = 0$$

При това входящите във възела токове се приемат с произволен знак (например „+“, а изходящите - с обратен на входящите знак „-“). Тогава, ако в най-общия случай входящите токове се обозначат с индекс „вх“, а изходящите - с индекс „изх“, се получава изразът

Фиг. 3.10. Към Първия закон на Кирхоф

$$(3.3) \quad \sum I_{вх} = \sum I_{изх}$$



което е друга формулировка на първия закон на Кирхоф: *Алгебричната сума от всички входящи в една възлова точка токове е равна на алгебричната сума на всички изходящи от същата точка токове* (например, ако т. А е възлова точка на клоновете от схемата на фиг. 3.10).

### Б. Втори закон на Кирхоф

Вторият закон на Кирхоф дава връзката между електродвижещите напрежения и падовете на напрежение в един затворен електрически контур. Той е следствие от закона за съхранение на енергията, според който работата за пренасяне на електрически заряд по затворен контур е равна на нула.

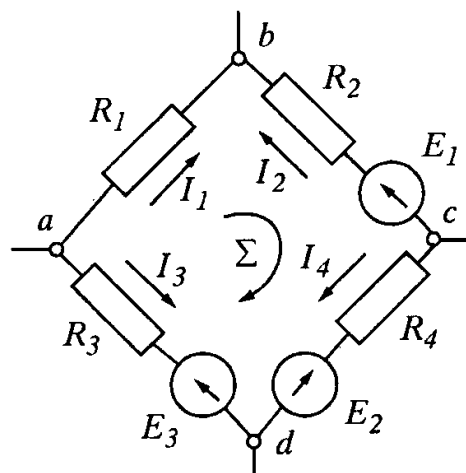
*Вторият закон на Кирхоф гласи: В един затворен контур алгебричната сума на е.д.н., участващи в контура, е равна на алгебричната сума от падовете на напрежения в контура.* При това с положителен знак „+“ се приемат тези токове и е.д.н., чиято положителна посока съвпада с произволно избраната посока на обхождане на контура. В противен случай те се вземат със знак минус „-“. Например за контура на фиг. 3.11, който е част от електрическа верига, може да се запише:

$$E_3 - E_2 - E_1 = R_1 I_1 - R_2 I_2 + R_3 I_3 - R_4 I_4 .$$

В общия случай равенството се записва както следва:

$$(3.4) \quad \sum_{k=1}^m E_k = \sum_{k=1}^n R_k I_k .$$

Ако е.д.н., разположени в лявата част на уравнението, бъдат пренесени отдясно със знак минус, те ще представляват напреженията между началото и края на всеки източник. По такъв начин се получава още една формулировка на втория закон на Кирхоф: *Сумата от напреженията върху елементите, включени в един затворен контур,*



Фиг. 3.11. Към Втория закон на Кирхоф

*е равна на нула.* За разглеждания контур уравнението се записва така:

$$0 = R_1 I_1 - R_2 I_2 + E_1 + R_4 I_4 + E_2 - E_3 + R_3 I_3$$

или

$$0 = U_{R1} - U_{R2} + U_{E1} + U_{R4} + U_{E2} - U_{E3} - U_{R3} .$$

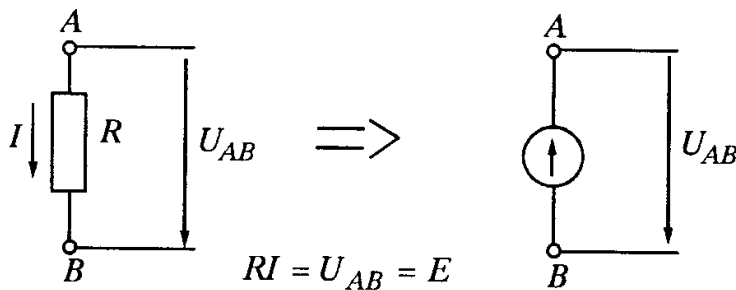
В общия случай е в сила равенството:

$$\sum_{k=1}^n U_k = 0 .$$

При това напреженията, чиято посока съвпада с посоката на обхождане на контура, се вземат с положителен знак, в противен случай - със знак „-“.

• **Принцип на компенсацията**

Който и да е резистор със съпротивление  $R$  от електрическата верига може да бъде заменен с източник на е.д.н., числено равно на пада на напрежение в заменяемото  $R$  и насочено срещу посоката на



насочено срещу посоката на тока през заменяемия резистор, без това да причини изменение на токовете в клоновете на веригата (фиг. 3.12).

Фиг. 3.12. Към принципа на компенсацията

• **Баланс на мощностите**

За която и да е затворена електрическа верига алгебричната сума от мощността  $\sum P_n$ , отдадена от източниците на електроенергия, е равна на алгебричната сума от мощността, изразходвана в консуматорите на електроенергия  $\sum P_k$ :

За която и да е затворена електрическа верига алгебричната сума от мощността  $\sum P_n$ , отдадена от източниците на електроенергия, е равна на алгебричната сума от мощността, изразходвана в консуматорите на електроенергия  $\sum P_k$ :

суматорите на електроенергия  $\sum P_k$ :

$$\sum P_n = \sum P_k .$$

При захранване само от източници на е.д.н. горното равенство има вида

$$(3.5) \quad \sum EI = \sum RI^2 .$$

3.2.2. **Свързване на елементите на веригата**

• **Резистори**

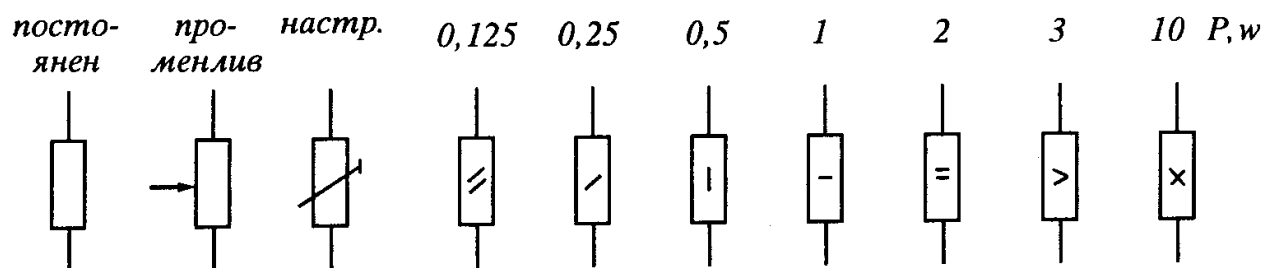
Резисторите са сред най-употребяваните елементи в електротехническите апаратури. Поглъщането на електрическа енергия от резисторите служи като главно средство за нейното регулиране и разпределение в необходимите количества между многобройните вериги и елементи на схемата. Резисторите най-често служат за понижаване на напрежението, за делители на напрежение, за изкуствен товар и т.н. Условното графично изображение на резисторите е посочено на фиг. 3.13.

Някои от по-важните характеристики на резисторите са:

- **Номинална стойност** на съпротивлението на резистора. Определя се от геометричните размери на проводящия елемент и от вида на материала, от който той е изработен. Номиналните стойности на съпротивленията, с

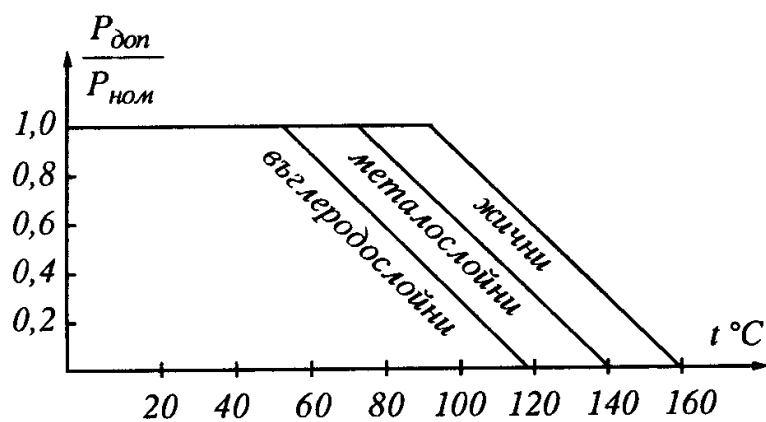
нормирани допустими отклонения, се посочват в съответните стандарти.

- **Номинална мощност** на резистора. Допустимата мощност, която резисторът може да разсейва продължително време в околното пространство при непрекъснат товар и при определени климатични условия, без да се изменят параметрите му.



Фиг. 3.13. Графично изображение на резистори

- **Електрическа якост.** Характеризира безаварийната работа при евентуално превишаване на работното напрежение. Номиналните работни напрежения, за които се оразмеряват резисторите с оглед на диелектричната якост, са: 250, 350, 450, 500, 750, 1 500, 3 000 и 10 000 V. Изискването е резисторите да издържат за определено кратко време (10 s) напрежение, превишаващо 1,5-2 пъти работното, без да настъпи пробив, искрене или нарушаване на работоспособността на съпротивителния елемент.



Фиг. 3.14. Гранични температури за различни видове резистори

ване на работоспособността на съпротивителния елемент.

- **Стабилност.** Характеризира способността на елемента да запазва свойствата си под влиянието на температура, влага и др. На фиг. 3.14 са посочени граничните температури, при които различните видове резистори могат да работят.

### • Свързване на резисторите

#### А. Последователно свързване на резистори

Последователно се нарича такова свързване, при което през всеки от резисторите протича един и същ ток. При последователното свързване на  $n$  резистора токът на зададената (фиг. 3.15a) и токът на еквивалентната (фиг. 3.15б) схема са еднакви. Поради това, съгласно втория закон на

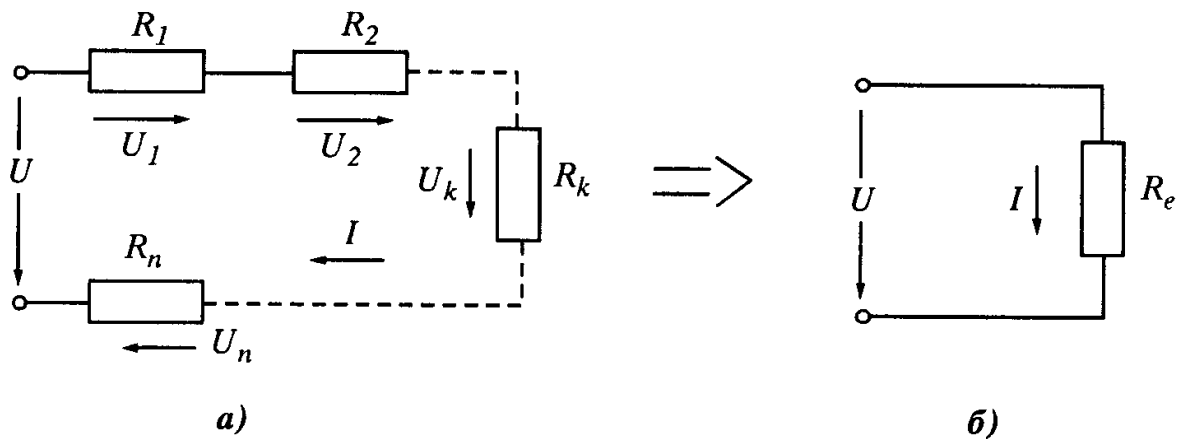
Кирхоф, се записва

$$U_1 + U_2 + \dots + U_k + \dots + U_n = U \quad ,$$

$$R_1 I + R_2 I + \dots + R_k I + \dots + R_n I = R_e I \quad ,$$

откъдето се определя еквивалентното съпротивление:

$$(3.6) \quad R_e = R_1 + R_2 + \dots + R_k + \dots + R_n = \sum_{k=1}^n R_k \quad .$$



Фиг. 3.15. Схема на верига с последователно съединени резистори (а) и нейната заместваща схема (б)

**Еквивалентното съпротивление на последователно съединените резистори е равно на сумата на съпротивленията на отделните резистори.**

Схемата с последователно свързване на резистори може да се разглежда като делител на напрежение, тъй като върху всеки резистор „пада“ напрежение, пропорционално на неговото съпротивление. Действително, ако токът в контура е  $I = U / (R_1 + R_2 + \dots + R_n) = U / \sum R_k$ , напрежението върху кой да е резистор ще бъде:  $U_i = R_i \cdot I = UR_i / \sum R_k$ . Най-често се използва схема с два резистора, като напрежението, например на втория резистор, ще бъде  $U_2 = UR_2 / (R_1 + R_2)$ .

Последователното свързване на консуматори с параметър  $R$  се използва в случаите, когато техните номинални напрежения са по-ниски от напрежението на захранващата мрежа. Ако например консуматорите имат номинално напрежение 110 V, а напрежението на мрежата е 220V, тези консуматори може да се съединят последователно и тогава да се включат под напрежението на мрежата. При това обаче трябва да се има предвид, че

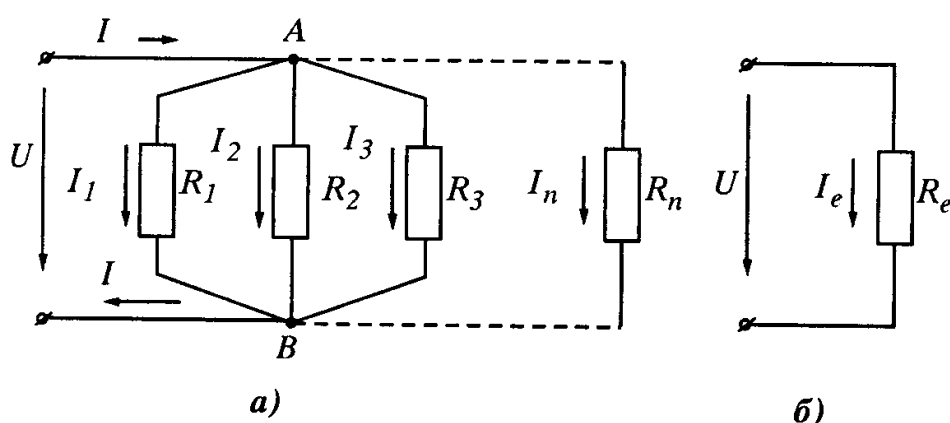
съпротивлението на отделния консуматор е обратнопропорционално на номиналната му мощност. Поради това консуматорът с по-голяма номинална мощност ще бъде ненатоварен, а консуматорът с по-малка мощност ще се претовари. Последователното свързване на консуматори с еднакви номинални напрежения осигурява най-добри условия на работа при еднакви номинални мощности на консуматорите.

### Б. Успоредно свързване на резистори

На фиг. 3.16а е показана схема с  $n$  пасивни клона, присъединени към едни и същи възли  $A$  и  $B$ , чиято разлика в потенциалите е равна на напрежението  $U$  на източника. Поради това токът през всеки един от  $n$ -те клона се определя от напрежението между възлите и съпротивлението (или проводимостта) на клона, т.е.:

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = G_1 U, \quad I_2 = \frac{U}{R_2} = G_2 U, \quad \dots \quad I_n = \frac{U}{R_n} = G_n U.$$

Обстоятелството, че успоредното свързване осигурява еднакво напрежение на всички включени резистори и независимост на техните режими на работа е важно предимство на това съединение, поради което то намира ши-



Фиг. 3.16. Схема на верига с успоредно съединени резистори (а) и нейната еквивалентна схема (б)

роко приложение. Всички консуматори на електрическа енергия трябва да се включват към захранващата мрежа успоредно. За да се характеризира работата на веригата, състояща се от успоредно свързани резистори, се определя еквивалентното ѝ съпротивление. Условието за еквивалентност са спазени, ако протичащият по еквивалентната верига ток  $I_e$  (фиг. 3.16б) е равен на тока  $I$  в неразклонената част на веригата или на сумата от токовете през отделните успоредни клонове:

$$I_e = I = I_1 + I_2 + \dots + I_k + \dots + I_n = \sum_{k=1}^n I_k.$$

Като се замести в това уравнение със стойностите на токовете, опре-

делени от предходните равенства, се получава

$$G_e U = G_1 U + G_2 U + \dots + G_n U \quad ,$$

откъдето може да се изведе формулата за еквивалентната проводимост:

$$G_e = G_1 + G_2 + \dots + G_k + \dots + G_n = \sum_{k=1}^n G_k$$

или формулата за еквивалентното съпротивление:

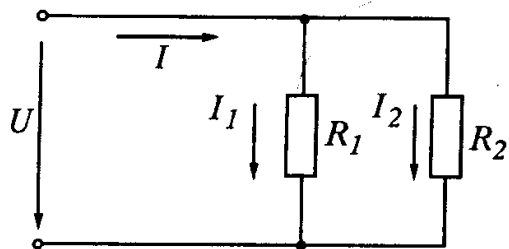
$$(3.7) \quad \frac{1}{R_e} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_k} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad .$$

Следователно, при успоредното свързване еквивалентната проводимост на веригата е равна на сумата от проводимостите на отделните клонове. Тъй като клонът с най-малко съпротивление притежава най-голяма проводимост, проводимостта на веригата с успоредно съединени резистори не може да бъде по-малка от проводимостта на клона с най-малко съпротивление. Еквивалентното съпротивление на веригата, състояща се от успоредно съединени клонове, е обратнопропорционално на еквивалентната ѝ проводимост, поради което е винаги по-малко от най-малкото от съпротивленията на клоновете.

При включване на нов консуматор към мрежата се образува допълнителен успореден клон, при което общата проводимост на веригата се увеличава, а еквивалентното ѝ съпротивление се намалява. Ако успоредно съединените  $n$  клона са с еднакви съпротивления  $R$ , тяхното еквивалентно съпротивление е  $n$ -пъти по-малко от съпротивлението на единия от клоновете:

$$R_e = R/n \quad .$$

Намаляването на общото съпротивление на веригата е съпроводено с увеличаване на тока и мощността.



Фиг. 3.17. Към определянето на тока през кой да е от два успоредни клона

Практически интерес представлява веригата с два успоредно включени резистора със съпротивления  $R_1$  и  $R_2$  (фиг. 3.17). Еквивалентната проводимост на тази схема е  $G_e = G_1 + G_2$ , а еквивалентното съпротивление се получава от равенството

$$1/R_e = 1/R_1 + 1/R_2 \quad ,$$

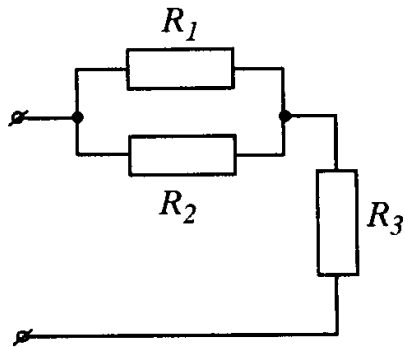
следователно:

$$R_e = R_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2) \quad .$$

Такава схема може да се разглежда като *делител на ток* - токът например в  $R_1$  ще се определи като  $I_1 = G_1 \cdot U$  и, тъй като  $U = I / G_e$ , следва:  $I_1 = I \cdot G_1 / G_e$ . Получената формула е аналогична на тази за делителя на напрежение, с тази разлика, че в нея вместо напрежение имаме ток, вместо проводимост - съпротивление. Ако се замести  $G_1 = 1 / R_1$  и  $G_e = 1 / R_e$ , ще се получи следната удобна формула за тока в първия клон:  $I_1 = IR_2 / (R_1 + R_2)$ . Съгласно този резултат, токът в един от двата успоредни клона на веригата е равен на тока през неразклонения участък на веригата, умножен по отношението на съпротивлението на другия клон към сумата от съпротивленията на клоновете.

### В. Смесено свързване на резистори

При смесеното свързване на резистори веригата представлява съчетание от последователно и успоредно свързани клонове с параметър  $R$ . Пресмятането на такава верига се извършва чрез редица опростявания на отделните ѝ участъци до получаването на верига с един еквивалентен елемент  $R_e$ .



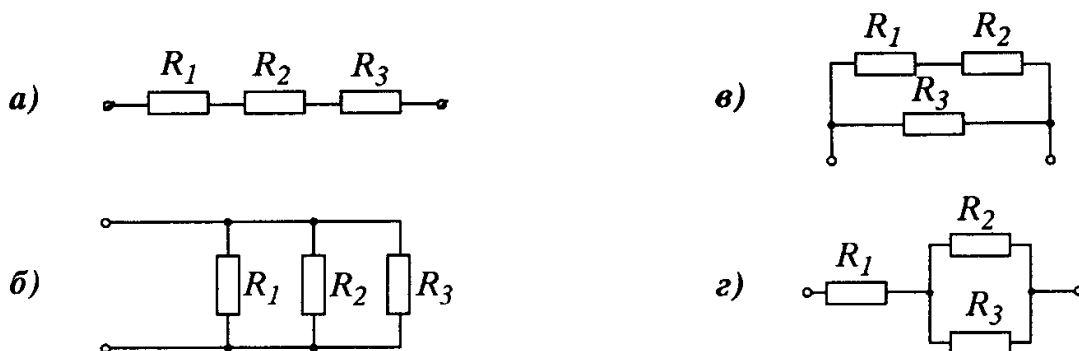
Фиг. 3.18. Схема на верига със смесено свързани резистори

Съпротивлението на този еквивалентен резистор се определя, като се използват формулите за еквивалентното съпротивление при последователното и успоредното свързване на резистори. Така за веригата от фиг. 3.18. се получава:

$$R_e = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} + R_3$$

### Пример 3.1:

Да се определи еквивалентното съпротивление на три еднакви съпротивления по  $12 \Omega$  за всичките им възможни свързвания (фиг. 3.19).



Фиг. 3.19

**Решение:**

$$a) R_{e1} = nR = 3 \cdot 12 = 36 \Omega ,$$

$$б) R_{e2} = \frac{R}{n} = \frac{12}{3} = 4 \Omega ,$$

$$в) R_{e3} = \frac{(R_1 + R_2)R_3}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{(12 + 12)12}{12 + 12 + 12} = 8 \Omega ,$$

$$г) R_{e4} = R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} = 12 + \frac{12 \cdot 12}{12 + 12} = 18 \Omega .$$

• *Свързване на източници на е.д.н.*

Преди да бъдат разгледани случаите на последователно и успоредно свързване на източници на е.д.н. и ток, нека се върнем към еквивалентните схеми на реалните източници - фиг. 3.6б и фиг. 3.6г.

Като използваме втория на Кирхоф за първата схема, можем да запишем

$$E = R_0 I + R_T I = R_0 I + U ,$$

откъдето

$$(3.8) \quad U = E - R_0 I .$$

Последното равенство се нарича още *Закон на Ом за генератора*. Когато товарът е изключен, токът е нула, следователно  $U = E$ .

Към схемата на реалния източник на ток може да се приложи първия закон на Кирхоф за токовете, т.е.  $J = G_0 U + I$ ,

откъдето

$$(3.9) \quad I = J - G_0 U .$$

Графичните зависимости (3.8) и (3.9) са дадени на фиг. 3.7, заедно с тези за идеалните източници.

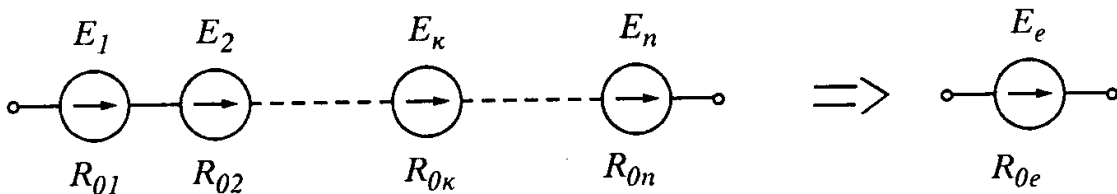
Всеки реален източник на напрежение може да се преобразува в източник на ток, и обратно. Ако уравнението  $U = E - R_0 I$  се раздели на  $R_0$ , се получава:  $U / R_0 = E / R_0 - I$ , където  $U / R_0 = U \cdot G_0$ , а  $E / R_0 = J$  представлява електродвижещ ток, следователно:  $I = J - G_0 U$ , което всъщност е равенство (3.9).



• **Последователно свързване на източници на е.д.н.**

Последователното свързване на източници на е.д.н. се използва в случаите, когато за захранването на даден консуматор е необходимо определено по стойност напрежение, а напрежението само на един източник е недостатъчно. При това съвкупността от  $n$  последователно свързани източника може да се разглежда като един еквивалентен източник (фиг. 3.20), чието е.д.н.  $E_e$  е равно на алгебричната сума от е.д.н. на отделните източници, а вътрешното му съпротивление  $R_{0e}$  - равно на сумата от вътрешните им съпротивления:

$$E_e = \sum_{k=1}^n E_k, \quad R_{0e} = \sum_{k=1}^n R_{0k}.$$

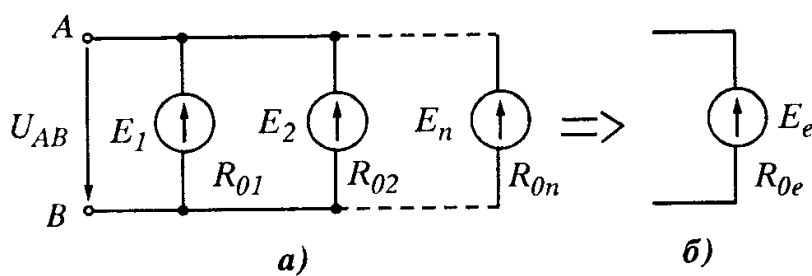


Фиг. 3.20. Последователно свързване на източниците на е.д.н.

• **Успоредно свързване на източници на е.д.н.**

Такова свързване се използва в системи с реални източници, в които мощността само на един източник не е достатъчна за покриване на мощността на консуматорите (фиг. 3.21).

Когато всички е.д.н. и вътрешни съпротивления на източниците са равни, т.е.  $E_1 = E_2 = E_3 \dots = E_n = E$  и  $R_{01} = R_{02} = R_{03} \dots = R_{0n} = R_0$ , схемата на



фиг. 3.21a може да се замени с еквивалентен източник с е.д.н.  $E$  и вътрешно съпротивление  $R_0/n$  - фиг. 3.21б.

Фиг. 3.21. Успоредно свързване на източници на е.д.н.

В случай че указаните параметри са различни, напрежението между възлите  $A$  и  $B$  се определя по формула, която се получава с помощта на показаното по-горе преобразуване на източник на е.д.н. в източник на ток, което

позволява сумирането на всички електродвижещи токове и проводимости:

$$(3.10) U_{AB} = (E_1 \cdot G_{01} + E_2 \cdot G_{02} + E_3 \cdot G_{03} \dots + E_n \cdot G_{0n}) / (G_{01} + G_{02} + G_{03} \dots + G_{0n}) = \\ = \sum E_k \cdot G_{0k} / \sum G_{0k} .$$

Това е *теоремата за еквивалентния генератор* или още *теорема на Милман*.

Ако към изводите *A* и *B* се включи товар с проводимост  $G_T$ , последната се прибавя към сумата в знаменателя на формула (3.10), за да се определи напрежението на товара.

### 3.2.3. Анализ на сложни електрически вериги

Основната задача, която се поставя при пресмятането на сложни електрически вериги, е да се определят токовете в отделните клонове на веригата, когато са известни параметрите ѝ (е.д.н. и  $R$ ).

Като се използват законите на Кирхоф се съставя система от  $m$  на брой уравнения, където  $m$  е броят на клоновете във веригата. *Редът на работа е следният:*

1. Определя се броят на възлите  $n$ . Приемат се произволни положителни посоки на токовете в отделните клонове и за  $n - 1$  възела се записват уравненията по първия закон на Кирхоф. Това е броят на независимите уравнения за токовете. Уравнението за  $n$ -тия възел може да се получи чрез линейна комбинация от уравненията за съседните възли.

2. Останалите  $m - (n - 1)$  уравнения се съставят с помощта на втория закон на Кирхоф. Избират се  $m - (n - 1)$  независими контура. Независими са такива контури, които имат поне един клон, който не се съдържа в другите. Задава се произволно посока на обхода на всеки контур и се съставят за тях съответните уравнения, като е.д.н. и напреженията върху отделните елементи се записват със знак „+“, когато тяхната посока съвпада с посоката на обхода, и с „-“, когато е обратна.

За дадената на фиг. 3.22 схема, която има два възела и три клона, ще се състави едно ( $n - 1 = 2 - 1 = 1$ ) уравнение по първия закон на Кирхоф, а именно:

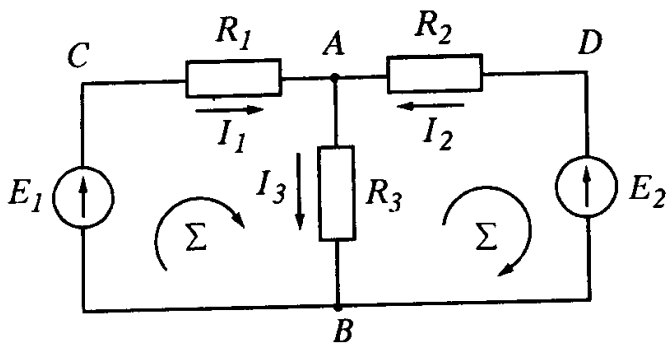
$$I_3 = I_1 + I_2 .$$

По втория закон на Кирхоф ще се съставят  $m - (n - 1) = 3 - (2 - 1) = 2$  уравнения. Избират се контурите *ABCA* и *ADBA* и посока на обхода по часовниковата стрелка:

$$E_1 = R_1 I_1 + R_3 I_3 , \\ -E_2 = -R_2 I_2 - R_3 I_3 .$$

3. Решава се получената система от уравнения. Ако след заместване с числените стойности някой от токовете се получи със знак „-“, това означава, че действителната му посока е обратна на тази, означена на схемата.

Посоченият метод е лесен и удобен за пресмятане, тъй като директно



Фиг. 3.22. Към пресмятането на сложна електрическа верига с помощта на законите на Кирхоф

се прилагат законите на Кирхоф. При по-сложни вериги (с повече клонове и контури) броят на уравненията се увеличава, което затруднява изчисленията и в такива случаи се използват други методи (например метода на контурните токове и др.), описани в съответната специализирана литература, или компютърни програми (напр. MathCad).

### 3.2.4. Режими на работа на електрическата верига

#### • Режим на празен ход (ПХ)

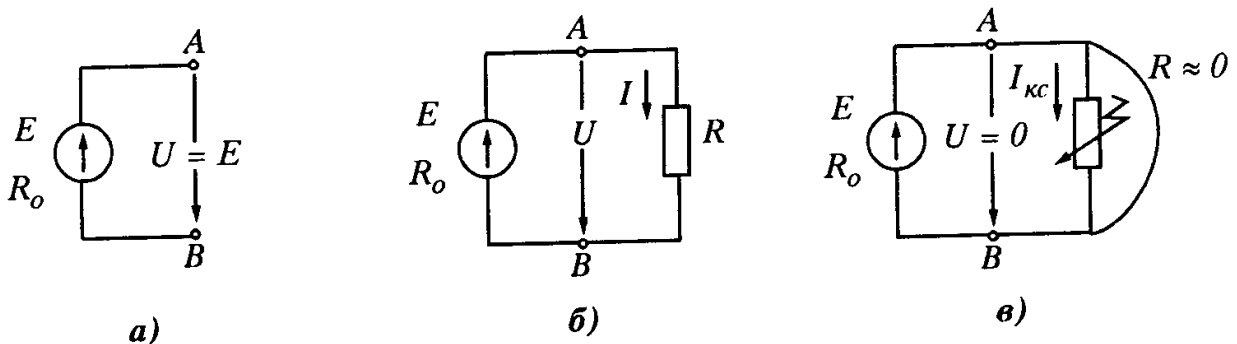
Това е такъв режим, при който електрическата верига е отворена и през нея не протича ток (фиг. 3.23а). При това

$$I = 0, \quad IR = 0 \quad \text{и} \quad U = E,$$

т.е. при този режим, ако към изводите на източника се включи волтметър, той ще измери неговото е.д.н.

#### • Работен режим

При този режим към източника е свързан консуматор със съпротивление  $R$  и през веригата протича ток  $I$  (фиг. 3.23б). Напрежението на източника ще се изменя и ще зависи от големината на протичащия през него ток - вж. уравнение (3.8).



Фиг. 3.23. Режими на работа на електрическата верига: а) празен ход; б) работен режим; в) късо съединение

Равенството (3.8) характеризира електрическото състояние на веригата. Когато напрежението и токът на веригата съответстват на номиналните данни на електрическите устройства (по номиналното напрежение се определя изолацията на проводниците, а по номиналния ток - условията на пределно допустимото им нагряване), веригата работи при номинален режим.

Номиналният режим гарантира най-добри условия на работа (икономичност, дълготрайност и т.н). Обикновено величините, определящи номиналния режим, са посочени в документацията или на корпуса на съответното устройство. Именно тези данни се вземат за база при оразмеряването на електрическите вериги.

• **Режим на късо съединение**

При свързване на изводите на източника с много малко съпротивление  $R \approx 0$  (фиг. 3.23в) се получава т.нар. *късо съединение* (к.с.), при което напрежението на изводите на източника става равно на

$$U = I_{кс} \cdot 0 = 0, \quad \text{т.е. } U = 0 .$$

Тогава токът, който ще протече във веригата, ще бъде

$$I_{кс} = \frac{E}{R_0}$$

и  $I_{кс}$ , поради малката стойност на  $R_0$ , може да добие много големи стойности, което, по правило, прави този режим опасен за източника.

**Контролни въпроси:**

1. Формулирайте законите на Ом и Кирхоф.
2. Какво се разбира под понятието *пад на напрежение*?
3. Как се определя  $R_e$  при последователно и успоредно свързване на  $R$ ?
4. Колко уравнения е необходимо да се съставят при пресмятане на сложна електрическа верига чрез прилагане на законите на Кирхоф?
5. В какви случаи напрежението и електродвижещото напрежение на един източник са числено равни?
6. Защо напрежението на източника на е.д.н. се влияе от големината на протичащия през него ток?

## Четвърта глава

### ЛИНЕЙНИ ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ВЕРИГИ ЗА ПРОМЕНЛИВ ТОК

#### 4.1. Общи положения

##### 4.1.1. Променливотокови синусоидални величини

Променливи е.д.н., ток и напрежение се наричат тези, които се изменят по големина и посока във времето.

Стойностите на тези величини в който и да е момент от времето на тяхното изменение се наричат *моментни стойности*. Означават се, съответно, с  $e$ ,  $u$  и  $i$ .

От определението следва, че

$$e = e(t) , \quad u = u(t) , \quad i = i(t) .$$

Най-често се използват периодичните променливи е.д.н., ток и напрежение, т.е. тези, които след равни интервали от време повтарят стойностите си, като например

$$e = e(t + T) \text{ или } e = e(t + kT) , \quad u = u(t + kT) \text{ и } i = i(t + kT) ,$$

където  $k$  е произволно цяло число, а  $T$  - постоянна величина, наречена *период* на променливата функция. Периодът представлява времето, за което се извършва един пълен цикъл.

Честотата  $f$  е равна на броя на циклите за единица време:

$$(4.1) \quad f = \frac{1}{T} .$$

Измервателната единица за честота е *Херц* ( $Hz$ ),  $1 Hz = 1/s$ .

Най-проста форма на периодичния процес е хармоничното колебание, при което изменението на физическата величина се представя със синусоидална функция. Синусоидалната форма е най-удобна, тъй като пресмятането на веригите за синусоидален ток е относително леко. Освен това, всяка периодична несинусоидална функция може да се разложи в ред на Фурие като сума от синусоидални функции с кратни честоти и да се изследва поотделно действието на всяка от тях. При условие че веригата е линейна, крайният резултат е сума от резултатите, получени за отделните функции.

Синусоидалният ток има това преимущество, че позволява най-икономично да се осъществят производството, предаването, разпределението и използването на електрическата енергия.

Във всички европейски страни електрическата енергия е на трифазен синусоидален ток с честота 50 Hz, а в САЩ и Япония - с честота 60 Hz .

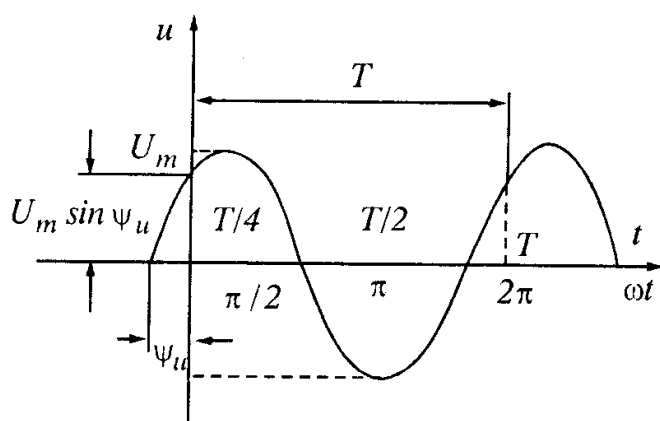
В зависимост от изискванията, в различните области на техниката синусоидалният ток се използва с най-широк честотен диапазон (от части от Hz до милиарди Hz в радиотехниката). На корабите освен ток с променлива честота 50 Hz, широко приложение намира и синусоидалният ток с честота 427 Hz.

Синусоидалните е.д.н., ток и напрежението могат да се представят в следния вид:

$$e = E_m \sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \psi_e\right) ,$$

$$u = U_m \sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \psi_u\right) ,$$

$$i = I_m \sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \psi_i\right) .$$



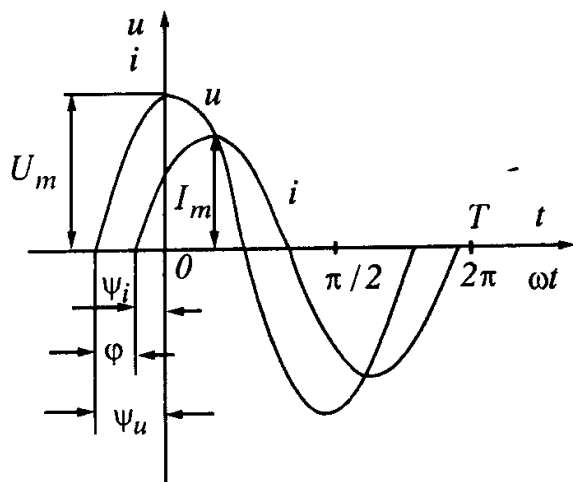
Фиг. 4.1. Графика на променливо напрежение, изменящо се по синусоидален закон

На фиг. 4.1 е показано променливо напрежение, което се изменя по синусоидален закон. Най-големите стойности на  $e$ ,  $u$  и  $i$  се наричат максимални стойности (*амплитуди*) и се отбелязват, съответно, с  $E_m$ ,  $U_m$  и  $I_m$ . Величината  $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$  се нарича *ъглова честота* и се измерва в  $rc/s$ . Аргументът на синусоидалната функция, т.е. величината  $\omega t + \psi$ , се нарича *фаза*. Тя представлява ъгъл, изразен в радиани (или градуси), и е линейна функция на времето. Стойността на фазата при  $t = 0$  (т.е. *въгълът*  $\psi$ ) се нарича *начална фаза*. Когато началната фаза е нула, синусоидата започва от началото на координатната система. При  $\psi > 0$  началото на синусоидата е изместено наляво, а при  $\psi < 0$  - надясно от началото на координатната система.

Ако за няколко синусоидални функции, изменящи се с еднаква честота, началото на синусоидите не съвпада, това означава, че те са дефазирани една спрямо друга по фаза. Фазовата разлика се измерва с разликата на

техните начални фази. Например фазовата разлика между напрежението  $u = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$  и тока  $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$  - фиг. 4.2, е

$$\varphi = \psi_u - \psi_i .$$



Фиг. 4.2. Графики на синусоидално изменящи се ток и напрежение с различни начални фази

Понятието **фазова разлика** има смисъл само при изохронни (с еднаква честота) синусоидални величини. Фазовата разлика между едноименни синусоидални функции (е.д.н., ток или напрежение) се означава с  $\alpha$ , а фазовата разлика между синусоидално напрежение и ток - с  $\varphi$ .

При  $\varphi = 0$  токът и напрежението съвпадат по фаза, при  $\varphi = \pm \pi$  те са в противофаза, а при  $\varphi = \pm \frac{\pi}{2}$  - в квадратура.

#### 4.1.2. Средни и ефективни стойности на синусоидалните величини

Под **средна стойност** на синусоидално изменящата се величина се разбира средната ѝ стойност за един полупериод. Така например средната стойност на ток с нулева начална фаза е

$$I_{cp} = \frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} I_m \sin \omega t dt = \frac{2}{\pi} I_m = 0,637 I_m ,$$

т.е. средната стойност на синусоидалния ток представлява 0,637 от амплитудата му. Аналогично

$$E_{cp} = \frac{2}{\pi} E_m , \quad U_{cp} = \frac{2}{\pi} U_m .$$

За променливотоковите величини обикновено се съди по тяхната **ефективна стойност**. Ефективната стойност на величината се определя като средноквадратичната ѝ стойност за един период. Ефективната стойност на тока е

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t dt} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0,707 I_m .$$

Следователно, ефективната стойност на синусоидалния ток е равна на 0,707 от амплитудата му. Аналогично

$$(4.2) \quad E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}, \quad U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}.$$

Може да се съпостави топлинното действие на синусоидалния ток с топлинното действие на постоянен ток  $I_{пост}$ , протичащ за същото време през същото съпротивление.

Количеството топлина, отделена за един период на синусоидалния ток, е

$$\int_0^T R i^2 dt = R I_m^2 \frac{T}{2}.$$

Отделената за същото време от постоянния ток топлина е равна на

$$R I_{пост}^2 T.$$

След приравняването

$$R I_m^2 \frac{T}{2} = R I_{пост}^2 T \quad \text{или} \quad I_{пост} = I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}.$$

По такъв начин ефективната стойност на синусоидалния ток  $I$  е числено равна на стойността на такъв постоянен ток, който за време, равно на един период на синусоидалния ток, отделя същото количество топлина, каквато и синусоидалният ток.

Следователно с въвеждането на понятието *ефективна стойност на синусоидалния ток* се получава израз за средната мощност за един период на синусоидалния ток от такъв вид, какъвто е и при постоянния ток.

$$\frac{1}{T} \int_0^T i^2 R dt = R \frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt = R I^2.$$

Основно измервателните апарати показват именно ефективната стойност на измерваната величина.

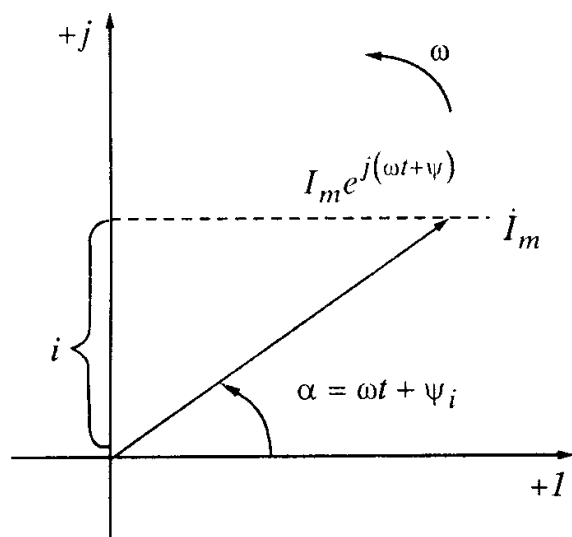
#### 4.1.3. Представяне на синусоидалните е.д.н., ток и напрежение чрез комплексни числа (символичен метод)

Изобразяването на моментните стойности на променливотоковите величини с помощта на графики дава нагледна представа за амплитудите им, техните начални фази и фазовата им разлика. При пресмятането на линейни вериги обаче се налага многократно да се извършват действията съби-



ране и изваждане, диференциране и интегриране на прости хармонични функции, умножаването им с постоянни величини и т.н., което значително усложнява процеса на пресмятането.

Използването на тригонометрични зависимости при пресмятане на електрически вериги е удобно само при прости вериги, докато при сложните се използват аналитични методи, при които електрическите вериги за променлив ток се пресмятат алгебрично, както веригите за постоянен ток. Такъв удобен метод за пресмятане на вериги за променлив ток е *символичният* или *методът на комплексните амплитуди*. Той се основава на представянето на хармоничните функции като проекции на въртящи се вектори в комплексната равнина. *Методът се нарича символичен, тъй като е основан на символичното изобразяване на действителните синусоидални функции на времето с комплексни числа* (въведен е в теорията на променливотоковите вериги от Щайнмец). Така например променливият ток  $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$



Фиг. 4.3. Изобразяване на синусоидален ток чрез въртящ се вектор в комплексна равнина

може да се представи като комплексно число  $\dot{I}_m$ , изобразено в комплексната равнина с въртящ се вектор, числено равен на  $I_m$ , и сключващ ъгъл  $\alpha = (\omega t + \psi_i)$  с оста на реалните стойности  $+1$  (проекцията на вектора  $I_m$  върху оста  $+1$  е равна на  $I_m [\cos(\omega t + \psi_i)]$  - фиг. 4.3.

Проекцията на вектора  $I_m$  върху оста на имагинерните стойности  $+j$  (в електротехниката се използва обозначението  $j$  вместо  $i$ , тъй като с  $i$  се обозначава ток) е равна на  $I_m \sin(\omega t + \psi_i)$ .

И тъй като моментната стойност на тока е  $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$ , следва, че променливият ток  $i$  може да се изобрази чрез комплексното число  $\dot{I}_m$ , чиято проекция върху оста  $+j$  във всеки момент от времето дава величината  $i$ .

В практиката често вместо вектора  $\dot{I}_m$  се използва  $\dot{I}$ , където  $\dot{I} = \frac{\dot{I}_m}{\sqrt{2}}$ , като величината  $\dot{I}$  се нарича *комплексна ефективна стойност на тока* или накратко *комплекс на тока*.

Комплексът на тока  $\dot{I}$  (както всяко комплексно число) може да се представи в следните форми на запис (за момента  $\omega t = 0$ ):

- експоненциална (показателна):

$$\dot{I} = I e^{j\psi_i} ;$$

- тригонометрична (съгласно Ойлер):

$$\dot{I} = I \cos \psi_i + j I \sin \psi_i ;$$

- алгебрична:

$$\dot{I} = I' + j I'' \Rightarrow I' = \operatorname{Re} [I e^{j\psi_i}] , \quad I'' = \operatorname{Im} [I e^{j\psi_i}] ,$$

където модульът

$$I = |\dot{I}| = \sqrt{I'^2 + I''^2} .$$

#### Пример 4.1:

Да се запишат в алгебрична форма на запис комплексите на напрежението и тока, зададени с уравненията

$$u = 100\sqrt{2} \sin(\omega t + 15^\circ) [V] ;$$

$$i = 5\sqrt{2} \sin(\omega t - 20^\circ) [A] .$$

**Решение:**

От зададените уравнения за напрежението и тока следва, съответно:

- за напрежението:

$$U_m = U\sqrt{2} = 100\sqrt{2} V ,$$

т.е.

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{100\sqrt{2}}{\sqrt{2}} = 100 V ,$$

съответно, за началната фаза:

$$\psi_u = 15^\circ ,$$

следователно:

$$U = U e^{j\psi_u} = 100 e^{j15^\circ} = 100 (\cos 15^\circ + j \sin 15^\circ) = (96,50 + j 25,88) V .$$

- за тока:

$$I_m = I\sqrt{2} = 5\sqrt{2} A ,$$

т.е. 
$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{5\sqrt{2}}{\sqrt{2}} = 5 \text{ A} .$$

Съответно, за началната фаза:

$$\psi_i = -20^\circ ,$$

следователно:

$$I = I e^{j\psi_i} = 5 e^{j(-20^\circ)} = 5(\cos 20^\circ - j \sin 20^\circ) = (4,7 - j 1,71) \text{ A} .$$


---

#### 4.1.4. Закони на Ом и Кирхоф в комплексна форма

##### А. Закон на Ом в комплексна форма

Законът на Ом в комплексна форма има вида

$$(4.3) \quad \dot{I} = \frac{\dot{U}}{Z} ,$$

където отношението на комплексното напрежение  $\dot{U}$  към комплексния ток  $\dot{I}$  се нарича *комплексно съпротивление на веригата (комплексен импеданс)* и се означава със

$$Z = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = z \cdot e^{j\varphi} .$$

Комплексната форма на запис на закона на Ом има това предимство, че отчита както връзката между ефективните стойности на напрежението и тока, така и фазовата разлика между тях.

##### Б. Закони на Кирхоф в комплексна форма

Първият закон на Кирхоф, който се прилага за възлова точка от веригата, за моментните стойности на токовете има вида

$$\sum_{k=1}^n i_k = 0 .$$

В комплексна форма той се записва като

$$(4.4) \quad \sum_{k=1}^n \dot{I}_k = 0 .$$

Вторият закон на Кирхоф, който се прилага за контур от веригата, за моментните стойности на е.д.н. и падовете на напрежение има вида

$$\sum e = \sum u .$$

В комплексна форма той се записва като

$$(4.5) \quad \sum \dot{E} = \sum \dot{U} = \sum Z \dot{I} .$$

#### 4.2. Синусоидални ток и напрежение в пасивните елементи на електрическата верига

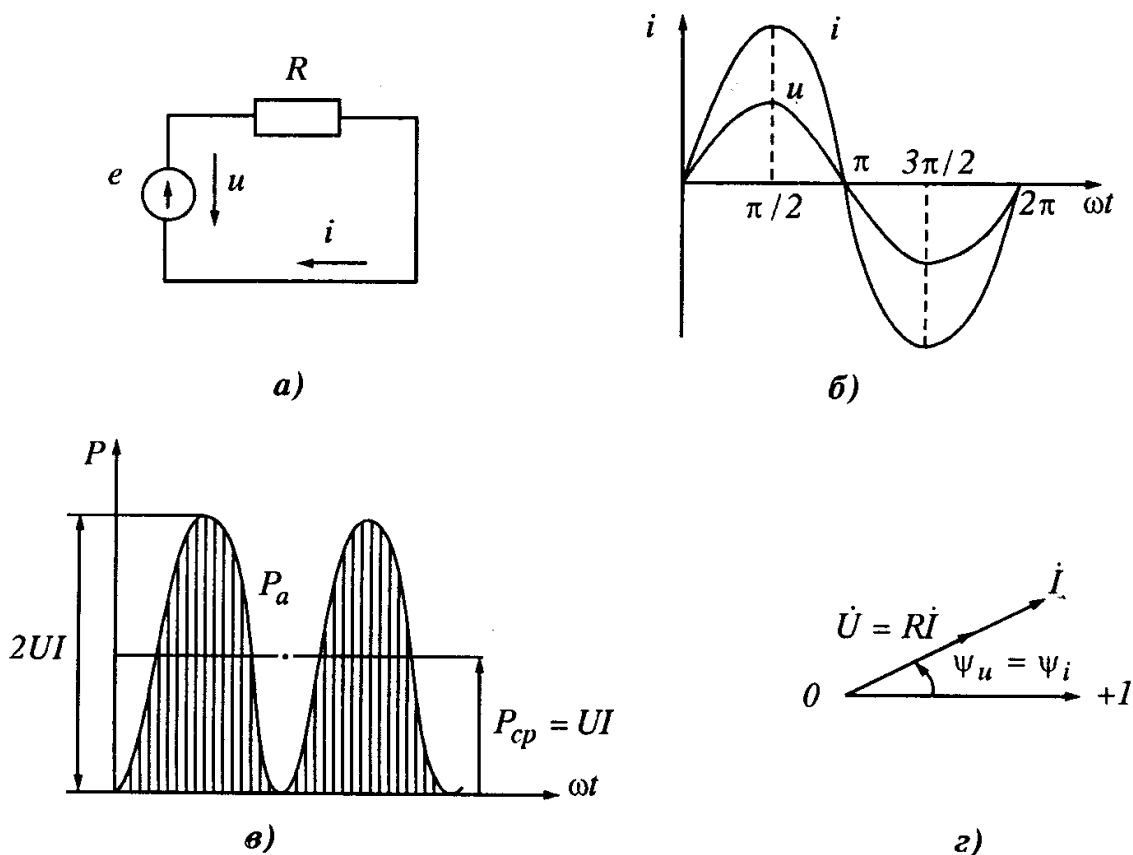
За да се опрости изследването в реалните електрически вериги за променлив ток, те, както и веригите за постоянен ток, се представят със заместващи схеми, съставени от елементи, които отчитат тези явления. При това наименованията на елементите в схемите съвпадат с наименованията на параметрите им.

##### 4.2.1. Резистор

Разглежда се верига, която съдържа резистивен елемент с активно съпротивление  $R$  (фиг. 4.4а), на чийто вход е приложено синусоидално напрежение

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u) .$$

Трябва да се установи как се изменят токът и мощността на тази верига.



Фиг. 4.4. Схема (а) и графики на моментните стойности на напрежението, тока и мощността на верига с активно съпротивление (б, в) и векторна диаграма на комплексите на тока и напрежението (г)

От закона на Ом следва, че токът в резистора е

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m}{R} \sin(\omega t + \psi_u) ,$$

където  $\frac{U_m}{R}$  е неговата амплитуда, следователно:

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_u) .$$

От полученото равенство се вижда, че *токът и напрежението имат еднаква начална фаза, т.е. съвпадат по фаза:*

$$\psi_i = \psi_u = \psi ,$$

при което

$$I_m = \frac{U_m}{R} \quad \text{или} \quad I = \frac{U}{R} .$$

*Следователно, ефективната стойност на тока във верига с активно съпротивление R е равна на ефективната стойност на напрежението, разделена на съпротивлението.*

В комплексна форма:  $\dot{U} = U e^{j\psi_u}$ ,  $\dot{I} = \frac{\dot{U}}{R} = \frac{U e^{j\psi_u}}{R} = I e^{j\psi_u} = I e^{j\psi_i}$  ,

*т.е. комплексът на тока  $\dot{I}$  във верига с параметър R е равен на комплекса на напрежението  $\dot{U}$ , разделен на активното съпротивление R.*

Моментната стойност на мощността на веригата е равна на произведението от моментните стойности на напрежението и тока:

$$\begin{aligned} p &= ui = U_m \sin(\omega t + \psi_u) I_m \sin(\omega t + \psi_i) = U_m I_m \sin^2(\omega t + \psi) = \\ &= U_m I_m \frac{1 - \cos 2(\omega t + \psi)}{2} = UI [1 - \cos 2(\omega t + \psi)] = UI - UI \cos 2(\omega t + \psi) . \end{aligned}$$

Тя се изменя с двойна честота в сравнение с честотата на напрежението и тока, и се колебае в границите от 0 до 2UI. От горното равенство следва, че кривата на мощността p се състои от две съставлящи - постоянна UI и синусоидална - с амплитуда UI и ъглова честота 2ω.

Средната стойност на мощността за един период

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} UI \int_0^T dt - \frac{1}{T} UI \int_0^T \cos 2(\omega t + \psi) dt = UI$$

се нарича *активна мощност*. В разглеждания случай, ако напрежението U се замени с неговото равно RI, за активната мощност се получава

$$P = UI = RI^2 = \frac{U^2}{R} ,$$

т.е. цялата електрическа енергия, която постъпва във веригата, се преобразува в топлина. Измервателната единица за активна мощност е ват,  $W$ .

#### 4.2.2. Индуктивна бобина

Както бе посочено в гл. 1 и гл. 2 на раздела, при протичане на ток в индуктивна бобина в нея се създава магнитно поле, което при промяна на тока се променя, и в бобината се индуцира е.д.н., пропорционално на броя на навивките и скоростта на изменение на потока:

$$e = -w \frac{d\Phi}{dt}$$

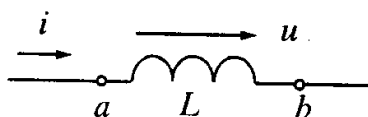
Тъй като според закона на Ом за магнитните вериги магнитният поток е пропорционален на тока:  $\Phi = \frac{w \cdot i}{R_\mu}$ , след заместване се получава

$$e = -w \frac{d\Phi}{dt} = -w \frac{d}{dt} \left( \frac{w \cdot i}{R_\mu} \right) = -\frac{w^2}{R_\mu} \frac{di}{dt}$$

Това е.д.н. е насочено срещу външното напрежение, което създава тока и може да се разглежда като пад на напрежението в бобината при протичане на променлив ток в нея, т.е.



а)



б)

$$u = \frac{w^2}{R_\mu} \frac{di}{dt} = L \cdot \frac{di}{dt}$$

където  $L = \frac{w^2}{R_\mu}$  е коефициент на самоиндукция на бобината или просто *индуктивност*. Единицата за индуктивност, както може да се види от формулата, е  $Wb/A$  или  $H$  (*Henry*).

Практически, всяка намотка (бобина) притежава някаква индуктивност  $L$  и активно съпротивление  $R$ . Следователно, еквивалентната заместваща схема на реалната индуктивна бобина представлява последователно свързване на два елемента с параметри  $L$  и  $R$  (фиг. 4.5а).

Когато се разглежда идеализирана индуктивна бобина, нейното активно съпротивление  $R$  се пренебрегва. Нека във верига с индуктивност  $L$

Фиг. 4.5: а) еквивалентна схема на реална индуктивна бобина; б) идеална индуктивна бобина

(фиг. 4.5б) да протича синусоидален ток

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i) .$$

Тогава напрежението върху нея ще бъде

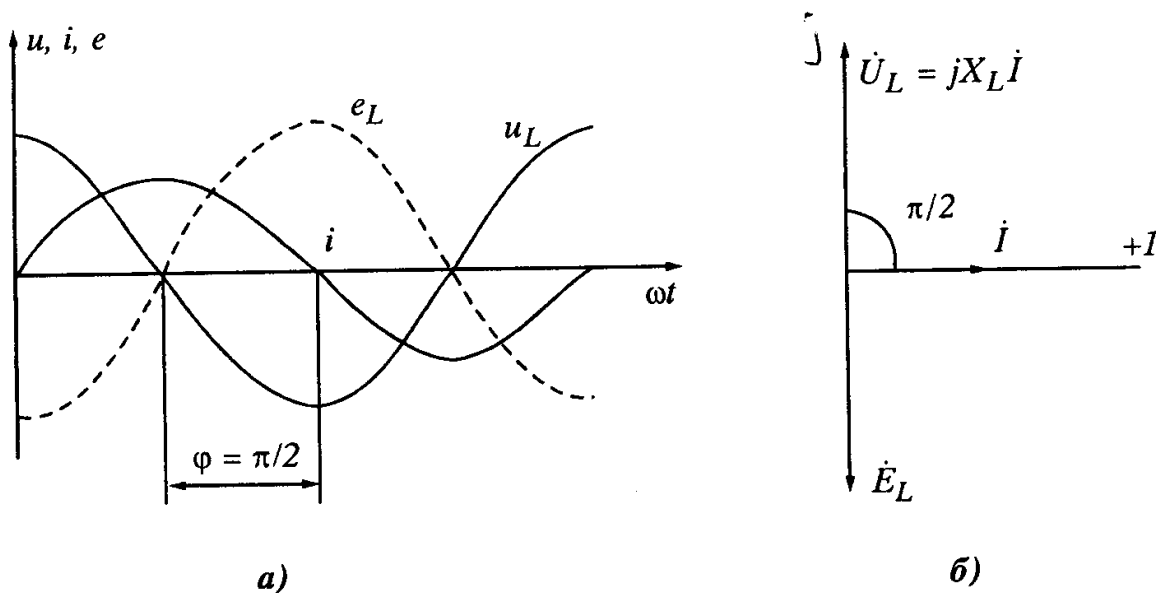
$$u = u_L = L \frac{di}{dt} = \omega L I_m \cos(\omega t + \psi_i) = U_m \sin(\omega t + \psi_i + \pi/2) ,$$

където  $U_m = \omega L \cdot I_m$  .

*Полученият израз показва, че напрежението в краищата на идеалната индуктивна бобина изпреварва тока с фазов ъгъл  $\pi/2$ .*

На фиг. 4.6а са показани графиките на синусоидите на напрежението  $u$ , тока  $i$  и е.д.н. на самоиндукцията  $e_L$  при  $\psi_i = 0$ . От фигурата се вижда, че максималната стойност на напрежението е изместена вляво от максималната стойност на тока на ъгъл  $\pi/2$ . Когато токът преминава през нулевата си стойност, напрежението достига своята положителна или отрицателна максимална стойност, тъй като е пропорционално на скоростта на изменение на тока.

Когато токът достигне максималната си стойност, скоростта на неговото изменение, а следователно и напрежението в краищата на идеалната индуктивна бобина, стават равни на нула.



**Фиг. 4.6:** а) графики на моментните стойности на тока, е.д.н. на самоиндукция и напрежението във верига с идеална индуктивна бобина; б) векторна диаграма на тази верига

От уравнението за  $u_L$  следва, че максималните, съответно ефективните стойности на напрежението и тока, са свързани с равенствата

$$U_m = \omega L I_m = X_L I_m, \quad U = \omega L I = X_L I.$$

Величината  $X_L = \omega L$  има размерност на съпротивление и се нарича *индуктивно съпротивление*, а реципрочната му стойност - *индуктивна проводимост* ( $B_L$ ). Следователно:

$$I_m = B_L U_m, \quad I = B_L U.$$

Ако токът се изрази в комплексна форма, т.е.  $I_m e^{j(\omega t + \psi_i)}$ , от уравнението за напрежението  $u_L$  се получава

$$L \frac{d}{dt} (I_m e^{j\psi_i} \cdot e^{j\omega t}) = j\omega L \cdot I_m e^{j\psi_i} \cdot e^{j\omega t} = jX_L I_m e^{j\omega t} = \dot{U}_m e^{j\omega t},$$

където  $\dot{U}_m = jX_L \dot{I}_m$  или  $\dot{U} = jX_L \dot{I}$ .

Комплексното съпротивление на бобината е

$$Z_L = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = jX_L.$$

Фазовото изместване между тока и напрежението се отчита от множителя  $j = e^{j\pi/2}$ , т.е.:

$$\dot{U} = U e^{j\psi_u} = e^{j\pi/2} X_L I e^{j\psi_i} = X_L I e^{j(\psi_i + \pi/2)},$$

където

$$U = X_L I, \quad \psi_u = \psi_i + \pi/2$$

т.е. напрежението в бобината изпреварва тока с  $\pi/2$ . Ако се търси тока при дадено напрежение  $U e^{j\psi_u}$ , той може да се намери както следва:

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{Z_L} = \frac{U e^{j\psi_u}}{jX_L} = \frac{U e^{j\psi_u}}{e^{j\pi/2} X_L},$$

откъдето  $I = \frac{U}{X_L}$ , а  $\psi_i = \psi_u - \pi/2$ , т.е. токът в бобината изостава по фаза с  $\pi/2$ .



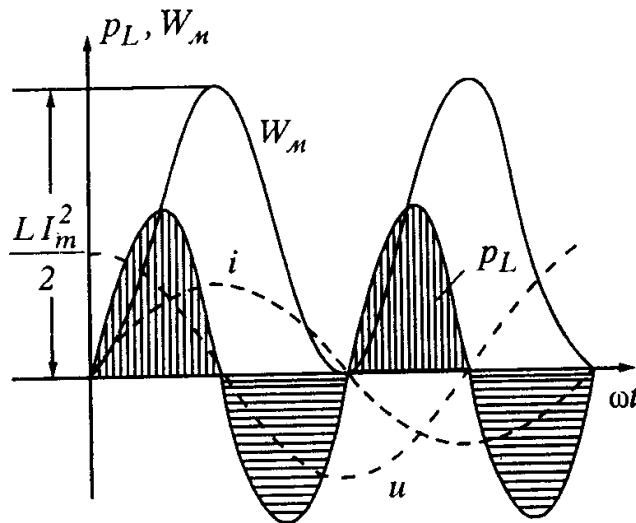
Моментната стойност на мощността на веригата е

$$\begin{aligned} P_L &= u_L i = U_{Lm} \sin(\omega t + \psi_i + \pi/2) I_m \sin(\omega t + \psi_i) = \\ &= U_{Lm} \cos(\omega t + \psi_i) I_m \sin(\omega t + \psi_i) = \\ &= U_{Lm} I_m \frac{\sin 2(\omega t + \psi_i)}{2} = UI \sin 2(\omega t + \psi_i) \end{aligned}$$

т.е. тя се изменя по синусоидален закон с ъгловата честота  $2\omega$  и амплитудата  $UI$  (фиг. 4.7).

Енергията на магнитното поле на бобината се определя с равенството

$$\begin{aligned} W_m &= \frac{Li^2}{2} = \frac{LI_m^2}{2} \sin^2(\omega t + \psi_i) = \frac{LI_m^2}{2} \frac{1}{2} [1 - \cos 2(\omega t + \psi_i)] = \\ &= \frac{LI_m^2}{2} [1 - \cos 2(\omega t + \psi_i)] \end{aligned}$$



Фиг. 4.7. Графики на моментната мощност и енергията на индуктивна бобина при  $\psi_i = 0$

Тя се изменя периодично с ъгловата честота  $2\omega$  в границите от нула до  $\frac{LI_m^2}{2}$  (фиг. 4.7). Енергията

постъпва от източника, натрупва се временно в магнитното поле на бобината и след това се връща отново към източника. Тя достига своя максимум в момента, когато токът в бобината преминава през амплитудните си стойности, след което намалява и добива нулева стойност при ток, равен на нула. По такъв начин енергията се предава от източника към бобината и после обратно - от бобината към източника.

Активната мощност на веригата е

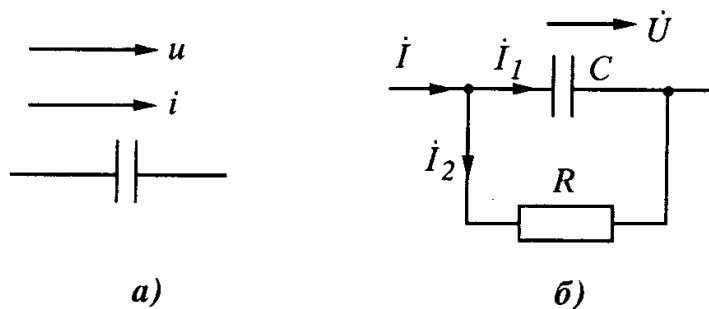
$$P_L = \frac{1}{T} \int_0^T P_L dt = \frac{1}{T} \int_0^T UI \sin 2(\omega t + \psi_i) dt = \frac{1}{T} UI \int_0^T \sin 2(\omega t + \psi_i) dt = 0$$

т.е. активната мощност на верига с индуктивност  $L$  е равна на нула.

### 4.2.3. Кондензатор

Ако приложеното към един кондензатор напрежение не се изменя във времето, зарядът  $q = Ci$  на единия електрод и зарядът  $q = -Ci$  на другия електрод не се изменят и ток през кондензатора не протича ( $i = \frac{dq}{dt} = 0$ ).

Но ако напрежението на кондензатора се изменя във времето, например по синусодален закон, по такъв закон ще се изменя и неговият заряд и кондензаторът ще започне да се презарежда периодично. Това презареждане е съпроводено с протичане на заряден ток. При прилагането на синусодално напрежение към електродите на кондензатора в него се получават някакви загуби на енергия във вид на топлина, обусловени от взаимното триене при завъртане на диполните молекули, а така също и от несъ-



Фиг. 4.8: а) идеален кондензатор; б) заместваща схема на реален кондензатор

вършенството на диелектрика (наличие на неголяма електропроводимост на диелектрика), както и от трептенето на кондензаторните електроди, когато те не са здраво закрепени, и др. Тези загуби може да се отчетат от еквивалентната заместваща схема на реалния кондензатор (фиг. 4.8б), състояща се от два успоредно съединени елемента с параметри  $R$  и  $C$ , като загубите в активното съпротивление имитират загубите на енергия в реалния диелектрик, които обикновено са относително малки и често се пренебрегват.

Нека към веригата с идеализиран кондензатор е включено синусодално напрежение

$$u_C = U_{Cm} \sin(\omega t + \psi_u) .$$

Тогава токът във веригата ще бъде

$$\begin{aligned} i &= \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt} = C \frac{d}{dt} U_{Cm} \sin(\omega t + \psi_u) = \omega C U_{Cm} \cos(\omega t + \psi_u) = \\ &= \omega C U_{Cm} \sin(\omega t + \psi_u + \pi/2) , \end{aligned}$$

или

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_u + \pi/2) .$$

вършенството на диелектрика (наличие на неголяма електропроводимост на диелектрика), както и от трептенето на кондензаторните електроди, когато те не са здраво закрепени, и др. Тези загуби може да се отчетат от еквивалентната заместваща схема на реалния кондензатор (фиг. 4.8б), състояща се от два успоред-

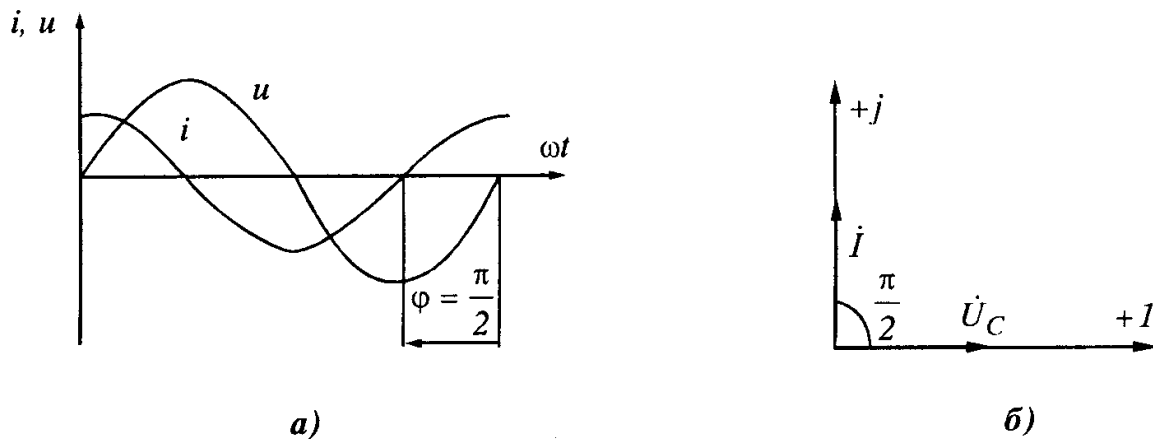
Равенството показва, че токът през кондензатора изпреварва приложеното напрежение с фазов ъгъл  $\pi/2$ .

На фиг. 4.9а са показани графиките на синусоидите на тока  $i$  и на напрежението  $u$ , при  $\psi_u = 0$ . От фигурата се вижда, че токът преминава през нулевата си стойност, когато приложеното напрежение достига своите положителни и отрицателни амплитудни стойности.

По такъв начин, за разлика от веригата с индуктивност, фазовото изместване при веригата с капацитет е отрицателно ( $\varphi = \psi_u - \psi_i = -\pi/2$ ).

От уравнението за  $i$  следва, че максималните (съответно ефективните) стойности на напрежението и тока са свързани с равенствата

$$U_{Cm} = \frac{1}{\omega C} I_m = X_C I_m \quad , \quad U_C = \frac{1}{\omega C} I = X_C I \quad .$$



Фиг. 4.9: а) графики на моментните стойности на тока и напрежението във верига с капацитет; б) векторна диаграма на веригата

Величината  $X_C = \frac{1}{\omega C}$  има размерност на съпротивление и се нарича **капацитивно съпротивление**, а нейната реципрочна стойност  $B_C$  - капацитивна проводимост. Следователно:

$$I_m = B_C U_{Cm} \quad \text{и} \quad I = B_C U_C \quad .$$

Ако напрежението се изрази в комплексна форма, т.е.  $U_m e^{j(\omega t + \psi_u)}$ , от уравнението за тока  $i_C$  се получава:

$$C \cdot \frac{d}{dt} (U_m e^{j\psi_u} \cdot e^{j\omega t}) = j\omega C \cdot U_m \cdot e^{j\omega t} = jB_C U_m \cdot e^{j\psi_u} \cdot e^{j\omega t} = \dot{I}_m e^{j\omega t} \quad ,$$

където  $\dot{I}_m = jB_C \dot{U}_m$  или  $\dot{I} = jB_C \dot{U}$ .

Очевидно, множителят пред  $U$  представлява комплексната проводимост на кондензатора, а комплексното съпротивление е реципрочната ѝ стойност:

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C} = -jX_C .$$

Множителят  $j$  пред комплекса на напрежението показва, че токът изпреварва напрежението с  $\pi/2$  или ако е зададен токът, напрежението ще изостава от него с  $\pi/2$ , както се вижда от равенството  $\dot{U} = Z_C \dot{I} = -jX_C \dot{I}$ .

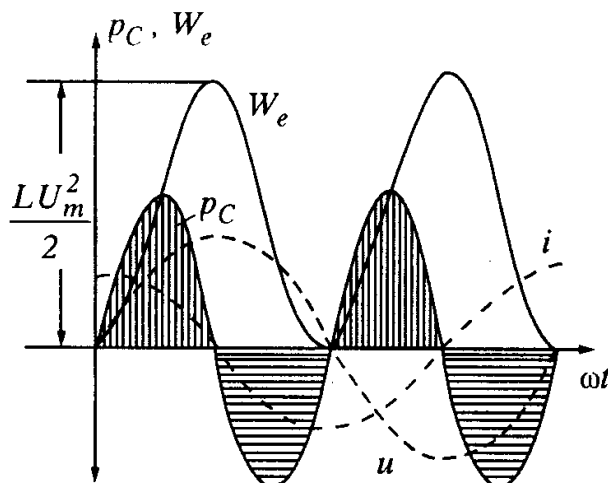
Моментната стойност на мощността на веригата е

$$\begin{aligned} p_C &= u_C i = U_{Cm} \sin(\omega t + \psi_u) I_m \sin(\omega t + \psi_u + \pi/2) = \\ &= U_{Cm} \sin(\omega t + \psi_u) I_m \cos(\omega t + \psi_u) = U_{Cm} I_m \frac{\sin 2(\omega t + \psi_u)}{2} = \\ &= UI \sin 2(\omega t + \psi_u) , \end{aligned}$$

т.е. тя се изменя по синусоидален закон с ъглова честота  $2\omega$  и амплитуда  $UI$  (фиг. 4.10).

Енергията на електрическото поле на кондензатора се определя с равенството

$$\begin{aligned} W_e &= \frac{Cu_C^2}{2} = \frac{CU_{Cm}^2}{2} \sin^2(\omega t + \psi_u) = \frac{CU_{Cm}^2}{2} \frac{1}{2} [1 - \cos 2(\omega t + \psi_u)] = \\ &= \frac{CU_C^2}{2} [1 - \cos 2(\omega t + \psi_u)] . \end{aligned}$$



Фиг. 4.10. Графики на моментната мощност и енергията на верига с параметър  $C$  при  $\psi_u = 0$

Тя се изменя периодично с ъглова честота  $2\omega$  в границите от нула до

$$\frac{CU_C^2}{2} \text{ (фиг. 4.10).}$$

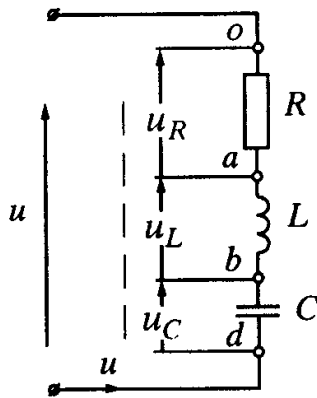
Енергията постъпва от източника, натрупва се временно в електрическото поле на кондензатора и след това се връща отново към източника. Тя достига своя максимум, когато напрежението, приложено към кондензатора, преминава през амплитудните си стойности, след което намалява и добива нулева стой-

ност, когато напрежението стане равно на нула. Следователно и тук, както при веригата с индуктивност, енергията се предава от източника към кондензатора, и обратно. И в този случай активната мощност на веригата е равна на нула ( $P_C = 0$ ).

### 4.3. Свързване на елементите на променливотокова верига

#### 4.3.1. Верига с последователно съединени участъци с активно съпротивление, индуктивност и капацитет

Ако дадена верига, състояща се от последователно съединени участъци с активно съпротивление  $R$ , индуктивност  $L$  и капацитет  $C$  (фиг. 4.11), се включи към източник на променливо напрежение, напрежението на изводите ѝ ще бъде равно на сумата от трите съставлящи:



Фиг. 4.11. Верига с последователно съединени  $R$ ,  $L$  и  $C$  елементи

$$u = u_R + u_L + u_C \quad ,$$

където  $u_R$ ,  $u_L$  и  $u_C$  са, съответно, активното, индуктивното и капацитивното напрежение.

Напреженията на отделните участъци може да се изразят чрез тока на веригата. Напрежението на първия участък  $o-a$  е равно на  $u_R = Ri$ , на

втория участък  $a-b$  - на  $u_L = \frac{Ldi}{dt}$ , а на третия участък  $b-d$  може да се определи чрез заряда на

кондензатора и неговия капацитет като  $u_C = \frac{q}{C}$ ,

откъдето:  $i = \frac{dq}{dt}$ ,  $dq = i dt$  и  $du_C = \frac{dq}{C} = \frac{1}{C} i dt$ .

Следователно:

$$u_C = \frac{1}{C} \int i dt \quad .$$

След заместване се получава интегро-диференциалното уравнение на веригата

$$(4.6) \quad u = Ri + \frac{Ldi}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt \quad .$$

Ако приложеното напрежение се изменя по синусоидален закон

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u) \quad ,$$

токът също ще се изменя по синусоидален закон:

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i) = I_m \sin(\omega t + \psi_u - \varphi) \quad .$$

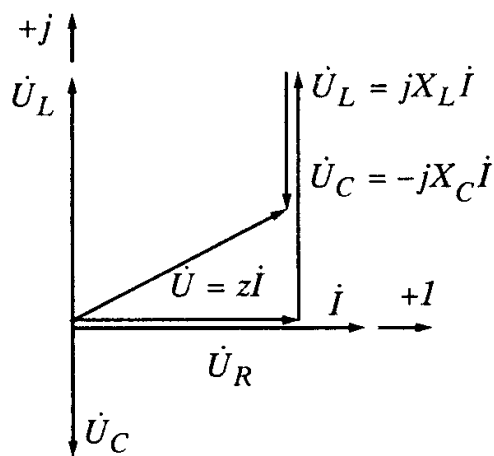
Анализът на веригата се свежда до определяне на амплитудата (съответно на ефективната стойност) на тока и фазовата разлика между напрежението и тока при дадени  $U_m$ ,  $\omega$  и  $\psi_u$ .

Уравнението за напрежението на веригата, съгласно втория закон на Кирхоф, може да се запише в комплексна форма (за ефективните стойности):

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C, \text{ където } \dot{U}_R = RI, \dot{U}_L = jX_L I \text{ и } \dot{U}_C = -jX_C I$$

са комплексните напрежения на резистивния, индуктивния и капацитивния участък. След заместване горното уравнение се записва така:

$$\dot{U} = RI + X_L I + (-X_C) I = I \left( R + j\omega L - \frac{j}{\omega C} \right) = ZI$$



Фиг. 4.12. Векторна диаграма на напреженията на веригата от фиг. 4.11

На фиг. 4.12 е изобразена векторната диаграма на напреженията за разглежданата верига.

Токът има вида

$$I = \frac{\dot{U}}{R + j\omega L - \frac{j}{\omega C}}$$

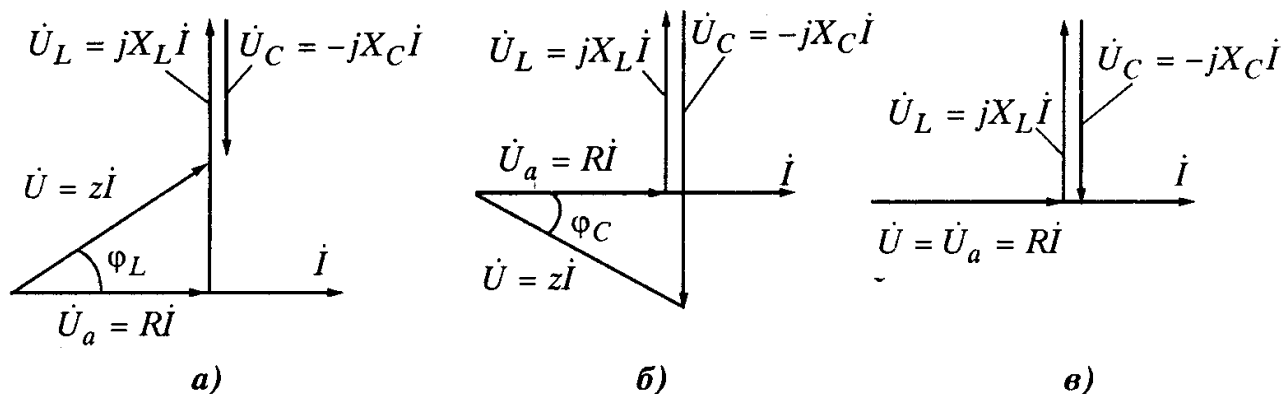
От тази зависимост следва, че съгласно закона на Ом в комплексна форма из-

разът  $R + j\omega L - \frac{j}{\omega C}$  представлява комплексното съпротивление  $Z$  на разглежданата верига, където

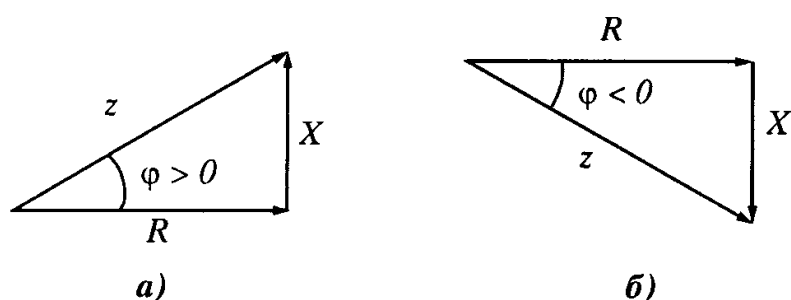
$$(4.7) \quad Z = R + j\omega L - \frac{j}{\omega C} = R + j(X_L - X_C) = R + jX$$

или 
$$Z = z e^{j\varphi} = \sqrt{R^2 + X^2} e^{j\varphi}$$

В зависимост от съотношението между индуктивното и капацитивно съпротивление на веригата, тя може да има индуктивен характер ( $X_L > X_C$ ), капацитивен характер ( $X_L < X_C$ ) или да е в състояние на резонанс ( $X_L = X_C$ ), т.е. да представлява чисто активно съпротивление. Векторните диаграми за посочените случаи са показани на фиг. 4.13а, б и в.



Фиг. 4.13. Векторни диаграми на верига, състояща се от последователно съединени  $R$ ,  $L$  и  $C$  елементи



Фиг. 4.14. Триъгълник на съпротивленията: а) при индуктивен характер на веригата ( $\varphi > 0$ ); б) при капацитивен характер на веригата ( $\varphi < 0$ )

Ако страните на триъгълника на напреженията се разделят на общия множител  $I$ , се получава подобен триъгълник на съпротивленията с хипотенуза  $z$  и катети  $R$  и  $X$  (фиг. 4.14).

От триъгълника на съпротивленията следва:

$$R = z \cos \varphi, \quad X = z \sin \varphi, \quad z = \sqrt{R^2 + X^2}.$$

Фазовият ъгъл между напрежението и тока се определя като

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{X}{R}.$$

### Пример 4.2:

Към последователно свързани резистор със съпротивление  $20 \Omega$  и идеална бобина с индуктивност  $50 \text{ mH}$  е приложено напрежение

$$u = 10\sqrt{2} \cdot \sin 314t \text{ V}.$$

Да се намери токът във веригата и напрежението върху отделните елементи.

### Решение:

Използва се комплексната форма на напрежението, тока и съпротив-

лението:

$$\dot{U} = U \cdot e^{j\psi u} = 10 \cdot e^{j0} \text{ V} ,$$

$$Z = R + jX_L = 20 + j(314 \cdot 0,050) = 20 + j15,7 \Omega .$$

Тъй като за да се изчисли тока трябва напрежението да се раздели на комплексното съпротивление, е удобно последното да се преобразува в експоненциална форма, т.е.

$$Z = z \cdot e^{j\varphi} ,$$

където

$$z = \sqrt{(20^2 + 15,7^2)} = 25,43 \Omega ,$$

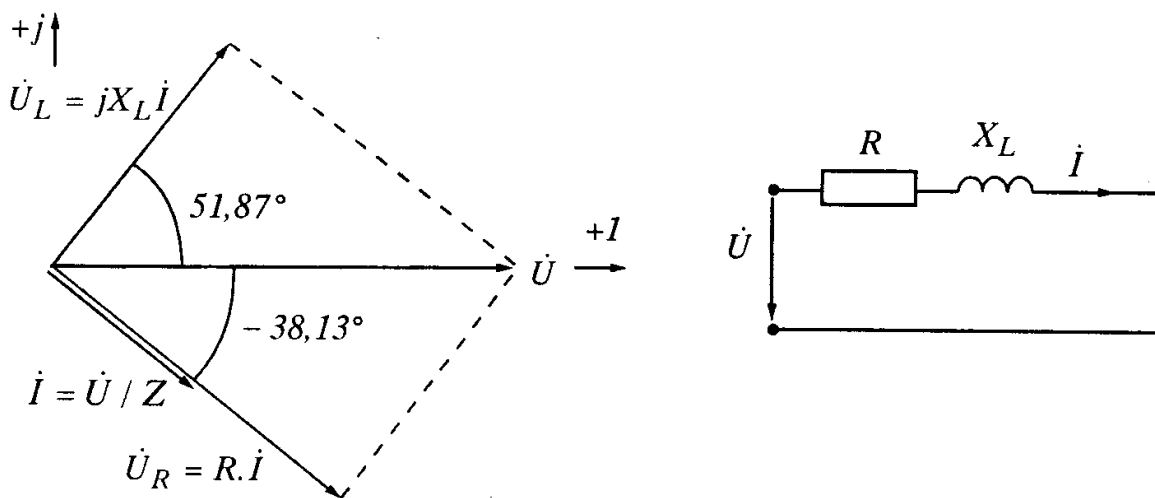
$$\varphi = \text{arctg}\left(\frac{15,7}{20}\right) = 38,13^\circ .$$

Следователно

$$Z = 25,43 \cdot e^{j38,13} \Omega ,$$

а комплексният ток има стойност

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{Z} = \frac{10 \cdot e^{j0}}{25,43 \cdot e^{j38,13}} = 0,39 \cdot e^{-j38,13} \text{ A} .$$



Фиг. 4.15. Към пример 4.2

Напреженията върху отделните елементи са:

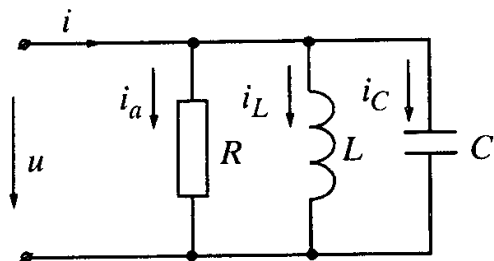
$$\dot{U}_R = R \cdot \dot{I} = 20 \cdot 0,39 \cdot e^{-j38,13} = 7,8 \cdot e^{-j38,13} \text{ A} ,$$

$$\dot{U}_L = jX_L \cdot \dot{I} = e^{j\frac{\pi}{2}} 15,7 \cdot 0,39 \cdot e^{-j38,13} = 6,17 \cdot e^{j51,87} \text{ V} .$$



Полученият резултат показва, че токът във веригата изостава от напрежението с  $38,13^\circ$ ; напрежението на резистора съвпада по фаза с тока, а напрежението върху бобината е изместено с  $90^\circ$  спрямо тока, но спрямо реалната ос, от която се отчита фазовия ъгъл, е изместено на  $+51,87^\circ$ , фиг. 4.15.

#### 4.3.2. Верига с успоредно съединени участъци с активно съпротивление, индуктивност и капацитет



Фиг. 4.16. Верига с успоредно съединени  $R$ ,  $L$  и  $C$  елементи

Разглежда се верига, състояща се от три успоредно съединени клона с параметри, съответно,  $R$ ,  $L$  и  $C$  (фиг. 4.16).

По първия закон на Кирхоф следва

$$i = i_a + i_L + i_C ,$$

където  $i_a$ ,  $i_L$  и  $i_C$  са активният, индуктивният и капацитивният ток, определени съответно като:

$$i_a = \frac{u}{R} = Gu ,$$

$$i_L = \frac{1}{L} \int u dt ,$$

$$i_C = C \frac{du}{dt} .$$

След заместване се получава интегрално-диференциалното уравнение на веригата

$$(4.8) \quad i = \frac{1}{R}u + \frac{1}{L} \int u dt + C \frac{du}{dt} .$$

Ако към веригата се приложи синусоидално напрежение

$$u = U_m \sin \omega t ,$$

токът също ще бъде синусоидален и може да се представи в следния вид:

$$i = I_m \sin(\omega t - \varphi) .$$

В комплексна форма уравнението за токовете се записва по следния начин:

$$\dot{I} = \dot{I}_R + \dot{I}_L + \dot{I}_C .$$

Всеки от тях може да се изрази чрез напрежението и съпротивлението (проводимостта) така:

$$\dot{I}_R = \frac{\dot{U}}{R} = \dot{U} \cdot G, \quad \dot{I}_L = \frac{\dot{U}}{jX_L} = -jB_L \cdot \dot{U}, \quad \dot{I}_C = \frac{\dot{U}}{-jX_C} = jB_C \cdot \dot{U},$$

където  $G = \frac{1}{R}$  е активна проводимост;

като:  $B = B_L - B_C$  - реактивна проводимост,

$B_L = \frac{1}{\omega L}$  - индуктивна проводимост;

$B_C = \omega C$  - капацитивна проводимост.

След заместване

$$\dot{I} = G \cdot \dot{U} + jB_C \cdot \dot{U} - jB_L \cdot \dot{U} = [G + j(B_C - B_L)] \cdot \dot{U} = Y \cdot \dot{U},$$

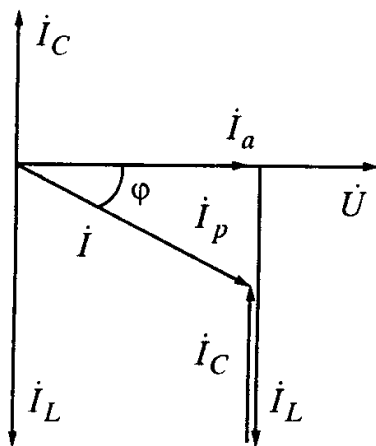
където  $Y = G + j(B_C - B_L)$  представлява еквивалентна комплексна проводимост, съдържаща активна ( $G$ ) и реактивна ( $B = (B_C - B_L)$ ) проводимост.

В експоненциална форма тя има вида

$$Y = y \cdot e^{j\psi},$$

където

$$Y = \sqrt{G^2 + B^2}, \quad \psi = \operatorname{arctg} \frac{B_C - B_L}{G}.$$



Както следва от формулата за ъгъла  $\psi$ , той е положителен, когато  $B_C > B_L$  и тогава токът изпреварва напрежението, а при  $B_C < B_L$  ъгълът  $\psi$  е отрицателен и токът изостава от напрежението. При равенство на двете проводимости ( $B_C = B_L$ ) настъпва резонанс на токовете (вж. т. 4.4).

Векторната диаграма на токовете е дадена на фиг. 4.17.

**Фиг. 4.17. Векторна диаграма на токовете на верига от фиг. 4.16**

## 4.4. Резонансни явления в електрическите вериги

### 4.4.1. Понятие за резонанс в електрическите вериги

Реактивните съпротивления или проводимости на отделните участъци на веригата могат да са както положителни, така и отрицателни величини и, следователно, да се компенсират взаимно. Поради това са възможни случаи, при които реактивното съпротивление или реактивната проводимост на цялата верига да се окажат равни на нула, при което токът и напрежението на входа на веригата ще съвпадат по фаза и веригата като цяло, ще представлява чисто активно съпротивление. *Когато при наличието на реактивни съпротивления или проводимост токът в електрическата верига съвпадне по фаза с приложеното към нея напрежение, във верига настъпва резонанс.*

### 4.4.2. Резонанс на напреженията

Във веригата с последователно съединени  $R$ ,  $L$  и  $C$  елементи (фиг. 4.11) възниква *резонанс на напреженията*, когато

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}, \quad \text{т.е.} \quad X_L = X_C.$$

При това условие от уравнението за напреженията в последователния контур

$$\dot{U} = R \cdot \dot{I}_0 + jX_L \cdot \dot{I}_0 - jX_C \cdot \dot{I}_0$$

следва, че напреженията върху бобината и кондензатора са равни по големина и противоположни по знак, и взаимно се компенсират, при което

$$\dot{U} = R \cdot \dot{I}_0,$$

т.е. резонансният ток  $I_0$  ще съвпада по фаза с напрежението и неговата стойност ще се определя само от активното съпротивление в контура. При малки стойности на  $R$  тази стойност може да бъде значителна. При заместване в уравнение (4.8) с  $I_0 = \frac{U}{R}$  се получава:

$$\dot{U} = \frac{R \cdot \dot{U}}{R} + j \frac{X_L}{R} \cdot \dot{U} - j \frac{X_C}{R} \cdot \dot{U}.$$

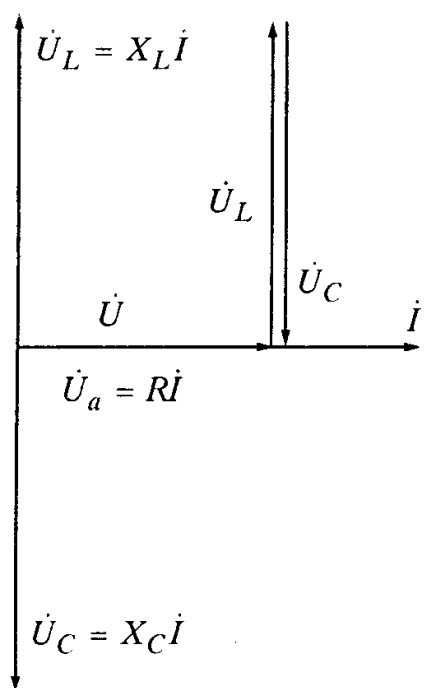
От това равенство се вижда, че напрежението върху бобината изпреварва захранващото напрежение с  $90^\circ$ , а напрежението върху кондензатора изостава с  $90^\circ$ , като по големина е толкова пъти по-голямо, колкото пъти е по-голямо реактивното съпротивление на елемента от активното съпротивление в контура.

На фиг. 4.18 е показана векторна диаграма на веригата при резонанс.

Както се вижда от нея и от приведените съотношения, при резонанс веригата, независимо от наличието в нея на индуктивност и капацитет, се проявява като чисто активно съпротивление. Токът съвпада по фаза с напрежението и получава своята най-голяма стойност, а напреженията върху бобината и кондензатора взаимно се компенсират.

Тъй като условието за резонанс е равенството  $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ , то при дадени две величини от трите ( $L, C, \omega$ ) резонанс може да се получи чрез подбор на третата величина. Следователно, резонанс ще настъпи при

$$L_0 = \frac{1}{\omega^2 C}, \quad C_0 = \frac{1}{\omega^2 L} \quad \text{и} \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$



Фиг. 4.18. Векторна диаграма на последователната  $R, L, C$  верига при резонанс

Ъгловата честота  $\omega_0$ , при която се получава резонансът, се нарича резонансна ъглова честота или **собствена ъглова честота** на електрическата верига.

Тогавя резонансната честота  $f_0$  се определя от равенството

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Уравненията за  $\omega_0$  и  $f_0$  са известни като **уравнения (формули) на Томсон**.

Индуктивното и капацитивно съпротивление при резонанс са равни, т.е.:

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} = \frac{\sqrt{LC}}{C} = \sqrt{\frac{L}{C}} = \rho.$$

Величината  $\rho$  има размерност на съпротивление и се нарича **характеристично (вълново) съпротивление на електрическата верига**, а отношението

$$Q = \frac{\rho}{R}$$

се нарича **качествен фактор** на веригата.

Качественият фактор е равен също и на отношението на индуктивното или на капацитивното напрежение при резонанс към напрежението на ця-

лата верига. Реципрочната величина

$$d = \frac{1}{Q} = \frac{R}{\rho}$$

се нарича *затихване* на веригата.

Условието за превишаване на напрежението на бобината  $U_{L0}$  и кон-

дензатора  $U_{C0}$  над входното напрежение  $U$  на веригата при резонанс е

$$Q > 1 \text{ или } d < 1 .$$

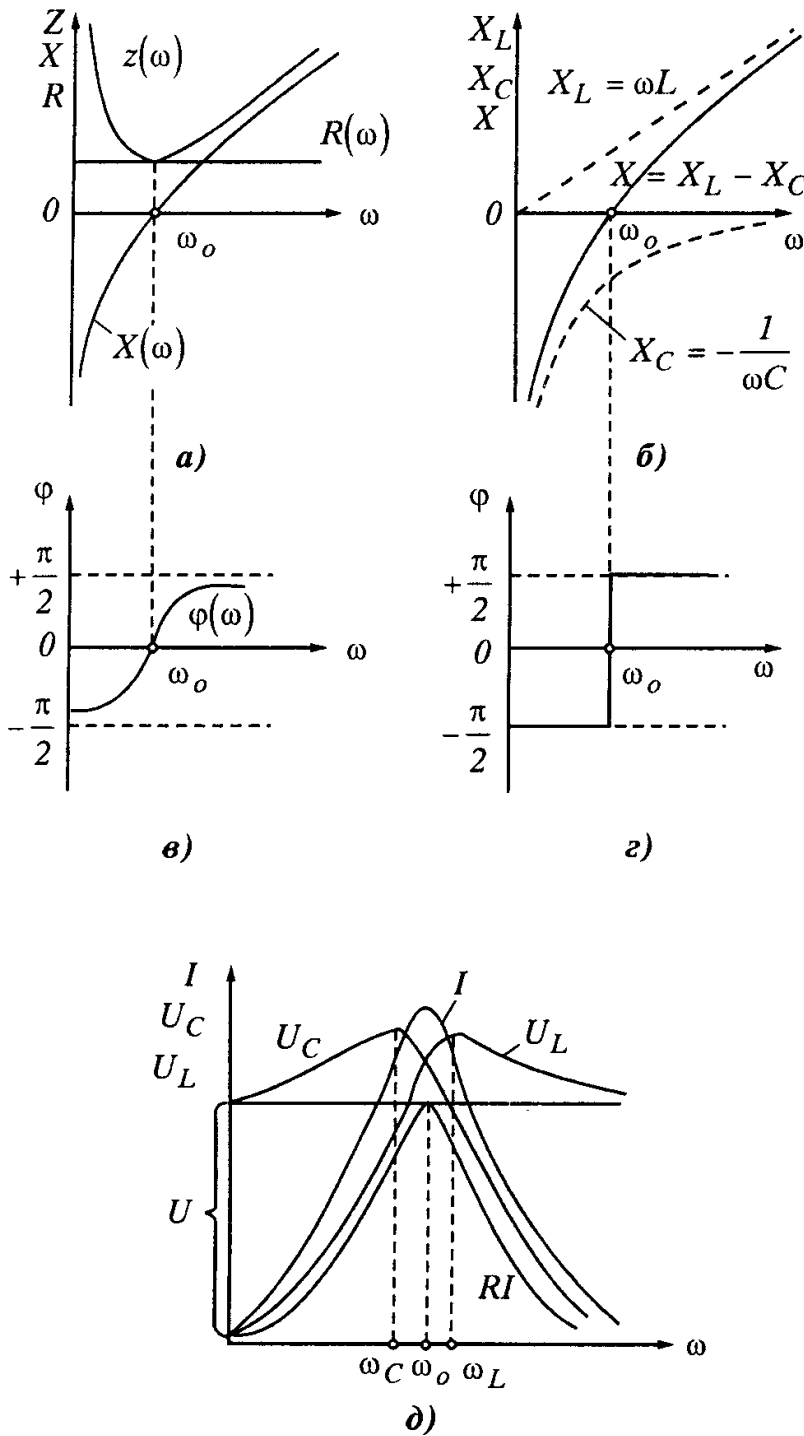
Тогава напреженията  $U_{L0}$  и  $U_{C0}$  са по-големи от приложеното напрежение  $Q$  пъти.

Зависимостта на пълното съпротивление  $z$ , реактивните съпротивления, напреженията, токът и ъгълът на дефазирание  $\varphi$  от честотата  $\omega$  са показани на фиг. 4.19. Тези зависимости се получават от формулите за тока и фазовата разлика между напрежението и тока, и са, съответно:

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \frac{U}{R'}$$

$$\varphi = \text{arctg} \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} = 0 .$$

Активното съпротивление  $R(\omega)$  не зависи от честотата. Реактивното съ-



Фиг. 4.19. Честотни характеристики на последователната  $R, L, C$  верига

ротивление  $X = X_L - X_C$  при различни стойности на честотата  $\omega$  се променя значително. В момента на резонанса става изменение на характера на реактивното съпротивление. Ако при  $\omega < \omega_0$  то е имало капацитивен характер ( $X < 0$ ,  $\varphi < 0$ ), при  $\omega > \omega_0$  придобива индуктивен характер ( $X > 0$ ,  $\varphi > 0$ ). В частния случай, ако  $R = 0$  при честота  $\omega = \omega_0$ , настъпва скокообразно изменение на ъгъла  $\varphi$  от  $-\pi/2$  до  $+\pi/2$ , т.е. обръщане на фазата.

Токът  $I$  е равен на 0 при  $\omega = \infty$  и е максимален при резонанс, когато  $\omega = \omega_0$ . Аналогично се изменя и активното напрежение,  $U_a = RI$ , при което функцията  $U_a = U_a(\omega)$  има същия вид, както и  $I = I(\omega)$ , като получава максималната си стойност  $U_{a0} = U$  при  $\omega = \omega_0$ .

Тъй като при резонанс или в състояние, близко до резонанса, при  $Q > 1$ , напреженията  $U_L$  и  $U_C$  стават по-големи от напрежението, приложено на входа на веригата, и когато тези стойности са неочаквани, те могат да се окажат опасни за съответните елементи. В много случаи обаче електрическата верига се настройва в резонанс за дадена честота, като се цели да се получат колкото се може по-високи напрежения върху реактивните елементи. Затова качественият фактор трябва да има големи стойности. Поради това в електрическите вериги не се включва активно съпротивление, а вместо него остава само съпротивлението на проводника, от който е навита индуктивната бобина. Така образуваната електрическа верига само от  $L$  и  $C$  се нарича *третящ кръг*.

#### 4.4.3. Резонанс на токовете

Веригата от фиг. 4.16 изпада в състояние на резонанс при изпълнение на условието

$$B = B_L - B_C = 0,$$

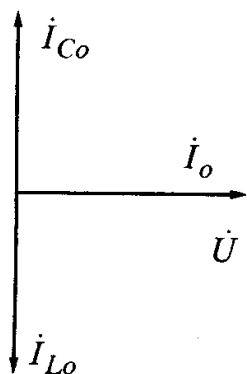
или 
$$\frac{1}{\omega L} - \omega C = 0, \quad \text{т.е.} \quad \frac{1}{\omega L} = \omega C.$$

При горното условие, от уравнението за токовете

$$\dot{I} = G \cdot \dot{U} + jB_C \cdot \dot{U} - jB_L \cdot \dot{U}$$

Фиг. 4.20. Векторна диаграма на веригата от фиг. 4.16 при резонанс

следва, че общият ток се определя само от активната проводимост, т.е.  $\dot{I} = \dot{I}_0 = G \cdot \dot{U}$ , а токовете в реактивните елементи са равни по големина и противоположни по фаза, което означава, че те взаимно се компенсират (векторната диаграма е дадена на фиг. 4.20).



При резонанс реактивната проводимост на веригата е равна на нула и пълната проводимост получава възможната си най-малка стойност, при което общият ток  $I_o$  е минимален (за разлика от резонанса в последователната  $R, L, C$  верига). Токовете в клоновете на веригата са, съответно:

$$I_{Ro} = \frac{U}{R} = I_o ,$$

$$I_{Lo} = \frac{U}{\omega L} = \frac{R}{\omega L} I_o ,$$

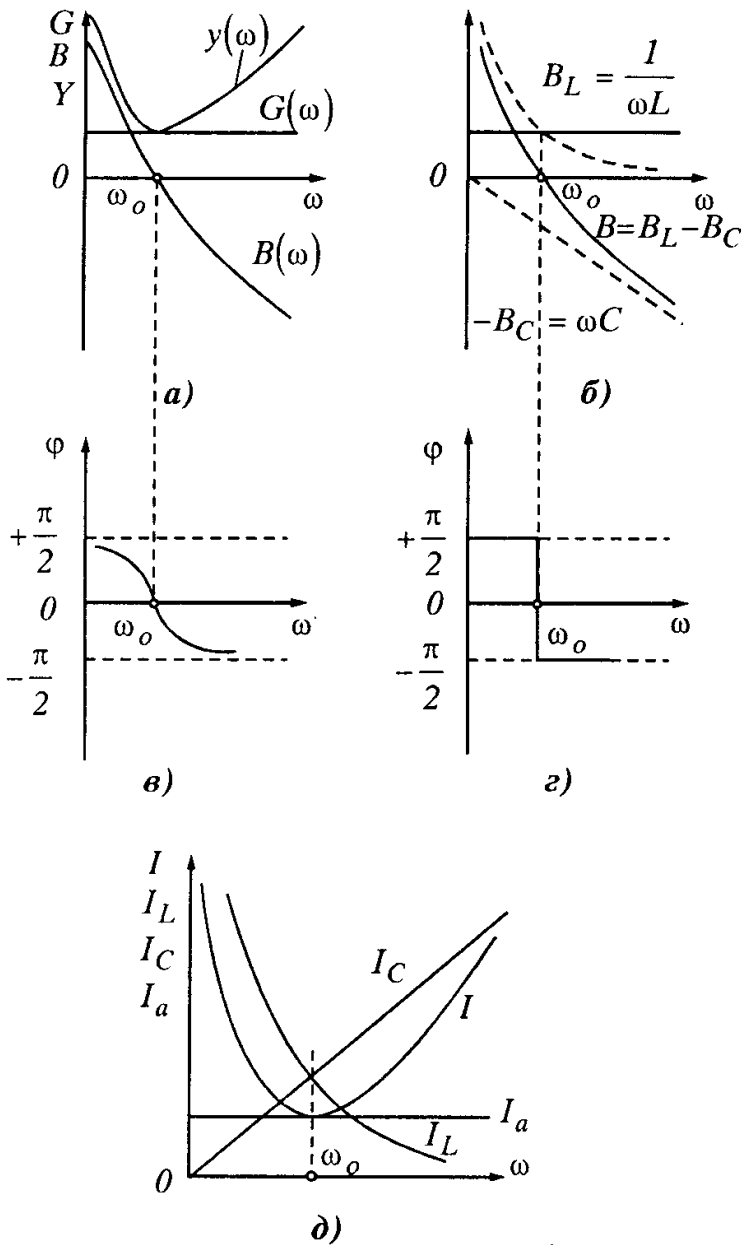
$$I_{Co} = \omega C U = R \omega C I_o .$$

При  $\frac{1}{\omega L} = \omega C > \frac{1}{R}$  токът

$I_{Lo} = I_{Co} > I_o = I_{Ro}$ , т.е. реактивните токове  $I_L$  и  $I_C$  ще бъдат по-големи от общия ток на веригата, който от своя страна е равен само на тока през активното съпротивление. Затова резонансът във веригата с успоредно съединени  $R, L, C$  елементи се нарича *резонанс на токовете*.

Честотните характеристики на веригата са показани на фиг. 4.21.

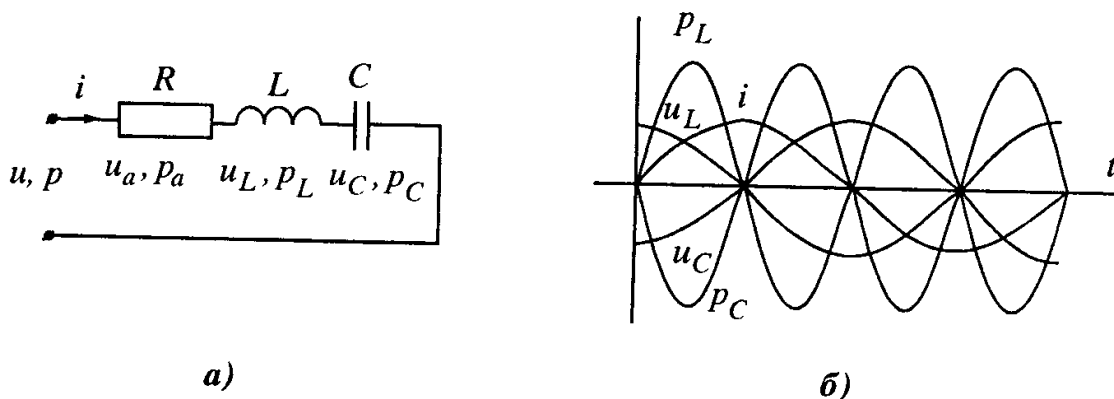
Резонансът на токовете намира широко приложение за компенсиране на реактивните токове на различните консуматори на електрическа енергия. Например при консуматори, чийто ток има индуктивен характер (асинхронни двигатели), реактивната индуктивна съставляваща на тока може да се компенсира чрез успоредно свързване на кондензатори с подходящ капацитет към консуматора, което от своя страна довежда до намаляване на загубите на електрическа енергия и до подобряване на фактора на мощност.



Фиг. 4.21. Честотни характеристики на успоредната  $R, L, C$  верига

#### 4.5. Мощност при променливия ток. Фактор на мощността

Като пример за определяне на мощността на една верига за синусоидален ток се разглеждат енергийните процеси във верига, състояща се от последователно съединени участъци с  $R$ ,  $L$  и  $C$  параметри (фиг. 4.22а).



Фиг. 4.22. Към определяне на мощността

Уравнението за напреженията на веригата има вида

$$u = u_R + u_L + u_C .$$

Съответно, за моментната мощност на изводите на веригата и на отделните ѝ участъци се получава уравнението

$$p = ui = u_R i + u_L i + u_C i = p_R + p_L + p_C = Ri^2 + \frac{d}{dt}(W_m) + \frac{d}{dt}(W_e) .$$

Вижда се, че мощността на участъка с активно съпротивление  $R$  е винаги положителна величина и характеризира необратимия процес на поглъщане на енергия от източника. Мощността  $p_L = \frac{d}{dt}(W_m)$  определя скоростта на постъпване на енергия в магнитното поле на бобината, а мощността  $p_C = \frac{d}{dt}(W_e)$  - скоростта на постъпване на енергия в електрическото поле на кондензатора.

За да се поясни обмяната на мощност между елементите на последователния контур на фиг. 4.22а, се използва фиг. 4.22б, която съответства на състоянието на резонанс. На нея са показани токът с начална фаза нула, напреженията върху бобината и кондензатора, които се намират в противофаза и се изменят едновременно с противоположни знаци, и моментните мощности на реактивните елементи. През първата четвърт на периода на тока бобината натрупва мощност ( $+p_L$ ), а в същото време кондензаторът



отдава мощност ( $-p_C$ ). Тъй като двете мощности са равни, запасената в контура енергия се обменя само между реактивните елементи, а контурът черпи само активна мощност от източника, която се разсейва в резистора (фиг. 4.13в). Ако стойността на  $X_L$  е по-голяма от  $X_C$  (съответно  $U_L > U_C$ ), бобината може да запаси повече енергия, отколкото има в кондензатора, затова разликата се добавя от източника на напрежение, т.е. веригата обменя реактивна мощност с мрежата. При това активната мощност остава същата ( $U \cdot I \cdot \cos \varphi$ , вж. фиг. 4.13а). Когато стойността на  $X_L$  е по-малка от  $X_C$  (съответно  $U_L < U_C$ ), кондензаторът обменя допълнителна реактивна мощност с мрежата, с тази разлика, че токът е изпреварващ. Активната мощност отново е  $UI \cos \varphi$  (вж. фиг. 4.13б). Следващият четвърт период реактивните елементи сменят местата си - бобината отдава мощност, а кондензаторът я запасява. При постоянно напрежение на мрежата обмяната на реактивна мощност с нея води до увеличаване на тока, което е причина за увеличаване на загубите в линиите. Това обяснява необходимостта от компенсиране на реактивната мощност (вж. т. 4.4).

Ако токът и напрежението на контура са, съответно

$$i = I_m \sin \omega t \quad , \quad u = U_m \sin(\omega t + \varphi) \quad ,$$

за моментната мощност се получава

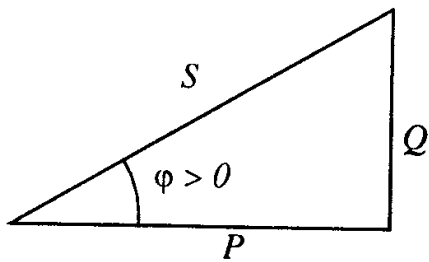
$$\begin{aligned} p &= U_m I_m \sin(\omega t + \varphi) \sin \omega t = (1/2) U_m I_m \cdot [\cos \varphi - \cos(2\omega t + \varphi)] = \\ &= UI [\cos \varphi - \cos(2\omega t + \varphi)] \quad . \end{aligned}$$

Следователно, средната за един период мощност ще бъде

$$(4.9) \quad P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = UI \cos \varphi \quad ,$$

т.е. **активната мощност** (измерва се във ватове,  $W$ ) на цялата верига, е равна на средната за един период мощност на участъка с активно съпротивление  $R$ .

Активната мощност е основната величина, но не винаги достатъчната, за характеризирание на енергетичните условия във веригите за променлив ток. В такъв случай се използват две спомагателни величини: **пълна (привидна) мощност**  $S = UI$  (измерва се във волтампери,  $VA$ ) и **реактивна мощност**  $Q = UI \sin \varphi$  (измерва се във волтампери реактивни,  $VAr$ ), съотношението между които може да се покаже нагледно чрез **триъгълника на мощностите** (фиг. 4.23).



Фиг. 4.23. Триъгълник на мощностите

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad P = S \cos \varphi, \quad Q = S \sin \varphi.$$

Реактивната мощност  $Q$  характеризира енергията, която се обменя между източника и консуматора. Ако се приеме, че реактивната индуктивна мощност  $Q_L$  е положителна, а реактивната капацитивна мощност  $Q_C$  - отрицателна, то за пълната мощност се получава

$$(4.10) \quad S = \sqrt{(\sum P)^2 + (\sum Q_L - \sum Q_C)^2}.$$

На корпуса на всеки източник на променливотокова енергия (генератор, трансформатор) е посочена величината  $S$ . Тя е равна на максимално възможната активна мощност (при дадени стойности на  $U$  и  $I$ ), която генераторът може да отдаде (съответно, трансформаторът - да предаде) при най-благоприятни условия на консуматора, т.е., ако последният работи при  $\cos \varphi = 1$  (което означава, че консуматорът представлява чисто активно съпротивление).

Множителят

$$(4.11) \quad \cos \varphi = \frac{P}{S}$$

се нарича *фактор на мощността*.

Електрическите машини, трансформаторите и другите електротехнически устройства се оразмеряват за определено номинално напрежение и определен номинален ток. За най-пълното им използване електрическите машини трябва да имат възможно най-висок фактор на мощността (т.е. възможно най-малка фазова разлика между напрежението и тока). Така например за захранване на консуматор с мощност 1 000 kW при  $\cos \varphi = 0,7$ , захранващият източник трябва да има мощност 1 430 kVA, а при  $\cos \varphi = 1$  - мощност 1 000 kVA.

Високият фактор на мощността е желателен и за намаляване на загубите при пренасянето на електроенергия по линиите. При зададена активна мощност на консуматора  $P$ , токът в линията е толкова по-малък, колкото по-голяма е стойността на  $\cos \varphi = P / UI$ .

Тъй като обикновено токът има индуктивен характер ( $\varphi > 0$ ), радикално средство за повишаване на  $\cos \varphi$  може да бъде включването на кондензатори, успоредно на другите устройства.

За определяне на мощностите на една верига, когато токът и напреже-

нието са зададени в комплексна форма, комплексната ефективна стойност на напрежението се умножава със спрегнатия комплекс на тока

$$\begin{aligned}\tilde{S} &= \dot{U}\dot{I}^* = U e^{j\psi_u} I e^{-j\psi_i} = UI e^{j(\psi_u - \psi_i)} = UI e^{j\varphi} = \\ &= UI \cos \varphi + jUI \sin \varphi = P + jQ \quad .\end{aligned}$$

По такъв начин активната мощност  $P$  представлява реалната част ( $Re$ ), а реактивната мощност  $Q$  - имагинерната част ( $Im$ ) на произведението  $\dot{U}\dot{I}^*$ , т.е.

$$P = Re [\dot{U}\dot{I}^*] ,$$

$$Q = Im [\dot{U}\dot{I}^*] .$$

Комплексната величина  $\tilde{S}$  се нарича *комплексна мощност*, чийто модул е равен на пълната мощност  $S$ , т.е.:

$$S = |\tilde{S}| = \sqrt{P^2 + Q^2} .$$

#### 4.6. Анализ на линейни електрически вериги за променлив ток

##### 4.6.1. Пресмятане на прости (неразклонени) променливотокови вериги

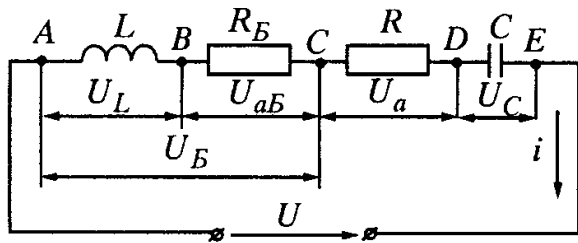
Отчитайки параметрите на елементите на електрическите вериги при променлив ток и съотношенията между тях, простите електрически вериги за променлив ток, подобно на веригите за постоянен ток, могат да се пресметнат по класическия начин (без да е необходимо приложението на символичния метод), прилагайки основните положения и съотношения, изложени в настоящата глава.

##### 4.6.2. Пресмятане на сложни (разклонени) променливотокови вериги

За целта се прилагат същите методи както при постоянно-токовите вериги с тази разлика, че всички пасивни елементи се представят с техните комплексни съпротивления или проводимости, а токовете и напреженията - с техните комплексни стойности.

#### Пример 4.3:

За неразклонената верига (фиг. 4.24) да се определи токът и напрежението на всички участъци на веригата, ако  $L = 0,038 \text{ H}$ ,  $R_B = 5 \Omega$ ,  $R = 3 \Omega$ ,  $C = 177 \mu\text{F}$ ,  $U = 120 \text{ V}$  при  $f = 50 \text{ Hz}$ .



Фиг. 4.24. Към пример 4.3

**Решение:**

Определят се съпротивленията на веригата:

- индуктивното:

$$X_L = 2\pi fL = 2.3,14.50.0,038 = 12 \Omega ;$$

- капацитивното:

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2.3,14.50.177.10^{-6}} = 18 \Omega ;$$

- пълното:  $z = \sqrt{(R_B + R)^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{(5 + 3)^2 + (12 - 18)^2} = 10 \Omega .$

Токът във веригата е

$$I = \frac{U}{z} = \frac{120}{10} = 12 A .$$

Напреженията на отделните участъци:

$$U_L = U_{AB} = X_L I = 12.12 = 144 V ,$$

$$U_{aB} = U_{BC} = R_B I = 5.12 = 60 V ,$$

$$U_a = U_{CD} = R I = 3.12 = 36 V ,$$

$$U_C = U_{DE} = X_C I = 18.12 = 216 V ,$$

$$U_B = U_{AC} = \sqrt{U_{aB}^2 + U_L^2} = \sqrt{60^2 + 144^2} = 156 V .$$

При използване на символичния метод решението се извършва по следния начин:

1. Определя се комплексното съпротивление на елементите:

$$Z_{R_B} = R_{R_B} = 5 \Omega , \quad Z_R = R = 3 \Omega , \quad Z_L = jX_L = j12 \Omega , \quad Z_C = -jX_C = -j18 \Omega .$$

2. Еквивалентното комплексно съпротивление на веригата е

$$Z_L = R_{R_B} + R + jX_L - jX_C = j12 + 5 + 3 - j18 = 8 - j6 \Omega$$

и в експоненциална форма:

$$Z = z.e^{j\varphi} \Omega = 10.e^{-j36,87} \Omega ,$$

където  $z = \sqrt{10^2 + 6^2} = 10 \Omega , \quad \varphi = \text{arctg}\left(-\frac{6}{8}\right) = -36,87^\circ .$

3. Тъй като напрежението е  $\dot{U} = 120 \cdot e^{j0} \text{ V}$ , за тока се получава

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{Z} = \frac{120 \cdot e^{j0}}{10 \cdot e^{-j36,87^\circ}} = 12 e^{j36,87^\circ} \text{ A} .$$

4. Напрежението върху отделните елементи:

$$\dot{U}_{RB} = 5 \cdot 12 \cdot e^{j36,87^\circ} = 60 \cdot e^{j36,87^\circ} \text{ V} ,$$

$$\dot{U}_R = 3 \cdot 12 e^{j36,87^\circ} = 36 \cdot e^{j36,87^\circ} \text{ V} ,$$

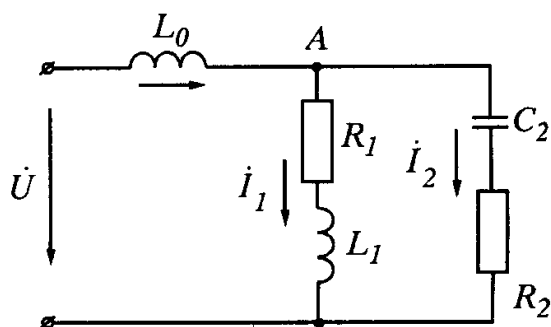
$$\dot{U}_L = j12 \cdot 12 e^{j36,87^\circ} = 144 \cdot e^{j(36,87^\circ + 90^\circ)} = 144 e^{j126,87^\circ} \text{ V} ,$$

$$\dot{U}_C = j18 \cdot 12 e^{j36,87^\circ} = 216 \cdot e^{j(36,87^\circ - 90^\circ)} = 216 \cdot e^{j53,13^\circ} \text{ V} .$$

Най-удобно такива вериги се решават чрез прилагане на символичния метод, при което пресмятането се извършва по същия начин, както и при веригите за постоянен ток (разбира се, след като всички величини се представят в комплексна форма).

#### Пример 4.4:

Да се определи мощността на веригата от фиг. 4.25, ако  $U = 120 \text{ V}$ ,



$$X_{L0} = 4 \Omega, \quad X_{L1} = 8 \Omega, \quad R_1 = 6 \Omega,$$

$$X_{C2} = 5 \Omega, \quad R_2 = 5 \Omega .$$

**Решение:**

Входното комплексно съпротивление на веригата е

Фиг. 4.25. Към пример 4.4

$$\begin{aligned} Z_{\text{ex}} &= Z_0 + \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} = jX_{L0} + \frac{(R_1 + jX_{L1})(R_2 - jX_{C2})}{R_1 + jX_{L1} + R_2 - jX_{C2}} = \\ &= j4 + \frac{(6 + j8)(5 - j5)}{6 + 5 + j8 - j5} = (6,15 + j3,23) = 6,95 \cdot e^{j27,71^\circ} \Omega . \end{aligned}$$

$$\text{Общият ток: } \dot{I} = \frac{\dot{U}}{Z_{\text{вх}}} = \frac{120 \cdot e^{j0}}{6.95 \cdot e^{j27,71^\circ}} = 17,27 \cdot e^{-j27,71^\circ} = (15,3 - j8) \text{ A} .$$

Комплексната пълна мощност:

$$\tilde{S} = \dot{U} \dot{I}^* = 120(15,3 + j8) = (1836 + j960) \text{ VA} ,$$

откъдето  $S = |\tilde{S}| = \sqrt{1836^2 + 960^2} = 2072 \text{ VA} .$

$$P = 1836 \text{ W} , \quad Q = 960 \text{ VAr} .$$

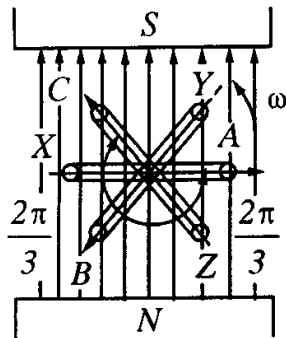
### Контролни въпроси:

1. Как се образуват променливотоковите величини?
2. Каква е връзката между ефективната и максимална стойност на променливотоковата синусоидална величина?
3. Каква информация дават ъглите  $\psi_i$ ,  $\psi_u$ ,  $\varphi$ ?
4. От какво зависят съпротивленията на реактивните елементи на веригата?
5. Какво означава понятието **резонанс** в електрическата верига и колко вида резонанс има?
6. Кога настъпва резонанс в електрическата верига?
7. Възможно ли е напреженията на реактивните елементи на веригата да бъдат по-големи по стойност от напрежението, приложено към входа на веригата?
8. Ако в една последователна  $R$ ,  $L$ ,  $C$  верига елементът  $L$  се замени с друг  $L_1 > L$ , ще се промени ли токът (съответно падовете на напрежения) във веригата, и ако отговорът е „да“ - как?
9. Възможно ли е общият ток на веригата да бъде по стойност по-малък от токовете в отделните клонове на веригата?
10. Колко вида мощности има във веригите за променлив ток и в какви единици те се измерват?
11. Какво означава понятието **фактор на мощността**?
12. Как може да се подобри факторът на мощността и каква е възможната му най-голяма стойност?

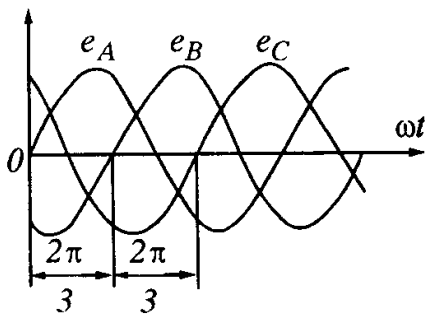
## 4.7. Трифазни вериги

### 4.7.1. Общи положения

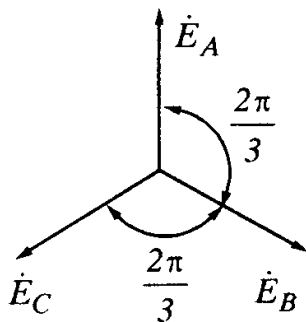
Трифазната система от електрически вериги (трифазна верига) представлява съвкупност от три електрически вериги, в които действат е.д.н. с една и съща честота и определена фазова разлика между тях. Отделните електрически вериги, образуващи системата, се наричат фази.



а)



б)



в)

Фиг. 4.26. Принципно устройство на елементарен трифазен генератор (а); временна диаграма на трифазни е.д.н. (б) и тяхната векторна диаграма (в)

Електродвижещите напрежения, които действат в посочената система от електрически вериги, образуват *трифазна система от е.д.н.*, а протичащите в тези вериги токове - *трифазна система от токове*.

Трифазните системи от е.д.н., токове и напрежения могат да са симетрични и несиметрични. Трифазната система е *симетрична*, когато е.д.н. (токове или напрежения), които я образуват, имат еднакви максимални стойности и всяко е.д.н. закъснява по фаза от предното на един и същ ъгъл ( $120^\circ$ ). Ако едно от горните условия не е изпълнено, системата е *несиметрична*.

Трифазна система от е.д.н. може да се получи, ако например три правоъгълни контура, като показаните на фиг. 1.5 (вж. гл. I), чиито плоскости сключват определен ъгъл един с друг, се въртят с постоянна честота на въртене в равномерното магнитно поле на един постоянен магнит (фиг. 4.27). Получава се 3-фазен генератор, при който индуцираните в контурите е.д.н. са синусоидални и изместени по фаза на ъгли, равни на ъглите между плоскостите на отделните контури. Когато тези ъгли са равни помежду си ( $120^\circ$ ), е.д.н. на всеки два съседни контура са изместени по фаза на ъгъл  $120^\circ$  ( $2\pi/3$ ). Ако контурите имат еднакъв брой навивки, се получава симетрична трифазна система от е.д.н.

На фиг. 4.26а е показано принципното устройство на елементарен трифазен гене-

устройство на елементарен трифазен гене-

ратор. Началата на фазите са означени с  $A$ ,  $B$  и  $C$ , а краищата, съответно, с  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ , т.е. изводите на първата фаза на генератора са  $A-X$ , на втората фаза:  $B-Y$ , а на третата фаза  $C$ :  $C-Z$ .

На фиг. 4.26б са показани синусоидите на е.д.н., индуцирани в трите фазни намотки, като за начало на отчитане във времето е приет моментът, когато е.д.н. във фаза  $A$  е равно на нула (т.е. е.д.н. на фаза  $A$  е с нулева начална фаза). Електродвижещото напрежение на фаза  $B$  изостава по фаза на ъгъл  $2\pi/3$  от е.д.н. на фаза  $A$ , а е.д.н. на фаза  $C$  изостава на същия ъгъл от е.д.н. на фаза  $B$  (или, което е едно и също - изпреварва по фаза е.д.н. на фаза  $A$  на ъгъл  $2\pi/3$ ). Когато и амплитудите на трите е.д.н. са еднакви, трифазната система от е.д.н. е симетрична.

За моментните стойности на е.д.н. на една симетрична трифазна система са в сила равенствата

$$\begin{aligned} e_A &= E_m \sin \omega t , \\ e_B &= E_m \sin \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right) , \\ e_C &= E_m \sin \left( \omega t - 2 \frac{2\pi}{3} \right) = E_m \sin \left( \omega t + \frac{2\pi}{3} \right) . \end{aligned}$$

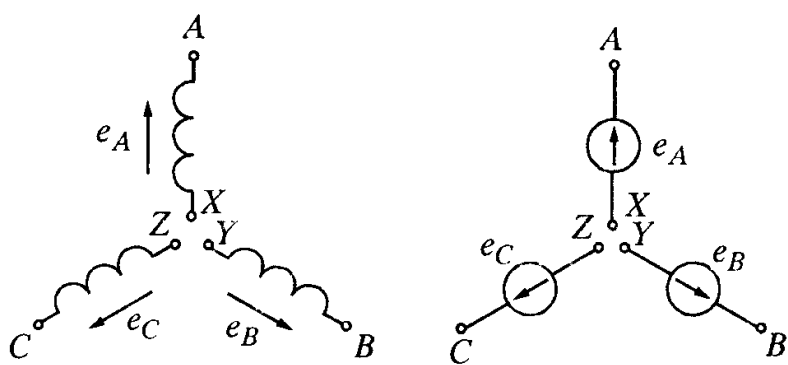
Комплексите на тези е.д.н. са, съответно:

$$\begin{aligned} \dot{E}_A &= E e^{j0} = E , \\ \dot{E}_B &= E e^{j \left( -\frac{2\pi}{3} \right)} , \\ \dot{E}_C &= E e^{j \frac{2\pi}{3}} . \end{aligned}$$

На фиг. 4.26в е дадена векторната диаграма на симетрична трифазна система от е.д.н. При построяването на диаграмата за изходен вектор е приет векторът  $\dot{E}_A$  на е.д.н. на фаза  $A$ . Останалите два вектора  $\dot{E}_B$  и  $\dot{E}_C$  са построени спрямо изходния вектор, съгласно правилото за ориентация. Разглеждат се два вида последователност на фазите:  $A-B-C$ , наречена **права последователност**, и  $A-C-B$  - **обратна последователност**. Последователността на фазите определя посоката на въртене на трифазните двигатели. Тя трябва да се отчита и при включване на трифазните генератори в паралел. За определяне на последователността на фазите се използват специални апарати - **фазоуказатели**. *Най-често се използва правата последователност на фазите.*

В електрическите схеми трифазните генератори се изобразяват така,



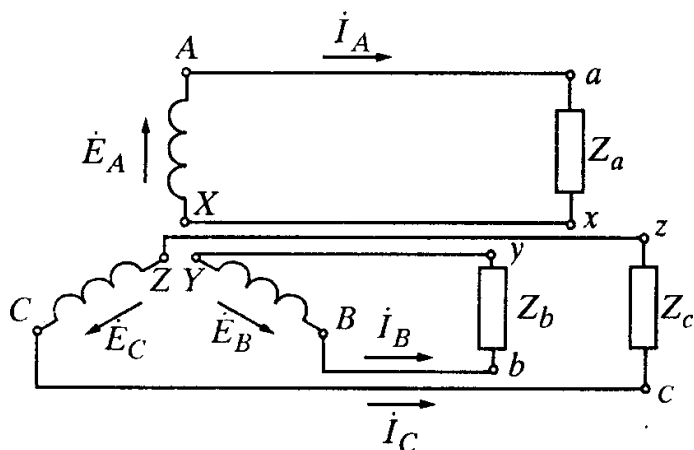


Фиг. 4.27. Условно изобразяване на трифазен генератор

*е.д.н. във всяка фаза се избира посоката от края към началото на фазата.*

За да протекат токове във фазовите намотки на генератора, към тях трябва да се свържат консуматори така, както е показано на фиг. 4.28. Съпротивленията на консуматорите във всяка фаза са обозначени, съответно, със  $Z_a$ ,  $Z_b$  и  $Z_c$ . Токовете, протичащи през отделните фази, се определят от фазовите електродвижещи напрежения и от общото съпротивление на получените затворени вериги. Ако трите фази имат еднакви съпротивления, т.е.  $Z_A = Z_B = Z_C$ , токовете  $\dot{I}_A$ ,  $\dot{I}_B$  и  $\dot{I}_C$  ще бъдат еднакви по стойност и изместени един спрямо друг на фазов ъгъл  $2\pi/3$ .

На фиг. 4.28 всяка фаза на трифазната система е свързана с консуматора с отделна верига без електрическа връзка с останалите две фази. Такава



Фиг. 4.28. Несвързана трифазна система

трифазна верига се нарича *несвързана*. При нея са необходими шест проводника за предаване на електрическата енергия от генератора към консуматорите. Броят на проводниците може да се намали, като се използват т. нар. *свързани* трифазни системи. При това намотките на трифазния генератор могат да се свържат в „звезда“ или в „триъгълник“.

#### 4.7.2. Свързване „звезда“

Броят на проводниците, които свързват фазите на генератора с консуматорите, се намалява, когато вместо три обратни проводника се използва един общ проводник, към който се присъединяват краищата  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  на трите фази

на генератора и краищата  $x, y$  и  $z$  на трите фази на консуматора (фиг. 4.29а).

Тъй като фазите на генератора и на консуматорите са свързани във вид на трилъчева звезда, свързването се нарича *звезда* ( $\Upsilon$ ). Общата точка, в която са съединени краищата на фазите на генератора (съответно - на консуматора), се нарича *звезден център, нулева или неутрална точка* на генератора или на консуматора. На фиг. 4.29а звездният център на генератора е означен с  $0$ , а на консуматора - с  $0'$ . Проводникът, който свързва нулевите точки  $0$  и  $0'$ , се нарича *нулев или неутрален проводник*. Останалите три проводника, свързващи началата на съответните фази на генератора и консуматора, се наричат *линейни проводници*.

При свързаните трифазни вериги се различават фазови и линейни напрежения (съответно, фазови и линейни токове):

**Фазови напрежения** са напреженията между началото и края на отделните фази на генератора (съответно, на консуматора).

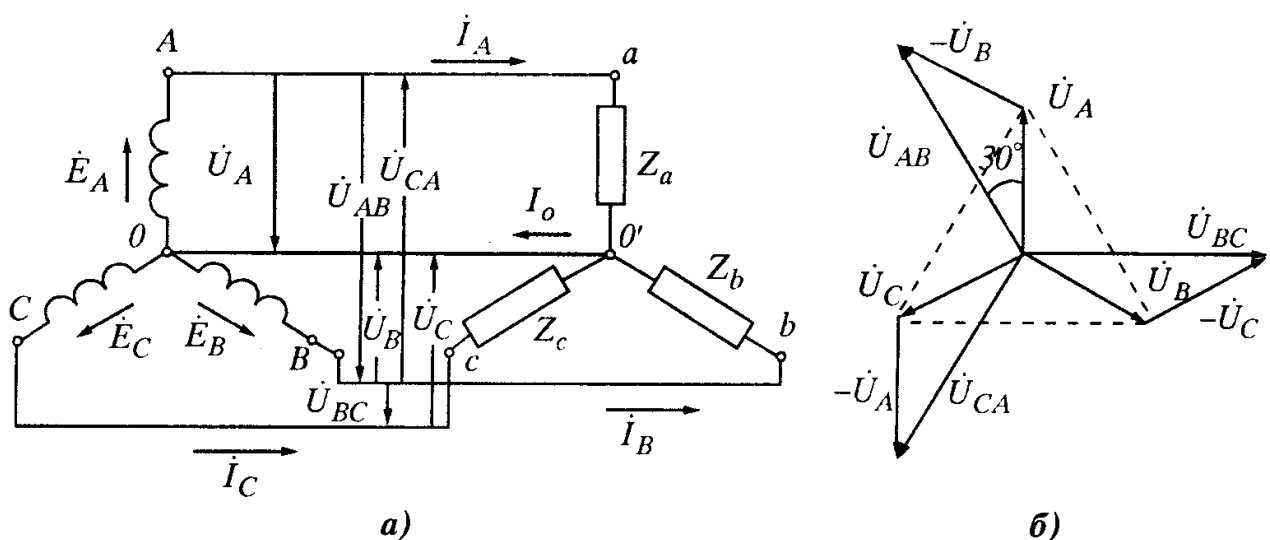
**Линейни напрежения** са напреженията между кои да са два линейни проводника.

**Фазови токове** са токовете, които протичат във фазите на генератора (съответно, на консуматора).

**Линейни токове** са токовете, протичащи по линейните проводници.

При свързване „звезда“ фазовите и линейните токове са едни и същи, което се вижда от фиг. 4.29а. На същата фигура фазовите напрежения са означени с  $\dot{U}_A, \dot{U}_B$  и  $\dot{U}_C$ , а линейните - с  $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}$  и  $\dot{U}_{CA}$ .

Ако се пренебрегнат собствените съпротивления на фазите на източника на електрическа енергия, фазовите напрежения ще бъдат равни на съответните електродвижещи напрежения и на векторната диаграма те се изобразяват със симетрично разположени вектори (фиг. 4.29б).



Фиг. 4.29. Свързване „звезда“ с нулев проводник (а) и съответната векторна диаграма (б)

Между линейните и фазовите напрежения, съгласно втория закон на Кирхоф, съществуват зависимостите

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B, \quad \dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C, \quad \dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A.$$

На векторната диаграма са показани и векторите на линейните напрежения  $\dot{U}_{AB}$ ,  $\dot{U}_{BC}$  и  $\dot{U}_{CA}$ . Векторът  $\dot{U}_{AB}$  се получава, като от вектора  $\dot{U}_A$  се извади векторът  $\dot{U}_B$ , т.е. като към вектора  $\dot{U}_A$  се прибави векторът  $(-\dot{U}_B)$ . Аналогично се получават и векторите на останалите две линейни напрежения. Векторите на трите линейни напрежения образуват симетрична триълчева звезда, която е завъртяна спрямо звездата на фазовите напрежения на ъгъл  $30^\circ$  в положителна посока.

Съотношението между ефективната стойност на линейните напрежения и ефективната стойност на фазовите напрежения може да се определи, като се разгледа равнобедреният триъгълник с бедра  $U_A$  и  $U_B$  и основа  $U_{AB}$ . От него се получава

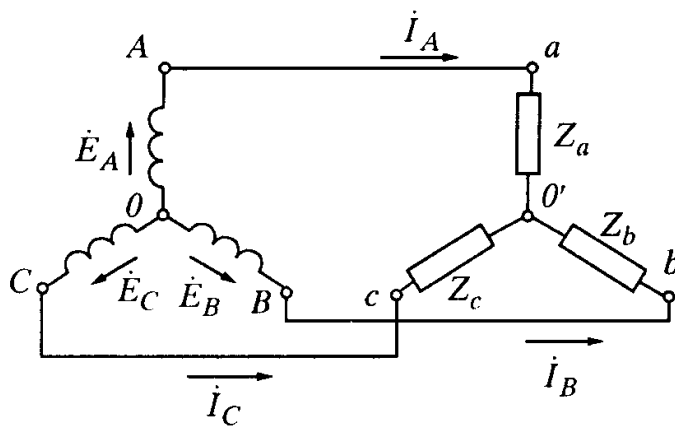
$$(4.12) \quad U_{AB} = U_L = 2U_\phi \cos 30^\circ = 2U_\phi \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3}U_\phi.$$

У нас в мрежите за ниско напрежение се използва трифазна система със стандартни ефективни стойности на фазовите напрежения 220 V и на линейните - 380 V.

Токът в нулевия проводник се определя съгласно първия закон на Кирхоф, приложен за точката 0 (или 0'):

$$I_0 = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C,$$

т.е.  $\dot{I}_0$  представлява сумата от трите фазови тока. Тъй като при симетричен товар и симетрична система на фазовите напрежения  $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$ , токът



Фиг. 4.30. Трипроводна трифазна верига

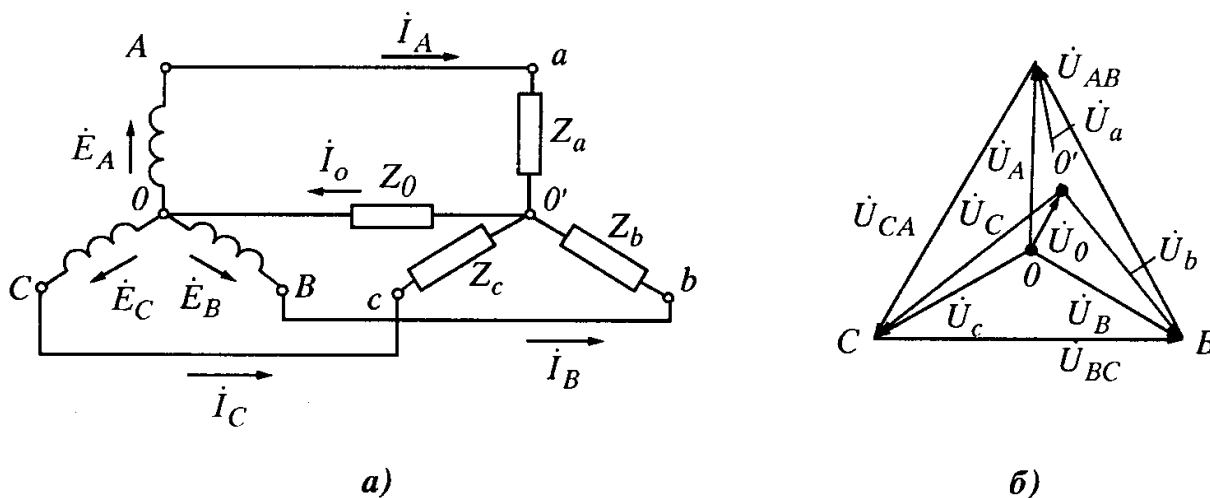
в нулевия проводник ще бъде равен на нула и нулевият проводник може да бъде отстранен. Тогава се получава *трипроводна трифазна верига, свързана в „звезда“* (фиг. 4.30), която обаче може да работи нормално само при симетричен товар на фазите. В противен случай напреженията на фазите на консуматора няма да са еднакви и равни на фазовите напрежения на генератора.

При несиметричен товар предназначението на нулевия проводник е да поддържа симетрична системата на фазовите напрежения на консуматора.

Благодарение на неутралния проводник и при несиметричен товар напреженията на всяка една от фазите на консуматора остават неизменни и равни на съответните фазови напрежения на захранващия източник както по стойност, така и по фаза, т.е. фазовите и линейните напрежения на консуматора образуват симетрична система. Поради това в четирипроводната система може да се включат еднофазни консуматори, режимът на работа на всеки един от които, намиращ се под неизменното фазово напрежение на захранващия източник, няма да зависи от режима на работа на консуматорите, включени в другите две фази.

Ако съпротивлението на нулевия проводник не се пренебрегне, т.е.  $Z_0 \neq 0$  (фиг. 4.31а), фазовите напрежения на консуматора при  $I_0 \neq 0$  няма да са равни на съответните напрежения на източника, и между звездните центрове възниква  $\dot{U}_0 = Z_0 \dot{I}_0$ .

При  $Z_0 = 0$  напрежението  $\dot{U}_0 = 0$ , а ако нулевият проводник липсва ( $Z_0 = \infty$ ),  $\dot{U}_0$  е най-голямо, т.е., колкото  $Z_0$  е по-голямо, толкова по-голямо ще бъде и  $\dot{U}_0$ , и толкова по-силно ще бъде изразена асиметрията на



Фиг. 4.31. Към трифазната несиметрична система с отчитане на  $Z_0$  (а) и векторна диаграма на напреженията при несиметричен товар (б)

фазовите напрежения на консуматора (фиг. 4.31б).

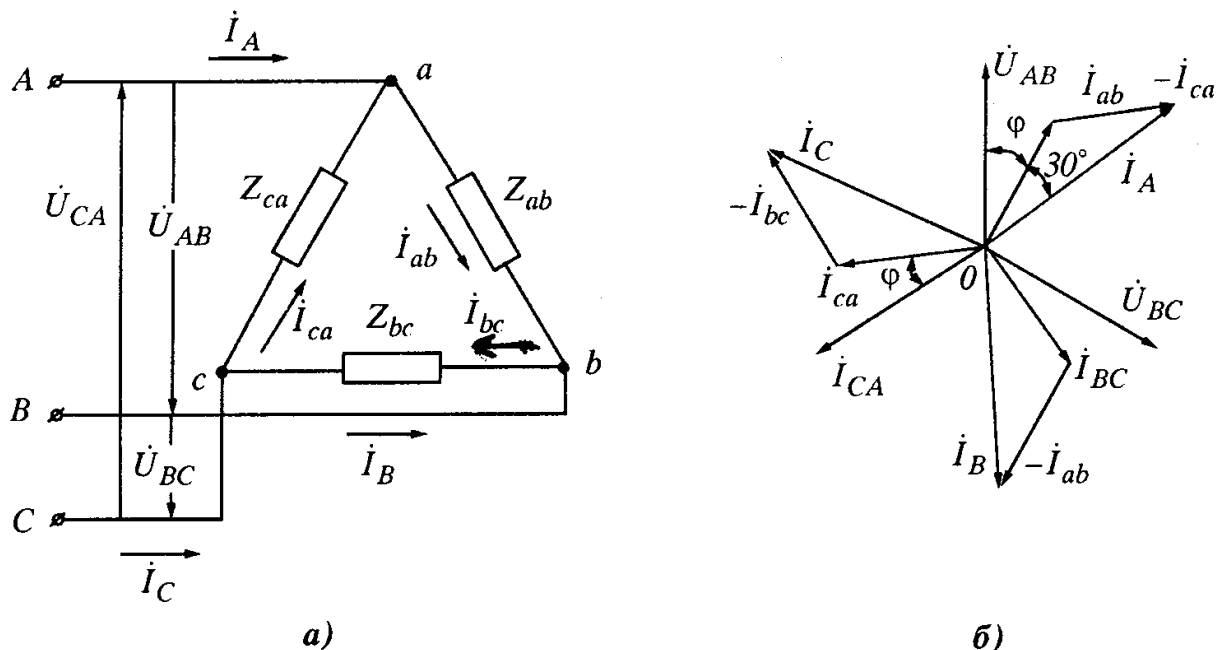
Следователно, при увеличаване на съпротивлението на нулевия проводник ефективността от неговото използване се намалява и в случай на прекъсването му при несиметричен товар  $\dot{U}_0$  ще бъде максимално. Пора-

ди тази причина на нулевия проводник не се поставят прекъсвачи и стопяеми предпазители (или каквито и да е било други защиты), тъй като при стопяване на предпазителя, на фазите на консуматора могат да възникнат значителни пренапрежения.

Четирипроводната трифазна верига се използва във всички случаи, когато не може да се осигури равномерно разпределение на товара между фазите. За захранване на трифазни електродвигатели нулевият проводник не е необходим, тъй като в този случай товарът е симетричен.

#### 4.7.3. Свързване „триъгълник“

Освен свързването „звезда“, широко се използват и трипроводните трифазни вериги със свързване на консуматорите „триъгълник“ ( $\Delta$ ). Ако трите фази на консуматора със съпротивления, съответно,  $Z_{ab}$ ,  $Z_{bc}$  и  $Z_{ca}$  се включат непосредствено към линейните проводници на трипроводната верига, свързването на консуматора ще бъде в триъгълник (фиг. 4.32а).



Фиг. 4.32: а) схема „триъгълник“; б) съответната векторна диаграма на напреженията и токовете при симетричен товар

От схемата се вижда, че ако съпротивлението на линейните проводници се пренебрегне, фазовите напрежения на консуматора са равни на съответните линейни напрежения на захранващия източник. В този случай, за разлика от свързването „звезда“, фазовите и линейни токове не са равни помежду си.

При зададени съпротивления на фазите на консуматора фазовите то-

кове се определят съгласно закона на Ом, съответно:

$$\dot{I}_{ab} = \frac{\dot{U}_{AB}}{Z_{ab}}, \quad \dot{I}_{bc} = \frac{\dot{U}_{BC}}{Z_{bc}}, \quad \dot{I}_{ca} = \frac{\dot{U}_{CA}}{Z_{ca}}.$$

Като се приложи първият закон на Кирхоф, за възлите  $a$ ,  $b$  и  $c$  се определят и линейните токове:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}, \quad \dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}, \quad \dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}.$$

От тези изрази следва, че който и да е от линейните токове е равен на геометричната разлика на съответните вектори на токовете на тези две фази на консуматора, които се съединяват с дадения линеен проводник.

При симетричен товар ( $Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca}$ ) фазовите токове са равни по големина и ъглите на фазовата им разлика по отношение на съответните фазови напрежения са еднакви. Векторната диаграма на напреженията и токовете при симетричен товар, съединен в триъгълник, е показана на фиг. 4.32б. Звездата на линейните токове е изместена на ъгъл  $30^\circ$  в отрицателна посока спрямо звездата на фазовите токове. Като се разгледа равнобедреният триъгълник с бедра  $I_{ab}$  и  $(-I_{ca})$ , между ефективните стойности на линейните и фазови токове  $I_A$  и  $I_\phi$  при симетричен товар се получава същото съотношение, както между линейните и фазовите напрежения при свързване в звезда, а именно:

$$I_A = \sqrt{3} I_\phi.$$

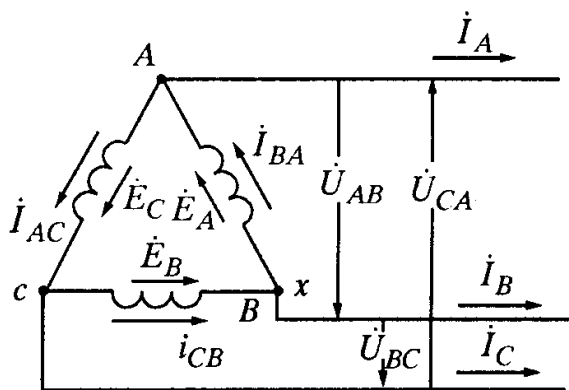
В триъгълник могат да бъдат свързани не само фазите на консуматора, но и фазите на източника на електрическа енергия (фиг. 4.33).

В трифазната система при синусоидална форма на кривата на е.д.н. е изпълнено условието

$$\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0.$$

Затова, когато към линейните проводници не са включени консуматори, в затворения триъгълник, образуван от трите фази на източника, не протича ток.

На практика фазите на намотките на трифазните генератори се свързват в звезда главно поради това, че в случай на отклонение на е.д.н. на източника от синусоидалната форма сумата от



Фиг. 4.33. Свързване „триъгълник“ на източник на е.д.н.

моментните стойности на е.д.н. няма да е равна на нула и в намотките на източника, съединен в триъгълник, при отсъствие на товар ще протече ток, който ще предизвика прегряване и намаляване на к.п.д. на генератора. При трифазните трансформатори обаче това свързване е широко разпространено.

*Важна особеност при свързване на фазите на консуматора в триъгълник е тази, че при изменение на съпротивлението на една от фазите режимът на работа на другите две фази остава неизменен (тъй като линейните напрежения на генератора са постоянни, ще се изменят само токът в дадената фаза и линейните токове в проводниците на линиите, съединени с тази фаза).*

#### 4.7.4. Мощност на трифазна верига

При трифазните вериги, както и при еднофазния променлив ток, се разглеждат моментна, активна, реактивна и привидна мощности:

$$P = P_A + P_B + P_C = u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C \quad ,$$

$$P = P_A + P_B + P_C = U_A I_A \cos \varphi_A + U_B I_B \cos \varphi_B + U_C I_C \cos \varphi_C \quad ,$$

$$Q = Q_A + Q_B + Q_C = U_A I_A \sin \varphi_A + U_B I_B \sin \varphi_B + U_C I_C \sin \varphi_C \quad ,$$

$$\dot{S} = P + jQ \quad \text{или} \quad S = |\dot{S}| = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad .$$

При симетрична система на фазовите напрежения и при симетричен товар, когато са изпълнени условията

$$U_A = U_B = U_C \quad ,$$

$$I_A = I_B = I_C \quad ,$$

$$\varphi_A = \varphi_B = \varphi_C \quad ,$$

мощностите се определят, съответно, като

$$P = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi [W] \quad ,$$

$$Q = 3U_\phi I_\phi \sin \varphi [VA_r] \quad ,$$

$$S = 3U_\phi I_\phi [VA] \quad .$$

При анализа на трифазните вериги е удобно да се използват линейните напрежения и токове. Тъй като при свързване в звезда

$$U_\phi = \frac{U_A}{\sqrt{3}} \quad \text{и} \quad I_A = I_\phi \quad ,$$

а при свързване в триъгълник

$$U_{\phi} = U_{\lambda} \quad \text{и} \quad I_{\phi} = \frac{I_{\lambda}}{\sqrt{3}} ,$$

активната мощност при симетрична верига се определя с една и съща формула, независимо от схемата на свързване на фазите:

$$P = \sqrt{3} U_{\lambda} I_{\lambda} \cos \varphi .$$

Обикновено индексите  $\lambda$  и  $\phi$  в този случай не се поставят и затова горната формула добива вида

$$P = \sqrt{3} U I \cos \varphi .$$

Аналогично се определят и мощностите:

$$Q = \sqrt{3} U I \sin \varphi ,$$

$$S = \sqrt{3} U I .$$

От получените изрази се вижда, че и при трифазната верига със симетричен товар се получават същите съотношения между активната, реактивната и привидната мощност, както и при еднофазен променлив ток, т.е.:

$$P = S \cos \varphi , \quad Q = S \sin \varphi , \quad S = \sqrt{P^2 + Q^2} , \quad \cos \varphi = \frac{P}{S} .$$

#### 4.7.5. Сравнение между трифазната и еднофазна системи

Главните предимства на трифазната система пред еднофазната, които определят широкото ѝ приложение, са:

1. По-малък разход на материал за проводници при пренасяне на електрическата енергия.

Ако обемът на материала за еднофазната двупроводна линия е  $V$ , на трифазната трипроводна -  $V_T$ , и на трифазната четирипроводна с нулев проводник -  $V_{T0}$ , може да се докаже, че съотношението между  $V$ ,  $V_T$  и  $V_{T0}$  е

$$V : V_T : V_{T0} = 100 : 75 : 82,5 ,$$

т.е. при еднакво линейно напрежение звездата без нулев проводник и триъгълникът очевидно дават еднакъв разход на материал за линията на предаване на енергия и икономия от 25 % в сравнение с еднофазната линия, а нулевият проводник предизвиква преразход на материал и, въпреки това, в този случай е налице икономия с 12,5%.

2. Възможност в една и съща електрическа уредба да има две експлоатационни напрежения (фазово и линейно при съединение „звезда“ с нулев



проводник), което позволява еднофазни консуматори да се включат и към линейно, и към фазово напрежение.

3. Основно преимущество на трифазната система е възможността за получаване на *въртящо се магнитно поле* (вж. т. 17.2) и използването на основаните на този принцип най-прости и сигурни електродвигатели - асинхронните електродвигатели.

---

#### Пример 4.5:

Ще се изменят ли линейните токове и активната мощност на трифазната верига, ако при неизменно  $U_{\Delta}$  трифазният консуматор със съпротивление на всяка фаза  $z_{\phi}$  се превключи от „звезда“ в „триъгълник“, при условие, че  $U_{\Delta} = 380 \text{ V}$ ;  $z_{\phi} = 2 \Omega$  и  $\cos \varphi = 0,75$ ?

#### Решение:

При свързване на консуматора в „звезда“ фазовите (те са и линейни) токове се определят като

$$I_{\phi} = I_{\Delta} = \frac{U_{\phi}}{z_{\phi}} = \frac{U_{\Delta}}{\sqrt{3} z_{\phi}} = \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 2} = 109,7 \text{ A} .$$

Мощността на трифазната верига при свързване „звезда“ е равна на

$$P = \sqrt{3} U_{\Delta} I_{\Delta} \cos \varphi = 3 \cdot 380 \cdot 109,7 \cdot 0,75 = 54,15 \text{ kW} .$$

При свързване на консуматора в „триъгълник“ неговият фазов ток ще стане равен на

$$I_{\phi \Delta} = \frac{U_{\phi}}{z_{\phi}} = \frac{U_{\Delta}}{z_{\phi}} = \frac{380}{2} = 190 \text{ A} \quad (\text{тъй като при } \Delta \quad U_{\phi} = U_{\Delta}),$$

а линейният ток на веригата

$$I_{\Delta \Delta} = \sqrt{3} I_{\phi \Delta} = \sqrt{3} \cdot 190 = 329,1 \text{ A} .$$

Отношението на линейните токове при свързване  $\Delta$  и  $Y$  е равно на

$$\frac{I_{\Delta \Delta}}{I_{\Delta Y}} = \frac{329,1}{109,7} = 3 .$$

Тъй като в този случай (при свързване  $\Delta$ ) линейният ток се е увеличил 3 пъти, то и активната мощност на веригата става 3 пъти по-голяма, т.е.:

$$P_{\Delta} = 3P = 3 \cdot 54,15 = 162,45 \text{ kW} .$$

На практика такова превключване от „звезда“ в „триъгълник“ е възможно при условие, че консуматорът е оразмерен за работа в „триъгълник“. В противен случай претоварването може да доведе до повреда.

---

**Контролни въпроси:**

1. Какво се разбира под понятието *фаза* в трифазните вериги?
2. Кога една трифазна верига е симетрична?
3. Кое е основното свойство на симетричната трифазна система?
4. Какви са съотношенията между линейните и фазови токове (съответно напрежения) при свързването „звезда“ (съответно „триъгълник“)?
5. Какво е предназначението на нулевия проводник?
6. В какъв случай нулевият проводник не е необходим?
7. Защо обикновено намотките на трифазните генератори са свързани „звезда“?
8. Кои са предимствата на трифазната система пред еднофазната?

**4.8. Преходни процеси в линейни електрически вериги за постоянен ток**

**4.8.1. Общи положения**

*Под преходен процес се разбира процесът на преминаване от един установен режим на работа на електрическата верига към друг установен режим, т.е. процесът, протичащ при изменение на режима на работа на веригата.*

*Преходният процес възниква вследствие на комутация във веригата (включване или изключване на захранващ източник или елемент от веригата), а така също и при изменение на нейните параметри. Но преходни процеси в електрическите устройства могат да възникнат не само в началото или в края на тяхната работа, когато се включва или изключва захранващият източник, но и при възникване на аварийни ситуации при прекъсване или късо съединение на част от електрическата верига.*

В редица случаи стойността на тока или напрежението на някои от елементите на веригата може значително да превиши номиналните стойности, за които са пресметнати тези елементи. В тези случаи, за да не излязат от строя, към тях се включва апаратура за автоматична защита на веригата от пренапрежение и прекомерно увеличаване на тока. При експлоатацията на електротехнически устройства със защитна апаратура трябва да се отчитат максималните стойности на тока и напрежението, възникващи през преходния режим, и времето, за което те достигат тези стойности.

В много електротехнически устройства, и особено в устройствата на промишлената електроника, преходните процеси са основни процеси на

работа, а не свидетелство за аварийен режим. Например преходните процеси, свързани със зареждането и разреждането на кондензатори, лежат в основата на работата на някои типове електронни генератори.

*Физически преходният процес представлява процес на прехода от енергийно състояние, съответстващо на документационния режим, към енергийно състояние, съответстващо на следкомутационния режим.*

*Преходните процеси възникват във вериги, които съдържат индуктивни и капацитивни елементи. Това е свързано с обстоятелството, че посочените елементи притежават способност да натрупват и да отдават енергия, съответно, на магнитното и на електрическото поле.*

Възникването на преходни процеси се обяснява с това, че индуктивните и капацитивни елементи са инерционни, т.е. при тях изменението на енергията на магнитното и електрическото им поле не може да протече мигновено. Натрупването на енергия за сметка на източника или отдаването ѝ в електрическата верига протичат макар и в много малък, но все пак краен промеждутък от време. *Продължителността на тези процеси може да съставлява части от секундата или единици секунди.*

В електрическите вериги, които съдържат само резистивни елементи, не възникват преходни процеси. В тях стационарните режими се установяват мигновено.

Процесите в електрическата верига, които се дължат на собствения ѝ запас на енергия в първоначалния момент, дават т. нар. *свободен режим*, след завършването на който в електрическата верига се установява режим, определен само от външните е.д.н. Този режим се нарича *установен (принудителен)*.

*Преходните процеси в електрическите вериги траят от момента на комутацията до затихването на свободния режим, след което настъпва установеният режим.*

Пресмятането на токовете и напреженията на даден участък от веригата по време на преходния процес се извършва посредством уравнения, съставени в съответствие със законите на Кирхоф. В линейните електрически вериги, чиито параметри  $R$ ,  $L$  и  $C$  са постоянни величини, процесите се описват от линейни диференциални уравнения, при което частният интеграл на нехомогенното уравнение определя принудителния (установения) режим, а решението на хомогенното уравнение - свободния режим.

*Алгебричната сума от принудителната и свободната съставляваща на тока или напрежението определя техните действителни стойности по време на преходния процес:*

$$i_L = i_{Lcv} + i_{Lnp} ; \quad u_C = u_{Ccv} + u_{Cnp} .$$

В решението на диференциалното уравнение фигурират и интеграционни константи, които се определят от *началните условия*, т.е. от състоянието на електрическата верига в момента на комутацията. Следователно, *под начални условия се разбират стойностите на токовете и напреженията във веригата в момента  $t = 0$* . Началните условия биват *докомутационни* и *следкомутационни*:

Докомутационни начални условия се наричат стойностите на токовете и напреженията непосредствено до комутацията (при  $t = -0$ ).

Следкомутационни начални условия се наричат стойностите на токовете и напреженията след комутацията (при  $t = 0_+$ ).

Ако до началото на преходния процес непосредствено преди комутацията токовете и напреженията на пасивните елементи на веригата са равни на нула, схемата има нулеви начални условия, в противен случай - ненулеви начални условия.

Началните условия позволяват да се определят стойностите на интеграционните константи с помощта на *двамата закона на комутацията*:

• *Първи закон на комутацията*

*Токът в клон с индуктивен елемент не може да се измени скокообразно*, т.е. каквато стойност е имал токът в момент, непосредствено до комутацията [при  $t(-0)$ ], такава стойност запазва и в момента, непосредствено след комутацията [при  $t(0_+)$ ], или

$$(4.13) \quad i_L(-0) = i_L(0_+) .$$

• *Втори закон на комутацията*

*Напрежението на кондензаторния елемент не може да се измени скокообразно*, т.е. каквато стойност е имало напрежението в момент, непосредствено до комутацията [при  $t(-0)$ ], такава стойност запазва и в момента, непосредствено след комутацията [при  $t(0_+)$ ], или

$$(4.14) \quad u_C(-0) = u_C(0_+) .$$

Допускането за скокообразното изменение на тока в клон с индуктивен елемент или на напрежението на кондензаторния елемент довежда до заключението за неизбежното скокообразно изменение на енергията на маг-

нитното (съответно на електрическото) поле:

$$W_M = \frac{Li^2}{2} , \quad W_e = \frac{Cu^2}{2} .$$

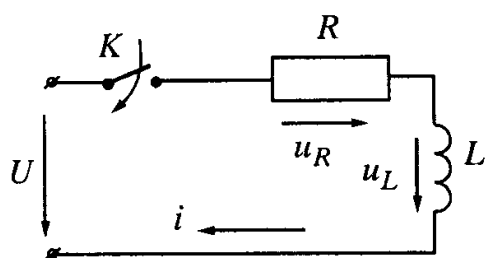
Но скокообразно изменение на тези енергии е възможно само при безкрайно големи мощности на елементите на веригата:

$$P_M = \frac{dW_M}{dt} , \quad P_e = \frac{dW_e}{dt} .$$

Доколкото електрическа верига с безкрайно голяма мощност не съществува, скокообразно изменение на енергията на магнитното и електрическото полета не е възможно. Това потвърждава верността на първия и втория закон на комутацията.

#### 4.8.2. Преходни процеси в $R, L$ вериги за постоянен ток

• *Включване на индуктивна бобина към източник на постоянно напрежение*



Фиг. 4.34. Включване на бобина към постоянно напрежение

Разглежда се процесът на нарастване на тока в бобина с индуктивност  $L$  и активно съпротивление  $R$  след включването ѝ към постоянно напрежение (фиг. 4.34).

Уравнението на електрическото състояние на веригата от фиг. 4.34 след затварянето на ключа  $K$  е

$$u_R + u_L = U .$$

Диференциалното уравнение на веригата се получава след заместване на  $u_R$  и  $u_L$ , изразени чрез тока  $i$ , т.е.:

$$L \frac{di}{dt} + Ri = U \quad \text{или} \quad \frac{L}{R} \frac{di}{dt} + i = \frac{U}{R} .$$

Множителят  $\frac{L}{R} = \tau$  пред производната има дименсия „време“ и се нарича времеконстанта на веригата. Решението на това уравнение има следния вид:

$$i = Ae^{-\frac{t}{\tau}} + B ,$$

където  $A$  и  $B$  са константи. Константата  $B$  съответства на тока след завър-

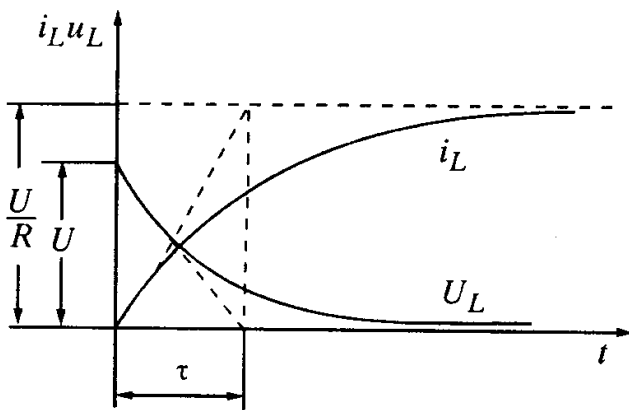
шване на преходния процес, т.е. при  $t = \infty$ . Тогава токът във веригата е постоянен, напрежението върху бобината е нула и  $i(\infty) = 0 + B = \frac{U}{R}$ , т.е.

$B = \frac{U}{R}$ . Константата  $A$  характеризира изменението на тока при преминаване от състоянието  $i(0_-) = i(0_+)$  в състояние  $i(\infty)$ , т.е.  $A = i(\infty) - i(0_+)$ , и се намира от равенството за тока при  $t = 0$ . В случая

$$0 = A \cdot e^0 + B ,$$

$$A = -B = -\frac{U}{R} .$$

Решението на разглежданото уравнение може да се запише още и по следния начин:



Фиг. 4.35. Графики на изменение на  $i_L$  и  $u_L$  след включване на веригата от фиг. 4.34 към постоянно напрежение

$$i = [i(\infty) - i(0_+)] e^{-\frac{t}{\tau}} + i(\infty) ,$$

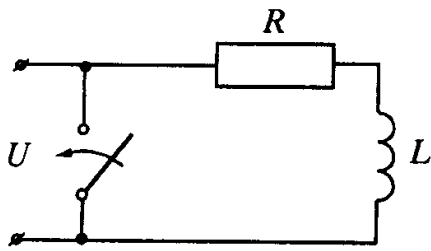
което води до

$$i = -\frac{U}{R} e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{U}{R} = \frac{U}{R} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) .$$

Графиката на изменението на тока и напрежението по време на преходния процес е дадена на фиг. 4.35. От нея се вижда, че токът постепенно достига установена стойност  $\frac{U}{R}$ , а напрежението вър-

ху бобината  $u_L = L \frac{di}{dt} = U e^{-\frac{t}{\tau}}$  спада до нула.

Практически, може да се приеме, че преходният процес завършва за време  $t = 5\tau$ , като времеконстантата  $\tau = L/R$  изразява времето, за което съответната величина ( $i_L$  или  $u_L$ ) се изменя е пъти. Фактически времеконстантата  $\tau$  се явява мярка за инертността на веригата при протичането на преходните процеси, т.е. тя характеризира скоростта, с която тези процеси протичат.



Фиг. 4.36. Към даване накъсо входа на веригата от фиг. 4.34

• Даване накъсо входа на  $R, L$  веригата

Нека в момента  $t=0$  входът на веригата се затвори накъсо (фиг. 4.36).

След късото съединение токът протича през новия  $R-L$  контур и енергията, натрупана в бобината, се разсейва в резистора. След завършване на преходния процес ( $t = \infty$ )  $u_L$  и  $i$  стават равни на нула.

Уравнението за електрическото състояние на контура се записва както следва:

$$u_R + u_L = 0 \quad ,$$

$$Ri + L \frac{di}{dt} = 0$$

или

$$\frac{L}{R} \frac{di}{dt} + i = 0 \quad .$$

Времеконстантата  $\tau$  е същата и решението на това едномерно диференциално уравнение е:

$$i = A \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad ,$$

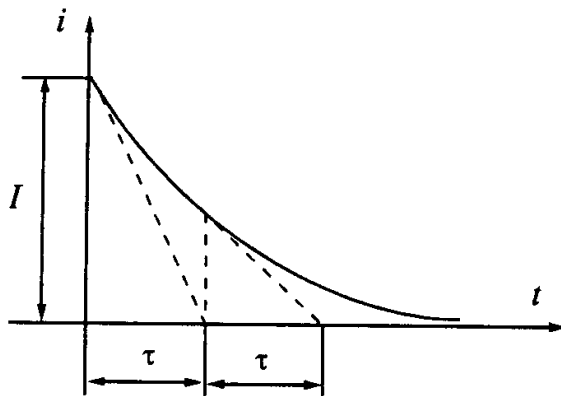
където  $A$  се определя от началното условие

$$i(0_-) = i(0_+) = \frac{U}{R} = I \quad ,$$

т.е.  $I = A \cdot e^0$ .

Следователно:

$$i(t) = I \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad .$$



Фиг. 4.37. Изменение на тока на веригата от фиг. 4.36

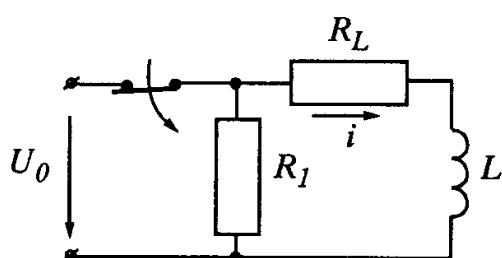
Скоростта, с която токът спада до нула, зависи както от запасената енергия  $\left(\frac{LI^2}{2}\right)$ , така и от стойността на съпротивлението  $R$ . При по-големи стойности на  $R$  спадането е по-бавно. Във всички случаи може да се счита, че преходният процес завършва практически при  $t = 5\tau$ .

• **Изключване на индуктивната бобина от източника на постоянно напрежение**

Въпросът за изключване на електрическата верига от фиг. 4.34 е сложен. Съпротивлението на изключващите контакти се променя в процеса на изключването на електрическата верига и в много случаи не се знае законът, по който това съпротивление се изменя.

При прекъсването на електрическата верига би следвало токът изведнъж да стане равен на нула. Това би довело до появата на безкрайно голямо напрежение на прекъсващите контакти ( $L \frac{di}{dt}$  ще клони към безкрай-

ност, тъй като токът би се изменил скокообразно). На практика безкрайно голямо напрежение на прекъсващите контакти не се получава, тъй като



Фиг. 4.38. Към изключването на вериги с големи индуктивности

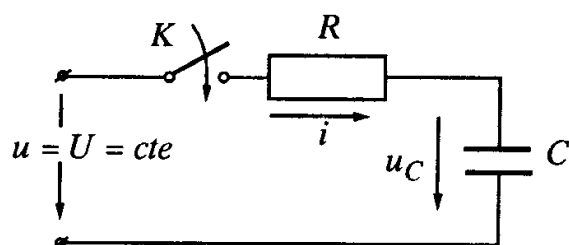
при нарастване на напрежението до известна стойност, между контактите се появява електрическа дъга или искра, което дава възможност за разсейване на енергията, запасена в магнитното поле на бобината.

За избягване на възникването на големи пренапрежения при прекъсването на вериги за постоянен ток, притежаващи големи индуктивности, тези вериги предварително се затварят през специален резистор ( $R_1$  от фиг. 4.38).

За избягване на възникването на големи пренапрежения при прекъсването на вериги за постоянен ток, притежаващи големи индуктивности, тези вериги предварително се затварят през специален резистор ( $R_1$  от фиг. 4.38).

При разработването на електрокомутационна апаратура в нея се предвиждат специални дъгогасящи устройства, като в редица случаи за предотвратяване на дъгата индуктивната бобина се шунтира с подходящи резистори.

4.8.3. Преходни процеси в  $R, C$  вериги за постоянен ток



Фиг. 4.39. Към зареждане на кондензатор

• **Зареждане на кондензатор**

Разглежда се преходният процес на зареждането на кондензатор през активно съпротивление, при включване на веригата към източник на постоянно е.д.н. при положение, че преди включването на веригата кондензаторът е бил напълно разреден (фиг. 4.39), т.е.:

$$U_C(0) = 0$$



По втория закон на Кирхоф за веригата се получава

$$u_R + u_C = U \quad \text{или} \quad Ri + u_C = U .$$

Токът в този контур ще бъде ток, който зарежда кондензатора, т.е.:

$$i = C \frac{du_C}{dt} .$$

След заместване се получава диференциалното уравнение на веригата:

$$RC \frac{du_C}{dt} + u_C = U .$$

Полученото диференциално уравнение е аналогично на това за  $R-L$  контура, с тази разлика, че тук променливата е напрежението  $u_C$ , а времеконстантата се определя като  $\tau = RC$ . Решението има вида:

$$u_C = A e^{-\frac{t}{\tau}} + B ,$$

където  $B$  е напрежението върху кондензатора след завършване на преходния процес, което е  $u_C(\infty) = U$ , т.е. кондензаторът е зареден. Тъй като преди затваряне на ключа кондензаторът е разреден, т.е.

$$u_C(-0) = u_C(0_+) = 0 ,$$

константата  $A$  може да се определи от равенството

$$0 = A e^0 + U = A + U$$

или

$$A = -U .$$

Следователно:

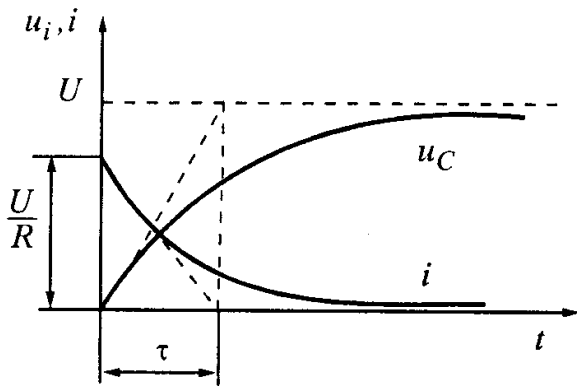
$$u_C = -U e^{-\frac{t}{\tau}} + U = U \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) .$$

Токът във веригата се определя от уравнението

$$i = C \frac{du_C}{dt} = C \frac{d}{dt} \left[ U \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \right] = CU \frac{1}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}} = \frac{U}{R} e^{-\frac{t}{\tau}} .$$

Графиките на изменение на тока и напрежението при зареждане на кондензатора са показани на фиг. 4.40.

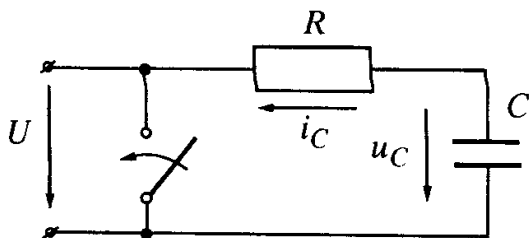
Токът в разглежданата верига може да се измени скокообразно. Това



Фиг. 4.40. Изменение на напрежението и тока при зареждане на кондензатор

• Разреждане на кондензатор

Предполага се, че до момента на комутацията кондензаторът с капацитет  $C$  е зареден да някакво напрежение  $U$  - фиг. 4.41.



Фиг. 4.41. Към разреждането на кондензатор

трябва да се отчита в случаите, когато към източника на е.д.н. се включва верига, съдържаща кондензатор. Ако активното съпротивление е малко, токът в началния момент след включването към източника може да бъде много голям и значително да превиши номиналния ток.

Практически може да се приеме, че преходният процес е завършил за време  $t = 5 \tau$ .

Когато ключът се затвори, кондензаторът постепенно се разрежда през резистора  $R$  и запасената в него енергия

$\left(\frac{CU^2}{2}\right)$  се преобразува в топлина. След завършване на преходния процес токът и напрежението в контура стават нула.

Уравнението за напреженията има вида:

$$u_R + u_C = 0 \text{ или } Ri + u_C = 0 ,$$

откъдето

$$RC \frac{du_C}{dt} + u_C = 0 .$$

Решението на това уравнение е известно:

$$u_C = Ae^{-\frac{t}{\tau}} .$$

Тъй като в началния момент

$$u_C(0_-) = u_C(0_+) = U ,$$

за константата  $A$  се получава

$$U = Ae^0 .$$

Или

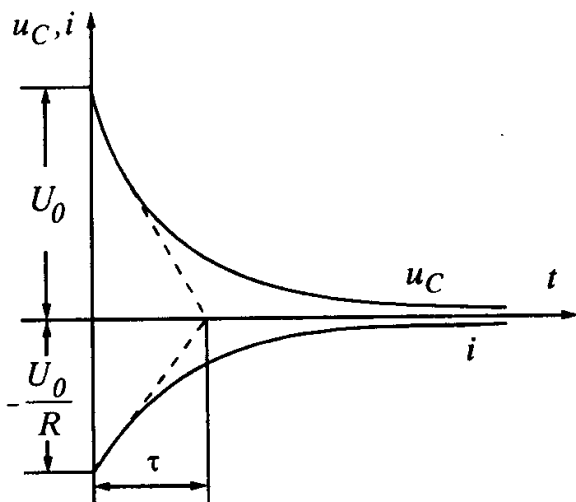
$$A = U.$$

Следователно:

$$u_C = A e^{-\frac{t}{RC}} = U e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

Токът във веригата се определя от уравнението

$$i = C \frac{du_C}{dt} = C \frac{d}{dt} \left( U e^{-\frac{t}{\tau}} \right) = -CU \frac{1}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}} = -\frac{U}{R} e^{-\frac{t}{\tau}},$$



Фиг. 4.42. Към изменението на тока и напрежението на кондензатора при разреждането му

където знакът  $(-)$  означава, че токът  $i$  е ток на разреждане на кондензатора; неговата посока не съвпада с посоката на напрежението на кондензатора, т.е. в случая кондензаторът е един вид източник, който отдава енергия.

Графиките на изменение на тока и напрежението на кондензатора при разреждането му са показани на фиг. 4.42.

Напрежението върху кондензатора и токът по абсолютна стойност намаляват по един и същ експоненциален закон и асимптотично клонят към нула. Времеконстантата определя скоростта на намаляването им.

---

#### Пример 4.6:

За какво време ще се зареди кондензаторът от фиг. 4.39, ако  $C = 1000 \mu F$  и  $R = 500 \Omega$ ?

Решение:

$$\tau = RC = 500 \cdot 1000 \cdot 10^{-6} = 0,5 \text{ s},$$
$$t = 5\tau = 5 \cdot 0,5 = 2,5 \text{ s}.$$

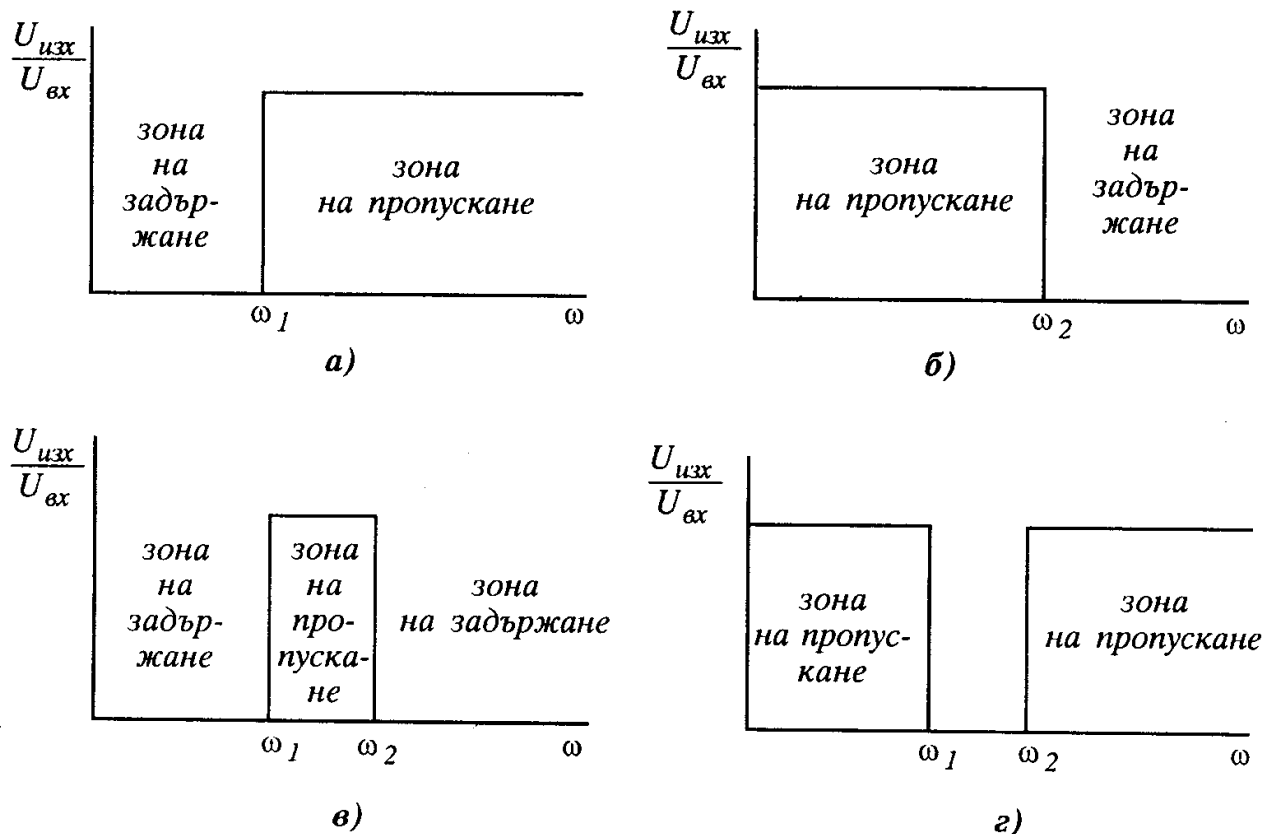
---

### Контролни въпроси:

1. Какво се разбира под понятието *преходен процес*?
2. Какво изразяват двата закона на комутацията?
3. Каква информация дава времеконстантата  $\tau$ ?
4. Как се определя времеконстантата при  $RL$  и  $RC$  верига?
5. За какво време обикновено завършват переходните процеси?
6. Опасно ли е директното изключване на големи индуктивности от веригите за постоянен ток?
7. Какво означава знакът  $(-)$  в израза за тока на кондензатора при разреждането му?

### 4.9. Електрически филтри

Изменението на съпротивлението на реактивните елементи при изменение на честотата позволява създаване на схеми, които пропускат или задържат сигнали, чиято честота се намира в определен честотен диапазон. Такива схеми се наричат филтри. Те се делят на няколко групи (фиг. 4.43):



Фиг. 4.43. Електрически филтри: а) високочестотен; б) нискочестотен; в) лентов; г) режекторен

- *високочестотни* - пропускат сигнали с честота по-висока от зададена гранична честота, т.е. в диапазона  $\omega_1 < \omega < \infty$  (фиг. 4.43а),

- *нискочестотни* - пропускат сигнали с честота по-ниска от зададена гранична честота, включително постоянен ток, т.е. в диапазона  $0 < \omega < \omega_2$  (фиг. 4.43б),

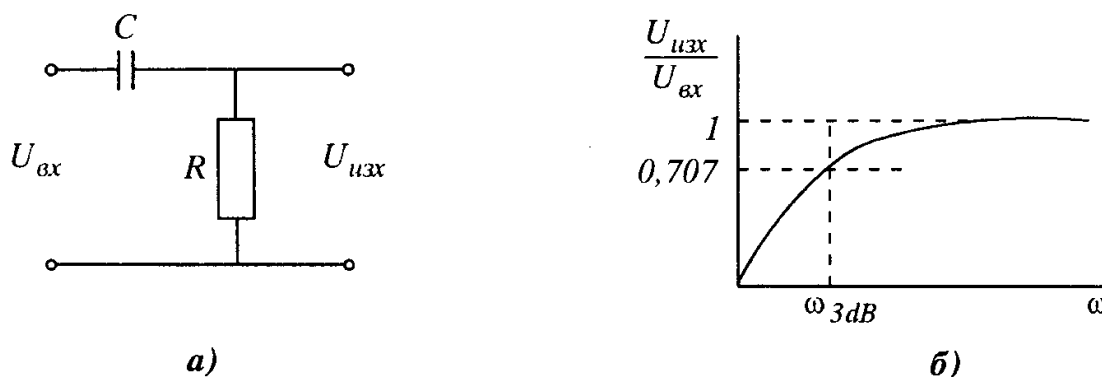
- *лентови* - пропускат сигнали в честотния диапазон от  $\omega_1$  до  $\omega_2$  (фиг. 4.43в),

- *режекторни* - не пропускат сигнали в честотния диапазон от  $\omega_1$  до  $\omega_2$  (фиг. 4.43г).

Тук ще бъдат разгледани най-простите филтри, които намират приложение в електронните схеми.

#### 4.9.1. Високочестотен филтър

Нека разгледаме схемата на фиг. 4.44а. Тя представлява последователно свързани резистор и кондензатор, към които се подава напрежение от източник, чиято честота може да се променя в широки граници.



Фиг. 4.44. Високочестотен филтър

Големината на тока във веригата се определя по закона на Ом, като се

има предвид, че модулът на комплексното съпротивление е  $z = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}$ , следователно

$$I = \frac{U_{вх}}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}}$$

Напрежението върху резистора, което в същото време е и изходно нап-

режение, ще бъде

$$U_{изх} = I \cdot R = U_{вх} I = \frac{U_{вх} R}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}}$$

Ако числителят и знаменателят в този израз се разделят на  $R$ , се получава

$$U_{изх} = \frac{U_{вх}}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega RC}\right)^2}},$$

а отношението на изходното към входното напрежение е:

$$\frac{U_{изх}}{U_{вх}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega RC}\right)^2}}$$

Както следва от получената формула, при  $\omega = 0$  това отношение става нула, а при  $\omega = \infty$  е единица. От графиката на фиг. 4.44б се вижда, че тази зависимост се изменя плавно и границата между зоните на пропускане и задържане не е ясно определена. По тази причина се приема, че тя се нами-

ра при онази честота, при която отношението  $\frac{U_{изх}}{U_{вх}}$  спада до  $\frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707$ .

Това съответства на двойно намаляване на изходната мощност (последната е пропорционална на квадрата на напрежението), което, изразено в логаритмичен мащаб, е равно на три децибела (3dB). При това условие, от

израза под корена следва, че  $\frac{1}{\omega RC} = 1$ , откъдето за граничната честота се получава

$$\omega_{3dB} = \frac{1}{RC}$$

Например при съпротивление на резистора  $1 \text{ k}\Omega$  и капацитет на кондензатора  $0,1 \text{ }\mu\text{F}$ ,  $\omega_{3dB} = 1/1 \cdot 10^3 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6} = 10^4 \text{ rad/s}$ , което съответства на

$$\frac{10^4}{2\pi} = 1,59 \text{ kHz}$$

### 4.9.2. Нискочестотен филтър

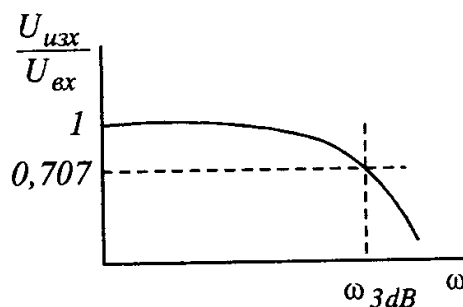
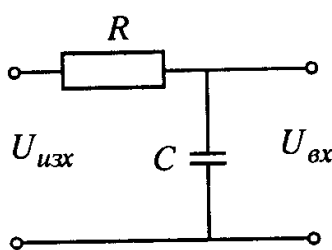
Схемата на такъв филтър може да се получи като се разменят местата на резистора и кондензатора (фиг. 4.45). Токът във веригата остава същият, а напрежението върху кондензатора ще има вида

$$U_{изх} = I \cdot \frac{1}{\omega C} = \frac{U_{вх}}{\omega C \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \frac{U_{вх}}{\sqrt{(\omega RC)^2 + 1}},$$

откъдето за отношението на изходното към входното напрежение се получава:

$$\frac{U_{изх}}{U_{вх}} = \frac{1}{\sqrt{(\omega RC)^2 + 1}}.$$

Зависимостта на  $\frac{U_{изх}}{U_{вх}}$  от честотата е дадена на фиг. 4.45. За граничната честота в този случай се получава същата формула, но честотният диапазон е от 0 до  $\omega_{3dB}$ .



Фиг. 4.45. Нискочестотен филтър

Разгледаните филтри се наричат RC-филтри - от наименованието на елементите, от които са съставени. За да се получи лентов или режекторен филтър се използват схеми с последователно или успоредно свързване на бобина и кондензатор. Тези филтри се наричат още *резонансни*.

### 4.9.3. Лентов филтър

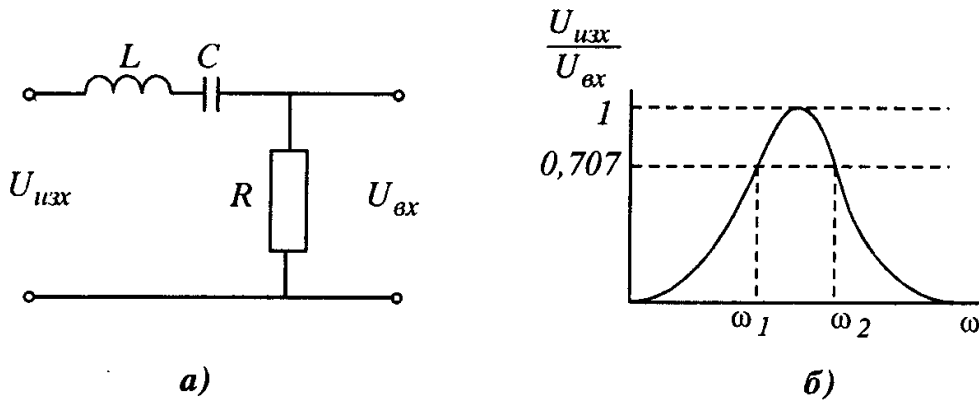
Лентовия филтър е последователен  $R, L, C$  контур, в който напрежението върху резистора представлява изходното напрежение на филтъра (фиг. 4.46a). Както следва от получената в т. 4.4 формула за тока, то има вида

$$U_{изх} = I \cdot R = U_{вх} \cdot \frac{R}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}},$$

откъдето

$$\frac{U_{изх}}{U_{вх}} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}$$

Отношението на изходното към входното напрежение като функция на честотата е показано на фиг. 4.46б. При резонансната честота то достига своя максимум, т.е. единица. При по-ниски или по-високи честоти спада, като граничните честоти се определят от нивото 0,707. Това означава, че филтърът пропуска сигнали в честотната лента  $\omega_1 - \omega_2$ .

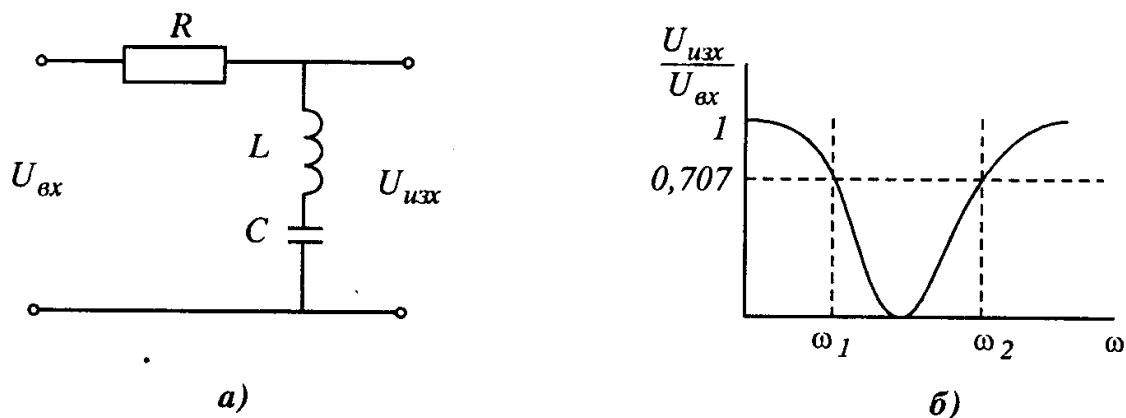


Фиг. 4.46. Лентов филтър

#### 4.9.4. Режекторен филтър

Този филтър се получава като в схемата на фиг. 4.46б се сменят местата на резистора и бобината и кондензатора - фиг. 4.47а.

В този случай изходното напрежение при резонансната честота на контура спада до нула, а при  $\omega = 0$  или безкрайност е равно на входното (фиг.



Фиг. 4.47. Режекторен филтър



4.476). Граничните честоти  $\omega_1$  и  $\omega_2$  определят зоната на задържане за сигналите, чиито честоти попадат в нея.

Разгледаните филтри съдържат само идеални пасивни елементи, но съществуват филтри с източници на напрежение и ток, които се наричат *активни филтри*. Стремехът да се създадат филтри с амплитудно-честотна характеристика, максимално близка до идеалната, е довел до създаване на по-сложни и по-качествени схеми, чието разглеждане не е предмет на настоящия учебник.

МАГНИТНИ ВЕРИГИ С ПОСТОЯННО МАГНИТОДВИЖЕЩО НАПРЕЖЕНИЕ

5.1. Общи положения

5.1.1. Магнитни вериги. Видове

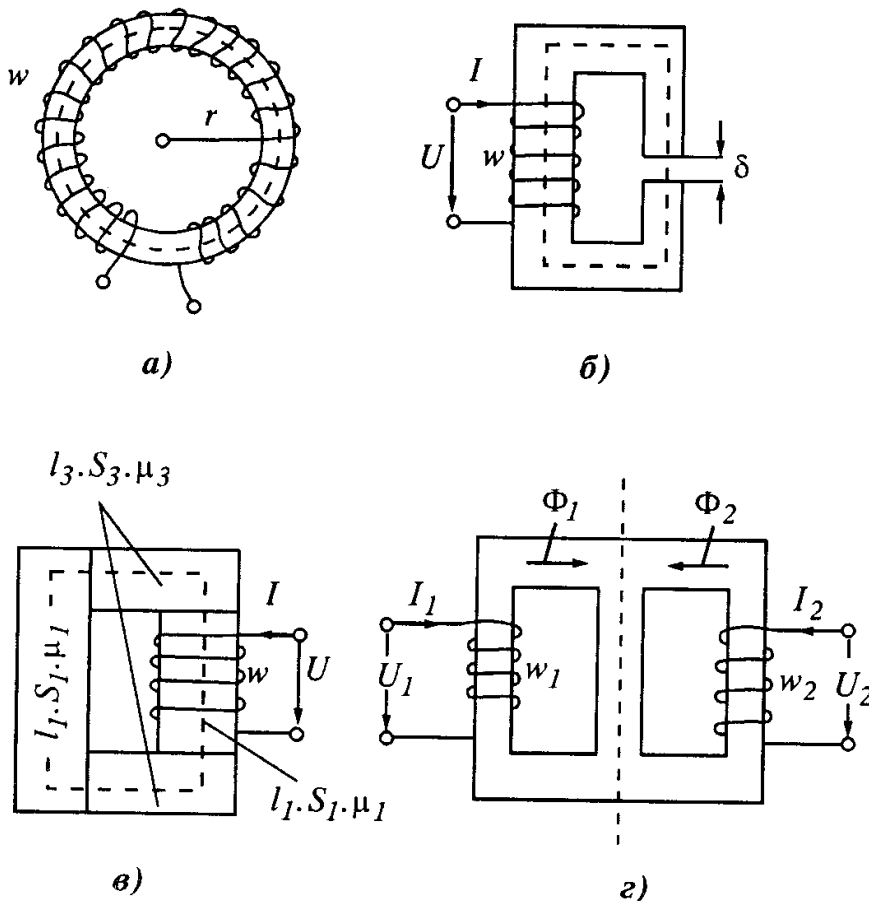
Съвкупността от магнитни и немагнитни материали, образуващи магнитопровод, през който се затваря магнитният поток, се нарича *магнитна верига (МВ)*.

Ако затвореният път на магнитният поток е образуван от един и същ материал (еднородна среда), веригата е *еднородна*, а когато е образувана от различни материали, включително и въздушни междини - *разнородна*.

От друга страна, съществуват *неразклонени (прости)* и *разклонени (сложни)* магнитни вериги,

когато магнитният поток се разклонява на части и се затваря по различни пътища. Разклонените магнитни вериги, от своя страна, могат да бъдат *симетрични* и *несиметрични*. На фиг. 5.1 са посочени примери за различни видове магнитни вериги.

Магнитната верига е симетрична, ако двете ѝ части, разположени отляво и отдясно от вертикалната пунктирна линия, са еднакви в геометрично отношение, изготвени са



Фиг. 5.1. Магнитни вериги: а) проста еднородна; б, в) прости разнородни; г) симетрична магнитна

от един и същ материал и ако

$$I_1 \cdot w_1 = I_2 \cdot w_2, \quad \Phi_1 = \Phi_2 \quad .$$

Достатъчно е да се направи  $I_1 \cdot w_1 \neq I_2 \cdot w_2$  или да се измени посоката на тока в една от намотките, за да стане магнитната верига несиметрична.

При условие, че отделните участъци на магнитната верига имат постоянно сечение и плътността на магнитния поток (магнитната индукция) по цялото сечение е постоянна, тогава е възможно да се направи еквивалентна електрическа схема, в която вместо ток ще има магнитен поток, вместо е.д.н. - магнитодвижещо напрежение (м.д.н.), а вместо електрическо съпротивление - магнитно съпротивление. При условие, че магнитната проницаемост на материала се приема за постоянна, съпротивлението  $R_\mu = const.$  Към такава магнитна верига може да се приложат законите на Кирхоф по същия начин, както това бе направено за линейните постояннотокови електрически вериги.

### 5.1.2. Закони на Кирхоф за магнитните вериги

При пресмятането на магнитните вериги, както и при електрическите, се използват двата закона на Кирхоф.

#### • Първи закон на Кирхоф за магнитните вериги

*Първият закон на Кирхоф* следва от принципа за непрекъснатостта на магнитния поток и гласи: *Алгебричната сума от магнитните потоци в който и да възел от магнитната верига е равна на нула:*

$$(5.1) \quad \Phi_1 + \Phi_2 + \dots + \Phi_k + \dots + \Phi_n = \sum_{k=1}^n \Phi_k = 0 \quad .$$

Приема се входящите магнитни потоци да имат един знак (примерно +), а изходящите - обратен знак (-).

#### • Втори закон на Кирхоф за магнитните вериги

Вторият закон на Кирхоф за магнитните вериги представлява, по същество, друга форма на запис на закона за пълния ток (закона на Ампер - вж. гл. 1, т. 1.3) и гласи: *Алгебричната сума от падовете на магнитните напрежения в даден затворен контур е равна на алгебричната сума от магнитодвижещите напрежения (м.д.н.), действащи в този контур:*

$$\Sigma U_\mu = \Sigma F_\mu$$

или

$$(5.2) \quad \Sigma U_{\mu} = \Sigma Hl = \Sigma \Phi R_{\mu} = \Sigma F_{\mu} = \Sigma Iw \quad .$$

Приема се произволна положителна посока на потоците в клоновете на магнитната верига и положителна посока на обхождане на контура. Ако посоката на магнитния поток в някой участък съвпада с посоката на обхождане, падът на магнитното напрежение в тези участък влиза в сумата  $\Sigma U_{\mu}$  със знак (+), в противен случай - със знак (-). Аналогично, ако м.д.н, съвпада по посока с посоката на обхождане на контура, то влиза в сумата  $\Sigma Fw$  със знак (+), в противен случай - със знак (-).

## 5.2. Анализ на магнитни вериги

При пресмятането на магнитни вериги се срещат *два вида задачи*. При единия от тях трябва да се определи намагнитващият ток, когато е зададен магнитният поток (*права задача*), а при другия - да се определи потокът по зададен ток или м.д.н. (*обратна задача*). И в двата случая са зададени конфигурацията и геометричните размери на магнитната верига, материалите, от които тя е направена, магнитната проницаемост или кривата на намагнитване на феромагнитните материали и броят на навивките на бобината.

### 5.2.1. Линейни магнитни вериги

Пресмятането се извършва в следната последователност:

1. Магнитната верига се разделя на участъци с постоянно сечение  $S_k$  и определена дължина  $l_k$  (дължината на участъците се избира по средната магнитна линия) и при известна стойност на  $\mu_r$  се определя  $R_{\mu}$  за всеки участък.

2. Съставя се еквивалентната електрическа схема.

3. В зависимост от това дали е зададено м.д.н.  $F$  или магнитният поток, се решава права или обратна задача.

4. Съставя се система уравнения за намиране на неизвестните величини.

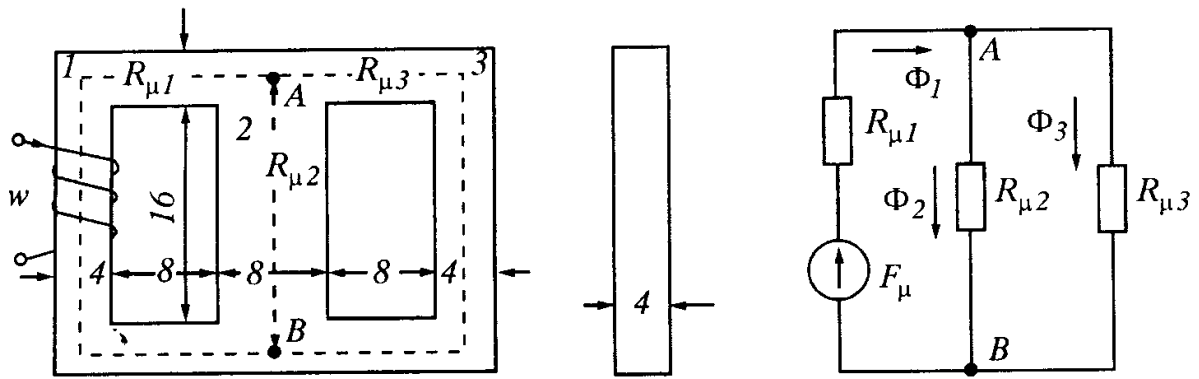
---

### Пример 5.1:

Да се определят магнитните потоци през различните сечения на магнитопровода за разклонената магнитна верига от фиг. 5.2 (всички размери са в см), ако  $\mu_r = 600 = const$ ,  $w = 200$  навивки и  $I = 2,5A$ .

### Решение:

1. Дадената магнитна верига е линейна. За нея се съставя еквивалентната електрическа схема и се определят стойностите на магнитните съпро-



Фиг. 5.2. Магнитни вериги (към пример 5.1)

тивления и м.д.н.,  $F_{\mu}$  :

Тъй като магнитната верига е симетрична, то

$$R_{\mu 1} = R_{\mu 3} = \frac{l_1}{\mu S_1} = \frac{l_1}{\mu_0 \mu_r S_1} = \frac{48 \cdot 10^{-2}}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 600 \cdot 16 \cdot 10^{-4}} = 3,98 \cdot 10^5 \text{ H}^{-1} ,$$

където  $l_1$  е дължината на участъците по средната магнитна линия между т. А и т. В, т.е.  $l_1 = 48 \cdot 10^{-2} \text{ m}$ , а сечението на участъците е  $S_1 = 16 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ .

$$R_{\mu 2} = \frac{l_2}{\mu S_2} = \frac{l_2}{\mu_0 \mu_r S_2} = \frac{20 \cdot 10^{-2}}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 600 \cdot 32 \cdot 10^{-4}} = 0,829 \cdot 10^5 \text{ H}^{-1} ,$$

където  $l_2 = 20 \cdot 10^{-2} \text{ m}$ , а  $S_2 = 32 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ ,

$$Iw = F_{\mu} = 2,5 \cdot 200 = 500 \text{ A} .$$

2. Магнитният поток  $\Phi_1$  може да се изчисли по формулата

$$\Phi_1 = \frac{F_{\mu}}{R_{\mu \text{ екв}}} ,$$

където

$$R_{\mu \text{ екв}} = R_{\mu 1} + \frac{R_{\mu 2} R_{\mu 3}}{R_{\mu 2} + R_{\mu 3}} = 3,98 \cdot 10^5 + \frac{0,829 \cdot 10^5 \cdot 3,98 \cdot 10^5}{0,829 \cdot 10^5 + 3,98 \cdot 10^5} = 4,67 \cdot 10^5 \text{ H}^{-1} ,$$

$$\Phi_1 = 1,07 \cdot 10^{-3} \text{ wb} .$$

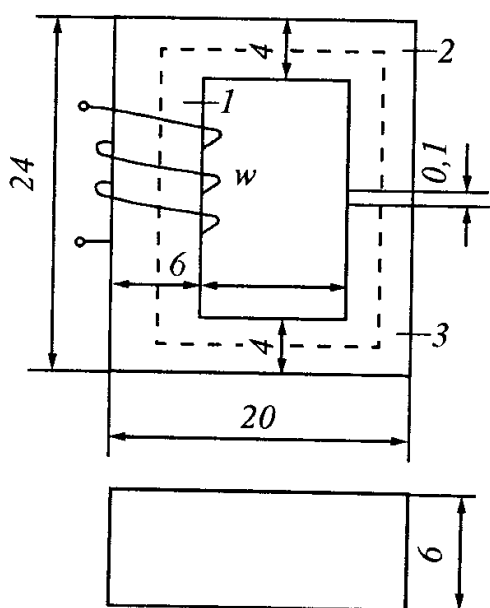
3. Магнитните потоци  $\Phi_2$  и  $\Phi_3$  могат да се намерят след заместване във формулите

$$\Phi_2 = \Phi_1 \frac{R_{\mu 3}}{R_{\mu 2} + R_{\mu 3}} = 0,886 \cdot 10^{-3} \text{ Wb} \quad ,$$

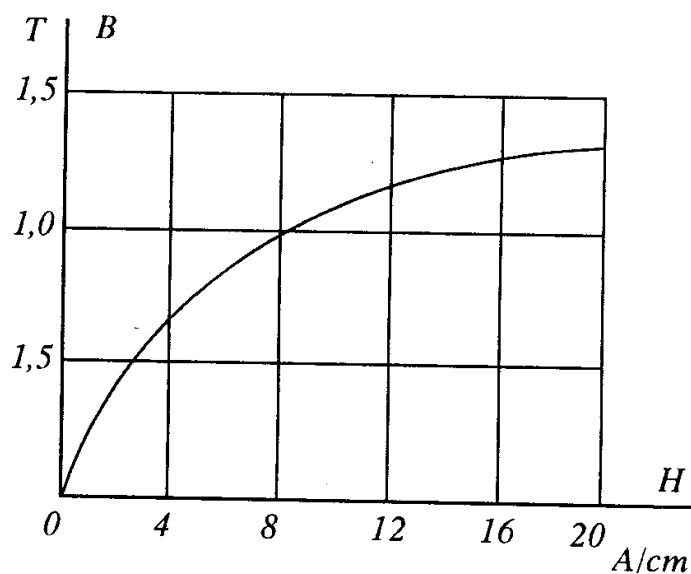
$$\Phi_3 = \Phi_1 - \Phi_2 = 0,184 \cdot 10^{-3} \text{ Wb} \quad .$$

### 5.2.2. Нелинейни магнитни вериги

На практика магнитните вериги на електрическите машини и апарати са нелинейни, т.е. за тях не може да се приеме, че  $\mu = const$ , следователно за анализ на такива  $M\Phi$  трябва да се използват други методи. Тук ще бъде разгледан един от тях за определяне на м.д.н., необходимо за създаване на зададена магнитна индукция във въздушната междина  $B_\delta$  на едноконтурна магнитна верига - фиг. 5.3.



Фиг. 5.3. Магнитна верига (към пример 5.2)



Фиг. 5.4. Крива на намагнитване на стомана Ст3

С изключение на магнитната проницаемост, тук са в сила всички ограничения, формулирани за линейните  $M\Phi$ , а вместо  $\mu$  е зададена зависимостта  $B(H)$  - фиг. 5.4. Магнитният поток  $\Phi$  в този контур се определя като

$$\Phi = B_\delta \cdot S_\delta \quad ,$$

а плътността на магнитния поток в отделните участъци на контура:  $B_k = \frac{\Phi}{S_k}$ .

От закона за пълния ток се получава следното равенство:

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = \sum H_k l_k .$$

В него магнитният интензитет  $H_k$  на феромагнитните участъци се определя от кривата на намагнитване на материала за всяка стойност на  $B_k$ . За въздушния участък  $H_\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0}$ . В  $MВ$  на фиг. 5.3 могат да се разграничат следните феромагнитни участъци: 1 - с навита върху него бобина, създаваща м.д.н.  $F$ ; 2 и 3 - с еднакво сечение и дължина, и въздушният участък с дължина  $\delta$ . Следователно:

$$\sum H_k \cdot l_k = H_1 \cdot l_1 + H_2 \cdot l_2 + H_3 \cdot l_3 + \left( \frac{B_\delta}{\mu_0} \right) \cdot \delta .$$

Основно допускане при пресмятането на магнитните вериги е това, че магнитният поток по цялата магнитна верига се приема за неизменен. В действителност известна част от магнитния поток се затваря през въздуха - това е т. нар. *поток на разсейване*. При малки въздушни междини потокът на разсейване е относително малък, но с увеличаване на въздушната междина той може да стане съизмерим с основния магнитен поток. Наличието на поток на разсейване в сложните магнитни вериги затруднява пресмятането.

### Пример 5.2:

Да се определи необходимото м.д.н. за създаване на магнитна индукция  $0,8 \text{ Т}$  във въздушната междина на магнитната верига, показана на фиг. 5.3. Всички размери са дадени в см. На фиг. 5.4 е дадена кривата на намагнитване на стомана Ст3. Да се определи необходимият ток в бобината при брой на навивките  $w = 200$ .

### Решение:

1. Определя се магнитният поток в контура като се приема, че сечението на въздушната междина е равно на това на магнитопровода в участъка, където тя е направена:  $\Phi = B_\delta \cdot S_\delta = 0,8 \cdot 24 \cdot 10^{-4} = 19,2 \cdot 10^{-4} \text{ Wb}$ , а магнитният

интензитет е  $H_\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0} = \frac{0,8}{4\pi \cdot 10^{-7} \text{ A/m}} = 6,366 \cdot 10^5 \text{ A/m} = 6,366 \cdot 10^3 \text{ A/cm}$ .

2. Участъците 2 и 3 имат същото сечение и, следователно,  $B_2 = B_3 = 0,8 \text{ Т}$ . Магнитният интензитет за създаване на такава индукция в стоманата се определя по кривата  $B(H)$  на фиг. 5.4:  $H_2 = H_3 = 5,5 \text{ A/cm}$ .

3. Магнитната индукция в участък 1 е  $B_1 = \frac{\Phi}{S_1} = \frac{19,2 \cdot 10^{-4}}{36 \cdot 10^{-4}} = 0,533 T$ , а

магнитният интензитет:  $H_1 = 3 A/cm$ .

4. Търсеното м.д.н. ще бъде:

$$F = H_1 \cdot l_1 + H_2 \cdot l_2 + H_3 \cdot l_3 + H_8 \cdot \delta = 3 \cdot 20 + 5,5 \cdot (17 + 9,9) + 5,5 \cdot (17 + 10) + 6,366 \cdot 10^3 \cdot 0,1 = 60 + 147,95 + 148,5 + 636,6 = 993,05 A.$$

5. Токът в бобината се получава  $I = \frac{993,05}{200} = 4,96 A$ .

За по-точното изчисляване на магнитното поле в електромагнитните устройства се използват компютърни програми, съставени по метода на крайните елементи (МКЕ). При този метод магнитопроводът се разбива на елементарни еднородни триъгълници (или тетраедри в пространството), за чиито върхове магнитната индукция има определени стойности и се изменя линейно по дължината на всяка страна. Така, при зададени гранични условия, магнитната индукция може да се изчисли във всички възли (върхове) на съставената мрежа след решаване на съответната система уравнения. Последната може да наброява няколкостотин хиляди. Получените резултати обикновено се представят с помощта на силови линии или се изобразяват с цвят, който се променя в зависимост от стойността на магнитната индукция  $B$ .

#### **Контролни въпроси:**

1. Какво представлява магнитната верига?
2. Как се определя магнитното съпротивление?
3. Формулирайте законите на Ом и Кирхоф за магнитните вериги.
4. Колко вида задачи има при пресмятането на магнитните вериги?
5. Кога е възможно пряко решаване на магнитна верига (чрез еквивалентна електрическа схема)?
6. Как се съставя еквивалентната електрическа схема на магнитна верига?
7. Защо между закона на Ом за магнитни и електрически вериги има само формална аналогия?
8. Защо машините и апаратите за променлив ток се снабдяват с феромагнитни ядра?
9. Защо магнитопроводите се изпълняват от листов електротехническа стомана?
10. С каква цел по пътя на магнитния поток в магнитопровода се включва въздушна междина?



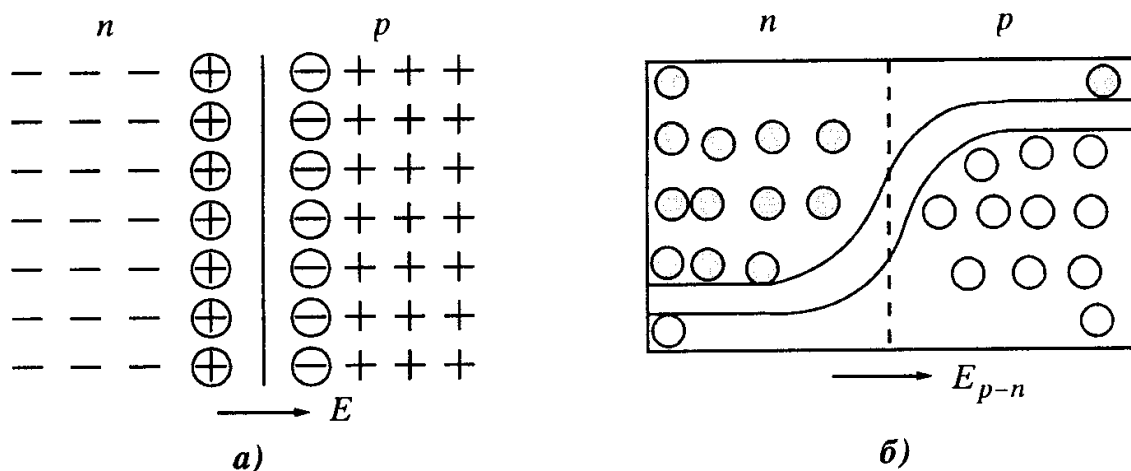
## РАЗДЕЛ III. ЕЛЕКТРОННИ СХЕМИ

### Шеста глава

#### ПОЛУПРОВОДНИКОВИ ПРИБОРИ

##### 6.1. p-n преход. Полупроводников диод

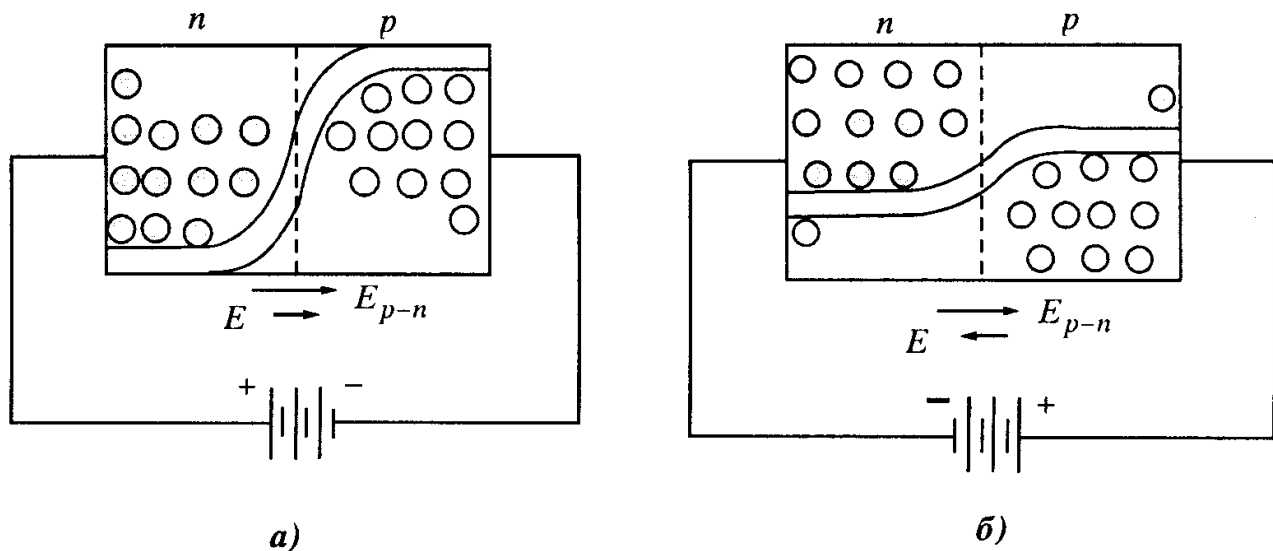
Както беше показано в гл. 2, полупроводниковите материали от  $n$ -тип имат свободни носители на електрически заряд електрони, а материалите от  $p$ -тип - дупки. Какво става на границата на два кристала, единият от които е с  $n$ -, а другият с  $p$ -проводимост? Вследствие разликата в концентрациите на свободните носители електроните от  $n$ - преминават в  $p$ -областта, при което в граничната зона се образуват отрицателни йони (да си припомним, че примесите в нея са от трета валентност) и заедно с това в  $n$ -областта в граничната зона се образуват положителни йони (примесите са от пета валентност) - фиг. 6.1.



Фиг. 6.1. p-n преход

По такъв начин се създава граничен слой, в който електрическото поле е насочено от  $n$ - към  $p$ -областта и препятства по-нататъшното проникване на електрони в  $p$ - и на дупки в  $n$ -областта. Това поле играе ролята на **потенциална бариера**, която може да се изобрази както е показано на фиг. 6.1б. Забранената зона на границата на двата полупроводника се деформира така, че свободните електрони нямат достатъчно енергия да преминат в  $p$ -областта. Ако разглеждаме електроните като топчета, плаващи в течност, това означа-

ва, че е необходима допълнителна сила да ги издигне нагоре, за да увеличи тяхната потенциална енергия. А ако разглеждаме дупките като мехурчета в течността, необходима е сила да ги дръпне надолу, след което те могат да преминат в  $n$ -областта. Какво ще стане, ако към  $p$ - $n$  прехода се приложи напрежение от външен източник? В случая, когато плюсьт е свързан към  $n$ -, а минусът към  $p$ -полупроводника (фиг. 6.2а), външното поле  $E$  съвпада по посока с вътрешното  $E_{p-n}$  и потенциалната бариера се увеличава, и на практика ток във веригата не протича. Възможно е само преминаване на свободни електрони, намиращи се в  $p$ -областта, и на дупки, намиращи се в  $n$ -областта. При смяна на полярността на източника (фиг. 6.2б) външното поле е насочено срещу вътрешното, потенциалната бариера намалява и става възможно преминаване на голям брой носители през  $p$ - $n$  прехода, което води до рязко увеличаване на тока. Следователно  $p$ - $n$  преходът може да работи като електронна клапа (вентил), която в зависимост от посоката на приложеното напрежение пропуска или не пропуска ток.

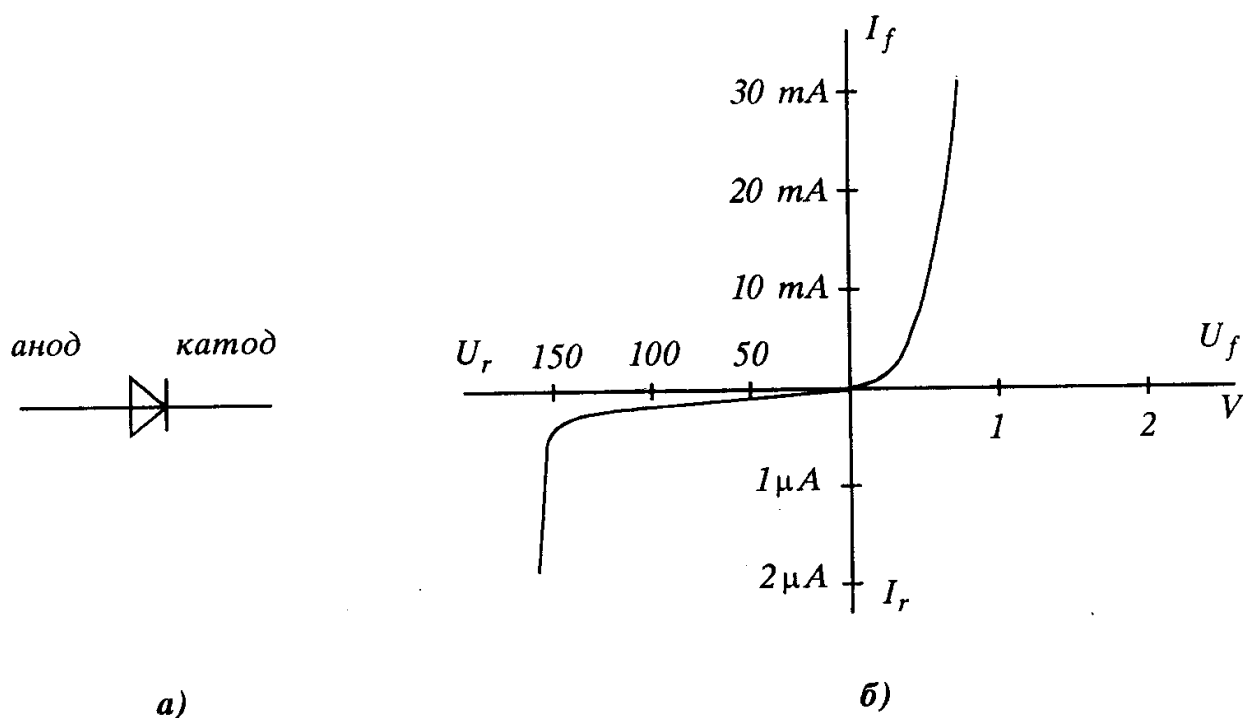


Фиг. 6.2. Включване на напрежение към  $p$ - $n$  прехода

Когато „клапата“ е отворена, включването се нарича **право включване**, а когато е затворена - **обратно включване**. Изменението на потенциалната бариера на практика е свързано с изменение на ширината на преходния слой, като в първия случай тя намалява, а във втория се увеличава. Тези свойства на  $p$ - $n$  прехода се използват в полупроводниковите диоди и транзистори.

#### • Полупроводников диод

Полупроводниковият диод представлява пасивен нелинеен елемент, който има два извода, наречени „анод“ и „катод“ (фиг. 6.3а), и волтамперна характеристика, показана на фиг. 6.3б.



Фиг. 6.3. Волтамперна характеристика на полупроводников диод

При подаване на напрежение в права посока („+“ на анода и „-“ на катода) при стойности 0,5-0,8 V токът в права посока  $I_f$  рязко нараства и се ограничава от резистор, включен последователно с диода. Ако се подаде обратно напрежение  $U_r$  („+“ на катода и „-“ на анода), токът е значително по-малък (на около 5-6 порядъка) при напрежения, достигащи десетки и стотици волта. За всеки диод съществува обратно напрежение, при което настъпва пробив и елементът не се възстановява.

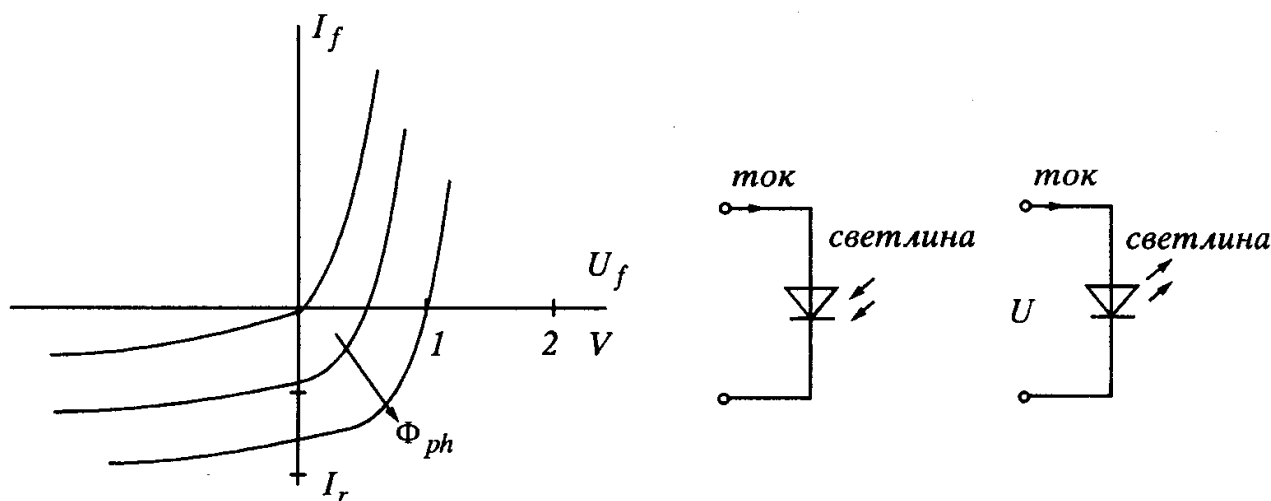
Най-важните характеристики на диода са допустимият ток в права посока,  $I_{f\max}$ , допустимото обратно напрежение,  $U_{r\max}$  и честотният диапазон, за които е предназначен. Последното обстоятелство е свързано с това, че  $p-n$  преходът в описаната структура може да се разглежда като кондензатор, чието влияние при използване на диода в променливотокови вериги не може да се пренебрегне. По тази причина за по-високите честоти площта на прехода трябва да бъде по-малка. На това изискване отговарят т.нар. *точкови диоди*.

Диодите най-често се използват в токоизправителите, които представляват преобразуватели на променливия ток в постоянен.

#### • Фотодиоди

Едно от свойствата на  $p-n$  прехода е възможността да генерира свободни заряди при осветяване. Ако към изводите на елемент с такъв преход се

свърже резистор, вътрешното поле на  $E_{p-n}$  се превръща източник на е.д.н. Волтамперната ( $V-A$ ) характеристика на такъв диод на тъмно има същия вид като обикновения диод, но при осветяване и увеличаване на светлинния поток се измества надолу (фиг. 6.4).



Фиг. 6.4.  $V-A$  характеристика на фотоелемент. Условни означения на фотодиод и светодиод (LED)

Работната част на характеристиката е в  $IV$ -ти квадрант. За да се получат фотоелементи с достатъчна мощност е необходимо площта на  $p-n$  прехода да се увеличи и последният да бъде разположен близо до повърхността на силициевия кристал. Важна роля в това отношение изиграва създадената през 50-те години на миналия век технология на дифузионно въвеждане на съответните примеси в кристала на силиция или германия. Силен тласък в създаването на ефективни и евтини фотоелементи дава приложението им в космическите апарати, а в последно време екологичните изисквания постепенно увеличават дела на тези елементи в производството на електроенергия. Напрежението на една слънчева батерия зависи от броя на последователно свързаните елементи, а мощността - от броя на паралелните клонове с еднакво напрежение.

#### • Светодиоди

Обратният процес на преобразуване на електрическата енергия в светлина при подаване на напрежение на  $p-n$  прехода също е възможен. Този въпрос е свързан със създаването на полупроводникови лазери и технологично е решен през 60-те години на миналия век. За целта, като основа, вместо кристали от силиций се използват кристали от галиев арсенид (GaAs). Последните, макар съставени от елементи от трета (Ga) и пета

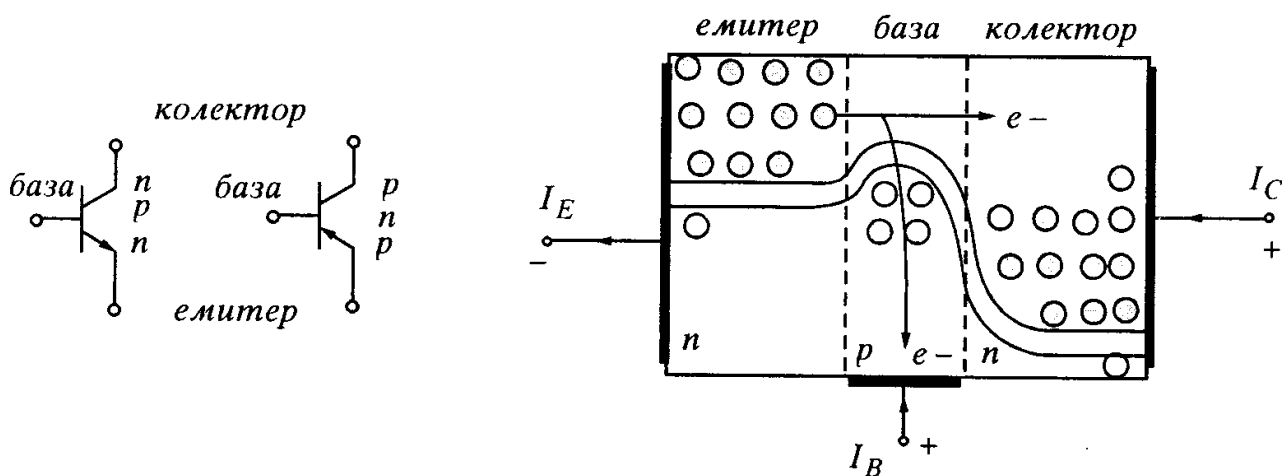
валентност (As), имат същата структура като Si. Но GaAs превъзхожда значително силиция по подвижност на електроните и това позволява да се правят транзистори за много високи честоти и много бързи електронни ключове за цифровата техника. Легирането на GaAs с различни добавки (елементи) позволява да се осигури висока проводимост, когато собствените загуби на диода или транзистора трябва да са минимални, и по-малка проводимост, когато се правят интегрални схеми.

Понастоящем масово се произвеждат светодиоди (английската им абревиатура е LED - Light Emitting Diodes), излъчващи в основните цветове на видимия спектър. Интензивността на излъчването  $0,1 \div 0,4 \text{ lm/W}$  в първите LED, вече е над  $100 \text{ lm/W}$ , което позволява използването им за сигнални и аварийни светлини на кораби и самолети, в уличните светофарни уредби и др., поради високата надеждност и възможността за работа в тежки условия.

## 6.2. Транзистори. Принцип на действие. Основни свойства

Транзисторът представлява полупроводников елемент с трислойна структура ( $n-p-n$  или  $p-n-p$ ) и има два  $p-n$  прехода и три извода. На фиг. 6.5 е показана  $n-p-n$  структура, при която единият от преходите е включен в права посока, а вторият - в обратна.

При указаната полярност на напрежението преходът емитер-база (*емитерен преход*) е отпушен, а преходът база-колектор (*колекторен преход*) е запушен. Главната особеност на транзистора се състои в това, че базовият слой се прави много тънък и когато емитерният преход е отворен енергията на електроните и, съответно, дължината на свободния пробег е достатъчна, за да пресече базата и да се окаже в областта на колектора, като увеличава обратния ток на колекторния преход. Почти всички заряди от емитера достигат колектора. Една малка част от тях се отклонява и образува



Фиг. 6.5. Условни означения и структура на  $n-p-n$  транзистор

базовия ток. В общия случай емитерният ток  $I_E$  е

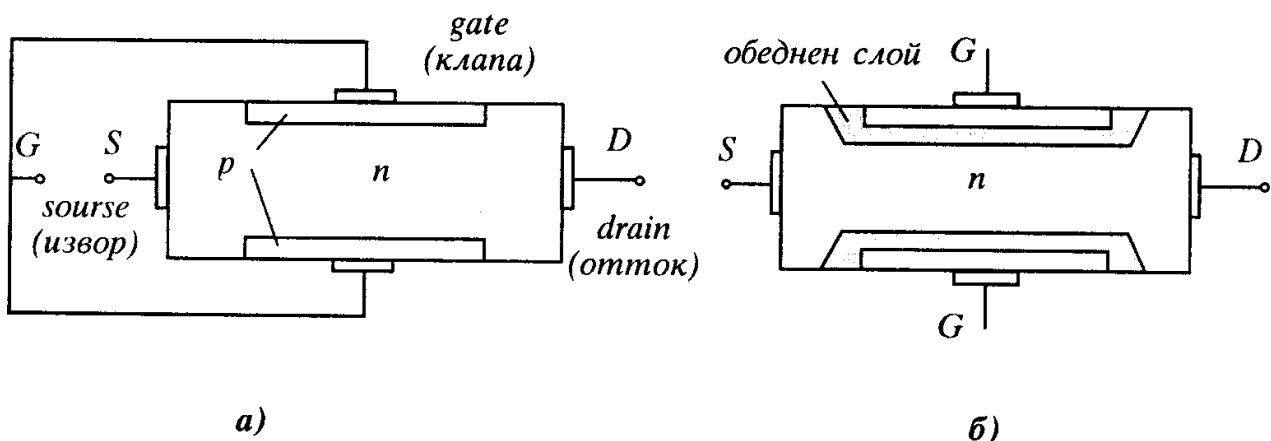
$$I_E = I_C + I_B$$

Колекторният ток  $I_C$  и базовият ток  $I_B$  са свързани, както следва:  $I_B = I_C / h_{21E}$ . Константата  $h_{21E}$  обикновено приема стойността от 20 до 1 000 в зависимост от типа на транзистора. Често тя се означава с  $\beta$  и се нарича коефициент на усилване по ток.

#### • Полеви транзистори

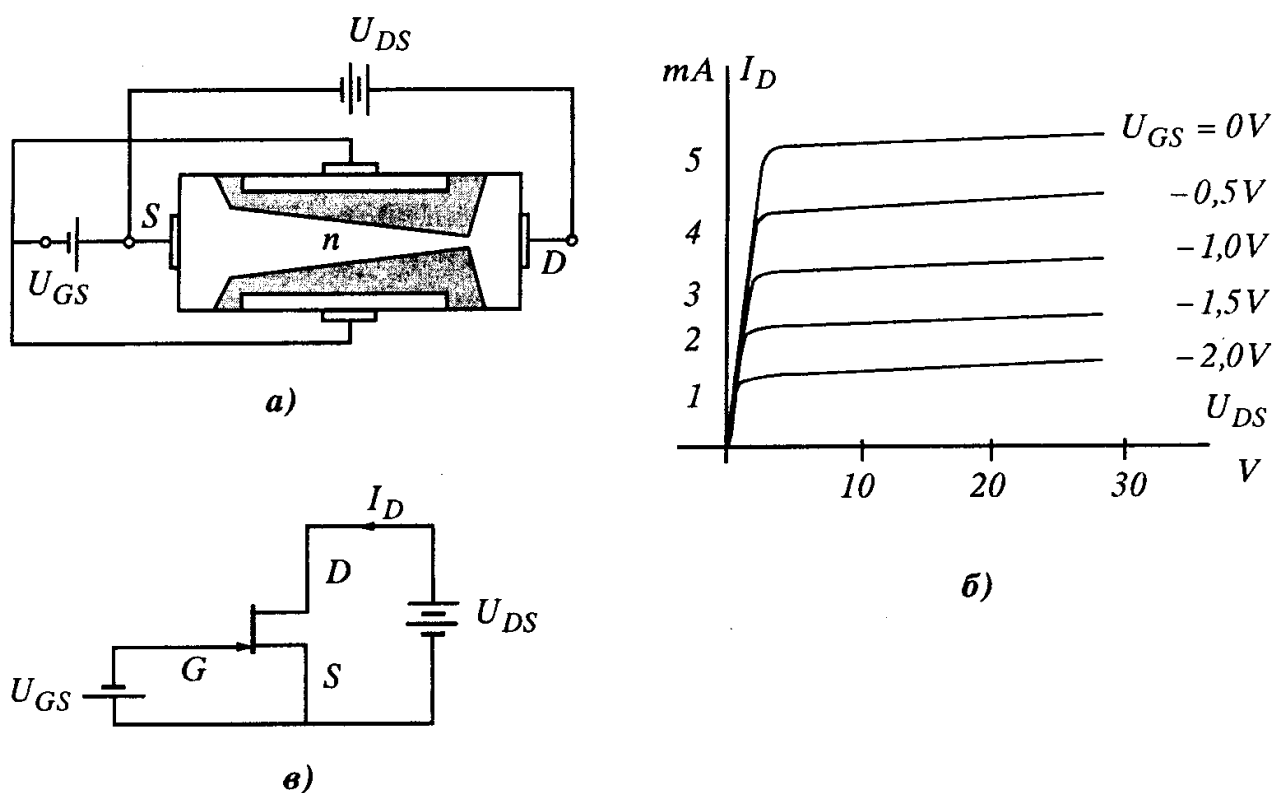
Полевите транзистори имат структурата, показана на фиг. 6.6а. От двете страни на пластинка от полупроводник с  $n$ -проводимост е нанесен слой с  $p$ -проводимост.

Този елемент има два извода  $S$  и  $D$ , между които има среда със свободни носители на заряд - електрони. Включен в електрическа верига, той може да се разглежда като нелинеен резистор с волтамперна характеристика, показана на фиг. 6.7б ( $U_{GS} = 0$ ); токът зависи от количеството на свободните носители в т.нар.  $n$ -канал и след тяхното изчерпване настъпва насищане;  $p$ -слоеве имат изводи  $G$ , които са свързани и представляват *управляващ електрод*. От потенциала на този електрод зависи проводимостта на „резистора“. Как работи полевият транзистор? В образувалите се два  $p$ - $n$  прехода електроните от  $n$ -преминават в  $p$ -полупроводника, което води до създаване на обеднена откъм свободни електрони област (фиг. 6.6б). При подаване на напрежение към  $G$  със знак „-“ спрямо  $n$ -слоя,  $p$ - $n$  преходите са обратно включени, потенциалната бариера е висока, което съответства на по-широка преходна зона. От друга страна, това означава по-голяма обеднена област (фиг. 6.7а), стесняване на  $n$ -канала и намаляване на свободните носители, преминаващи от  $S$  към  $D$ .



Фиг. 6.6. Структура на полеви транзистор

Тъй като  $p-n$  преходите са включени винаги в обратна посока, токът е много малък и не е определящ за работата на транзистора. Проводимостта в  $n$ -канала се управлява от напрежението, подадено към  $G$ , т.е. от електрическото поле, действащо в  $p-n$  преходите. Оттук и названието *полеви транзистори*. Токът в  $n$ -канала е пропорционален на приложеното напрежение докато настъпи насищане, т.е. когато всички носители участват в пренасянето на електрически заряд. Този ток на насищане зависи от ширината на  $n$ -канала, която при различни напрежения на  $G$  е различна (фиг. 6.76). В интегралните схеми се използват предимно полеви транзистори, в които между металния електрод  $G$  и полупроводника има окисен изолиращ слой и на практика токът във веригата на управляващия електрод е нула. Те се наричат МОП-транзистори (МОП - метал/окис/полупроводник; английската абривиатура е MOS - metal/oxide/semiconductor).



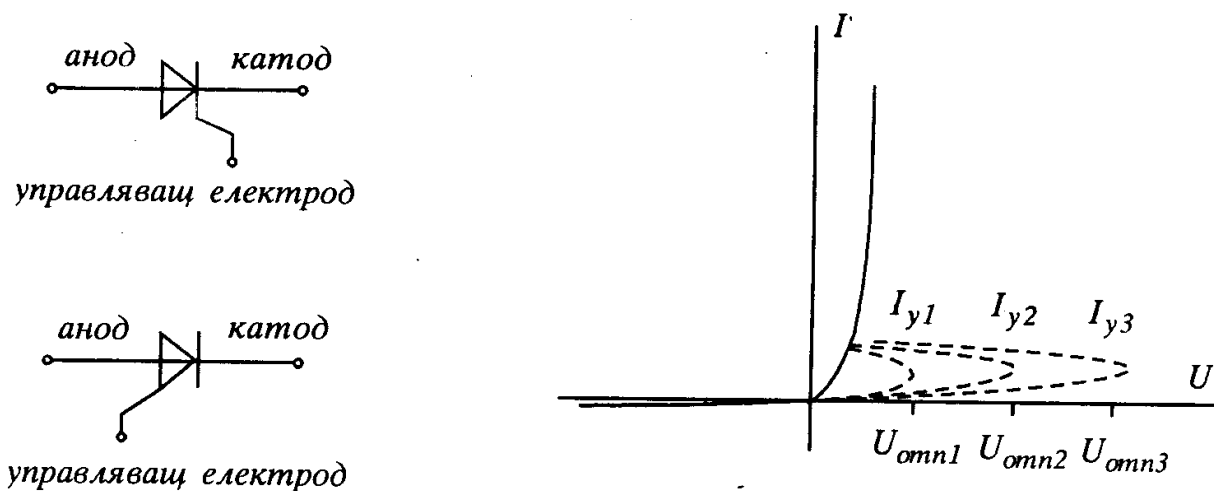
Фиг. 6.7. Включване на полеви транзистор с  $n$ -канал.  $V-A$  характеристики

### 6.3. Тиристори

Тиристорите представляват управляеми полупроводникови вентили с четирислойна структура ( $p-n-p-n$  или  $n-p-n-p$ ). Тяхната волтамперна характеристика и условно означение са показани на фиг. 6.8.

Когато веригата на управляващия електрод е прекъсната, а към другите два извода се подава напрежение в права посока („+“ на анода и „-“ на

катода), в тиристора протича много малък ток, който слабо нараства при увеличаване на анодното напрежение -  $U_A$ . При определена стойност на  $U_A$ , обаче, тиристорът се отпушва, при което напрежението върху него рязко спада до 0,8-1 V, а токът рязко нараства и се ограничава от товарното съпротивление в анодната верига. При свързване на управляващия електрод с източник на постоянно напрежение във веригата протича управляващ ток  $I_y$  и пропорционално на  $I_y$  намалява напрежението на отпушване -  $U_{отп}$ . Това свойство на тиристора се оказва много полезно за регулируеми токоизправители (вж. гл. 9). Променяйки напрежението на отпушване (посредством  $I_y$ ), може да се регулира средния ток в анодната верига.

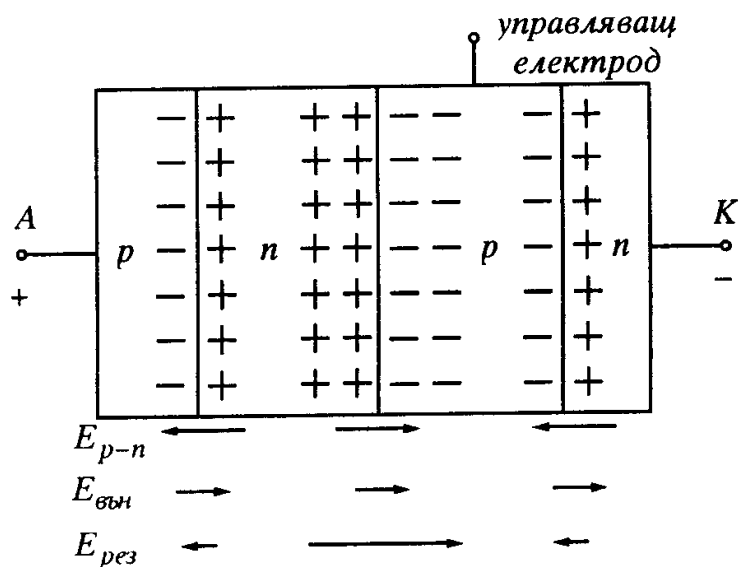


Фиг. 6.8. Условно означение и V-A характеристики на тиристор

На практика отпушването на тиристорите става чрез подаване на импулси към управляващия електрод в точно определени моменти. Това дава възможност регулирането да се извършва в по-широки граници. Действието на тиристора може да се обясни по следния начин: Когато към него не е приложено напрежение, в  $p-n$  преходите съществува електрическо поле  $E_{p-n}$ , което представлява потенциална бариера за основните носители в  $p$ - и  $n$ -областите. На фиг. 6.9 е показана структурата на тиристора и посоката на  $E$ .

Когато към анода се приложи положителен потенциал, а към катода отрицателен, под действието на външното поле,  $E_{вн}$  левият и десният преходи се оказват отпушени (отворени), а средният - запушен, и резултантното поле  $E_{рез}$  е голямо, което означава, че областта с положителни заряди





Фиг. 6.9. Състояние на преходите при подаване на напрежение на анода

утрализируют противоположния заряд. При това потенциалната бариера намалява, което дава възможност да преминат зарядите с по-малка енергия. Получава се лавинен процес, който довежда до отпушване на тиристора. Наличието на управляващ електрод с положителен потенциал, присъединен към третия слой, позволява да се отведат част от отрицателните заряди, да се „оголи“ границата и да се намали потенциалната бариера. Това води до отпушване на тиристора при по-ниско напрежение. Управляващият електрод може да се свърже и с втория слой, но тогава на него се подава отрицателен потенциал.

в n-полупроводника е по-широка. Това затруднява преминаването на дупки към катода и на електрони към анода. Повишаването на напрежението не променя картината. Но едновременно с разширяването на указаната област се увеличава енергията на носителите и дължината на свободния им пробег. Това дава възможност на дупки от първа област да преминат в трета и на електрони от четвърта във втора, където не-

## Седма глава

### ОСНОВНИ ТРАНЗИСТОРНИ СХЕМИ

В изложението ще бъдат разгледани елементарни схеми с биполярни транзистори, с помощта на които се реализират редица функции в електронните устройства (електронен ключ, усилвател на напрежение, източник на ток и др.). Подобни схеми съществуват и за полевите транзистори.

На практика, без да разглеждаме процесите в самия транзистор, е достатъчно да се възползваме от следните четири правила, за да опишем работата му:

1. Колекторът има по-висок положителен потенциал от емитера (става дума за *n-p-n* транзистор).

2. Преходите база-емитер и база-колектор могат да се разглеждат като диоди, първият от които обикновено е отпушен, а вторият - запушен.

3. Всеки транзистор се характеризира с максимални стойности на колекторния ток, базовия ток, напрежението между колектора и емитера,  $U_{CE}$  и др.

4. Ако са спазени горните правила, токът  $I_C$  е правопрпорционален на  $I_B$ :

$$I_C = h_{21E} \cdot I_B = \beta \cdot I_B.$$

Правило 4 определя основното свойство на транзистора - неголемият ток в базата управлява големия ток в колектора. Типичните стойности на  $h_{21E}$  са от 50 до 250. Той зависи от  $I_C$ , напрежението  $U_{CE}$  и температурата. Но една схема може да се счита за лоша, ако на нейните характеристики влияе  $h_{21E}$ . По-нататък при някои пресмятания ние ще приемаме  $h_{21E} = 100$  и тъй като нашите схеми трябва да бъдат добри, възможната неточност на  $h_{21E}$  няма да се отрази на техните параметри.

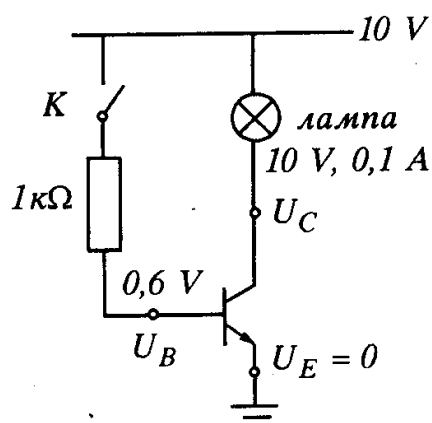
От правило 2 следва, че не бива да се увеличава прекомерно напрежението между базата и емитера, защото ако то е по-високо от 0,6-0,8 V (правото напрежение на диода), ще възникне много голям ток. Следователно, в работещия транзистор напреженията на базата и емитера ще са свързани по следния начин:

$$U_B = U_E + 0,6V \text{ (в общия случай } U_B = U_E + U_{BE} \text{)}.$$

Може да се отбележи още, че колекторният ток много слабо зависи от напрежението на колектора (това следва от разгледания по-рано принцип на действие), докато правият ток (в емитерния преход) рязко нараства при увеличаване на приложеното напрежение.

### 7.1. Транзисторен ключ

Схемата, показана на фиг. 7.1, позволява да се разберат правилата, формулирани по-горе.



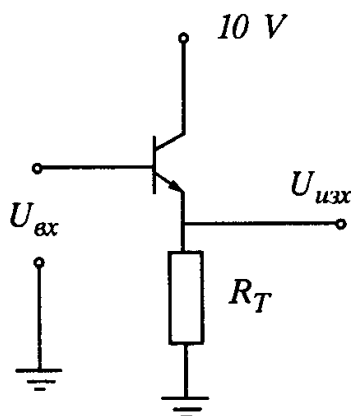
Фиг. 7.1. Транзисторен ключ

Когато механичният ключ  $K$  е отворен, базовият ток е нула. Лампата не свети. Когато ключът  $K$  е затворен, напрежението на базата е  $0,6\text{ V}$ , а напрежението върху резистора  $9,4\text{ V}$ . Следователно, базовият ток е  $9,4\text{ mA}$ . Ако вземем  $\beta = 100$ , за  $I_C$  се получава  $940\text{ mA}$ , но напрежението на лампата е  $10\text{ V}$  още при  $0,1\text{ A}$ . Къде е грешката? Правило 4 работи само когато е спазено правило 1, т.е. потенциалът на колектора да е по-висок от потенциала на емитера. За да бъде токът  $I_C$  по-голям е необходимо потенциалът на колектора да е отрицателен спрямо земята. Но транзисторът не може да премине в такова състояние. Когато потенциалът на колектора се приближава към потенциала на земята, транзисторът преминава в режим на насищане (типичните стойности на напрежението на насищане са в границите  $0,05 \div 0,2\text{ V}$ ) и изменението на колекторния потенциал се прекратява. Лампата светва при напрежение върху нея  $10\text{ V}$ .

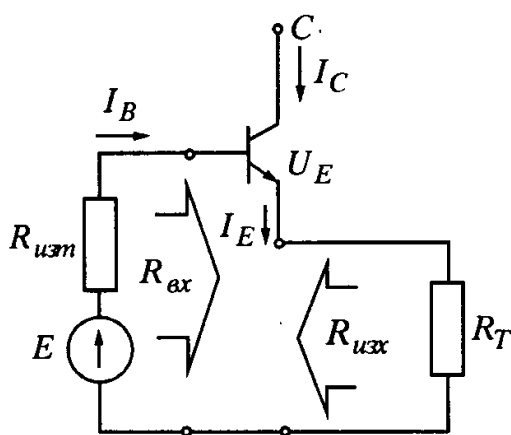
За включване на лампата би бил достатъчен и ток  $I_B = 1\text{ mA}$ , но схемата, както се вижда, не изразходва този излишък. От друга страна, обаче, такъв излишък е необходим, защото в студено състояние съпротивлението на лампата е 5-10 пъти по-ниско. Освен това, при малки напрежения между колектора и базата намалява и коефициентът  $\beta$ .

Транзисторните ключове са много бързи (включването става за части от  $\mu\text{s}$ ). С тях може да се включват няколко схеми с един управляващ сигнал.

## 7.2. Емитерен повторител



Фиг. 7.2. Емитерен повторител



Фиг. 7.3. Входно и изходно съпротивление на транзистора

В емитерната верига на транзистора (фиг. 7.2) е включен резистор и изходното напрежение се сема от емитера (това е напрежението върху  $R_T$ ). Съгласно правило 2 и пояснението към него, напрежението на входа е  $U_{вх} = U_{изх} + 0,6V$ . Докато не се отпуши емитерният преход,  $U_{изх} = 0$ . В тази схема изходното напрежение с неголяма разлика повтаря входното. В същото време обаче емитерният ток е  $h_{21E}$  пъти по-голям от базовия. Следователно, в тази схема имаме усиление по ток (и, съответно, по мощност). В разглежданата схема входното съпротивление е значително по-голямо от изходното и това дава възможност да се съгласуват съпротивленията на източниците на сигнали и товари (фиг. 7.3).

Напрежението на емитера при малко изменение на напрежението на базата  $U_B + \Delta U_B$  ще бъде  $U_E + \Delta U_E$ , а изменението на емитерния ток -  $\Delta I_E = \Delta U_E / R_T$ , тъй като  $\Delta U_B = \Delta U_E$ . Освен това  $I_E = I_C + I_B$  или  $I_E = (\beta + 1)I_B$ . Входното съпротивление

се определя като отношение на нарастванията на напрежението на базата и базовия ток:

$$r_{вх} = \Delta U_B / \Delta I_B = \Delta U_B / (\Delta I_E / (\beta + 1)) = \Delta U_B / (\Delta U_E / R_T (\beta + 1)),$$

следователно

$$r_{вх} = R_T (\beta + 1),$$

откъдето следва, че входното съпротивление е приблизително 100 пъти по-голямо от съпротивлението на товара. Аналогично, изходното съпротивление:

$$r_{изх} = \Delta U_E / \Delta I_E = \Delta U_B / (\Delta I_B (\beta + 1)) = R_{вх} / (\beta + 1),$$

където  $R_{вх}$  е вътрешното съпротивление на източника на сигнала.

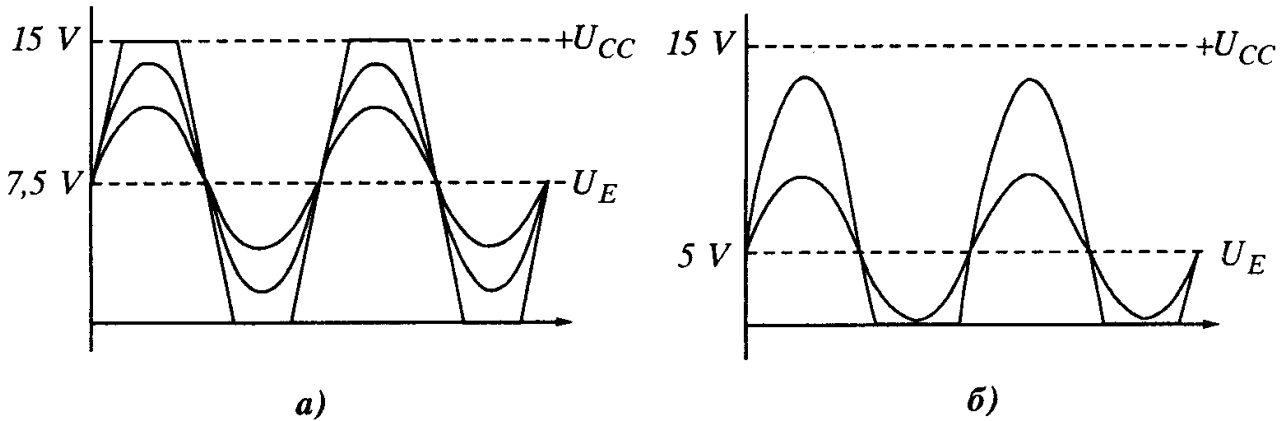
В общия случай би следвало да запишем съпротивленията в комплекс-

на форма, т.е.:

$$Z_{\text{ex}} = Z_T(\beta + 1),$$

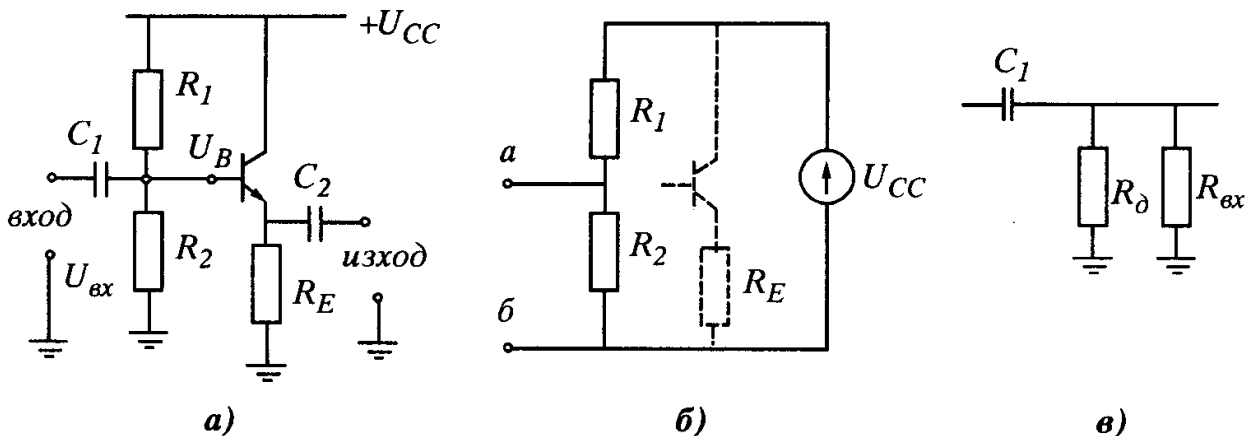
$$Z_{\text{взх}} = Z_{\text{взм}} / (\beta + 1).$$

За правилна работа на емитерния повторител е необходимо да се зададе определено постоянно напрежение на базата. При усилване на синусоиден ток например напрежението на емитера трябва да бъде равно на половината от колекторното напрежение, което гарантира еднакво усилване на положителната и отрицателната полуълна (фиг. 7.4а).



Фиг. 7.4. Избор на работната точка

Изборът на напрежение на базата при липса на входен сигнал се нарича *избор (установяване) на работната точка*. Необходимото напрежение се задава с помощта на делител на напрежение (фиг. 7.5а). На схемата са



Фиг. 7.5. Емитерен повторител

дадени още кондензаторите  $C_1$  и  $C_2$ , които отделят постояннотоковата верига на емитерния повторител от веригата на източника на сигнала и на

товара.  $C_1$  и  $C_2$  се наричат *блокиращи кондензатори*. Техните стойности се определят съобразно честотния диапазон на усилвателя.

---

### Пример 7.1:

Да се разработи емитерен повторител с честотен диапазон от 20 Hz до 20 kHz; захранващо напрежение  $U = 15V$  и  $I_C = 1mA$  за работната точка.

#### Решение:

1. Избор на  $U_E$ . За да няма срязване на синусоидалния сигнал (фиг. 7.4)  $U_E = 0,5U_{CC} = 0,5 \cdot 15 = 7,5V$ .

2. Избор на резистора  $R_E$ . Тъй като  $U_E$  трябва да бъде 7,5 V, то при ток 1mA -  $R_E = U_E / I_E = U_E / I_C = 7,5 / 10^{-3} = 7,5k\Omega$  ( $I_E \approx I_C$ ).

3. Избор на  $R_1$  и  $R_2$ . Напрежението на базата ще бъде  $U_B = U_E + 0,6V = 7,5V + 0,6V = 8,1V$ , следователно  $R_2 / R_1$  трябва да бъде  $8,1 / 6,9 = 1,17$ , като имаме предвид, че входното съпротивление на емитерния повторител е

$$r_{ex} = R_T(\beta + 1) = 7,5 \cdot 10^3 \cdot 100 = 750k\Omega$$

и това, че съпротивлението на делителя трябва да е приблизително

$$R_{дел} = 0,1 \cdot r_{ex} = 75k\Omega$$

(Както се вижда от фиг. 7.5б, резисторите  $R_2$  и  $R_1$  са свързани паралелно спрямо точките  $a$  и  $b$ , тъй като източникът  $U_{CC}$  има нулево съпротивление. Еквивалентното съпротивление на делителя е  $R_2 \cdot R_1 / (R_2 + R_1)$ , следователно, при известно отношение  $R_2 / R_1$  се намират точните стойности на резисторите).

Избират се съответно стандартните стойности 130 kΩ и 150 kΩ.

4. Избор на кондензатора  $C_1$ . Тъй като  $C_1$  заедно с входното съпротивление на схемата и съпротивлението на делителя образува високочестотен филтър (фиг. 7.5в), за който граничната честота е 20 Hz, капацитетът ще се определи от неравенството  $\omega_{3dB} > 1 / R_E \cdot C_1$ :

$$C_1 > 1 / 2\pi f_{3dB} \cdot R_E = 1 / 2\pi \cdot 20 \cdot 63 \cdot 10^3 = 0,127 \mu F$$

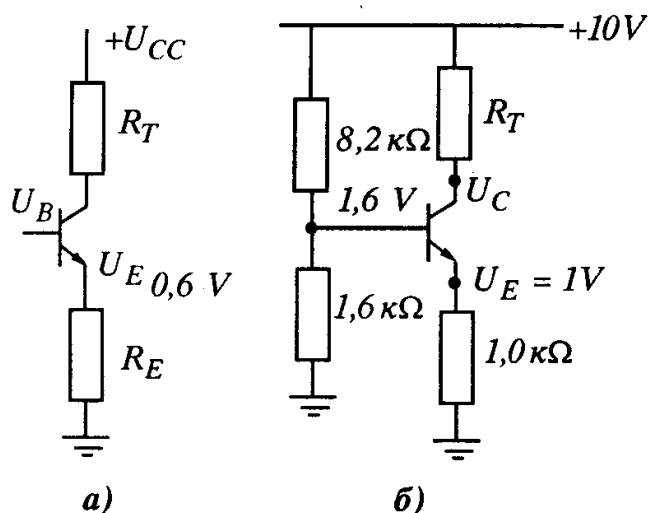
Избира се  $C_1 = 0,15 \mu F$ .

5. Избор на кондензатора  $C_2$ . Този кондензатор и неизвестният товар образуват високочестотен филтър. Няма да сгрешим, ако предположим, че съпротивлението на товара няма бъде по-малко от  $R_E$  - тогава, в най-лошия случай,  $C_2 > 1 / 2\pi f_{3dB} \cdot R_E$  или  $C_2 > 3,3 \mu F$ .

Тъй като в случая се получава двустъпален високочестотен филтър, по-добре ще бъде окончателно да изберем  $C_1 = 0,5 \mu F$ ,  $C_2 = 3,3 \mu F$ .

### 7.3. Транзисторен източник на ток

Източниците на ток са не по-малко важни от източниците на напрежение. Те намират широко приложение в различните електронни схеми, като например в схемите на усилвателите и стабилизаторите (те осигуряват широк диапазон на напреженията).



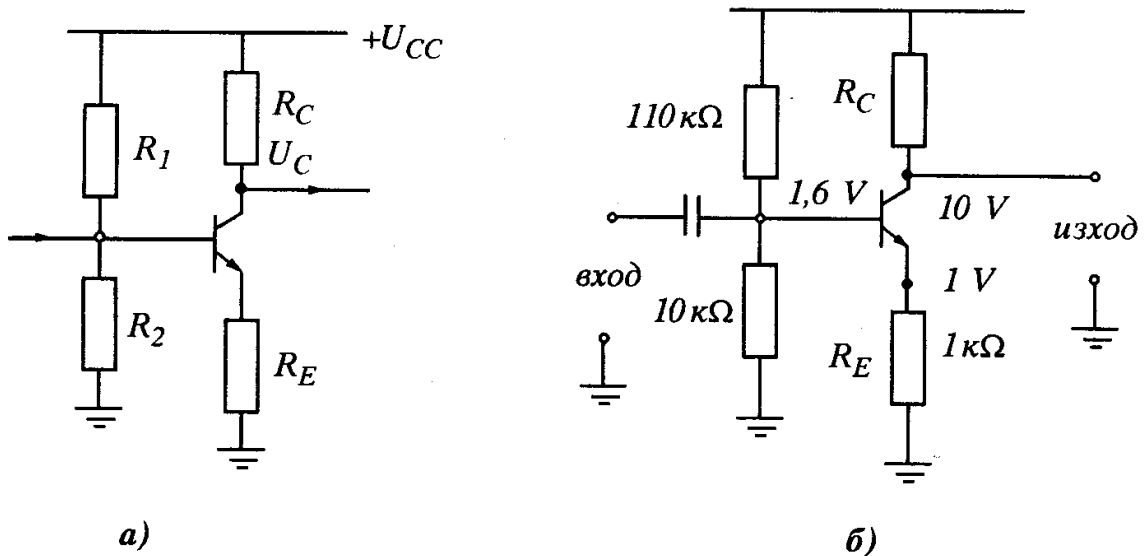
Фиг. 7.6. Транзисторен източник на ток

На фиг. 7.6а товарният резистор е включен във веригата на колектора. Нека напрежението на базата бъде  $U_B > 0,6V$ . Тогава  $U_E = U_B - 0,6V$ , а емитерният ток  $I_E = U_E / R_E = (U_B - 0,6V) / R_E$ . При голяма стойност на  $\beta$  токът  $I_E \approx I_C$  и тогава  $I_C = (U_B - 0,6V) / R_E$ , т.е. колекторният ток не зависи от товарното съпротивление. Напрежението на базата може да се зададе с помощта на делител на напрежението (фиг. 7.6б) или друга схема. В дадената схема при нарастване на  $R_T$  напрежението върху него нараства:  $U_T = R_T \cdot I_C$ , като в същото време  $U_C$  намалява, т.е.  $U_C = U_{CC} - R_T I_C$ . Когато  $U_C$  достигне  $U_E + 0,2V$ , транзисторът ще премине в режим на насищане. В тази схема при изменение на напрежението върху товара от 0 до 8 V изменението на тока е приблизително 0,5% (за транзистора 2N3565).

Разглежданият източник на ток може да стане програмируем, ако задаваме  $U_B$  по предварително определен начин.

#### 7.4. Усилвател с общ емитер

Схемата, показана на фиг. 7.7а, представлява източник на ток, в която вместо  $R_T$  е включен резисторът  $R_C$ , при което напрежението на колектора е  $U_C = U_{CC} - R_C \cdot I_C$ .



Фиг. 7.7. Усилвател с общ емитер

Нека видим какво ще се получи, ако подадем към базата през кондензатор някакъв сигнал -  $u_{ex}$  (фиг. 7.7б): Напрежението на емитера ще се изменя по същия начин, както и напрежението на базата  $u_E = u_B$ , следователно изменението на емитерния ток ще бъде  $i_E = u_E / R_E = u_B / R_E$ . Приблизително такава ще бъде изменението на колекторния ток  $i_C = i_E$ . Изменението на колекторното напрежение ще бъде  $u_C = -i_C \cdot R_C = -u_B \cdot R_C / R_E$  или

$$u_{изх} = -u_{ex} \cdot R_C / R_E.$$

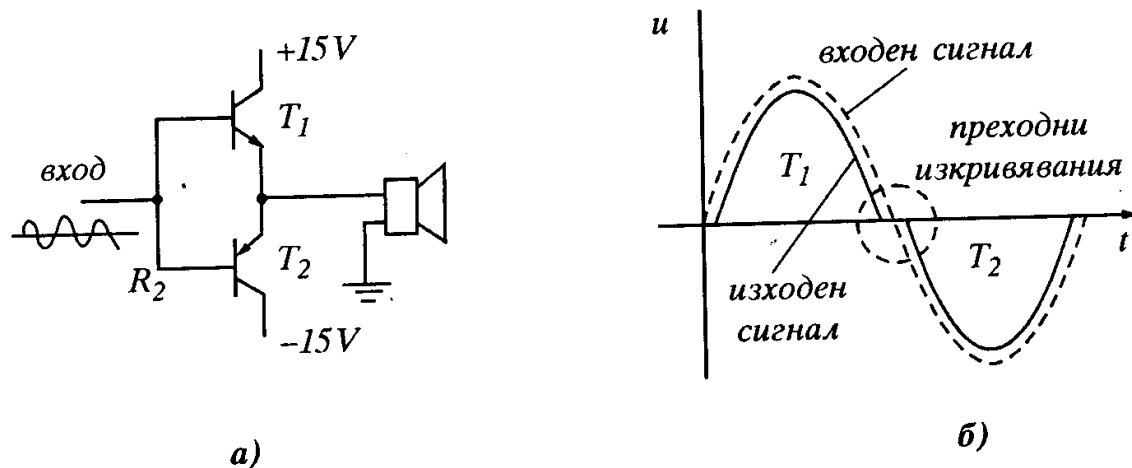
Схемата работи като усилвател на напрежение. Коефициентът на усилване  $\kappa_{ус} = u_{изх} / u_{ex} = -R_C / R_E$  се определя от отношението на съпротивленията на резисторите в колекторната и емитерната верига. За схемата на фиг. 7.7б  $\kappa_{ус} = 10$ . Входното съпротивление на усилвателя се определя както за емитерния повторител и в случая е приблизително  $8 \text{ k}\Omega$  (преобладаващо значение има съпротивлението  $10 \text{ k}\Omega$ ). Стойността на кондензатора се определя съобразно зададената честотна лента. Изходното съпротивление



на схемата се определя от паралелното свързване на  $R_C$  и изходното съпротивление на транзистора от страна на колектора. Но тъй като колекторният преход е включен обратно, неговото съпротивление е много голямо (от порядъка на мегаоми) и по тази причина изходното съпротивление на усилвателя се определя от  $R_C$ , чието съпротивление е  $10\text{ k}\Omega$ .

## 7.5. Усилватели

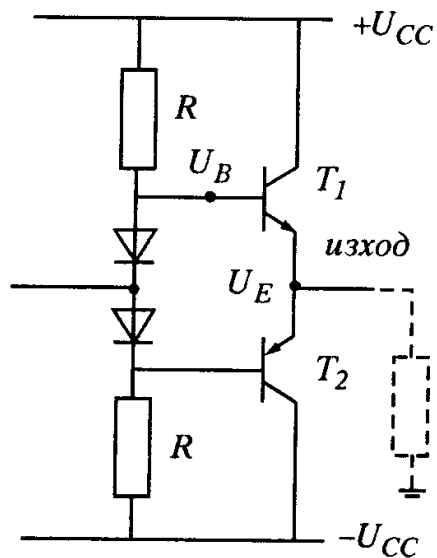
Различните електронни схеми съдържат усилватели на напрежение (ток, мощност), които се състоят от две, три или повече усилвателни стъпала. Съществува огромно разнообразие на такива схеми в зависимост от изискванията към тях и предназначението им. Тук ще разгледаме една често срещана схема.



Фиг. 7.8. Двухактно изходно стъпало

**Двухактно изходно стъпало.** На фиг. 7.8а е показана схема с два транзистора - единият *n-p-n*, а другият *p-n-p*, всеки от които работи като емитерен повторител.

Товарът е бобината на високоговорител. За да се отпуши  $T_1$  е необходимо на базата да има положително напрежение спрямо емитера, а за да се отпуши  $T_2$  - отрицателно напрежение (на *p-n-p* транзистора полярността на електродите е обратна). При подаване на променлив сигнал едновременно на двата входа, при положителната полуваляна ще работи транзисторът  $T_1$ , а при отрицателната -  $T_2$ . Тук са възможни изкривявания заради напрежението, необходимо за отпушване на емитерния преход (фиг. 7.8б). Един от начините да се отстрани това изкривяване е да се повиши предварително напрежението на базата на  $T_1$  и да се понижи това на  $T_2$  с  $0,6\text{ V}$  (фиг. 7.9).



Фиг. 7.9. Отстраняване на изкривяванията в двутактно изходно стъпало

В този случай един от транзисторите е винаги отворен.  $R$  се избира така, че да се осигури необходимия базов ток при максималните стойности на изходния сигнал. Например, ако се използват захранващи източници  $\pm 20 V$ , а товарът има съпротивление  $8 \Omega$  и мощност  $10 W$ , се получава следното:

- тъй като  $P = U_m \cdot I_m / 2 = I_m^2 R_T / 2$ , следователно  $I_m = 1,6 A$ ;

- при коефициент на усилване  $\beta = 50$ , базовият ток ще бъде

$$I_{Bm} = I_{Em} / \beta = 32 \text{ mA} ;$$

- максималното напрежение на базата е

$$U_{Bm} = U_{Em} + 0,6 V ,$$

където

$$U_{Em} = I_{Em} \cdot R_T = 1,6 \cdot 8 = 12,8 V ,$$

следователно:

$$U_{Bm} = 12,8 + 0,6 = 13,4 V .$$

При това условие, напрежението върху  $R$  ще бъде

$$U_{CC} - U_{Bm} = 20 - 13,4 = 6,6 V ,$$

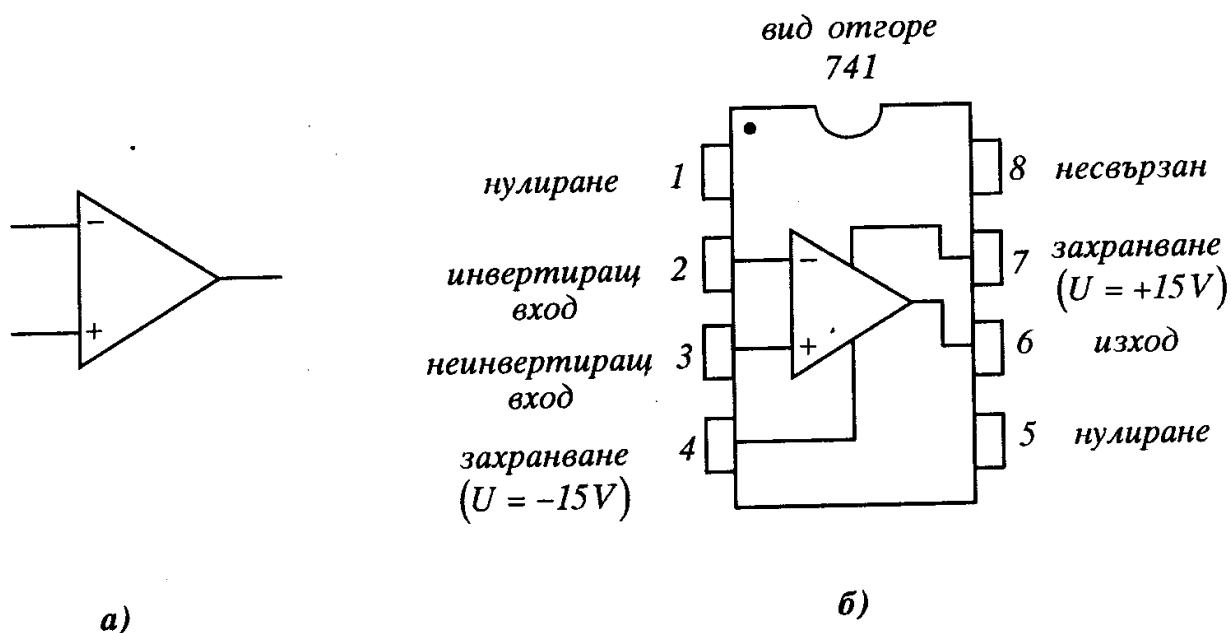
откъдето при ток  $32 \text{ mA}$  за  $R$  се получава  $200 \Omega$ .

## О с м а г л а в а

### ОПЕРАЦИОННИ УСИЛВАТЕЛИ

#### 8.1. Основни свойства на операционните усилватели (ОУ)

Операционният усилвател (ОУ) представлява диференциален усилвател на постоянен ток с много голям коефициент на усилване (обикновено от порядъка на  $10^5 \div 10^6$ ) и несиметричен изход. Означава се както е показано на фиг. 8.1а.



Фиг. 8.1. Условно означение на ОУ и разположение на изводите

Входовете се означават с „+“ или „-“, което означава, че изходният сигнал нараства, когато потенциалът на входа „+“ става по-положителен от потенциала на входа „-“, и обратно. Входовете „+“ и „-“ е прието да се наричат съответно „неинвертиращ“ и „инвертиращ“. ОУ има много голям коефициент на усилване по напрежение и никога не се използва без обратна връзка и всъщност характеристиките на усилвателя зависят само от схемата на обратната връзка.

Тук ще разгледаме работата на ОУ, без да се интересуваме от неговата конкретна схема (тя съдържа около 20 и повече транзистора). Най-разп-

ространената схема на ОУ е тази от типа mA741C или само 741. Тя представя миниатюрен елемент, получен по интегрална технология и разположен в пластмасов корпус, обикновено с двуредно разположение на изводите (8 или повече крачета). На фиг. 8.1б е показано примерно разположение на изводите на интегралната схема. Изводите „нулиране“ служат за отстраняване на известна несиметрия, възможна в ОУ.

Основните правила, които определят поведението на ОУ с *отрицателна обратна връзка*, са следните:

1. Изходът на операционния усилвател се стреми към това разликата между напреженията на входовете да бъде равна на нула.

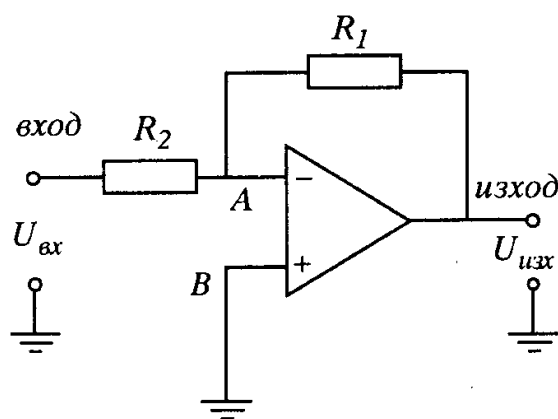
2. Входовете на операционния усилвател не консумират ток.

Действително, входният ток на схема от типа 741 е 0,08 mA, а в микросхемите с входове с полеви транзистори - от порядъка на пикоампери. Такива токове в случая могат да се пренебрегнат.

От правило 1 не следва, че ОУ действително изменя напрежението на входовете. Това е невъзможно. ОУ „оценява“ състоянието на входовете и с помощта на обратната връзка предава напрежение от изхода на входа, така че в резултат да се получи разлика между напреженията на входовете, равна на нула.

## 8.2. Инвертиращ усилвател с ОУ

На фиг. 8.2 изходът на ОУ е свързан с инвертиращия вход посредством резистора  $R_2$ , който представлява отрицателната обратна връзка в схемата.



Фиг. 8.2. Инвертиращ усилвател

Нека приложим формулираните по-горе правила. Съгласно правило 2 напрежението  $U_A = U_B = 0$ . И тъй като инвертиращият вход не консумира ток, можем да запишем, че токовете в резисторите са равни:  $I_1 = I_2$ , или

$$U_{вх} / R_1 = -U_{изх} / R_2 ,$$

(знакът „минус“ се взема поради това че спрямо т. А  $U_{вх}$  и  $U_{изх}$  са противоположни), откъдето за коефициента на

усилване се получава:  $U_{изх} / U_{вх} = -R_2 / R_1$ , т.е. коефициентът на усилване се определя от отношението на съпротивленията  $R_1$  и  $R_2$ . Ако  $R_2 = 100\text{ k}\Omega$ ,  $R_1 = 10\text{ k}\Omega$  и  $U_{вх} = 1\text{ V}$ , то  $U_{изх} = -10\text{ V}$ .

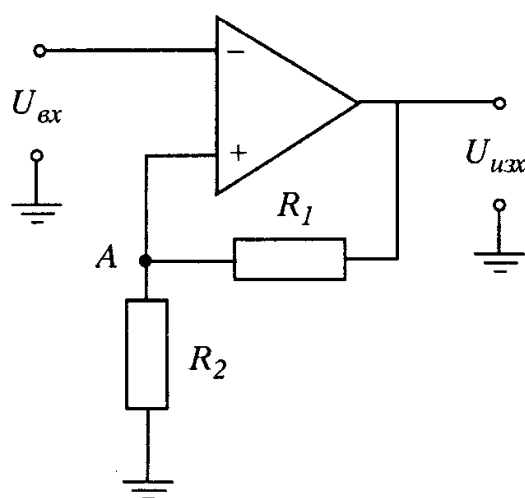
Какво е входното съпротивление на схемата? Ако потенциалът в т. А е

нула, това означава, че входното напрежение е приложено към резистора  $R_1$ , следователно входното съпротивление ще бъде:  $R_{ex} = R_1$ . Изходното съпротивление на схемата е няколко десети от ома.

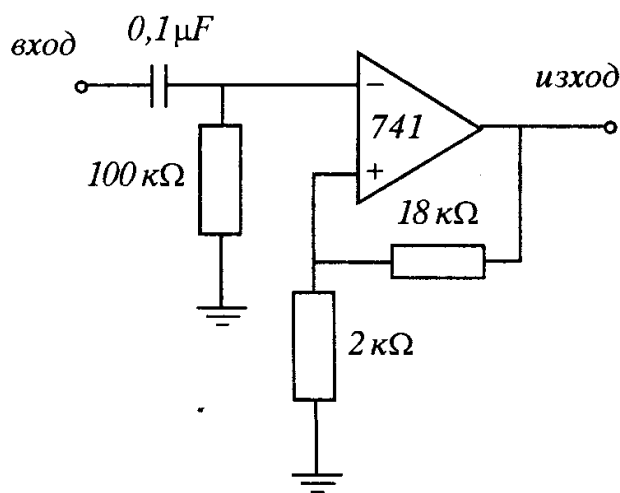
Като недостатък на разглежданата схема трябва да се отбележи това, че тя е с ниско входно съпротивление, тъй като  $R_1$  обикновено има неголяма стойност.

### 8.3. Неинвертиращ усилвател с ОУ

Схемата е дадена на фиг. 8.3. Тук, за разлика от схемата на фиг. 8.2, резисторът  $R_1$  е заземен, а сигналът се подава на неинвертиращия вход.



Фиг. 8.3. Неинвертиращ усилвател



Фиг. 8.4. Усилвател на променлив ток с ОУ

Съгласно правило 1,  $U_{ex} = U_A$ , и тъй като  $R_1$  и  $R_2$  образуват делител на напрежение,

$$U_A = U_{изх} R_1 / (R_1 + R_2),$$

откъдето коефициентът на усилване:

$$\kappa_y = U_{изх} / U_{ex} = 1 + R_2 / R_1.$$

Входното съпротивление на схемата в този случай е много голямо ( $10^2 \Omega$ ), а изходното, както и в предишния случай, се равнява на части от ома.

Разглежданата схема представлява постояннотоков усилвател. За усилване на променливи сигнали на входа на усилвателя се поставя кондензатор (фиг. 8.4).

За входния ток на ОУ, който е много малък, е необходимо да се предвиди заземяване през резистор с голямо съпротивление. За дадените на схемата стойности на  $R$  и  $C$  можем да определим:

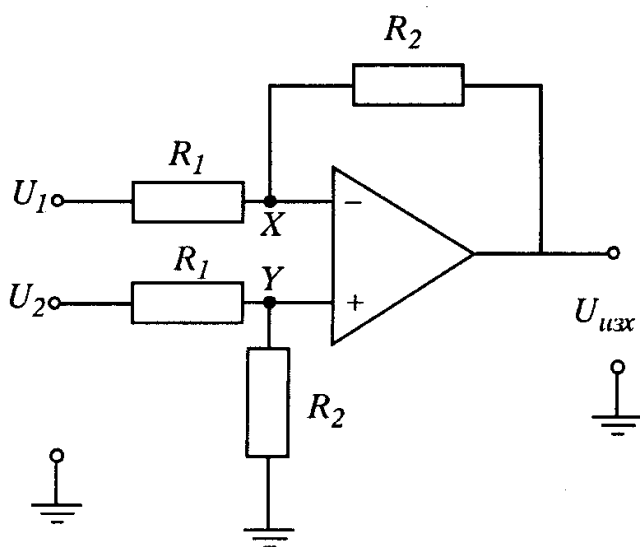
$$\kappa_y = 1 + R_2 / R_1 = 1 + 18 / 2 = 10$$

и, тъй като кондензаторът и резисторът на входа образуват високочестотен филтър, трябва да се определи

още и граничната честота:

$$f_{3db} = 1 / 2\pi RC = 1 / 2\pi \cdot 10^5 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6} \approx 16 \text{ Hz} .$$

#### 8.4. Диференциален усилвател с ОУ



Фиг. 8.5. Диференциален усилвател

Диференциалният усилвател е една изключително полезна схема, когато е необходимо да се усили малка разлика между два относително големи сигнала. Сигналите  $U_1$  и  $U_2$  се подават към двата входа на ОУ (фиг. 8.5) през резисторите  $R_1$ ; инвертиращият вход е заземен през резистор  $R_2$ , чието съпротивление е равно на това във веригата на обратната връзка. Потенциалите на входовете на ОУ спрямо земята са, съответно,  $U_X$  и  $U_Y$ . Като се из-

ползва правило 2 (входовете на ОУ не консумират ток), може да се запише:

- за инвертиращия вход:

$$(U_1 - U_X) / R_1 = (U_X - U_{изх}) / R_2 ,$$

- за неинвертиращия вход:

$$(U_2 - U_Y) / R_1 = U_Y / R_2 .$$

От получената система уравнения могат да се намерят  $U_X$  и  $U_Y$ :

$$U_X = (U_1 R_2 + U_{изх} R_1) / (R_1 + R_2) ,$$

$$U_Y = U_2 R_2 / (R_1 + R_2) .$$

Както беше посочено в т. 8.1, изходното напрежение на ОУ е

$$(U_X - U_Y) \cdot A = U_{изх} ,$$

където  $A$  е коефициент на усилване. При условие, че стойността на последния е около милион, след заместване на  $U_X$  и  $U_Y$  и при  $A \rightarrow \infty$  за изходното напрежение се получава:

$$U_{изх} = (R_2 / R_1)(U_2 - U_1) .$$

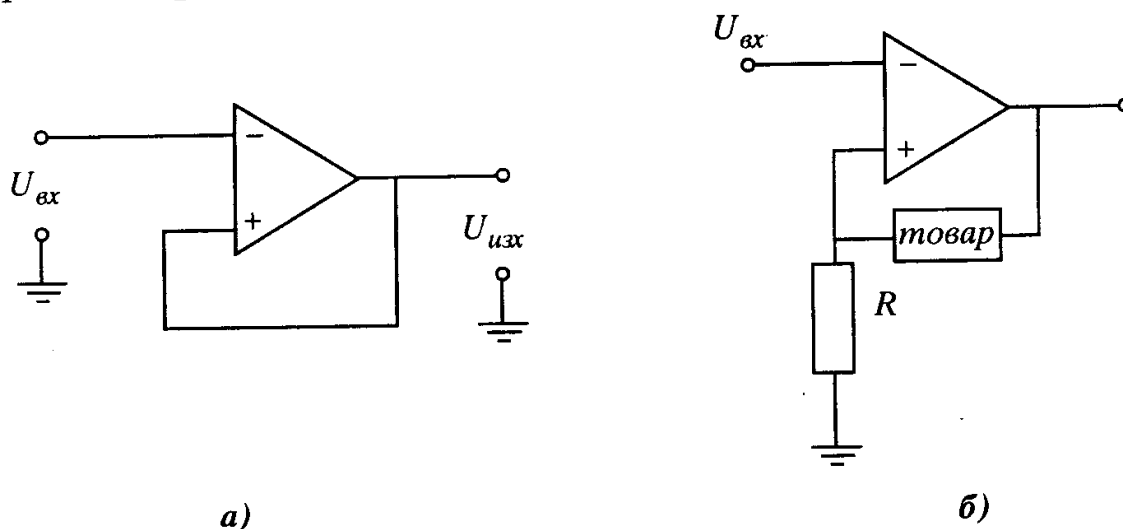
Изходният сигнал на диференциалния ОУ е пропорционален на разликата от напреженията на двата входа, като коефициентът на пропорционалност, т.е. *коефициентът на усилване*, е равен на отношението  $R_2 / R_1$ .

### 8.5. Други схеми с ОУ

#### • Повторител

В този случай изходът се свързва с инвертиращия вход (фиг. 8.6а).

Коефициентът на усилване  $\kappa_y = U_{изх} / U_{вх} = 1 + R_2 / R_1 = 1$ , тъй като  $R_1 = \infty$ , а  $R_2 = 0$ .

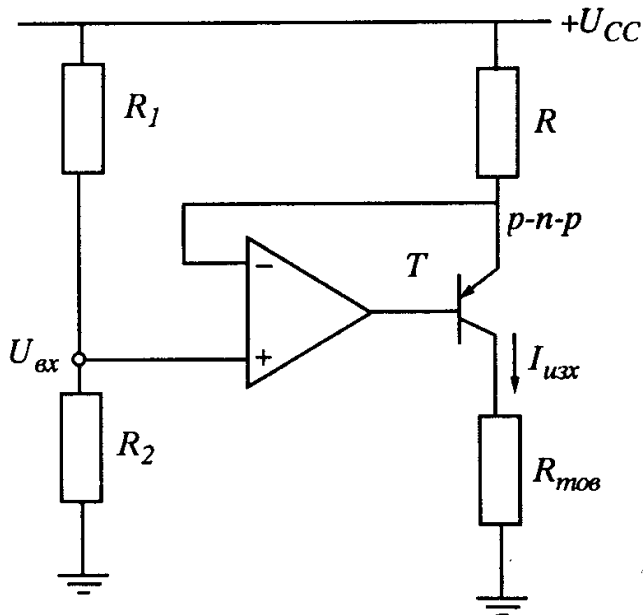


Фиг. 8.6. Повторител и източник на ток с ОУ

Съществуват специални ОУ, предназначени да работят с коефициент на усилване единица. Понякога ги наричат буфери, тъй като те имат голямо входно съпротивление и малко изходно.

#### • Източник на ток

Схемата е показана на фиг. 8.6б. При зададено напрежение на неинвертиращия вход напрежението в т. А ще бъде  $U_A = U_{вх}$ , а токът в резистора  $R$  ще има стойност  $I = U_{вх} / R$ , която не зависи от съпротивлението на товара. Такава схема има следния недостатък: товарът е „плаващ“, т.е. не е заземен. Това създава известни неудобства, когато напрежението трябва да се отчита спрямо земята. Схемата на фиг. 8.7 позволява да се избегне този недостатък. В нея напрежението върху резистора  $R$  в емитерната верига на  $p-n-p$  транзистора е:  $\kappa_y = U_{CC} - U_{вх}$  и, следователно, емитерният ток ще бъде:  $I_E = (U_{CC} - U_{вх}) / R$ . Както следва от формулата, токът  $I_{тов} = I_C \approx I_E$



Фиг. 8.7. Източник на ток със заземен товар

не зависи от напрежението на базата и, съответно, от неговите изменения, свързани с температурата, влиянието на  $I_C$ ,  $U_{CE}$  и др.

• **Сумиращ усилвател**

Схемата е дадена на фиг. 8.8а. Потенциалът на т. А е нула. При това условие входният ток ще бъде сума от три тока:

$$I = U_1 / R + U_2 / R + U_3 / R,$$

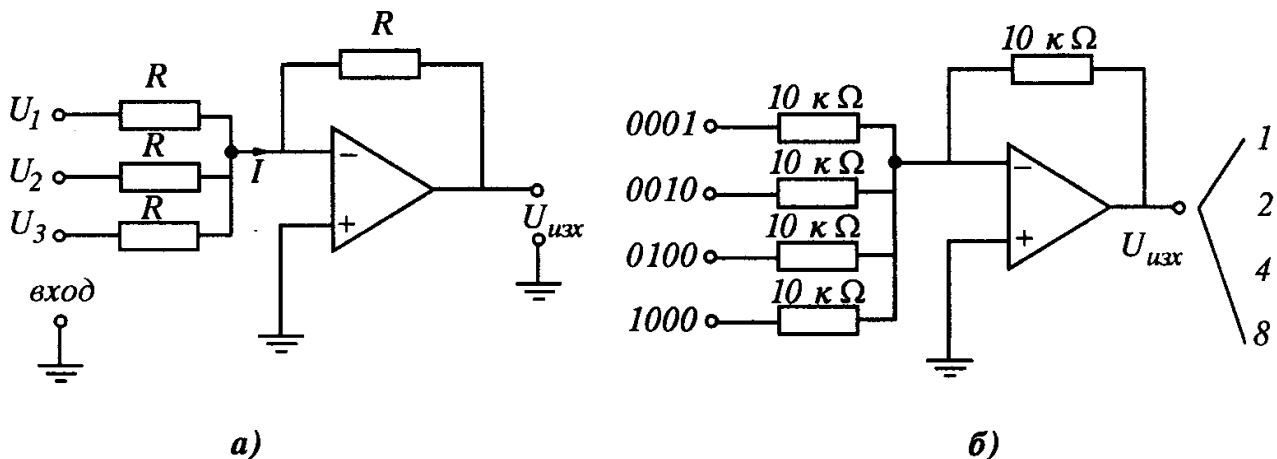
а изходното напрежение:

$$U_{изх} = -I \cdot R.$$

Следователно

$$U_{изх} = -(U_1 + U_2 + U_3),$$

т.е. разглежданата схема сумира напреженията на входовете, при това последните могат да бъдат положителни и отрицателни.



Фиг. 8.8. Сумиращ усилвател

Нека сега разгледаме схема с четири входа (фиг. 8.8б), като на всеки от тях напрежението може да бъде  $+1V$  или  $0$ . Ако използваме резистори със съпротивления  $10; 5; 2,5$  и  $12,5$   $\kappa\Omega$ , напрежението на изхода ще бъде пропорционално на двоичното число, което е зададено на входа. Ако подадем  $1 V$  на първия вход, получаваме на изхода  $1 V$ . Ако подадем единица на втория вход, получаваме  $2$  на изхода, при подаване на единица на третия, получаваме  $4$  и при  $1$  на четвъртия вход, получаваме на изхода  $8$ . Какво ще се получи като подадем единици на първите три входа? Съответства ли



числото на двоичната му форма?

Описаният метод лежи в основата на цифро-аналоговите преобразуватели (ЦАП), които широко се използват в електронната техника.

**• Някои предупреждения при работа с операционни усилватели**

1. Правилата 1 и 2, формулирани в т. 8.1, са в сила за всеки операционен усилвател при условие, че той се намира в активен режим, т.е. входовете му не се претоварени. Например, при коефициент на усилване 100 и входен сигнал с амплитуда  $0,5 V$  на изхода ние няма да получим сигнал с амплитуда  $50 V$ , защото захранващото напрежение на изхода не може да бъде по-голямо от диапазона на захранващото напрежение (разликата не бива да бъде по-малка от  $2 V$ ).

2. Обратната връзка трябва да бъде отрицателна, т.е. не бива да се бъркат инвертиращия и неинвертиращия входове.

3. В схемата на ОУ обезателно трябва да има обратна връзка по постоянен ток. В противен случай ОУ ще се окаже в режим на насищане.

4. Повечето ОУ имат неголямо допустимо диференциално входно напрежение. Обикновено максималната разлика между напреженията на инвертиращия и неинвертиращия входове не бива да превишава  $5 V$ . Ако това условие не се спази, ще възникнат големи входни токове, ще се влошат характеристиките на ОУ или той ще се повреди.

## ПОЛУПРОВОДНИКОВИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

### 9.1. Основни понятия

Устройствата, които консумират електрическа енергия, по своето предназначение и характеристики са от най-различни видове. Една част от тях работят най-добре при захранване с постоянен ток, други - с променлив. Стойностите на захранващите им напрежения, а често и честотата, също са различни. По тази причина в практиката много често възниква задачата за преобразуване на параметрите на захранващите напрежения.

Полупроводниковите преобразуватели представляват електронни устройства, които преобразуват параметрите на захранващата електрическа енергия. В зависимост от вида на преобразуване те се делят на различни класове.

*Изправители* се наричат устройствата, които преобразуват променливото напрежение в постоянно. Ако изправителят позволява по някакъв начин да се регулира стойността на изправеното напрежение, той се нарича *управляем изправител*.

*Инвертори* се наричат устройствата, които преобразуват постоянното напрежение в променливо. Тъй като честотата на изходното променливо напрежение може да бъде регулирана в широки граници, често инверторите се наричат *преобразуватели на честота*.

Към всички преобразуватели се поставя основно изискване - да работят с минимални загуби (т.е. с максимално висок к.п.д.). Това изискване определя тяхната структура и елементна база. По тази причина всички преобразуватели са изградени от полупроводникови прибори, работещи в ключов режим. При такъв режим на работа загубите са минимални, тъй като при запушено състояние на ключа напрежението върху него е пропорционално на напрежението на захранване на преобразувателя, но токът е близък до нула и разсейваната мощност, която е равна на произведението от тока и напрежението, се стреми към нула. При отпушено състояние, обратно - напрежението върху полупроводниковия прибор е между 1-2 V, а токът се определя от съпротивлението на товара. Ето защо к.п.д. на преобразувателя в много голяма степен се определя от загубите в отпушено състояние на прибора.

Както следва от изложеното дотук, всички преобразуватели се изграж-

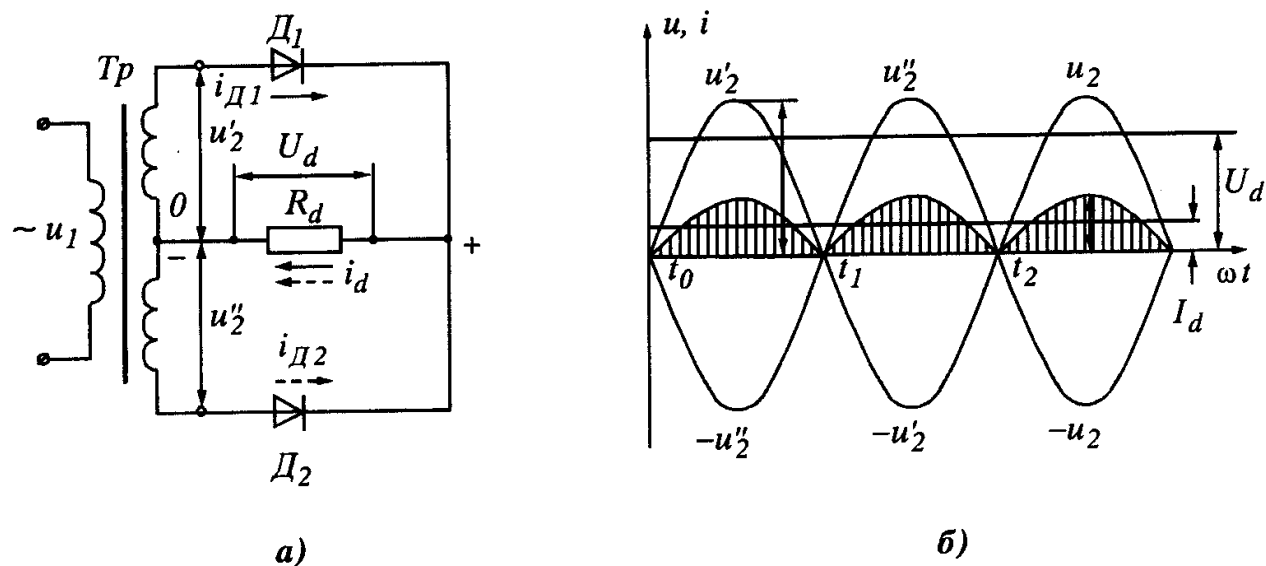
дат от диоди, тиристори и транзистори, работещи в ключов режим.

Начинът на работа на преобразувателите е следният: полупроводниковите прибори по някакъв начин превключват товара към захранващото напрежение така, че към съответния извод на товара се подава напрежение с нужния поляритет. В следващите параграфи на основата на най-разпространените преобразователни схеми това ще бъде разяснено по-подробно.

При анализа на всички преобразуватели се решават две основни задачи: първо - какви съотношения свързват параметрите на електрическата енергия на входа и изхода на преобразувателя (т.е. как се преобразува енергията) и, второ - как се натоварват елементите на преобразувателя.

## 9.2. Еднофазни изправители

Най-простата схема на еднофазен изправител съдържа два диода, включени както е показано на фиг. 9.1. Обикновено схемата се захранва от вторичната намотка на трансформатор с подходящо напрежение, който служи за съгласуване на параметрите на входното и изходно напрежение. На фиг. 9.1а са показани временните диаграми на напреженията и токовете в различните елементи на схемата. Тъй като диодът пропуска ток само в една посока, то токът в товара  $R_d$  е пулсиращ. Тази схема се нарича двуполупериоден изправител със средна точка, тъй като вторичната намотка на трансформатора се разделя на две, а през всеки диод използва само едната половина на захранващото напрежение. На фиг. 9.1, както и на всички следващи фигури, моментните стойности на напреженията и токовете са обозначени с малки букви, интегралните стойности (средноквадратична и средна) - с големи, а променливите в постояннотоковата страна на изправителя - с индекс  $d$ , за разлика от токовете в диодите, чийто индекс е  $D$ .



Фиг. 9.1

Както се вижда от приведените графики на напреженията и токовете в различните елементи на схемата, напрежението върху товара е пулсиращо и негова основна характеристика е средната му стойност. Средната стойност  $U_d$  се намира като се интегрира функцията, описваща това напрежение, т.е.

$$U_d = \frac{2}{T} \int_0^{\pi} \sqrt{2}U_2 \cdot \sin \tau d\tau = 0,9U_2 \quad .$$

Величината 0,9 се нарича *коэффициент на изправяне* и за всяка изправителна схема е различен.

Максималната стойност на обратното напрежение, прилагано върху диода, е равна на удвоената амплитуда на напрежението върху едната намотка на трансформатора, или, изразено чрез средната стойност на изправеното напрежение:

$$U_{обр. max} = 2\sqrt{2}U_d = 3,14.U_d \quad .$$

Токът през всеки диод е равен на половината от изправения ток:

$$I_D = 0,5.I_d \quad .$$

С по-горните прости формули се оразмеряват диодите в изправителя.

Оразмеряването на трансформатора е свързано с избора на трансформатора по мощност и избора на коефициента му на трансформация.

Като се има предвид съотношението за средната стойност на изправеното напрежение, очевидно коефициентът на трансформация ще бъде

$$K_{тр} = 0,9U_1 / U_d \quad .$$

Мощността на трансформатора при всички изправители е по-голяма от мощността върху товара, тъй като токът в трансформатора не е синусоидален (състои се само от части от синусоидата) и защото между ефективната стойност на захранващото напрежение и средната стойност на изправеното напрежение връзката е чрез коефициента на изправяне, който не е равен на 1. За разглежданата схема мощността на трансформатора следва да е с 48% по-голяма от тази на товара, т.е.

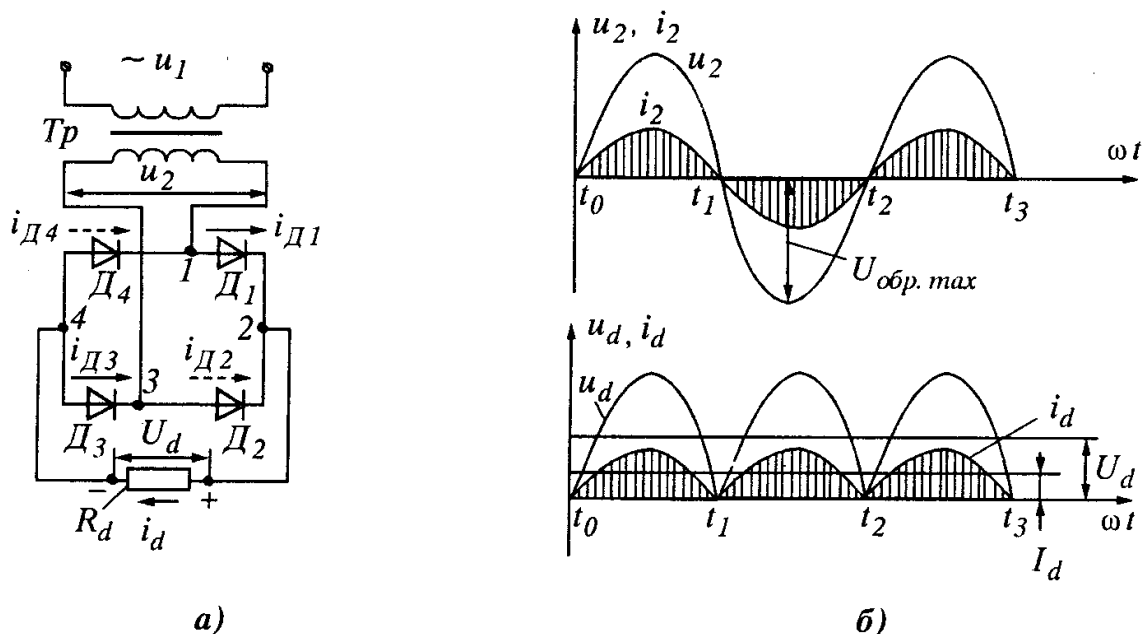
$$P_{тр} = 1,48.P_{тов} \quad .$$

На фиг. 9.2а е показана схема на двуполупериоден токоизправител (схема Грец). Когато потенциалът в т. 1 е положителен, ток пропускат диодите  $D_1$  и  $D_3$  в посоката, показана със стрелка, а когато потенциалът в т. 3 е положителен, а на т. 1 - отрицателен, ток протича през диодите  $D_4$  и  $D_2$ , като в  $R_d$  той има същата посока, както в първия случай. Схемата се нарича ще *мостова схема на изправяне*. На фиг. 9.2б са показани напреженията и

токовете в различните елементи на схемата. Както се вижда от фигурата, напрежението върху товара има същата пулсираща форма. Съотношенията, по които се оразмерява изправителя, са подобни. Зависимостите са приведени по-долу.

Средната стойност  $U_d$  се намира по същия начин, чрез интегриране на функцията, описваща напрежението, т.е.

$$U_d = \frac{2}{T} \int_0^{\pi} \sqrt{2}U_2 \cdot \sin \tau \cdot d\tau = 0,9U_2$$



Фиг. 9.2

Максималната стойност на обратното напрежение, прилагано върху диода, е равна на амплитудата на напрежението върху вторичната намотка на трансформатора, или изразено чрез средната стойност на изправеното напрежение:

$$U_{обр. max} = \sqrt{2}U_2 = 1,57 \cdot U_d$$

Токът през всеки диод е равен на половината от изправения ток:

$$I_D = 0,5I_d$$

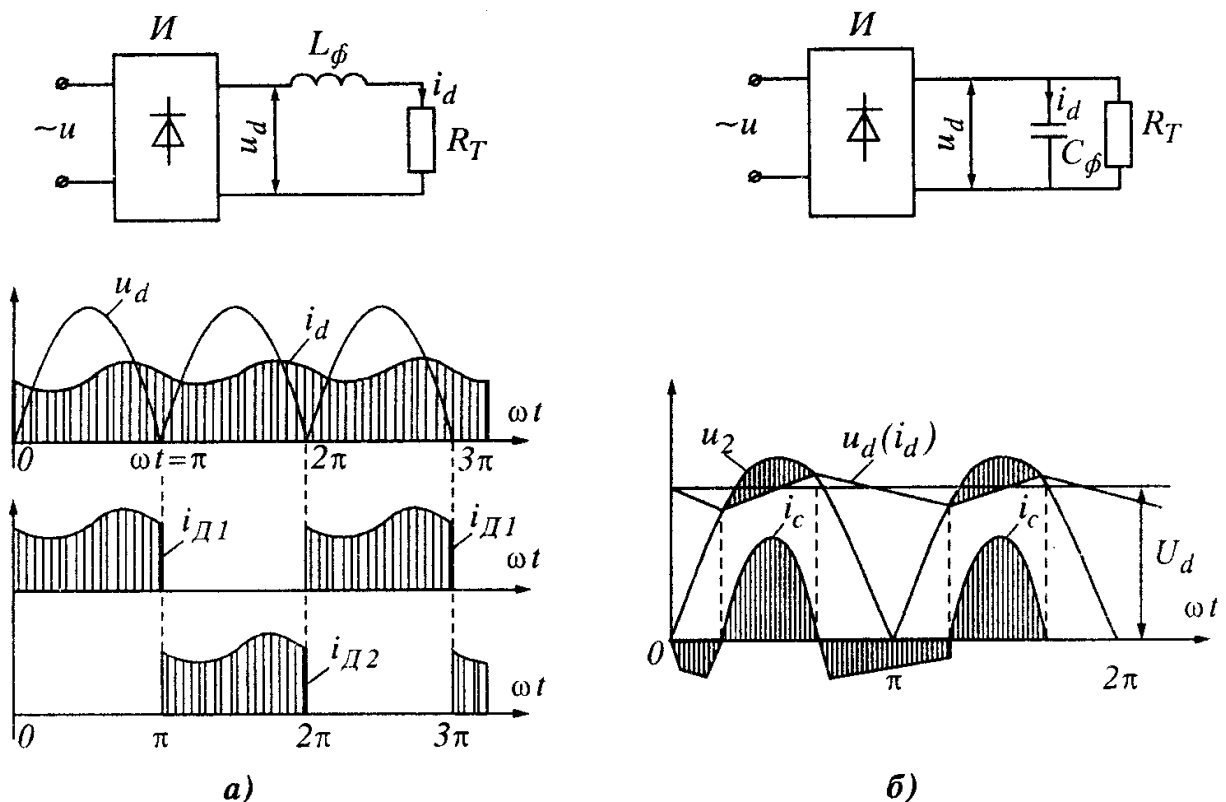
За мостовата схема на изправяне мощността на трансформатора следва да е с 21% по-голяма от тази на товара, т.е.

$$P_{тр} = 1,21 \cdot P_{тов}$$

В много случаи пулсациите са нежелателни и затова се филтрират, като към изправителя се включва нискочестотен филтър. Филтрите в мощните

изправители обикновено са индуктивни, а в маломощните - капацитивни. Те обаче влияят върху работата на изправителя и могат да доведат до необходимост при оразмеряването на изправителя да се коригират посочените по-горе изчислителни съотношения.

На фиг. 9.3а са дадени опростената схема на изправителя, филтъра  $L_\phi$ , товара и временните диаграми на токовете и напреженията, а на фиг. 9.3б - временните диаграми на токовете и напреженията при капацитивен филтър. От сравнението на тези диаграми с временните диаграми в изправителя без филтър се вижда, че при индуктивния филтър токът през вторичната намотка на трансформатора става по-близък до правоъгълен, докато при капацитивния - обратно, протича за време, по-малко от полупериода, и има остра пикова форма. Тъй като формата на тока влияе върху нейната ефективна стойност, индуктивният филтър влияе благоприятно на натоварването на захранващия трансформатор, докато капацитивният - обратно, влияе неблагоприятно. По тази причина той се използва основно при маломощни изправители.



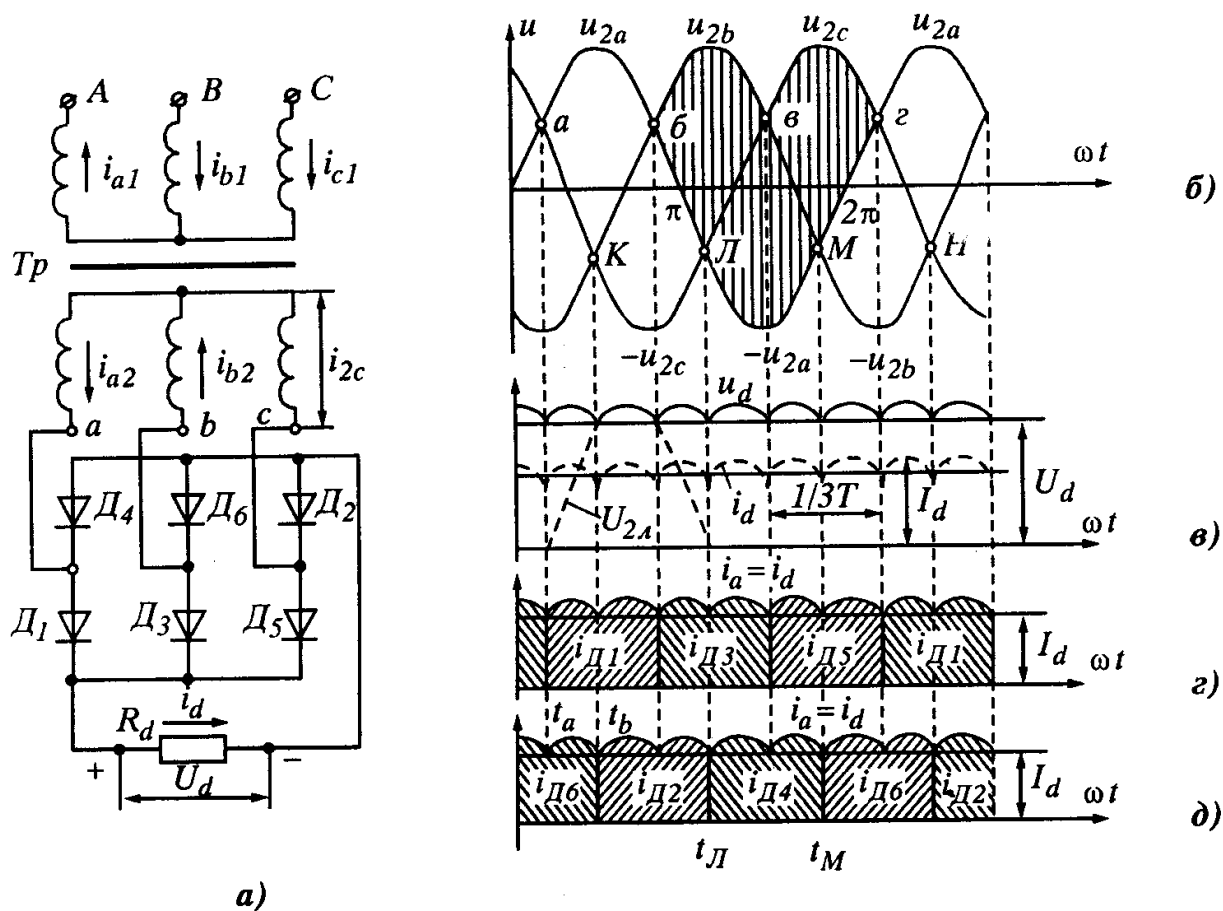
Фиг. 9.3

Капацитивният филтър влияе и върху стойността на изправеното напрежение. При значителен кондензатор и малък товар (близък до празния ход на изправителя) кондензаторът се зарежда до амплитудната стойност на захранващото напрежение.

### 9.3. Трифазни токоизправители

В случаите, когато от изправител се захранват относително мощни устройства (над 1 kW) е за предпочитане да се използват трифазни схеми на изправяне. Трифазните изправители позволяват директно да се разпределя товара между фазите на захранващото напрежение и осигуряват по-малки пулсации на захранващото напрежение.

Най-разпространената схема на трифазен изправител е тази на мостовия трифазен изправител или, както още е известен, *трифазен изправител по схема на Ларионов*. Схемата и временните диаграми на токовете и напреженията в различните точки са показани на фиг. 9.4.



Фиг. 9.4

Изправителят, както се вижда от схемата, се състои от шест диода, захранвани от трансформатор. Намотките на трансформатора могат да бъдат свързвани както в „звезда“, така и в „триъгълник“. На разглежданата схема е възприето за по-голяма прегледност свързване в „звезда“.

Диодите, които са свързани с общи катоди ( $D_1, D_2, D_3$ ), образуват положителния полюс на изправителя и се наричат *анодна група*, а диодите с общи аноди ( $D_4, D_5, D_6$ ) - отрицателния полюс, и се наричат, съответно,

*катодна група*. Всеки диод се отпушва тогава, когато напрежението на неговия анод е най-високо, в сравнение с другите диоди, като токът протича към диода, чийто потенциал на катода е най-нисък. Това означава, че диодите ще започват работа от момента, в който се пресичат синусоидите на фазните напрежения и всеки диод ще работи 120 ел.гр. Точката на пресичане на синусоидите се нарича *точка на естествена комутация на диодите*.

Тъй като токът протича от диода с най-положителен потенциал от анодната група към диода с най-отрицателен такъв от катодната група, то всеки диод от едната група ще работи по 60 ел.гр. с два диода от другата група. Диодът  $D_1$  ще работи с диодите  $D_4$  и  $D_5$ , диодът  $D_2$  - с диодите  $D_5$  и  $D_6$ , диодът  $D_3$  - с диодите  $D_6$  и  $D_4$ .

Както се вижда от временните диаграми на фиг. 9.4б, в, г, д, токът, консумиран от изправителя, не е синусоидален. Това представлява определен недостатък на изправителя, тъй като несинусоидалната форма на консумирания ток предизвиква в захранващото напрежение на мрежата височестотни изкривявания. Този ефект се проявява особено силно, когато мрежата е с ограничена мощност, както е на корабите.

Средната стойност на изправеното напрежение може да бъде получена като се интегрира напрежението, прилагано към товара по време на работата на един диод, и тази стойност се умножи по 6, тъй като за един период има 6 такива цикъла:

$$U_d = \frac{6}{T} \int_{\pi/6}^{\pi/6} \sqrt{6} U_2 \cdot \cos \tau \cdot d\tau = 2,34 U_2 .$$

Изправеното напрежение пулсира с честота, равна на шест пъти честотата на захранващото напрежение, или 300 Hz, а големината на пулсациите е около 12%, което дава възможност, в сравнение с другите изправителни схеми, тя да бъде филтрирана относително лесно с индуктивен филтър.

Средната стойност на тока през всеки диод е 1/3 от изправения ток, а максималната стойност на обратното напрежение върху всеки диод достига амплитудата на линейното напрежение, или  $\sqrt{6} U_{2\phi}$ .

В сравнение с другите изправителни схеми, при трифазната мостова схема на изправяне съотношението между необходимата габаритна мощност и консумираната мощност е 1,05, което показва добро използване на трансформатора.

#### 9.4. Управляеми изправители

В много случаи в практиката се налага изправеното напрежение да се променя (ръчно или под действието на електрически сигнал). Такива слу-



чаи в корабни условия например са тези, когато изправителите се използват за захранване на електродвигатели или за корабни зарядни устройства за акумулаторите.

Разгледаните по-горе схеми не дават тази възможност. За регулиране на средната стойност на изправеното напрежение се използват варианти на изправителите, в които част от диодите (или всички диоди) са заменени с тиристори. Такива изправители, които позволяват регулирането на средната стойност на изправеното напрежение, се наричат *управляеми*.

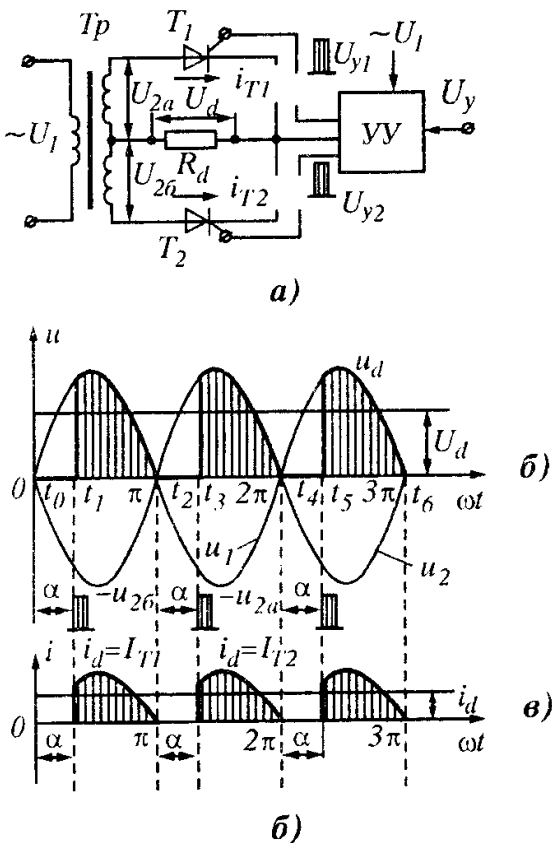
Както бе посочено, тиристорите могат да бъдат разглеждани като диоди, за отпушването на които освен положително напрежение на анода, е необходимо подаването на отпушващ импулс към управляващия електрод на прибора. Посредством изменение на момента (или фазата, както е прието да се казва), в който се подава импулсът, се изменя и времето, през което този прибор пропуска ток. По този начин се регулира средното значение на изправеното напрежение.

Очевидно, такъв изправител освен трансформатор и тиристорна част, ще изисква управляващо устройство, което да регулира фазата на отпушващите импулси. При анализа на работата на управляваемите изправители винаги ще имаме предвид това, но анализът ще извършим отделно за силовата част и за управляващото устройство.

Нека разгледаме тези изправители в същата последователност, в която се запознахме и с неуправляемите:

На фиг. 9.5а е показана схемата на еднофазен изправител със средна точка. Както се вижда, силовата част не се отличава по структура от тази на неуправляемия изправител. Разликата е в това, че диодите са заменени с тиристори, които се управляват от устройство за управление (УУ), на изхода на което има тесни импулси, отпушващи тиристорите, и чиято фаза се променя от 0 до 180 ел.гр. Структурата на това устройство спрямо захранващото напрежение под действието на управляващо напрежение е разгледано по-долу.

Временните диаграми на напреженията и токовете в схемата са показани на фиг. 9.5б.



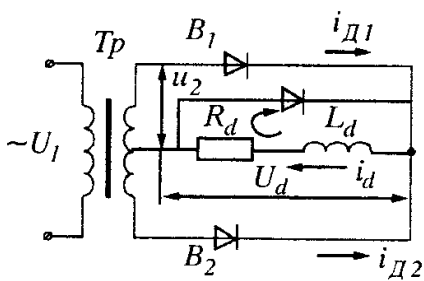
Фиг. 9.5

С  $u_{2a}$  и  $u_{2b}$  са означени фазните напрежения върху вторичните намотки на трансформатора, а на определен ъгъл от нулевата точка на синусоидата - управляващите импулси, постъпващи към тиристорите.

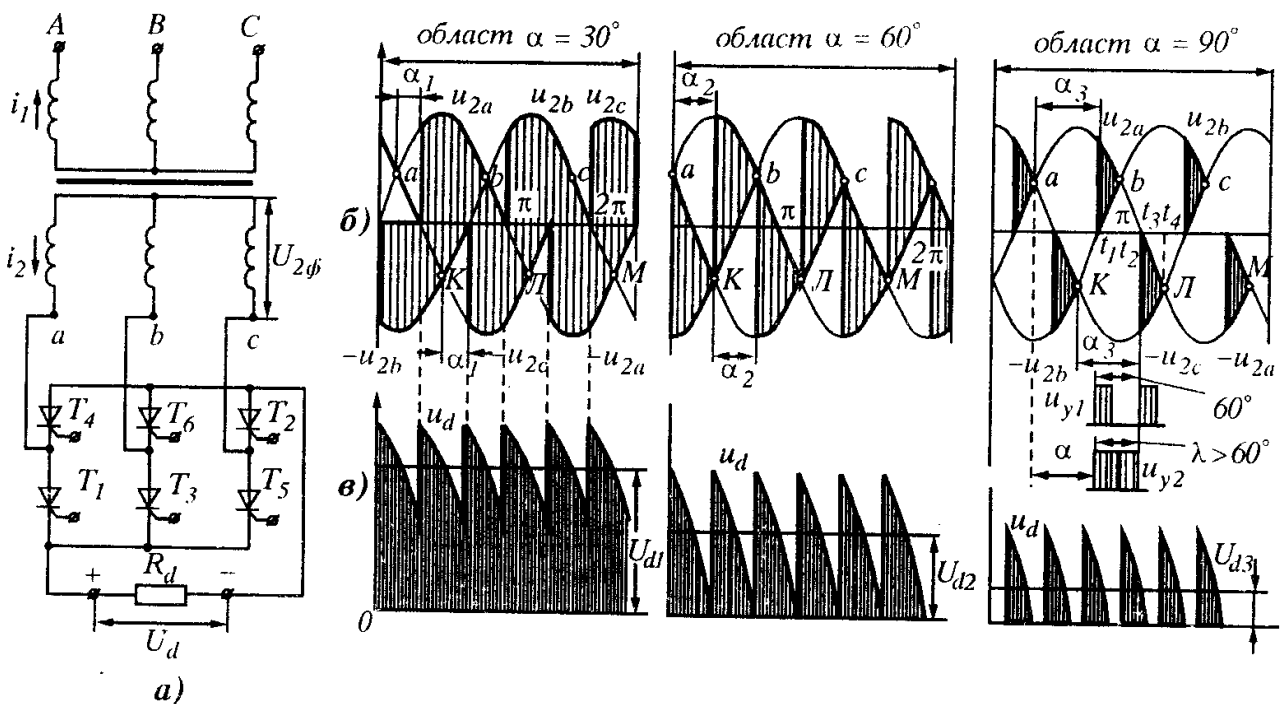
Ако тези импулси изостават на ъгъл  $\alpha$ , както е посочено на диаграмите, тиристорите се отпушват със съответното закъснение и върху товара се прилагат части от синусоидата. Временната диаграма на получаваното напрежение върху товара, когато последният представлява активно съпротивление, се състои от части от синусоидата. Както се вижда, това напрежение е силно пулсиращо и неговата средна стойност се променя с изменението на ъгъла на отпушване на тиристорите ( $\alpha$ ) от максимална стойност, равна на напрежението в съответния неуправляем изправител, до нула.

Когато управляемият изправител работи към товар с изглаждаща индуктивност, възникват някои особености. Основният проблем се състои в това, че през интервалите, през които към изглаждащата индуктивност е

подадено захранващо напрежение, в нея се натрупва електромагнитна енергия. Тази енергия следва да се разсее в товара в интервалите, в които тиристорите са запушени. За целта паралелно на товара и изглаждащата индуктивност се свързва диод, наричан *обратен диод*. На фиг. 9.6 е показано неговото свързване - вижда се, че по този начин се образува затворен



Фиг. 9.6



Фиг. 9.7

контур, по който след изключването на тиристорите токът в товара протича в същата посока, както е показано на фигурата със стрелка, до разреждането на натрупаната в индуктивността електромагнитна енергия.

За управление на мощни постояннотокови двигатели често се използват управляеми трифазни изправители. На фиг. 9.7а е показана силовата част на схемата на такъв изправител, а на фиг. 9.7б, в - временните диаграми на работа на тиристорите при различни ъгли на управление и получаваното изходно напрежение.

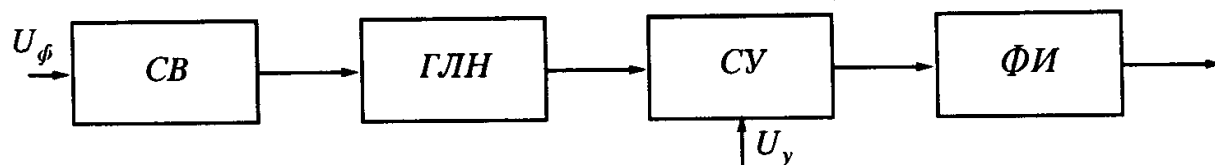
### 9.5. Устройства за управление на управляеми изправители

Системата за управление на тиристорите представлява много важна част от управляемия изправител. От нейните качества и възможности се определят качествата на изправителя. Към тези системи могат да бъдат формулирани следните основни изисквания:

- да осигуряват импулси за управление на всеки тиристор с необходимата мощност (до 5 W при 1 A) и продължителност от около 20 ms;
- да осигуряват симетрично управление на тиристорите, което означава, че импулсите за управление на всеки тиристор трябва да отстоят на еднакъв фазов ъгъл спрямо нулевата стойност на всяко фазно напрежение;
- да се управлява изместването на импулсите спрямо нулевите стойности на фазните напрежения с общ напреженов сигнал;
- да осигуряват диапазон на изместване на импулсите от 0 до 180 ел.гр.

Тези изисквания определят и структурата на устройствата на управление на управляемите изправители:

Устройствата за управление имат симетрична структура и се състоят от толкова еднотипни канала за управление, колкото тиристора има управляемия изправител. Всеки канал има възел, определящ синхронизацията на импулсите със съответното фазно напрежение, едновременното управление на фазовото изместване и формирането на импулси с необходимата мощност. Тази структура (за един канал) е показана на фиг. 9.8, където  $U_{\phi}$  е входното фазно напрежение, СВ - синхронизиращ блок, ГЛН - генератор на линейно напрежение, СУ - сравняващо устройство, ФИ - формирова- тел на импулси,  $U_y$  - управляващо напрежение.

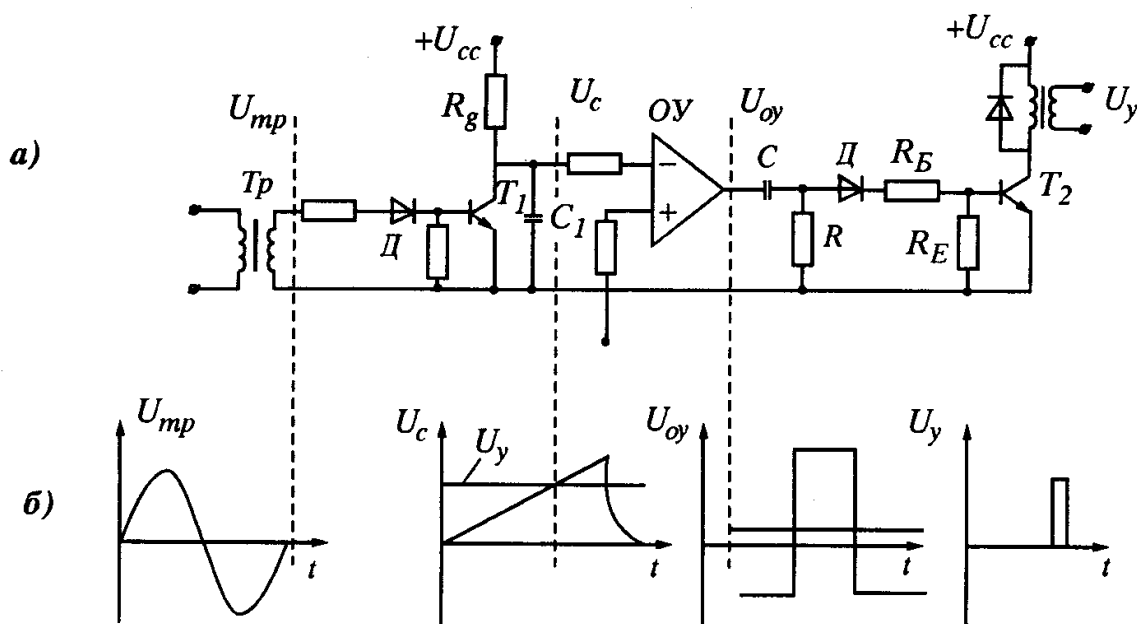


Фиг. 9.8

Принципна схема на един канал от система на управление на тиристори, реализиран по разгледаната блок-схема, е дадена на фиг. 9.9а:

Ролята на синхронизиращ блок играе понижаващ трансформатор - еднофазен или трифазен, свързан по такъв начин, че напрежението на вторичната намотка да съвпада по фаза с напрежението върху съответния тиристор, за който е предназначен даденият канал за управление.

Напрежението на вторичната намотка управлява транзисторен ключ, който периодично дава на ток кондензатора, който се зарежда от захранващата схемата източник през съпротивлението  $R_g$ . По този начин напрежението върху кондензатора периодично се изменя по закон, близък до линейния, и наподобява зъбите на трион. Такава схема се нарича *генератор на линейно напрежение*.



Фиг. 9.9

Напрежението от кондензатора се сравнява в компаратора с управляващия сигнал, подаван на другия вход на компаратора. В момента на сравнението на изхода на компаратора се формира правоъгълен импулс, от който с помощта на  $C$ - $R$  диференцираща верига и транзисторен усилвател се формира управляващият импулс  $U_y$ .

Временните диаграми, илюстриращи работата на тази схема, са показани на фиг. 9.9б. На първата графика е показано синхронизиращото напрежение към трансформатора, на втората - напрежението върху кондензатора в  $ГЛН$  и управляващото напрежение, на третата - напрежението на изхода на компаратора, и на последната - управляващите импулси.

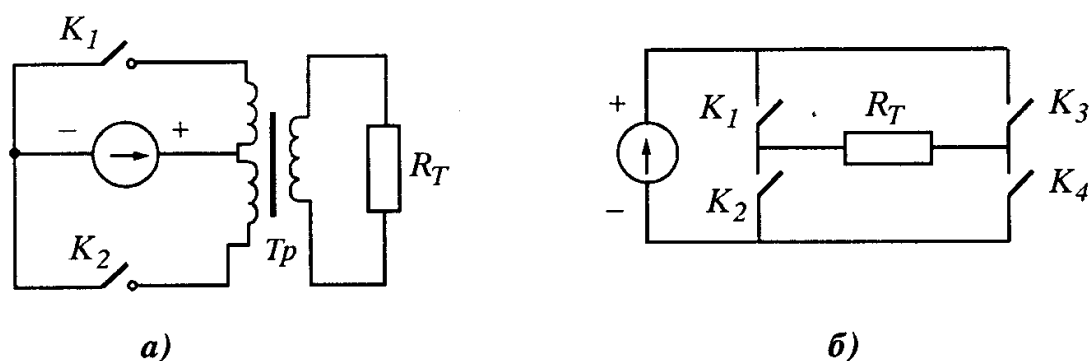
Изграждането на схеми за управление на тиристори по подобна блокова схема е възприето да се определя като управление по вертикален принцип.

Възможни са и други начини на построяване на схеми на управление на тиристори, при които разгледаните аналогови сигнали са преобразувани в цифрови (или дискретни).

### 9.6. Преобразуватели на честота

Както вече бе разяснено, преобразувателите на честота представляват устройства, чието предназначение е обратно на това на изправителите - те преобразуват постоянното напрежение в променливо, най-често с правоъгълна форма. Наричат се още и инвертори, макар че в електротехниката и електрониката на термина „инвертор“ често се придава различно значение.

Схемите на преобразувателите на честота представляват система от електронни ключове. Тяхната структура е подобна на изправителните схеми, при които са разменени местата на товара и хранящия източник. На фиг. 9.10а и фиг. 9.10б са показани двете основни схеми на еднофазни преобразуватели - със средна точка на трансформатора и мостова схема.



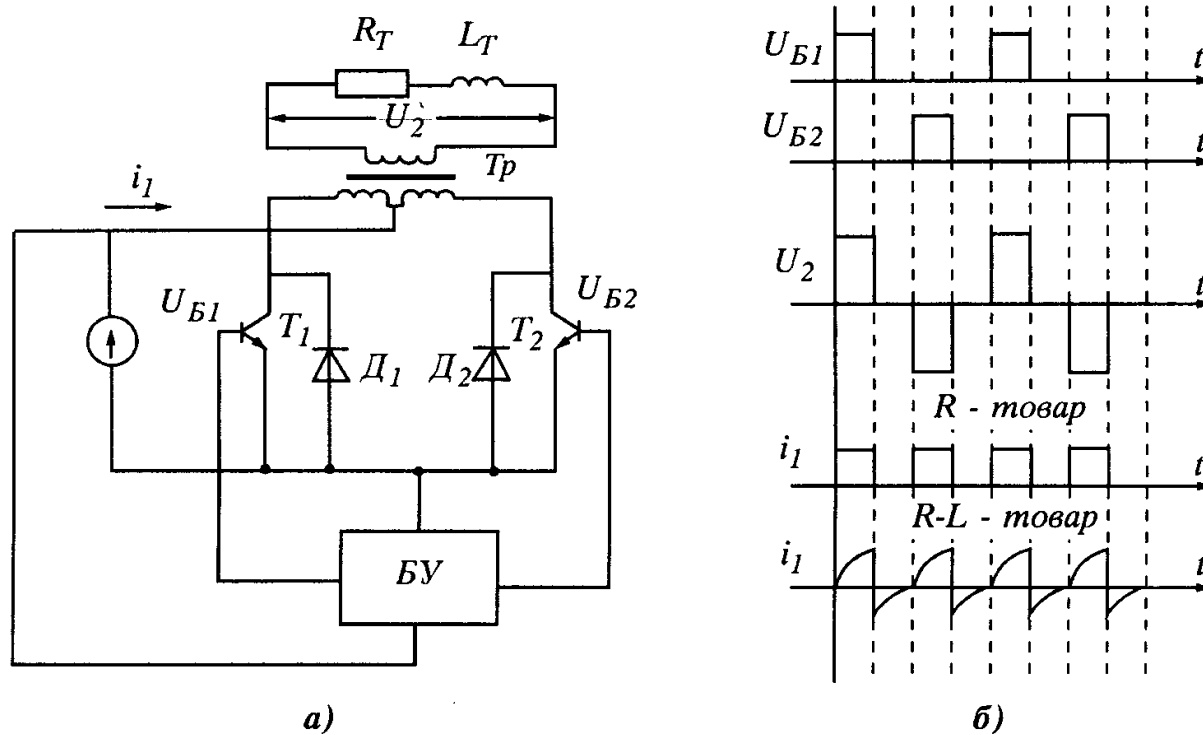
Фиг. 9.10

Както и при изправителите, при мостовите схеми през единия полупериод токът протича последователно през два ключа и товара, а при схемите със средна точка - през едната половина на вторичната намотка на трансформатора, ключа и товара. Очевидно е, че превключването на веригите, през които протича токът през двата полупериода, трябва да бъде надеждно гарантирано. В противен случай ще настъпи късо съединение във веригата на хранящия постояннотоков източник.

На основата на тези схеми са разработени множество варианти на преобразуватели на честота. Основните проблеми, определящи многообразието от преобразувателни схеми, произтичат основно от вида на използваните електронни ключове и от възможностите за връщане на реактивната енергия при индуктивен товар обратно към източника на храняване.

Електронните ключове, използвани в преобразувателните схеми, са транзисторни или тиристорни. Както вече бе посочено, транзисторните ключове са по-бързи, но не издържат претоварване, изискват управление през цялото време на проводящото им състояние и се произвеждат за по-малки мощности. Тиристорните ключове се произвеждат за значително по-големи мощности, издържат претоварвания, включват се с много малка мощност от пусков импулс, но са по-бавни и се изключват трудно. Изключването им е възможно, само ако под действието на приложено външно напрежение токът през тях спадне до нула. В преобразувателните схеми това води до въвеждането на допълнителни реактивни елементи - индуктивности и кондензатори, като натрупаната реактивна енергия в тях се използва за изключване на тиристорите.

Нека разгледаме някои основни видове схеми, като илюстрираме с тях изложението по-горе: На фиг. 9.11а е показана схемата на еднофазен транзисторен преобразувател със средна точка на трансформатора, а на фиг. 9.11б - временните диаграми на неговата работа при активен и активно-индуктивен товар.



Фиг. 9.11

Както всеки преобразувател, така и този съдържа два основни функционални блока - силова схема и блок за управление ( $БУ$ ). Предназначението на  $БУ$  е да осигури управляващи импулси с необходимата честота, продължителност и последователност така, че в силовата част електронните ключове да осигурят необходимото превключване на веригата на товара, за да осигурят знакопроменливо напрежение към последния. Тъй като ос-

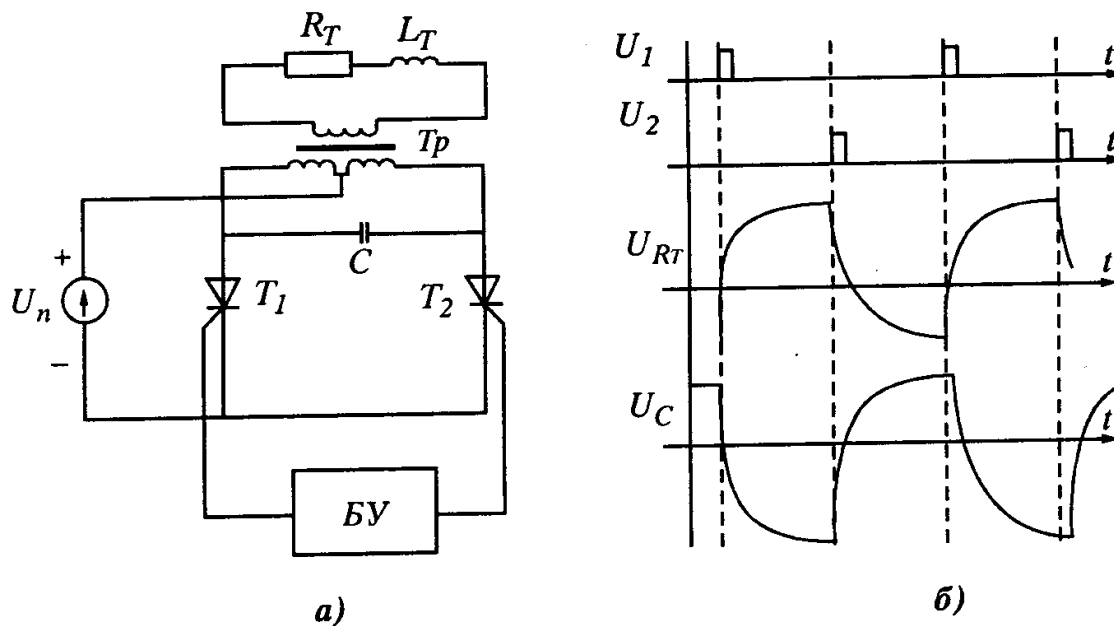
новните параметри на преобразувателя се определят от силовата част, нека разгледаме процесите в нея:

Както се вижда, тя повтаря структурата от фиг. 9.10б, като ключовете са заменени с транзистори, към които е свързан паралелно диод. Ролята на диода е да осигури връщането на реактивна енергия от товара и трансформатора обратно в източника. Това се вижда от временните диаграми. При активен товар поредното превключване на транзисторите от управляващите импулси  $U_y$  води до индуциране на правоъгълно знакопроменливо напрежение върху товара  $U_{RT}$ . Консумираният ток е постоянен, отбелязан е с  $I_1$  и е различен по форма в зависимост от това дали товарът е активен или активно-индуктивен.

При активно-индуктивен товар след изключването на транзистора, поради натрупаната реактивна енергия, токът в транзистора не може изведнъж да спадне до нула и в намотката на трансформатора се индуцира противо-е.д.н. Поради автотрансформаторното свързване на трансформатора това противо-е.д.н. е с такъв знак, че диодът, свързан паралелно към другия транзистор, се отпушва и през него и намотката на трансформатора към източника протича ток с обратен знак. Това съответства на връщането на натрупаната в индуктивността енергия.

Друга особеност на схемата е, че поради автотрансформаторното свързване на трансформатора обратното напрежение върху транзистора в запущено състояние е равно на двойното захранващо напрежение.

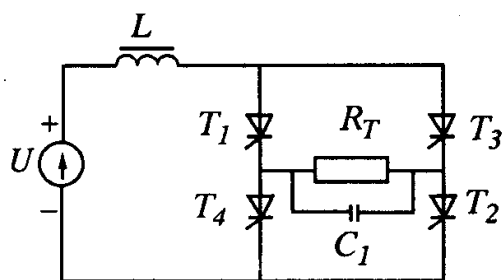
Аналогът на горния преобразувател в тиристорен вариант (с тиристорни ключове) е показан на фиг. 9.12а, а фиг. 9.12б илюстрира временните диаграми на токовете и напреженията на отделните елементи.



Фиг. 9.12

След отпушване на единия от тиристорите, през двете намотки на трансформатора протича ток. Токът през едната намотка зарежда кондензатора между двата тиристора с такава полярност, че след отпушване на следващия тиристор към катода на работещия дотогава се прилага положително напрежение и той се изключва. Кондензаторът следва да бъде оразмерен така, че времето за презареждането му да бъде достатъчно, за да се запуши работещият тиристор.

Недостатък на схемата е обстоятелството, че при големи промени на натоварването е възможно тиристорът да не се запуши. Тогава захранващият източник влиза в режим на късо съединение.



Фиг. 9.13

Често последователно със захранващия източник се включва индуктивност, която влияе благоприятно на стабилността на преобразувателя при промяна на товара. Външната характеристика на преобразувателя се получава падаща и той се нарича *инвертор на ток*. Вариант на такава схема, но при свързани в мост тиристори, е показан на фиг. 9.13.

При тази схема товарът директно се превключва от тиристорите към захранващия източник така, че на клемите му поляритетът е различен във всеки полупериод. Процесите на презареждане на кондензатора са аналогични с тази разлика, че в случая кондензаторът гаси едновременно двата работещи тиристора, а не един.

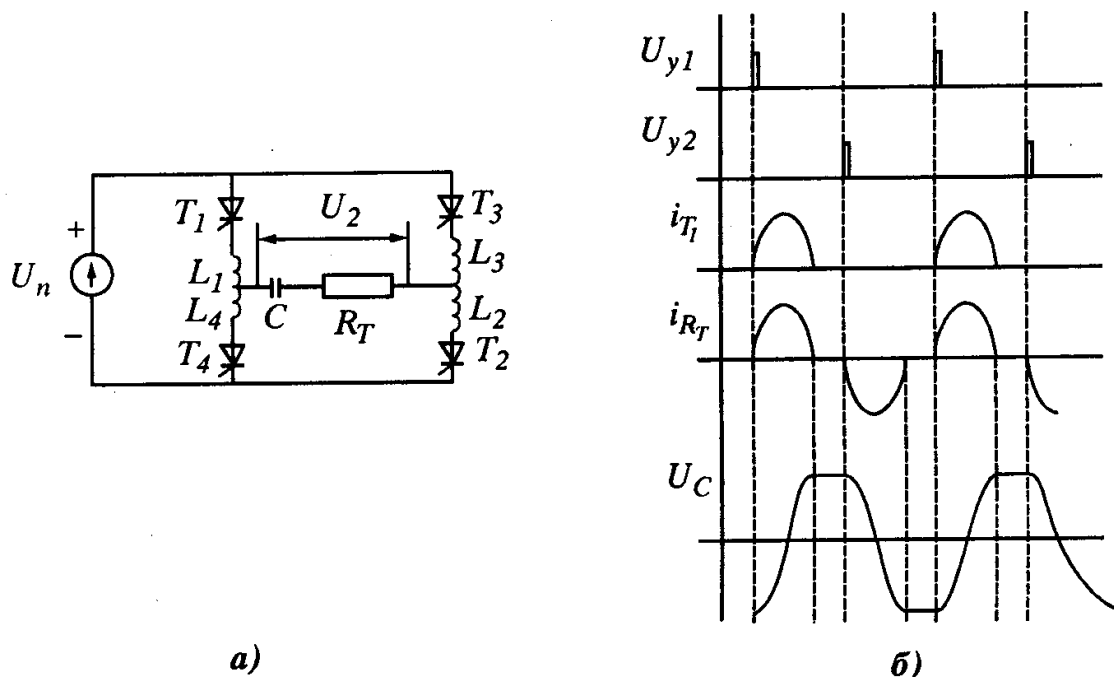
Следва да се отбележи, че при всички по-горе разгледани схеми напрежението върху товара е по-близо по форма до правоъгълното, а не до синусоидалното.

Както е известно от електротехниката, при включване на постоянно напрежение към верига, съдържаща индуктивност и кондензатор, протича затихващ колебателен процес (резонансен процес). Тази особеност се използва в много преобразуватели, наричани *резонансни инвертори*, за които е характерно, че напрежението върху товара е близко до синусоидалното. Схемата на такъв мостов инвертор и временните диаграми на напреженията и токовете върху основните елементи е показана на фиг. 9.14a и фиг. 9.14б.

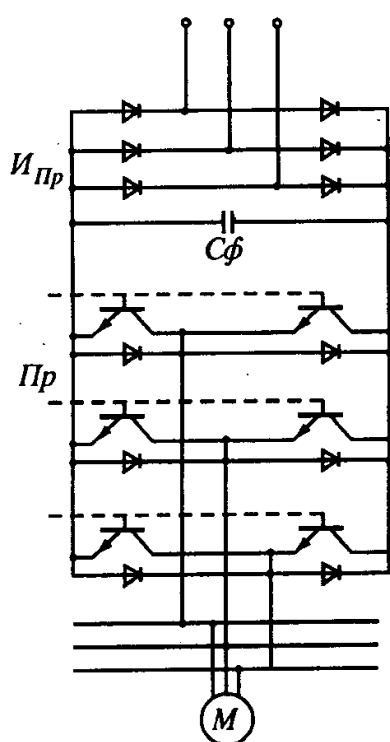
Работата на инвертора протича по следния начин: след едновременно отпушване на тиристорите  $T_1$  и  $T_2$  в единия диагонал на моста през индуктивностите  $L_1$  и  $L_2$ , кондензатора  $C$  и товара  $R_T$  протича резонансен процес. При подходящо подбрани параметри на индуктивността и кондензатора първото колебание на този процес приключва, токът преминава през нулата и тиристорите се запущат малко преди да постъпят управля-



ващи импулси към следващите тиристори. При постъпване на импулси  $U_{y2}$  към тиристорите  $T_3$  и  $T_4$  процесът протича по същия начин, но с обратен знак през веригата  $L_3, L_4, C, R_T$ . Напрежението върху товара е близко до синусоидалното.



Фиг. 9.14



Фиг. 9.15

Очевидно е обаче, че при този инвертор не е допустимо изменението на товара в широки граници, тъй като при такава промяна ще се нарушат условията на настъпване на резонанс. Друг недостатък на инверторите от разглеждания тип са значителните габарити на индуктивностите и кондензатора.

Развитието на технологиите за производство на полупроводникови прибори през последните години доведе до създаването на мощни MOS-транзистори и IGBT-транзистори (комбинация от MOS и биполярни транзистори), които комутират токове до няколко стотици ампера. Благодарение на това днес все по-широко разпространение при управлението на асинхронните двигатели намират транзисторни преобразуватели на честота с широчинно-импулсна модулация. При този случай преобразувателят се захранва от променливотокова мрежа с

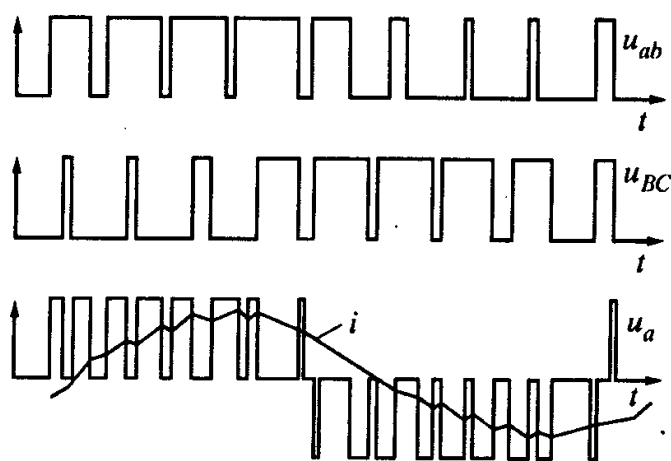
постоянна честота, изправя се и се преобразува в трифазно напрежение в друга променяща се честота и стойност на напрежението. Силовата схема на такъв трифазен преобразувател е показана на фиг. 9.15. Схемата включва неуправляем изправител, изглаждащ кондензатор и трифазен мостов транзисторен инвертор, в който транзисторите са шунтирани с обратни диоди. Диодите образуват също мостов изправител, свързан насрещно за захранващия. Предназначението му е да осигури връщането на реактивната енергия от товара и циркулирането ѝ между фазите. Както се вижда, преобразувателят освен полупроводниковите прибори (транзистори и диоди) включва много малко външни реактивни елементи. Това позволява полупроводниковите прибори да бъдат произведени като общи модули върху общ кристал и с общ радиатор за охлаждане. Благодарение на това цената и габаритите на тези преобразуватели е намалена многократно.

Временните диаграми на напреженията на трите фази на изхода на инвертора и токът в захранвания от него активно-индуктивен товар са показани на фиг. 9.16.

Вижда се, че транзисторните ключове се управляват така, че напрежението на всяка фаза се състои от импулси, чиято ширина се променя. Всъщност тази променяща се ширина на импулсите носи информация за честотата и стойността на първата хармонична съставна в изходното напрежение. В това се състои и същността на метода за широчинно-импулсна модулация на изходното напрежение.

Тъй като тези преобразуватели са предназначени най-често да управляват асинхронни двигатели, представляващи активно-индуктивен товар, ролята на филтър играе индуктивността на самия товар. На фиг. 9.16 е показана и формата на тока, която е много близка до синусоидалната.

Благодарение на това, че MOS-транзисторите изискват много малка мощност за управление, схемите за управление на такива преобразуватели



Фиг. 9.16

са компактни и с големи възможности за управление. Така например те управляват честотата и стойността на първата хармонична на напрежението по време на пусковия процес на асинхронен двигател така, че неговата стойност не надхвърля определени стойности; променят честотата така, че оборотите на вала на двигателя се стабилизират, или ги управляват по определен закон.

## РАЗДЕЛ IV. ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ИЗМЕРВАНИЯ

### Десета глава

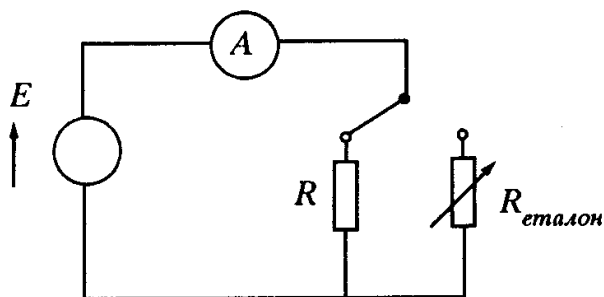
#### МЕТОДИ ЗА ИЗМЕРВАНЕ И ГРЕШКИ ПРИ ИЗМЕРВАНИЯТА

##### 10.1. Методи за измерване

Терминът *измерване* се използва, за да се опише действието по определяне на големината или размера на дадена величина, например ток.

*Методи за измерване.* Съществуват различни начини за класификация на методите за измерване. Един от тях ги разпределя в следните групи:

- *Аналогови измервания.* Измерваната величина се следи непрекъснато и използваният уред дава показания, които са аналогични на измерваната величина, т. е. големината на изходния сигнал представлява размера на измерваната величина. Пример за такъв уред е галванометърът с подвижна бобина. Големината на ъгловото отклонение на показалеца съответства на тока, протичащ в уреда.



Фиг. 10.1. Метод на заместване

- *Сравнителни измервания.* Измерваната величина се сравнява с еталон. Стойността ѝ съответства на еталонната, когато отклонението на показващия уред е едно и също. Пример в това отношение е *методът на заместване* за измерване на съпротивление - фиг. 10.1. Токът през неизвестния резистор се сравнява с този през еталонен резистор (декада).

Посредством резисторната декада се подбира такова съпротивление, че токът да е един и същ.

Друга форма на метода на сравнение е т.нар. *нулев метод*, при който разликата между неизвестната и известната величини се определя с уред и се свежда до нула, т.е. при този метод се установява нулевата разлика. Пример за това може да бъде потенциометричният метод за измерване и мостът на Уитстон (Wheatstone) за определяне на съпротивление.

- *Цифрови измервания.* При цифровите измервателни уреди измерваната величина се определя през установен интервал от време и получената стойност се преобразува в число, т.е. в поредица от цифри (цифров волтметър).

## 10.2. Грешки при измерванията

Независимо от вида на измерването се правят грешки. Грешката се определя както следва:

*грешка = измерена стойност – действителна стойност:*

$$\Delta x = x - x_0 \quad ,$$

$$\text{относителна грешка} = \Delta x / x_0 \quad .$$

*Точност на измерването* представлява диапазонът, в който се намира относителната грешка, изразена в проценти. За някои параметри или уреди този диапазон се гарантира от производителя. Това представлява лимитирана грешка (или толеранс) на уреда. Например, ако един резистор има номинална стойност на съпротивлението  $100\Omega \pm 10\%$ , това означава, че действителната стойност се намира в границите  $90 \div 110\Omega$ . Разбира се, толерансът отговаря на най-голямата възможна грешка.

Грешките могат да се разделят на две основни групи: *случайни* и *систематични*. Съществуват още, грешки, които се дължат на човека, извършващ измерването - *човешки грешки*.

*Случайните грешки* са непредсказуеми и се изменят по големина и по знак при неколккратно измерване на една и съща величина.

*Систематичните грешки* са грешки, които остават непроменени при повтаряне на измерванията.

*Човешките грешки* се дължат на грешки при използването на измервателните уреди и при отчитането на показанията на уредите.

Едно измерване се нарича *точно*, когато случайната, систематичната и човешката грешки са малки, а *прецизно* - измерването, при което случайните грешки са малки, независимо от това дали систематичната или човешката грешки са малки. Прецизен резултат е онзи, при който повторните измервания дават само малки отклонения. Тъй като случайната грешка често се увеличава от това, че операторът трябва да отчете дадена стойност, когато стрелката на уреда например се намира между две деления, прецизността на уреда може да се оцени по това колко лесно могат да се отчетат показанията. Ако един уред има повече деления от друг, то първият може да се нарече по-прецизен.

## 10.3. Източници на грешки

• *Източници на случайни грешки могат да бъдат:*

1. Грешки при отчитането на показанията (паралактична грешка, грешка, когато стрелката се намира между две деления или когато се движи под и над дадено деление).

2. Грешки, които се дължат на външните условия (от състоянието на околната среда) - температура, влажност, налягане. Например, ако външната температура не съответства на тази, за която е калибриран галванометърът, съпротивлението на подвижната бобина ще бъде друго, други ще бъдат и показанията.

3. Стохастични грешки, които се дължат на физическата природа на някои величини. Например налягането е резултат от действието на молекулите, което има случаен, вероятностен характер, върху стените на съд с някакъв газ. Друг пример е електрическият шум, който има същия характер.

• *Източници на систематични грешки могат да бъдат:*

1. Конструктивни грешки. Те се пораждат от неточности в производството на използваните електрически компоненти (например резистор със съпротивление  $R \pm 5\%$ ).

2. Апаратурна грешка. Възможен е дефект в уреда, който прави калибровката некоректна.

3. Грешка от нулиране на уреда. Тази грешка зависи от неточното установяване на нулевото показание на уреда.

4. Калибровъчни грешки. Неправилната калибровка води до изместване на показанията на уреда по-горе или по-долу в целия диапазон на уреда.

5. Грешки от стареене. Това са грешки вследствие изменение на свойствата на материалите с течение на времето; образуване на повърхностни слоеве от отлагания, които влошават изолацията на уреда и т. н.

6. Грешки, предизвикани от включване на уреда в схемата - например включване на амперметър за измерване на тока във веригата.

• *Източниците на човешки (операторски) грешки са:*

1. Грешки от неправилно отчитане. Възможно е операторът неправилно да отчете броя на деленията или да сгреша скалата.

2. Изчислителна грешка.

3. Неправилно използване на даден измервателен уред или метод за измерване - например измерване на напрежение с честота по-висока от тази, за която е изработен уредът.

4. Неправилна настройка на измервателния уред (неточно изпълнени условия за равновесие в измервателния мост).

• *Оценка и намаляване на грешките:*

*Случайните грешки* могат да се оценят като се направят повече измервания на дадена величина и резултатите се обработят с помощта на статистически методи. Могат да се намалят чрез по-точно конструиране на из-

мервателната система и минимизиране на влиянието на околната среда - термостатиране на уреда, виброизолация, екраниране за защита от електрически и магнитни полета.

*Систематичните грешки* могат да бъдат открити и взети под внимание. Възможно е много от тях да се намалят чрез внимателна проверка и поддръжка на уреда, за да се гарантира правилната му работа.

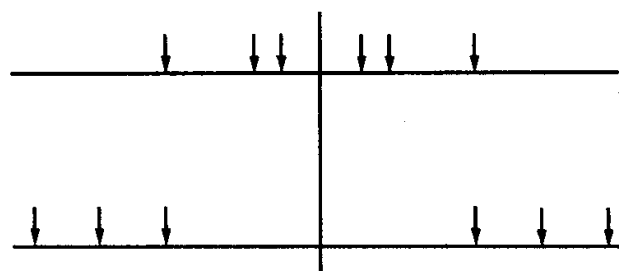
#### 10.4. Статистика на грешките

Случайните грешки водят до получаване на различни резултати при измерване на дадена величина. Тези резултати имат известно разсейване около действителната стойност. За получаване на най-близката до нея стойност и вероятната грешка се използват статистически методи.

Най-често използваният метод е определянето на *средноаритметичната стойност* на всички ( $n$ ) получени резултати:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum x_i}{n}$$

Колкото по-голям е броят на измерванията, толкова по-надежден е резултатът. Средноаритметичната стойност обаче не дава информация за



Фиг. 10.2. Средна стойност и разсейване на резултатите от измерването

разсейването на резултатите, т.е. за случайната грешка. На фиг. 10.2 са показани две групи резултати, които дават една и съща средна стойност, но в първия случай измерените стойности са по-близко до средната, докато във втория са разпръснати в по-широк диапазон. Може да се очаква, че средната стойност ще бъде по-близка до действителната, ако разсейването на резултатите е по-малко.

Терминът *отклонение* ще използваме за обозначаване на разликата между резултата от дадено измерване и средната стойност:

$$\text{отклонение} = x_1 - \bar{x}$$

Отклонението може да бъде положително или отрицателно. Мярка за разсейването на резултатите е *средното отклонение*, което се определя като средна стойност от абсолютните стойности на всички отклонения:

$$\text{средно отклонение} = \frac{|x_1 - \bar{x}| + |x_2 - \bar{x}| + \dots + |x_n - \bar{x}|}{n} = \frac{\sum |x_i - \bar{x}|}{n}$$

Колкото по-малко е средното отклонение, толкова по-прецизен е измервателният уред.

За оценка на разсейването на резултатите обикновено се използва *средноквадратичното отклонение*. То представлява квадратен корен от сумата от квадратите на всички „ $n$ “ отклонения, разделени на броя на измерванията „ $n$ “, т. е. квадратен корен от средната стойност от квадратите на отклоненията:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n}}$$

Както следва от формулата,  $\sigma$  има винаги положителна стойност и се нарича още *стандартно отклонение*.

### Пример 10.1:

Дадени са резултатите от измерване на капацитета на кондензатор. Да се определи средната стойност и стандартното отклонение от средното.

Капацитет, $\mu F$	Отклонение, $\mu F$	Отклонение, $\mu F^2$
$x_n$	$x_n - \bar{x}$	$(x_n - \bar{x})^2$
8,0	-0,1	0,01
8,1	0,0	0,00
7,9	-0,2	0,04
7,9	-0,2	0,04
8,3	+0,2	0,04
8,4	+0,3	0,09

Решение:

$$\sum x_i = 48,6 \qquad \frac{\sum (x_i - \bar{x})}{n} = 0,17 \qquad \sum (x_i - \bar{x})^2 = 0,22$$

$$\frac{\sum x_i}{n} = 8,1 \qquad \sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} = 0,21$$

В някои случаи при изчисляване на  $\sigma$  се използва „ $(n - 1)$ “ вместо „ $n$ “. При големи „ $n$ “ разликата е незначителна.

## 10.5. Сумиране на грешките

Дадена електрическа величина може да бъде сума, разлика, произведение или частно от деление на други две или повече величини, измерени със съответната точност. Грешката в резултата се определя по следния начин:

1. *Сумиране.* Ако  $X = A + B$  и грешките, с които са определени  $A$  и  $B$  са съответно  $\pm\Delta A$  и  $\pm\Delta B$ , то

$$X \pm \Delta X = (A \pm \Delta A) + (B \pm \Delta B) ,$$

следователно

$$\pm\Delta X = \pm\Delta A \pm \Delta B .$$

Грешката в определянето на  $X$  ще бъде *най-голяма*, когато грешките на  $A$  и  $B$  имат еднакъв знак, т. е.  $\Delta X = \pm(\Delta A + \Delta B)$ .

---

### Пример 10.2:

Съпротивленията на два резистора са определени като  $100 \pm 10 \Omega$  и  $50 \pm 5 \Omega$ . Да се определи съпротивлението при последователно свързване на резисторите и съответната грешка.

**Решение:**

$$X = 150 \pm (10 + 5) = 150 \pm 15 \Omega .$$

$\Delta X = 150 \Omega$  съответства на случая, когато първият резистор има стойност  $110 \Omega$ , а вторият -  $55 \Omega$ , т. е.:

$$X_1 = 110 + 55 = 165 \Omega, \quad \Delta X = 165 - 150 = 15 \Omega ,$$

$\Delta X = -15 \Omega$  съответства на  $X_1 = 90 + 45 = 135 \Omega$  и  $\Delta X = 135 - 150 = -15 \Omega$ .

Тъй като е възможна корелация между слагаемите, то аритметичното сумиране на грешките обикновено дава завишени стойности на сумарната грешка. По тази причина се предпочита геометрично сумиране, което дава по-добър резултат, т. е.

$$\Delta X = \pm\sqrt{(\Delta A)^2 + (\Delta B)^2} .$$

---

2. *Изваждане.* Грешките се сумират, за да се получи най-голяма обща грешка. По-близка до реалната ще бъде геометричната сума на грешките:

$$\Delta X = \pm\sqrt{(\Delta A)^2 + (\Delta B)^2} .$$



3. Умножение. При  $X = A + B$ , се получава

$$X \pm \Delta X = (A \pm \Delta A)(B \pm \Delta B) = AB \pm A\Delta B \pm B\Delta A \pm \Delta A\Delta B .$$

Ако пренебрегнем  $\Delta A\Delta B$ , като слагаме от по-висок порядък можем да запишем

$$X \pm \Delta X = AB \pm A\Delta B \pm B\Delta A ,$$

$$\Delta X = \pm A\Delta B \pm B\Delta A .$$

Това може да се запише:

$$\frac{\Delta X}{X} = \frac{\pm A\Delta B \pm B\Delta A}{AB} = \pm \frac{\Delta B}{B} \pm \frac{\Delta A}{A} .$$

В най-лошия случай грешките ще имат еднакъв знак. Следователно:

$$\frac{\Delta X}{X} = \pm \left( \frac{\Delta B}{B} + \frac{\Delta A}{A} \right) ,$$

или в проценти:  $\frac{\Delta X}{X} 100 = \pm \left( \frac{\Delta B}{B} 100 + \frac{\Delta A}{A} 100 \right) \% .$

При умножение на две величини общата *относителна* грешка е сума от относителните грешки на множителите. По-добре ще бъде да се вземе геометричната сума:

$$\frac{\Delta X}{X} = \pm \sqrt{\left( \frac{\Delta A}{A} \right)^2 + \left( \frac{\Delta B}{B} \right)^2} .$$

4. Деление. В този случай общата относителна грешка е сума от относителните грешки, но по-добър резултат дава формулата

$$\frac{\Delta X}{X} = \pm \sqrt{\left( \frac{\Delta A}{A} \right)^2 + \left( \frac{\Delta B}{B} \right)^2} .$$

5. При изчисляване на мощност ( $P = U^2 / R = RI^2$ ) за относителната грешка се използва формулата

$$(10.1) \quad \frac{\Delta P}{P} = \pm \left( \frac{\Delta R}{R} + 2 \frac{\Delta U}{U} \right) .$$

В общия случай по-точно ще бъде изчисляването по формулата

$$(10.2) \quad \frac{\Delta X}{X} = \pm \sqrt{\left( \frac{\Delta A}{A} \right)^2 + \left( \frac{n\Delta B}{B} \right)^2} .$$

---

**Пример 10.3:**

При изчисляване на мощност се използва формулата  $P = U^2 / R$ , като напрежението е определено с точност  $\pm 4\%$ , а съпротивлението - с точност  $\pm 10\%$ . Да се определи величината на най-голямата грешка.

**Решение:**

При използване на (10.1) резултатът е:

$$\frac{\Delta X}{X} 100 = \pm(10 + 2,4) = \pm 18\% ,$$

а при използване на (10.2):

$$\frac{\Delta X}{X} = \pm \sqrt{0,1^2 + (2,0,04)^2} = \pm 0,128 \text{ (или } \pm 12,8\%) .$$

---

## ЕЛЕКТРОМЕХАНИЧНИ ИЗМЕРВАТЕЛНИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ И УРЕДИ

### 11.1. Метрологични характеристики на електроизмервателните уреди

Понятието *измервателен уред* или само *уред* се използва за устройство, предназначено за определяне на големината на дадена величина. То може да бъде например рулетка за определяне на дължината на някакъв обект, галванометър за определяне на големината на тока, осцилоскоп за определяне на формата на електрически сигнал. Действието, извършвано с посочената цел, се нарича *измерване*. За да се прецени какви измервания могат да се правят с даден уред, е необходимо да се знаят неговите метрологични характеристики. Списъкът с тези характеристики и условията на работа, при които те са гарантирани, обикновено се нарича *спецификация*.

Свойствата на измервателните уреди описва определена терминология. Основните понятия, която тя използва, могат да се разделят в три групи, отнасящи се до конструкцията на уреда, неговата чувствителност и точност, и свързаните с неговата калибровка. Тук ще бъдат разгледани най-важните от посочените групи.

• *Понятия, свързани с конструкцията:*

1. Показващ уред - измервателен уред, при който големината на измерваната величина се определя визуално, т.е. по мястото на показалеца върху скалата (например амперметър от магнитоелектрическата система).

2. Записващ уред - измервателен уред, в който стойностите на измерваната величина се записват (например на хартия).

3. Скала - разграфен участък за отчитане на отклонението на показалеца (фиг. 11.14).

4. Дължина на скалата - пътят, който очертава показалецът между двата края на скалата (фиг. 11.1).

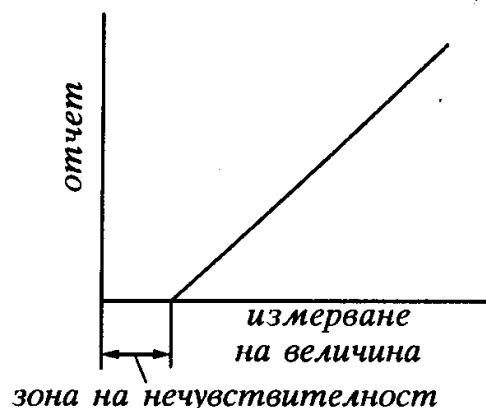
5. Скално деление - минималната стойност, с която се изменят показанията на уреда между две съседни черти.

6. Диапазон или обхват на уреда - границите, между които може да се прави отчет на измерваната величина (на фиг. 11.1 диапазонът е от 0 до 25 единици).

7. Зона на нечувствителност - диапазонът от стойности на измерваната величина, за който уредът не дава показания. Често това се отнася за началото на скалата. Например, необходима е определена стойност на тока, за да започне завъртането на подвижната бобина (фиг. 11.2).



Фиг. 11.1

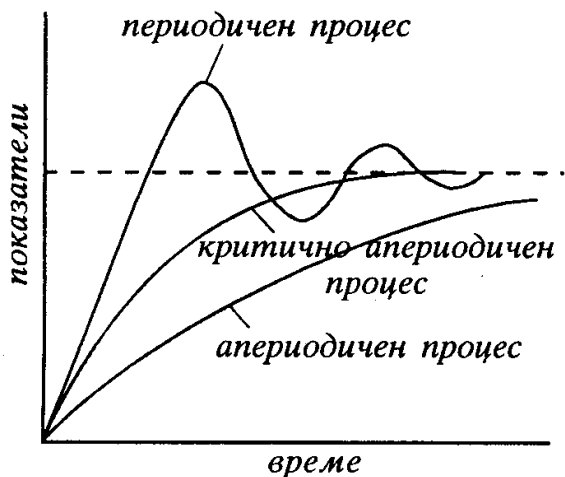


Фиг. 11.2

8. Демпфиране (успокояване на подвижната част). При включване на уреда стрелката не се установява веднага срещу съответното деление, а може да го отmine и да направи няколко колебания около него. Този преходен процес, в зависимост от демпфирането, може да бъде апериодичен, критично-апериодичен или колебателен.

Обикновено успокоителят се настройва за критично апериодичен или бързозатихващ колебателен процес.

• **Понятия, свързани с чувствителността и точността:**



Фиг. 11.3. Успокояване на подвижната част на уреда

1. Чувствителност. Определя се чрез преместването на стрелката, съответстващо на определено изменение на измерваната величина, което го предизвиква.

Чувствителността на осцилоскопа по оста  $y$  например може да бъде  $0,05 \text{ дел/V}$  (в някои случаи е по-удобно да се използва реципрочната стойност -  $20 \text{ V/дел}$ ). В някои измервателни системи чувствителността може да се изрази като отношение на изменението на изходния сигнал към изменението на входния сигнал:

$$\text{чувствителност} = \frac{\text{изменение на изхода}}{\text{изменение на входа}}$$

2. Разрешаваща способност. За даден уред това е най-малкото изменение на измерваната величина, което предизвиква наблюдаемо изменение в показанията на уреда. В някои случаи тя се изразява като част от стойността на максималния входен сигнал. Например при разрешаваща способност  $10^{-4}$  за волтметър с обхват  $200\text{ V}$ , това означава, че тя има стойност  $200 \times 10^{-4} = 20\text{ mV}$ .

3. Дрейф. Уредът има дрейф, когато са налице бавни изменения на неговите показания, които не са свързани с неговия вход.

4. Точност. Точност на измервателния уред е степента, до която показанието, което той дава, може да бъде грешно, т.е. степента, до която то ще се различава от действителната стойност. Последната може да се счита измерената с най-добрите еталонни измервателни уреди. Точността на един уред може да бъде дадена в съответните единици за една стойност или за целия диапазон на измерване (например  $\pm 0,1\text{ A}$  за диапазон  $0 \div 10\text{ A}$ ; това означава, че само се гарантира, че отчетената стойност е в границите от  $-0,1\text{ A}$  до  $+0,1\text{ A}$  спрямо действителната). Точността може да се даде и в проценти от измерената стойност, например  $4\%$ . Това означава, че ако е отчетена стойност  $5\text{ A}$ , то действителната стойност е в границите от  $5 - 0,2\text{ A}$  и  $5 + 0,2\text{ A}$ . По-често обаче точността се изразява в проценти от максималното отклонение на стрелката (до края на разграфената част на скалата) - съкратено м.о.с. Ако един амперметър има точност  $2\%$  м.о.с. и обхват  $10\text{ A}$ , това означава, че всяка стойност в този диапазон ще има грешка  $\pm 0,2\text{ A}$ . Понятието *нормирана стойност* се използва за величината, спрямо която точността е дефинирана в  $\%$  (приведена грешка). Обикновено нормираната стойност е тази, която съответства на максималното отклонение на стрелката. При цифровите уреди точността обикновено се определя като „ $\pm$ “ (процент от отчетената стойност). Ако един цифров волтметър има точност  $\pm 0,5\%$  от показанията  $\pm 1$ , то ако са отчетени  $100\text{ V}$  и един разряд е  $1\text{ V}$ , точността ще бъде:  $0,5\%$  от  $100\text{ V} \pm 1\text{ V}$ , т.е.  $\pm 1,5\text{ V}$ .

5. Грешка на уреда - разликата между измерената стойност  $x_{изм}$  и действителната  $x_0$  е абсолютна грешка:  $\Delta x = x_{изм} - x_0$ ,  $\Delta x / x_0$  - относителна грешка и  $(\Delta x / x) \cdot 100\%$  - процентна грешка.

6. Грешка от хистерезис. Проявява се като разлика в отчитането на една и съща стойност на дадена величина, в зависимост от това как тя е установена - при увеличаване от дадена по-малка или при намаляване от по-висока. Стойността на тази грешка се дава за максималната разлика, отнесена към съответния обхват в проценти:

$$\text{грешка от хистерезис} = (\text{макс. грешка от хистерезис} / \text{обхват}) \cdot 100\%.$$

Тя е резултат от триене в лагерите или хлабини в редуктора на измервателния уред.

7. Клас на точност. Максималните основни допустими грешки на апаратите са установени със съответен стандарт, като по степен на точност апаратите за непосредствена оценка се делят на **седем класа на точност: 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5 и 4,0**. Съответните основни приведени грешки в % за отделните класове не трябва да превишават  $\pm 0,1\%$ ,  $\pm 0,2\%$ ,  $\pm 0,5\%$ ,  $\pm 1,0\%$ ,  $\pm 1,5\%$ ,  $\pm 2,5\%$ ,  $\pm 4,0\%$ .

8. Надеждност - вероятността уредът да работи при гарантираните в спецификацията характеристики и експлоатационни условия.

• **Понятия, отнасящи се до калибровката** или градуирането на измервателните уреди:

1. Калибровка - процес на определяне на отношението между стойността на измерваната величина и съответното положение на стрелката на уреда.

2. Константа на уреда. За уредите, които имат независима скала или за уредите с няколко обхвата това е коефициент, с който трябва да се умножи показанието на уреда, за да се получи стойността на измерваната величина.

3. Еталон - образцова мярка за калибриране или градуиране на измервателен уред.

• **Освен посочените**, се използват и следните по-специфични термини:

1. Размери и тегло.

2. Работна температура - температурен диапазон, за който са гарантирани свойствата на уреда, посочени в спецификацията.

3. Изходно съпротивление (импеданс) - съпротивлението от страната на изходните краища, което е свързано с натоварването на уреда и влиянието на товара върху него.

4. Входна мощност - мощността, необходима за работа на уреда.

5. Времеконстанта на уреда - времето, което трябва да мине от момента, когато измерваната величина се измени, до момента, в който уредът ще реагира с отчитане на новата стойност.

6. Честотна лента. Показанията на уреда за дадена стойност на входния сигнал в общия случай зависят от честотата. Например един стрелкови уред може да не запази показанието си, когато честотата се увеличи.

Ширината на честотната лента се определя за диапазон, в който показанията на уреда са не по-малки от  $0,707 = 1/\sqrt{2}$  от неговата максимална стойност. Такова изменение съответства на  $3dB$  по логаритмичната скала:

$$20 \lg (\text{стойност}/\text{макс. стойност}) = 20 \lg (1/\sqrt{2}) .$$

### Пример 11.1:

За измерване се използва мултиметър със следните данни:

*Диапазони:*

Напрежение: постоянно - 100 mV, 3 V, 10 V, 30 V, 100 V, 300 V, 600 V,  
1 kV, 3 kV;

променливо - 3 V, 10 V, 100 V, 300 V, 600 V, 1 kV, 3 kV.

Ток: постоянен - 50  $\mu$ A, 300  $\mu$ A, 1 mA, 10 mA, 100 mA, 1 A, 10 A;

променлив - 10 mA, 100 mA, 1 A, 10 A.

Съпротивление:  $0 \div 2 \text{ k}\Omega$ ,  $0 \div 200 \text{ k}\Omega$ ,  $0 \div 20 \text{ M}\Omega$ .

*Точност при 20 °C:*

- постоянен ток  $\pm 1\%$  приведена грешка,
- променлив ток  $\pm 2\%$  приведена грешка при 50 Hz,
- съпротивление  $\pm 3\%$  от показанияето в центъра на скалата.

Каква ще бъде точността на показанияето, когато уредът измерва:

а) = напрежение 5 V в диапазона 10 V?

б) = напрежение 5 V в диапазона 30 V?

в) ~ ток 5 mA в диапазона 10 mA?

г) съпротивление 50 k $\Omega$  в диапазона  $0 \div 200 \text{ k}\Omega$ ?

Да се вземе предвид това, че скалата за съпротивлението е нелинейна и е различна за всеки диапазон. За диапазона  $0 \div 2000$  центърът е при отметка 20.

**Решение:**

а) при = 5 V приведената грешка на диапазона е  $\pm 1\%$  от 10 V, т.е.  $\pm 0,1 \text{ V}$ . Следователно, резултатът е  $5 \pm 0,1 \text{ V}$  (в същото време относителната грешка е  $\pm 2\%$ );

б) точността в диапазона 30 V е  $\pm 1\%$  от 30 V, т.е. 0,3 V. Следователно, резултатът е  $5 \pm 0,3 \text{ V}$ ;

в) точността в обхвата ~10 mA е  $\pm 2\%$  приведена грешка, а  $2\%$  от 10 mA е  $\pm 0,2 \text{ mA}$  и резултатът ще бъде  $5 \pm 0,2 \text{ mA}$ ;

г) точността в обхвата  $0 \div 200 \text{ k}\Omega$  е  $\pm 3\%$  грешка, приведена към центъра на скалата; скалата е разграфена от 0 до 2000 и 2000 в случая отговаря на 200 k $\Omega$  - тогава центърът на скалата отговаря на 2 k $\Omega$ . И така,  $\pm 3\%$  от 2 k $\Omega$  отговаря на 0,06 k $\Omega$ . Резултатът ще бъде  $50 \pm 0,006 \text{ k}\Omega$ .

## 11.2. Електромеханични измервателни механизми

Измервателните механизми преобразуват входната (измервана) величина в механично преместване (ъглово или линейно) под действието на двигателен момент  $M$ , който е функция на входната електрическа величина  $X$  и на ъгъла на завъртане на подвижната част на апарата.

Според физическите явления, използвани за получаване на необходимия двигателен момент, измервателните механизми са магнитоелектрически, електромагнитни, електродинамични и др.

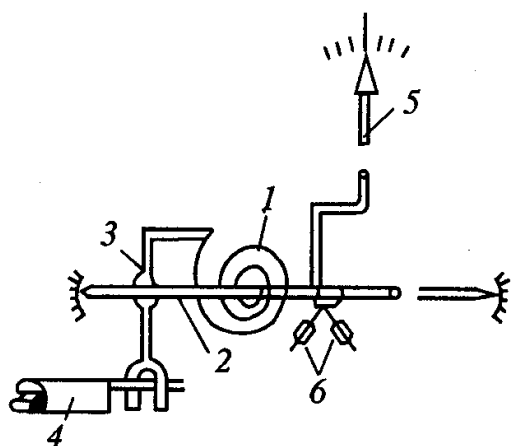
Измервателният механизъм (ИМ) на всеки апарат за непосредствена оценка се състои от две основни части - неподвижна и подвижна. Под въздействие на получените в механизма сили подвижната част се премества и по големината на полученото преместване се съди за стойността на измерваната величина. За отчитане на преместването уредите са снабдени със стрелка и ска̀ла, като за повишаване на точността на отчитането (избягване на грешката от паралакс) ска̀лите са с огледало.

Подвижната част на измервателния механизъм се закрепва на ос (електромагнитен ИМ) или на две полуоси, когато апаратите имат бобина на подвижната част (магнитоелектрически ИМ).

Ако върху подвижната част действа само въртящият момент  $M_{\text{ввр}}$ , тя ще се отклони до възможното си крайно положение и това ще става при всички стойности на измерваната величина. За да може на определена стойност на величината да съответства строго определено отклонение на подвижната част, върху нея трябва да действа и друг момент (противодействащ, съпротивителен -  $M_{\text{пр}}$ ), насочен срещу двигателния и зависещ от ъгъла на завъртане на подвижната част, при което  $M_{\text{ввр}} = M_{\text{пр}}$ . Обикновено  $M_{\text{пр}}$

се създава от спирални пружинки, тъй като те имат свойството да създават противодействащ момент, пропорционален на ъгъла на завъртане:  $M_{\text{пр}} = K \cdot \alpha$ , където  $K$  е специфичен противодействащ момент, отговарящ на единица ъгъл на завъртане на подвижната част.

С единия си край спиралната пружинка 1 (фиг. 11.4) е закрепена за оста 2 на подвижната част, а с другия - за коректора 3. Посредством коректорния винт 4, който е изведен на капака на апарата, положението на стрелката 5 може да се



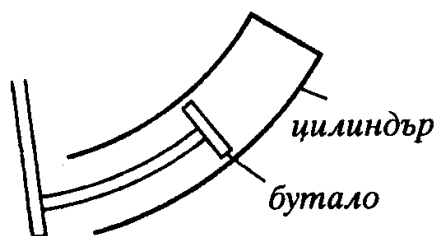
Фиг. 11.4. Подвижна част на измервателния механизъм



мени в известни граници спрямо скалата. Това позволява преди измерване стрелката да се установява срещу нулевото деление на скалата, което е задължително, за да се отчитат правилно показанията на апарата.

При завъртане на подвижната част, тежестта ѝ не трябва да създава допълнителни противодействащи моменти. Затова подвижната част трябва да се върти около ос, минаваща през центъра на тежестта ѝ - това се постига чрез противотежестите б.

При преминаване от едно равновесно положение в друго, подвижната част извършва движение, чийто характер зависи от моментите, които действат върху нея по време на движението ѝ - двигателен, противодействащ, инерционен и момент от триенето. Под действието на тези моменти подвижната част извършва затихващо колебателно движение. За да затихнат по-бързо получените колебания и подвижната част да заеме по-скоро равновесно положение, тя се снабдява с успокоително устройство. Най-широко разпространение са получили въздушните и магнитни успокоители (затихватели).



Фиг. 11.5. Въздушен успокоител

На фиг. 11.5 е показано принципното устройство на въздушен успокоител. В него бутало, свързано с оста, се движи в дълговиден цилиндър, при което среща съпротивлението на въздуха и колебателното движение на подвижната част затихва бързо.

• *Условни знаци върху скалите на измервателните апарати*

С условни знаци върху скалите се означават следните по-важни данни за апарата (табл. 11.1):

- единицата на измерваната величина, с която се означава и видът на апарата;

Таблица 11.1

Параметър	Обозначение	Вид, стойност
измервана величина	mA	ток, милиампери (mA)
измервателна система		магнетоелектрическа
вид на тока	-	постоянен (A)
клас на точност	0,5	0,5% м.о.с.
работно положение		хоризонтално
изпитвателно напрежение		2 kV

- вид (система) на измервателния механизъм;
- вид на тока;
- клас на точност;
- работно положение на апарата (при измерване);
- изпитвателно напрежение (на изолацията) и др.

• *Магнитоелектрически механизъм*

*Устройство и принцип на действие.* Принципното устройство на магнитоелектрическият измервателен механизъм е показано на фиг. 11.6а. Полусните накрайници от магнитно мек материал и цилиндърът между тях формират въздушната междина с достатъчно силно еднородно радиално поле. Подвижната бобина обхваща цилиндричната сърцевина и може свободно да се върти във въздушната междина. Бобината е направена от тънък меден или алуминиев проводник с лакова изолация, навит върху лека алуминиева рамка. Рамката изпълнява двойна роля: първо, служи за основа на бобината и, второ, представлява магнитен успокоител, вследствие взаимодействието между индуцираните в нея вихрови токове (при движението ѝ в магнитното поле) и потока на постоянния магнит.

При протичане на ток през бобината върху нея действа въртящ момент, образуван от двоица сили (фиг. 11.6б):

$$M_{\text{вър}} = F \cdot a = (B \cdot l \cdot I) \cdot a$$

Заедно с това при преместване на стрелката се появява противодействащ момент  $M_{\text{пр}} = K \cdot \alpha$ . След затихване на преходния процес се установява равенството

$$M_{\text{пр}} = M_{\text{вър}},$$

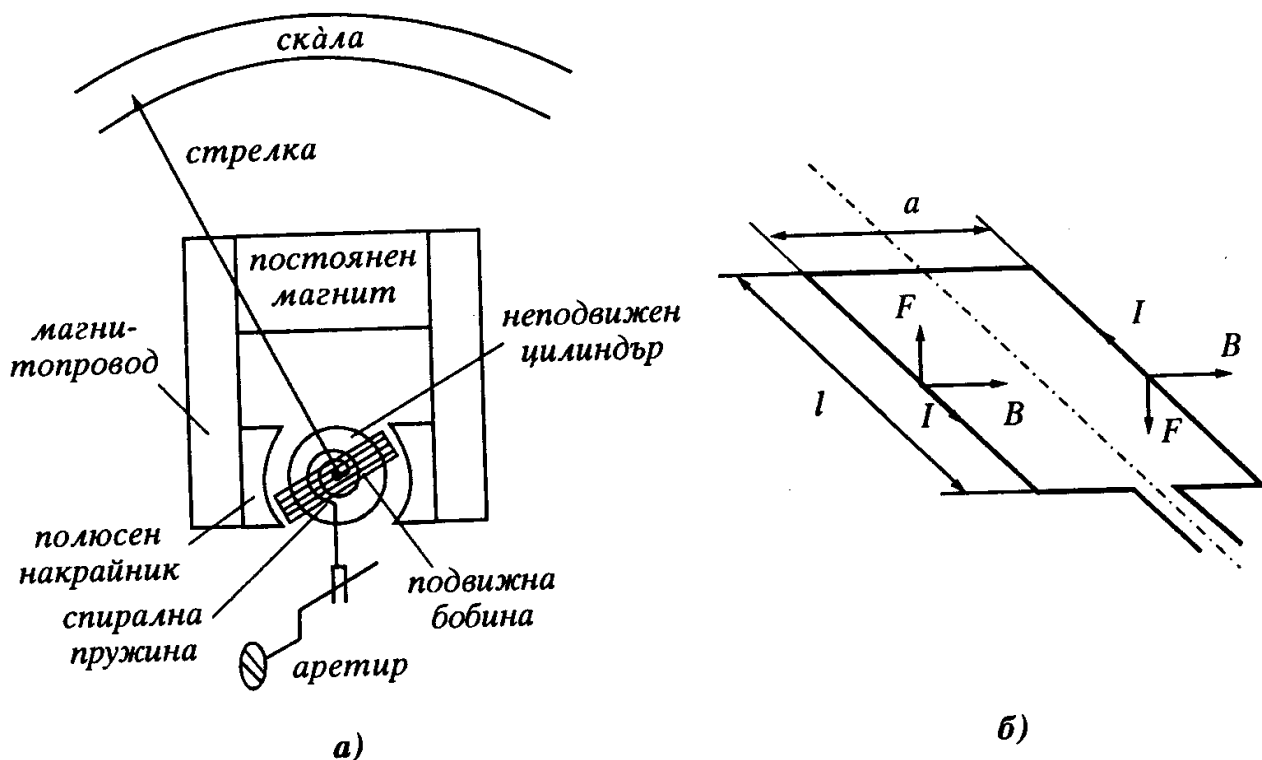
откъдето

$$(B \cdot l \cdot I) \cdot a = K \cdot \alpha,$$

$$\alpha = (B \cdot l \cdot a / K) \cdot I = S \cdot I,$$

като изразът в скобите представлява чувствителността на уреда  $S$  (sensitivity - англ.), ако не се използват допълнителни схеми за нейната промяна.

*Свойства и област на приложение.* Описаният по-горе магнитоелектрически механизъм може да се използва за направа на амперметри, волтметри и омметри. При последователно включване в електрическата верига той може да се използва само като милиамперметър, поради това, че конструкцията на подвижната му бобина е слаба и токът към нея се подава чрез спиралните пружинки. Следователно, максималната стойност на измервания ток се определя от допустимия за проводника на бобината и за спиралните пружинки ток (обикновено до 150 ÷ 200 mA).



Фиг. 11.6. Магнитоелектрически механизъм

Същият механизъм служи и като волтметър, ако последователно с бобината се включи резистор с подходящо съпротивление  $R_{доп}$  за ограничаване на тока, протичащ през апарата. В този случай токът  $I$  през бобината ще бъде пропорционален на приложеното към апарата напрежение  $U$ , при което скалата се градуира направо в единици за напрежение (mV или V).

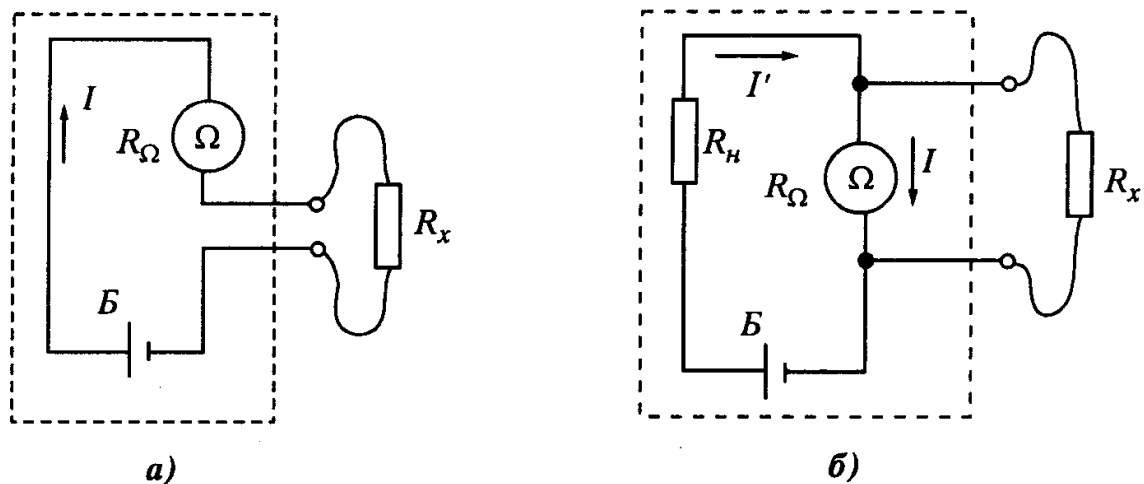
Тъй като  $B = const$ , ъгълът на отклонение на подвижната част е пропорционален на тока през бобината, което осигурява равномерност и еднаква чувствителност по цялата скала на апарата. Апаратите са с много висок клас на точност (до 0,1), имат малка собствена консумация и незначително влияние на показанията от външни магнитни полета.

Ако се смени посоката на тока, ще се смени и посоката на двигателния момент  $M_{вър}$  и в резултат на това подвижната част на апарата ще се отклони в обратна посока, от което следва, че тези механизми могат да се използват директно за измерване само в постояннотокови вериги. Такъв апарат се нарича **поляризиран** и обикновено изводите му се обозначават с „+“ и „-“.

При включване за измерване в променливотокова верига подвижната част няма да се отклони, тъй като средната стойност на променливия синусоиден ток за един период е нула. За да може магнитоелектрическият

механизъм да се използва и във вериги за променлив ток, апаратът се снабдява с преобразувател на променливия ток в постоянен (обикновено едно- или двуполупериоден полупроводников изправител).

При постоянно напрежение на източника стойността на тока в подвижната бобина на измервателния механизъм ще зависи от съпротивлението на веригата му. Това дава възможност скалата на апарата да се градуира направо в олове и апаратът да се използва като омметър. При това са възможни две схеми на свързване на измерваното съпротивление спрямо измервателния механизъм: последователна - когато измерваното съпротивление  $R_x$  се включва последователно с бобината на апарата (фиг. 11.7а), и успоредна - когато измерваното съпротивление  $R_x$  се свързва успоредно към измервателния механизъм (фиг. 11.7б). Съпротивлението  $R_H$  служи за ограничаване на тока във веригата на апарата.



Фиг. 11.7. Схеми на омметър: а) последователна; б) успоредна

При омметър с последователна схема токът в бобината на апарата е

$$I = \frac{U}{R_x + R_\Omega} \approx \frac{U}{R_x},$$

тъй като съпротивлението  $R_\Omega$  на самия апарат (съпротивлението на бобината на измервателния механизъм) е незначително по отношение на измерваното съпротивление  $R_x$ . Поради това тази схема се предпочита при измерване на големи съпротивления (над 1 000  $\Omega$ ).

При  $R_x = 0$  стрелката на апарата ще се отклонява максимално, а при  $R_x = \infty$  (прекъсната верига) отклонението ѝ ще е равно на нула. Затова в

десния край на скалата на разглеждания омметър е поставен нулев белег (0).

При омметър с успоредна схема токът в бобината на апарата се определя, съответно:

$$I = I' \frac{R_x}{R_x + R_\Omega} = \frac{U}{\frac{R_x R_\Omega}{R_x + R_\Omega} + R_H} \cdot \frac{R_x}{R_x + R_\Omega} = \frac{U R_x}{R_x R_\Omega + R_H (R_x + R_\Omega)}$$

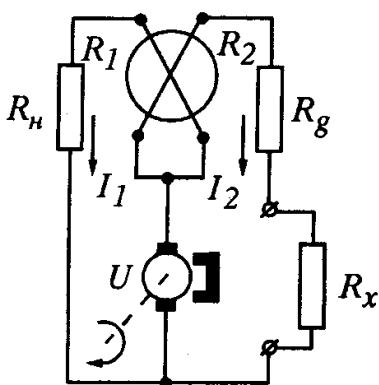
Ако  $R_x \ll R_\Omega$  и  $R_x \ll R_H$ , то

$$I \approx U \frac{R_x}{R_H R_\Omega},$$

от което следва, че при  $R_x = 0$  отклонението на стрелката ще е нулево, а при  $R_x = \infty$  - максимално. Омметрите, изпълнени по успоредната схема, трябва да се използват при измерване на сравнително малки съпротивления (под 1 000  $\Omega$ ).

Явно е, че и при двата вида омметри скалите са неравномерни. Недостатък на тези уреди е зависимостта на показанията им от стойността на напрежението на захранващия източник. Разгледаните омметри се снабдяват със собствен захранващ източник, най-често сух елемент (батерия). С оглед отстраняване на влиянието на евентуални изменения на захранващото напрежение върху показанията на омметрите, те се снабдяват с магнитен шунт, посредством който преди всяко измерване е желателно да се провери (коригира) нулевото показание на омметъра. Клас на точност - до  $1,5 \div 2,5$ .

За измерване на големи съпротивления (от порядъка на  $M_\Omega$ ) посочените омметри не са подходящи, поради незначителната стойност на проти-



Фиг. 11.8. Схема на измервателна верига на мегаомметър

чащия в този случай ток (ограничен от ниското напрежение на захранващия източник (батерия). За тази цел се използват мегаомметри, които представляват магнитоелектрически логомери, чийто ъгъл на преместване на подвижната част не зависи от стойността на захранващото напрежение, а се определя единствено от отношението на токовете през бобините и е функция на измерваното съпротивление (фиг. 11.8). За захранващ източник се използва генератор с ръчно задвижване (индуктор), вграден в кутията на апарата и произвеждащ напрежение

от 500 до 2 500 V.

В дадената схема

$$I_1 = \frac{U}{R_1 + R_n}, \quad I_2 = \frac{U}{R_2 + R_g + R_x},$$

а отклонението на стрелката

$$\alpha = f\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = f\left(\frac{R_2 + R_g + R_x}{R_1 + R_n}\right).$$

При

$$R_1, R_2, R_n, R_g = const,$$

$$\alpha = f(R_x).$$

#### • *Електромагнитен механизъм*

*Устройство и принцип на действие.* Апаратите с такъв механизъм са сред най-предпочитаните, когато изискванията за точност не са големи и когато стойността и здравината на апарата е определящ фактор.

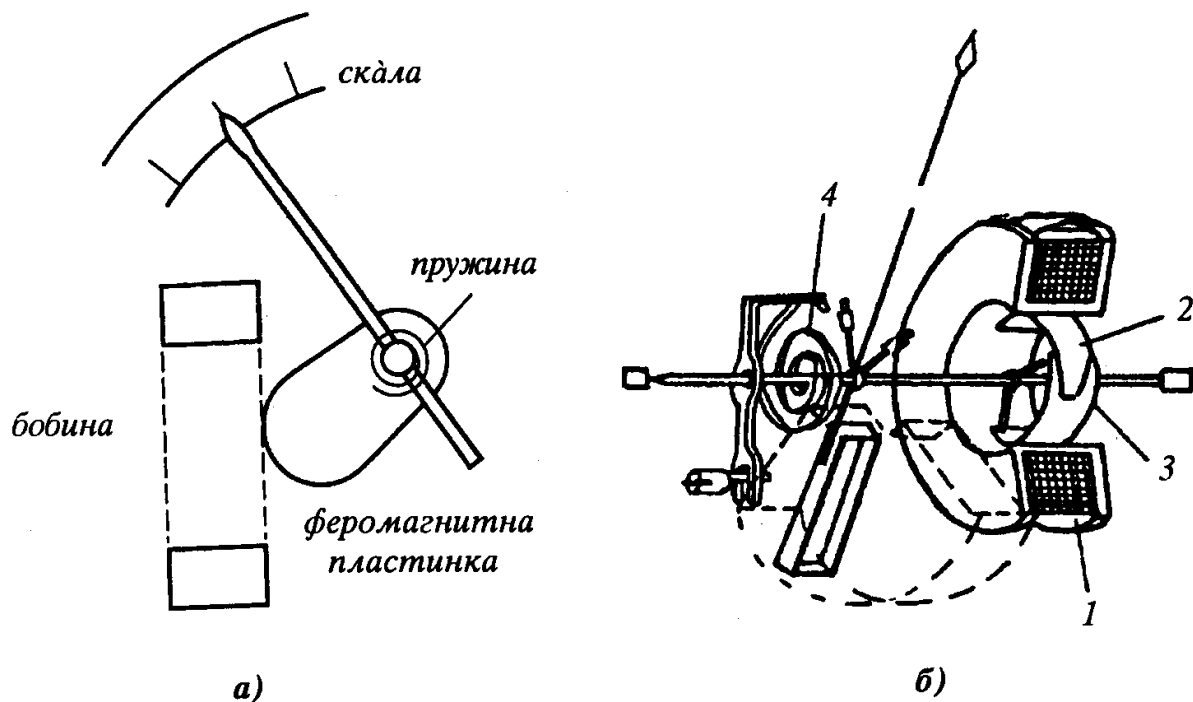
Принципът на действието им се основава на взаимодействието между магнитно поле, което се възбужда от измервания ток, и ядро от магнитно мек материал, представляващо подвижната част на апарата.

В конструктивно отношение механизмите от този вид са два типа - с плоска (фиг. 11.9а) и с кръгла (фиг. 11.9б) бобина:

а) Измерваният ток преминава през бобината, която има плоска форма с тесен отвор. Ядрото от магнитно мек материал е закрепено ексцентрично на оста и може да прониква в отвора на бобината, като с това завърта оста на апарата. При протичане на ток през бобината, магнитното поле, създадено от него, привлича феромагнитната пластинка, при което се създава въртящ момент. Спиралната пружинка създава противодействащ момент.

б) Във вътрешността на кръгла бобината 1 са разположени две ядра от магнитно мек материал. Едното от тях (2) е закрепено неподвижно за вътрешното цилиндрично тяло на бобината, а другото (3) е закрепено ексцентрично към оста на апарата. Когато през бобината протича ток, двете ядра се намагнитват едноименно и се отблъскват едно от друго, при което подвижното ядро завърта оста на апарата.

Магнитната енергия на системата, съставена от неподвижната бобина и подвижното феромагнитно тяло, в общия случай, е  $W = (1/2)L.I^2$ , където  $I$  е постоянен ток или ефективната стойност на променлив ток, а  $L$  -



Фиг. 11.9. Електромагнитен измервателен механизъм: а) с плоска бобина; б) с кръгла бобина

коэффициентът на самоиндукция, който в случая зависи от положението на подвижната част, т.е.  $L = f(\alpha)$ . Следователно, въртящият момент на ИМ може да се определи като

$$M_{\text{вър}} = \frac{dW}{d\alpha} = \frac{d}{d\alpha} \left( \frac{1}{2} LI^2 \right) = \frac{1}{2} \frac{dL}{d\alpha} \cdot I^2$$

При равенство на въртящия и противодействащия моменти,  $M_{\text{пр}} = M_{\text{вър}}$  :

$$\frac{1}{2} \frac{dL}{d\alpha} I^2 = K \cdot \alpha$$

откъдето 
$$\alpha = \left( \frac{1}{2K} \frac{dL}{d\alpha} \right) \cdot I^2 = S \cdot I^2$$

Следователно, отклонението на стрелката при тези уреди е пропорционално на квадрата на тока, а скалата на уреда ще бъде неравномерна.

*Свойства и област на приложение.* Тъй като ъгълът на завъртане на подвижната част на измервателния механизъм зависи от квадрата на тока, апаратите от този тип се изработват като амперметри и волтметри както за постоянен, така и за променлив ток. Във втория случай двигателният момент на апарата е пропорционален на ефективната стойност на измер-

ваната величина.

Техни *предимства* са: проста конструкция, вследствие което са сравнително евтини; издръжливост на претоварване (измерваният ток протича през неподвижна бобина, а тя може да бъде навита от проводник с по-голямо сечение).

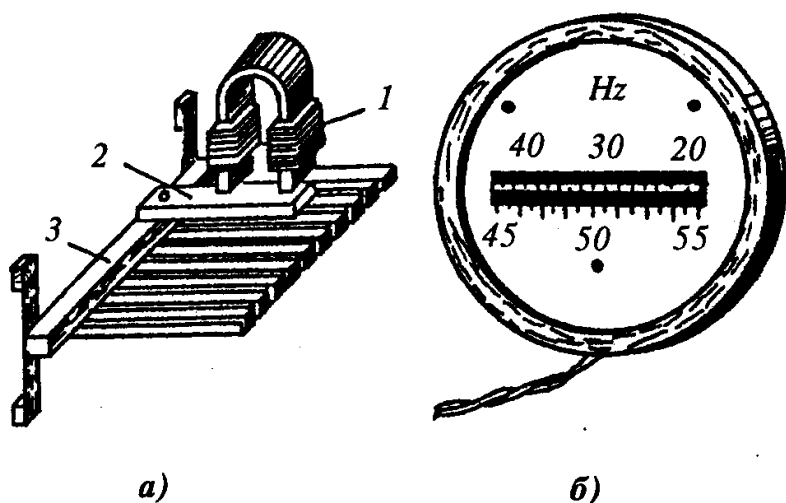
*Недостатъци*: сравнително неголяма точност (среден клас на точност 1,5), с изключение на онези апарати, чието ядро е направено от пермалой (клас на точност до 0,2); сравнително малко специфично съпротивление за волтметрите (от 20 до 40  $\Omega$ ); влияние на външни магнитни полета (собственото им магнитно поле е сравнително слабо, тъй като в много от тях то се затваря през въздуха) - това влияние може напълно да се отстрани посредством екраниране на измервателния механизъм или други методи.

Електромагнитните механизми не се използват за изработване на амперметри и волтметри за измерване на малки по стойност токове и напрежения, тъй като в тези случаи собствената им консумация и влиянието на външни магнитни полета са относително големи.

Към електромагнитните механизми се отнасят и тези от вибрационната система. В тях подвижната част може да следи колебанията на тока в бобината, например т.нар. вибрационни честотомери.

На фиг. 11.10 е показано устройството на вибрационен честотомер:

Съставни части на измервателния механизъм са електромагнитът 1, неговата котва 2, закрепена към метална конзола 3. Към нея са прикрепени определен брой пружиниращи стоманени пластинки. Пластинките са подбрани така, че да имат различни, но постоянно увеличаващи се периоди на собствени трептения. Променливият ток, чиято честота ще се измерва, се



Фиг. 11.10. Вибрационен честотомер (а) и неговата скала в кръгло изпълнение за монтаж на табло (б)

пропуска през бобината на електромагнита. За време, съответстващо на един период на променливия ток, електромагнитът привлича два пъти своята котва. Предизвиканите по такъв начин трептения се предават посредством конзолата на пружиниращите пластинки, като най-силно ще вибрира тази от тях, която е изпаднала в резонанс, а това ще бъде пластинката, която има два пъ-

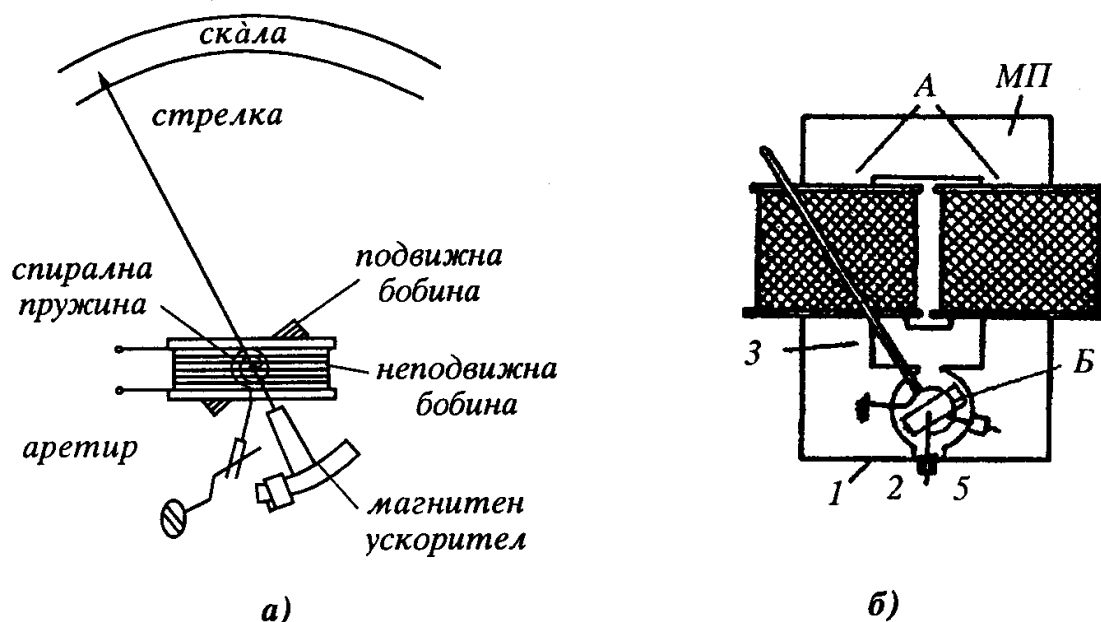


ти по-малък период на собствени трептения от периода на променливия ток.

Вибрационните честотомери се включват в мрежите за променлив ток подобно на волтметрите. Те се изработват за измервателен обхват от 10 до 1 500 Hz. Грешките при тях зависят от настройката на трептящите пластини и обикновено не надвишават 1 %.

### • Електродинамичен механизъм

*Устройство и принцип на действие.* В магнитоелектрическите ИМ магнитното поле се създава от постоянен магнит и има постоянна стойност. За разлика от тях в електродинамичния ИМ това поле се създава от неподвижна бобина без или с желязна сърцевина. Във втория случай ИМ се нарича *феродинамичен* (фиг. 11.11). При това условие в разглежданата конс-



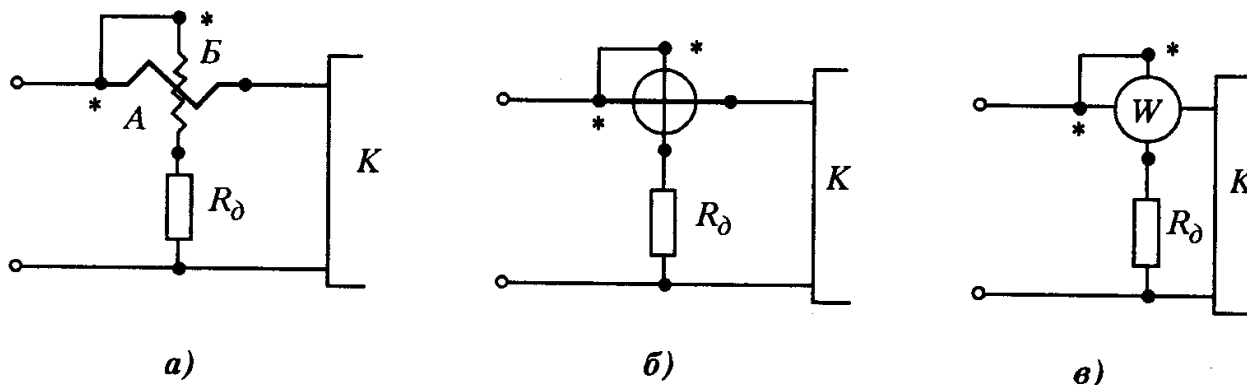
Фиг. 11.11. Електродинамичен (а) и феродинамичен (б) измервателен механизъм

струкция отклонението на стрелката е пропорционално не само на тока в подвижната бобина, но и на тока в неподвижната, който създава магнитната индукция:

$$\alpha = (l.a / K) B.I = (l.a / K) K_B I_2 . I_1 = S . I_2 . I_1 \quad .$$

Електродинамичният ИМ може да се използва за волтметри и амперметри, например при последователно свързване на двете бобини, при което показанията на уреда ще са пропорционални на квадрата на тока, протичащ през тях. Но най-разпространените апарати от електродинамичната

система са *ватметрите*. При тях двете бобини образуват самостоятелни вериги (фиг. 11.12). Неподвижната бобина *A* се изработва от сравнително дебел проводник и се включва последователно в мрежата. Затова се нарича *токова бобина*. Подвижната бобина *B* се изработва от тънък проводник, свързва се успоредно към мрежата (обикновено чрез допълнителен резистор) и се нарича *напрежителна бобина*.



Фиг. 11.12: а) схема на ватметър; б), в) - условно обозначение

Електродинамичните апарати имат следните *по-важни качества*: пригодност за работа във вериги за постоянен и променлив ток, равномерна ска̀ла (при ватметрите), висок клас на точност - за амперметрите и волтметрите - до 0,1; за ватметрите - до 0,2 (те са най-прецизните апарати за променлив ток).

*Недостатъци*: неравномерна ска̀ла (за амперметрите и волтметрите) - с изключение на първите 25-30 % от ска̀лата, останалата ѝ част може да се направи почти равномерна; не издържат на претоварване, имат значителна собствена консумация. Уредите от този вид са сравнително скъпи.

Отклонението на подвижната част на ватметъра както за постоянен, така и за променлив ток, е пропорционално на мощността на веригата.

Ако се смени посоката на тока само в една от веригите на ватметъра, ще се смени и посоката на въртящия момент, вследствие на което стрелката ще се отклонява наляво от нулевото деление на ска̀лата. За правилното отклонение на стрелката изводът на всяка бобина, който трябва да се свърже към страната на източника, се отбелязва със специален знак, например (\*), (+), (/) и т.н. Тези краища (изводи) се наричат *генераторни*. На изводите или на ска̀лата на ватметъра се означават номиналното напрежение на напрежителната верига и номиналният ток на токовата верига, които не трябва да се превишават дори и тогава, когато стрелката не се е отклонила до края на ска̀лата. Ватметрите се конструират така, че при номинален ток и номинално напрежение (за променлив ток и при определена стойност на

$\cos \varphi_H$ , най-често при  $\cos \varphi_H = 1$ ) стрелката да се отклони на крайното скално деление  $\alpha_m$ . Затова константата на ватметъра се определя като

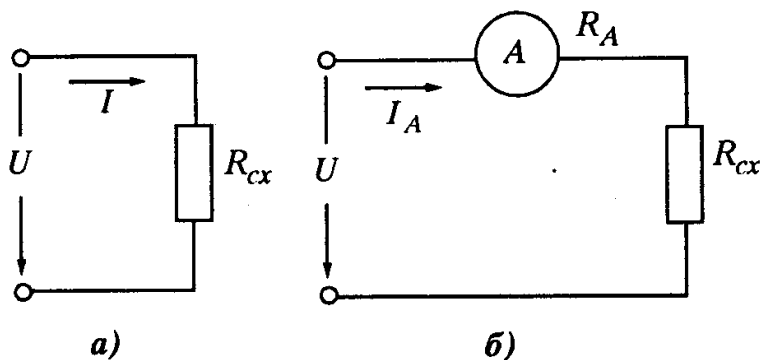
$$C_w = \frac{U_H I_H (\cos \varphi_H)}{\alpha_m} .$$

### 11.3. Измерване на електрически величини с електромеханични измервателни уреди

#### 11.3.1. Измерване на ток

За да се измери токът на даден елемент на електрическата верига, последователно на него се включва амперметър. При включването на измервателния апарат във веригата нейният режим се изменя. Грешката на метода, например при измерване на постоянен ток с амперметър, може да се оцени, ако са известни съпротивлението на схемата  $R_{cx}$  и вътрешното съпротивление на амперметъра  $R_A$ . Ако до включването на амперметъра в схемата (фиг. 11.13а) токът във веригата е  $I = U / R_{cx}$ , след включването на апарата токът, измерен от амперметъра (фиг. 11.13б), ще бъде  $I_A = U / (R_{cx} + R_A)$ , а относителната грешка

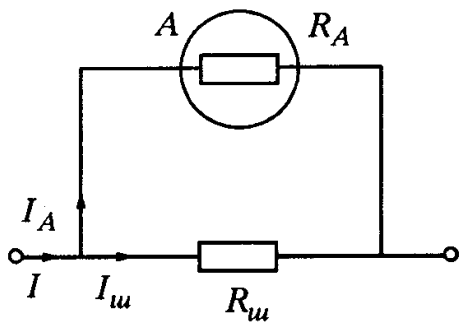
$$\xi_I = \frac{\Delta I}{I} = \frac{I_A - I}{I} = \frac{\frac{U}{R_{cx} + R_A} - \frac{U}{R_{cx}}}{\frac{U}{R_{cx}}} = -\frac{R_A}{R_{cx} - R_A} = -\frac{1}{1 - \frac{R_{cx}}{R_A}} ,$$



Фиг. 11.13. Схема на измерването на ток с амперметър

откъдето следва, че колкото по-малко е вътрешното съпротивление на амперметъра  $R_A$  в сравнение със съпротивлението на схемата  $R_{cx}$ , толкова по-малка ще е и грешката от измерването.

Във веригите за постоянен ток се използват магнитоелектрически и електромагнитни амперметри, а във веригите за променлив ток - електромагнитни и електродинамични амперметри.



Фиг. 11.14. Разширяване на обхвата на амперметър

Разширяване на обхвата на амперметър. При измерване на токове, чиято стойност е по-голяма от обхвата на уреда, се прибегва до т.нар. *разширяване на обхвата*. Обхватът на *магнитоелектрическите амперметри* се разширява чрез включване, успоредно на уреда, на резистор с точно определено, много малко съпротивление, наречено *шунт* (фиг. 11.14).

При такова свързване през уреда преминава ток, съответстващ на неговия обхват, а през шунта - останалата част от измервания ток. Когато обхватът на амперметъра трябва да се разшири  $n$  пъти (т.е. да се получи съотношение  $I / I_A = n$ , където  $n$  е цяло число), съпротивлението на шунта  $R_{ш}$  може да се определи по следния начин: От формулата за делител на ток следва, че

$$I_A = I \cdot R_{ш} / (R_A + R_{ш}) ,$$

откъдето  $I / I_A = n = (R_A + R_{ш}) / R_{ш} = (R_A / R_{ш}) + 1$ ,  
следователно

$$R_{ш} = R_A / (n - 1) .$$

Шунтовете се изработват от манганин и при по-малки токове се монтират в кутията на уреда (във вид на спирали или бобини), а при по-големи токове - извън нея.

Обхватите на амперметрите с електромагнитен и електродинамичен механизъм се разширяват като бобините им се секционират.

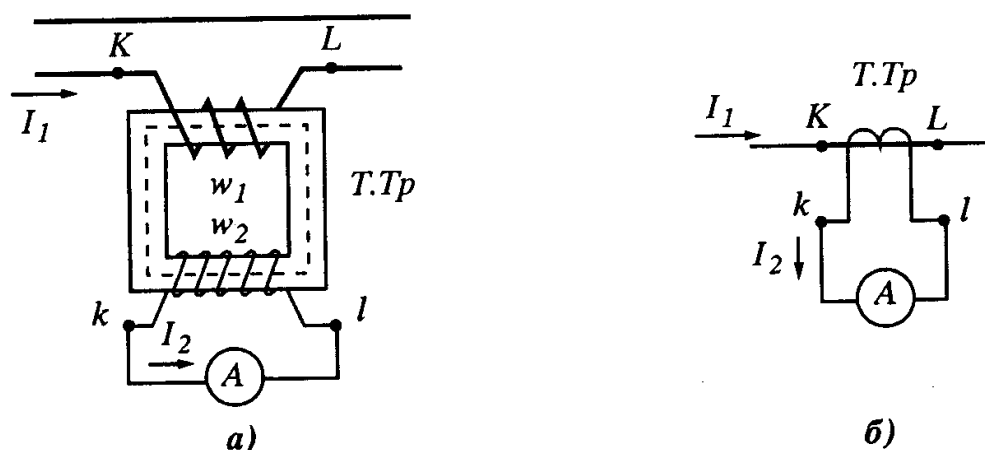
При променлив ток обхватът на амперметрите може да се разшири с токов трансформатор (*Т.Тр.*), като първичната му намотка  $w_1$  (изводни краища  $K-L$ ) се включи последователно във веригата, чийто ток се измерва (по същия начин, както и амперметрите), а към вторичната  $w_2$  (изводни краища  $k-l$ ) се свърже амперметърът (фиг. 11.15).

Амперметърът измерва вторичния ток на трансформатора  $I_2$ , а токът в линията  $I_1$  се определя по формулата

$$I_1 = K_{I_n} I_2 ,$$

където  $K_{I_n} = \frac{I_{1н}}{I_2}$  ( $I_{1н}$  - обхват на *Т.Тр.*) е коефициентът на трансформация на токовия трансформатор. Токовите трансформатори дават възмож-

ност за измерване на токове при високи напрежения, поради галваничното отделяне на измерваната верига от измервателния апарат (амперметъра).



Фиг. 11.15. Включване на токов трансформатор (а) и обозначаването му (б)

Тъй като за удобство в практиката е прието токовете вериги на измервателните апарати и на релетата да са оразмерени за номинален ток 5 А, то съгласно стандартите номиналният вторичен ток на токовия трансформатор се избира  $I_2 = 5\text{ А}$ , при което

$$K_{I_n} = \frac{I_{1n}}{5} .$$

### 11.3.2. Измерване на напрежение

За измерване на напрежението на който и да е участък от веригата, успоредно на участъка се включва волтметър, т.е. волтметърът се свързва непосредствено към точките, между които ще се измерва напрежението.

При измерване на напрежение с волтметър се изменя режимът на работа на веригата и възниква грешка, която всъщност се дължи на метода на измерване. Напрежението върху участъка със съпротивление  $R$  на фиг. 11.16 е

$$U_R = RI ,$$

където

$$I = E / (R_1 + R) .$$

При включване на волтметър с вътрешно съпротивление  $R_V$ , то ще се промени и ще бъде

$$U'_R = R'I' ,$$

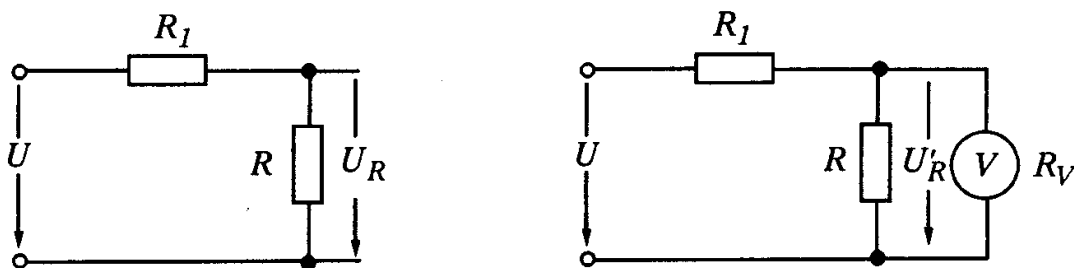
където 
$$I' = E / (R_I + R') ; \quad R' = \frac{RR_V}{R + R_V} = R / (1 + R / R_V) .$$

Следователно, колкото по-голямо е вътрешното съпротивление на волтметъра  $R_V$ , толкова по-близо ще бъде  $R'$  до  $R$  и  $V_R'$  до  $V_R$  и толкова по-малка ще е и грешката от измерването, внесена от уреда.

Точната стойност на относителната грешка, която се дължи на включването на волтметъра, се получава след заместване на  $U_R$  и  $U_R'$  във формулата

$$\frac{\Delta U_R}{U_R} = \frac{U_R - U_R'}{U_R} = \frac{-I}{1 + R_V / R_{Th}} ,$$

където 
$$R_{Th} = \frac{R_I R}{R_I + R} .$$



Фиг. 11.16. Измерване на напрежение с волтметър

По тази причина волтметрите са апарати с много голямо вътрешно съпротивление (идеалният волтметър има безкрайно голямо съпротивление).

За измерване на напрежение във веригите за постоянен ток се използват магнитоелектрически волтметри, а във веригите за променлив ток - предимно електромагнитни волтметри (за по-точни измервания - електродинамични волтметри).

*Разширяване на обхвата на волтметъра.* При измерване на напрежения, чиято стойност е по-голяма от обхвата на уреда, се прибегва до разширяване на обхвата, като последователно на волтметъра се свързва резистор с определено съпротивление,  $R_{\partial on}$ . Стойността на  $R_{\partial on}$  се избира така, че да осигури номинален ток в измервателния механизъм и, съответно, номинално напрежение на изводите на уреда в новия обхват по напрежение (фиг. 11.17a). От формулата за делител на напрежението следва

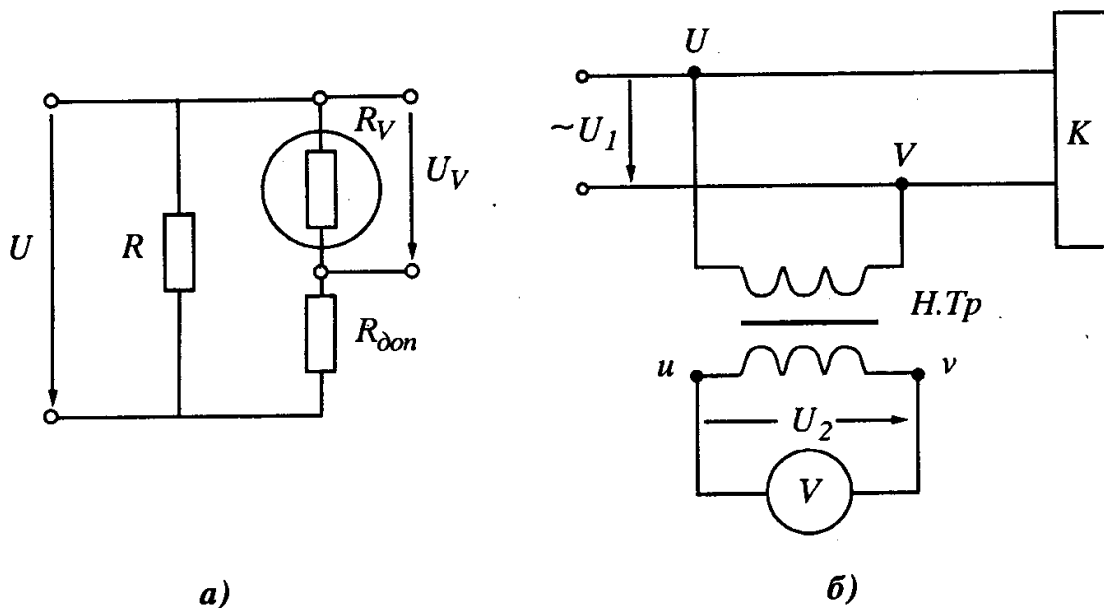
$$U_V = U \cdot R_V / (R_V + R_{\partial on}) ,$$

откъдето при  $n$ -кратно разширяване на обхвата, т.е.  $U / U_V = n$ , се получава

$$R_{\partial on} = R_V (n - 1) .$$

Допълнителният резистор се монтира обикновено в кутията на уреда и се изготвя от тънък изолиран манганинов проводник, който се навива на кръгли бобинки (или върху изоляционни плочки), като при преносимите волтметри бобинките се секционират и от отделните секции се извеждат изводи. Това дава възможност измервателният апарат да се използва за напрежения до 600-700 V.

При по-големи напрежения се използват напрежителни трансформатори, които освен разширяването на обхвата осигуряват и галванично разделяне на измерваната високоволтова верига от измервателната верига (волтметъра) - фиг. 11.17б.



Фиг. 11.17: а) разширяване на обхвата на волтметър; б) включване на волтметър чрез напрежителен трансформатор

Първичната намотка на напрежителния трансформатор (*Н.Тр*)  $w_1$  (изводни краища  $U-V$ ) се свързва към точките, между които трябва да се измери напрежението, по същия начин, както се свързват и волтметрите, а към вторичната намотка  $w_2$  (изводни краища  $u-v$ ) се включва волтметърът (фиг. 11.17).

Волтметърът измерва напрежението  $U_2$  на вторичната намотка на напрежителния трансформатор, а търсеното напрежение  $U_1$  се определя по формулата

$$U_1 = K_{U_n} U_2 \quad ,$$

където

$$K_{U_n} = \frac{U_{1n}}{U_2} \quad (U_{1n} - \text{обхват на } H.Tr).$$

За удобство, в практиката е прието напрежителните вериги на измервателните апарати и на релетата да се оразмеряват за номинално напрежение  $100\text{ V}$ . Затова съгласно стандартите номиналното вторично напрежение на напрежителния трансформатор се избира  $U = 100\text{ V}$ , т.е.

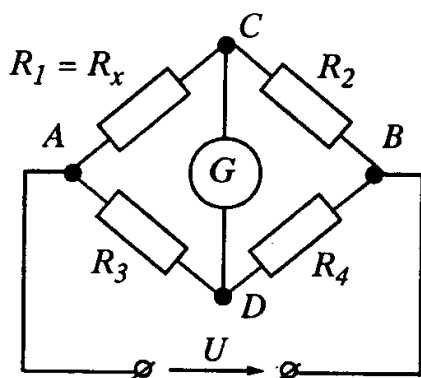
$$K_{U_n} = \frac{U_{1n}}{100}$$

### 11.3.3. Измерване на съпротивления

*Измерване на съпротивления при постоянен ток.* Неизвестното съпротивление  $R_x$  може да се измери с омметър или с мегаомметър (за големи съпротивления) (вж. т. 11.2.2. *Магнитоелектрически механизъм*), а така също да се определи и чрез волтметър и амперметър, измерващи, съответно, напрежението  $U$  върху  $R_x$  и токът  $I$ , протичащ през него (косвен метод), като  $R_x = \frac{U_V}{I_A}$ , където  $U_V$  и  $I_A$  са показанията, съответно, на волтметъра и амперметъра.

Значително по-голяма точност на измерването се постига чрез използване на мостови методи за измерване на съпротивления.

На фиг. 11.18 е показана принципната схема на обикновен четирираменен мост на Уитстон.



Фиг. 11.18. Уитстонов мост

Мостът на Уитстон е уравновесен мост, т.е. за стойността на неизвестното съпротивление  $R_x$  се съди по нулевото показание на чувствителния елемент  $G$  (галванометър - апарат за измерване на много малки по стойност токове, обикновено от магнитоелектрически тип, с голяма чувствителност), включен в диагонала  $CD$  на моста.

Нулевото показание се постига при изпълнение на следното условие за равновесие на моста:

$$R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3$$

Неизвестното  $R_x$  се включва в едното рамо на моста (на мястото на  $R_1$ ), при което следва, че

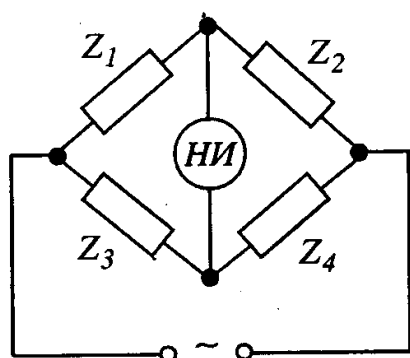
$$R_x = R_2 \frac{R_3}{R_4}$$



Съпротивлението  $R_2$  се изпълнява като регулируем резистор, съставен от няколко декади, свързани последователно, така че на  $R_2$  да се задават различни стойности, обикновено през  $1 \Omega$  в обхвата от  $1 \Omega$  до  $1000 \Omega$ , а на отношението  $R_3 / R_4$  чрез централен превключвател могат да се придават следните десетократни стойности: 1000, 100, 10, 1, 0,1, 0,01 и 0,001.

Уитстоновите мостове за технически измервания обикновено са с вградени галванометър и източник, особено когато са преносими. Те не са пригодени за измерване на съпротивления, по-малки от  $0,1 \Omega$ , тъй като при тях съпротивленията на съединителните проводници и контакти се наслагват към измерваното съпротивление. В този случай се прилагат други по-сложни мостове (например двоен мост на Томпсон).

*Измерване на съпротивления при променлив ток.* За измерване на капацитети и индуктивности се използват предимно мостове за променлив ток (фиг. 11.19).



Фиг. 11.19. Принципна схема на мост за променлив ток

Условието за равновесие на моста е подобно на това при моста на Уитстон. В случая

$$Z_1 \cdot Z_4 = Z_2 \cdot Z_3 ,$$

откъдето

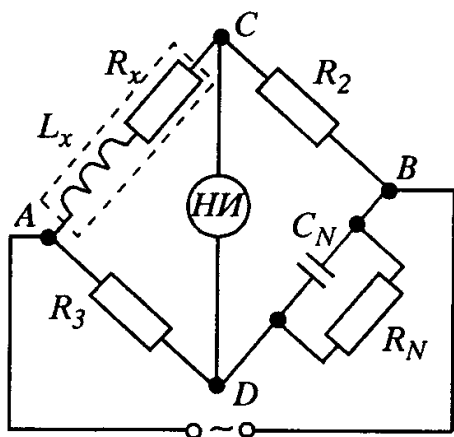
$$z_1 \cdot z_4 = z_2 \cdot z_3 ,$$

$$\varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3 .$$

Последното условие  $\varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3$  показва при какво разположение на съпротивленията, в зависимост от характера им, може да се уравни мостът. Например, ако в две съседни рамена са включени чисто активни съпротивления ( $R_3$  и  $R_4$ , т.е.  $\varphi_3 = \varphi_4 = 0$ ), в срещуположните рамена трябва да се включат или индуктивни, или капацитивни съпротивления ( $\varphi_1 = \varphi_2$ ).

Ако активните съпротивления са включени в срещуположните рамена на моста, в едно от другите две рамена трябва да се включи индуктивно съпротивление, а в останалото - капацитивно.

В генераторния диагонал на моста се включва източник на променливо напрежение (обикновено със звукова честота), а в индикаторния диагонал - нулев индикатор (вибрационен галванометър, звукови слушалки и др.).



Фиг. 11.20. Мост на Максвел-Вин

Пример на мост за променлив ток е сравнително по-разпространеният мост на Максвел-Вин за измерване на индуктивности (фиг. 11.20). В този случай от условието за равновесие следва

$$R_x = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_N} ,$$

$$L_x = C_N \cdot R_2 \cdot R_3 .$$

#### 11.3.4. Измерване на мощност

Измерване на еднофазна мощност се извършва по схемата на фиг. 11.12. Обхватът на уреда по напрежение и ток трябва да съответства на напрежението и тока в консуматора, чиято мощност се измерва. При необходимост обхватът по напрежение се разширява с допълнително съпротивление както при волтметрите, а за разширяване на обхвата по ток се използва токов трансформатор.

Измерване на активна мощност в трифазни вериги. В трифазна четирипроводникова система (свързване Y-Y с нулев - неутрален, проводник) при несиметрично натоварване мощността на трифазния консуматор се измерва с помощта на три ватметъра, включени към всяка една от фазите; общата мощност е сумата от трите измерени мощности. При равномерен (симетричен) товар активната мощност на симетричната трифазна верига е равна на активната мощност на една от фазите, умножена по три:

$$P = 3U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi ,$$

откъдето следва, че активната мощност на трифазната верига може да се измери с един ватметър, свързан към една от фазите (фиг. 11.21), т.е.

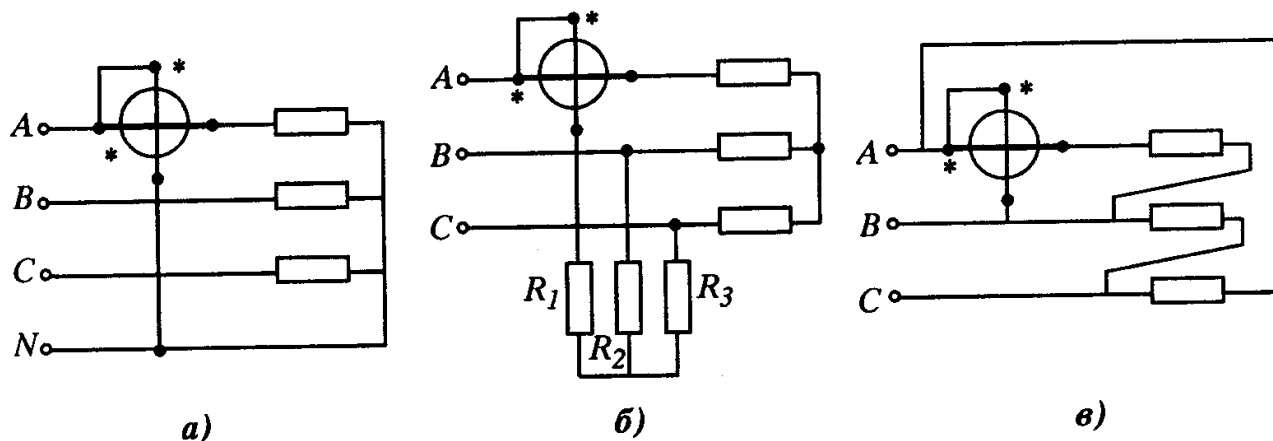
$$P = 3C_w \alpha .$$

За случая от фиг. 11.21б се създава изкуствена нулева точка чрез три резистора, при което трябва да е изпълнено условието

$$R_w + R_1 = R_2 = R_3 .$$

При трипроводна верига, без значение дали консуматорът е свързан в звезда или триъгълник, се прилага методът на двата ватметъра (схема на Аарон).

Моментната стойност на мощността на трифазната верига, ако консу-



Фиг. 11.21. Измерване на активна мощност в симетрична трифазна верига: а) звезда с нулев проводник; б) триъгълник; в) с достъп само до линейните проводници

моторът е свързан в звезда, се определя от израза

$$P = u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C .$$

При трипроводна трифазна верига винаги е изпълнено равенството

$$i_A + i_B + i_C = 0$$

или

$$i_B = -i_A - i_C .$$

След заместване на тока  $i_B$  във формулата за моментната мощност се получава

$$P = u_A i_A - u_B i_B + u_C i_C - u_B i_C = (u_A - u_B) i_A + (u_C - u_B) i_C = u_{AB} i_A + u_{CB} i_C .$$

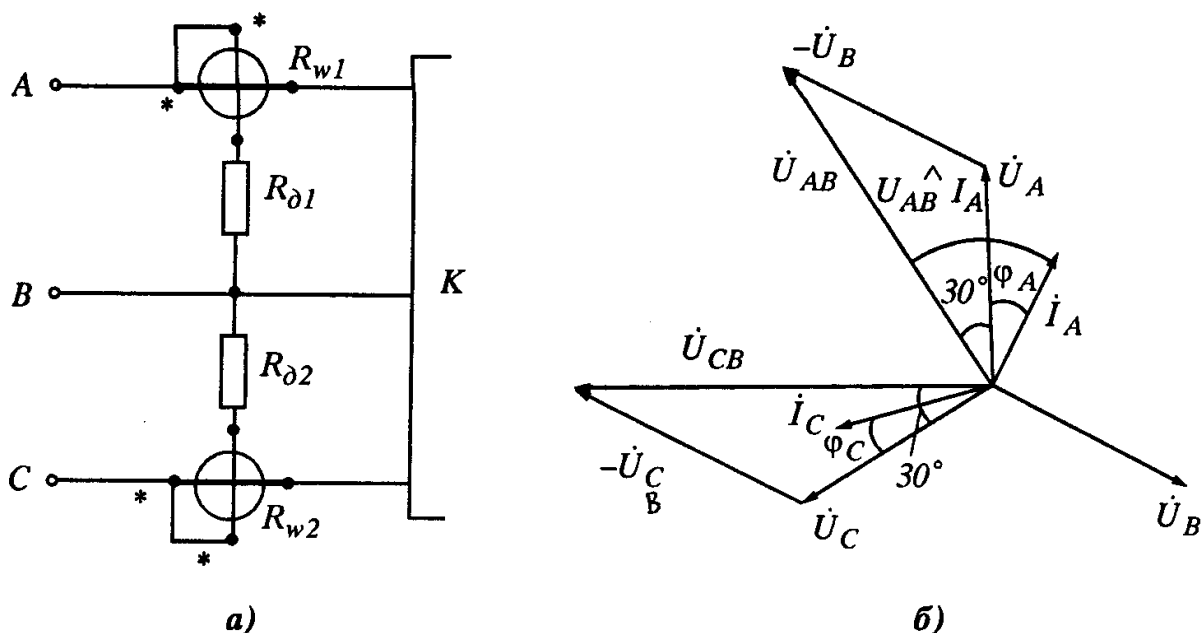
Тъй като активната мощност представлява средната стойност на моментната мощност за един период, то

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T u_{AB} i_A dt + \frac{1}{T} \int_0^T u_{CB} i_C dt .$$

След интегриране формулата добива вида

$$P = U_{AB} I_A \cos(\dot{U}_{AB} \hat{I}_A) + U_{CB} I_C \cos(\dot{U}_{CB} \hat{I}_C) .$$

Ако двата ватметъра се свържат така, както е показано на фиг. 11.22, показанията на първия ватметър ще определят члена  $U_{AB} I_A \cos(\dot{U}_{AB} \hat{I}_A)$ , а показанията на втория - члена  $U_{CB} I_C \cos(\dot{U}_{CB} \hat{I}_C)$ . Това се дължи на факта, че ъгълът на завъртане на подвижната част на ватметъра е пропорционален на произведението от приложеното към напрехителната му верига



Фиг. 11.22. Схема на Аарон: а) свързване на ватметрите; б) векторна диаграма при индуктивен товар

напрежение, тока, протичащ в токовата му верига, и косинуса от фазовата разлика между напрежението и тока.

Активната мощност на трифазната верига ще се определи от сумата на показанията на двата ватметъра:

$$P = C_{w1}\alpha_1 + C_{w2}\alpha_2 \quad .$$

От векторната диаграма (фиг. 11.22б) се вижда, че при силно индуктивен характер на товара (при  $\varphi_A > 60^\circ$ ) първият ватметър ще даде обратно отклонение, а при силно капацитивен (при  $\varphi_C > |-60^\circ|$ ), обратно - отклонение ще има вторият ватметър. За да може да се отчете обратното отклонение на съответния ватметър, е необходимо в схемата на свързване да се разменят началото и края на една от веригите му (най-често на напрежителната, за да не се прекъсва токовата верига). В такъв случай активната мощност на трифазната верига ще се определи от разликата на показанията на двата ватметъра, т.е.:

$$P = C_{w1}\alpha_1 - C_{w2}\alpha_2 \quad .$$

Ако константите на двата ватметъра са еднакви, т.е.  $C_{w1} = C_{w2} = C_w$ , се получава

$$P = C_w(\alpha_1 \pm \alpha_2) \quad ,$$

където  $\alpha_1$  е винаги по-голямото от показанията на двата ватметъра. Същи-

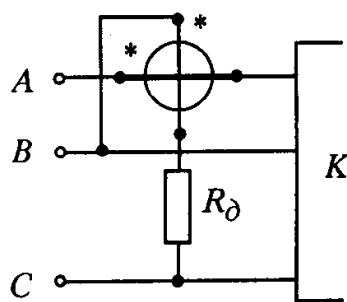
ят резултат се получава и при свързване на фазите на консуматора в триъгълник.

*Измерване на реактивната мощност в трифазни вериги.* При симетрична верига реактивната мощност е равна на реактивната мощност на една от фазите (например на фаза A), умножена по три:

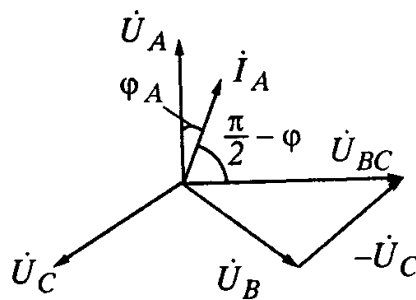
$$Q = 3U_{\phi} I_{\phi} \sin \varphi = 3U_A I_A \sin \varphi .$$

За измерване на реактивната мощност в трифазни вериги се използват обикновени ватметри, но свързани по особен начин. При всички схеми на измерване на реактивна мощност се използва фактът, че в трифазната верига могат да се получат напрежения, изместени по фаза на ъгъл  $\frac{\pi}{2}$ .

Поради голямата мощност на съвременните трифазни вериги, симетричността на фазовите и линейните напрежения се запазва винаги и споменатата фазова разлика от  $90^\circ$  не се изменя.



a)



б)

**Фиг. 11.23.** Към измерване на реактивна мощност в симетрична трифазна верига : а) схема с един ватметър ; б) векторна диаграма на напреженията

Тогава, ако един ватметър е свързан, както е показано на фиг. 11.23а, т.е. токовата му верига е включена последователно във фазата A, а напрежителната верига е свързана към линейното напрежение  $U_{BC}$ , което е изместено по фаза от

напрежението  $U_A$  на ъгъл  $\frac{\pi}{2}$  (фиг. 11.23б), неговото показание ще определя величината

$$C_w \alpha = U_{BC} I_A \cos(\widehat{U_{BC} I_A}) = U_{BC} I_A \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) = \sqrt{3} U_A I_A \sin \varphi .$$

Следователно, със схемата от фиг. 11.23 може да се измерва реактивната мощност на симетрична трифазна верига, като показанията на ватметър се умножат по  $\sqrt{3}$ , или

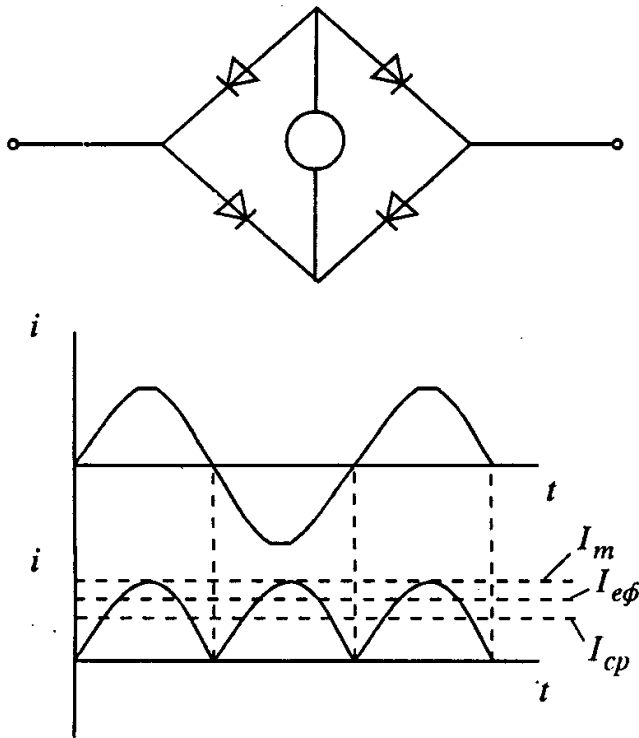
$$Q = \sqrt{3} C_w \alpha .$$

## Дванадесета глава

### ЕЛЕКТРОННИ ИЗМЕРВАТЕЛНИ УРЕДИ

#### 12.1. Електронни измервателни уреди с магнитоелектрически индикатор

##### 12.1.1. Измерване на променлив ток с уред от магнитоелектрическата система



Фиг. 12.1

Тъй като въртящият момент в магнитоелектрическият ИМ е пропорционален на тока в бобината ( $M = c.B.i$ ), стрелката ще следва измененията на тока, но само при много ниски честоти. При по-високи честоти уредът няма да се задейства, поради инерционния момент на подвижната бобина. По тази причина, за да се измери, променливият ток отначало се изправя (фиг. 12.1).

Отклонението на стрелката е пропорционално на *средния ток*. Ефективната стойност на синусоидалния ток е  $I_{ef} = I = 1,11 I_{cp}$  и скалата на уреда е градуирана на тази база. Ако входният сигнал не

е синусоидален, тогава скалата ще дава грешка, т.е. отношението  $I / I_{cp}$  ще се различава от 1,11 - коефициент на формата за синусоидален сигнал. Грешката от несинусоидалност се определя като

$$\text{грешка} = \frac{1,11 - K_{\phi}}{K_{\phi}} 100\%$$

където  $K_{\phi}$  е коефициент на формата на измервания сигнал.

#### Пример 12.1:

Каква ще бъде грешката, ако уред от разгледаната система, чиято скала е градуирана за синусоидален ток, се използва за измерване на ток с пра-

вогълна форма на вълната?

**Решение:**

Коефициентът на формата е 1. Грешката от несинусоидалност се изчислява по дадената формула:

$$\frac{1,11 - K_{\phi}}{K_{\phi}} \cdot 100 \% = \left[ \frac{(1,11 - 1)}{1} \right] \cdot 100 \% = +11 \% ,$$

т.е. показанията са по-високи с 11 %.

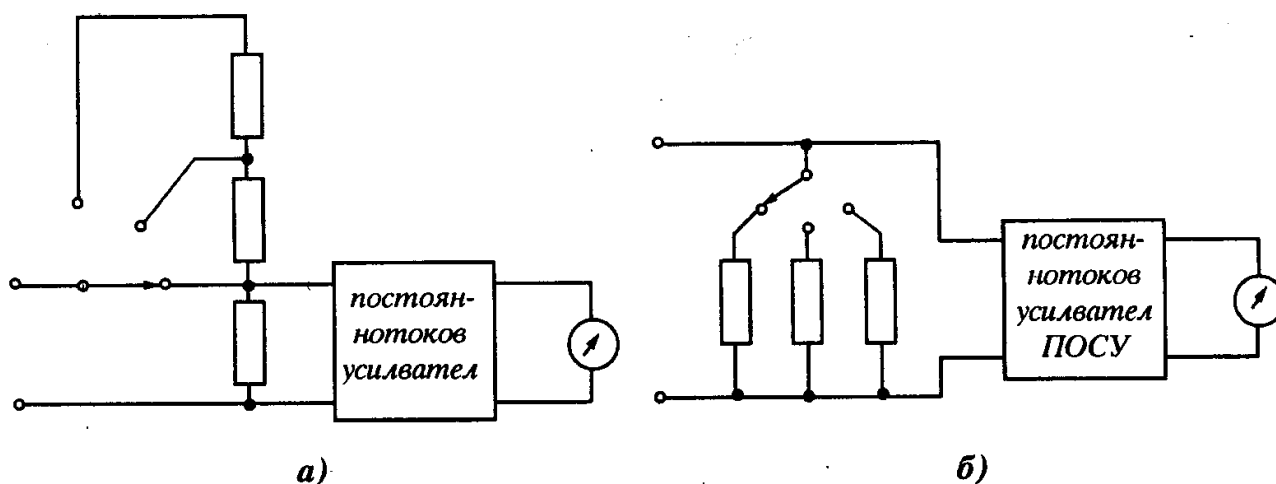
#### • Мултиметри

Уредът от магнитоелектрическата система може да се използва с подходящи шунтове като амперметър за постоянен ток, с подходящи допълнителни съпротивления - като волтметър за постоянен ток, а с токоизправител - за променливи ток и напрежение; при съответно включване - и като омметър. Всички тези функции могат да се комбинират в един уред - *мултиметър с подвижна бобина*. Типичните обхвати на мултиметъра са: от  $= 50 \mu\text{A}$  до 10 A; от  $\sim 10 \text{ mV}$  до 10 A; от  $= 100 \text{ mV}$  до 3000 V; от  $\sim 3 \text{ V}$  до 3000 V; от  $\Gamma, 2 \text{ k}\Omega$  до 20 M $\Omega$ , с точност за постоянен ток  $\pm 1 \%$  (м.о.с.), за променлив ток  $\pm 2 \%$  (м.о.с.) и за съпротивление  $\pm 3 \%$  (за средата на скалата).

#### • Електронни мултиметри

Уредът с подвижна бобина има два *недостатъка*: ниско входно съпротивление и ниска чувствителност при използване на изправител за измерване на променливи напрежение и ток. Посочените ограничения могат да се преодолеят чрез включване на усилвател между входа и измервателния механизъм. Такова устройство се нарича *електронен измервателен уред*.

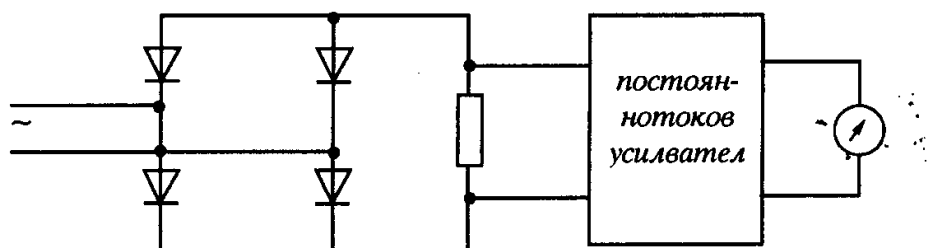
На фиг. 12.2а е показан волтметър за постоянен ток с три обхвата. Такъв



Фиг. 12.2

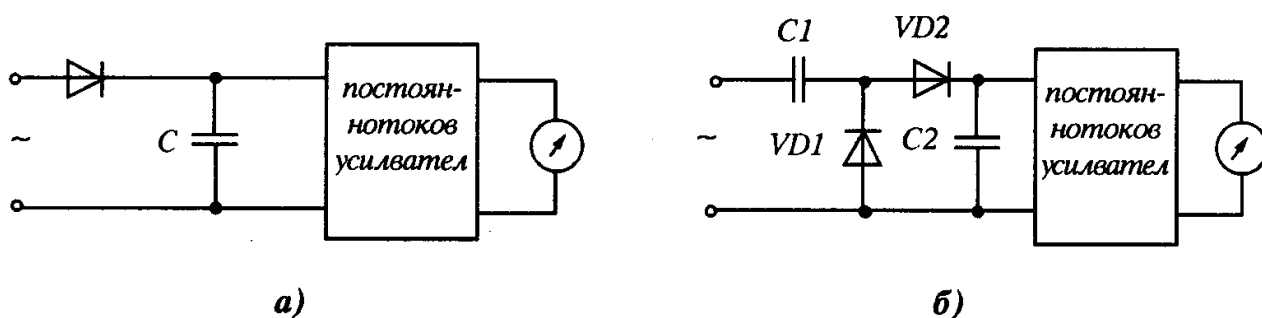
уред има обикновено входно съпротивление  $10\text{ M}\Omega$ , точност около  $\pm 1\%$  (м.о.с.), обхвати от  $15\text{ mV}$  до  $1\text{ 000 V}$ . На фиг. 12.2б е дадена схемата на постояннотоков амперметър. Обхватите са от  $1\text{ }\mu\text{A}$  до  $3\text{ A}$ , точността  $1 \div 2\%$ . Входното съпротивление е от няколко части от ома на най-големия обхват.

Съществуват няколко схеми на електронни волтметри за променлив ток. На фиг. 12.3 е показана схема, при която входният сигнал се изправя, след това се подава на постояннотоков усилвател, а показващият уред е градуиран да отчита ефективна стойност на напрежението при синусоидален сигнал. Ако подаваният сигнал не е такъв, се прави корекция, както бе показано по-горе.



Фиг. 12.3

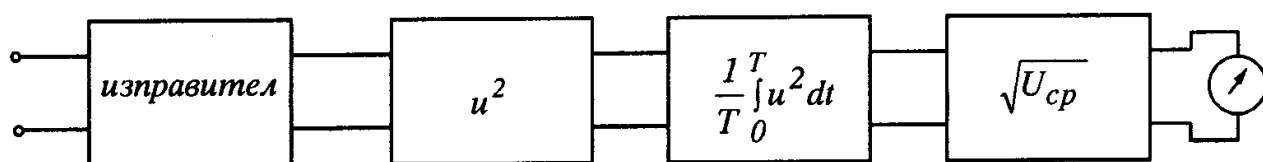
Съществуват схеми на електронни волтметри, които измерват максималната (пикова) стойност на променливия сигнал или двойната амплитуда на сигнала. Тези схеми са дадени на фиг. 12.4а и фиг. 12.4б. При първата от тях кондензаторът се зарежда до максималната стойност на измерваното напрежение, което се усилва от постояннотоков усилвател и се отчита от стрелковия уред. При втората схема се използва схема за удвояване на изправеното напрежение.



Фиг. 12.4

Съществуват схеми за измерване на променливо напрежение, изградени на следния принцип: входното напрежение се изправя, след което се повдига на квадрат, усреднява се за един период, коренува се и се подава към уреда с подвижна бобина.

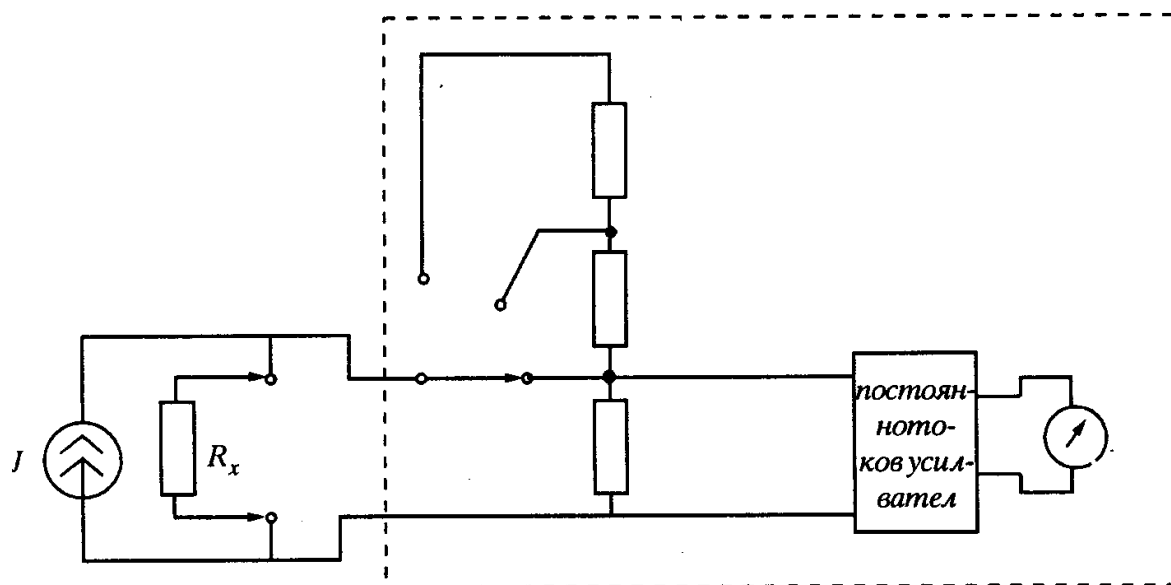




Фиг. 12.5

Електронните волтметри обикновено имат обхват от  $100 \mu\text{V}$  до  $1000 \text{V}$ , входно съпротивление от около  $10 \text{M}\Omega$ , честотен диапазон от  $20 \text{Hz}$  до  $100 \text{MHz}$  и точност  $\pm 2 \div \pm 5\%$ , в зависимост от честотния диапазон.

Променлив ток се измерва с използване на електронен волтметър за измерване на напрежението върху резистор с известно съпротивление. По този начин могат да се измерят токове от  $1 \mu\text{A}$  до  $3 \text{A}$ .



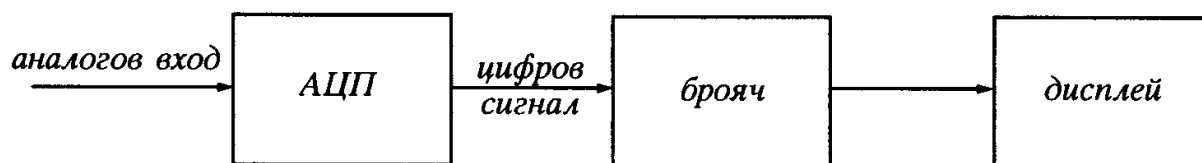
Фиг. 12.6

Съпротивление може да се измери като се определи напрежението върху резистора  $R_x$ , през който тече постоянен ток. Различни обхвати за съпротивлението могат да се получат като се използват различните обхвати на електронния волтметър. По този начин могат да се измерват съпротивления от  $1 \Omega$  до  $100 \text{M}\Omega$ . Скалата е нелинейна и точността е  $\pm 3\%$  за средата на скалата.

## 12.2. Цифрови измервателни уреди

Цифровите измервателни уреди отчитат получения резултат като число, т.е. в цифров вид, което има следните *предимства*: намаляване на греш-

ката на оператора при отчитане, по-бързо отчитане на измерваната величина, липса на паралактична грешка. Тъй като измерваната величина в повечето случаи е аналогова, тя трябва да се преобразува в цифров вид и след това да се изобрази на дисплея. По тази причина аналого-цифровият преобразувател (АЦП) е основна част на цифровия уред. Тук ще разгледаме някои аналого-цифрови преобразуватели, използвани в цифровите волтметри.



Фиг. 12.7

На фиг. 12.7 е показана блок-схемата на цифров волтметър - напрежението, което е аналогова величина, се оценява в определен момент от времето и се преобразува в цифров сигнал, т.е. в поредица от импулси, зависеща от големината на измерваното напрежение. Тези импулси се преброяват от брояча и резултатът се предава на дисплея като ред от цифри.

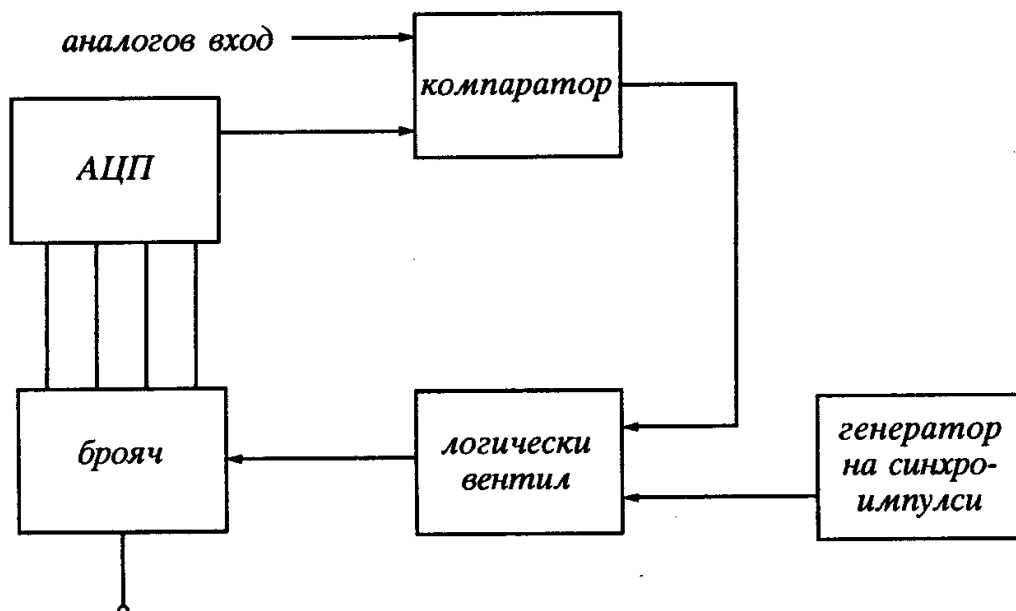
#### 12.2.1. Аналого-цифрови преобразуватели (АЦП)

Съществуват различни методи за аналого-цифрово преобразуване (а.ц.п.): метод с апроксимация; бързо а.ц.п.; с използване на линейно нарастваща функция; с използване на две линейни функции и с преобразуване „напрежение-честота“.

Методите на последователно приближение, бързо а.ц.п. и с линейно нарастваща функция са свързани с т.нар. „пробващи“ АЦП, в които се генерират цифрови стойности, равни на напрежението в момента, когато се „взема проба“ от измервания сигнал.

Другите два метода са свързани с т.нар. интегриращи АЦП, в които се определя средната стойност на напрежението за фиксирано време на измерване. Тези АЦП изискват повече време за измерване, но в тях смущенията са значително отслабени.

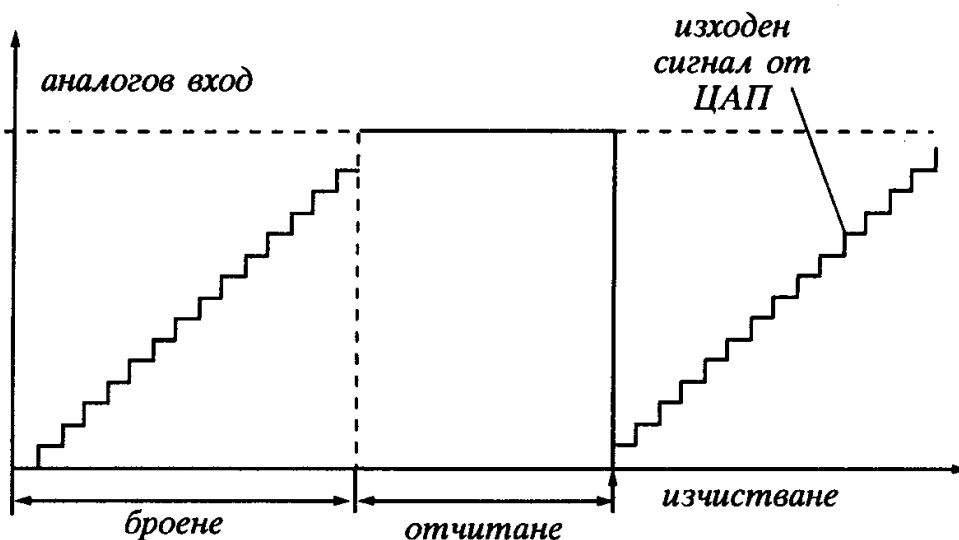
При метода на последователна апроксимация „пробата“ от входното аналогово напрежение се сравнява с напрежение, което нараства постепенно с постоянни дискретни стойности, докато последното не достигне стойността на входното (фиг. 12.8). Това става по следния начин: Логическият вентил отваря входа за брояча и в него постъпват импулси от генератора. Количеството отброени импулси се преобразува в цифрово-аналоговия преобразувател (ЦАП) в напрежение и последното постъпва в компаратора. Аналоговият сигнал от ЦАП се сравнява с входното напрежение и



Фиг. 12.8. Метод на последователна апроксимация

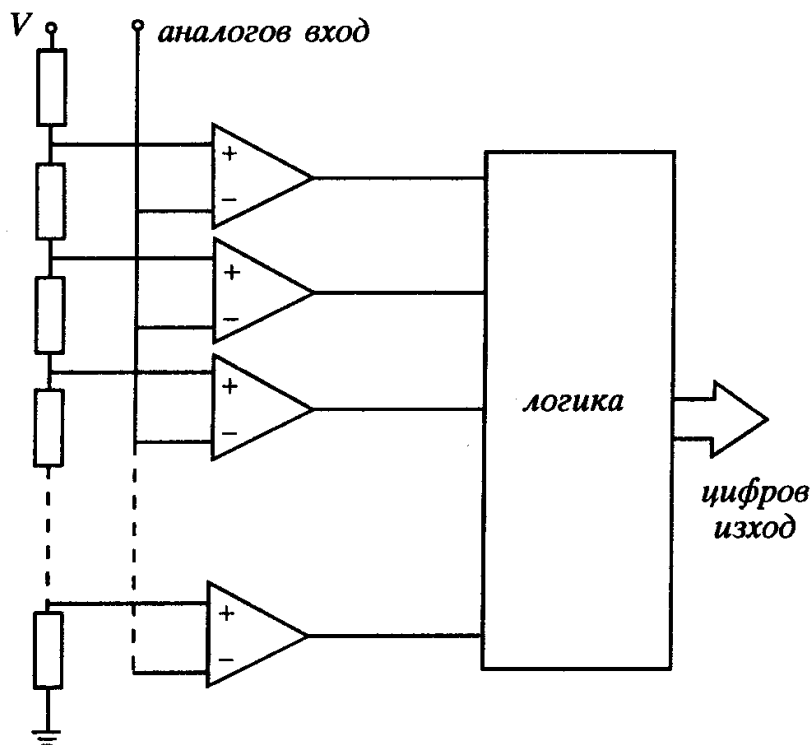
когато той достигне ниво, по-голямо от това на входа, логическият вентил прекъсва подаването на импулси към брояча и по такъв начин отчетът на брояча е цифровият еквивалент на входното аналогово напрежение. Един 8-битов уред, например, има време за преобразуване  $10 \mu\text{s}$ , следователно вземането на проби става 1 000 пъти в секунда или повече. Електронните цифрови волтметри, основани на метода на последователна апроксимация, се считат за сравнително бързи. Разглежданият метод може да се сравни с претеглянето на един предмет с помощта на лабораторни везни, като на везната се поставят последователно определен брой от най-малките теглилки. Претеглянето може да стане по-бързо, като се започне с голяма теглилка и ако тя се окаже по-тежка, се вземе теглилка с два пъти по-малка тежест. Продължава се по същия начин, докато се достигне до теглилка, по-лека от дадения предмет. Последната остава и започва добавянето на теглилки с два пъти по-малко тегло от предходната, докато се достигне до най-малката теглилка. Подобна процедура може да се използва и при АЦП. Така, за ускоряване на процеса на измерване, вместо сравняване на входното напрежение с постепенно нарастващо до необходимата стойност напрежение, сравнението най-напред се прави с аналогова стойност на бита с най-голяма значимост, след това на следващия по значимост и така, по същия начин, както при претеглянето. Последователността би била следната: опитва се 1 000, ако е много голяма, опитва се 0100. Ако е малка, опитва с 0110, ако е малка - опитва се с 0111, и, ако е по-голяма, резултатът ще бъде 0110. Тъй като всеки бит в думата се пробва последователно, са необходими само  $N$  стъпки за  $N$ -битова дума. Ако генераторът на импулси

има честота  $f$ , най-малкото време, за което може да бъде направена промяна в думата  $Nt$  (където  $t$  е време между два последователни импулса) е  $1/f$ . Следователно, времето за преобразуване е  $N/f$ .



Фиг. 12.9. Към метода на последователна апроксимация

Терминът *свръхбърз преобразувател* (паралелен АЦП) се използва за преобразувател, в който аналоговият сигнал се подава на набор от паралелни компаратори с различно прагово напрежение. За  $N$ -битово преобразуване се използват  $2^{N-1}$  компаратора, по един за всяка цифра. Времето за

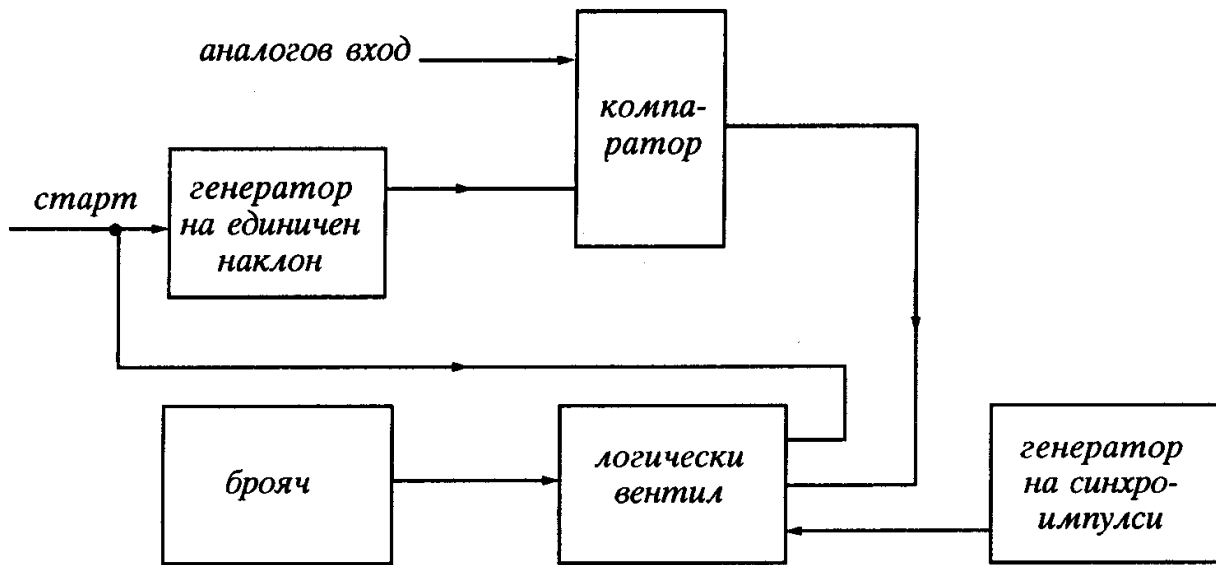


Фиг. 12.10. Свръхбърз АЦП

преобразуване е от порядъка на 10 ns. Сигналят от съответния компаратор постъпва в логическата схема и се превръща в цифров. Тези АЦП са много бързи, но и скъпи, поради големия брой компаратори.

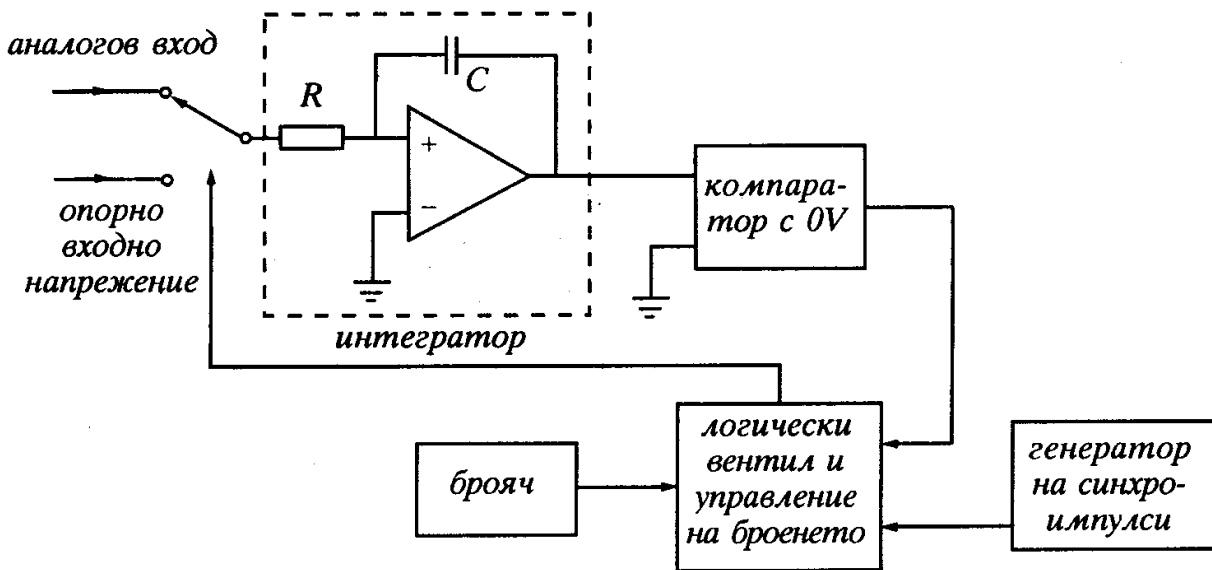
АЦП с линейно нарастващо напрежение (единичен наклон) представлява най-простия и най-евтиния вариант на цифровия волтметър. Входното аналогово напрежение се пода-

ва към компаратор и се измерва времето, за което приложеното линейно нарастващо напрежение се изменя от нула до стойността на входното напрежение (фиг. 12.11).



Фиг. 12.11. АЦП с линейно нарастващо напрежение

Времето се получава в цифрова форма, като се отброяват импулсите, постъпващи от генератора на синхроимпулси за интервала от време, докато логическият вентил е отворен, като последният се отваря, когато стартира единичният наклон, и се затваря, когато двете напрежения на компаратора се изравнят. Поради нелинейностите във формата на единичния наклон и липсата на шумови ограничения, точността се ограничава приблизително до



Фиг. 12.12. Интегриращ АЦП

$\pm 0,05 \%$ . Скоростта на пробите може да бъде до около 1 000 за секунда.

Интегриращият двутактен АЦП има схема, показана на фиг. 12.12:

Входният аналогов сигнал се интегрира за време  $t_1$ , равно на един период на основната честота (на захранващата мрежа, например). При постоянна стойност на входното аналогово напрежение на кондензатора се създава непрекъснато нарастващо напрежение. След като завърши интервала на интегриране, аналоговият сигнал се изключва и кондензаторът остава зареден. Тъй като  $i = dq/dt$ , при постоянна скорост на зареждане зарядът върху кондензатора  $Q_c$  ще бъде  $i \cdot t_1 = \frac{U_{ex} \cdot t_1}{R}$ .

В следващия момент към хода на интегратора се включва постоянно отрицателно напрежение  $U_{оп}$ . Времето, за което изходът на интегратора достига 0, е  $t_2$  и тогава  $\frac{U_{оп} \cdot t_2}{R} = \frac{U_{ex} \cdot t_1}{R}$ , следователно:

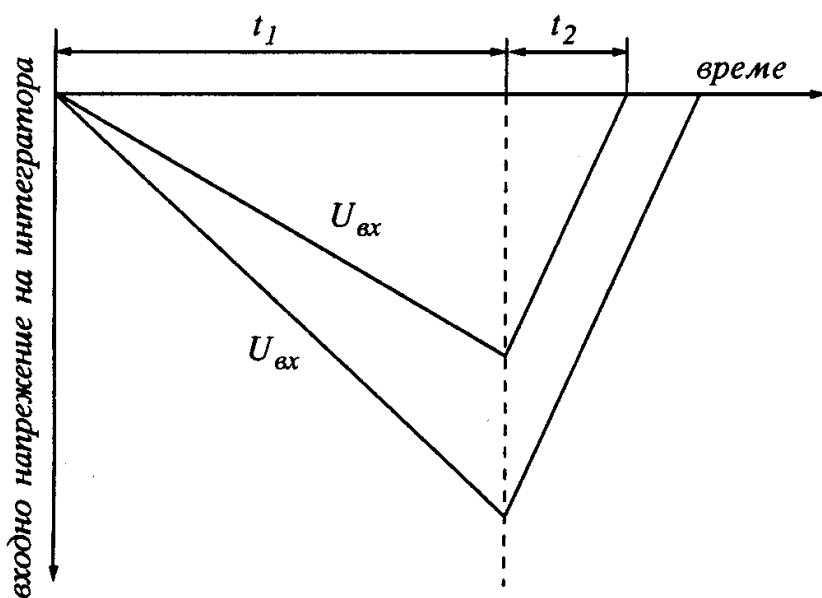
$$U_{ex} = \frac{U_{оп} \cdot t_2}{t_1}.$$

Тъй като времето  $t_1$  и напрежението  $U_{оп}$  са фиксирани, стойността на  $t_2$  съответства на измереното напрежение. Времето  $t_2$  се отчита чрез броя на синхроимпулсите, постъпили в брояча, докато се разрежи кондензатора. Ако основната честота е 50 Hz (60 Hz), времето на преобразуване е

съответно 1/50 (1/60) s.

Интегриращите двутактни АЦП имат висока точност - около 0,005 %. При тях се изключват грешки от изменението на честотата на синхроимпулсите, тъй като такива изменения в еднаква степен важат и за двата интервала  $t_1$  и  $t_2$ . Този АЦП има и по-висока устойчивост към шум.

В преобразувателя **напрежение - честота** входното напрежение се



Фиг. 12.13. Аналого-цифрово преобразуване в интегриращия АЦП

преобразува в импулси, чиято честота е пропорционална на големината на това напрежение. Самата честота се измерва чрез броя на импулсите за определен времеви интервал.

---

### **Пример 12.2:**

АЦП с линейно нарастваща функция има генератор с коефициент на наклона  $1\text{V/ms}$ . Генераторът на синхроимпулси има честота  $100\text{ kHz}$ . Какъв ще бъде отчетът при входен сигнал  $5\text{V}$ ?

### **Решение:**

При наклон на линейно нарастващото напрежение  $1\text{V/ms}$  са необходими  $5\text{ms}$ , за да се достигне напрежение  $5\text{V}$ , когато компараторът ще прекрати броенето. За това време броячът ще отброи  $5 \cdot 10^{-3} \cdot 100 \cdot 10^3 = 500$  импулса.

---

### **12.2.2. Основни характеристики на цифровите волтметри и мултиметри**

Цифровите волтметри представят резултати от измерването в цифрова форма, като по този начин се елиминира интерполацията и паралактичната грешка, свързана с работата със стрелкови уреди. Дисплеите имат обикновено от  $3\frac{1}{2}$  до  $8\frac{1}{2}$  знака, където половинката означава, че най-старшата значеща цифра може да бъде само 0 или 1; всички останали разряди могат да приемат стойности от 0 до 9. Прагът на чувствителност (разделителната способност) на тези уреди е изменението на напрежението, което дава изменение в последната значеща цифра на дисплея. Например дисплей с  $3\frac{1}{2}$  разряда има диапазон от 1 до 1999 и тогава разделителната способност е от 1 до 1999.  $8\frac{1}{2}$ -разряден дисплей има диапазон от 1 до 19999999 и разделителната способност е 1 от  $2 \cdot 10^8$ .

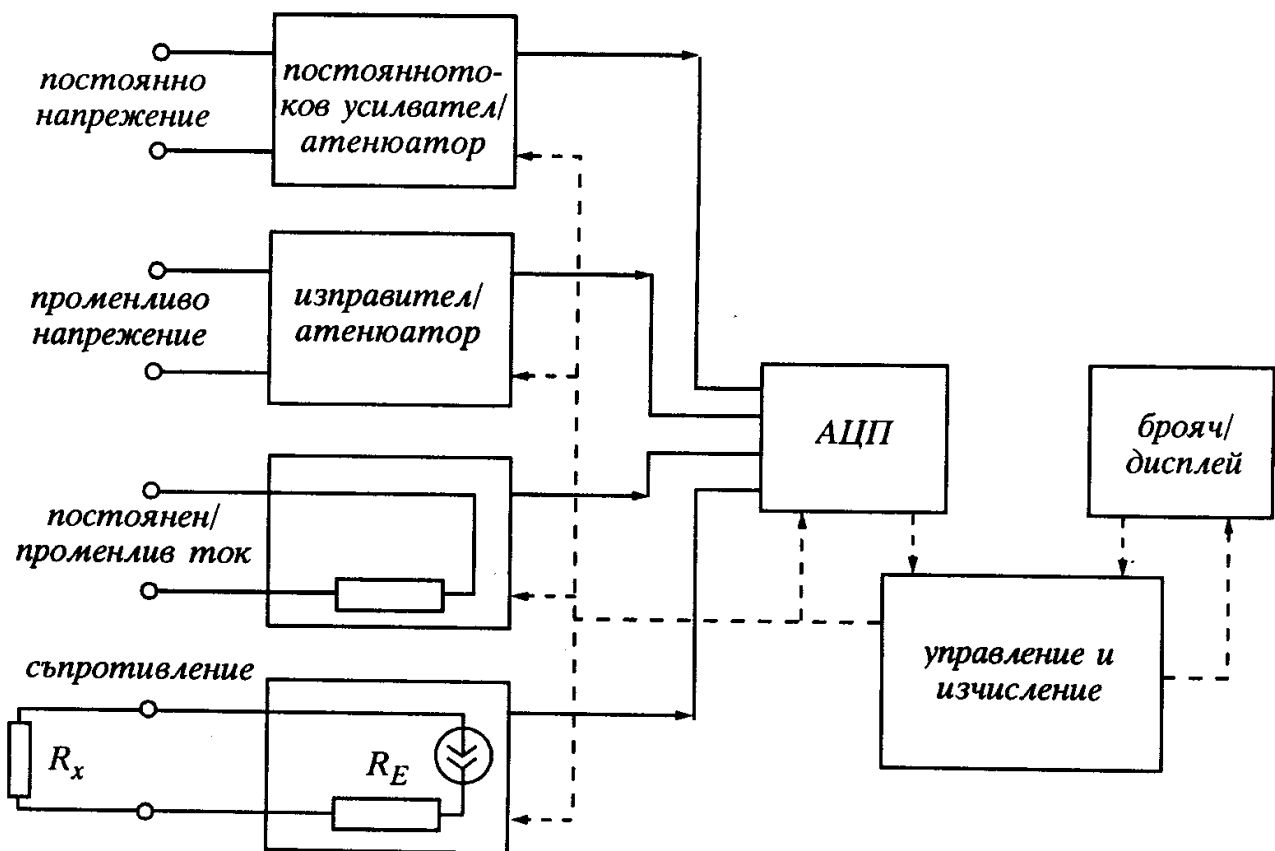
Типична стойност на чувствителността на  $3\frac{1}{2}$ -разряден уред е  $\pm 0,1\%$  от отчетената стойност плюс  $0,00003\%$  от горната граница на диапазона на измерване. Тези уреди обикновено имат входно съпротивление  $10\text{ M}\Omega$  или повече, капацитет  $40\text{ pF}$  и добра стабилност. Диапазоните на напрежение са от около  $100\text{ mV}$  до  $1000\text{V}$ , а границата на разделителната способност е  $1\text{ }\mu\text{V}$ .

В зависимост от метода, АЦП-уредът ще „пробва“ аналоговото напрежение или ще го интегрира за определен интервал от време. Пример на волтметър от първия тип е уред с последователна апроксимация, който има време на преобразуване  $10\text{ }\mu\text{s}$ ; паралелният (свърхбърз) преобразувател има време на преобразуване  $10\text{ ns}$ . Колкото е по-малко времето на преобразуване, толкова по-добре ще реагира уредът на изменението на входно-

то напрежение или на неочаквани пикове. В случай че се очакват такива ситуации, за предпочитане са аналоговите уреди.

Основен цифров волтметър е постояннотоковият волтметър. Той може да се използва за измерване на променливо напрежение, като се използва токоизправител, както това вече бе разгледано за уреда от магнитоелектрическата система. Тъй като на изхода на токоизправителя се получава средното напрежение и тъй като уредите обикновено са градуирани да показват ефективна стойност, необходимо е да се въвежда корекция за формата на сигнала при несинусоидални сигнали. Точността обикновено варира от  $\pm 1\%$  от отчетената стойност плюс 3 единици за дисплеи с  $3\frac{1}{2}$  разряда до  $0,05\%$  от отчетената стойност плюс  $0,03\%$  от горната граница на измервателния диапазон за дисплеи с  $8\frac{1}{2}$  разряда. Честотният диапазон варира от  $45\text{ Hz}$  до  $10\text{ kHz}$  за  $3\frac{1}{2}$ -разряден дисплей до  $10\text{ Hz} \div 100\text{ kHz}$  за  $8\frac{1}{2}$ -разряден дисплей. Диапазоните на напрежението са от  $100\text{ mV}$  до  $1\text{ 000 V}$ , а входното съпротивление е около  $10\text{ M}\Omega$  и входен капацитет  $100\text{ pF}$ .

Променлив или постоянен ток може да се измери с цифров волтметър, с който се определя напрежението върху резистор с известно съпротивление. Точността е обикновено  $\pm 0,2\%$  от отчетената стойност плюс 2 единици за постоянен ток, а  $\pm 1\%$  от отчетената стойност плюс 2 или по-



Фиг. 12.14. Схема на цифров мултиметър



вече единици - за променлив ток. И за постоянния, и за променливия ток диапазоните са от около 200  $\mu\text{A}$  до 2 A и пад на напрежението върху уреда, по-малък от 0,3 V. Честотният диапазон е от 45 Hz до 1 kHz.

Съпротивления могат да се измерват като се използва цифров волтметър за измерване на напрежението (върху резистор) при известен ток, протичащ през резистора с неизвестно съпротивление.

По-прецизните уреди използват друг метод. Токът преминава през еталонен резистор и през неизвестния резистор, и напреженията върху резисторите се сравняват. Тъй като токът е един и същ за двата резистора, отношението на напреженията на резисторите е равно на отношението на техните съпротивления. Точността се движи в границите от  $\pm 0,1\%$  от отчетената стойност плюс една единица за 3 1/2-разрядните дисплеи до 0,0002 % от отчетената стойност,  $\pm 0,0004$  от п.о.с. за 8 1/2-разрядни дисплеи. Диапазонът на съпротивленията е от 200  $\Omega$  до 1 000 M $\Omega$ . На фиг. 12.14 е показана блок-схемата на цифров мултиметър за измерване на постоянни и променливи напрежение, ток и съпротивление. Използваните методи бяха разгледани по-горе. Някои цифрови уреди могат да имат цифров изход за свързване с регистратор на данни или компютър.

### 12.3. Осцилоскопи

Електроннолъчевият осцилоскоп е един от най-използваните уреди в електрониката. Принципът му на действие се състои в използването на електронен лъч, който „рисува“ върху покрития с луминофор екран на електроннолъчевата тръба. Изображението е във форма на двумерна графика, която показва зависимостта на напрежението на един сигнал от времето или от друг сигнал.

Тук ще бъдат разгледани основната схема на осцилоскопите и техните подсистеми, и измерванията, които могат да се извършват с тях.

Осцилоскопите могат да се разделят на две основни категории: работещи в реално време и такива, които не работят в реално време. Работещите в реално време представят на екрана това, което в момента става в една верига и наблюдението се ограничава до бързо повтарящи се отрязъци от периодични трептения. Осцилоскопите, които не работят в реално време, позволяват да се наблюдават неповтарящи се вълни (трептения), тъй като данните за тях са съхранени в паметта на уреда или се получават по метода на пробите, след което формата на сигнала се възстановява по-късно.

### 12.3.1. Основна схема на осцилоскопа

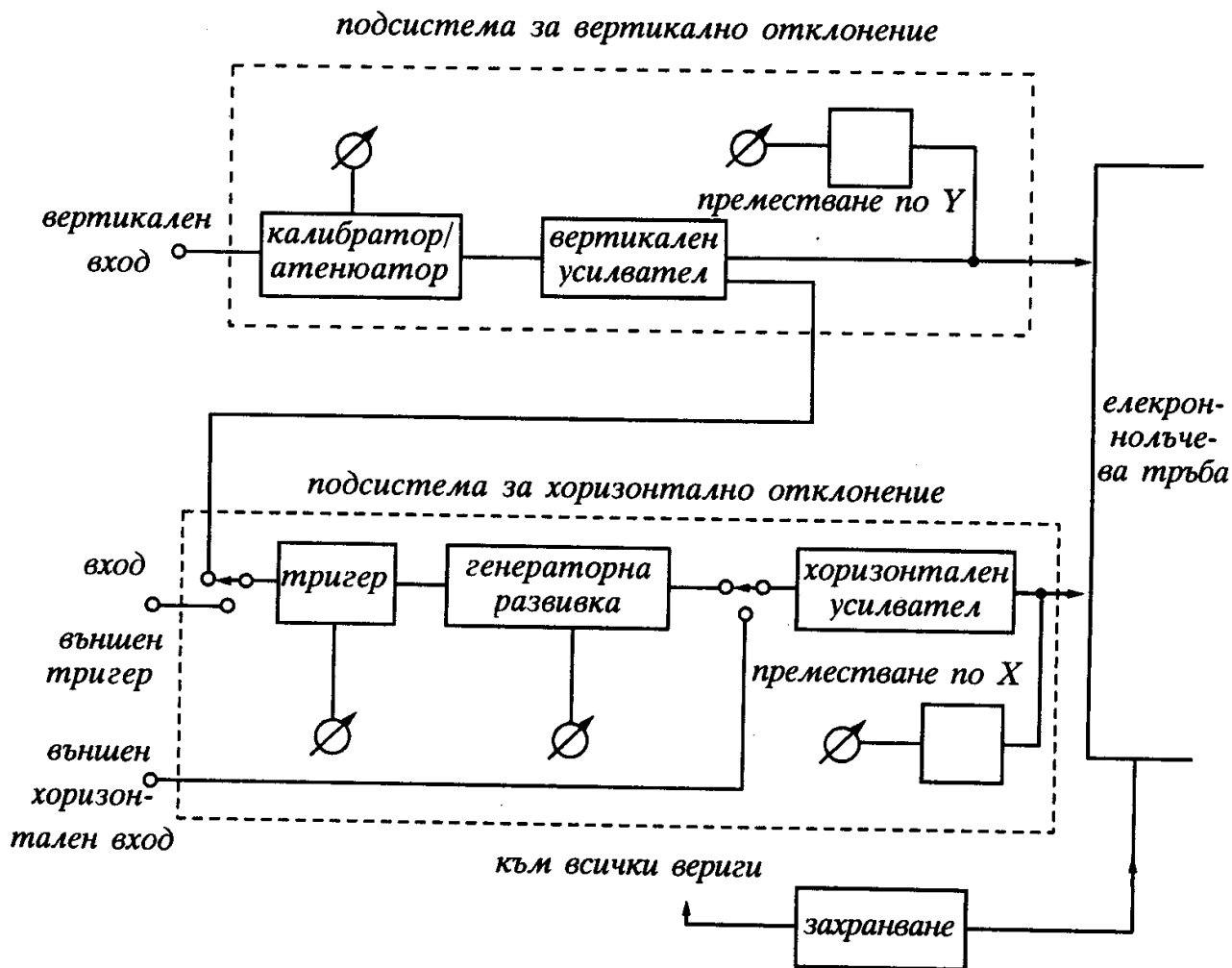
Основната схема на осцилоскопа може да се представи като съставена от определен брой свързани помежду си подсистеми. Тези подсистеми са:

1. Изобразяваща система, т.е. електроннолъчева тръба, която преобразува сигналите за хоризонтално и вертикално отклонение в отклонение на флуорисциращата точка на екрана.

2. Вертикално отклоняваща система, която осигурява вертикално отклонение на лъча, пропорционално на входния сигнал (фиг. 12.15).

3. Хоризонтално-отклоняваща система, която отклонява лъча по хоризонталната ос под действието на външен сигнал или вътрешен трионообразен сигнал, осигуряващ преместване на лъча (по хоризонталната ос) с постоянна скорост.

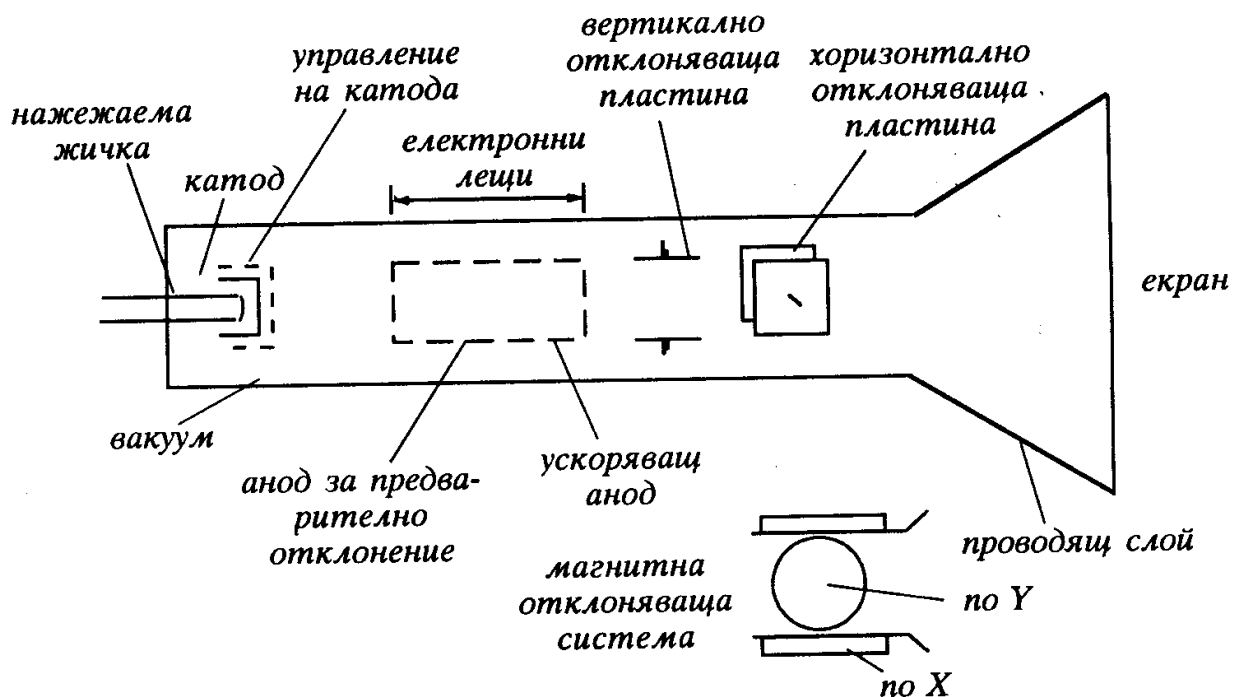
4. Захранващи източници.



Фиг. 12.15. Основна схема на осцилоскопа

### 12.3.2. Електроннолъчева тръба (ЕЛТ)

На фиг. 12.16 са показани основните елементи на електроннолъчевата тръба. При нагриване на катода от него се отделят електрони. Количеството електрони, които формират лъча, т.е. неговата яркост, се определя от потенциала, приложен към електрода (наречен модулатор), разположен непосредствено пред катода.



Фиг. 12.16. Електроннолъчева тръба

Някои осцилоскопи имат вход, наречен Z-модуляция, посредством който се управлява яркостта на лъча от външен сигнал. Електроните се ускоряват по дължината на тръбата вследствие потенциалната разлика между катода и анода. Електронните лещи фокусират потока електрони и на екрана се получава светеща точка. Фокусирането се осъществява чрез изменение на потенциала на определени електроди спрямо потенциала на предходните. Източникът на електрони (емитерът), модулаторът, анодът и лещите формират т. нар. *електронна пушка*.

Потенциалната разлика между пластините Y предизвиква отклонение на лъча във вертикалата, а потенциалната разлика между X-пластините - по хоризонталата. В някои ЕЛТ отклонението на лъча става под действието на магнитно поле. Електростатичната отклоняваща система позволява да се получат отклонения до  $40^\circ$ , а магнитната - до  $110^\circ$ .

Електростатичните отклоняващи системи са бързодействащи и икономични, тъй като при зареждане на кондензатора, който се образува от

двете пластини, загубите на мощност на усилвателя са незначителни. На практика всички ЕЛТ с честотен диапазон над 1 MHz имат такава отклоняваща система.

При електромагнитната система за отклонение на лъча се изменя магнитното поле, като се изменя токът в отклоняващите бобини. При високи честоти е необходимо да се намалява броят на навивките, а токът да се увеличава, така че при честоти над 25kHz системата изисква голяма захранваща мощност, при което и загубите са големи.

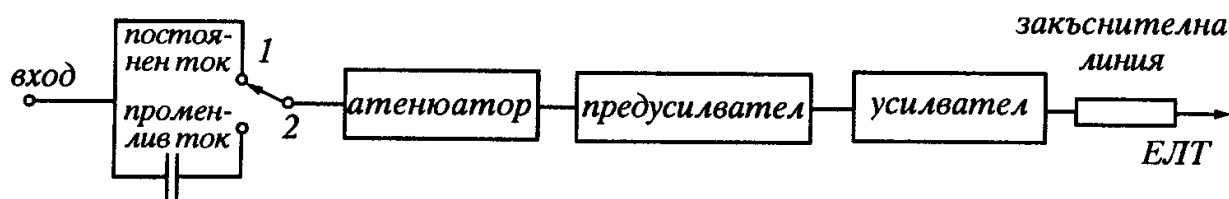
Като правило, такива размери се използват при растрова развивка, например в телевизията. Те позволяват да се получи и електронен лъч с по-голям диаметър, тъй като няма препятствия за лъча в самата тръба, а това осигурява по-ярко изображение.

**Луминофорът**, с който е покрит екранът на ЕЛТ, започва да свети, когато върху него попадат електрони. Времето за активиране на луминофора е малко, а светенето продължава докато продължава „бомбардировката“ с електрони. Това светене се нарича **флуоресценция**. След спиране на бомбардировката светенето продължава известно време, след което затихва до нула. Това светене се нарича **фосфоресценция**.

Луминофорите представляват свръхчисти кристали на фосфора (с диаметър 2-3μm) с добавки от други елементи, наречени активатори. Като такива се използват Ag, Mn, Cu, Sr, които определят светлоотдаването, спектъра на излъчване и послесветенето.

### 12.3.3. Вертикално отклоняваща система

Вертикално отклоняващата система се състои от входен селектор, атенюатор, предусилвател, усилвател и закъснителна линия (фиг. 12.17).



Фиг. 12.17. Вертикално отклоняваща система

Входният селектор позволява постояннотоковите сигнали да се подават директно към атенюатора, а променливотоковите - през кондензатор, който блокира евентуална постояннотокова съставка. Атенюаторът променя големината на сигнала, подаван към усилвателя, така че да се получи различна чувствителност. Коефициентът на ослабване на атенюатора обикновено е 1 000 и се реализира чрез 10 степени. Атенюаторът при всички

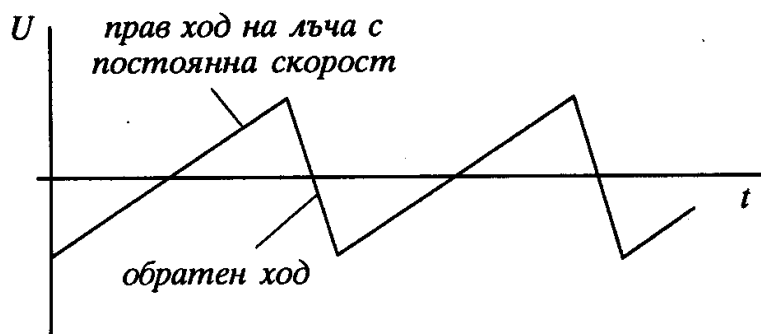
свои позиции трябва да поддържа постоянно натоварване на източника на сигнала и да отслабва входния сигнал на всички честоти еднакво.

Типична стойност на входния импеданс е  $1\text{ M}\Omega$ , шунтиран от капацитет от около  $10\text{-}100\text{ pF}$ . В съчетание с усилвателя, който обикновено има коефициент на усилване  $2\ 000$ , атенюаторът осигурява изменение на чувствителността от системата за вертикално отклонение от  $10\text{ mV}$  до  $50\text{ V}$  на деление. Точността на измерване зависи от линейността на усилвателите и обикновено е  $\pm 1 \div 3\%$ . При измерване на променливи сигнали честотният диапазон е от  $0$  до  $100\text{ MHz}$  при положение 1 (постоянен ток) и от  $2\text{ Hz}$  до  $10\text{ MHz}$  при положение 2 (променлив ток), фиг.12.17.

Поради наличието на закъснение при стартиране на хоризонталното отклонение на лъча, е необходимо да се осигури закъснение на напрежението, подавано от вертикалния усилвател към ЕЛТ. Това се осъществява посредством закъснителна линия, която представлява спирална бобина, навита върху сърцевина (напр. ферит).

#### 12.3.4. Хоризонтално отклоняваща система

Основен блок на тази система е *генераторът за развивка*, произвеждащ трионообразно напрежение, при което полегатата част е съответстваща на движението на лъча от лявата страна на екрана към дясната с постоянна скорост, а стръмната - на връщане на лъча в изходно положение. Връщането е достатъчно бързо, за да не се забележи следата върху екрана. Времето за правия ход на лъча плюс това за обратния ход определя *периода на развивката*.

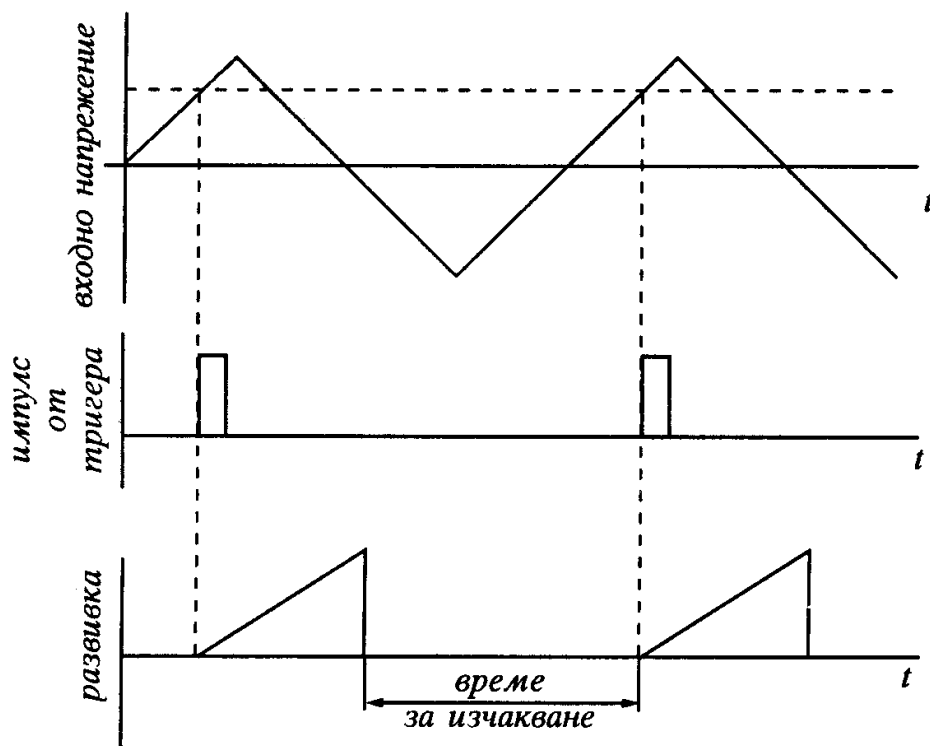


Фиг. 12.18. Напрежение на развивката

Типичните стойности са от  $1\text{ s}$  за едно деление от началото на екрана, скала до  $0,2\mu\text{s}$  на деление с точност  $\pm 1 \div 2\%$ . За да започне хоризонталното движение на лъча, в подходящ момент е необходимо да се синхронизират входният сигнал и развивката. За тази

цел се използва тригерна схема. Тригерът може да се построи така, че да реагира на определена стойност на напрежението. Тогава се произвежда импулс, който включва развивката. При това положение развивката винаги започва от една и съща точка на изображението на сигнала (фиг. 12.19). В резултат на това следващите един след друг сканирани участъци от сигнала се наслагват.

Сигналът за управление на тригерната схема може да е вътрешен сигнал, като се използва изходното напрежение от вертикалния усилвател. Може да се използва също така сигналът от мрежовото напрежение с честота 50 Hz или 60 Hz. Последното е удобно, когато входният сигнал има същата честота.



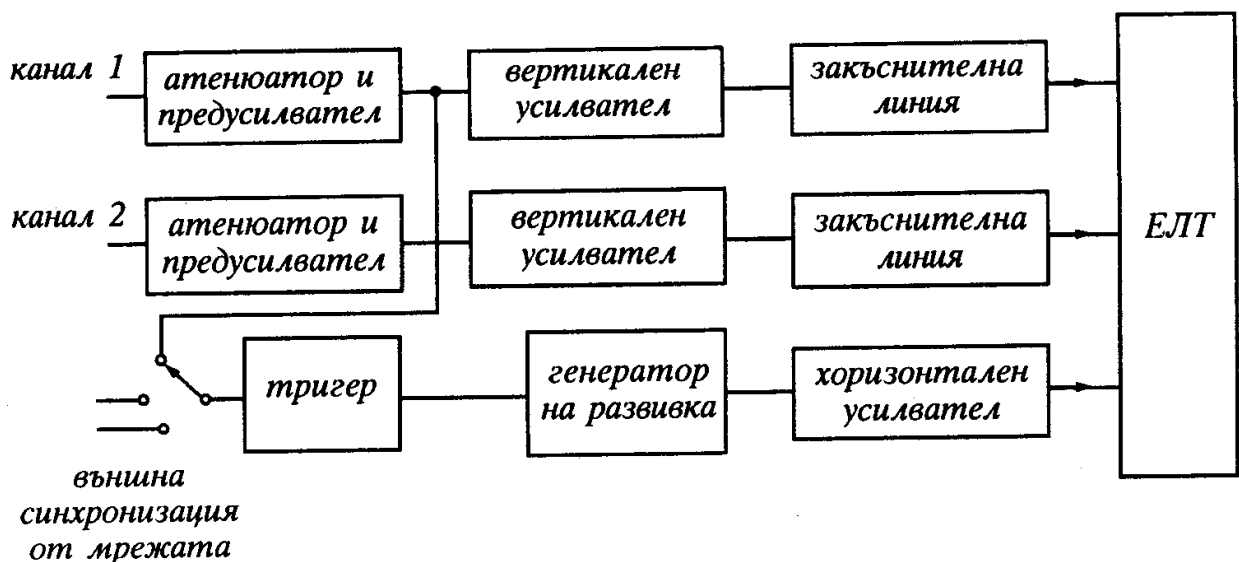
Фиг. 12.19. Синхронизация на входния сигнал и развивката

### 12.3.5. Осцилоскопи с два входа

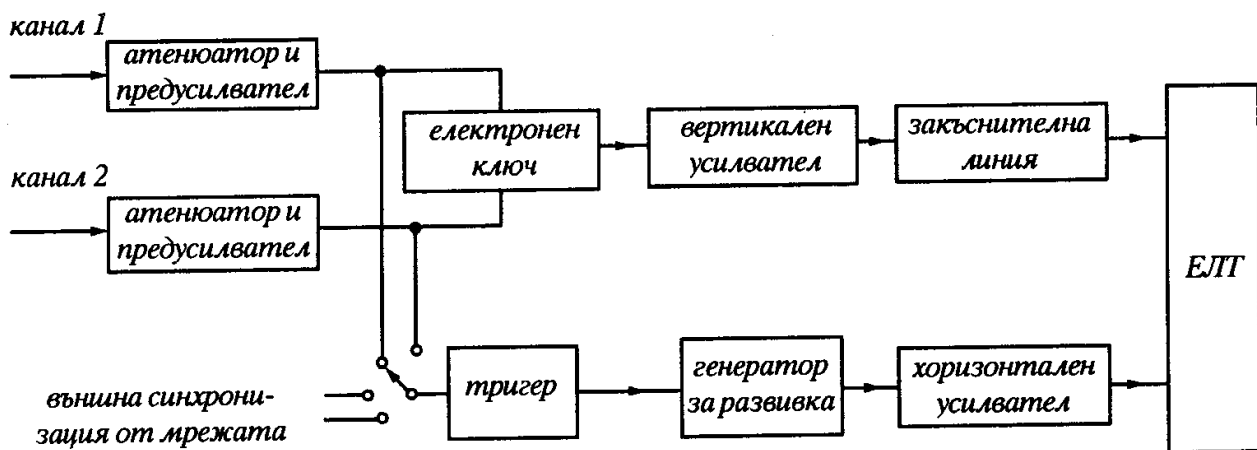
Терминът *двулъчев* се използва за осцилоскопи, които имат два входа и два лъча, и се наблюдават на екрана. Терминът *канал* се използва за всеки вход и такива осцилоскопи се наричат двуканални. Двуканалните са често срещани, макар да има и четири- и осемканални.

Двулъчевите осцилоскопи имат две електронни пушки. Всяка от тях трябва да има своя  $Y$ -отклоняваща система, а отклонението по  $X$  може да се осигурява от една отклоняваща система с един генератор на развивка или за всеки лъч да има  $X$ -пластини и независим генератор на развивка. На фиг. 12.20 е показан първият вариант.

По-евтина и по-често използвана версия обаче е тази на двуканален осцилоскоп, където се използва един електронен лъч и превключване на  $Y$ -отклоняващите пластини от единия входен сигнал към другия, като всеки път се включва генераторът на развивка (фиг. 12.21).



Фиг. 12.20. Двълъчев осцилоскоп



Фиг. 12.21. Двуканален осцилоскоп

Електронният ключ превключва последователно каналите 1 и 2. Модулаторът на яркост се включва само при правия ход на развивката. Това е режим на *последователно включване* на двата канала. Той има обаче този недостатък, че не може да регистрира едновременно изменението на два сигнала. Но ако сигналите са периодични, едновременната регистрация на различни периоди е възможна.

Електронният комутатор може да работи още в режим на прекъсване без синхронизация, с висока честота от 100 до 500 kHz. В резултат на това неголеми фрагменти от каналите 1 и 2 се включват последователно към вертикалния усилвател и се изобразяват на екрана. При скорост на прекъсване, значително превишаваща скоростта на хоризонталната развивка, на екрана ще се наблюдава непрекъсната линия за всеки канал.

### **12.3.6. Цифрови запомнящи осцилоскопи**

В цифровите запомнящи осцилоскопи се използва конвенционална ЕЛТ, но входните сигнали се преобразуват в цифрови с помощта на АЦП и се запамятват в цифровата електронна памет. Изходният сигнал в паметта се преобразува в аналогова форма посредством ЦАП и се подава към осцилоскопа. Формата на вълната се възстановява по съответния брой точки. Осцилоскопът може да извърши интерполация между отделните точки, за да се получи непрекъсната линия.

Цифровите запомнящи осцилоскопи могат да имат много входни канали, като входовете могат поред да се превключват към АЦП. Обикновено тези уреди имат два канала с честотна лента до 100 MHz, макар да съществуват осцилоскопи с 40 канала. Те могат да имат изход, който осигурява копиране на данните на x-y плотер, а също така и изход за връзка с компютър за обработка и анализ на данните.

Разделителната способност на цифровия осцилоскоп се определя от АЦП. Един 8-битов АЦП има разделителна способност 1 от 256, 12-битовият - 1 от 4096. Аналоговият осцилоскоп има типична стойност на разрешаваща способност - 1 към 50. Предимство на аналоговите осцилоскопи е, че могат да работят с по-широки честотни ленти и с по-висока скорост на записване.

### **12.3.7. Измерване с осцилоскоп**

Осцилоскопът е измервателен уред с широки възможности. Един едноканален осцилоскоп например може да се използва за измерване и наблюдение на формата на ток и напрежение, за измерване на време, честота; двуканалният осцилоскоп позволява сравнение на два сигнала и определяне на фазовата разлика.

За измерване на напрежение (или при променливо напрежение двойната амплитуда на сигнала) е необходимо използваната сонда да бъде точно компенсирана, а превключвателят на атенюатора да е в точно фиксирано напрежение. Сигналът се подава на Y-входа и се определя отклонението на лъча по скалата на екрана. Този резултат се преобразува в напрежение, като се отчита положението на атенюатора ( $V/del$ ) и ослабването на сондата.

$$U(V) = \text{брой скални деления} \times (V/del) \times \text{ослабване на сондата.}$$

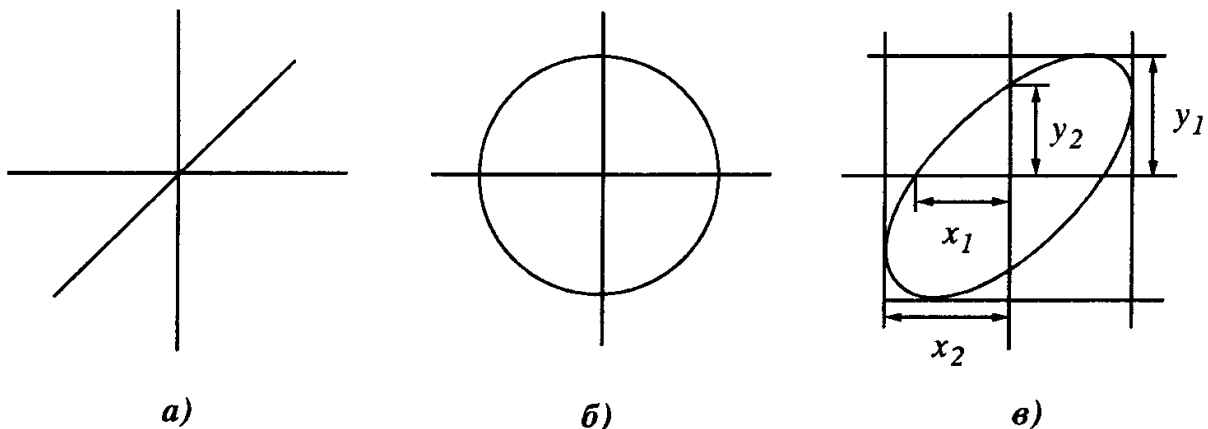
Постоянен и променлив ток се измерват като се определи напрежението върху известно съпротивление и се използва закона на Ом. Времето между две точки на изображението на сигнала може да се определи, като се използва калибрираната развивка. Точността е около 5%. Ако се опре-



деля времето на нарастване на един сигнал, е необходимо да се направи корекция за времето на нарастване на осцилоскопа.

Честотата на един сигнал може да се намери като се определи отначало периода (като разстояние между два максимума, например) и след това се вземе реципрочната стойност. Точността зависи от точността на развивката и от точността на отчитане на разстоянието между точките. Обикновено резултатът има точност 5%. По-точен метод обаче е този с използването на фигурите на Лисажу. При него неизвестната честота се сравнява с точно известна. Неизвестната честота се подава към вертикалния вход на осцилоскопа, вътрешната развивка се изключва, а сигналът с известна честота се подава към хоризонтално отклоняващите пластини. След това генераторът на известната честота се настройва така, че картината на екрана да бъде неподвижна. Ако честотите са равни, ще се получи една от фигурите, показани на фиг. 12.22: при фазово изместване  $\varphi = 0$  - фиг. 12.23а; при  $\varphi = 90^\circ$  - фиг. 12.23б, а при  $\varphi$  между тези стойности - фиг. 11.26в, като

$$\sin \varphi = \frac{y_1}{y_2} = \frac{x_1}{x_2} .$$



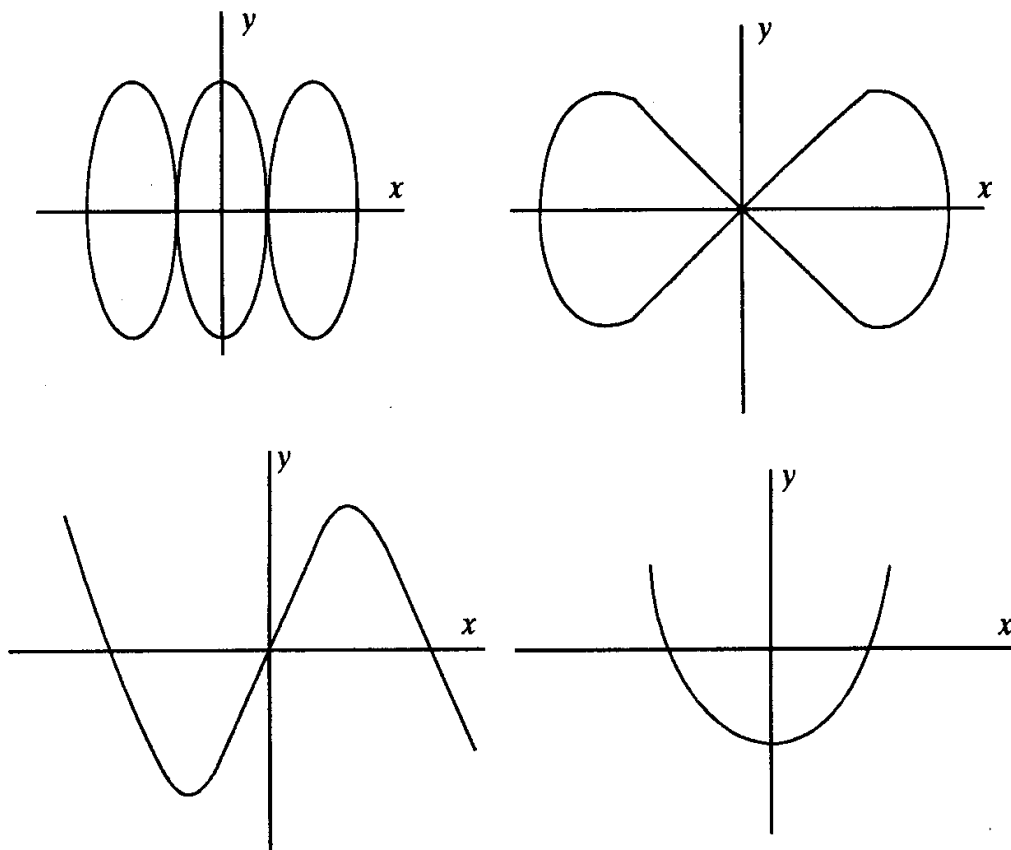
Фиг. 12.22. Фигура на Лисажу при равни честоти

В общия случай отношението на честотите е :

$$\frac{\text{честота по } y}{\text{честота по } x} = \frac{\text{брой на контурите по оста } x}{\text{брой на контурите по оста } y} ,$$

както е показано на фиг. 12.23.

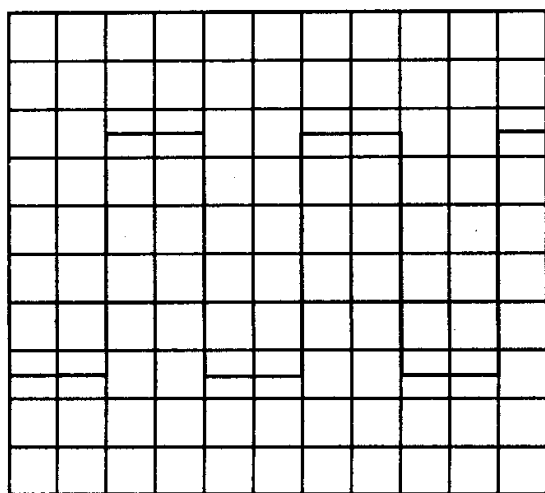
Вместо броя на контурите може да се вземе броят на пресечните точки на кривата с хоризонталната ос, прекарани произволно.



Фиг. 12.23

**Пример 12.3:**

На екрана на осцилоскопа е получено изображението от фиг. 12.24. Да се определят двойната амплитуда на сигнала и неговата честота, ако се използва сонда 10:1 при установена вертикална чувствителност 2 V/дел., а развивката е 10  $\mu$ s/дел.



Фиг. 12.24

**Решение:**

Броят на вертикалните деления между два максимума е 5 и, следователно, напрежението е

$$2U_m = 5 \cdot 2 \cdot 10 = 100 \text{ V} .$$

Броят на деленията за хоризонталното отклонение, съответстващо на един период на сигнала, е 4. Следователно:

$$T = 4 \cdot 10 = 40 \text{ } \mu\text{s} ,$$

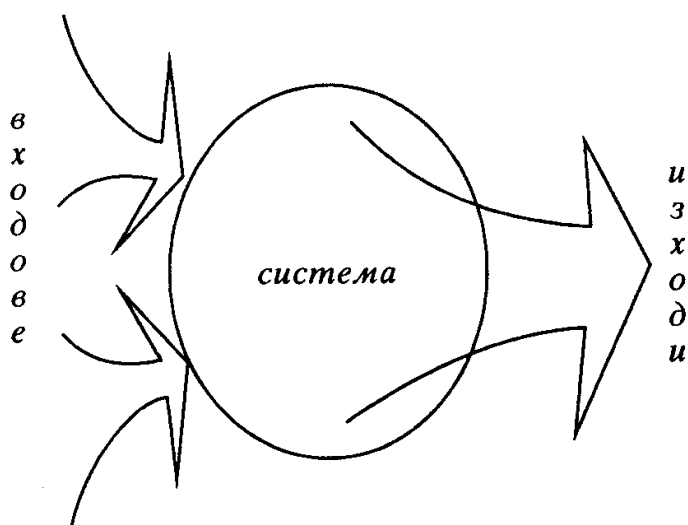
$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{40 \cdot 10^{-6}} = 25 \text{ kHz} .$$

## РАЗДЕЛ V. АВТОМАТИЧНО УПРАВЛЕНИЕ

### Тринадесета глава

#### СИСТЕМИ И ТЯХНОТО МАТЕМАТИЧЕСКО ОПИСАНИЕ

Всички машини и устройства, от които са изградени корабите, и самите кораби, могат да се разглеждат като съставени от отделни елементи, образуващи логично свързана система. С понятието *система* ще означаваме и различни йерархично свързани процеси и явления, протичащи в различни сфери на техниката. За да се разглеждат тези разнородни системи по еднакъв начин и за да се подчинят на еднакви определения и закони, е необходимо да се използват средствата на математиката. Математическото описание на системите представлява система от уравнения и неравенства и е прието да се нарича *математичен модел*. Математическите модели са в основата на всички стратегии за управление на системите и позволяват те да бъдат по-лесно изучени и обяснени.



Фиг. 13.1

Всяка *система* съдържа входи, наричани още *външни въздействия*, отразяващи влиянието на околната среда върху системата, и изходи, отразяващи променливите в системата, от които се интересуваме и е целесъобразно да бъдат измерени.

Поведението на системата във всеки един момент на времето може да бъде характеризирано от някои нейни параметри като курс, скорост, налягане, температура и др.

*Системата от параметри, които еднозначно определят поведението на системата при известни външни въздействия за определен малък период от време, ще наричаме променливи на състоянието. Променливите на състоянието са физически величини или техни математически функции, например производни, позволяващи да се опишат състоянията на системата във времето и изпълнението на задачата на управлението. Във всеки един момент на времето системата се намира в дадено състояние, опреде-*

лено еднозначно чрез стойностите на *променливите на състоянието*.

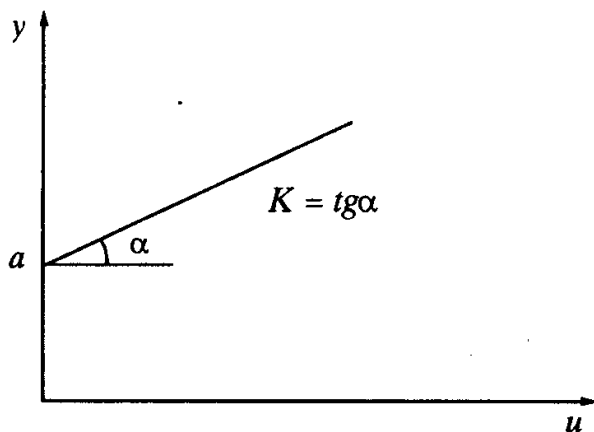
Нека като пример за система разгледаме помещение, в което температурата на въздуха се регулира. Променливи на състоянието ще бъдат температурите на стените, подът и таванът на помещението и температурата на въздуха в помещението. Входи (външни въздействия) се явяват температурите извън помещението, положението на вратите и прозорците на помещението, скоростта и температурата на въздушния поток през отворените врати и прозорци, количеството топлина, подвеждано или отвеждано от климатичната уредба на помещението. Ако ни интересува само температурата в помещението, системата ще има само един изход, но изходите могат да бъдат и повече - например друг изход може да е разходът на енергия за подържане на определената температура или стойността на тази енергия.

При описанието на системите ще приемем променливите на състоянието да се означават с „ $x$ “, входовете с „ $u$ “ и изходите с „ $y$ “.

Режимите на работа на всички устройства могат да се разделят на *статични* и *динамични*. *Статични* за режимите, при които променливите величини в устройството се запазват постоянни. Тези режими се наричат още установени, а изследването и анализът на съотношенията е прието да се означават като статика. Установеният режим е такова състояние на системата, при което входните и изходните му променливи остават постоянни. *Динамиката* изследва преминаването от едно установено състояние в друго.

### 13.1. Описание на системите в статичен режим

#### 13.1.1. Статични модели



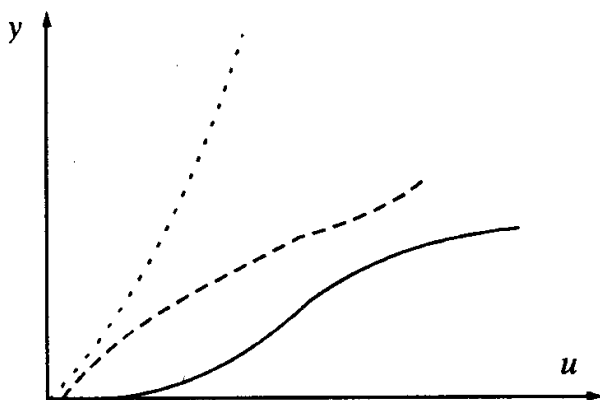
Фиг. 13.2

В статичния режим съществуват неизменни съотношения между входните и изходните променливи. В системи, съставени само от безинерционни елементи, съществуват само установени режими. Математическата зависимост, свързваща всеки един от изходите на елемента с някое от входните въздействия в установен режим, се нарича *статичен модел*  $y = f(u)$ , а графичното изразяване на тази зависимост - *статична характеристика*. За линейните елементи тази зависимост има вида  $y = a + ku$ , където  $a$  е коефициент, зависещ от стойностите на останалите входове;  $k$  - коефициент на пропорционалност между из-

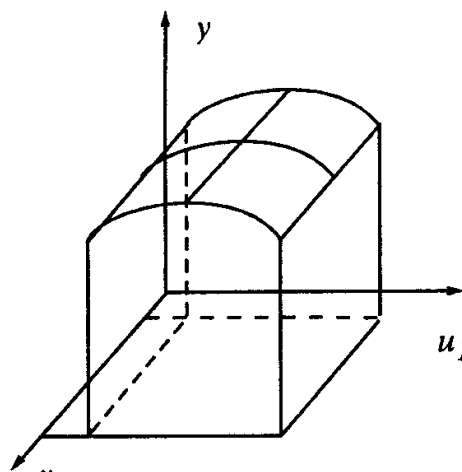
менението на входа и изхода, който е прието да се нарича коефициент на усилване или коефициент на предаване (фиг. 13.2). За линейните системи е в сила принципът на независимото действие на отделните въздействия - „принцип на суперпозицията“, и за елемент, подложен на няколко входни въздействия, статичният модел има вида  $y = a + k_1 u_1 + k_2 u_2 + \dots$ .

В общия случай, при повече от едно външно въздействие и нелинеен елемент аналитичният запис за всеки изход може да се представи както следва:  $y = f(u_1, u_2, \dots)$ , т.е. произволна функция на няколко променливи.

На фиг. 13.3 са показани статични характеристики на нелинейни системи. За да се онагледят влиянието на повече от един вход, на фиг. 13.4 е разгледан елемент с два входа, където статичната характеристика относно всеки от изходите се представя като повърхнината. При повече входове размерността на координатната система и повърхнината се увеличават.



Фиг. 13.3



Фиг. 13.4

За една система, съставена от множество елементи, свързани помежду си, изходните сигнали от един елемент са входни за друг и, като цяло, статическият модел на системата се записва като система алгебрични уравнения. За удобство, уравненията се записват в стандартна форма, като образуват две системи. В тези системи уравнения всички входни за цялата система сигнали отбелязваме с  $u$ , изходите с  $y$ , а вътрешните променливи с  $x$ .

Като пример ще дадем описанието на система с три вътрешни променливи, два входа и три изхода:

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + b_{11}u_1 + b_{12}u_2 = 0 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 + b_{21}u_1 + b_{22}u_2 = 0 \\ a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{33}x_3 + b_{31}u_1 + b_{32}u_2 = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} y_1 = c_{11}x_1 + c_{12}x_2 + c_{13}x_3 + d_{11}u_1 + d_{12}u_2 \\ y_2 = c_{21}x_1 + c_{22}x_2 + c_{23}x_3 + d_{21}u_1 + d_{22}u_2 \\ y_3 = c_{31}x_1 + c_{32}x_2 + c_{33}x_3 + d_{31}u_1 + d_{32}u_2 \end{cases} .$$

Първата система уравнения дава връзката между променливите в системата и входните въздействия, а чрез втората се намират стойностите на изходите. От коефициентите от двете системи може да се съставят четири матрици:

- матрица на състоянието,  $A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{32} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}$  ;

- матрица на входните въздействия,  $B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \\ b_{31} & b_{32} \end{bmatrix}$  ;

- матрица на наблюдение на състоянието,  $C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{32} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix}$  ;

- матрица на наблюдение на входовете,  $D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} \\ d_{21} & d_{22} \\ d_{31} & d_{32} \end{bmatrix}$  .

Когато се отчете, че вътрешните променливи, входните въздействия и изходите образуват вектори

$$\bar{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}, \quad \bar{u} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}, \quad \bar{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix},$$

статичният модел може да се запише и по-кратко векторно:

$$\begin{cases} 0 = A \times \bar{x} + B \times \bar{u} \\ \bar{y} = C \times \bar{x} + D \times \bar{u} \end{cases} .$$

Първото уравнение в тази система е прието да се нарича *уравнение на състоянието*, а второто уравнение - *на изхода или наблюдението*.

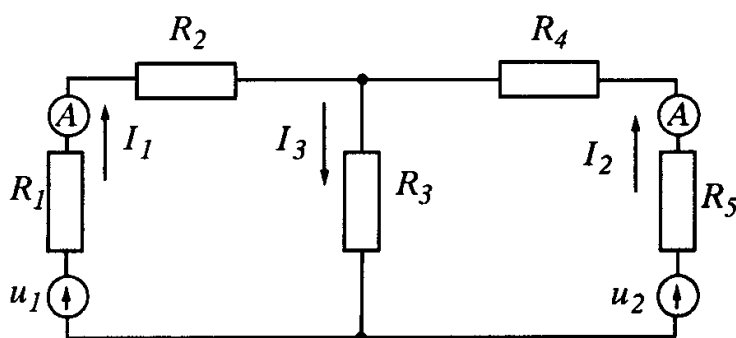
### Пример 13.1:

Да се направи статичен модел на електрическата верига, показана на фиг. 13.5, в която са зададени съпротивленията, входни сигнали са източниците на напрежение, а изходи - токовете през амперметрите.

#### Решение:

Използвайки законите на Кирхоф, можем да запишем:

$$\begin{cases} 0 = I_1 + I_2 + I_3 \\ u_1 = R_1 I_1 + R_2 I_1 + R_3 I_3 \\ u_2 = R_4 I_2 + R_5 I_2 + R_3 I_3 \end{cases} .$$



Фиг. 13.5

Тъй като входове за системата са напреженията на източниците  $u_1$  и  $u_2$ , а изходи - токовете  $I_1$  и  $I_2$  през двата амперметра, като променливи в схемата, които да са променливи на състоянията, ще изберем всички токове. Тогава тази система може да се преработи:

$$\begin{cases} 0 = I_1 + I_2 + I_3 + 0 \cdot u_1 + 0 \cdot u_2 \\ 0 = (R_1 + R_2) \cdot I_1 + 0 \cdot I_2 + R_3 \cdot I_3 + (-1) \cdot u_1 + 0 \cdot u_2 \\ 0 = 0 \cdot I_1 + (R_4 + R_5) \cdot I_2 + R_3 \cdot I_3 + 0 \cdot u_1 + (-1) \cdot u_2 \end{cases} .$$

За да получим общия вид, посочен по-горе, е необходимо да положим  $I_1 = x_1$ ,  $I_2 = x_2$ ,  $I_3 = x_3$ , а поради съвпадението на означенията на източниците на напрежение и външните въздействия, не е необходимо да ги заместваме:

$$\begin{cases} 0 = x_1 + x_2 + x_3 + 0 \cdot u_1 + 0 \cdot u_2 \\ 0 = (R_1 + R_2) \cdot x_1 + 0 \cdot x_2 + R_3 \cdot x_3 + (-1) \cdot u_1 + 0 \cdot u_2 \\ 0 = 0 \cdot x_1 + (R_4 + R_5) \cdot x_2 + R_3 \cdot x_3 + 0 \cdot u_1 + (-1) \cdot u_2 \end{cases} .$$

От тук, коефициентите пред променливите съставят матриците  $A$  и  $B$ :

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ R_1 + R_2 & 0 & R_3 \\ 0 & R_4 + R_5 & R_3 \end{bmatrix} , \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} .$$

Уравнението на наблюдението (на изходите) трябва да изрази връзката на величините, от които се интересуваме, с променливите на състоянието и входните въздействия. В конкретния пример това са токовете през амперметрите или променливите на състоянието  $x_1$  и  $x_2$ . За получаването на стойностите на изходите записваме втората група уравнения. Тъй като  $y_1 = x_1$  и  $y_2 = x_2$ , то коефициентите в уравненията, с изключение на  $c_{11}$  и  $c_{22}$ , ще бъдат равни на нула.

Оттук и матриците  $C$  и  $D$  ще бъдат

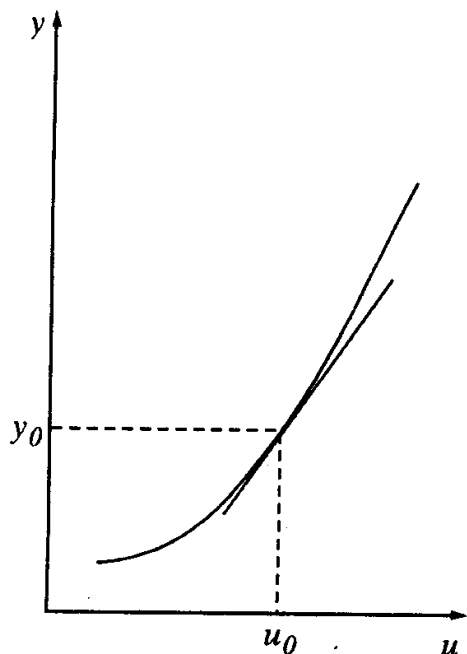
$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Представянето на системите в матрична форма дава възможност за използване на компютърни програми за решаване на задачи. Такава програмна система е MatLab и използването ѝ е показано в приложението.

### 13.1.2. Линеаризация на статичните модели

Наличието на нелинейности в значителна степен затруднява анализа на работата на нелинейните елементи, поради което е много по-добре да се разглеждат техни линеаризирани модели. Линеаризираният модел е в сила само за малка област около работната точка, където влиянието на нелинейностите е пренебрежимо малко.

Да разгледаме статичната характеристика на елемент с един вход и един изход. В този случай, както е показано на фигурата, замества кривата с допирателната към нея в работната точка. Аналитичният израз на допирателната е  $y = f(u_0) + \left( \frac{df}{du} \right)_{u_0} (u - u_0)$ . В



този случай линеаризираният статичен модел има вида  $y = y_0 + k \Delta u$ , където  $y_0$  е стойността на изхода в работната точка,  $k$  - коефициент на усилване или коефициент на предаване, а  $\Delta u$  - изменението на входната променлива.

Можем да изместим координатната система, така че началото ѝ да съвпада с работната точка, и уравнението ще придобие вида  $\Delta y = k \Delta u$ .



В общия случай, когато елементът е с много входи и изходи, за линеаризирания статичен модел на всеки един изход ще имаме

$$y_i = f(\bar{u})_0 + \left(\frac{\partial f}{\partial u_1}\right)_0 + \left(\frac{\partial f}{\partial u_2}\right)_0 + \left(\frac{\partial f}{\partial u_3}\right)_0 + \dots ,$$

където  $f(\bar{u})_0$  е стойността на функцията в точката в областта, на която се прави линеаризацията, и се определя от стойностите на вътрешните променливи, а  $\left(\frac{\partial f}{\partial u_i}\right)_0$  са частните производни на функцията по отношение на

всеки от входовете, даващи скоростта на изменението на изхода в зависимост от промяната на всеки от входовете за разглежданата работна точка.

В практиката обикновено се налага да се линеаризират обектите за регулиране, тъй като останалата част на системата се състои от елементи, специално конструирани за целите на управлението и те са обикновено линейни.

Когато системата работи при големи промени на входните въздействия, е необходимо да се направи линеаризация за всички най-характерни работни точки и всеки от получените линеаризирани статични модели ще е валиден в областта на съответната работна точка.

### 13.2. Динамични модели на системите и елементите им

Преходът на системите от едно установено състояние в друго установено състояние се нарича *динамика на системите*, а математичното описание на този преходен режим - *динамичен модел*. За описанието на динамичните модели се използват диференциални уравнения и други характеристики, неразривно свързани с диференциалните уравнения.

За съставянето на диференциалните уравнения се използват законите от дадената област на науката и затова ще се спрем на динамични модели за системи от елементи с различна физическа същност.

#### 13.2.1. Динамични модели на електрически вериги

Най-простият начин за съставяне на диференциалните уравнения, описващи динамиката в електрическите вериги, е използването на законите на Кирхоф. За вериги с много елементи е важно да се запишат точно уравненията по добре организиран алгоритъм. За това съществуват много методи. Тук ще се спрем само на посочения прост метод:

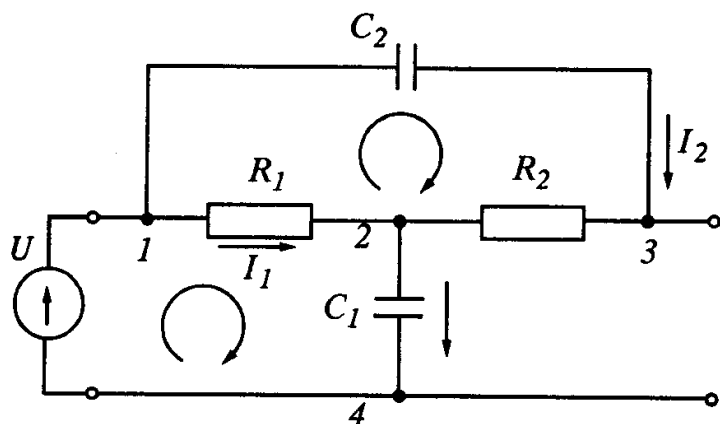
1. Приемат се произволни положителни посоки на токовете в отделните клонове.

2. За всички възли, с изключение на един, се прилага първият закон на Кирхоф.

3. За независимите контури се избира посока на обхождане и се записват уравнения по втория закон на Кирхоф.

В получените диференциални уравнения неизвестните се разделят и групират, за да добият формата на Коши, приета за основа на пространството на състоянията. Демонстрация на метода е следният пример:

### Пример 13.2:



Фиг. 13.7

Да се съставят диференциалните уравнения, описващи електрическата верига, представена на фиг. 13.7, даващи връзката на входното напрежение  $u$  с токовете и напреженията във веригата.

#### Решение:

За възел 2 съставяме уравнение по първия закон на Кирхоф, а за двата независими кон-

тура - уравнения по втория закон на Кирхоф:

$$\begin{cases} i_1 + i_2 - i_3 = 0 \\ R_1 \cdot i_1 - R_2 \cdot i_2 = u_{C2} \\ R_1 \cdot i_1 = u_{ax} - u_{C1} \end{cases}$$

В получената система при известни напрежения на входа и кондензаторите в началния момент на времето могат да бъдат получени моментните стойности на токовете. Напреженията върху кондензаторите и токовете през тях са взаимно зависими ( $i_3 - u_{C1}$  и  $i_2 - u_{C2}$ ), което означава, че при протичане на ток през кондензаторите напреженията им ще се променят във времето. Затова токовете  $i_3$  и  $i_2$  в кондензаторите се изразяват чрез капацитетите им и производната на напреженията върху тях, и се заместват в съответните уравнения:

$$i_3 = C_1 \cdot \frac{du_{C1}}{dt}, \quad i_2 = C_2 \cdot \frac{du_{C2}}{dt},$$

$$\begin{cases} i_1 + C_2 \cdot \frac{du_{C2}}{dt} - C_1 \cdot \frac{du_{C1}}{dt} = 0 \\ R_1 \cdot i_1 - R_2 \cdot C_2 \cdot \frac{du_{C2}}{dt} = u_{C2} \\ R_1 \cdot i_1 = u_{вх} - u_{C1} \end{cases}$$

Получиха се две диференциални и едно алгебрично уравнения с три неизвестни, като за описание на динамиката на електрическа верига с два реактивни елемента са достатъчни две диференциални уравнения.

Динамичният модел на разглежданата електрическа верига се описва с горната система от уравнения и може да се представи по няколко стандартни начина, разгледани в т. 13.3 и т. 13.4.

### 13.2.2. Динамични модели на механични системи

Основа на съставяне на динамичните модели или уравненията на движението на всяка механична система е законът на Нютон

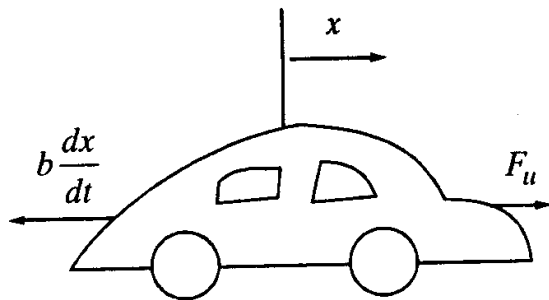
$$\vec{F} = m\vec{a} \quad ,$$

където  $\vec{F}$  е векторната сума на всички сили, приложени към тялото, в нютони ( $N$ );

$\vec{a}$  - векторът на ускорението на тялото, с отчитане на инерциалната координатна система (т.е. нито се ускорява, нито се завърта по отношение на звездите), наричано често инерциално ускорение, в метри за секунда на квадрат ( $m/s^2$ );

$m$  - масата на тялото, в килограми ( $kg$ ).

Приложението на този закон изисква дефинирането на система координати за пресмятане на движението на телата (позиция, скорост, ускорение), определяне на силите, прилагани към тялото, като се използват схеми на свободните тела, след което се написват уравненията. Процедурата е най-проста, когато координатите се избират да съвпадат с началната позиция, защото в този случай ускорението, намерено по закона на Нютон, е просто втора производна от координатите на позицията.



Фиг. 13.8

### Пример 13.3:

Да се съставят уравнения на движение за скоростта и движението напред на автомобил, като се допусне, че силата, предавана от двигателя, е пропорционална на положението на педала на газта.

#### Решение:

За опростяване ще приемем, че инерционният момент на колелата е незначителен и има триене, спиращо движението на колата, което е пропорционално на скоростта ѝ на движение. Колата може да бъде представена приблизително със следната схема на свободното тяло, като се дефинира една координата, свързана с положението на автомобила в началния момент:

$$F_u - b \cdot \frac{dx}{dt} = m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} \quad \text{или} \quad \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{b}{m} \frac{dx}{dt} = \frac{F_u}{m}$$

Като се приеме, че силата, предавана от двигателя на автомобила към колелата му,  $F_u$  е пропорционална на положението на педала за ускорение,  $u$ , можем да запишем

$$F_u = k \cdot u, \text{ то } \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{b}{m} \frac{dx}{dt} = \frac{k \cdot u}{m},$$

а ако променливата, която ни интересува, е скоростта:

$$\frac{dv}{dt} + \frac{b}{m} v = \frac{k \cdot u}{m}$$

Най-често при записването на уравненията се допускат грешки при определянето на знаците. Преди да продължим със следващите стъпки, трябва да проверим дали всички коефициенти пред всяка от променливите са с еднакви знаци. Ако това не е изпълнено, трябва да потърсим грешка при съставянето на уравненията. Когато разглеждаме устойчивостта на системите ще кажем, че за да е устойчива една физически осъществима система е необходимо това условие. В случая коефициентите пред  $x$  и производните му в първото уравнение, и  $v$  и производните му от второто уравнение са положителни, което съответства на действителността (автомобилът без прилагането на външни сили няма да се ускорява или забавя).

Законът на Нютон може да се приложи и за въртящи се системи. За едномерна система той има вида

$$M = J\alpha,$$

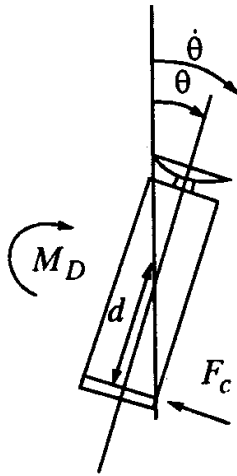
където:  $M$  е сума от всички моменти, относно центъра на тежестта на тялото;

$J$  - инерционен момент на тялото относно този център;

$\alpha$  - ъглово ускорение на тялото.

### Пример 13.4:

Комуникационните спътници се нуждаят от управление на ъгъла, под който са обвърнати към земята антените им, на ъгъла, под който слънчевите лъчи попадат върху слънчевите панели и др. Антените трябва да са насочени към приемната станция на Земята, докато слънчевите панели трябва да са перпендикулярни на слънчевите лъчи, с цел максимален добив на електрическа енергия. За да се постигне това е необходимо управление относно трите оси. Ние ще разгледаме част от управлението само по една от осите, което е по-лесно и достатъчно, за да се демонстрира принципът.



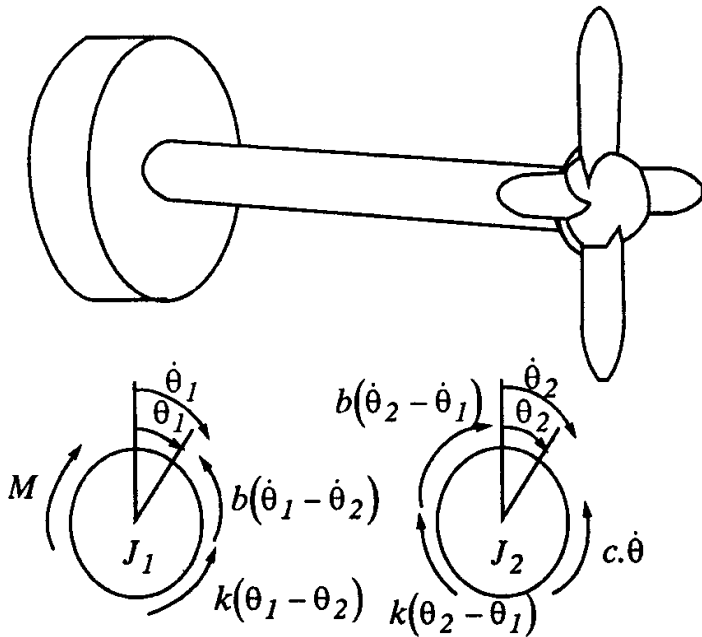
Фиг. 13.9

#### Решение:

Върху спътника по тази ос действа силата  $F_c$ , която създава момент  $F_c d$ . Вследствие на несиметричността на слънчевите панели и формата на спътника се появява и момент  $M_D$  от слънчевото налягане:

$$F_c d + M_D = J \frac{d^2 \theta}{dt^2} \quad \text{или} \quad \frac{d^2 \theta}{dt^2} = \frac{F_c d}{J} + \frac{M_D}{J}$$

Изходният параметър  $\theta$  може да се получи чрез двукратно интегриране на сумата на входа.



Фиг. 13.10

### Пример 13.5:

Да се намерят уравненията на движение на задвижването на корабен гребен винт, като се отчете и еластичността на гребния вал, свързващ главния двигател и винта. При възникване на резонанс в тази система е възможно скъсване на гребния вал.

Моделът да се разглежда като линеен за отклоненията от дадена работна точка, като съпротивлението на гребния винт се

приеме  $M_c = c \frac{d\theta}{dt}$ .

### Решение:

За съставянето на уравненията се използват диаграми на моментите на свободните тела, показани на фиг. 13.10.

Разделяме системата от две тела, като връзките заместваме с противоположно действащи сили.

Върху първото тяло (маховика на дизелов двигател или ротора на гребен електродвигател) действат моментите:

- момент, развиван от главния двигател,  $M$ ;
- момент от усукването на гребния вал:  $k \cdot (\theta_1 - \theta_2)$ .

Върху второто тяло действат моментите:

- момент от усукването на гребния вал:  $k \cdot (\theta_1 - \theta_2)$ ;
- момент от съпротивлението на винта:  $C \cdot \frac{d\theta}{dt}$ .

$$\begin{cases} J_1 \frac{d^2\theta_1}{dt^2} = M - k(\theta_1 - \theta_2) \\ J_2 \frac{d^2\theta_2}{dt^2} = -k(\theta_2 - \theta_1) - c \frac{d\theta_2}{dt} \end{cases}$$

В някои случаи механичните системи съдържат постъпателно и въртливо движение. Процедурата на съставяне на уравненията на движение е същата: скициране на диаграми на свободните тела, дефиниране на координатите и положителните посоки, нанасяне на всички действащи сили, външни и заместващи връзките, съставяне на уравненията и проверка на знаците.

Обикновено като резултат се получават уравнения на движение, които са нелинейни. Такива уравнения са много по-трудни за решаване от линейните и много по-трудни за категоризиране. Възможно е моделите да се линеаризират, с цел достъп до линейните методи за анализ. Линеяният модел и неговият анализ могат да се използват за целите на конструиране на системи за управление, когато системата работи в линейната област. Те могат да послужат за основа при симулиране на системите за управление на компютри, където допълнително се въвеждат и съществуващите нелинейности.

**Обобщение:** Съставянето на математични модели на движението на телата става въз основа на законите на Нютон за движението. Методът включва следните стъпки:

1. Избиране на променливи, които еднозначно да определят позицията на обекта.

2. Начертаване на схема на свободното тяло за всеки елемент на системата и означаване на всички сили, действащи върху него, и ускоренията, които получава.

3. Прилагане на законите на Нютон.

4. Комбиниране на уравненията и изключване на неизвестните (вътрешните за системата) сили.

Комбинирането на уравненията, с цел изключване на вътрешните сили, може да стане като предварително се изберат по-интелигентно координатите. Представени в различни координатни системи, първоначалните уравнения за всяко тяло могат да изглеждат коренно различни. След комбинирането и изключването на вътрешните сили те довеждат до еквивалентни системи уравнения.

### 13.2.3. Модели на електромеханични системи

Електрическият ток и електромагнитното поле си взаимодействат в много електромеханични системи. Преобразуване на енергията се извършва в електрическите машини - линейни и въртящи се електродвигатели, генератори, датчици за движение и др. За да се опише действието на повечето от устройствата за електромеханично преобразуване на електроенергията, т.е. да се създаде динамичен модел на такова устройство, се използват основно три зависимости.

*Първата връзка* между тока и магнитното поле е, че всеки проводник, провеждащ електрически ток, създава и магнитно поле. Напрегнатостта на полето на навит проводник е право пропорционална на тока, който протича по навивките и броят им. Например магнитната индукция на намотка

с  $N$  навивки ще се представи с формулата  $B = \frac{\mu}{2\pi R} N \cdot i$ , където  $R$  е радиусът на тороида,  $\mu$  - магнитната проницаемост,  $i$  - силата на тока.

сът на тороида,  $\mu$  - магнитната проницаемост,  $i$  - силата на тока.

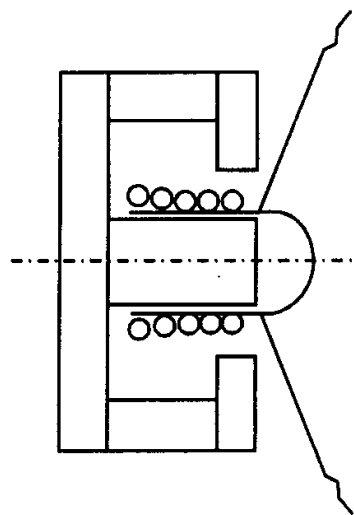
*Втората зависимост* свързва силата  $F$ , действаща на заряд  $q$ , движещ се със скорост  $v$  в магнитно поле с магнитна индукция  $B$ , с количеството на заряда, неговата скорост и магнитната индукция на полета чрез формулата

$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$ . За електродвигателите, където зарядът се пренася по проводник перпендикулярно на магнитното поле, законът има вида  $F = Bli$ , където  $l$  е дължината на проводника;  $i$  - силата на тока.

---

### Пример 13.6:

Говорителите за възпроизвеждане на звук от електрически сигнали обикновено съдържат постоянен магнит, който създава радиално магнитно поле във въздушната междина между полюсите. Те имат конструкция,



Фиг. 13.11

подобна на показаната на фиг. 13.11.

Под действието на силата, породена от електрическият ток в намотката, мембраната се движи наляво-надясно и създава звукови вълни във въздуха. Нека мембраната и намотката имат маса  $M$ , коефициент на триене  $b$ , магнитна индукция  $B = 0,5 T$  и бобина с 20 навивки с диаметър 2 cm. Да се намери уравнението на движение на мембраната.

**Решение:**

Токът и магнитната индукция  $B$  са перпендикулярни и пораждат сила  $F$ .

$$l = 20 \frac{2}{100} \pi = 1,26 m \quad ,$$

$$F = 0.5 \cdot 1.26 i = 0.63 i N \quad .$$

Механичното движение за маса  $M$  ще се описва, както следва:

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} = 0.63 i \quad .$$

Това диференциално уравнение описва движението на мембраната, като функция на тока  $i$ , задвижващ системата.

*Третата важна зависимост* е законът за електромагнитната индукция  $e(t) = Blv$ , определящ генерираното електродвижещо напрежение. Отчитането на това напрежение е необходимо, когато като входен сигнал в пример 13.6 се вземе напрежението към изводите на говорителя.

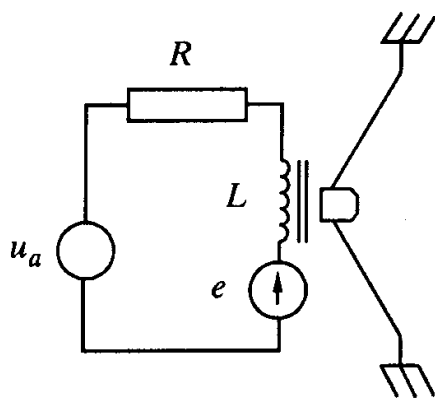
### Пример 13.7:

Нека разгледаме същият говорител, включен в електрическа верига, както е показано на фиг. 13.12.

Да се намерят диференциалните уравнения, описващи системата, като входен сигнал е напрежението  $u_a$ , а изход - преместването на мембраната  $x$ . Да се отчете съпротивлението във веригата  $R$  и индуктивността на намотката  $L$ .

**Решение:**

В резултат на движението, описано с уравненията в предходния пример, във веригата ще



Фиг. 13.12



се появи напрежението, индуцирано в намотката:

$$e_M = Bl \frac{dx}{dt} = 0.63 \frac{dx}{dt} .$$

Механичното движение се описва със същото уравнение:

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} = 0.63i .$$

Електрическата верига се описва с диференциално уравнение

$$L \frac{di}{dt} + Ri = u_a - 0.63 \frac{dx}{dt} .$$

Тези две диференциални уравнения съставляват динамичния модел на говорителя.

### 13.3. Представяне на динамичните модели в пространството на състоянията

С развитието на изчислителната техника, въз основа на съвременните персонални компютри най-широко разпространение за описание на динамичните модели получи системата диференциални уравнения от първи ред.

Подобно на представянето на статичните модели, разгледано в т. 13.1, динамичните също могат да се представят в две системи уравнения: първата - от диференциални уравнения от първи ред, даваща връзката между променливите в системата и входовете; и втората - от алгебрични уравнения, описваща състоянието на изходите в зависимост от променливите на състоянието и входовете. В общия случай реалните системи се описват със системи от нелинейни уравнения, но ние ще се спрем само на по-простия случай - линейните системи.

Използвайки същите означения, както при статичните системи: входове -  $u = u(u_1, u_2, u_3, \dots)$ , изходи -  $y = y(y_1, y_2, y_3, \dots)$  и променливи на състоянието -  $x = x(x_1, x_2, x_3, \dots)$ , системите ще запишем, както следва:

- уравнения на състоянието:

$$\left| \begin{array}{l} \frac{dx_1}{dt} = a_{11} \cdot x_1 + a_{12} \cdot x_2 + a_{13} \cdot x_3 + \dots + b_{11} \cdot u_1 + b_{12} \cdot u_2 + \dots \\ \frac{dx_2}{dt} = a_{21} \cdot x_1 + a_{22} \cdot x_2 + a_{23} \cdot x_3 + \dots + b_{21} \cdot u_1 + b_{22} \cdot u_2 + \dots \\ \dots \end{array} \right.$$

- уравнения на изходите:

$$\left\{ \begin{array}{l} y_1 = c_{11} \cdot x_1 + c_{12} \cdot x_2 + c_{13} \cdot x_3 + \dots + d_{11} \cdot u_1 + d_{12} \cdot u_2 + \dots \\ y_1 = c_{21} \cdot x_1 + c_{22} \cdot x_2 + c_{23} \cdot x_3 + \dots + d_{21} \cdot u_1 + d_{22} \cdot u_2 + \dots \\ y_1 = c_{31} \cdot x_1 + c_{32} \cdot x_2 + c_{33} \cdot x_3 + \dots + d_{31} \cdot u_1 + d_{32} \cdot u_2 + \dots \\ \dots \end{array} \right. ,$$

или, представени в матричен вид, както при статичните системи:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\bar{x}}{dt} = A \times \bar{x} + B \times \bar{u} \\ \bar{y} = C \times \bar{x} + D \times \bar{u} \end{array} \right. .$$

Както се вижда от записа на двете матрични уравнения, определящи (основни характеристики) са матриците  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$ , които представят системите.

За поясняване на този начин на представяне ще разгледаме отново някои от примерите от предходния параграф и получените диференциални уравнения ще приведем във форма на пространство на състоянията, която, по същество, е формата на Коши за представяне на системи диференциални уравнения:

### Пример 13.8:

Да се представят диференциалните уравнения, описващи работата на електрическа верига от пример 13.2, във формата на пространство на състоянията.

### Решение:

Като решение на пример 13.2 бяха получени следните уравнения:

$$\left\{ \begin{array}{l} i_1 + c_2 \cdot \frac{du_{c2}}{dt} - c_1 \cdot \frac{du_{c1}}{dt} = 0 \\ R_1 \cdot i_1 - R_2 \cdot c_2 \cdot \frac{du_{c2}}{dt} = u_{c2} \\ R_1 \cdot i_1 = u_{вх} - u_{c1} \end{array} \right. .$$

За привеждане във формата на Коши трябва да се изберат променливи на състоянието и да се подредят уравненията. Във вериги с кондензатори е удобно като променливи на състоянието да се избират напреженията върху кондензаторите, а във вериги с индуктивности - токовете през индуктивностите.

Динамиката на електрическите вериги се описва еднозначно от толкова променливи на състоянието, колкото са реактивните елементи във веригата. Като спазваме изложеното по-горе, избираме за променливи на със-

тоянието да се въведат напреженията върху кондензаторите.

Избират се  $x_1 = u_{c1}$ ,  $x_2 = u_{c2}$ ,  $u = u_{ex}$ . Тогава

$$\begin{cases} i_1 + c_2 \cdot \frac{dx_2}{dt} - c_1 \cdot \frac{dx_1}{dt} = 0 \\ R_1 \cdot i_1 - R_2 \cdot c_2 \cdot \frac{dx_2}{dt} = x_2 \\ R_1 \cdot i_1 = u - x_1 \end{cases} .$$

За да съставим уравнението на състоянието при две променливи на състоянието ще са ни необходими две диференциални уравнения от първи ред, като във всяко има първа производна само на една променлива. Затова заместваме тока от третото уравнение в първото и второто:

$$\begin{cases} \frac{u - x_1}{R_1} + c_2 \cdot \frac{dx_2}{dt} - c_1 \cdot \frac{dx_1}{dt} = 0 \\ u - x_1 - R_2 \cdot c_2 \cdot \frac{dx_2}{dt} = x_2 \end{cases} .$$

Второто уравнение чрез пренареждане лесно се привежда в стандартна форма:

$$\frac{dx_2}{dt} = -\frac{1}{R_2 \cdot c_2} x_1 - \frac{1}{R_2 \cdot c_2} x_2 + \frac{1}{R_2 \cdot c_2} u .$$

В първото уравнение имаме производни и на двете променливи на състоянието и, тъй като е необходимо да остане само производната на първата променлива, изключваме втората, като я заместваме с полученото от второто уравнение. След това подреждаме уравнението в стандартна форма:

$$\frac{1}{R_1} u - \frac{1}{R_1} x_1 + c_2 \cdot \left( -\frac{1}{R_2 \cdot c_2} x_1 - \frac{1}{R_2 \cdot c_2} x_2 + \frac{1}{R_2 \cdot c_2} u \right) - c_1 \frac{dx_1}{dt} = 0 ,$$

$$\frac{dx_1}{dt} = -\frac{R_1 + R_2}{R_1 \cdot R_2 \cdot c_1} x_1 - \frac{1}{R_2 \cdot c_1} x_2 + \frac{R_1 + R_2}{R_1 \cdot R_2 \cdot c_1} u .$$

Така за уравненията на състоянието получаваме

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = -\frac{R_1 + R_2}{R_1 \cdot R_2 \cdot c_1} x_1 - \frac{1}{R_2 \cdot c_1} x_2 + \frac{R_1 + R_2}{R_1 \cdot R_2 \cdot c_1} u \\ \frac{dx_2}{dt} = -\frac{1}{R_2 \cdot c_2} x_1 - \frac{1}{R_2 \cdot c_2} x_2 + \frac{1}{R_2 \cdot c_2} u \end{cases} .$$

Тези уравнения определят матриците  $A$  и  $B$ :

$$A = \begin{bmatrix} \frac{(R_1 + R_2)}{C_1 \cdot R_1 \cdot R_2} & -\frac{1}{C_1 \cdot R_2} \\ -\frac{(R_1 + R_2)}{C_2 \cdot R_2} & -\frac{1}{C_2 \cdot R_2} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{(R_1 + R_2)}{C_1 \cdot R_1 \cdot R_2} \\ \frac{1}{C_2 \cdot R_2} \end{bmatrix}.$$

За изходи избираме:

- $y_1$  - ток  $i_1$  през съпротивлението  $R_1$ ;
- $y_2$  - ток  $i_2$  през  $C_2$ ;
- $y_3$  - ток  $i_3$  през кондензатора  $C_2$ ;
- $y_4$  - напрежението между точки 3 и 4.

Изходите трябва да получим като ги изразим чрез променливите на състоянието и външните въздействия. Така уравнението на изхода ще бъде

$$\begin{cases} y_1 = i_1 = \frac{u_{C1} - u_{\text{вх}}}{R_1} = \frac{1}{R_1} \cdot x_1 + 0 \cdot x_2 + \frac{1}{R_1} \cdot u \\ y_2 = i_2 = \frac{u_{\text{вх}} + u_{C2} - u_{C1}}{R_2} = -\frac{1}{R_2} \cdot x_1 + \frac{1}{R_2} \cdot x_2 + \frac{1}{R_2} \cdot u \\ y_3 = i_3 = i_1 + i_2 = \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \cdot x_1 + \frac{1}{R_2} \cdot x_2 - \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \cdot u \\ y_4 = u_{\text{вх}} + u_{C2} = x_2 + u = 0 \cdot x_1 + 1 \cdot x_2 + 1 \cdot u \end{cases}$$

Оттук матриците ще бъдат:  $C = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_1} & 0 \\ -\frac{1}{R_2} & \frac{1}{R_2} \\ \frac{R_2 - R_1}{R_1 \cdot R_2} & \frac{1}{R_2} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_1} \\ \frac{1}{R_2} \\ \frac{R_1 - R_2}{R_1 \cdot R_2} \\ 1 \end{bmatrix}.$

### Пример 13.9:

Да се представи динамичният модел от пример 13.5, описващ движението на корабен гребен винт в пространство на състоянията.

**Решение:**

Получените в примера диференциални уравнения са от втори ред:

$$\begin{cases} J_1 \frac{d^2\theta_1}{dt^2} = M - k(\theta_1 - \theta_2) \\ J_2 \frac{d^2\theta_2}{dt^2} = -k(\theta_2 - \theta_1) - C \frac{d\theta_2}{dt} \end{cases}$$

За всяко диференциално уравнение от втори ред трябва да се въведат по две координати (променливи) на състоянието. Като координати избираме  $x_1 = \frac{d\theta_1}{dt}$ ,  $x_2 = \theta_1$ ,  $x_3 = \frac{d\theta_2}{dt}$ ,  $x_4 = \theta_2$ , вход  $u = M$  и уравненията се преобразуват в

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = \frac{k}{J_1} x_2 + \frac{k}{J_1} x_4 + \frac{1}{J_1} M \\ \frac{dx_2}{dt} = x_1 \\ \frac{dx_3}{dt} = \frac{k}{J_1} x_2 - \frac{k}{J_2} x_4 \\ \frac{dx_4}{dt} = x_3 \end{cases}$$

От тези уравнения се извличат матриците  $A$  и  $B$ .

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \frac{k}{J_1} & 0 & \frac{k_s}{J_1} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{k_s}{J_2} & 0 & -\frac{k_s}{J_2} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{J_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Ако за изход приемем усукването на вала  $Y = X_2 - X_4$ , то за матриците  $C$  и  $D$  ще получим  $C = [0 \ 1 \ 0 \ -1]$ ,  $D = 0$ .

---

### 13.4. Други начини за описание на динамичните модели

За описание на динамичните модели в миналото се използват предимно системи диференциални уравнения от висок ред, даващи връзката на всеки един от изходите с входовете, които му влияят. За улеснение уравненията се алгебризират посредством различни преобразувания, най-вече преобразуването на Лаплас. Затова научните източници представят и този вид динамични модели - обект на настоящата глава.

#### 13.4.1. Преобразуване на Лаплас

Преобразуването на Лаплас е метод за преобразуване на диференциалните уравнения в алгебрични, които се решават по-лесно. За да разберем същността на това математическо преобразуване ще разгледаме друго просто математическо преобразуване, позволяващо да се замести операцията умножение с операцията събиране - логаритмуването. Например произведението  $A$  на числата  $B$  и  $V$  след логаритмично преобразуване има вида:

$$\lg A = \lg B + \lg V .$$

При сумиране в дясната част на равенството получаваме числото  $\Gamma$ . Така

$$\lg A = \Gamma .$$

За да намерим  $A$ , е необходимо да извършим обратна трансформация, т.е. да антилогаритмуваме:  $A = \text{антилогаритъмът} (\Gamma)$ .

Трансформацията на Лаплас е подобен тип математическа операция. Диференциалните уравнения, описващи поведението на системите във времето, се преобразуват в алгебрични уравнения, нямащи връзка с времето и позволяващи чрез използване на простите алгебрични операции да се изрази решението на уравнението като функция на новата променлива. След това е необходимо да се направи обратна трансформация, подобно на антилогаритмуването, за да се намери решението във временната област.

Френският математик Лаплас (1749-1827) е открил метод за решаване на диференциални уравнения като умножава всички членове на уравнението с величината  $e^{-pt}$  и след това ги интегрира във времето от нула до безкрайност;  $p$  е константа с размерност  $1/t$ . Резултатът се нарича *преобразуване на Лаплас*. За функцията  $f(t)$  то изглежда по следния начин:

$$\int_0^{\infty} f(t) e^{-pt} dt .$$

Прието е Лапласовите образи на функциите да се означават с главни букви, новият аргумент - с  $p$  (в западната литература по-често се използва  $s$ ), правото преобразуване - с  $L$ , а обратното - с  $L^{-1}$ . Така за горната функ-

ция можем да запишем:

$$F(p) = \int_0^{\infty} f(t) e^{-pt} dt = L[f(t)] ,$$

$$f(t) = L^{-1}[F(p)] .$$

Съществуват таблици, даващи връзката между временните функции и Лапласовите им образи.

### 13.4.2. Предавателни функции

Да приемем, че връзката между един от изходите,  $y_1$  и входовете на даден елемент или система се описва със следното диференциално уравнение:

$$(13.1) \quad a_0 \frac{d^2 y_1}{dt^2} + a_1 \frac{dy_1}{dt} + a_2 y_1 = b_0 \frac{d^2 u_1}{dt^2} + b_1 \frac{du_1}{dt} + b_2 u_1 + c_0 \frac{du_2}{dt} + c_1 u_2 .$$

В лявата част на уравнението се разполагат изходът  $y_1$  и неговите производни, а отдясно - входовете  $u_1, u_2$  и производните им.

Това уравнение може да се преобразува в алгебрично като се използва операторния метод на Лаплас:

$$a_0 p^2 Y(p) + a_1 p Y(p) + a_2 Y(p) = b_0 p^2 U_1(p) + b_1 p U_1(p) + b_2 U_1(p) + c_0 p U_2(p) + c_1 U_2(p),$$

$$(a_0 p^2 + a_1 p + a_2) Y(p) = (b_0 p^2 + b_1 p + b_2) U_1(p) + (c_0 p + c_1) U_2(p) .$$

Отношението, изразяващо връзката между образите на изхода и един от входовете, при положение, че образите на останалите входове са равни на нула, е прието да се нарича *предавателна функция*. За всеки изход съществуват толкова предавателни функции, колкото входа има елементът или системата. Предавателните функции се означават с  $W_i(p)$  и изразени аналитично имат вида

$$(13.2) \quad W_{u_1}(p) = \frac{Y(p)}{U_1(p)} = \frac{b_0 p^2 + b_1 p + b_m}{a_0 p^2 + a_1 p + a_n} ,$$

$$W_{u_2}(p) = \frac{Y(p)}{U_2(p)} = \frac{c_0 p + c_1}{a_0 p^2 + a_1 p + a_2} .$$

Ако с  $A(p)$  се означае полиномът в знаменателите  $a_0 p^2 + a_1 p + a_2$ , с  $B(p)$ -

полиномът  $b_0p^2 + b_1p + b_2$ , а полиномът  $c_0p + c_1$  - с  $C(p)$ , то предавателните функции могат да се изразят като

$$(13.3) \quad W_{u1}(p) = \frac{Y(p)}{U_1(p)} = \frac{B(p)}{A(p)} \quad ; \quad W_{u2}(p) = \frac{Y(p)}{U_2(p)} = \frac{C(p)}{A(p)} .$$

Вижда се, че всички предавателни функции имат един и същ знаменател. Корените на полинома в знаменателя се наричат *полюси на предавателната функция*, а корените на полинома в числителя - *нули на предавателната функция*. За физически реализуемите системи, степента на полинома в знаменателя е по-голяма или равна на тази в числителя. Ако предавателната функция няма нули и полюси с положителна реална част, тя се нарича *минимално фазова*, а когато има такива - *неминимално фазова*.

Като сравним диференциалното уравнение и предавателната функция ще установим, че знаменателят на предавателната функция е всъщност характеристичният полином на диференциалното уравнение. Характеристичният полином определя общото решение на диференциалното уравнение, определящо поведението на системата в преходен режим. По този начин преходните режими в една система зависят изключително от знаменателите на предавателните функции.

Освен общия начин на записване като рационална дроб, показан във формула (13.2), съществуват още два начина за представяне на предавателната функция, използвани в научната литература. И двата се основават на разлагането на предавателната функция на множители. Единият е чрез намирането на нулите  $n_i$  и полюсите  $p_i$  на предавателната функция и представяне във вида

$$(13.4) \quad W(p) = \frac{G(p - n_1)(p - n_2) \dots}{p^q (p - p_1)(p - p_2) \dots} ,$$

където  $G$  е коефициент;

$n_i$  - нули на предавателната функция;

$p_i$  - полюси на предавателната функция.

Степенният показател  $q$  изразява кратността на нулевите полюси и е прието да се нарича *степен на астатизма*, а коефициентът  $G$  се свързва с коефициента на усилване в статичен режим с равенството

$$(13.5) \quad K = \frac{G(-n_1)(-n_2) \dots}{0^q (-p_1)(-p_2) \dots} .$$



Вторият начин на представяне е

$$(13.6) \quad W(p) = \frac{K(\tau_1 p + 1)(\tau_2 p + 1) \dots}{p^q (T_1 p + 1)(T_2 p + 1) \dots}$$

чрез времеконстантите  $\tau = -\frac{1}{n_i}$  и  $T = -\frac{1}{p_j}$ , и коефициента на усилване в

статичен режим  $K$ . В този запис времеконстантите са показатели за скоростта на преходните процеси в системата.

Начините на представяне на предавателната функция е необходимо да се знаят, тъй като в различните литературни източници и програмни системи за симулация на работата на динамични системи се използват различни форми на представяне - например комплексната променлива  $p$ , заместваща времето в преобразуванието на Лаплас, се отбелязва с  $s$ , и др.

### Пример 13.10:

Да се намери предавателната функция на електрическата верига, представена в пример 13.2, като входен сигнал е напрежението на източника, а изходен - напрежението на клемите (*m. 3* и *m. 4*).

### Решение:

Получените в пример 13.2 диференциални уравнения

$$\left| \begin{array}{l} i_1 + c_2 \cdot \frac{du_{c2}}{dt} - c_1 \cdot \frac{du_{c1}}{dt} = 0 \\ R_1 \cdot i_1 - R_2 \cdot c_2 \cdot \frac{du_{c2}}{dt} = u_{c2} \\ R_1 \cdot i_1 = u_{ex} - u_{c1} \end{array} \right.$$

трябва да се преобразуват, като се състави едно диференциално уравнение, съдържащо само входните и изходните променливи  $u = u_{ex}$  и  $y = u_{ex} + u_{C2}$ , а останалите се изключат. Тъй като е прието изходната променлива в предавателната функция да се отбелязва с  $y$ , а входната с  $u$ , първо полагаме  $u_{ex} = u$  и  $u_{C2} = u - y$  и заместваме тока  $i_1$ , изразен от третото уравнение в първите две:

$$\left| \begin{array}{l} \frac{u - u_{C1}}{R_1} + C_2 \cdot \frac{d(u - y)}{dt} - C_1 \cdot \frac{du_{C1}}{dt} = 0 \\ u - u_{C1} - R_2 \cdot C_2 \cdot \frac{d(u - y)}{dt} = u - y \end{array} \right.$$

Освен променливите на входа и изхода, в двете уравнения са налице и променливата  $u_{C1}$ , и нейната производна. За това изразяваме  $u_{C1}$  от второто уравнение и намираме неговата първа производна, за да ги заместим в първото уравнение:

$$\begin{cases} \frac{u - u_{C1}}{R_1} + C_2 \cdot \frac{d(u - y)}{dt} - C_2 \cdot \frac{du_{C1}}{dt} = 0 \\ u_{C1} = y - R_2 \cdot C_2 \cdot \frac{d(u - y)}{dt} \\ \frac{du_{C1}}{dt} = \frac{du}{dt} - R_2 \cdot C_2 \cdot \frac{d^2(u - y)}{dt^2} \end{cases}$$

След заместването получаваме търсеното диференциално уравнение, което трябва да пренаредим така, че изходът и неговите производни да са в лявата част, а входът - отдясно:

$$\frac{1}{R_1} \cdot u - \frac{1}{R_1} \left( y - R_2 \cdot C_2 \cdot \frac{d(u - y)}{dt} \right) + C_2 \cdot \frac{d(u - y)}{dt} - C_1 \cdot \left( \frac{dy}{dt} - R_2 \cdot C_2 \cdot \frac{d^2(u - y)}{dt^2} \right) = 0,$$

$$R_2 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot \frac{d^2 y}{dt^2} + \left( \frac{R_2}{R_1} \cdot C_2 + C_2 + C_1 \right) \cdot \frac{dy}{dt} + \frac{1}{R_1} y = R_2 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot \frac{d^2 u}{dt^2} + \left( \frac{R_2}{R_1} \cdot C_2 + C_2 \right) \cdot \frac{du}{dt} + \frac{1}{R_1} \cdot u,$$

$$R_1 \cdot R_2 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot \frac{d^2 y}{dt^2} + (R_2 \cdot C_2 + R_1 \cdot C_2 + R_1 C_1) \cdot \frac{dy}{dt} + y =$$

$$= R_1 \cdot R_2 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot \frac{d^2 u}{dt^2} + (R_2 \cdot C_2 + R_1 \cdot C_2) \cdot \frac{du}{dt} + u$$

За опростяване на израза полагаме

$$a_1 = b_1 = C_1 \cdot C_2 \cdot R_2; \quad a_2 = C_1 \cdot R_1 + R_1 \cdot C_2 + R_2 \cdot C_2; \quad a_3 = 1;$$

$$b_2 = C_2 \cdot R_2 + R_1 \cdot C_2; \quad b_3 = 1$$

и получаваме стандартен вид на диференциалното уравнение:

$$a_1 \cdot \frac{d^2 y}{dt^2} + a_2 \cdot \frac{dy}{dt} + a_3 \cdot y = b_1 \frac{d^2 u}{dt^2} + b_2 \frac{du}{dt} + b_3 u$$

За получаването на предавателната функция е необходимо да се приложи преобразуването на Лаплас. При нулеви начални условия това става с

просто заместване на  $\frac{d}{dt}$  с  $p$  :

$$a_1 p^2 Y(p) + a_2 p Y(p) + a_3 Y(p) = b_1 p^2 U(p) + b_2 p U(p) + b_3 U(p) ,$$

$$(a_1 p^2 + a_2 p + a_3) Y(p) = (b_1 p^2 + b_2 p + b_3) U(p) .$$

Оттук лесно се намира отношението на изхода и входа, което всъщност е предавателната функция:

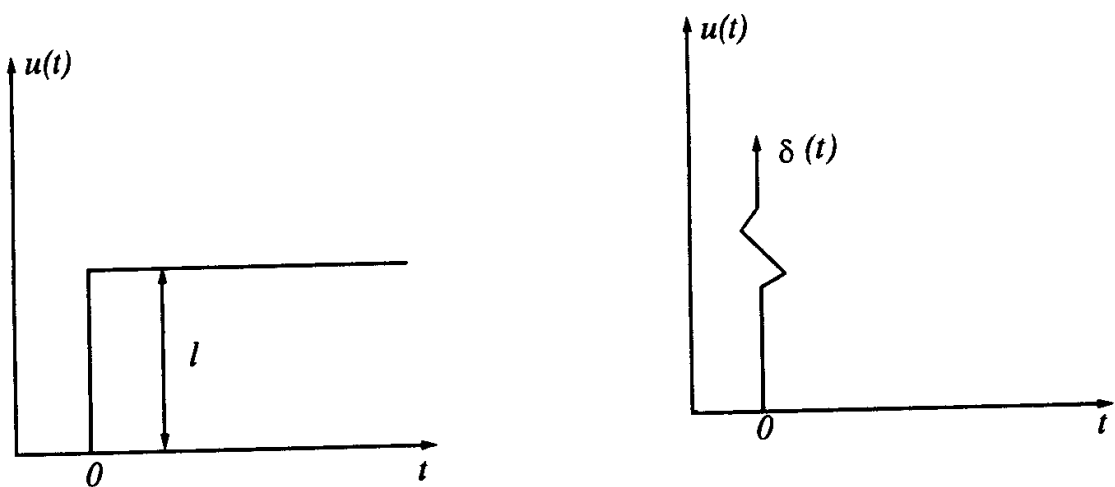
$$W(p) = \frac{Y(p)}{U(p)} = \frac{(b_1 p^2 + b_2 p + b_3)}{(a_1 p^2 + a_2 p + a_3)} .$$

Ако са дадени числените стойности на параметрите на веригата, може да се намерят корените на полиномите в числителя и знаменателя, след което предавателната функция може да се преобразува в останалите два вида, описани по-горе.

### 13.4.3. Временни характеристики

Много важна характеристика на системите е реакцията им на типови входни въздействия. По тази реакция може експериментално да се определят динамичните свойства на системи или части от тях, когато те са много сложни или параметрите им са неизвестни, и след това да се извърши математическото им описание. Като такива входни въздействия най-често се използват единичната функция и единичният импулс. Единичната функция

изпълнява условията  $f(t) = \begin{cases} 0 & \text{за } t < 0 \\ 1 & \text{за } t \geq 0 \end{cases}$  и се обозначава с  $1(t)$ .



Фиг. 13.13

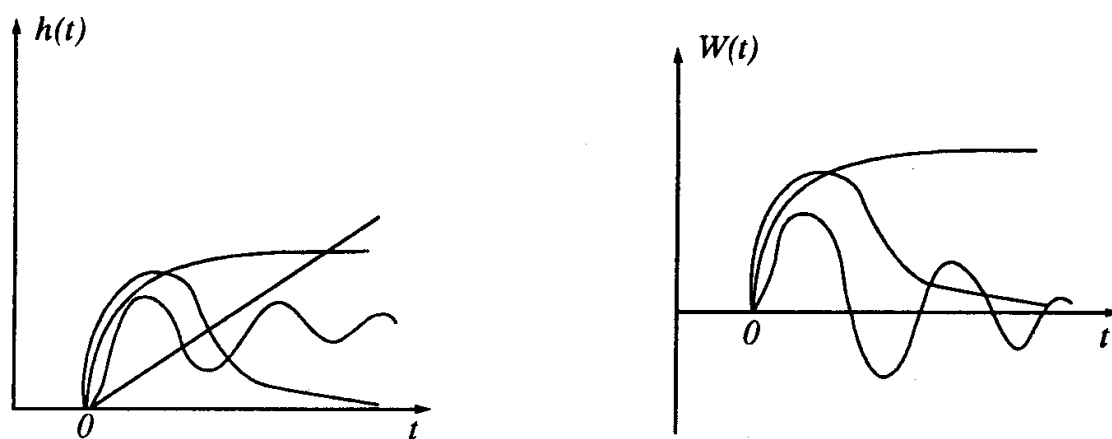
Единичният импулс е идеализирана функция, която изпълнява условия-

$$\text{та: } f(t) = \begin{cases} 0 & \text{за } t \neq 0 \\ \infty & \text{за } t = 0 \end{cases} \quad \text{и} \quad \int_{-\varepsilon}^{\varepsilon} f(t) dt = 1, \text{ където } \varepsilon \text{ е безкрайно малко число.}$$

Тази функция се нарича *делта функция* (или *импулсна функция*) на Дирак и се означава с  $\delta(t)$ .

Преходният процес, който се получава, когато на един от входовете се подаде единична функция, се нарича *преходна функция*,  $h(t)$ .

Преходният процес, който се получава, когато на един от входовете се подаде единичен импулс, се нарича *тегловна функция* или импулсна преходна функция,  $W(t)$ . Един реален импулс, използван за получаване на тегловна функция, се доближава до идеалния единичен импулс, когато продължителността му е много по-малка от преходния процес, който предизвиква.



Фиг. 13.14

Преходната и тегловната функции се наричат временни характеристики на елемента или системата. В зависимост от вида на елемента или системата техният вид може да е колебателен или апериодичен, затихващ или разходящ. Подобно на предавателните функции, съществуват временни характеристики, отразяващи влиянието на всеки един вход върху всеки един изход на системата.

Временните характеристики дават много добра нагледна представа за динамичните свойства на системите. Големият им недостатък произтича от по-сложния път за изчисляване на временните характеристики на цялата система, когато са известни временните характеристики на отделните елементи.

Математически връзката между типовите входни въздействия, преда-

вателните функции и временните характеристики може да се представи чрез:

- Лапласовото преобразуване на единичната функция:  $L[1(t)] = \frac{1}{p}$ ;

- Лапласовото преобразуване на единичния импулс:  $L[\delta(t)] = 1$ ;

$h(t) = y(t)$ , когато входното въздействие  $u(t) = 1(t)$ ,

$W(t) = y(t)$ , когато входното въздействие  $u(t) = \delta(t)$ ,

но  $y(t) = L^{-1}\{W(p)L[u(t)]\}$ , тогава

$$h(t) = L^{-1}\left[W(p) * \frac{1}{p}\right] \quad \text{и} \quad W(t) = L^{-1}\left[W(p) * 1\right],$$

където с  $L(\ )$  и  $L(\ )^{-1}$  е отбелязано правото и обратното преобразуване на Лаплас.

Вижда се, че предавателната функция се явява образ на тегловната функция, преобразувана по Лаплас. Двете временни характеристики се свър-

зват със следното равенство:  $W(t) = \frac{dh(t)}{dt} + h(0)\delta(t)$ .

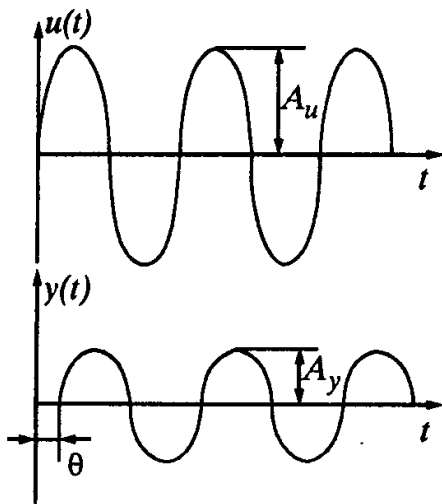
Или, тегловната функция е равна на производната на преходната функция във времето плюс произведението от стойността на преходната функция в началния момент на времето и единичен импулс.

#### 13.4.4. Честотни характеристики

Честотните характеристики описват реакцията на елемента или системата на хармонично въздействие. Когато елементът или системата са линейни, реакцията (изменението на изхода) на хармонично входно въздействие е хармоничен сигнал със същата честота, но с променена амплитуда и фаза. Или когато на входа имаме сигнал  $u(t) = A_u \sin \omega t$ , то на изхода ще получим  $y(t) = A_y \sin(\omega t + \theta)$  - фиг. 13.15. Амплитудата на изходния сигнал зависи от амплитудата на входния сигнал и неговата честота. Амплитудно-

честотната характеристика е отношението  $A(\omega) = \frac{A_y(\omega)}{A_u(\omega)}$  и е функция само на честотата. Фазовото изместване

$$\theta(\omega) = \theta_y(\omega) - \theta_u(\omega),$$



Фиг. 13.15

показващо разликата във фазите на изходния и входния сигнали също е функция само на честотата и се нарича фазово-честотна характеристика.

Математическата връзка на честотните характеристики с диференциалното уравнение и предавателната функция най-точно се описва като се използва преобразуванието на Фурие (преобразуване, подобно на това на Лаплас, при което вместо  $p$  се използва  $j\omega$ ). Прилагайки това преобразуване върху диференциалното уравнение, описващо връзката на един изход с входовете, получаваме

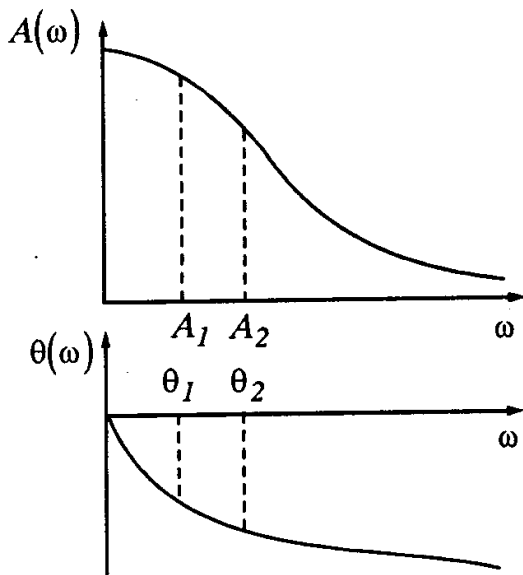
$$\left[ a_0(j\omega)^n + a_1(j\omega)^{n-1} + \dots + a_n \right] Y(j\omega) = \left[ b_0(j\omega)^m + b_1(j\omega)^{m-1} + \dots + b_m \right] U_1(j\omega) + \left[ c_0(j\omega)^l + c_1(j\omega)^{l-1} + \dots + c_l \right] U_2(j\omega) .$$

Подобно на предавателната функция, отношението на образите на изхода и съответния вход ни дава една от динамичните характеристики на елемента или системата, наричана комплексна предавателна функция или комплексен коефициент на усилване:

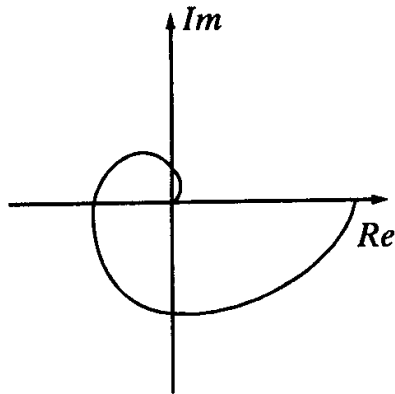
$$W_{u1}(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{U_1(j\omega)} = \frac{B(j\omega)}{A(j\omega)} ,$$

$$W_{u2}(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{U_2(j\omega)} = \frac{C(j\omega)}{A(j\omega)} , \text{ и т.н.}$$

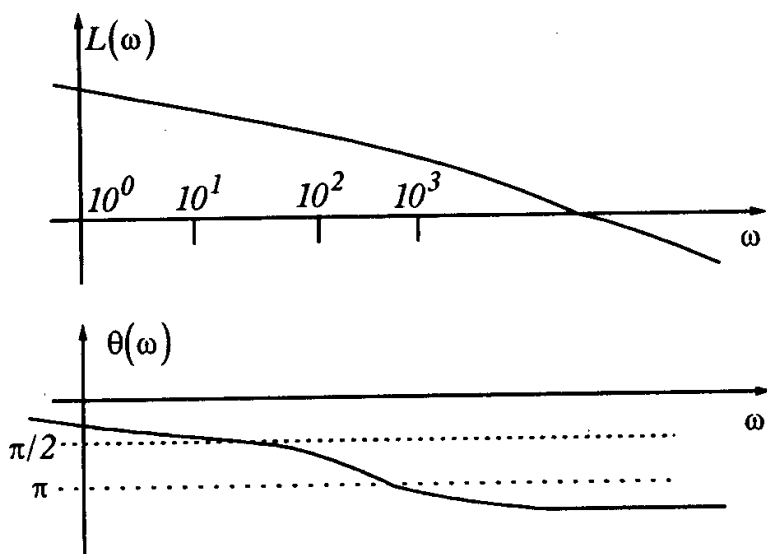
Комплексният коефициент на усилване се получава много лесно от предавателната функция, като се замени комплексната променлива  $p$  с имагинерната  $j\omega$ . Той е основа на всички честотни характеристики. Когато се представи в показателна форма, най-ясно се виждат амплитудно-честотната и фазово-честотната характеристики  $W(j\omega) = A(\omega) e^{j\theta(\omega)}$ . Амплитудно-честотната характеристика е модулът на комплексния коефициент на усилване  $A(\omega) = \text{mod } W(j\omega)$ , а фазово-честотната - неговият аргумент (фиг. 13.16). Понякога двете характеристики се обединяват в амплитудно-фазова характеристика (АФХ), която е ходографът на комплексния коефициент на усилване - фиг. 13.17 (ходограф - геометричното място на точки, определящи края на вектор, който е функция на променлива - в случая често-



Фиг. 13.16



Фиг. 13.17



Фиг. 13.18

тата). Когато комплексният коефициент на усилване се представи в алгебричен вид, могат да се отделят други две честотни характеристики:  $W(j\omega) = U(\omega) + jV(\omega)$ . Характеристиката  $U(\omega)$  се нарича реална честотна характеристика, а  $V(\omega)$  - имагинерна честотна характеристика.

Честотните характеристики позволяват чрез експериментални изследвания на системи или техни елементи, диференциалните уравнения на които са неизвестни, да се съставят математичните им модели. Много често в системите е неизвестно математическото описание само на обекта за управление, а описанието на останалите елементи - датчици, регулатори и др., е известно. За да се получат честотните характеристики на системата като цяло, е необходимо да се извърши много изчислителна работа. Процесът се улеснява, ако се използват честотните характеристики в логаритмичен мащаб. Така представени, те се наричат логаритмични честотни характеристики (ЛЧХ) - фиг. 13.18. По абсцисата на ЛЧХ се нанася  $\lg \omega$ , като числата са в  $s^{-1}$  или  $rad/s$ . По ординатата за логаритмичната

амплитудно-честотна характеристика (ЛАЧХ) се нанася  $L(\omega) = 20 \lg A(\omega)$ , а за логаритмичната фазово-честотна характеристика (ЛФЧХ) - стойността на фазата в градуси или радиани. Скалата по абсцисата е равномерна спрямо  $\lg \omega$ , като всяко деление съответства на десетократно изменение на честотата и се нарича декада. За оразмеряване на ЛАЧХ по ординатата

се използват децибели, dB. *Белът* (10 dB) е международна единица, показваща изменението на мощността на сигналите ( $\lg\left(\frac{P_{изх}}{P_{вх}}\right)$ ) и се използва в съобщителната техника, акустиката и автоматиката. Тъй като стойността ѝ е много голяма, се използва десетократно по малката ѝ величина децибел. Мощността на сигнала е пропорционална на квадрата на неговата амплитуда, а квадратът излиза пред логаритъма като произведение по 2, поради което коефициентът 10 от намаляването на единицата е умножен по две и пред логаритъма се получава числото 20. Много често ЛЧХ се чертаят така, че абсцисите им да съвпадат, при което се следи едновременното изменение на двете характеристики в зависимост от честотата.



## Ч е т и р и н а д е с е т а   г л а в а

### АВТОМАТИЧНО УПРАВЛЕНИЕ

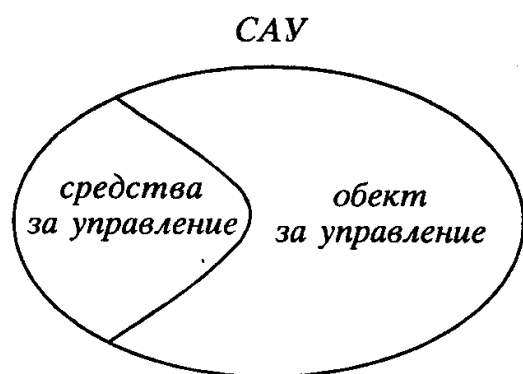
#### • *Основни понятия и принципи на автоматичното управление*

*Управлението* е общо понятие за организация и принудително въздействие върху дадена дейност, процес или система, с цел постигане на определени задачи. Управлението е *автоматично*, когато се извършва без участието на човека - пример в това отношение е корабът, който трябва да се придвижи безопасно от една точка на земното кълбо до друга. В много случаи се постига с ръчно управление на отделните параметри - курс, скорост, обороти на главния двигател, стъпка на винта, температури и налягания в главния двигател и спомагателните механизми, и др. В съвременните кораби голяма част от тях се управляват автоматично, т.е. без участието на човека. Управлението на отделен параметър, така че той да се изменя по предварително зададен закон, е прието да се нарича *регулиране*. В този аспект автоматичното регулиране се явява частен случай на автоматичното управление и означава да се спазва зададения закон за изменение на параметъра, без участието на човека. Параметърът, който се управлява, се нарича *регулируема величина*, а устройството, в което се осъществява управлението - *обект за управление*. Ако обектът за управление изпълнява своите задачи без участието на човека, той се нарича *автоматичен*. В случаите, когато само част от задачите за управление в една система се поемат от машините, а останалите са поверени на човека, системата е *автоматизирана*. В съвременните кораби има много автоматични обекти, които често са йерархично свързани, а някои процеси се управляват от човека. В този смисъл корабът представлява сложна автоматизирана система.

Всеки обект за управление непрекъснато взаимодейства с околната среда. Той, както всяка система, има входове, наричани още външни въздействия, променливи, които го характеризират (променливи на състоянието), и изходи. От гледна точка на автоматичното управление, входовете са *регулируеми* и *нерегулируеми*. Регулируеми са тези, върху които може да се въздейства с цел заставяне на системата да изпълни предварително поставени цели; наричат се още *управляващи въздействия*. Останалата част от външните въздействия предизвикват промени в системата, които я отклоняват от постигането на поставените цели, поради което се наричат *смуцаващи въздействия* или *смуцения*.

Автоматичното управление обикновено обхваща няколко процеса на регулиране, независими или взаимно влияещи си, които протичат паралелно. Много често отделните процеси при автоматичното управление са йерархично свързани. Така например управлението на нивото на водата в котела може да се разглежда като регулиране (което е част от управлението), за безопасното придвижване на кораба до зададеното пристанище. В това управление ще се включват още регулирането на скоростта и на курса на кораба, и много други задачи на регулирането, всички подчинени на общата задача.

За реализирането на автоматично управление (регулиране) са необходими устройства, машини и системи, които заставят регулируемите входове да се променят по подходящ начин. Тези елементи се наричат *средства за управление (регулиране)*. Обектите за управление (регулиране), заедно със средствата за управление (регулиране), свързани по подходящ начин, образуват *системите за автоматично управление (регулиране) - САУ*.



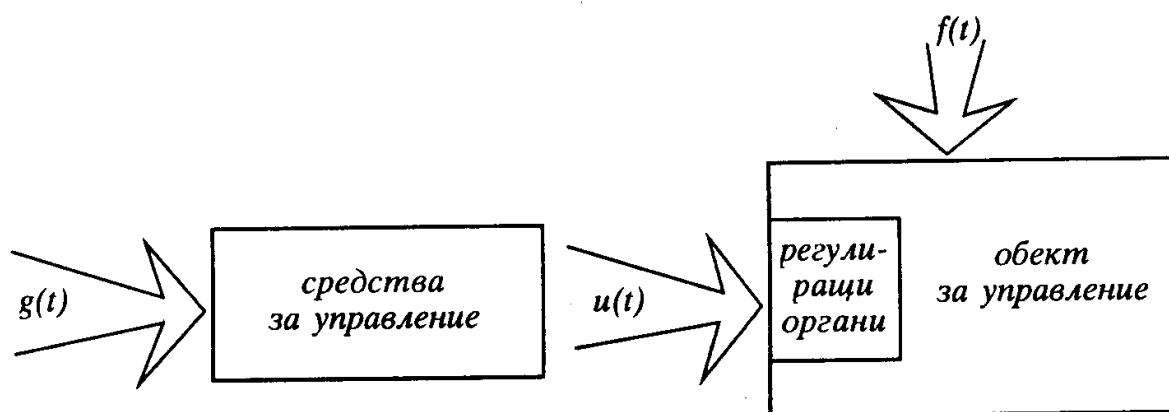
Основата, на която се гради теорията на автоматичното управление, е математиката. За да се разгледат различни по своята физическа същност системи и процеси от гледната точка на тази теория, е необходимо да се съставят математическите им модели, т.е. тези системи и процеси да бъдат описани с уравнения, най-често диференциални.

Нека разгледаме структурата на система за автоматично управление, за да изясним символите, които се използват в системата диференциални уравнения за означаване на различните параметри на САУ. Бе посочено, че системата се състои от две части: обект за управление и средства за управление. Прието е въздействията върху тях да се обозначават при съставянето на математическите уравнения с еднакви букви.

Външните въздействия обикновено се отбелязват с  $u(t)$ . Тези от тях, с които се влияе върху средствата за управление, се наричат *задаващи въздействия*,  $g(t)$  и определят желания закон за изменение на регулируемите променливи (изходи). Въздействието, което *средствата за управление*, оказват върху *обекта за управление*, се обозначава с  $u(t)$  или  $\mu(t)$  и се нарича *управляващо (регулиращо) въздействие*.

Обектът за управление винаги има вход, управляван от регулиращ орган, чрез въздействие върху който може да се извършва управление на регулируемата променлива. Смущаващите въздействия или смущенията, от-

клоняващи регулируемите променливи от желания закон за изменение, се обозначават с  $f(t)$ .



За да работи автоматично една система, е необходимо сред средствата ѝ за управление да има устройство, което да формира управляващото въздействие, заставлящо регулируемата величина да се изменя по зададения закон, без намесата на човека. Устройство, което автоматично решава задачата за изменение на регулиращото въздействие, се нарича *автоматичен регулатор*.

- **Кратка историческа справка за развитието на автоматизацията**

Първите исторически сведения за автоматично действащи устройства са от времето на античността. Свързани са с регулирането на потока при водните часовници и регулирането на нивото на виното в големите бъчви, предхождащи прилагането на този принцип в танковете на съвременните кораби. Регулирането на поток също се е свеждало до регулиране на ниво, посредством постоянния разход на течност през дюза при постоянно налягане - постоянното налягане се определя от постоянния воден стълб над дюзата. Използваното устройство е подобно на познатия и до днес поплавък на тоалетните казанчета.

С появата на машините, важен проблем според хрониката на автоматизираните системи става регулирането на честотата на въртене на задвижващия вал. Първоначално е решен при регулирането на оборотите на вятърните мелници посредством конично махало, или т. нар. центробежен регулатор. Около 1788 г. английският механик Джеймс Уат прилага тази конструкция за регулиране на оборотите на парната машина, като опитно установява съотношенията на лостовете и я прави широко известна. Уат е механик - практик, и независимо че не се занимава с теорията на регулатора, и понастоящем центробежният регулатор се свързва с неговото име.

Най-ранни сведения за теоретични разработки по управление съдържат разработките на Кристиан Хюйгенс (1673 г.). Следващата стъпка е на Джеймс Клерк Максвел, който през 1868 г. публикува труда си „За регулаторите“ и за пръв път се спира на проблемите на устойчивостта, а в края на XIX-ти век руският учен А. М. Ляпунов в „Обща задача за устойчивост на движението“ представя основните начини за изследване на устойчивостта на системите. XX-ти век е векът на кибернетиката: След 1930 г. се развива стохастичната теория на Н. Винер, през 1932 г. Найкуист публикува своя критерий за устойчивост, използван и до днес, през 1936 г. е предложено пропорционално-интегрално-диференциалното (ПИД) управление, през 1945 г. е публикуван критерият за устойчивост на Боде, а през 1948 г. американският учен Еванс разработва метода за изследване и синтез на САР, известен още като ходограф на корените. В средата на XX-ти век се заражда и новата теория на управлението, при която математическите модели на системите се съставят в матрична форма, т.е. използват пространството на състоянията. За нейни основоположници се считат учените Белман (САЩ), Калман (САЩ) и Понтрягин (СССР). Прилагането ѝ е много улеснено от развитието на компютърната техника, а възможностите ѝ я налагат, за разлика от старата (класическа) теория, като съвременна, нова теория на управлението.

#### **14.1. Основни принципи за регулиране и управление**

Съществуват три основни принципа на автоматично управление: *програмно регулиране*, *регулиране по смущаващото въздействие* и *регулиране по грешката*.

*Програмното регулиране* се използва, когато не е необходима висока точност на регулирането или регулираната променлива е нечувствителна към смущаващите въздействия. В този случай системата следи заданието, което се изменя по предварително зададена програма. Тъй като посочените условия ограничават силно неговото приложение, принципът не е предмет на настоящото изложение.

##### **14.1.1. Регулиране по смущаващо въздействие**

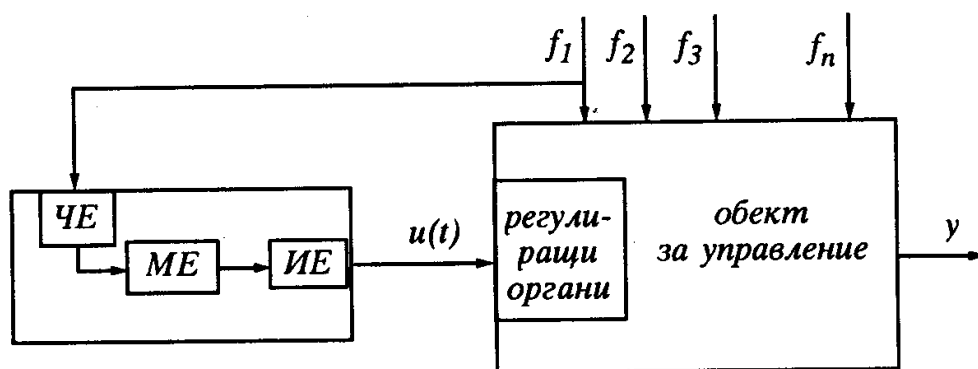
Принципът на регулиране по смущаващо въздействие е предложен за първи път от френския учен Понселе, описал начин за регулиране на оборотите на парната машина чрез измерване на съпротивителния момент на вала на машината и регулиране на потока пара, подаван към машината. След няколко неуспешни опита той се отказал от реализацията му.

*Същността на принципа е следната*: измерва се смущаващото въздействие, отклоняващо регулируемата величина от зададената стойност, и се

създава такова регулиращо въздействие, което да компенсира отклонението. За осъществяването му автоматичният регулатор обикновено съдържа следните функционални елементи:

- чувствителен елемент (ЧЕ) - измерва смущаващото въздействие,  $f_1$ ;
- междинен елемент (МЕ) - усилва сигнала от датчика и го преобразува в подходяща физическа величина за задействане на изпълнителния елемент;
- изпълнителен елемент (ИЕ) - формира управляващия сигнал към регулиращия орган.

Принципът на регулиране с въздействие по смущението се описва с функционалната схема (фиг. 14.1), като например в генератора за постоянен ток със смесено възбуждане: Серийната (последователна) намотка се конструира така, че да се компенсира понижаването на напрежението, вследствие на реакцията на котвата и пада на напрежението в котвената намотка при повишаване на товара.



Фиг. 14.1. Регулиране по смущаващо въздействие

Основни предимства на принципа са:

- голямо бързодействие - определя се от факта, че регулирането започва преди регулируемата величина да се отклони от зададената стойност;
- относителна простота при реализирането на управлението - не възникват проблеми с устойчивостта на системата, от които тя да стане неработоспособна.

Недостатъци:

- Регулирането се осъществява само по отношение на смущението, което се измерва, а останалите смущения водят до неконтролирано изменение на регулируемата величина. При наличие на няколко смущаващи въздействия е необходимо да се използват и няколко регулатора - по един за всяко смущаващо въздействие. Те могат да се съчетаят в един регулатор с чувствителни елементи за всяко едно смущаващо въздействие, като сигналите след това се сумират. Това обаче го усложнява и оскъпява много.

- Регулаторите, осъществяващи този принцип, са неразделно свързани с определен тип обекти за управление и не могат да се използват при други обекти.

Прилагайки посочените предимства и недостатъци към разглеждания пример, можем да направим извода, че регулирането при повишаване на товара ще започне преди напрежението на генератора да се е променило. При изменение на честотата на въртене на генератора обаче напрежението ще се изменя неопределено и тази автоматична система ще работи правилно при промяна само на смущението, което се следи. Всички останали смущения - честота на въртене, температура и съпротивления във връзките, ще водят до отклонение на регулируемата величина от зададената стойност.

#### 14.1.2. Регулиране по отклонението (грешката)

Основната задача на всяка система за автоматично регулиране (САР) е да се поддържа с достатъчна точност равенството  $y(t) = g(t)$ . Ето защо грешката  $e(t) = g(t) - y(t)$  определя качеството на системата.

Грешката  $e(t)$  отразява разликата между желаната и действителната стойност на регулируемата величина във всеки един момент от времето. Колкото е по-малка, толкова системата е по-добра, а за идеалната система  $e(t)$  е винаги равна на нула. За реалните системи грешката е различна от нула и трябва да остава в зададени граници, за да бъде САУ работоспособна. По такъв начин, ако управлението на системата може да измери грешката и да въздейства върху обекта така, че тя да се намали до изискваните граници, системата ще удовлетворява зададените изисквания. Това става възможно като се използва схемата на управление, показана на фиг. 14.2. В нея автоматичният регулатор включва следните функционални елементи:

$ЧЕ_1$  - задаващ елемент - формира желания закон  $g(t)$  за изменение на регулираната величина;

$ЧЕ_2$  - чувствителен елемент - измерва регулираната величина  $y(t)$ ;

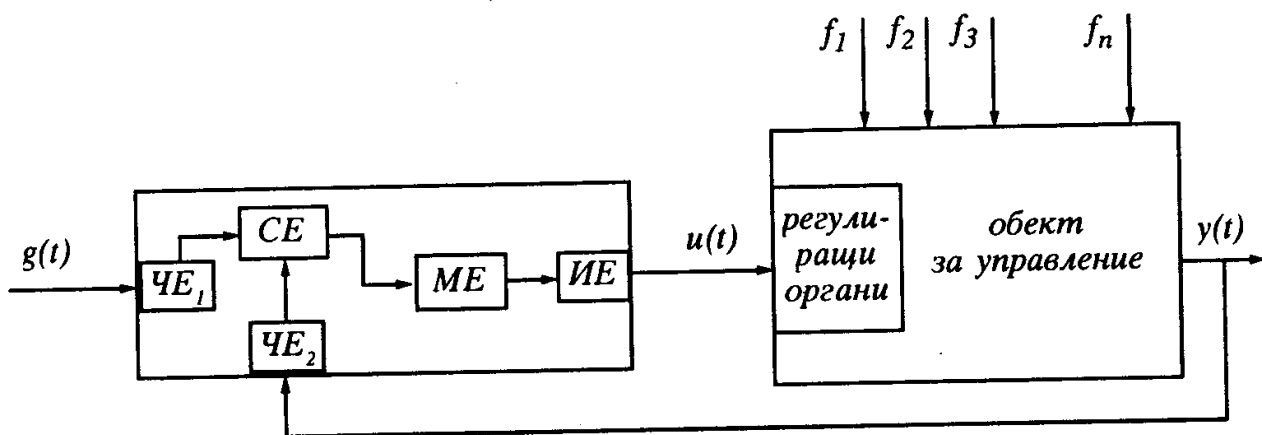
$СЕ$  - сравняващ елемент - определя разликата между  $g(t)$  и  $y(t)$ ;

$МЕ$  - междинен елемент - преобразува и усилва сигнала, за да се въздейства изпълнителния орган;

$ИЕ$  - формира управляващото въздействие върху регулиращия орган.

Когато грешката е положителна, се формира управляващо въздействие за увеличаване на регулируемата величина и, обратно - при отрицателна грешка - за намаляването ѝ.

Този тип регулиране е най-близък до разбирането ни за управление. При ръчното управление например човек следи (измерва) регулируемата



Фиг. 14.2. Регулиране по отклонение

величина и задейства регулиращия орган ръчно, така че да се постигне изменение в желаната посока.

Регулирането по отклонение се нарича още *регулиране с обратна връзка*, поради връщането на изходния за обекта сигнал към неговия вход. Тъй като изходният сигнал се изважда от заданието, обратната връзка е отрицателна. Ако обратната връзка е положителна, системата ще се стреми да увеличава грешката, вместо да я приближава към нула и да я задържа в допустимите граници.

Системите с обратна връзка са присъщи на много сфери от живота - пазарната икономика, системите за управление на кораба по курса, на двигателите с вътрешно горене с техните регулатори на честота на въртене, и др.

*Предимства* на принципа:

- автоматичният регулатор, управляващ системата и отстраняващ грешките (прави ги минимални), независимо от кое от външните въздействия са предизвикани, е един;

- позволява използването на типови регулатори за управление на различни физически процеси, като се променят само входните и изходни съгласуващи устройства на регулатора.

*Недостатъци*:

- регулирането започва с възникването на грешката, поради което системите са по-бавни и склонни към колебания;

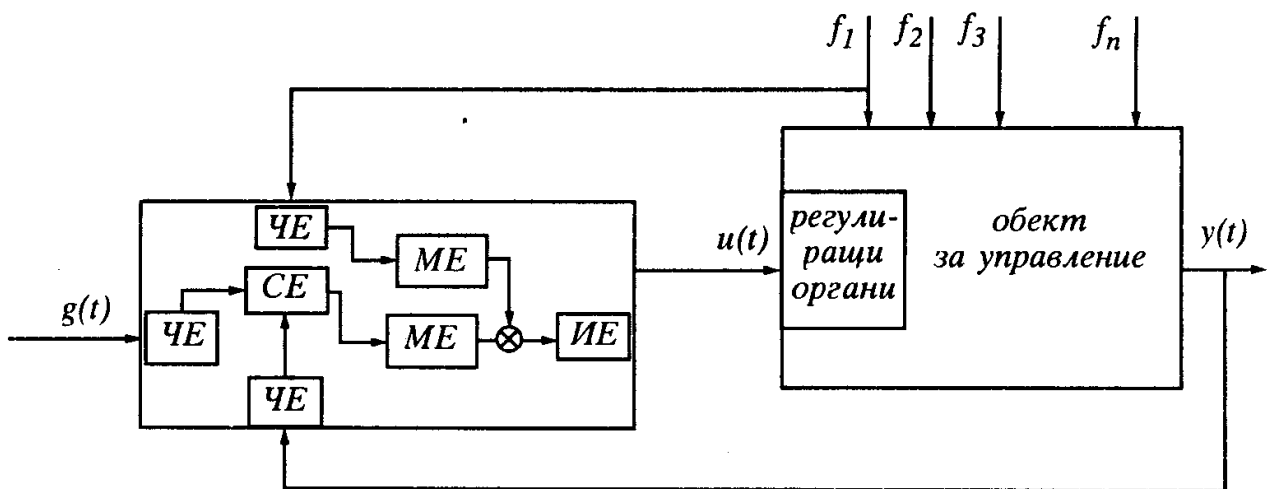
- за да се синтезира система от този тип, са необходими повече труд и изчисления, за да се избегне склонността към колебания и системата да работи устойчиво.

За да се съчетаят предимствата и да се избегнат някои от недостатъците на описаните два принципа, се създават САР, съчетаващи характеристиките им.

### 14.1.3. Комбинирани системи

Комбинираните системи съчетават бързодействието на системите, работещи по смущение, с универсалността на системите с обратна връзка. По отношение на основните смущаващи въздействия се включват канали, действащи по смущение, а грешката от останалите смущения се отстранява чрез регулиране по отклонение. Така се получават системи с много висока точност и бързодействие.

На фиг. 14.3 е показана функционалната схема на комбинирана система - САР, при която по отношение на основното смущаващо въздействие се реализира управление по смущение, а грешката от всички останали причинители се намалява или отстранява с управление по грешката. За тази цел се използват два чувствителни елемента, измерващи основното смущение и регулируемата величина, сравняващ елемент, определящ знака и големината на грешката, междинни елементи и суматор, преобразуващи и усилващи сигналите, за да се задейства правилно изпълнителният елемент, който формира регулиращото въздействие.

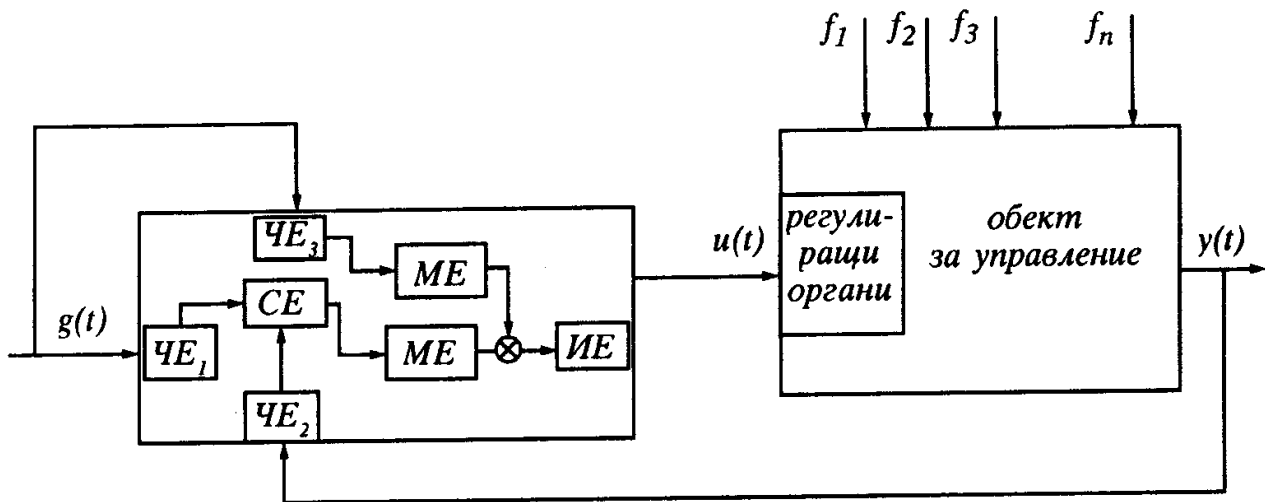


Фиг. 14.3. Комбинирана система

Тъй като при следящите системи основно смущаващо въздействие е изменението на заданието, функционалната схема на комбинираната САР добива вида, показан на фиг. 14.4.

Комбинираните САР осигуряват регулиране с много високо качество, но са по-сложни, по-скъпи, и, поради това - с по-ограничено приложение.





Фиг. 14.4. Следяща система

## 14.2. Динамични модели на обекти от първи и втори ред

За улесняване на анализа на системите за автоматично управление, в класическата теория те се разделят на *елементарни динамични звена*.

Елементарните динамични звена са части на САУ, описвани с линейни диференциални уравнения до втори ред. Те могат да представят само част от функционално обособен елемент на системата, но няколко такива елемента могат да се описват с едно динамично звено. Голяма част от динамичните модели на корабните системи и механизми могат да се представят при някои допускания именно като динамични звена от първи и втори ред.

Динамичните характеристики на звената се разглеждат в три основни форми: предавателни функции, временни и честотни характеристики. Достатъчно е за едно звено да се намери една от тези форми, за да се определи неговия тип. Временните и честотните характеристики могат да се снимат експериментално за обекти с неизвестно математическо описание и от тях да се определи математическият модел на обекта. Познаването на елементарните звена и техните динамични характеристики позволява по-лесно да се избират необходимите коригиращи звена и закони за управление при синтеза на САУ.

Според вида на диференциалните уравнения, динамичните звена са три групи: *позиционни*, *интегриращи* и *диференциращи*. Много често към тях се добавя и едно нелинейно звено, описващо времезакъснението в системите.

Познавайки динамичните характеристики на отделните звена, можем по-лесно да оценяваме тяхното влияние върху цялата система и, при необходимост, за подобряване на динамиката ѝ да добавяме такива звена или да променяме параметрите на някои от тях.

### 14.2.1. Позиционни звена

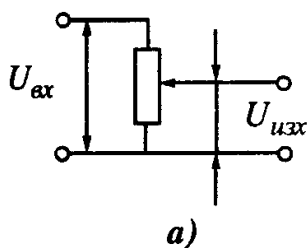
Позиционни звена са тези, които в статичен режим се характеризират със зависимостта  $y = kx$ .

#### А. Безинерционно звено

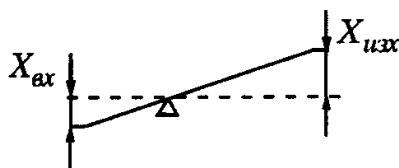
За разлика от всички останали, безинерционното звено се описва с алгебрично уравнение както в статичен, така и в динамичен режим:

$$y = kx$$

По тази причина сигналът на изхода от звеното ще повтаря сигнала на неговия вход с коефициент на пропорционалност  $k$  и без някакво временно изместване. Примери за такова звено са всички елементи с описаното динамично поведение (фиг. 14.5): потенциометрични датчици (а), лостове (б), зъбни предавки (в) и др.



а)



б)



в)

Временните характеристики могат да се запишат директно, без да се използва преобразуването на Лаплас:  $h(t) = k.I(t)$ ,  $W(t) = k.\delta(t)$ .

Предавателната функция е отношението на образите по Лаплас на изхода и входа

$$W(p) = Y(p) / X(p)$$

и може да се получи като изходното уравнение се преобразува по Лаплас:

$$Y(p) = kX(p), W(p) = k.$$

Комплексният коефициент на усилване се получава като в предавателната функция се замени  $p = j\omega$ ,  $W(j\omega) = k$ ,

или 
$$A(\omega).e^{\theta(\omega)} = k$$

Фиг. 14.5. Безинерционни звена

Оттук следва  $A(\omega) = k$  и  $\theta(\omega) = 0$ .

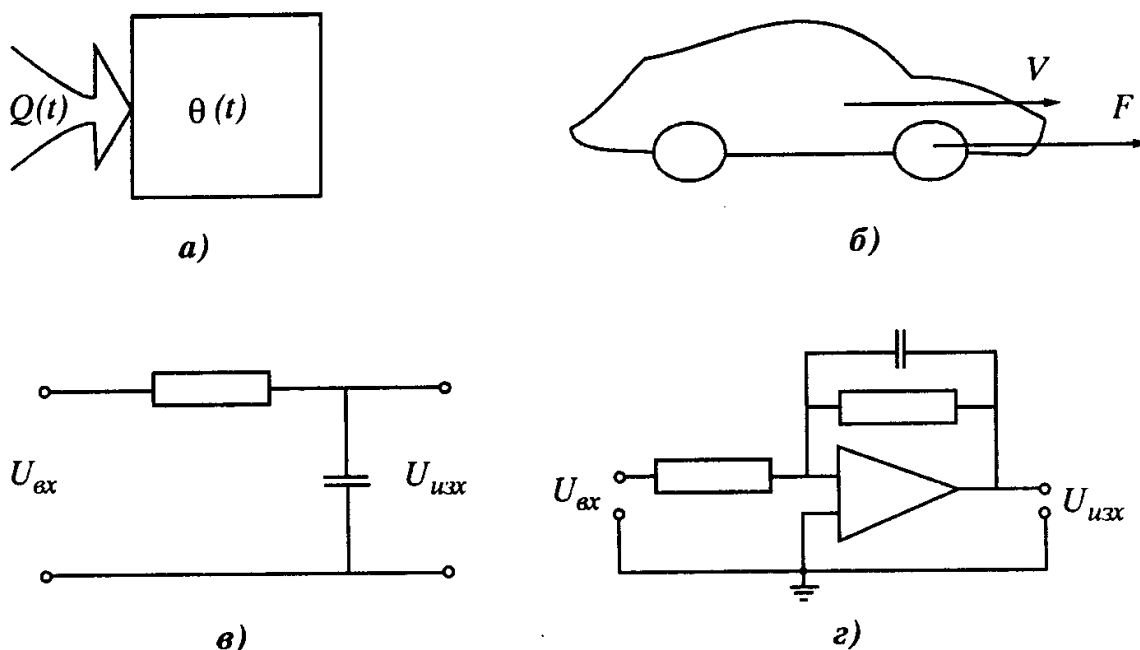
Логаритмичната амплитудно-честотна характеристика на звеното е  $L(\omega) = 20 \lg A(\omega)$  и представлява права, успоредна на абсцисата на разстояние  $k$ .

### Б. Аперидично звено

Описва се с диференциално уравнение от първи ред:

$$a_0 \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = k \cdot x(t)$$

Примери за аперидични звена са представени на фиг.14.6:



Фиг. 14.6. Примери за аперидични звена

В пример (а) е показан процесът на нагряване на тяло, като входен сигнал е количеството топлина, въвеждано в тялото, а изходен - неговата температура. Скоростта на нарастване на температурата зависи от топлоемкостта и масата на материала, от който е изработено тялото.

Вторият пример (б) разглежда автомобил, като входна променлива е силата, развивана от двигателя, а изходна - скоростта на автомобила.

Последните два примера (в, г) представят електрически вериги с входни,  $U_{вх}$  и изходни,  $U_{изх}$  сигнали.

Коефициентът  $a_0$  в диференциалното уравнение определя скоростта на затихване на преходния процес, обозначава се с  $T$  и се нарича *времеконстанта на звеното*.

Предавателната функция на звеното се получава след преобразуване на изходното диференциално уравнение по Лаплас и изразяване на отноше-

нието  $Y(p)/X(p)$ :

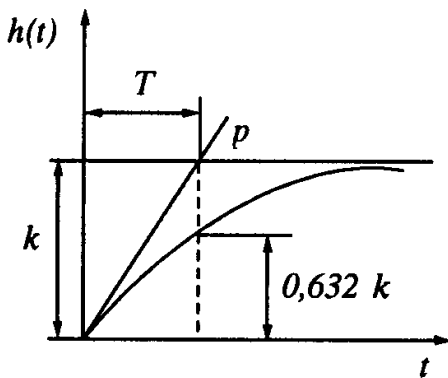
$$TpY(p) + Y(p) = kX(p) \quad ,$$

$$W(p) = \frac{k}{Tp + 1} \quad .$$

Преходната функция има следния аналитичен вид:

$$h(p) = L^{-1}\left[W(p)\frac{1}{p}\right] = L^{-1}\left[\frac{k}{a_0p + 1} \cdot \frac{1}{p}\right] = k + k \cdot e^{\frac{-1}{T}t} = k(1 - e^{\frac{-1}{T}t})$$

и е графично представена на фиг. 14.7:



Фиг. 14.7

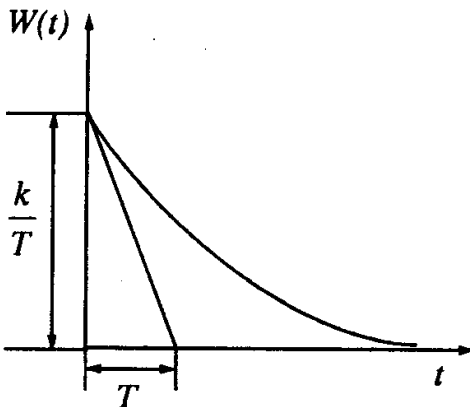
Допирателната към началната точка на преходната функция отсича от правата отсечка  $h(t) = k$ , отразяваща временния интервал  $T$ . За този временен интервал

$$h(t) \approx 0,632k \quad ,$$

което може да се използва за определяне на времеконстантата по експериментално снети данни.

Аналитичният израз на тегловната функция е

$$W(t) = L^{-1}[W(p)] = L^{-1}\left[\frac{k}{Tp + 1}\right] = \frac{k}{T} e^{\frac{-1}{T}t} \quad ,$$



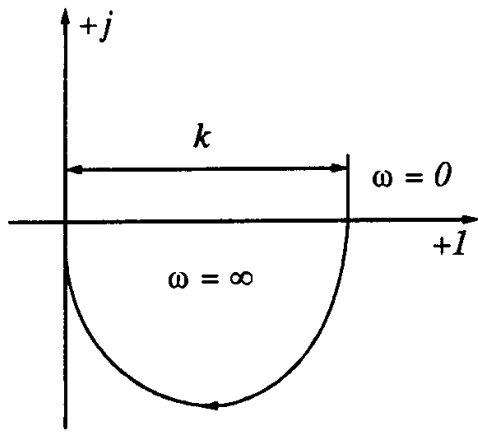
Фиг. 14.8

а графичният ѝ вид е показан на фиг. 14.8 и от него също могат да се определят двата параметъра на звеното:  $k$  и  $T$ . Коефициентът  $k$  характеризира статичните свойства на звеното, като показва отношението на изходния сигнал към входния в статичен режим. Нарича се *предавателен коефициент* или *коефициент на усилване*.

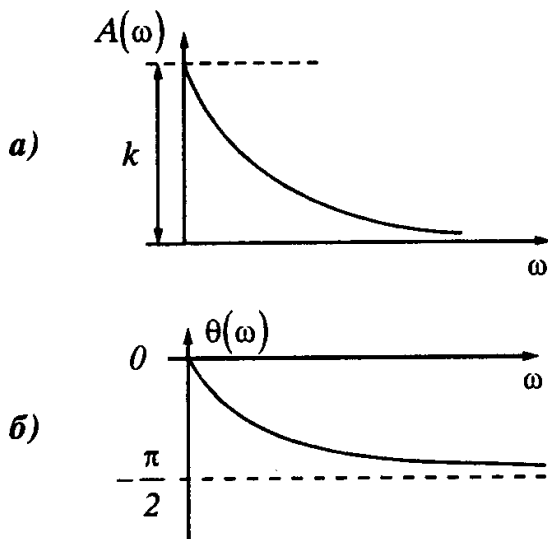
Аналитичният вид на амплитудно-фазовата характеристика е

$$W(j\omega) = \frac{k}{1 + jT\omega} \quad .$$

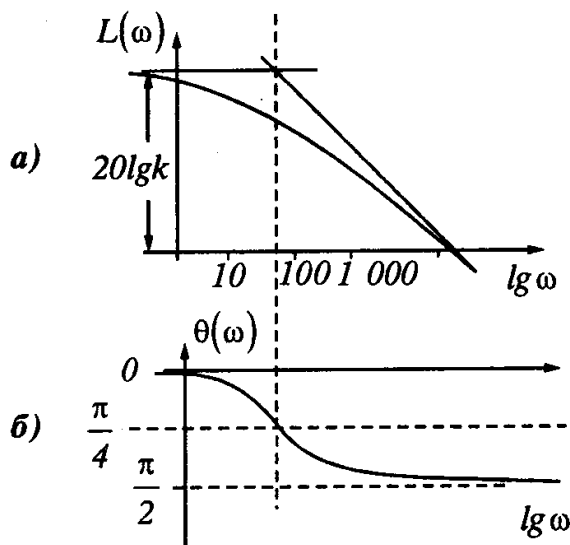
Графичният ѝ вид е представен на фиг. 14.9.



Фиг. 14.9



Фиг. 14.10



Фиг. 14.11

Амплитудно-честотната характеристика е

$$A(\omega) = \frac{k}{\sqrt{1+(T\omega)^2}},$$

а фазово-честотната  $\theta(\omega) = -\arctg(T\omega)$ -графично са представени на фиг. 14.10а,б.

Логаритмично-честотната характеристика се намира с помощта на израза

$$L(\omega) = 20 \lg A(\omega) = 20 \lg \frac{k}{\sqrt{1+(T\omega)^2}}.$$

Задавайки стойности на  $\omega$ , можем да построим графиките на функциите

$L(\omega), \theta(\omega)$  - фиг. 14.11а, б. Този начин на построяване обаче е много трудоемък, поради което се използва за приблизително построяване по метода на асимптотите.

Същността на метода се обяснява по следния начин:

1. Функцията се разделя на две части за  $\omega < 1/T$  и  $\omega > 1/T$ .

2. При  $\omega < 1/T$ ,  $\omega T < 1$  и  $(T\omega)^2 \ll 1$ . Тогава

$$L(\omega) = 20 \lg k.$$

3. При  $\omega > 1/T$ ,  $\omega T > 1$  и  $(T\omega)^2 \gg 1$ . Ето защо

$$L(\omega) = 20 \lg \frac{k}{T\omega}.$$

Горните две равенства описват прави линии в логаритмичен мащаб за честотата, пресичащи се при т. нар. *спрягаща честота*:  $\omega = 1/T$ . Двете прави заместват с достатъчна точност съответните участъци от логаритмичната амплитудно-честотна характеристика, като

грешката е най-голяма за честоти, близки до  $1/T$ , и не надхвърля  $3dB$ .

### В. Позиционно звено от втори ред

Описва се с диференциалното уравнение

$$a_0 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = k \cdot x(t)$$

Предавателната функция се получава след преобразуване по Лаплас и изразяване на съотношението  $Y(p)/X(p)$ :

$$W(p) = \frac{k}{a_0 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + 1}$$

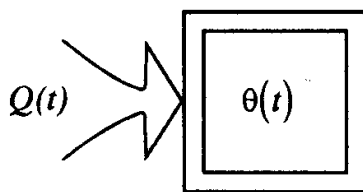
В зависимост от корените на характеристичния полином преходните процеси в звеното имат апериодичен или колебателен характер.

Когато корените  $p_1$  и  $p_2$  са корени на полинома в знаменателя и са реални числа, предавателната функция може да се представи във вида

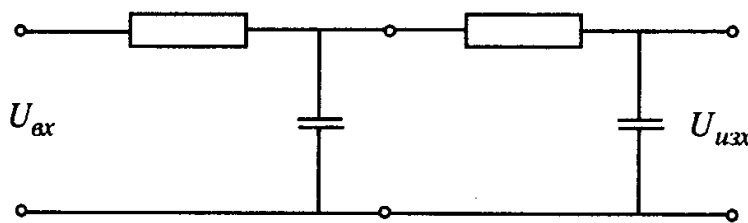
$$W(p) = \frac{k}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}$$

където  $T_1 = -1/p_1$  и  $T_2 = -1/p_2$ . В този случай звеното може да се разглеж-

да като две последователно свързани апериодични звена. Примери за позиционно звено от втори ред с апериодичен характер са дадени на фиг. 14.12: първият (а) отразява нагряване на тяло посредством друго тяло (детайл в пещ, охлаждащата вода на цилиндрите на ГД и др.), а вторият (б) - последователно свързване на две апериодични звена от RC елементи.



а)



б)

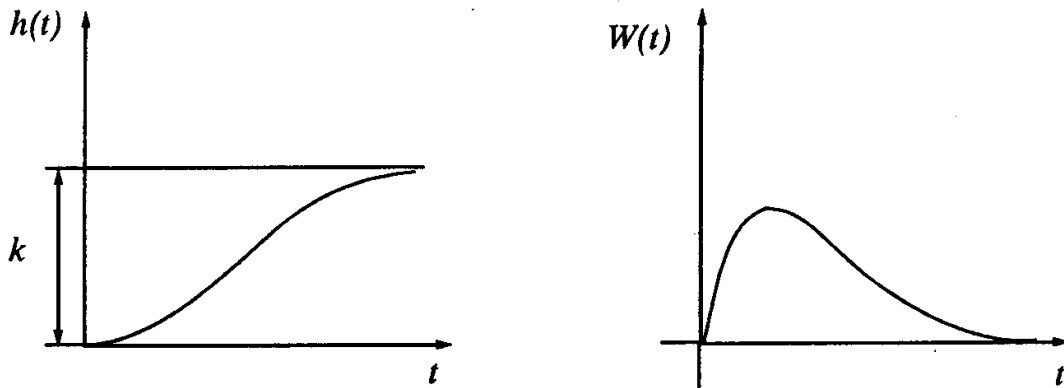
Фиг. 14.12

Временните характеристики в този случай се получават от предавателната функция, като за обратното преобразуване на Лаплас се използва теоремата на разлагането:

$$h(t) = L^{-1} \left[ W(p) \cdot \frac{1}{p} \right] = L^{-1} \left[ \frac{k}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)} \cdot \frac{1}{p} \right],$$

$$W(t) = \frac{k}{(T_1 - T_2)} \left( e^{-\frac{1}{T_1}t} - e^{-\frac{1}{T_2}t} \right),$$

Очевидно е, че преходните процеси в този случай имат аperiодичен характер, като затихват без колебания (фиг. 14.13).



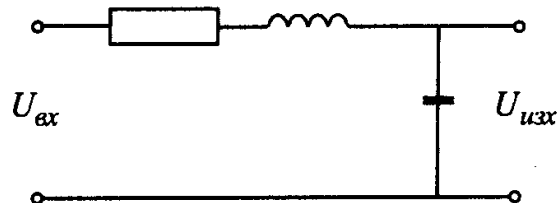
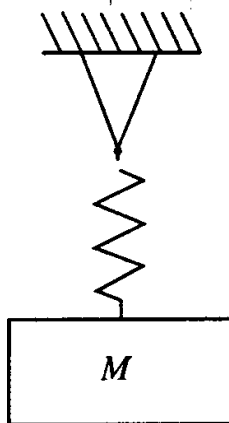
Фиг. 14.13

Когато характеристичният полином на диференциалното уравнение има имагинерни корени, предавателната функция се представя във вида

$$W(p) = \frac{k}{\frac{1}{\omega_0^2} p^2 + \frac{2\xi}{\omega_0} p + 1},$$

където  $\omega_0 = \sqrt{\frac{I}{a_0}}$  е резонансна честота, а  $\xi = \frac{a_1}{2\sqrt{a_0}}$  - коефициент на затихване.

Примери за такова звено са всички явления и процеси, свързани с натрупването на енергия и преобразуването ѝ от кинетична в потенциална, и обратно. На фиг. 14.14 са представени обекти с колебателен характер на преходните процеси: (а) - тяло, окачено на пружина, (б) - ел. схема на ел. верига с индуктивни и капацитивни елементи.



Фиг. 14.14

В този случай преходната функция има вида

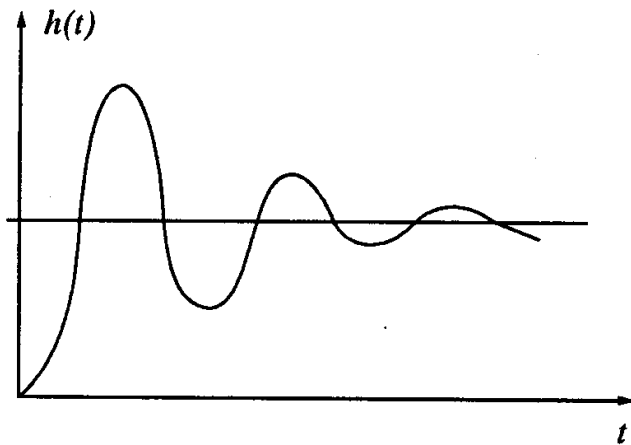
$$h(t) = k \left[ 1 - e^{-\omega_0 \xi t} \left( \cos \omega_0 t \sqrt{1 - \xi^2} + \frac{\xi}{\sqrt{1 - \xi^2}} \sin \omega_0 t \sqrt{1 - \xi^2} \right) \right].$$

Колебателният характер на преходния процес при този вид корени е показан на фиг. 14.15.

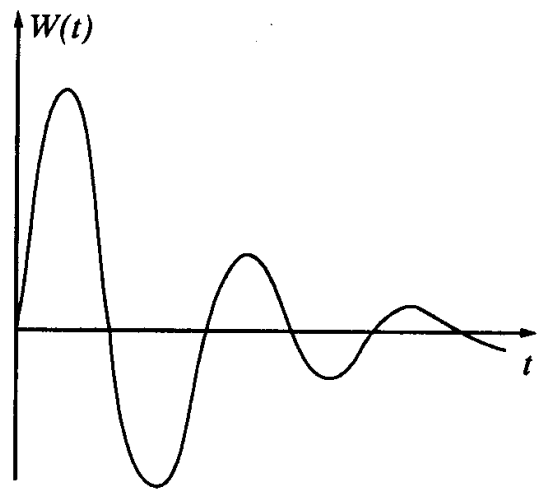
Тегловната функция при комплексни корени е

$$W(t) = \left( \frac{k \cdot \omega_0}{\sqrt{\xi^2 + 1}} e^{-\omega_0 \xi t} \right) \sin \left( \omega_0 \sqrt{1 - \xi^2} t \right)$$

и е графично представена на фиг. 14.16.



Фиг. 14.15



Фиг. 14.16

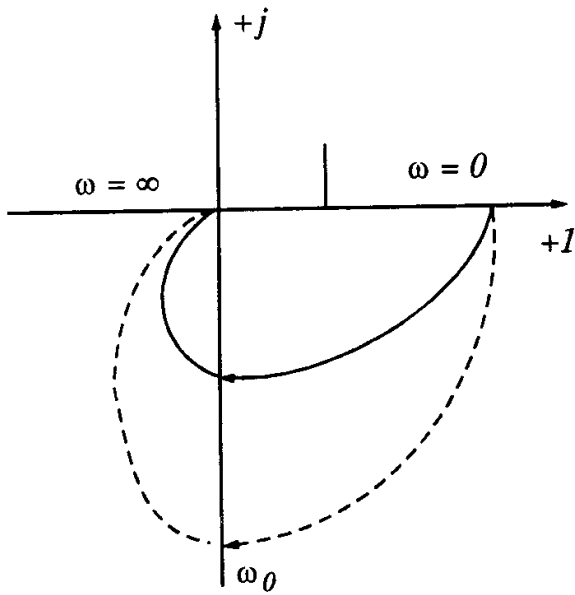
Замествайки  $p = j\omega$  в предавателната функция, получаваме комплексния коефициент на усилване:

$$W(j\omega) = \frac{k}{(1 + jT_1\omega)(1 + jT_2\omega)},$$

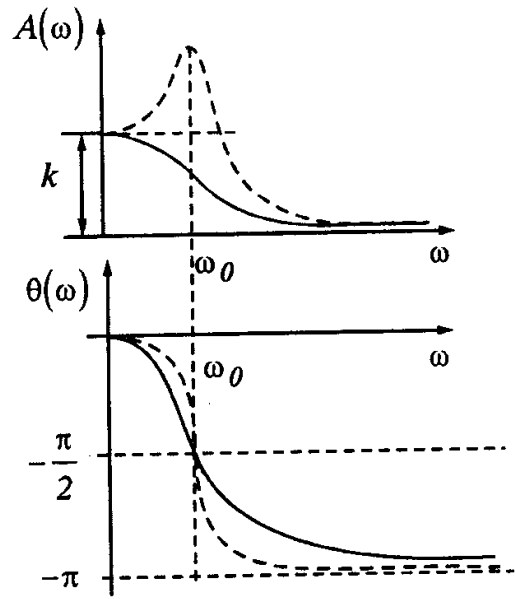
$$W(j\omega) = \frac{k}{1 - \frac{1}{\omega_0^2} \omega^2 + j \frac{2\xi}{\omega_0} \omega},$$

който се представя графично с амплитудно-фазовата характеристика, показана на фиг. 14.17.





Фиг. 14.17



Фиг. 14.18

Оттук е лесно да се получат амплитудно-честотната и фазово-честотната характеристики:

$$A(\omega) = \frac{k}{\sqrt{1+T_1^2\omega^2} \sqrt{1+T_2^2\omega^2}},$$

$$A(\omega) = \frac{k}{\sqrt{\left(1 - \frac{1}{\omega_0^2}\omega^2\right)^2 - \left(\frac{2\zeta}{\omega_0}\omega\right)^2}};$$

$$\theta(\omega) = -\operatorname{arctg}T_1\omega - \operatorname{arctg}T_2\omega,$$

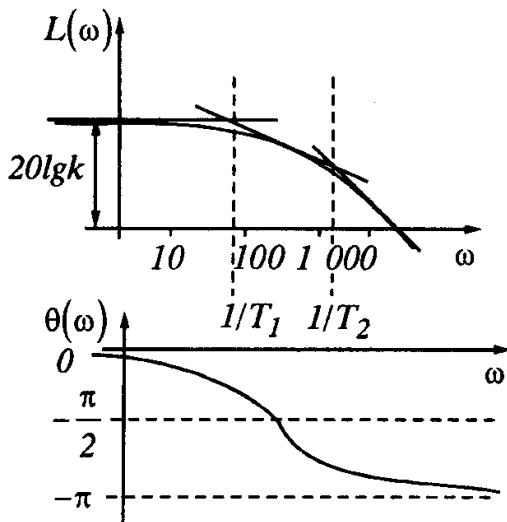
$$\theta(\omega) = -\operatorname{arctg} \frac{\frac{2\zeta}{\omega_0}\omega}{1 - \frac{2\zeta}{\omega_0^2}\omega^2} = -\operatorname{arctg} \frac{2\zeta\omega_0\omega}{\omega_0^2 - \omega^2}.$$

За отчетливо представяне на разликите, графиките за двата случая на позиционно звено от втори ред са съпоставени върху една и съща координатна система на фиг. 14.17 и фиг. 14.18. Характеристиките с апериодичен характер са показани с плътна линия, а тези с колебателен - с пунктирана.

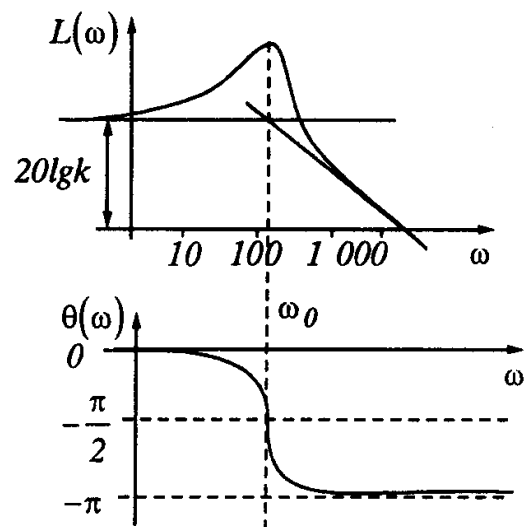
Логаритмичната амплитудно-честотна характеристика е

$$L(\omega) = 20 \lg \frac{k}{\sqrt{1+T_1^2 \omega^2} \sqrt{1+T_2^2 \omega^2}}, \quad L(\omega) = \frac{20 \lg k}{\sqrt{\left(1 - \frac{1}{\omega_0^2} \omega^2\right)^2 - \left(\frac{2\zeta}{\omega_0} \omega\right)^2}}$$

В случай на реални корени, тя може да се построи по метода на асимптотите, като е показано на фиг. 14.19, и грешката няма да надхвърли  $3dB$ . За имагинерни корени и честоти, близки до  $\omega_0$ , грешката е в зависимост от  $\zeta$  и трябва да се използват номограми за компенсирането ѝ при построяване по този метод - фиг. 14.20.



Фиг. 14.19



Фиг. 14.20

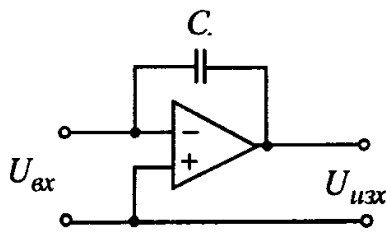
### 14.2.2. Интегриращи звена

#### А. Идеално интегриращо звено

Описва се с диференциалното уравнение  $a_0 \frac{dy(t)}{dt} = x(t)$  или с интег-

ралното  $y(t) = \frac{1}{T_1} \int x(t) dt$ .

Примери за елементи, които могат да се представят с такова звено, са двигателят за постоянен ток и хидравличната система *разпределител-цилиндър*, ако се пренебрегнат всички инерционности. По-точен пример е операционният усилвател, свързан по схемата, показана на фиг. 14.21.



Фиг. 14.21

Предавателната функция на звеното е

$$W(p) = \frac{1}{pT_i},$$

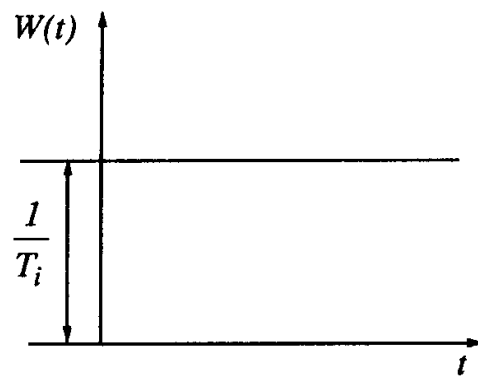
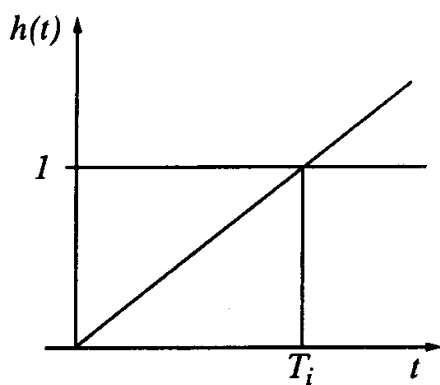
където  $T_i$  е интеграционната времеконстанта, определяща времето, за което изходният сигнал достига входния.

Преходната функция се намира посредством обратното преобразуване на Лаплас:

$$h(t) = L^{-1}\left[\frac{1}{T_i p} \frac{1}{p}\right] = L^{-1}\left[\frac{1}{T_i p^2}\right] = \frac{1}{T_i} t \quad \text{за } t > 0.$$

Може да се получи и чрез непосредствено интегриране на изходното уравнение. Тегловната функция е

$$W(t) = L^{-1}\left[\frac{1}{T_i p}\right] = \frac{1}{T_i} \quad \text{за } t > 0.$$



Фиг. 14.22

Аналитичният израз на амплитудно-фазовата характеристика е

$$W(j\omega) = \frac{1}{j\omega T_i} = -j \frac{1}{T_i \omega}$$

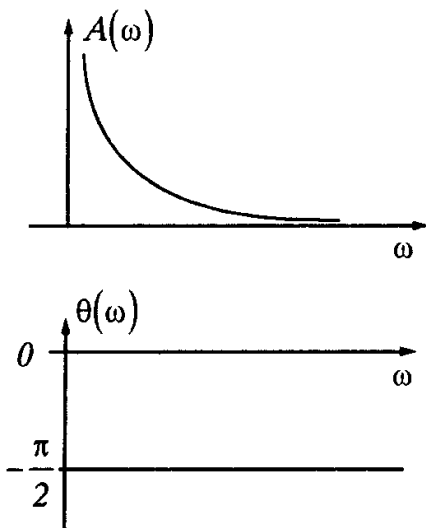
и тя съвпада с имагинерната ос, като се движи от  $-\infty$  до 0.

Амплитудно-честотната и фазово-честотната характеристики са, съответно (фиг. 14.23):

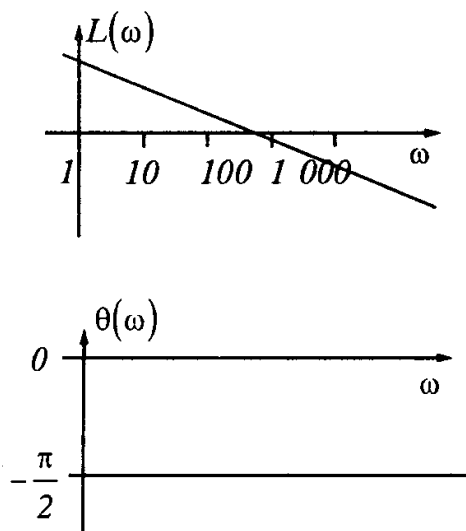
$$A(\omega) = \frac{1}{T_i \omega}, \quad \theta(\omega) = -\frac{\pi}{2}.$$

Логаритмичната амплитудно-честотна характеристика има следния вид:

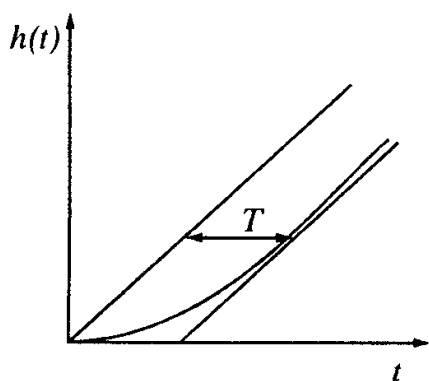
$$L(\omega) = 20 \lg \frac{1}{T_i \omega} = -20 \lg T_i \omega,$$



Фиг. 14.23



Фиг. 14.24



Фиг. 14.25

което е уравнение на права с наклон  $20 \text{ dB/dec}$ , пресичаща абсцисата в точката  $\omega = 1/T_i$ . Тя и фазово-честотната характеристики са показани на фиг. 14.24.

### Б. Реално интегриращо звено

Уравнението, което описва аналитично звеното, е

$$a_0 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + \frac{dy(t)}{dt} = k \cdot x(t)$$

или

$$a_1 \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = \frac{1}{T_i} \int x(t) dt$$

Примери за елементи, които могат да се представят с такова звено, са двигателят за постоянен ток и хидравличната система *разпределител-цилиндър*. Макар и посочени като примери за идеално интегриращо звено, при тях се пренебрегват всички инерционни сили, а в този случай точността на модела е по-добра.

Предавателната функция е

$$W(p) = \frac{\frac{1}{T_i}}{p(Tp + 1)}$$

където  $T = a_0$  е времеконстанта на звеното, а  $T_i$  - интеграционната времеконстанта.

Преходната функция има вида

$$h(t) = L^{-1} \frac{1}{T_i p(Tp + 1)} \cdot \frac{1}{p} = \frac{1}{T_i} \left[ t - T(1 - e^{-\frac{1}{T}t}) \right]$$

и е показана графично на фиг. 14.25.

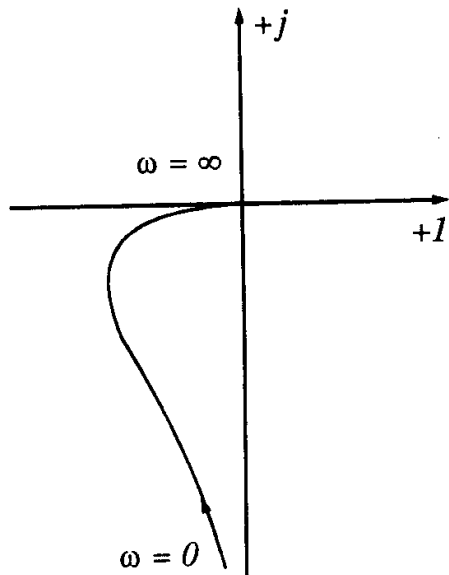
Аналитичният израз за амплитудно-фазовата характеристика (фиг. 14.26) е

$$W(j\omega) = \frac{1}{T_i} \frac{1}{j\omega(1+jT\omega)}$$

Оттук се намират амплитудно-честотната и амплитудно-фазовата характеристики

$$A(\omega) = \frac{1/T_i}{\omega\sqrt{1+T^2\omega^2}},$$

$$\theta(\omega) = -\frac{\pi}{2} - \text{arctg}T\omega,$$



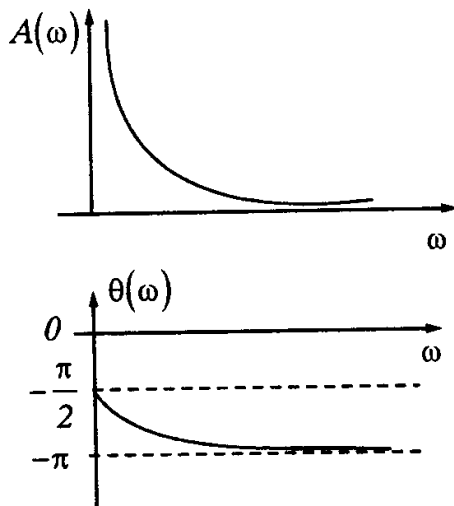
Фиг. 14.26

представени графично на фиг. 14.27.

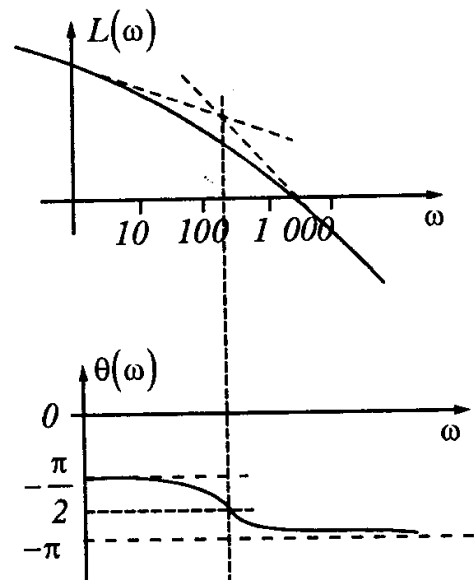
Логаритмичната амплитудно-честотна характеристика се определя от изказа

$$L(\omega) = 20 \lg \frac{1/T_i}{\omega\sqrt{1+T^2\omega^2}} = 20C \frac{1}{T_i\omega} - 20 \lg \sqrt{1+T^2\omega^2}$$

Графичният ѝ израз може да бъде построен с лекота по метода на асимптотите (фиг. 14.28).



Фиг. 14.27



Фиг. 14.28

Получават се две асимптоти:

$$L(\omega) = 20C \frac{1}{T_i \omega} \quad \text{за } \omega < 1/T ,$$

$$L(\omega) = 20C \frac{1}{T_i T \omega^2} \quad \text{за } \omega > 1/T$$

### В. Изодромно звено

Изодромното звено се описва с диференциалното уравнение

$$\frac{dy(t)}{dt} = b_0 \frac{dx(t)}{dt} + b_1 x(t)$$

или

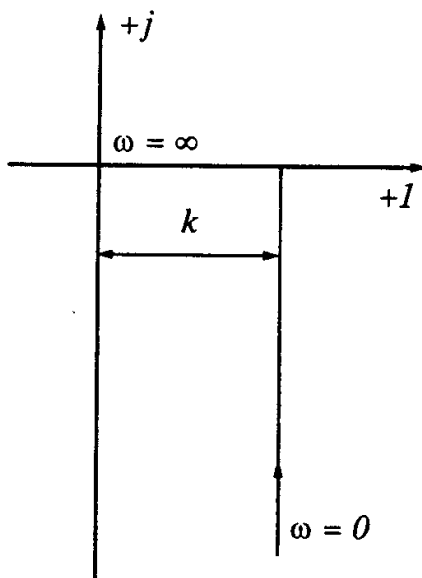
$$y(t) = k \cdot x(t) + \frac{1}{T_i} \int x(t) dt$$

и може да се разглежда като съставено от паралелно свързани безинерционно и идеално интегриращо звена.

Предавателната му функция е

$$W(p) = \frac{b_0 p + b_1}{p}, \quad W(p) = k + \frac{1}{T_i p},$$

където  $k$  е коефициент на пропорционалност, а  $T_i$  - интеграционна време-константа.



Фиг. 14.29

Аналитичният израз за амплитудно-фазовата характеристика е

$$W(j\omega) = k \left( 1 - j \frac{1}{k T_i \omega} \right),$$

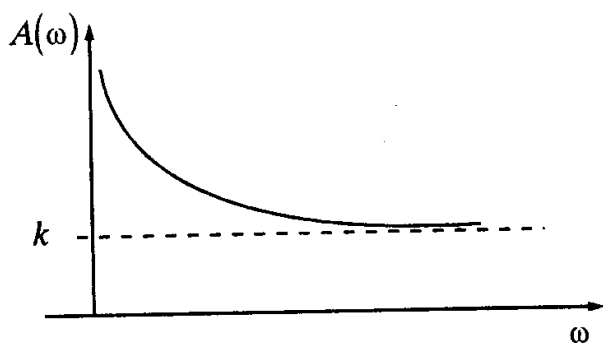
а изменението на комплексния коефициент на усилване е показано графично на фиг. 14.29.

Честотните характеристики могат да се изразят по следния начин:

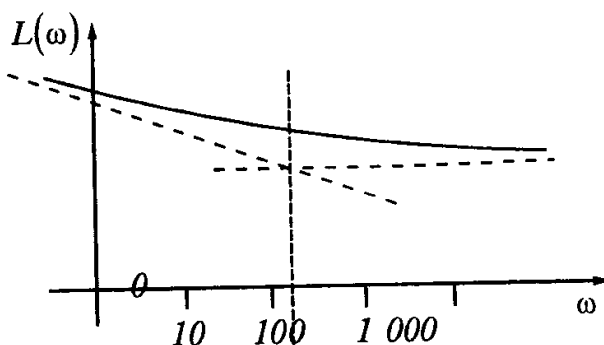
$$A(\omega) = \sqrt{k^2 + \left( \frac{1}{T_i \omega} \right)^2} = k \sqrt{1 + \left( \frac{1}{k T_i \omega} \right)^2},$$

$$\theta(\omega) = \text{arctg} \left( -\frac{1}{k T_i \omega} \right) = -\frac{\pi}{2} + \text{arctg} k T_i \omega$$

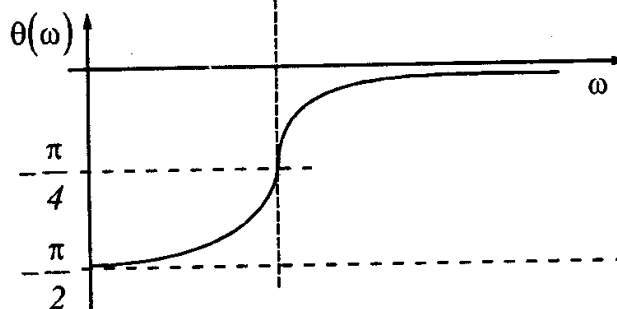
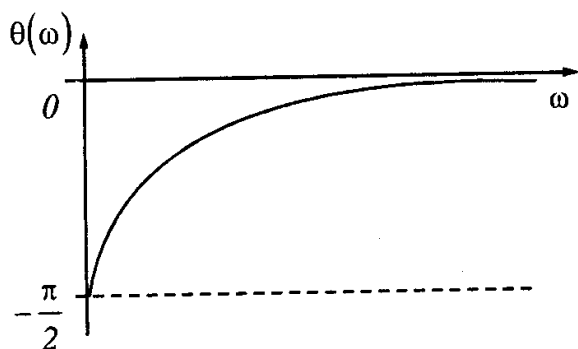
и графично имат вида, представен на фиг. 14.30.



Фиг. 14.30



Фиг. 14.31



Използвайки формулата  $L(\omega) = 20 \lg A(\omega)$ , с лекота получаваме логаритмичната амплитудно-честотна характеристика

$$L(\omega) = 20 \lg k \sqrt{1 + \left(\frac{1}{kT_i\omega}\right)^2},$$

която може да се построи графично посредством метода на асимптотите (фиг. 14.31).

### 14.2.3. Диференциращи звена и звено с чисто закъснение

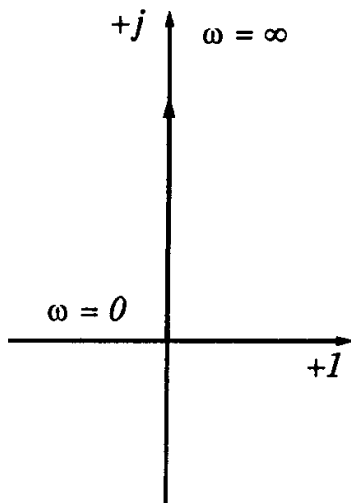
При диференциращите звена изходният сигнал зависи и от скоростта на изменение на входния сигнал.

#### А. Идеално диференциращо звено

Диференциалното уравнение, описващо идеалното диференциращо звено, е

$$y(t) = T_D \frac{dx(t)}{dt}.$$

Пример за такова звено е постояннотоковият тахогенератор, като вход е ъгълът на завъртане на вала, а изход - генерираното напрежение. Представителната му функция е



Фиг. 14.32

$$W(p) = T_D p \quad ,$$

а временните характеристики:

$$h(t) = L^{-1} \left[ T_D p \frac{1}{p} \right] = L^{-1} [T_D] = T_D \delta(t) \quad ,$$

$$W(t) = L^{-1} [T_D p] = T_D \frac{d\delta(t)}{dt} \quad .$$

Аналитичният израз за амплитудно-фазовата характеристика (фиг. 14.32) е

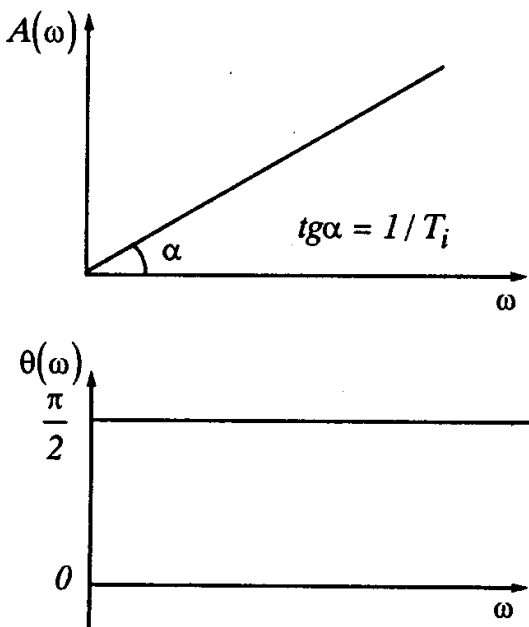
$$W(j\omega) = jT_D \omega \quad .$$

Оттук се намират изразите за амплитудно-честотната и фазово-честотната характеристики:

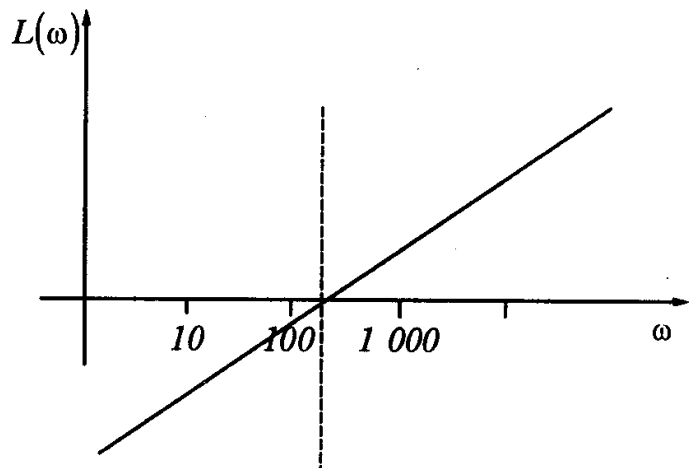
$$A(\omega) = \omega T_D \quad , \quad \theta(\omega) = \pi / 2 \quad ,$$

представени графично на фиг. 14.33.

Логаритмичната амплитудно-честотна характеристика се определя от израза  $L(\omega) = 20 \lg T_D \omega$ , описващ права с наклон  $20 \text{ dB/dec}$ . Показана е на фиг. 14.34.



Фиг. 14.33



Фиг. 14.34



### Б. Реално диференциращо звено

Реалното диференциращо звено се описва с диференциалното уравнение

$$a_0 \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = T_D \cdot \frac{dx(t)}{dt}$$

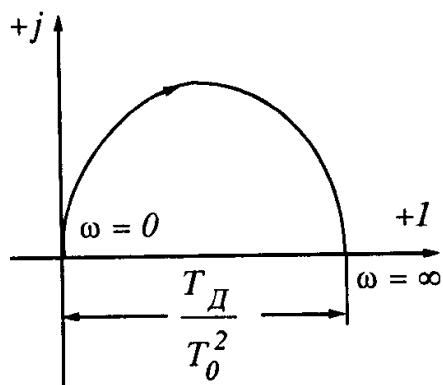
и може да се разглежда като две последователно свързани звена: апериодично и идеално диференциращо.

Предавателната функция на звеното е

$$W(p) = \frac{T_D p}{T p + 1},$$

където  $T$  е времеконстанта, изразяваща инерционността на звеното,

$T_D$  - коефициент, определящ връзката между изходния сигнал и скоростта на изменение на входния.



Фиг. 14.35

Амплитудно-фазовата характеристика (фиг. 14.35) представя изразът

$$W(j\omega) = \frac{jT_D\omega}{1 + jT\omega},$$

от които се намират останалите честотни характеристики:

Амплитудно-честотната характеристика е

$$A(\omega) = \frac{T_D\omega}{\sqrt{1 + (T\omega)^2}},$$

а фазово-честотната:  $\theta(\omega) = \frac{\pi}{2} - \arctg(T\omega)$ . И двете са представени графично на фиг. 14.36.

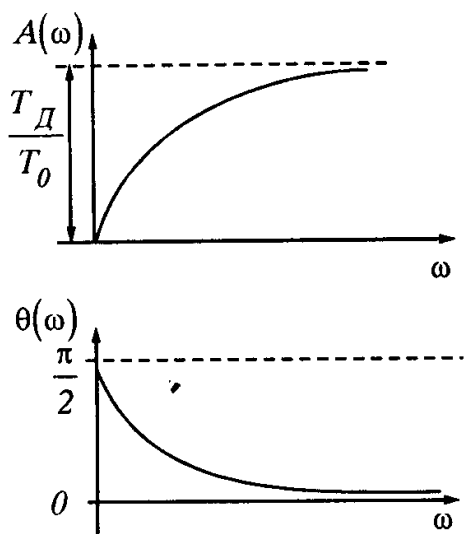
Логаритмично-честотната характеристика се намира чрез изрази

$$L(\omega) = 20 \lg A(\omega) = 20 \lg \frac{T_D\omega}{\sqrt{1 + (T\omega)^2}}$$

и може да бъде апроксимирана с две асимптоти:

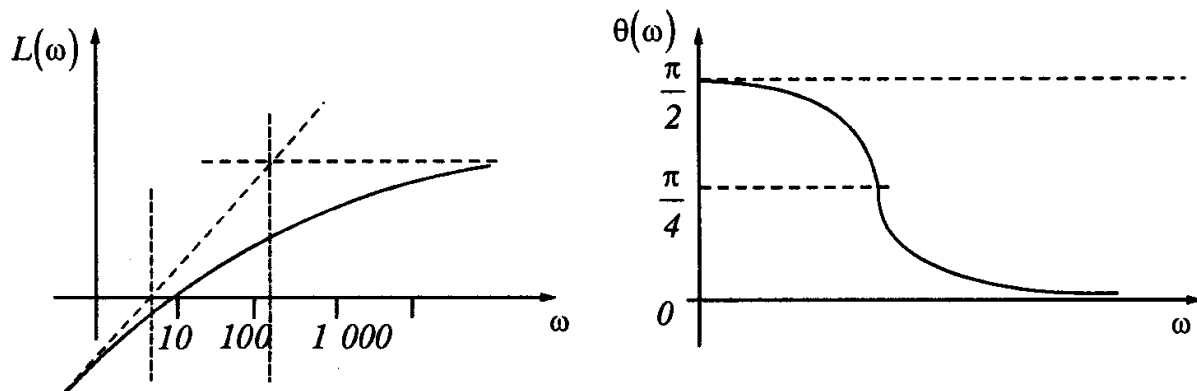
$$L(\omega) = 20 \lg T_D \omega,$$

$$L(\omega) = 20 \lg \frac{T_D\omega}{T\omega} = 20 \lg \frac{T_D}{T},$$

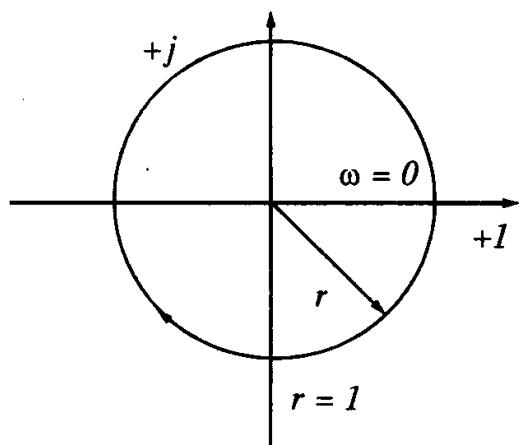


Фиг. 14.36

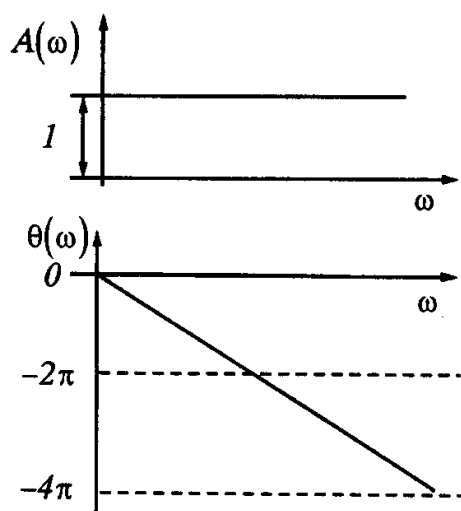
описващи две прави: първата с наклон  $20dB$  и втората - успоредна на абсцисата. Графичното ѝ построение е показано на фиг. 14.37.



Фиг. 14.37



Фиг. 14.38



Фиг. 14.39

### В. Звено с чисто времезакъснение

Звено е елементарно динамично и се въвежда, за да отрази времезакъсненията, характерни за много от елементите на САУ - дълги линии, транспортни ленти и др. Описва се с алгебричното уравнение

$$y(t) = x(t - \tau),$$

което показва, че изходният сигнал следва без изменение входния и изостава от него с време  $\tau$ . Преобразувано по Лаплас, равенството придобива вида

$$Y(p) = e^{-p\tau} X(p),$$

откъдето за предавателната функция се получава

$$W(p) = e^{-p\tau}.$$

Амплитудно-фазовата характеристика се дава от израза

$$W(j\omega) = e^{-j\omega\tau}.$$

Тя определя  $A(\omega) = 1$  и  $\theta(\omega) = -\omega\tau$ .

В този случай за логаритмично-чес-

тотните характеристики се получава

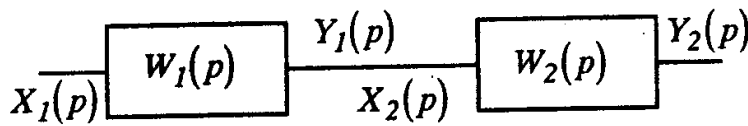
$$L(\omega) = 1 \quad \text{и} \quad \theta(\omega) = 20 \lg(\omega\tau).$$

### 14.3. Свързване на динамичните звена

В САУ динамичните звена се свързват по три начина: *последователно*, *паралелно* и *накрещно-паралелно* (наричано още *обратна връзка*).

#### 14.3.1. Последователно свързване

Последователно се нарича свързването, при което изходният сигнал от едно звено служи за входен сигнал в следващото звено.



Фиг. 14.40

Нека разгледаме две звена (фиг. 14.40) с предавателни функции  $W_1(p)$ ,  $W_2(p)$ , входове  $X_1(p)$  и  $X_2(p)$ , и изходи  $Y_1(p)$  и  $Y_2(p)$ .

Предавателната функция на така свързаните звена ще бъде

$$W(p) = \frac{Y_2(p)}{X_1(p)} = \frac{X_2(p)W_2(p)}{X_1} = \frac{Y_1(p)W_2(p)}{X_1} = W_1(p)W_2(p).$$

Ако по този начин са свързани  $n$  на брой звена, общата предавателна функция ще бъде

$$W(p) = W_1(p)W_2(p)\dots W_n(p) = \prod_{i=1}^n W_i(p) \quad .$$

Ако в това равенство се замести  $p = j\omega$ , ще се получи връзката на общата амплитудно-фазова характеристика с амплитудно-фазовите характеристики на отделните звена:

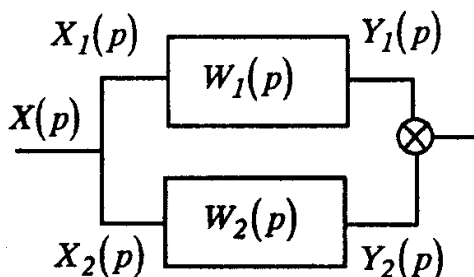
$$W(j\omega) = W_1(j\omega)W_2(j\omega)\dots W_n(j\omega) = \prod_{i=1}^n W_i(j\omega) \quad .$$

Чрез подобно заместване се достига и до формулата за логаритмично-честотната характеристика:

$$L(\omega) = 20 \lg A(\omega) = 20 \lg \prod A_i(\omega) = \sum 20 \lg A_i(\omega) \quad ,$$

$$L(\omega) = \sum_{i=1}^n L_i(\omega) \quad .$$

Полученото равенство е една от основните причини за използването на логаритмично-честотните характеристики - лесното им построяване и възможността за геометрично сумиране при последователно свързаните звена значително ускоряват анализа и синтеза на САУ, без използване на значителни изчислителни ресурси.



Фиг. 14.41

### 14.3.2. Паралелно свързване

Паралелно се нарича свързването на динамичните звена, при което входният сигнал постъпва едновременно на входовете на всички звена, а изходите им се сумират. Нека разгледаме две звена, с предавателни функции  $W_1(p)$ ,  $W_2(p)$ , входове  $X(p)$  и изходи  $Y_1(p)$ ,  $Y_2(p)$ , свързани паралелно (фиг. 14.41).

Предавателната функция на свързаните по този начин звена е

$$W(p) = \frac{Y_1(p) + Y_2(p)}{X(p)} = \frac{Y_1(p)}{X(p)} + \frac{Y_2(p)}{X(p)} = W_1(p) + W_2(p) .$$

Ако се обобщава за  $n$  паралелно свързани звена, следва:

$$W(p) = \sum_{i=0}^n W_i(p) .$$

Аналогично:

$$W(j\omega) = \sum_{i=0}^n W_i(j\omega) .$$

За намиране на амплитудната и фазовата честотни характеристики е необходимо първо да се установят реалната и имагинерната честотни характеристики:

$$W(j\omega) = U(\omega) + jV(\omega) = \sum_{i=1}^n W_i(j\omega) = \sum_{i=1}^n [U_i(\omega) + jV_i(\omega)] ,$$

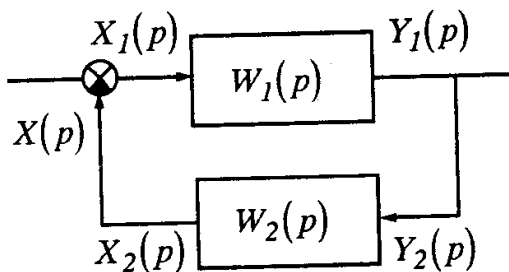
$$U(\omega) = \sum_{i=1}^n U_i(\omega) , \quad V(\omega) = \sum_{i=1}^n V_i(j\omega) ,$$

$$A(\omega) = \sqrt{U(\omega)^2 + V(\omega)^2} , \quad \theta(\omega) = \arctg \frac{V(\omega)}{U(\omega)} .$$

Използването на логаритмични честотни характеристики при паралелното свързване няма конкретни предимства.

### 14.3.3. Насрещно-паралелно свързване

При този тип свързване изходният сигнал от едно звено се подава към неговия вход директно или посредством друго звено. Нарича се още обратна връзка. Когато изходният сигнал се сумира с входния, обратната връзка се нарича положителна, а когато се изважда - отрицателна.



Фиг. 14.42

Нека разгледаме две звена с предавателни функции  $W_1(p)$ ,  $W_2(p)$ , входове  $X_1(p)$ ,  $X_2(p)$  и изходи  $Y_1(p)$ ,  $Y_2(p)$  и второто звено да е във веригата на обратната връзка (фиг. 14.42). Входният сигнал в системата да е означен с  $X$ .

$$\begin{aligned}
 W(p) &= \frac{Y_1(p)}{X(p)} = \frac{X_1(p)W_1(p)}{X_1(p) \mp Y_2(p)} = \frac{X_1(p)W_1(p)}{X_1(p) \mp W_2(p)Y_1(p)} = \\
 &= \frac{X_1(p)W_1(p)}{X_1(p) \mp W_2(p)X_1(p)Y_1(p)} = \frac{X_1(p)W_1(p)}{X_1(p)[1 \mp W_2(p)W_1(p)]} \\
 W(p) &= \frac{W_1(p)}{1 \mp W_1(p)W_2(p)}
 \end{aligned}$$

Знакът „минус“ се отнася за положителна обратна връзка, а „плюс“ - за отрицателна. За случаите с единична обратна връзка формулата придобива вида

$$W(p) = \frac{W_1(p)}{1 \mp W_1(p)}$$

Схемите, които представят САУ, съставени от динамични звена, подобно на използваните по-горе, се наричат структурни схеми на САУ. В структурните схеми отделните звена се отбелязват с правоъгълници, в които се нанасят предавателните им функции. Правоъгълниците се свързват с линии, по които със стрелки се означава посоката на предаването на сигналите. В структурните схеми предаването на сигналите е еднопосочно. При необходимост да се изрази обратното действие, например от реакцията на дадено звено, се въвежда обратна връзка.

## 14.4. Устойчивост и качество на системите за автоматично управление

### 14.4.1. Устойчивост

Определенията за устойчивост са разнообразни и субективни. Всяка система, която реагира адекватно на външните въздействия, може да се приеме за устойчива. При това трябва да се определи точно значението на думите „реагира“, „адекватно“ и „въздействия“. Например, възможно е една система да притежава добре реагиращи изходи при ограничено изменение на всеки от входовете, докато някоя от вътрешните променливи се изменя неограничено. Когато се отчита само реакцията на изходите на дадена система, то такава система трябва да се приеме за устойчива. Въпреки това, при разглеждане на реакцията на всички вътрешни променливи системата ще бъде неустойчива. Външните въздействия могат да се приемат като сигнали, въздействащи през цялото време или като набор от начални условия. И последно, признакът за устойчивост може да е променливите на състоянието и изходите да не нарастват или пък да намаляват до нула, когато се отстранят външните въздействия. Съгласно концепцията на Ляпунов, една система е устойчива, ако и входите и вътрешните променливи остават ограничени при достатъчно малки начални условия и външни въздействия, и след отстраняване на външните въздействия се движат към нула, когато времето клони към безкрайност.

За нелинейните системи или за системите, които променят параметрите си във времето, дефинирането на устойчивостта има още повече решения, част от които са твърде сложни, за да се обяснят кратко. Тук ще бъдат разгледани само някои по-елементарни случаи, необходими за изучаването на линейните системи с постоянни коефициенти.

### 14.4.2. Устойчивост на линейни системи с постоянни коефициенти

Възприемаме следното инженерно определение за устойчивост:

*Една система е устойчива, когато се връща в равновесното си състояние след отстраняване на въздействията, които са я извели от това състояние.*

Нека имаме система, описвана със следното диференциално уравнение:

$$a_0 \frac{d^n y}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_n y = b_0 \frac{d^m u_1}{dt^m} + b_1 \frac{d^{m-1} u_1}{dt^{m-1}} + \dots + b_m u_1 + c_0 \frac{d^m u_2}{dt^m} + c_1 \frac{d^{m-1} u_2}{dt^{m-1}} + \dots + c_m u_2 + \dots$$

Решението се състои от две части: общо решение и частно решение. Общото се определя от хомогенното диференциално уравнение и описва поведението на системата в преходните процеси, а частното зависи от дясната част на уравнението и описва поведението на системата под влияние

на външните въздействия. За определяне на устойчивостта, съгласно определението, от значение е дали преходният процес ще затихне с течение на времето, когато външните въздействия са равни на нула, т.е. от общото решение.

Изразено аналитично:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} y_{об}(t) = 0$$

Общото решение на едно линейно диференциално уравнение се определя от характеристичното му уравнение и има следната форма:

$$y_{об}(t) = \sum_{i=1}^n C_i e^{p_i t}$$

където  $p_i$  са корени на характеристичния полином,

$C_i$  - интеграционни времеконстанти.

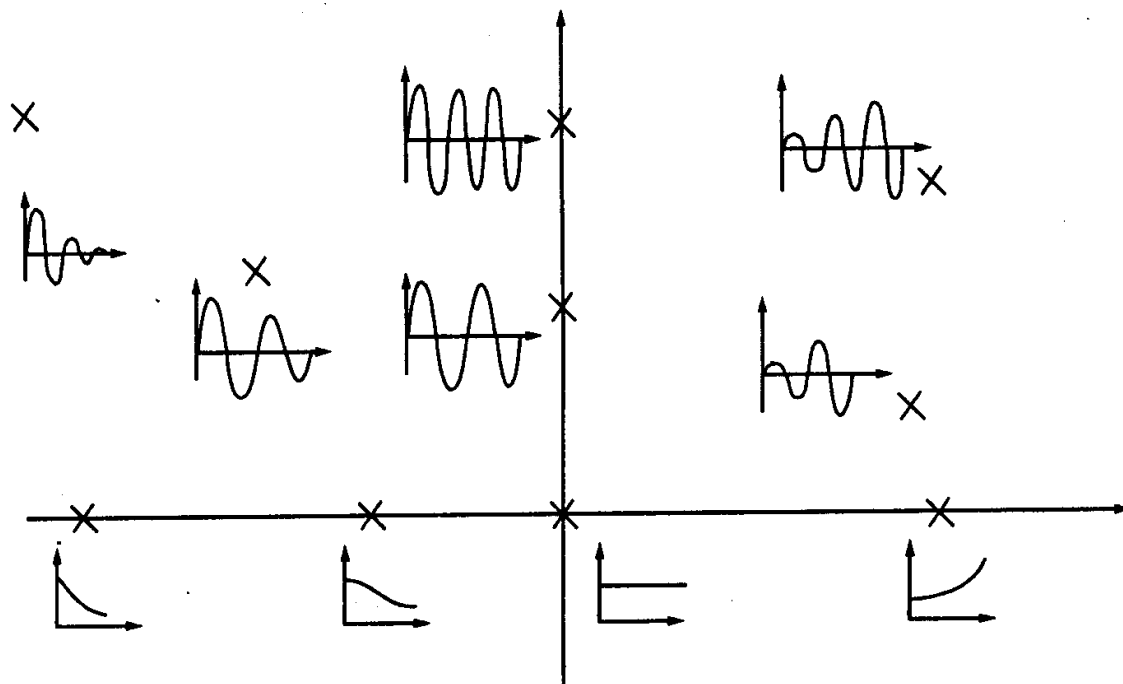
В зависимост от корените на характеристичния полином, за решението има следните възможности:

### 1. Реални корени

Реалните корени определят аperiодичен характер на преходните процеси.

#### а) Реални отрицателни корени

В този случай всички членове на сумата клонят по експонента си към нула и преходният процес затихва аperiодично, както е показано в III-ти квадрант на фиг. 14.43. Границата е равна на нула, следователно, системата е устойчива.



Фиг. 14.43

**б) Един или повече реални положителни корени**

Всеки положителен корен определя член в сумата, който нараства неограничено и системата е неустойчива.

**в) Един от корените е равен на нула, а останалите са отрицателни**

Нулевият корен определя член в сумата, който не се променя с течение на времето. В този случай границата ще клони към някаква постоянна стойност и, с оглед на определението за устойчивостта, системата ще е неустойчива. За разлика от предходния случай (б), изходният параметър остава ограничен и се определя като граница на аperiodичната устойчивост.

Случаите (б) и (в) са показани в IV-ти квадрант на фиг. 14.43.

**2. Комплексни корени**

Комплексните корени определят периодичния характер на преходните процеси. Нека системата има поне два комплексни корена, а всички останали да са отрицателни реални. Двойката комплексно спрегнати корени  $p_i = \alpha \pm j\beta$  определят част от сумата в общото решение

$$C_k e^{(\alpha+j\beta)t} + C_{k+1} e^{(\alpha-j\beta)t} = e^{\alpha t} (C_k e^{j\beta t} + C_{k+1} e^{-j\beta t})$$

Като се използва формулата на Ойлер, се получава

$$e^{\alpha t} [C_k (\cos \beta t + j \sin \beta t) + C_{k+1} (\cos \beta t - j \sin \beta t)]$$

и може да се приведе във вид  $e^{\alpha t} A \sin(\beta t + \varphi)$ , т.е. синусоида с амплитуда  $A e^{\alpha t}$ , зависеща от инерционните константи  $C_i$ ,  $\alpha$ , и фаза, зависеща от  $\beta$ .

**а) Комплексните корени са с отрицателна реална част**

В този случай първият множител, задаващ амплитудата на колебанията, с течение на времето намалява и клони към нула, което определя устойчива система.

**б) Комплексните корени са с положителна реална част**

Първият множител с течение на времето расте и клони към безкрайност, което определя неустойчива система, поради непрекъснато нарастващата амплитуда.

**в) Чисто имагинерни корени**

Чисто имагинерните корени определят колебания с постоянна амплитуда. Случаят също се явява граничен и се нарича граница на колебателната устойчивост.

От разгледаните възможни решения на диференциалните уравнения е очевидно, че за да е устойчива една система е необходимо корените на ха-



рактеристичния ѝ полином да имат отрицателни реални части. Достатъчно е само един от корените да има положителна реална част и системата ще е неустойчива. Когато се разглежда разположението на корените в комплексната равнина, се налага изводът, че системата е устойчива при корени, разположени наляво от имагинерната ос (вж. фиг. 14.43).

Тъй като не винаги е удобно да се търсят корените на характеристичния полином, учените са установили и други начини за определяне на устойчивостта на системите - т. нар. *критерии за устойчивост*. Най-елементарният от тях, изразяващ необходимото условие една система да е устойчива, е коефициентите на характеристичния полином да са положителни. Това условие е необходимо, но не и достатъчно - ако един коефициент е с отрицателен знак, системата ще е неустойчива.

### 14.4.3. Алгебрични критерии за устойчивост

Алгебричните критерии позволяват да се определи устойчивостта без да се търсят корените на характеристичния полином, което в края на миналия век е било изключително трудно. Устойчивостта се определя на базата на алгебрични действия над коефициентите на характеристичния полином.

Английският математик Раус пръв публикува такъв критерий през 1874 г. По-широко разпространение обаче получава критерият във вид на детерминанти на немския математик Хурвиц (1895 г.).

#### • Критерий на Хурвиц

За определяне на устойчивостта по критерия на Хурвиц се съставя квадратна матрица от  $n$ -ти ред от коефициентите на характеристичния полином по следния начин: Първият ред се попълва с коефициентите с нечетни индекси. На втория ред се поставят всички останали коефициенти. Следващите редове повтарят тези два реда, но сместени с по един елемент надясно.

Попълнената по този начин матрица има за главен диагонал коефициентите с индекси от 1 до  $n$ . Останалите празни места се запълват с нули.

Пресмятат се поддетерминантите по главния диагонал:

$$\Delta_1 = a_1, \quad \Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix}, \quad \Delta_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 \\ a_0 & a_2 & a_4 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix} \quad \text{и т.н.}$$

Необходимото и достатъчно условие за устойчивост на системата е всички поддетерминанти да са положителни:  $\Delta_i > 0$ .

Когато  $\Delta_n = 0$ , системата е на границата на апериодичната устойчивост, а когато  $\Delta_{n-1} = 0$  - на границата на колебателната устойчивост.

#### 14.4.4. Честотни критерии за устойчивост

При много от системите за автоматично управление динамичните модели на обекта са неизвестни и поради тяхната сложност е трудно получаването им във вид на диференциални уравнения и предавателни функции. В тези случаи се използват експериментално снети честотни характеристики. Оказва се, че е възможно устойчивостта на системата да се определя по-лесно като се използват честотни критерии за устойчивост, без да се прибягва до намиране на характеристичния полином на системата. Нещо повече, честотните критерии за устойчивост позволяват да се оценяват промените в настройките на регулатора от гледна точка на устойчивостта.

Всички честотни критерии се основават на принципа на аргумента (Теорема на Коши).

##### • Принцип на аргумента

Разглежда се характеристичния полином

$$H(p) = a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n ,$$

който може да се разложи във вида

$$H(p) = a_0 (p - p_1)(p - p_2) \dots (p - p_n) ,$$

където  $p_i$  са корените на характеристичния полином.

Ако заместим  $p = j\omega$ , получаваме характеристичния вектор

$$H(j\omega) = a_0 (j\omega - p_1)(j\omega - p_2) \dots (j\omega - p_n) ,$$

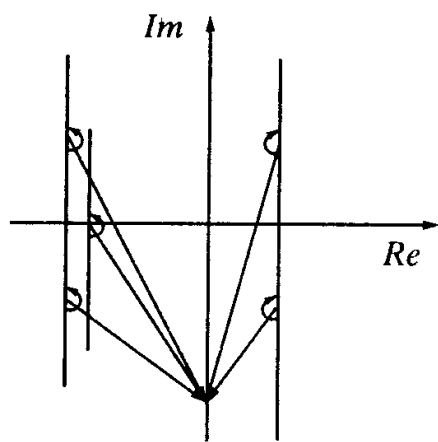
който е комплексна функция на  $\omega$  и в същото време е представен като произведение от елементарни вектори, с начало корените  $p_1$ ,  $p_2$ , и т. н., и край върху ординатната ос, определян от  $\omega$ .

Равенството може да се представи в експоненциален вид:

$$H(j\omega) = A(\omega) e^{j\theta(\omega)} = A_1(\omega) e^{j\theta_1(\omega)} A_2(\omega) e^{j\theta_2(\omega)} \dots A_n(\omega) e^{j\theta_n(\omega)} ,$$

откъдето 
$$\theta(\omega) = \sum_{i=1}^n \theta_i(\omega) .$$

Това означава, че общият ъгъл на завъртане на вектора  $H(j\omega)$  при из-



Фиг. 14.44

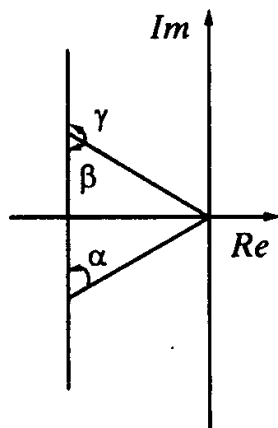
менение на честотата от  $-\infty$  до  $+\infty$  е сума от ъглите на завъртане на елементарните вектори. Записва се аналитично по следния начин:

$$\Delta \arg H(j\omega) = \sum \Delta \arg(j\omega - p_i) .$$

Завъртането на елементарните вектори може да се представи и графично (фиг. 14.44).

За векторите, разположени отляво на имагинерната ос, завъртането е  $\pi$ , тъй като започва от  $-90^\circ$  за  $-\infty$  и се върти в положителна посока (обратна на часовниковата стрелка) до  $90^\circ$  за  $+\infty$ . За векторите, разположени отдясно, изменението е  $-\pi$  (завъртането е по часовниковата стрелка) при изменение на честотата от  $-\infty$  до  $+\infty$ . Следователно, при  $m$  корена на полинома, които са разположени отдясно на имагинерната ос:

$$\Delta \arg H(j\omega) = (n - m)\pi + m(-\pi) = (n - 2m)\pi \quad -\infty \leq \omega \leq +\infty$$



Фиг. 14.45

При изменение на честотата от  $0$  до  $+\infty$  изменението на аргумента ще е два пъти по-малко. За корените, разположени на реалната ос, изменението на ъгъла с  $90^\circ$  е очевидно. Комплексните корени са спрегнати по двойки и като се разгледат получаващите се равнобедрени триъгълници се вижда, че  $\alpha = \beta$  и  $\beta + \gamma = \pi$ , т.е. сумарното изменение за всяка двойка е  $180^\circ$ . Тогава

$$\Delta \arg H(j\omega) = (n - m)\pi + m(-\pi) = (n - 2m)\frac{\pi}{2} \quad -\infty \leq \omega \leq +\infty$$

#### 14.4.5. Критерий на Найквист

Критерият на Найквист свързва устойчивостта на затворената система с амплитудно-честотните характеристики на отворената. За обяснението му се създава помощната функция

$$F(j\omega) = 1 + W(j\omega) = 1 + \frac{B(j\omega)}{A(j\omega)} = \frac{A(j\omega) + B(j\omega)}{A(j\omega)} ,$$

където  $W(j\omega)$  е амплитудно-фазовата характеристика на отворената система. Помощната функция има за числител характеристичния полином на отворената система и за знаменател - характеристичния полином на затворената система.

В зависимост от устойчивостта на отворената система се разглеждат

три случая:

*а) Отворената система е устойчива*

Това означава, че всички корени на полинома  $A$  са в лявата полуравнина и въз основа на принципа на аргумента можем да запишем

$$\Delta \arg A(j\omega) = n \frac{\pi}{2} \quad 0 \leq \omega \leq +\infty$$

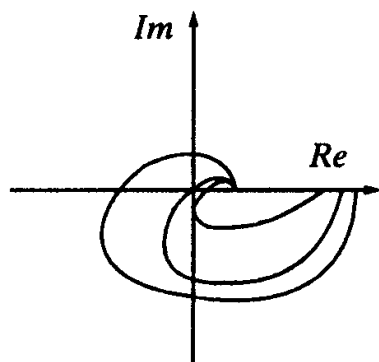
За една реална система степента на полинома в знаменателя винаги е по-голяма или равна на полинома в числителя и така помощната функция има числител и знаменател от една и съща степен. За да бъде и затворената система устойчива, е необходимо всичките ѝ корени да са отрицателни:

$$\Delta \arg [A(j\omega) + B(j\omega)] = n \frac{\pi}{2} \quad 0 \leq \omega \leq +\infty$$

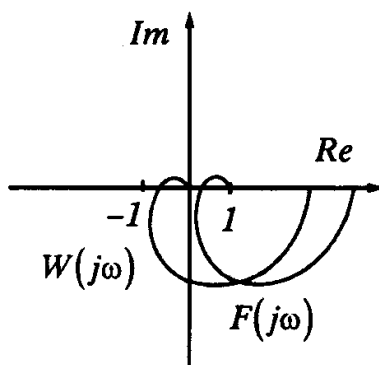
Изменението на аргумента на  $F(j\omega)$  е

$$\Delta \arg F(j\omega) = \Delta \arg [A(j\omega) + B(j\omega)] - \Delta \arg A(j\omega) \quad , \quad 0 \leq \omega \leq +\infty$$

$$\Delta \arg F(j\omega) = n \frac{\pi}{2} - n \frac{\pi}{2} = 0 \quad , \quad 0 \leq \omega \leq +\infty$$



Фиг. 14.46



Фиг. 14.47

което означава, че векторът  $F(j\omega)$  при честота, клоняща към безкрайност, трябва да се върне на изходния ъгъл, от който е започнал движението си. Ходографът на вектора започва от точката  $b_m/a_n$ , намираща се върху абсцисата, и свършва в т. 1, като при това не трябва да обикаля около началото на координатната система.

На фигура 14.46 са представени няколко ходографа на вектора  $F(j\omega)$  за различните видове системи: устойчива (не обикаля около началото), неустойчива (обикаля около началото) и на границата на устойчивостта (минава през началото на координатната система). Нека върху една координатна система бъдат нанесени векторите  $F(j\omega)$  и  $W(j\omega)$  - вижда се, че първият е сместен надясно с 1 на фиг. 14.47. Тогава не е необходимо да се чертае  $F(j\omega)$ , а да се замени условието ходографът на  $F(j\omega)$  да не обика-

ля около началото на координатната система с условието ходографът на  $W(j\omega)$  да не обикаля около точката  $(-1,0)$ . Оттук е и формулировката на критерия за този случай: *Затворената система ще е устойчива, ако амплитудно-фазовата характеристика на отворената система не обхваща точката  $(-1,0)$ .*

**б) Отворената система е неустойчива**

Нека отворената система има  $m$  корена в дясната полуравнина. Тогава на базата на принципа на аргумента:

$$\Delta \arg A(j\omega) = (n - 2m) \frac{\pi}{2} \quad 0 \leq \omega \leq +\infty$$

За да бъде и затворената система устойчива е необходимо

$$\Delta \arg [A(j\omega) + B(j\omega)] = n \frac{\pi}{2} \quad 0 \leq \omega \leq +\infty$$

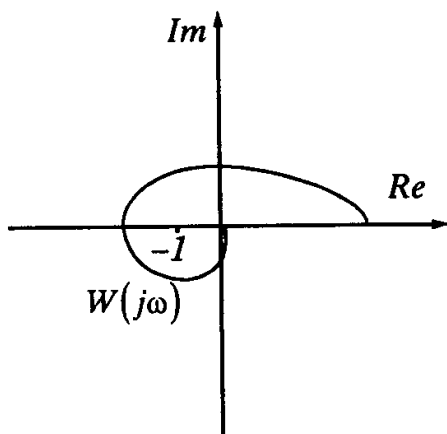
Изменението на аргумента на  $F(j\omega)$  е

$$\Delta \arg F(j\omega) = \Delta \arg [A(j\omega) + B(j\omega)] - \Delta \arg A(j\omega) = n \frac{\pi}{2} - (n - 2m) \frac{\pi}{2} = 2m \frac{\pi}{2}$$

Като се приложи графичната интерпретация, се получава формулировката на критерия за този случай:

*Затворената система е устойчива, когато амплитудно-фазовата характеристика на отворената система обикаля в положителна посока около точката  $(-1,0)$   $m/2$  пъти, където  $m$  е броят на корените в дясната полуравнина.*

На фигура 14.48 е показана система с два корена в дясната полуравнина.

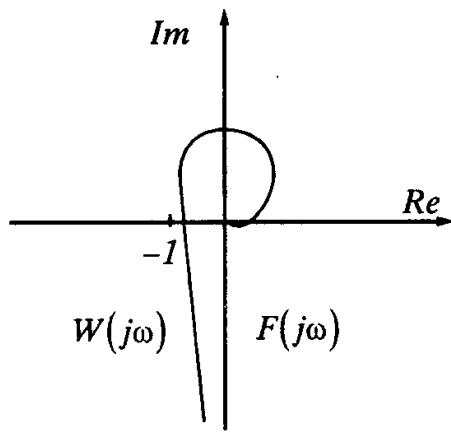


Фиг. 14.48

**в) Отворената система е на границата на устойчивостта**

Нека отворената система е астатична, т.е. да притежава интегриращи звена в контура. Амплитудно-фазовата ѝ характеристика ще бъде

$$W(j\omega) = \frac{B(j\omega)}{(j\omega)^k A_1(j\omega)}$$



Фиг. 14.49

При  $k = 1$  амплитудно-фазовата характеристика има вида, показан на фиг. 14.49. Тя има точка на прекъсване за  $\omega = 0$ . За да се приложи принципът на аргумента, трябва нулевият корен да се присъедини към лявата или дясната полуравнина. Нека е присъединен към лявата полуравнина, като се заобиколи отдясно по дъга с безкрайно малък радиус и се разглежда границата на  $W(j\omega)$ :

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} W(j\omega) = \lim_{\omega \rightarrow 0} \frac{B(j\omega)}{j\omega A_1(j\omega)} = \lim_{\omega \rightarrow 0} \frac{b_m}{\omega a_{n-1}}$$

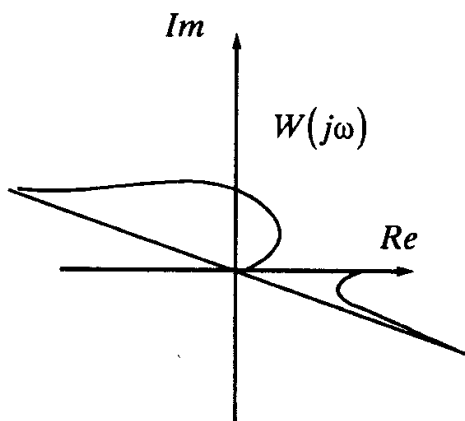
Заобикалянето по дъга с безкрайно малък радиус отдясно се изразява чрез заместването  $\omega = re^{j\varphi}$  ( $r \rightarrow 0, 0 < \varphi < \frac{\pi}{2}$ ):

$$\lim_{r \rightarrow 0, 0 < \varphi < \frac{\pi}{2}} \frac{b_m}{r \cdot e^{j\varphi}} = \lim_{R \rightarrow \infty, 0 < \varphi < \frac{\pi}{2}} R \cdot e^{-j\varphi}$$

и превръща амплитудно-фазовата характеристика (АФХ) в дъга с безкрайно голям радиус  $R$ , движеща се в отрицателна посока. За  $\omega = 0$ , АФХ лежи на реалната ос, но в безкрайността.

В този случай, ако се допълни АФХ с дъга с безкрайно голям радиус,  $R$  и ъгъл от  $90^\circ$  с отрицателна посока за точката на прекъсване, и тя не обиколи точката  $(-1, 0)$ , системата ще е устойчива.

По подобен начин се доказва критерият при наличие на чисто имагинерни корени - фиг. 14.50. Те също водят до неопределеност на АФХ. За тези точки на прекъсване АФХ също трябва да се допълни с дъга с безкрайно голям радиус  $R$  с отрицателна посока, но за ъгъл  $\pi$ . Ако допълнената по този начин АФХ не обхваща точката  $(-1, 0)$  затворената система ще е устойчива.



Фиг. 14.50

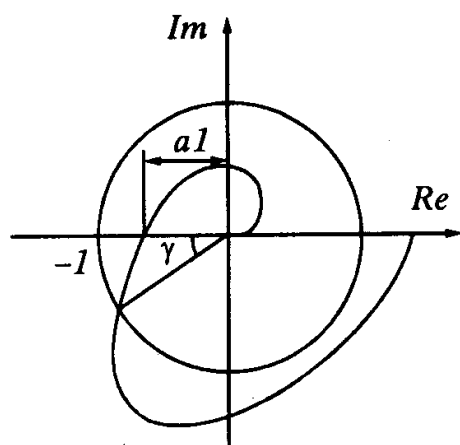
Критерият на Найквист може да се обобщава за отворени системи на границата на устойчивостта по следния начин: **Една система, имаща корени на имагинерната ос в отворено състояние, ще е устойчива, когато се затвори веригата на обратната връзка**

ка, ако амплитудно-фазовата ѝ характеристика, допълнена за точките на прекъсване с дъги с безкрайно голям радиус в отрицателна посока, не обхваща точката  $(-1,0)$ .

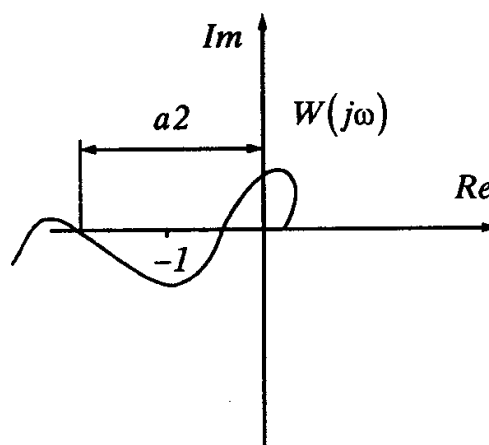
По време на експлоатацията част от параметрите на системите се променят, поради което е необходимо те да притежават известен запас по отношение на устойчивостта. Критерият на Найквист е много удобен за дефинирането на такива запаси.

**Запас по фаза** се нарича ъгълът  $\gamma$  (фиг. 14.51) между отрицателната част на абсцисата и вектора  $W(j\omega)$  в точката, където ходографът му пресича единичната окръжност около началото на координатната система. Този ъгъл осигурява устойчивостта на системата при изменение на амплитудно-фазовата характеристика.

**Запас по модул  $a1$**  (фиг. 14.51) е реципрочната стойност на отсечката, свързваща пресечната точка на АФХ с отрицателната част на абсцисата и началото на координатната система. Когато АФХ пресича неколkokратно отрицателната част на абсцисата, се определя още един запас на устойчивост,  $a2$  (фиг. 14.52). За различните системи изискванията за запас на устойчивост по фаза и модул са различни, но обикновено  $\gamma$  е в нормите  $20 \div 60^\circ$ .



Фиг. 14.51



Фиг. 14.52

#### 14.4.6. Критерий за устойчивост на Боде

Критерият за устойчивост на Боде може да се разглежда като интерпретация на критерия на устойчивост на Найквист относно логаритмичните честотни характеристики. Логаритмичните честотни характеристики се построяват много по-лесно и дават възможност с лекота да се отразят, при необходимост, промените от настройване на коефициентите на регулатора.

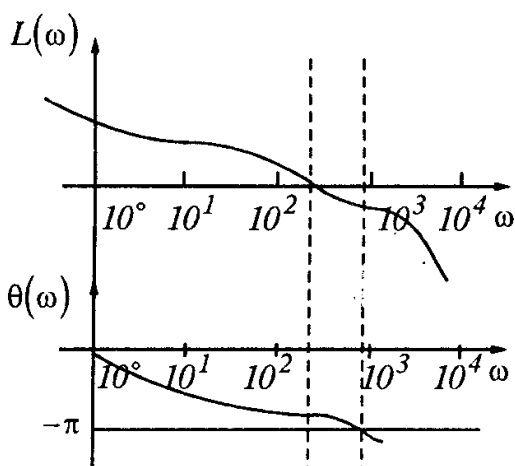
Ако се разгледа критерият на Найквист в равнините на логаритмични-

те честотни характеристики, могат да се направят следните изводи:

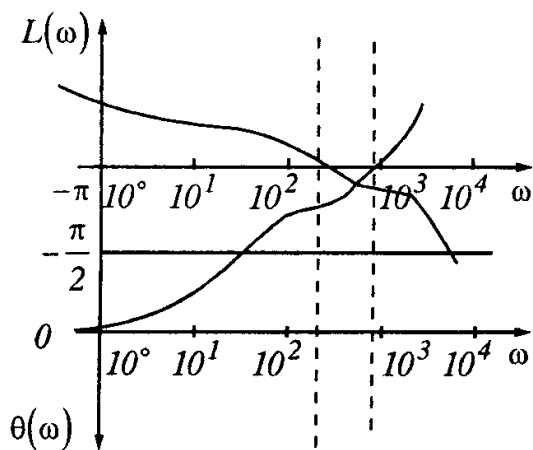
1. Единичната окръжност от АФХ се трансформира в абсцисата на логаритмичната амплитудно-честотна характеристика (ЛАЧХ).

2. Точката  $(-1,0)$  на АФХ, явяваща се пресечна точка на вектора  $(-180^\circ)$  и единичната окръжност, не съществува и в равнините на логаритмичните честотни характеристики. По тази причина трябва да се съпоставят логаритмичните честотни характеристики с двете прави, посочени по-горе: абсцисата на ЛАЧХ и  $(-180^\circ)$  на логаритмичната фазово-честотна характеристика (ЛФЧХ).

На тази основа Боде формулира следния критерий: *Системата ще е устойчива, ако ЛАЧХ на отворената система пресече абсцисата при стой-*



Фиг. 14.53



Фиг. 14.54

ности на ЛФЧХ, по-големи от  $(-180^\circ)$ .

Ако стойността на ЛФЧХ на отворената система е по-голяма от  $(-180^\circ)$ , т.е.  $|\theta(\omega_x)| < \pi$ , когато  $L(\omega_x) = 1$ , затворената система ще е устойчива (фиг. 14.53).

При логаритмичните честотни характеристики също се определят запасите по фаза и модул: запасът по фаза е разликата  $\theta_{\omega_{cp}}^{(-180^\circ)}$ , а запасът по модул се определя от разстоянието между абсцисата и ЛАЧХ за честотата, при която ЛФЧХ пресича  $180^\circ$ .

За по-лесно определяне на устойчивостта логаритмичните, амплитудна и фазова честотни характеристики се построяват в обща координатна мрежа (фиг. 14.54), като ординатата на фазово-честотната характеристика се обръща надолу и абсцисата на ЛАЧХ се съвместяват с правата  $(-180^\circ)$ . Така се следи коя от тези две характеристики ще пресече първа общата права. Когато това е ЛАЧХ, системата ще е устойчива и, обратно - ако ЛФЧХ

пресече първа, системата ще е неустойчива. За системи с ЛФЧХ, неколккратно пресичаща правата  $(-180^\circ)$ , се следи фазата, когато ЛАЧХ пресича абсцисата. Когато тя е по-голяма от  $(-180^\circ)$ , системата е устойчива.



#### 14.4.7. Устойчивост на системи, представени в пространството на състоянията

Най-общ критерий за системи, представени в пространството на състоянията, публикува през 1892 г. руският учен А. М. Ляпунов в труда си „Обща теория за устойчивост на движението“. За да разгледаме някои основни моменти от тази теория, ще се спрем на система, с вектор на състоянието

$x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ , описвана с уравнението

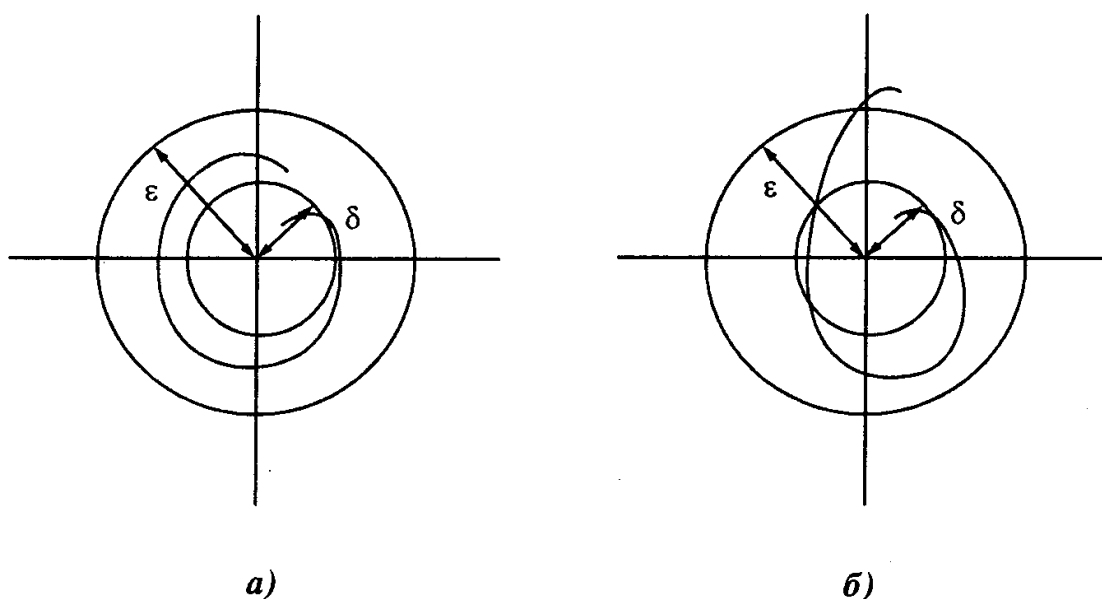
$$\frac{dx}{dt} = f(x) .$$

Когато  $f(x) = A \times x$ , където  $A$  е матрица с постоянни коефициенти, системата е линейна и стационарна. (В настоящото изложение по-често се разглеждат именно линейни и линеаризирани стационарни системи.) Приема се, че уравнението е написано така, че  $x = 0$  е равновесната точка (всички променливи се изразяват с отклонението си от тази точка) и оттук  $f(0) = 0$ . Системата е устойчива по Ляпунов в тази точка, ако съществува област за началните условия, която се явява източник на ограничени траектории за движението на системата, независимо от времето. Системата е асимптотически устойчива, когато траекториите се стремят към началото на координатната система при време, клонящо към безкрайност. По-стриктно определението може да бъде изразено по следния начин: Системата, изразена с горното равенство, има устойчиво равновесие в точката  $x = 0$ , когато за всички начални състояния на областта  $\delta$ , ограничена от  $|x_{(0)}| \leq \delta$ , съществува такава област с радиус  $\epsilon$ , че  $|x_{(t)}| \leq \epsilon$ , независимо от времето.

Графично устойчивата (а) и неустойчивата (б) системи са показани на фиг. 14.56.

Линейни системи с постоянни коефициенти, определени с посоченото равенство  $\frac{dx}{dt} = A \times x$ , са устойчиви по Ляпунов, когато нито една от собствените стойности на матрицата  $A$  не е в дясната част на комплексната равнина и ако има стойности на имагинерната ос, те трябва да са прости. (Кратните корени на имагинерната ос определят реакцията на системата като непрекъснато нарастваща и, следователно, тя ще е неустойчива.) Линейни системи с постоянни коефициенти са асимптотически устойчиви по Ляпунов, когато всички собствени стойности на матрицата  $A$  са в лявата

част на комплексната равнина. От сравнението на устойчивостта по Ляпунов с вече разгледаните случаи се вижда, че тя обхваща и случаите на гранична устойчивост, докато асимптотическата устойчивост по Ляпунов ги изключва.



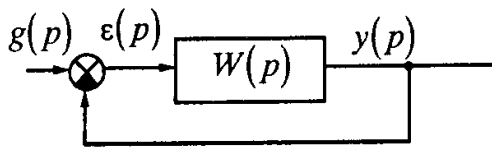
Фиг. 14.55

#### 14.5. Качество на системите за автоматично регулиране

За да работи без намесата на човека и да изпълнява поставените задачи, всяка система за автоматично управление трябва не само да е устойчива, но и да удовлетворява изискванията, поставени пред нея, т.е. конкретни качествени показатели. Качествените показатели обикновено се свързват с грешката, с която системата изпълнява поставените задачи. Тази грешка обаче зависи в голяма степен от външните смущения и тъй като те се изменят по случаен закон, тя няма постоянна стойност дори и за една и съща система с едно и също задание. Затова за определяне на качеството на САУ се използват няколко типови оценки, определящи работата им в различни условия - в установен режим това се показателите за точност на системата, докато преходните режими се оценяват по запаса на устойчивост и бързодействието ѝ. Съществуват и комплексни оценки - например интегралните.

### 14.5.1. Точност при типови въздействия

Нека разгледаме няколко закона на изменение на външните въздействия, като предположим, че изследваме системата по отношение само на едно въздействие, а останалите са равни на нула.



Фиг. 14.56

**А. Неподвижна система - система, в която външните въздействия имат постоянна стойност**

В този случай качеството на системата се характеризира с установената грешка,  $\epsilon_{уст}$ , с която се изпълнява равенството

$y(t) = g(t)$ . Нека работим със системата, дадена на фиг. 14.56.

$$\epsilon(p) = g(p) - y(p) = g(p) - \epsilon(p) * W(p),$$

$$\epsilon(p) = \frac{g(p)}{1 + W(p)}.$$

В установен режим  $g(p) = \frac{1}{p}g$  и грешката ще клони към границата

$$\epsilon_{уст} = \lim_{t \rightarrow \infty} \epsilon(t) = \lim_{p \rightarrow 0} p \left( \frac{g(p)}{1 + W(p)} \right) = \lim_{p \rightarrow 0} \frac{g}{1 + W(p)},$$

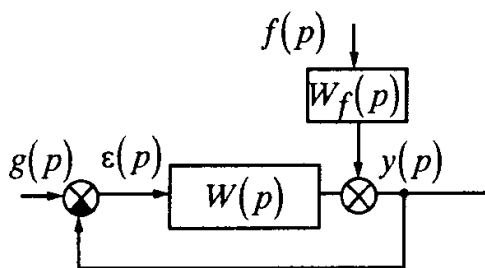
$$\epsilon(t) \lim_{p \rightarrow 0} \frac{g}{1 + \frac{b_m}{a_n}},$$

където  $b_m$  и  $a_n$  са свободните членове в полиномите на числителя и знаменателя на предавателната функция. Отношението  $b_m / a_n$  представлява *коэффициента на усилване на системата*,  $k$ . Колкото той е по-голям, толкова установената грешка ще е по-малка. При астатичните системи  $a_n = 0$  и  $k$

клони към безкрайност. Тогава грешката по отношение на задаващото въздействие е равна на нула.

Нека разгледаме и грешката по отношение на смущаващо въздействие, където  $g(t) = 0$  и  $f(t) = fI(t)$ , а  $g(p) = 0$  и  $f(p) = \frac{1}{p}f$

са техните образи по Лаплас.



Фиг. 14.57

$$e(p) = -y(p), \quad \varepsilon(p)W(p) + f(p)W_f(p) = -\varepsilon(p), \quad \varepsilon(p) = \frac{-f(p)W_f(p)}{1+W(p)},$$

$$e(t) = \lim_{p \rightarrow 0} p\varepsilon(p), \quad \text{тъй като } f(p) = L[f.I(t)] = f.I/p,$$

тогава:

$$e(t) = \lim_{p \rightarrow 0} \frac{-f.W_f(p)}{1+W(p)}, \quad e(t) = \lim_{p \rightarrow 0} \frac{-f \cdot \frac{c_l}{a_n}}{1 + \frac{b_m}{a_n}},$$

където  $c_l / a_n$  е коефициентът на усилване в предавателната функция по отношение на смуцаващото въздействие, а  $b_m / a_n = k$  - коефициентът на усилване на системата по отношение на заданието.

При астатизъм  $k \rightarrow \infty$  и грешката по отношение на смущението ще е равна на нула само при  $c_l = 0$ .

### ***Б. Външното въздействие се изменя с постоянна скорост***

В този случай  $g(t) = v.t$ , а  $g(p) = v/p^2$ . Тогава

$$\varepsilon_{уст} = \lim_{p \rightarrow 0} \frac{v/p}{1 + b_m/a_n}.$$

В случая на статична система грешката ще клони към безкрайност; когато  $a_n = 0$ , тя ще има постоянна стойност  $\varepsilon_{уст} = v/k_1$ , където  $k_1 = b_m/a_{n-1}$ ; при астатизъм от втори ред  $a_n = a_{n-1} = 0$  и грешката ще е нула. Коефициентът  $k_1$  се нарича *коефициент на усилване по скорост*, а реципрочната му стойност  $C_1 = 1/k_1$  - *коефициент на грешката по скорост*.

### ***В. Външното въздействие се изменя с постоянно ускорение***

В този случай  $g(t) = a.t^2$ , а  $g(p) = 2a/p^3$ . Грешката ще клони към безкрайност при астатизъм на системата, по-малък от втори ред. При астатизъм от втори ред ( $a_n = a_{n-1} = 0$ ) тя ще е постоянна:

$$\varepsilon_{уст} = 2a/k_2,$$

където  $a$  е стойността на ускорението,

$k_2 = b_m/a_{n-2}$  - коефициент на усилване по ускорение.

### Г. Външното въздействие се изменя по хармоничен закон

В този случай

$$g(t) = g_{max} \sin(\omega_g t),$$

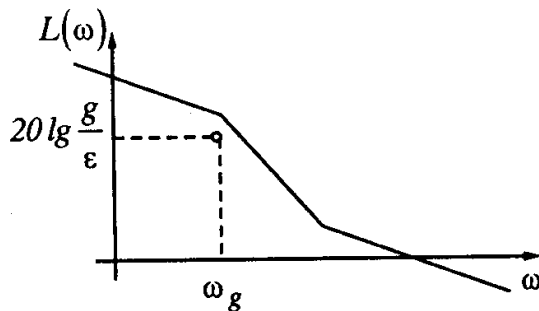
където  $g_{max}$  е амплитудата на хармоничните колебания, а  $\omega_g$  - тяхната честота.

Грешката ще се изменя също по хармоничен закон със същата честота,  $\omega_g$ . Максималната ѝ стойност,  $\varepsilon_{max}$  може да се намери по формулата

$$\varepsilon_{max} = \frac{g_{max}}{1 + |W(j\omega_g)|},$$

където  $|W(j\omega_g)|$  е модулът на АФХ за честота  $\omega_g$ .

В случаите, когато  $g_{max} \gg \varepsilon_{max}$ ,  $\varepsilon_{max} \approx \frac{g_{max}}{A(\omega_g)}$ , където  $A(\omega_g)$  е стой-



Фиг. 14.58

ността на АЧХ на отворената система за  $\omega = \omega_g$ . Горното приблизително равенство позволява да се формулира изискване към ЛАЧХ:

$$L(\omega_g) \geq 20 \lg \frac{g_{max}}{\varepsilon_{max}},$$

което означава, по същество, че ЛАЧХ

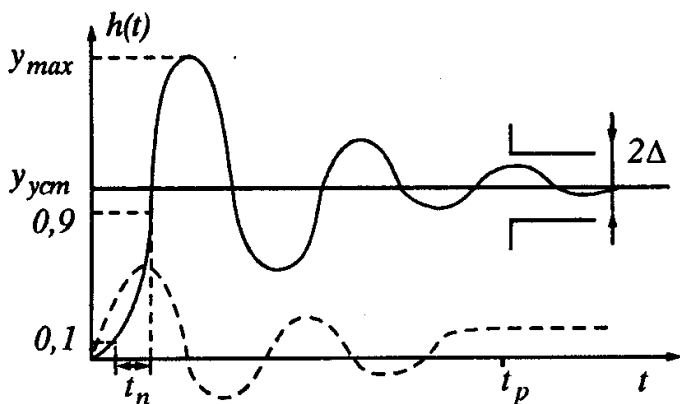
трябва да минава над точката с координати  $(\omega_g; 20 \lg \frac{g_{max}}{\varepsilon_{max}})$  - фиг. 14.58.

#### 14.5.2. Оценка на качеството по кривата на преходния процес

Кривата на преходния процес дава най-нагледна представа за качеството на САР. За оценка на качеството се използват преходната функция по отношение на заданието - фиг. 14.59 (плътна линия), и преходните функции по отношение на смущаващите въздействия (пунктирна линия). В първия случай процесът е предизвикан от промяна в заданието, като след затихване на преходния процес изходът се установява на новата зададена стойност или в близост до нея. Във втория случай преходният процес е предизвикан от промяна в смущаващото въздействие и под действие на управлението изходът, след затихване на преходния процес, се връща на зададената стойност или в близост до нея.

По кривата на преходния процес се определят следните качествените показатели, наричани още преки *показатели за качество*:

1. *Пререгулиране* - най-голямото относителното отклонение от установената стойност, изразено в проценти  $\sigma, \% = \frac{y_{max} - y_{уст}}{y_{уст}} \cdot 100$ . Този качест-



Фиг. 14.59

вен показател се сема от кривата на преходния процес по задание. Подобен е показателят *степен на пререгулиране*, определен с израза

$$\sigma = \frac{|\Delta y_2|}{|\Delta y_1|} \cdot 100, \%$$

И двата показателя характеризират запаса на устойчивост на системата. За повечето системи пререгулирането е в границите  $10 \div 30\%$ , за някои е допустимо да достигне  $70\%$ , а за други изобщо не се допуска.

2. *Допустимо отклонение от установената стойност*,  $\Delta$  - област около установената стойност, в която трябва да се намира регулируемата величина в установен режим, независимо от стойностите на външните въздействия. Допустимото отклонение показва точността, с която системата може да поддържа установения режим. За различните системи  $\Delta = (1 \div 5)\%$ .

3. *Време за регулиране*,  $t_p$  - времето, за което преходният процес затихва до допустимото отклонение. Времето за регулиране е една от най-важните качествени оценки. При  $t > t_p$  е в сила неравенството  $|y - y_{уст}| < \Delta$ .

4. *Време за нарастване*,  $t_n$  - определя се от времето за нарастване на изходния сигнал до новата зададена стойност. За преходни процеси с колебателен характер то съответства на една четвърт от периода на колебанията. За системи с времезакъснение е прието времето за нарастване да се отчита като времето, за което изходът се изменя от  $10$  до  $90\%$  от установената стойност.

5. *Брой на колебанията*,  $n$  - определят се от броя на периодите до затихване на преходния процес. За повечето системи  $n < 2$  до  $4$ .

Развитието на изчислителната техника улеснява се построяването на пре-

ходния процес на сложни системи, а преките качествени показатели могат да се използват при почти всички системи с постоянни параметри. В някои случаи се използват косвени критерии за качество, позволяващи качеството на системата да се определи без придължителна изчислителна работа.

### 14.5.3. Интегрални критерии за качество

Интегралните критерии са интеграли на функции на грешката и дават обобщена оценка на качеството на системата.

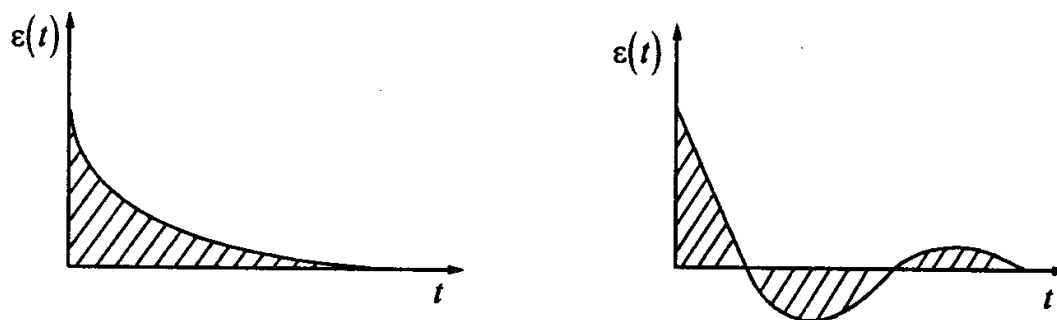
#### 1. Линеен интегрален критерий

Линейният интегрален критерий се изразява с минимума на интеграла на грешката и е най-простата интегрална оценка за качество:

$$I_1 = \int_0^{\infty} \varepsilon(t) dt .$$

Нека разгледаме преходните процеси и грешката, която се получава:

При апериодичен преходен процес интегралът се изразява с площта, затворена между кривата на грешката и абсцисата (фиг. 14.60а). При колебателен процес кривата на грешката затваря площи над и под абсцисата (фиг. 14.60б), като интегралът се определя от тяхната разлика. По този начин за системи с апериодичен преходен процес минимумът на интеграла ще означава бързо затихващ преходен процес. За колебателните системи това не е сигурно, защото може да се получи минимален интеграл при голямо пререгулиране и продължителен преходен процес. Например система на границата на колебателната устойчивост ще има интеграл  $I_1 = 0$ , т.е. минимален интеграл и безкраен преходен процес. Този недостатък ограничава използването на оценката само за системи, имащи апериодичен преходен процес.



Фиг. 14.60

## 2. Квадратичен интегрален критерий

Квадратичният интегрален критерий представлява минимум на интег-

рала от квадрата на грешката:  $I_2 = \int_0^{\infty} \varepsilon^2 dt$  и преодолява посочения по-горе

недостатък.

Може да се използва както за апериодични, така и за колебателни преходни процеси. За системи, силно чувствителни към пререгулирането, се прилага предложението от А. А. Фелдбаум подобрен квадратичен крите-

рий:  $I_3 = \int_0^{\infty} (\varepsilon^2 + T^2 \dot{\varepsilon}^2) dt$ , където  $T$  е тегловен коефициент,  $\dot{\varepsilon}$  - производна-

та на грешката относно времето. Включването на производната на грешката позволява да се получат по-плавни преходни процеси, доближаващи се до експонента с времеконстанта, равна на тегловния коефициент  $T$ .

## 3. Други интегрални критерии

Приложение в практиката имат още няколко интегрални критерия:

$$I_4 = \int_0^{\infty} |\varepsilon(t)| dt; \quad I_5 = \int_0^{\infty} |\varepsilon(t)| t dt; \quad I_6 = \int_0^{\infty} \varepsilon^2(t) \cdot t dt; \quad I_7 = \int_0^{\infty} \alpha \cdot \varepsilon^2(t) + \beta u^2(t) \cdot dt.$$

Първият използва модул, за да се избегнат отрицателните площи, но това води до точки на прекъсване на функцията и изчисляването на интеграла се затруднява.

В интегралите  $I_5$  и  $I_6$  е въведено и времето, поради което те имат по-малки стойности при по-бързи преходни процеси.

Последният интеграл съдържа и управляващото въздействие  $u$  и се минимизира при малък разход на енергия за управление. Тегловните коефициенти  $\alpha$  и  $\beta$  се определят от значението на всеки от параметрите - когато стойността на грешката е по-важна за работата на системата,  $\alpha$  е по-голям, а когато е необходим по-малък разход на енергия, по-голям е  $\beta$ .

За всеки от критериите интегрирането се осъществява от началото на преходния процес ( $t = 0$ ) до момента, когато грешката остава под допустимото отклонение ( $t = t_p$ ) и може да се счита, че преходният процес е завършил.



#### 14.5.4. Определяне на качеството по разположението на корените на характеристичния полином

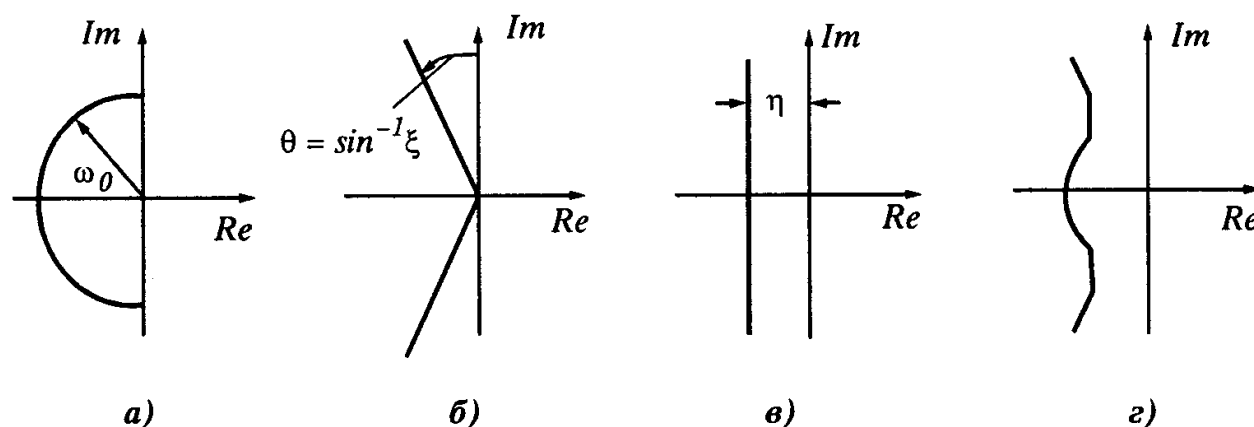
Между кривата на преходния процес и разположението на корените има ясно изразена връзка. Най-голямо влияние върху преходния процес оказват корените, разположени близо до имагинерната ос. Показателите за качество, свързани с корените, са косвени и дават приблизителна оценка за параметрите на преходния процес.

Въз основа на преходен процес на система от втори ред са определени следните зависимости и качествени показатели:

**1. Степен на устойчивост** - разстоянието от имагинерната ос до най-близкия корен. Когато коренът е реален, степента на устойчивост се нарича апериодична, а когато е комплексен - колебателна. Апериодичната степен на устойчивост се свързва с времето за регулиране чрез зависимостта  $t_p \approx 3/\eta$ , където  $\eta$  е разстоянието от корена до имагинерната ос - фиг. 14.61в. При колебателна степен на устойчивост (система от втори ред) зависимостта е  $t_p \approx 4,6/\eta$ . Вижда се, че този показател определя скоростта на затихване на преходния процес и би било по-правилно да се нарича степен на бързодействие.

**2. Колебателност** - най голямото от отношенията на имагинерната към реалната част на полюсите:  $\mu = \frac{\beta}{\alpha}$ . Показател за склонността на системите към колебания.

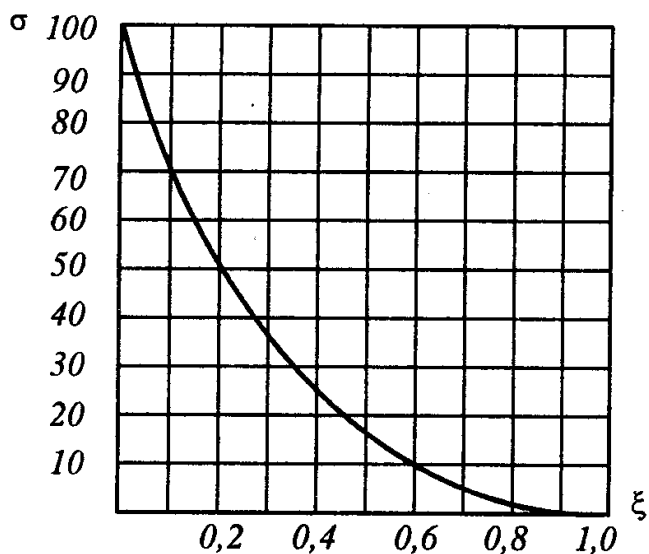
**3. Времето за достигане на първия максимум** се изчислява по зависимостта:  $t_1 \approx \frac{1,8}{\omega_0}$ , където  $\omega_0$  е собствената честота, която може да се опреде-



Фиг. 14.61

ли като разстоянието на най-близкия до началото на координатната система корен - фиг. 14.61a.

4. *Пререгулирането*,  $\sigma$  се определя от връзката на коефициента на затихване  $\xi$  с ъгъла  $\theta$ , показан на фиг. 14.61b.



Фиг. 14.62

Зависимостта между пререгулирането  $\sigma$  и коефициента на демпфиране  $\xi$  може да се представи графично по начина, показан на фиг. 14.62.

На базата на връзката между качеството на системата и разположението на корените, американският учен Еванс е създал метод за синтез на САР, при който се следи движението на полюсите при промяна на параметър на системата.

## 14.6. Видове управление

При анализа на качеството на системите бе установено, че увеличаването на общия коефициент на усилване води до подобряване на точността на системите. Много често САР имат и по-бърза реакция, когато се увеличи общият коефициент на усилване. В случай че от това няма други неприятни ефекти, увеличаването на общия коефициент на усилване се счита за желателно. Често обаче демпфирането на системата се влошава и колебанията в преходните процеси се увеличават, което може да доведе до загуба на устойчивостта. Ето защо съществува граница, до която могат да се намалява грешката и влиянието на външните въздействия чрез промяна само на коефициента на усилване.

Опитите за решаване на противоречието между малката статична грешка и достатъчния запас на устойчивост налагат въвеждането на по-сложни закони за управление. Нека сравним действието на системи за автоматично регулиране при въвеждане на пропорционални, интегрални и диференциални съставки от грешката в регулаторите:

### 14.6.1. Пропорционален закон за регулиране

Както вече бе посочено, в този случай регулиращото въздействие е в линейна зависимост (пропорционално) от грешката  $u = K\epsilon$ . Предавател-

ната функция на регулатора е  $W_p(p) = K$ .

Очевидно е, че пропорционалният регулатор е усилвател с възможност за промяна на коефициента на усилване, което променя общия коефициент на усилване на системата.

---

### Пример 14.1:

Дадена е САР на скоростта на въртене на двигател за постоянен ток с предавателна функция

$$W(p) = \frac{K}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)},$$

чрез промяна на напрежението на котвата.

Да се проследи движението на корените на системата в комплексната равнина и качеството на преходните процеси при пропорционално управление и промяна на коефициента на усилване на регулатора.

### Решение:

Характеристичният полином на затворената система е

$$T_1 T_2 p^2 + (T_1 + T_2)p + 1 + K K_p = 0.$$

При  $K_p = 0$ , т.е. без обратна връзка, полюсите са  $1/T_1$  и  $1/T_2$ , а с обратна връзка:

$$p_{1,2} = \frac{-(T_1 + T_2) \pm \sqrt{(T_1 + T_2)^2 - 4T_1 T_2 (1 + K K_p)}}{2T_1 T_2}.$$

Докато  $K_p$  се изменя от 0 до  $\frac{(T_1 + T_2)^2}{4(T_1 T_2)K}$ , корените на характеристич-

ния полином се движат един към друг по реалната ос. Когато  $K_p > \frac{(T_1 + T_2)^2}{4(T_1 T_2)K}$ ,

реалната част на корена не се променя, но имагинерната расте. Това свидетелства за намаляване на времето за реакция, но същевременно се влошават демпфирането на системата и пререгулирането.

---

За системи от по-висок ред големите стойности на коефициенти за усилване в регулатора обикновено водят до неустойчивост, т.е. комплексните

корени се движат и надясно, и пресичат имагинерната ос. За повечето системи съществува граница, съответстваща на добре демпфирана с устойчива реакция система, която има само неприемливо голяма статична грешка. Увеличаването на коефициента на усилване в по-голяма степен би нарушило устойчивостта. Това определя до каква степен при пропорционалното управление може да се намалява статичната грешка. Друг път за намаляването ѝ е въвеждането на интегрална съставка в закона за управление.

#### 14.6.2. Пропорционално-интегрален закон за управление

Първата задача на интегралното управление е да се премахне статичната грешка, което обаче в повечето случаи влошава динамиката на системата, като забавя реакцията. Интегралният закон се описва по следния начин:

$$u = \frac{K_p}{T_i} \int_0^t \varepsilon \cdot d\tau \quad \text{или} \quad W_p(p) = \frac{K_p}{T_i \cdot p} \quad ,$$

където  $T_i$  е интегрираща времеконстанта или време за възстановяване - времето, за което изходът на интегратора достига стойност  $1 \cdot K_p$  при единично входно въздействие. Реципрочната стойност на  $T_i$  показва скоростта на реакция на системата.

Пропорционално-интегралният закон за управление е първият начин за получаване на установена стойност на регулируемата величина без статична грешка, тъй като  $u$  е функция на всички минали грешки, а не само на моментната, както е при пропорционалния закон. Миналите грешки се натрупват, колкото и малки да са, докато окажат въздействие и доведат моментната стойност на грешката до 0, където системата се установява. Това означава, че смущенията с постоянна стойност могат да бъдат отхвърлени като източници на статична грешка.

Да разгледаме отново САР на скоростта на постояннотоков двигател. За да установим ефекта от въвеждането на интегралния закон на управление, нека определим напрежението към двигателя  $u_a$  по формулата

$$u_a = \frac{K_p}{T_i} \int_0^t (g - y) dt \quad .$$

Уравнението на движение с този регулатор добива вида

$$T_1 T_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + (T_1 + T_2) \frac{dy}{dt} + y = K \left[ \frac{K_p}{T_i} \int_0^t (g - y) dt \right] + K_f M_f \quad .$$

За да отстраним интеграла, диференцираме:

$$T_1 T_2 \frac{d^3 y}{dt^2} + (T_1 + T_2) \frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{dy}{dt} + K \frac{K_p}{T_u} y = K \frac{K_p}{T_u} g + K_f \frac{dM_f}{dt} .$$

От това управление е видно, че някои ограничения, наложени от пропорционалното регулиране, са премахнати. Ако смущаващият момент е статичен, то  $\frac{dM_f}{dt} = 0$  и няма да има никаква установена стойност на реакцията спрямо него (не води до установена грешка). Нещо повече, при постоянно

задаващо въздействие:  $K \frac{K_p}{T_u} y = K \frac{K_p}{T_u} g$ , което означава, че докато системата е устойчива, скоростта на двигателя ще е равна на зададената, дори и при промяна на някои от коефициентите на усилване.

И накрая, да се спрем на динамичната реакция на системата. За целта разглеждаме характеристичното уравнение, което вече има вида

$$T_1 T_2 p^3 + (T_1 + T_2) p^2 + p + K \frac{K_p}{T_u} = 0 .$$

При  $K_p / T_u$  близко до нула, характеристичният полином има реални отрицателни корени. Основен резултат от увеличаването на  $K_p / T_u$  за тази система са леко демпфираните корени, а за големите стойности на  $K$  два от корените ще станат комплексни и с увеличаването му ще се движат надясно. Т.е., системата първоначално ще бъде силно колебателна, а след това и неустойчива. За да се избегне това, в повечето случаи се прилагат едновременно пропорционално и интегрално управление. Тогава уравнението на управлението (регулатора) ще бъде

$$u_a = K_p \left[ g - y + \frac{1}{T_u} \int_0^t (g - y) dt \right] .$$

В този случай  $K_p$  е пропорционалният коефициент на усилване.

Подобно на преходния случай, след заместване и диференциране ще се получи:

$$T_1 T_2 \frac{d^3 y}{dt^2} + (T_1 + T_2) \frac{d^2 y}{dt^2} + (1 + K K_p) \frac{dy}{dt} + \frac{K_p}{T_u} y = K K_p \frac{dg}{dt} + \frac{K_p}{T_u} g + K_f \frac{dM_f}{dt} B .$$

В статичен режим производните са равни на нула и подобно на чистото интегрално управление статичната грешка при смущения и задания е равна на 0, независимо от промяната на коефициентите на усилване. Характеристичното уравнение е

$$T_1 T_2 p^3 + (T_1 + T_2) p^2 + (1 + K K_p) p + \frac{K_p}{T_i} = 0$$

Сега, като се подберат подходящи  $K_p$  и  $T_i$ , може да се варира с два коефициента, което дава много по-големи възможности за конструиране и настройка, отколкото при строго пропорционалното и интегрално управление.

### 14.6.3. Диференциален закон за управление

Диференциалният закон за управление се описва с уравнението  $u = T_D \frac{d\varepsilon}{dt}$ ,

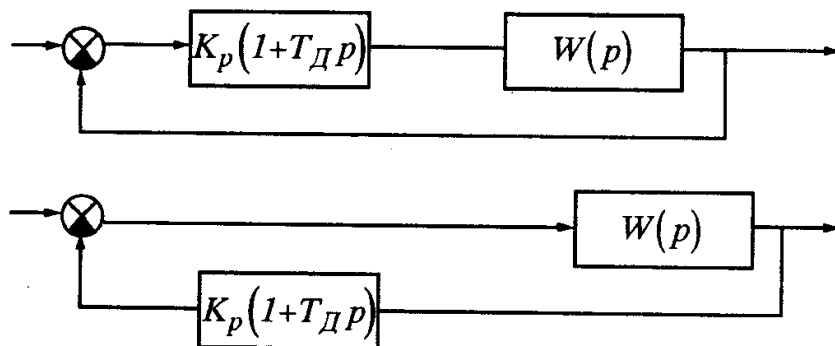
където  $T_D$  е диференцираща времеконстанта, а  $\frac{d\varepsilon}{dt}$  - производната на

грешката. Предавателната функция на регулатора ще бъде  $W_p(p) = T_D p$ .

Законът не се използва самостоятелно, а в комбинация с пропорционалния и интегралния. Самостоятелното му прилагане е възможно само на

теория и е практически невъзможно, понеже при  $\varepsilon = \text{const}$   $\frac{d\varepsilon}{dt} = 0$ , т.е. неза-

висимо колко е голяма грешката, изходът на диференциращия регулатор ще остава равен на нула. Ако грешката се променя бавно и производната ѝ има стойности под чувствителността на регулатора, тя може да достигне до неограничени стойности, без да предизвика регулиране. Ето защо в този случай е необходимо да има пропорционална или интегрална съставки в закона за регулиране.



Фиг. 14.63

При диференциалното управление корекцията зависи от скоростта на изменение на грешката. Като резултат регулаторът предвижда бъдещите стойности на грешката. Диференциално уравнение може да бъде въведено по двата начи-

на, показани на фиг. 14.63 - чрез датчика в обратната връзка или като динамично коригиращо устройство. И в двата случая се получават еднакви характеристични уравнения, но нулите са различни. Диференцирането в обратната връзка не диференцира заданието, а това в някои случаи е желателно.

Диференциращото звено в правата връзка има нула  $1/T_D$  и промяната на заданието ще доведе стъпково до начален импулс и по-бърза реакция на системата (също и по-голямо пререгулиране), отколкото в другия случай.

---

### Пример 14.2:

Да се оцени влиянието на диференциалното управление за САР на скоростта на двигател за постоянен ток.

**Решение:**

Когато  $W_p(p) = T_D p$ , характеристичното уравнение ще бъде

$$T_1 T_2 p^2 + (T_1 + T_2 + K K_p T_D) p + 1 = 0.$$

При сравнение на това уравнение с уравнението на колебателно звено  $T^2 p^2 + 2\xi T p + 1 = 0$  става очевидно, че диференциалният закон за управление подобрява демпфирането като увеличава  $\xi$  и дори може да направи колебателното звено апериодично.

---

### 14.6.4. Пропорционално-интегрално-диференциално (ПИД) управление

За намаляване на статичните и динамични грешки е възможно да се комбинират разгледаните три стратегии и да се обсъдят възможностите на полученото ПИД управление. В този случай регулиращото въздействие е сума от три събираеми, пропорционални, съответно, на грешката, нейния интеграл във времето и скоростта на изменението ѝ. И трите коефициента на усилване, с които събираемите участват, се явяват параметри за настройване. ПИД регулирането дава възможност да се отстрани статичната грешка, като едновременно с това се постигат добър запас на устойчивост и добро демпфиране.

ПИД управлението е толкова ефективно, че е прието като стандарт в промишлеността. В някои случаи в комбинациите се включва само пропорционално и диференциално (ПД) или пропорционално и интегрално (ПИ) управление.

В основната структурна схема за управление предавателната функция на регулатора ще бъде  $W_p(p) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_{up}} + T_D p \right)$ . За да конструира веригата за управление, инженерът трябва само да подбере трите константи  $K_p$ ,  $1/T_u$  и  $T_D$ . Процесът се нарича *настройка на регулатора*. Критериите за настройка се базират на идеите, изложени по-горе. Увеличаването на  $K_p$  и  $1/T_u$  води до намаляване на грешката, но това може да е и невъзможно, поради устойчивостта. Увеличаването на  $T_D$  подобрява устойчивостта.

За САР на скоростта на постояннотоков двигател, управляван с ПИД

$$\text{регулатор: } u_a = K_p \left[ g - y + \frac{1}{T_u} \int_0^t (g - y) dt + T_D (\dot{g} - \dot{y}) \right].$$

За затворената система, след диференциране, се получава диференциалното уравнение

$$T_1 T_2 \frac{d^3 y}{dt^3} + (T_1 + T_2) \frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{dy}{dt} = K \left[ K_p \left( \frac{dg}{dt} - \frac{dy}{dt} \right) + \frac{K_p}{T_u} (g - y) \right] + T_D \left( \frac{d^2 g}{dt^2} - \frac{d^2 y}{dt^2} \right) + K_f \frac{dM_f}{dt},$$

а за характеристичното уравнение:

$$T_1 T_2 p^3 + (T_1 + T_2 + K T_D) p^2 + (1 + K K_p) p + K \frac{K_p}{T_u} = 0.$$

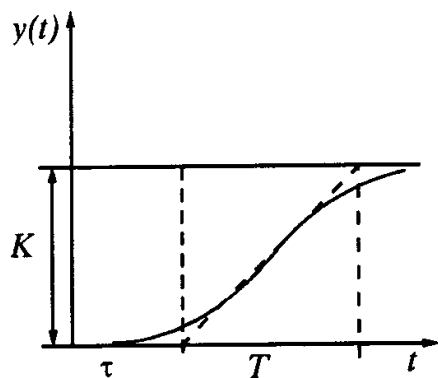
След разделянето на  $T_1 T_2$  се получават три коефициента и три параметъра, което позволява корените да се разположат в комплексната равнина, в съответствие с предпочитанията. По такъв начин ПИД управлението на тази система позволява пълен контрол върху нейната динамика.

#### 14.6.5. Приблизителни методи за настройка на ПИД регулатори

В много от случаите за настройване на регулаторите на САР по време на експлоатацията, когато не са известни точните предавателни функции на обектите за управление, се прибегва до приблизителни методи. Два от най-лесно приложимите и с голямо разпространение в практиката са предложени от американските учени Зайглер и Никълс.

*Първият метод* се прилага за управление на обекти, имащи апериодични преходни функции - фиг. 14.64. Независимо от реда на системата за автоматично управление, при такава преходна функция тя може да се опише





Фиг. 14.64

приблизително с предавателната функция

$$W(p) = \frac{Ke^{-\tau p}}{(Tp + 1)}$$

разглежда като съставена от две звена - закъснително и апериодично от първи ред.

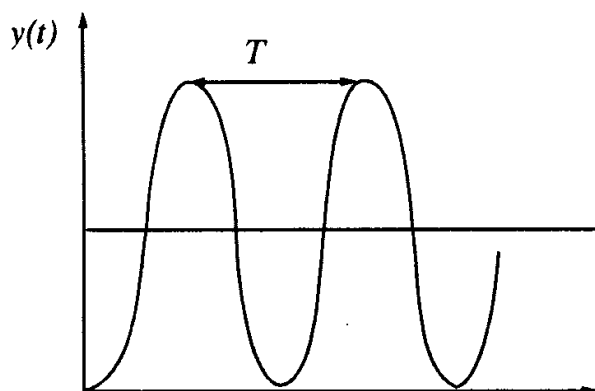
От кривата на преходния процес се определят два параметъра: времезакъснение-то  $L = \tau$  и наклонът  $R = K / T$ . По тях се избират коефициентът на усилване и време-константите на регулатора, в зависимост от

неговия тип и с помощта на следната таблица:

Таблица 14.1

Управление \ Константи	$K_p$	$T_u$	$T_d$
П	$1/RL$	-	-
ПИ	$0,9/RL$	$3,3L$	-
ПИД	$1,2/RL$	$2L$	$0,5L$

Вторият метод се прилага за системи с по-голяма склонност към колебания. Предварително се намалява коефициентът на усилване на регула-



Фиг. 14.65

тора и се изключват интегралната и дифференциалната съставки. Чрез увеличаване на коефициента на усилване на регулатора и подаване на пробни смущаващи въздействия, тези системи се довеждат до границата на устойчивостта (наличие на незатихващи колебания на изхода на системата). Настройката на регулатора се извършва въз основа на коефициента на усилване на регулатора  $K_{ep}$  в граничния слу-

чай и периода на колебанията  $T_{ep}$  - фиг. 14.65.

Таблица 14.2

Управление \ Константи	$K_p$	$T_u$	$T_d$
П	$0,5 K_{ep}$	-	-
ПИ	$0,45 K_{ep}$	$0,83 T_{ep}$	-
ПИД	$0,6 K_{ep}$	$0,5 T_{ep}$	$0,125 T_{ep}$

Настроените по този начин регулатори осигуряват скорост на затихване на колебанията 0,25, което е добър компромис между бързодействие и запас на устойчивост.

#### 14.7. Синтез на системи за автоматично управление (САУ)

Под синтез на САУ се разбира проектиране на система за управление, състояща се от обект на управление и свързани с него средства за управление, които са подбрани така, че получената система да удовлетворява зададени качествени показатели. Съществуват много начини за синтез на САУ, но в изложението ще бъде разгледан само един от тях - методът, използващ логаритмичните честотни характеристики.

Синтезът на системи за автоматично регулиране се съпровожда от някои предварителни действия - определяне на: 1. динамичните модели на всички елементи, съставляващи системата, 2. на изискванията към качеството на системата и 3. на структурата на системата за регулиране.

##### 14.7.1. Синтез на САУ с помощта на логаритмичните честотни характеристики

Методът се основава на връзката между качествените показатели и устойчивостта на затворената система с формата на логаритмичните честотни характеристики. Той е един от методите за анализ, синтез и настройка на САУ, при който не се налага извършването на сложна изчислителна работа.

*Синтезът включва няколко етапа:*

1. Построява се логаритмичната честотна характеристика на некоригираната система, която включва обекта за управление, датчиците, използвани за обратна връзка, използваните преобразуватели и предвидения регулатор. Системата се съставя логически на базата на изискванията към режима в нея (стабилизация, следене), необходимата изходна мощност, допустимите скорости и ускорения, и др.

2. По зададените качествени показатели се построява ЛАЧХ на системата, наричана още *желаната ЛАЧХ*,  $L(\omega)_{ж}$ , която се синтезира. За повечето системи, съставени от минимално фазови звена, на този етап не е необходимо построяването на съответстващата им фазово-честотна характеристика. За по-сложни системи, включващи и неминимално фазови звена, се построява и фазово-честотната характеристика на  $L(\omega)_{ж}$ , за да се определи запасът на устойчивост.

3. Построява се разликата  $L(\omega)_{ж} - L(\omega)_{н}$ , която определя каква пре-

настройка е необходима на параметрите на регулатора и какви коригиращи звена трябва да се включат в системата за подобряване на динамичните ѝ характеристики.

4. Подбират се реални устройства, които да се добавят в системата за подобряване на качествените ѝ показатели.

5. Построяват се логаритмичните честотни характеристики на синтезираната система, като се отчитат честотните характеристики на добавените елементи. Проверява се устойчивостта на синтезираната система и за да се оцени нейното качество се построява преходната ѝ функция.

Първият етап може да се изпълни, ако са известни динамичните модели на обекта и останалите елементи на некоригираната система. Предавателната функция на елементите с известни динамични модели се представя във вида

$$W(p) = k \frac{\prod (\tau_i p + 1)}{p^q \prod (T_j p + 1)}$$

Това позволява лесно построяване на ЛАЧХ на ръка, по метода на асимптотите. Когато не са известни предавателните функции на някои елементи, предварително е необходимо да се снемат експериментално честотните им характеристики.

Към построената ЛАЧХ за елементите с известни предавателни функции се добавят (сумират) и експериментално снетите ЛАЧХ на последователно свързаните елементи.

*При построяването на желаната ЛАЧХ е необходимо да се има предвид следното:*

1. Нискочестотната част на ЛАЧХ определя точността на системата в установен режим. Когато с качествените показатели е зададена установената грешка  $\Delta$ , нискочестотната част на ЛАЧХ на желаната система трябва да лежи над правата  $20 \lg k$ , където  $k = \frac{1 - \Delta}{\Delta}$ . В много случаи се изисква системата да притежава астатизъм по отношение на задаващото въздействие, което означава, че нискочестотната част трябва да е с наклон  $-20 \text{ dB/dec}$ .

При условие, че е зададена допустима грешка  $\varepsilon_{\max}$  при хармонично входно въздействие с амплитуда  $g_{\max}$  и честота  $\omega_g$ , желаната ЛАЧХ трябва да е по-високо от контролната точка А с координати  $g_{\max}$  и  $20 \lg \frac{g_{\max}}{\varepsilon_{\max}}$ .

2. Средночестотната част (областта около срязващата честота) се определя от устойчивостта и бързодействието на системата. Препоръчително е ЛАЧХ да пресича абсцисата с наклон  $-20 \text{ dB/dec}$ , като дължината на правите участъци от двете страни на срязващата честота да е от 0,2 до 0,6 декади. Колкото този участък е по-голям, толкова системата има по-големи запаси на устойчивост.

3. Високочестотната част от ЛАЧХ не оказва особено влияние върху качеството на системата.

След намирането на разликата между некоригираната и желаната система, избора на коригиращите устройства и съставянето на ЛАЧХ на синтезираната система, се извършва проверката за устойчивост по някой от разгледаните повече методи. Ако системата има достатъчни запаси на устойчивост, се построява преходната ѝ функция, като се използва програмата „Simulink“ от пакета MatLab.

## РАЗДЕЛ VI. ЕЛЕКТРИЧЕСКИ МАШИНИ И АПАРАТИ

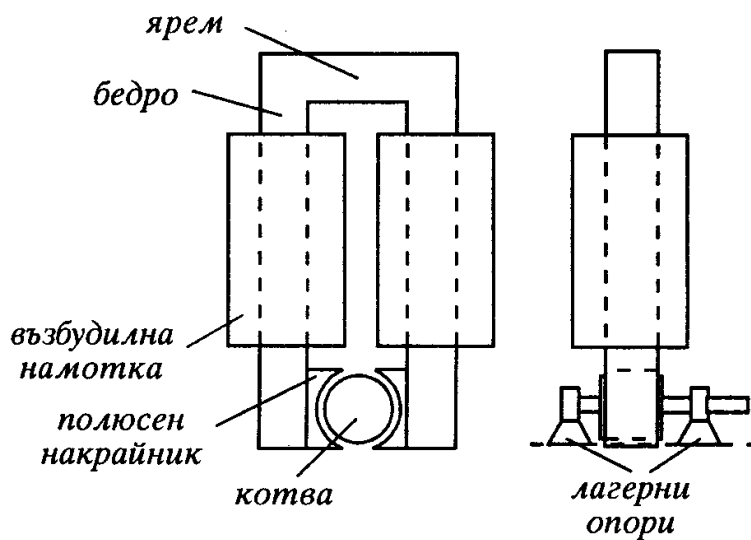
### Петнадесета глава

#### ПОСТОЯННОТОКОВИ МАШИНИ

Първите електрически машини с практическо приложение са постояннотоковите генератори и двигатели. Променливотоковите машини са създадени по-късно, поради продължителния процес на изучаването на променливия ток и променливотоковите вериги, и са доста по-сложни от постояннотоковите. В днешно време, въпреки прогнозите, правени преди 20-30 години, постояннотоковите машини (ПТМ) заемат около 30% от пазара на електрически машини (ЕМ), главно в бреговите кранови съоръжения. Изучаването им е задължително, тъй като основните понятия, свързани с ЕМ, са дефинирани за ПТМ.

#### 15.1. Принцип на действие и устройство на постояннотоковата машина

Постояннотоковата машина е преобразувател на механичната енергия в електрическа, и обратно. Принципът на действие на постояннотоков генератор (ПТГ) е формулиран в гл. 1 - в проводник, движещ се в магнитно поле, се индуцира е.д.н. За реализацията обаче на принципа и получаването на напрежение с постоянна стойност на изводите на ПТГ, е необходимо: да се създадат магнитно поле и непрекъснато движение на електрически проводници в него, както и да се изведе полученото напрежение на клемите на машината, наречена от създателите ѝ на една от първите ПТМ „Дългокраката Ана“ (Long leg Ann). Конструкцията е показана на фиг. 15.1. Вероятно по тази причина частта от магнитопровода, където е разположена *възбудителната намотка*, да се нарича *бедро*. Частта, свързваща двете бедра, се нарича *ярем*. Възбудителната намотка осигурява м.д.н. за създаване на необходимия магнитен поток  $\Phi$  в магнитопровода и на съответната магнитна индукция  $B$  (плътност на магнитния поток) във *въздушната междина* между *статора* и *ротора*. За да се получи достатъчно голям участък с постоянна индукция, се използват *полюсни накрайници*. В ротора е разположена намотката, в която се индуцира е.д.н., наречена *котвена намотка* или *котва*. Последният термин се отнася понякога за целия ротор.



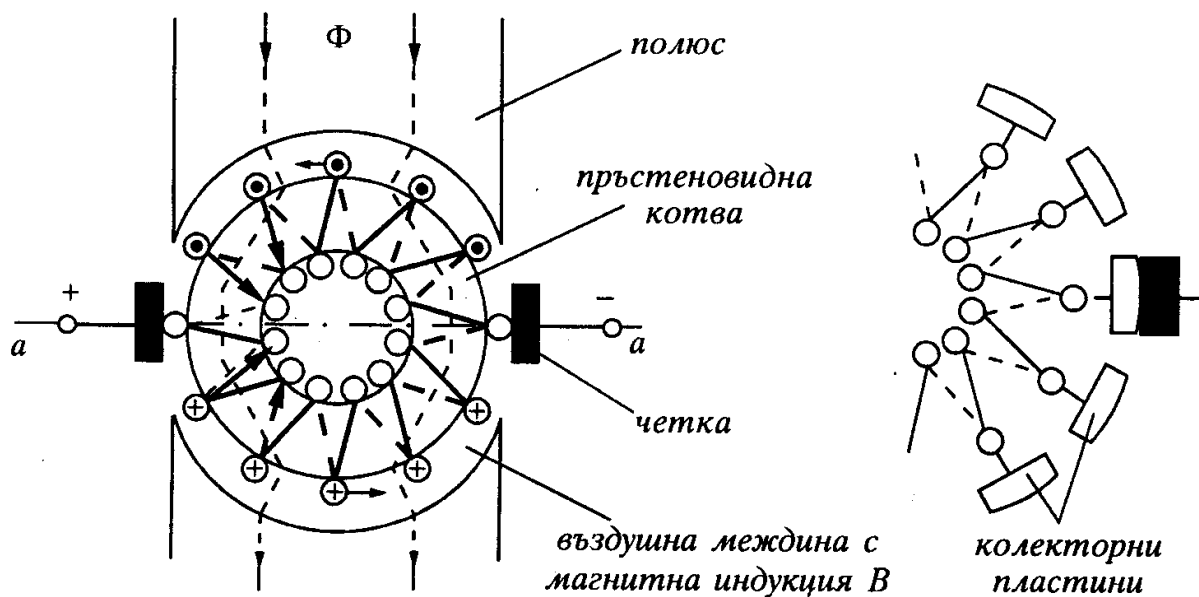
Фиг. 15.1. Устройство на ПТМ. Магнитна система

с посока към нас, а в тези срещу южния полюс от нас - към чертежа. С точка е изобразен върхът на една стрела, а с кръстче - нейната опашка (оперение).

В проводниците, разположени на геометричната неутрална линия  $a-a$ , не се индуцира е.д.н. Ако се махне част от изолацията на проводниците, където се допират четките, спрямо изводите „+“ и „-“ се образуват два паралелни клона, в които има две равни е.д.н.,  $E$ , с една и съща посока (отдясно наляво), които са сума от е.д.н. на отделните проводници. При въртене на ротора с постоянна ъглова скорост  $\omega$  и при достатъчно голям брой про-

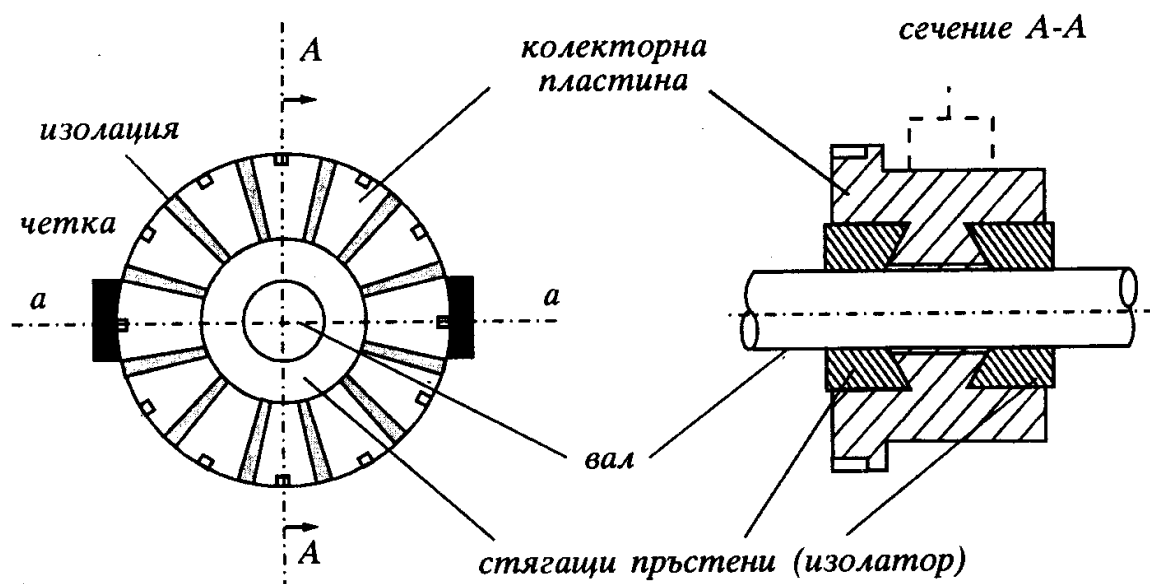
Роторът на първите машини представлява цилиндричен пръстен от ФМ материал с навита, както е показано на фиг. 15.2, намотка от изолиран меден проводник.

Намотката образува затворен контур. За да не се претрупва чертежът, на него са дадени само 12 навивки. При въртене на ротора в посока, обратна на часовниковата стрелка, в проводниците, намиращи се срещу северния полюс, се индуцира е.д.н.



Фиг. 15.2. Пръстеновидна котва

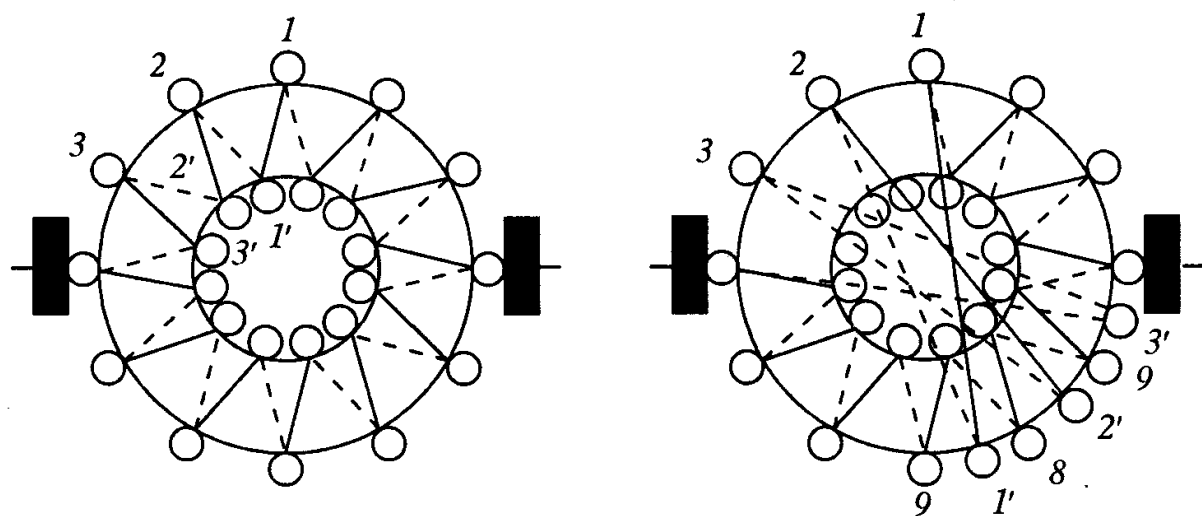
водници, броят на проводниците срещу полюсите  $N$  и  $S$  остава постоянен и, съответно,  $E = const$ . В реалните машини контактът между котвената намотка и неподвижните четки се осъществява по следния начин: От всяка навивка (или няколко навивки) се прави извод, свързан с една *колекторна пластина* (фиг. 15.2). КOLEKTOРНИТЕ ПЛАСТИНИ В СЛУЧАЯ СА 12 И ИМАТ ФОРМАТА, ПОКАЗАНА НА ФИГ. 15.3. Те се изолират една от друга и от вала, и се сглобяват така, че да образуват цилиндър, по който четките се плъзгат. Такава конструкция гарантира сигурен подвижен контакт.



Фиг. 15.3. Колектор

Пръстеновидната котва се оказва не много ефективна, тъй като е.д.н. се индуцира в част от навития меден проводник - на външната повърхност, срещу полюсните крайници. От вътрешната страна на пръстена полето е нула. Само четири години след създаването на пръстеновидната котва от Пачиноти (1869 г.), Х. Алтенек изобретява т.нар. *барабанна котва* (1873 г.), която се използва и в съвременните машини. Идеята е проста - вътрешните проводници (фиг. 15.4,  $1'$ ,  $2'$ ,  $3'$  и т.н.) се изнасят на външната повърхност на противоположната страна на цилиндъра. При това е.д.н. в проводник  $1'$  ще се сумира с това в проводник  $1$ ; е.д.н. в  $2'$  - с това в  $2$ , и т.н. (вж. фиг. 15.2). За да не бъдат много дълги участъците, съединяващи  $1 - 1' - 2 - 2' - 3 - 3'$  и т.н., т.е. *челните съединения*, диаметърът на ротора се намалява, а се увеличава дължината му. При това се увеличава и дължината на активните участъци на намотката. По описания начин се получава т.нар. *гладка котва*, която се използва в някои микромашини и в машините със свръхпроводящи намотки. В конвенционалните машини тя не е много удобна, поради това, че изисква специално укрепване, а въздушната междина е

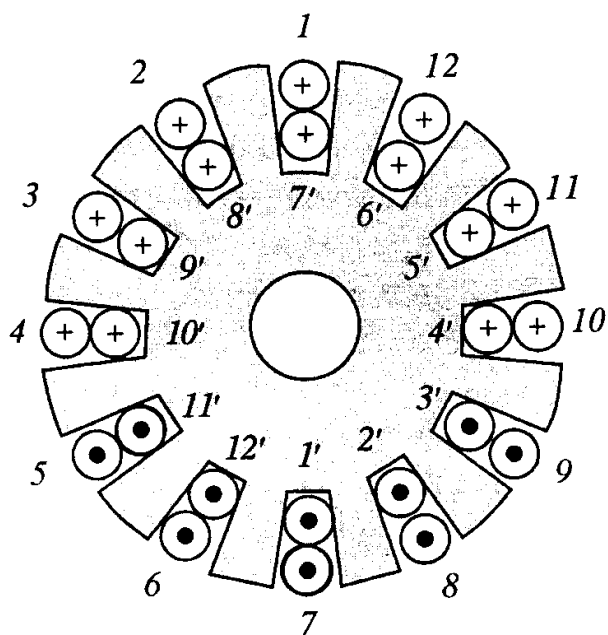
относително голяма, което води до намаляване на магнитния поток. За да се избегне това, намотката се разполага в канали, както е показано на фиг. 15.5a, като в дъното на съответния канал се разполагат страните 1', 2', 3' и т.н., а във външния слой - страните 1, 2, 3 и т.н. Тази промяна позволява значително намаляване на въздушната междина, следствие от което е намаляването на тока във възбудителната намотка при същия магнитен поток  $\Phi$ . В много случаи вместо една навивка от дебел проводник се изработва бобина (секция) от тънък проводник с определен брой навивки, като началото и крайт на секцията се свързват по същия начин към колектора. Мястото, на което проводникът се запоява към колекторната пластина, е показано на фиг. 15.3 (незащрихования правоъгълник - сечение А-А).



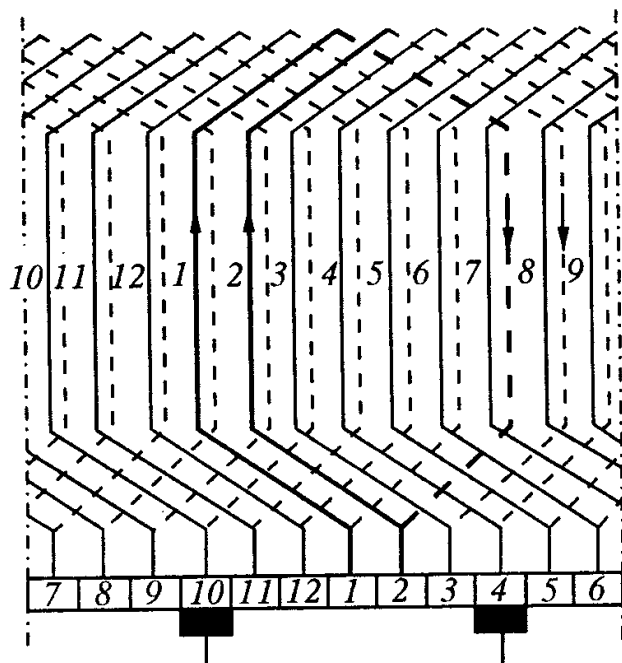
Фиг. 15.4. Преминане от пръстеновидна към барабанна котва

Изобразяването на котвената намотка и колектора по начина, показан на фиг. 15.2, фиг. 15.3 и фиг. 15.4 не е удобно, особено при голям брой канали и сложни съединения, затова се използват схеми - вж. фиг. 15.5б: Повърхността на ротора се разгъва по външната окръжност, като линията на срязване се изобразява с прекъснатата линия „тире-точка“. Каналите се номерират съгласно фиг. 15.5a: проводниците във външния слой са начертани с пълтна линия, а тези във вътрешния - с пунктирна. По аналогичен начин се разгъва колектора и са номерират неговите пластини - с линия „точка-точка-тире“ се очертават полюсите. Ако се приеме, че роторът се върти по посока на часовниковата стрелка и се започне от проводник 1, могат да се проследят всички връзки и изводи на котвената намотка: от горния слой на канал 1 се преминава в долния слой (дъното) на срещуположния канал 7, оттам - в колекторна пластина 2, от нея - към проводника в горния слой на канал 2; от канал 2 - в канал 8, следва колекторна пластина 3, канал 3 и т. н. Цялата последователност се записва както следва: 1 -





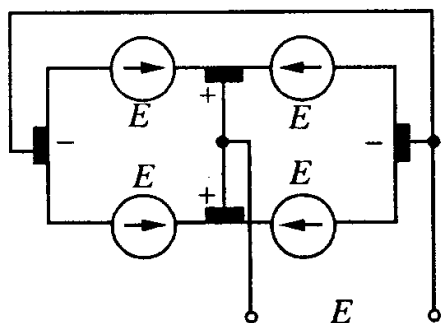
a)



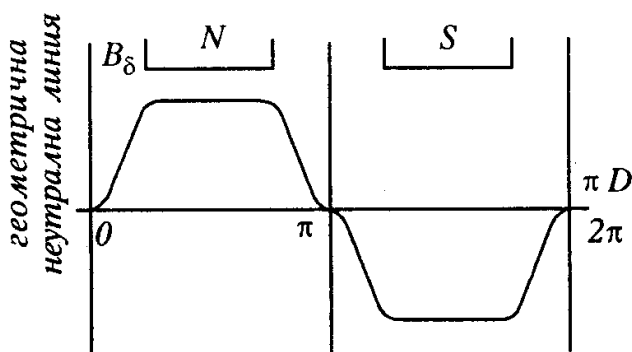
b)

Фиг. 15.5. Схема на котвената намотка

7' - 2 - 8' - 3 - 9' - 4 - 10' - 5 - 11' - 6 - 12' - 7 - 1' - 8 - 2' - 9 - 3' - 10 - 4' - 11 - 5' - 12 - 6' - 1 - кръгът се затваря. Този тип намотка се нарича *проста листова*. Ако до схемата на намотката на фиг. 15.5б се постави още една, новата схема ще съответства на машина с 24 канала и 4 полюса, т.е.  $2p = 4$  ( $p$  - брой на чифтовете полюси), четките ще бъдат 4, при което двата „плюса“ се свързват заедно, двата „минуса“ - също. По този начин се получават четири паралелни клона, т.е.  $2a = 4$ , където  $a$  е броят на двойките паралелни клонове - фиг. 15.6.



Фиг. 15.6. Свързване на изводите при 4-полюсна намотка

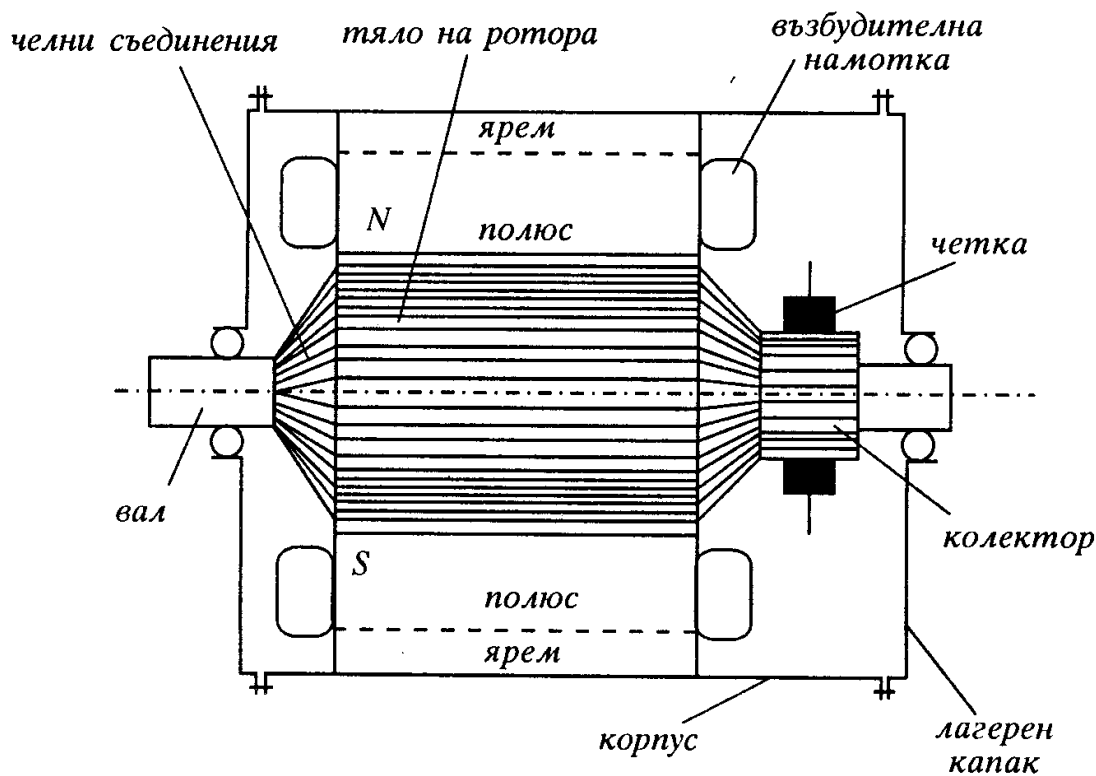


Фиг. 15.7. Разпределение на  $B$  по окръжността на ротора

Когато машината има повече от два полюса, вместо листова може да се направи *вълнова намотка*. При нея секциите се разполагат в каналите по аналогичен начин, но свързването им към колекторните пластини е по-особено: Вместо да се изведе напрежение от всяка двойка полюси и да се свържат паралелните клонове, всички полюси „се обхождат“ последователно, в резултат на което се получават само два паралелни клона. Това позволява да се получи по-високо напрежение на изводите, но, естествено, при по-малък ток. Комбинация от листова и вълнова намотки е сложната *жабешка намотка* (frog leg winding).

Съставянето на намотките и параметрите им не са предмет на настоящото изложение, тъй като в практиката за всяка конкретна машина схемата на намотката е известна. При необходимост след ремонт да се провери правилността на изпълнението, това се осъществява по аналогичен на представения по-горе начин.

Схематичното устройство на ПТМ с барабанна котва е показано на фиг. 15.8: Тялото на ротора, в чиито канали се разполага котвената намотка, представлява пакет от отделни пластини с дебелина  $0,3 \div 0,5$  mm и форма, показана на фиг. 15.5a. Ако това не се изпълни, в желязната сърцевина ще се индуцира е.д.н. както в медния проводник, но такова е.д.н. ще създава значителни вихрови токове в желязото, които ще действат като спирачка и ще отнемат полезна мощност.



Фиг. 15.8. Устройство на ПТМ с барабанна котва

## 15.2. Електродвижещо напрежение и въртящ момент на постоянно-токовите машини

### 15.2.1. Електродвижещо напрежение

След като е известно разполагането на котвената намотка и свързването ѝ към изводите на машината, става възможно и извеждането на формулата за произвежданото е.д.н. Както бе посочено, индуктираното в един проводник с дължина  $l$  е.д.н. при движение с постоянна линейна скорост  $v$  в магнитно поле с постоянна индукция  $B$  е  $E(l) = B.l.v$ . Формулата е вярна при взаимно перпендикулярни  $B$ ,  $l$  и  $v$ . Може да се приеме, че това условие е приблизително изпълнено. Но индукцията във въздушната междина не е постоянна и по дължината на окръжността на ротора се изменя по начина, показан на фиг. 15.7.

Дължината на окръжността, съответстваща на един полюс, се нарича *полюсно деление* и се определя по формулата  $\tau = \frac{\pi D}{2p}$ , където  $D$  е диаметърът на ротора. Срещу полюсите  $B = const$ , а на геометричната неутрална линия става нула и сменя знака си.

Последното усложнение може да се преодолее, ако се приеме, че в границите на едно полюсно деление индукцията е постоянна и равна на средната стойност ( $B_{cp}$ ). Тогава  $E(l) = B_{cp}.l.v$ . Тази формула може да се преобразува по следния начин: линейната скорост на повърхността на ротора се изразява чрез ъгловата:  $v = \frac{\omega.D}{2}$  и тъй като от формулата за  $\tau$

диаметърът  $D = \frac{\tau.2p}{\pi}$ , след заместването се получава  $v = \frac{\omega.\tau.p}{\pi}$ . Следователно

$$E(l) = B_{cp}.l.v = B_{cp}.l.\frac{\omega.\tau.p}{\pi} .$$

Тъй като произведението  $l.\tau$  представлява повърхността, пробождана от средната индукция, произведението  $B_{cp}.l.\tau$  е, по същество, магнитният поток  $\Phi$ , който преминава през полюса. Окончателно за един проводник се получава

$$E(l) = B_{cp}.l.v = \frac{p}{\pi}.\Phi.\omega .$$

Ако броят на всички проводници в каналите е  $N$ , а броят им в един

паралелен клон е  $\frac{N}{2a}$ , за сумарното е.д.н. резултатът ще бъде

$$E = \frac{N}{2a} \cdot \frac{p}{\pi} \cdot \Phi \cdot \omega = \frac{pN}{2\pi a} \cdot \Phi \cdot \omega = k \cdot \Phi \cdot \omega$$

или

$$(15.1) \quad E = k \cdot \Phi \cdot \omega \quad ,$$

където коефициентът  $k = \frac{pN}{2\pi a}$  е конструктивен параметър и се нарича *машинна константа*.

Тази формула е изключително важна за ПТМ и е необходимо да се запомни. Тя показва, че е.д.н. на машината е правопрпорционално на магнитния поток и честотата на въртене на ротора. При постоянен магнитен поток е.д.н.  $E$  е правопрпорционално на  $\omega$ , което означава, че ПТМ може да се използва за измерване на честота на въртене чрез преобразуване на последната в електродвижещо напрежение, т.е. да работи като тахогенератор. При постоянна честота на въртене по стойността на  $E$  може да се съди за магнитния поток на машината.

### 15.2.2. Въртящ момент

Както бе посочено, силата, действаща на проводник в магнитно поле, когато по проводника тече ток  $I_{np}$ , се определя като  $F(l) = B \cdot I_{np} \cdot l$ . Проводниците в котвената намотка са на разстояние  $\frac{D}{2}$  от оста на ротора, следователно въртящият момент  $M(l)$ , който ще създава силата  $F(l)$ , ще бъде:

$$M(l) = F(l) \cdot \frac{D}{2} = B \cdot I_{np} \cdot l \cdot \frac{D}{2} \quad . \quad \text{Като } D \text{ се замести с израза } \frac{\tau \cdot 2p}{\pi} \text{ следва}$$

$$M(l) = F(l) \cdot \frac{D}{2} = B \cdot I_{np} \cdot l \cdot \tau \cdot \frac{p}{\pi} = \frac{p}{\pi} \cdot B \cdot l \cdot \tau \cdot I_{np} = \frac{p}{\pi} \cdot \Phi \cdot I_{np} \quad .$$

Токът  $I_{np}$  представлява ток в един паралелен клон и може да се изрази чрез общия котвен ток  $I_a$ , като той се раздели на броя на паралелните клонове:  $I_{np} = \frac{I_a}{2a}$ . Тъй като броят на всички проводници в каналите на

ротора е  $N$ , за сумарния момент се получава

$$M = N \cdot M(I) = \frac{pN}{\pi} \cdot \Phi \cdot I_{np} = \frac{pN}{2\pi a} \cdot \Phi \cdot I_a ,$$

т. е.

$$(15.2) \quad M = k \cdot \Phi \cdot I_a .$$

Последното равенство показва, че при постоянен магнитен поток в машината въртящият момент е право пропорционален на котвения ток. Величината  $M$  се нарича още *електромагнитен момент*.

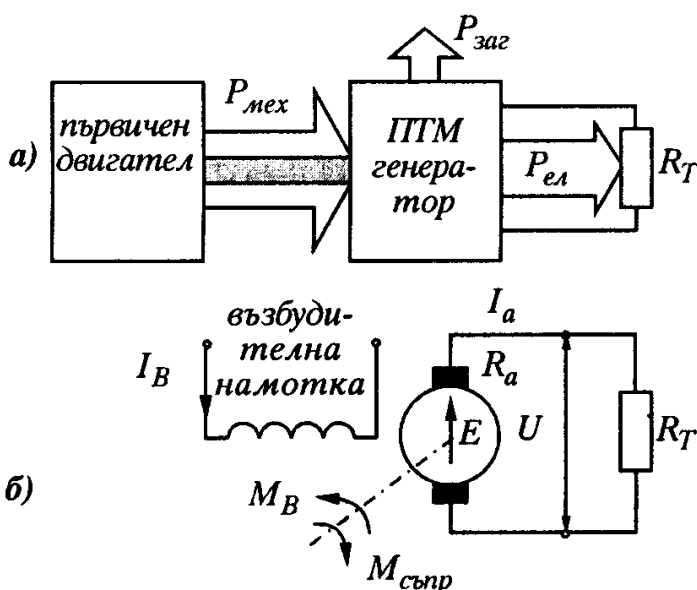
### 15.3. Преобразуване на енергията в постояннотоковите машини. Комутация. Реакция на котвата

#### 15.3.1. Преобразуване на енергията в постояннотоковите машини

Получените формули за  $E$  и  $M$  са основни за постояннотоковата машина. Те, обаче, не са достатъчни за описание на работата ѝ. Необходими са още две уравнения за напреженията и токовете в котвената намотка - за режим на генератор и за режим на двигател, както и уравнение за баланса на мощността, която се преобразува в машината.

#### • Режим на генератор

На фиг. 15.9а е показан потокът на мощност от първичния двигател към постояннотоковата машина, в която мощността се преобразува в електрическа, а част от нея се превръща в топлина, разсейваща се в околната среда, т.е.



Фиг. 15.9. Преобразуване на мощността в постояннотоков генератор

$$P_{мех} = P_{ел} + P_{заг} .$$

В електрическата схема на постояннотоковия генератор (ПТГ) - фиг. 15.9б,  $R_T$  е товарното съпротивление, а  $R_a$  - съпротивлението на котвената намотка (КН). За контура на котвената намотка е в сила уравнението

$$(15.3) \quad U = E - R_a \cdot I_a ,$$

от което, след умножение на лявата и дясната му страна по  $I_a$ , се получава

$$U \cdot I_a = E \cdot I_a - R_a \cdot I_a \cdot I_a$$

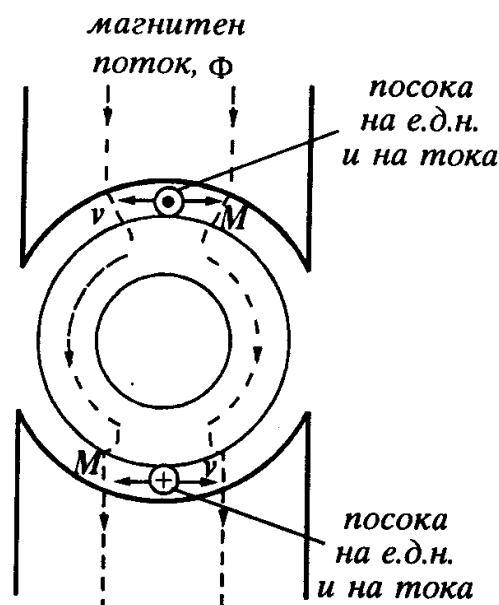
или

$$R_T \cdot I_a^2 = E \cdot I_a - R_a \cdot I_a^2.$$

Лявата страна на равенството представлява полезната електрическа мощност, която се изразходва в товарния резистор; в дясната произведението  $E \cdot I_a$  е преобразуваната мощност, наричана *електромагнитна мощност*, а  $R_a \cdot I_a^2$  - топлинните загуби в медния проводник на КН. Ако се пренебрегнат загубите от въртене на ротора и загубите в медния проводник на възбудителната намотка и последното уравнение се запише във вида

$$E \cdot I_a = R_T \cdot I_a^2 + R_a \cdot I_a^2,$$

то ще съответства напълно на равенството за мощностите. Фиг. 15.9б представя условно оста на ротора и посоките на въртене на ротора и на съпротивителния момент, създаван от генератора, на вала на задвижващата машина. Фиг. 15.10 пояснява това.



Фиг. 15.10. Създаване на противодействащ момент на вала на генератора

При въртене на ротора по посока, обратна на часовниковата стрелка, в разглежданите проводници се създава е.д.н. с указаната посока. Токът  $I_a$  има същата посока и, следователно, силата, която ще действа върху проводника, е насочена, съгласно правилото на лявата ръка, срещу посоката на въртене. Тя създава съответния противодействащ момент. Механичната мощност на първичния двигател е

$$P_{мех} = M \cdot \Omega, \quad (\Omega = \omega),$$

където  $\Omega$  е честота на въртене на вала, а  $M$  - въртящ момент на задвижващата машина, който е равен на

съпротивителния момент при въртене с честота  $\Omega = const (M_{вър} = M_{сър} = M)$ .

От друга страна, преобразуваната електромагнитна мощност е  $E \cdot I_a$ . Не е трудно да се покаже, че  $M \cdot \omega = E \cdot I_a$ . Тъй като  $E = k \cdot \Phi \cdot \omega$ , след заместване се получава

$$E \cdot I_a = k \cdot \Phi \cdot \omega \cdot I_a = k \cdot \Phi \cdot I_a \cdot \omega = M \cdot \omega.$$

### Пример 15.1:

Натоварването на един ПТГ е 5,5 kW при напрежение 110 V. Котвената намотка има съпротивление 0,3 Ω. Да се определи въртящият момент на първичния двигател, ако честотата на въртене е 1 000 об/мин. Всички загуби, освен тези в КН, да се пренебрегнат.

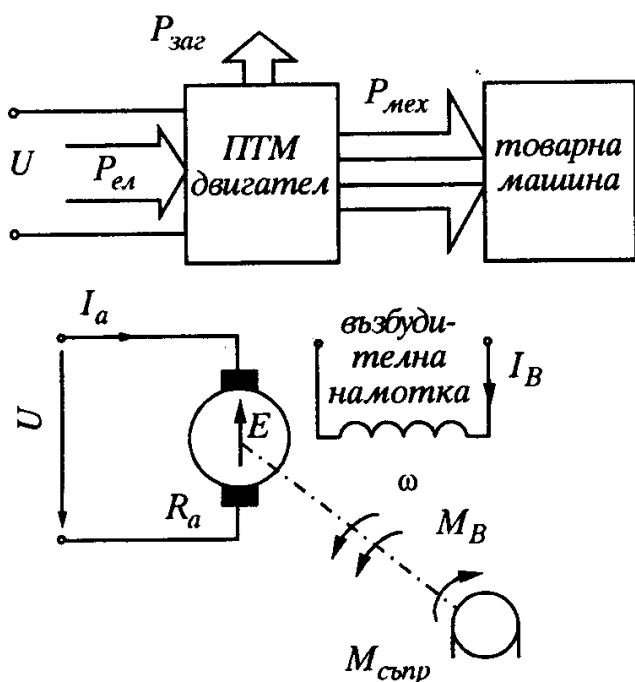
### Решение:

Тъй като отдаваната електрическа мощност е 5 500 W при напрежение 110 V, токът във веригата на КН е  $\frac{5\,500}{110} = 50\text{ A}$ . При такъв ток загубите в КН са  $0,3 \cdot 50^2 = 750\text{ W}$ . Следователно, пълната мощност е  $5\,500 + 750 = 6\,250\text{ W}$ . Честотата в rad/s има стойност  $\frac{\pi \cdot 1000}{30}$ , следователно:  $M = \frac{6\,250 \cdot 30}{\pi \cdot 1000} = 59,68\text{ Nm}$ .

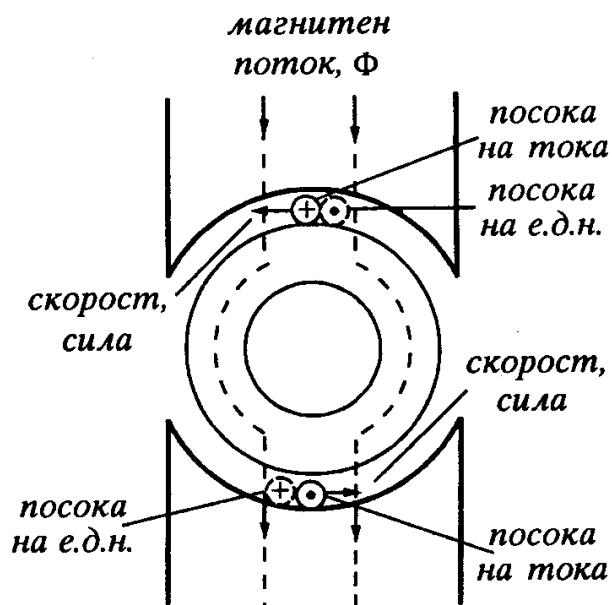
#### • Режим на двигател

Потокът на мощността в ПТМ в режим на двигател е от постоянно-ковата електрическа мрежа към задвижваната машина (фиг. 15.11).

Протичащият в КН ток създава въртящ момент на вала на двигателя. Едновременно с това при завъртане на ротора в КН ще се индуцира е.д.н., пропорционално на честотата на въртене и насочено срещу тока (фиг. 15.12).



Фиг. 15.11. Преобразуване на мощността в ПТМ (двигател)



Фиг. 15.12. Създаване на противо-е.д.н. в КН на двигателя

Аналогично на ПТМ, която в режим на генератор създава противодействащ момент на вала на задвижващата машина, ПТМ в режим на двигател създава противодействащо е.д.н. спрямо източника на захранващо напрежение. В първия случай увеличаването на тока в товарния резистор води до увеличаване на консумираната механична мощност от задвижващата машина, а във втория увеличаването на въртящия момент на вала на двигателя означава увеличаване на котвения ток и, респективно - на консумираната мощност от електрическата мрежа.

Уравнението за веригата на КН, съгласно втория закон на Кирхоф, се записва както следва:

$$U - E = R_a \cdot I_a$$

или

$$(15.4) \quad U = E + R_a \cdot I_a$$

Същият резултат се получава и от уравнението за мощностите, ако се пренебрегнат всички загуби, освен тези в КН. Последното уравнение е основно за електродвигателите.

### Пример 15.2:

Да се определи въртящият момент на постояннотоков двигател, ако захранващото напрежение е 110 V, консумираният ток е 20 A, а съпротивлението на котвената намотка 0,5 Ω. Честотата на въртене на ротора е 1 500 об/мин. Всички загуби, освен тези в КН, да се пренебрегнат.

### Решение:

Търсеният въртящ момент е електромагнитният момент на ПТМ. Изчислява се с помощта на уравнението  $M \cdot \omega = E \cdot I_a$ , в което неизвестната величина  $E$  се определя от уравнението за напрежението на ПТД, а именно:  $U = E + R_a \cdot I_a$ , откъдето  $E = U - R_a \cdot I_a = 110 - 0,5 \cdot 20 = 100 \text{ V}$ . Честотата на въртене в rad/s е  $\frac{\pi \cdot 1500}{30}$ , следователно:  $M = \frac{100 \cdot 20 \cdot 30}{\pi \cdot 1500} = 12,73 \text{ Nm}$ .

### 15.3.2. Загуби в постояннотоковите машини и коефициент на полезно действие

Преобразуването на енергията е свързано със загуби - електрически, магнитни и механични. Най-лесно се определят *електрическите* загуби - те се изразяват в нагряване на проводниците на намотките при протичане на



електрически ток и се изчисляват по формулата  $R_a \cdot I_a^2$  за загубите в котвената намотка, а по формулата  $R_b \cdot I_b^2$  - за възбудителната, и по аналогичен начин за други намотки. По-особени са електрическите загуби в подвижния контакт *четка-колектор*. Вследствие на нелинейните свойства на този контакт, загубите в четковия възел се определят по формулата  $P_{чет} = \Delta U_{чет} \cdot I_a$ , където  $\Delta U_{чет}$  е напрежението в четковия възел, което зависи от материала на четките и за даден тип е постоянна величина, отразена в справочниците.

*Магнитните* загуби включват загуби от *хистерезис* и *вихрови токове*. Освен нагряване на стоманата, те създават допълнителен съпротивителен момент на вала на задвижващата машина. Въртенето на ротора в неподвижно магнитно поле води до пренамагнитване на стоманата, а това е свързано с движение на магнитните домени, вследствие промяна на ориентацията им спрямо външното поле. Вихровите токове, индуцирани в желязото, също взаимодействат с външното поле, създавайки съпротивителен момент. Загубите от хистерезис и вихрови токове могат лесно да се наблюдават при празен ход на ПТГ (веригата на КН е прекъсната). При включване на възбудителната намотка скоростта на въртене спада или се увеличава въртящият момент на първичния двигател при постоянна скорост.

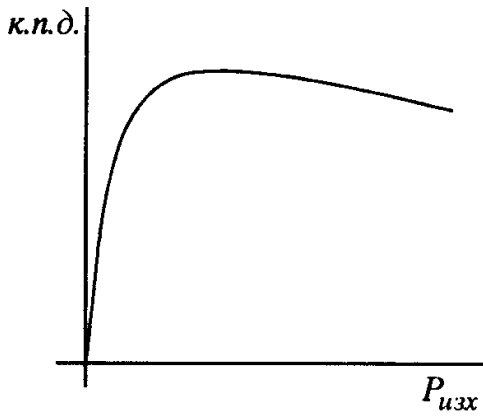
*Механичните* загуби са следствие от триене в лагерите, триене между четките и колектора и триене между въртящите части и въздуха (аеродинамични загуби). Тези загуби се определят обикновено по емпирични формули и, както и магнитните, зависят от честотата на въртене.

Тъй като нагряването на електрическата машина е неизбежно, се използват материали, които гарантират нормалната ѝ работа при повишена температура, като едновременно с това се вземат мерки и за охлаждането ѝ.

*Коефициентът на полезно действие* (к.п.д.) представлява, както при всички машини, отношение на изходната мощност към входната. Тъй като разликата между тези две мощности е равна на загубите, к.п.д. може да се изрази по следните няколко начина:

$$\text{К.п.д.} = \frac{P_{изх}}{P_{вх}} = \frac{P_{вх} - P_{заг}}{P_{вх}} = \frac{P_{изх}}{P_{изх} + P_{заг}}$$

В зависимост от това кои две стойности са известни, се използва съответната формула. В общия случай  $P_{заг}$  не зависят линейно от натоварването на машината и типичният характер на функцията  $\text{к.п.д.} = f(P_{изх})$  има

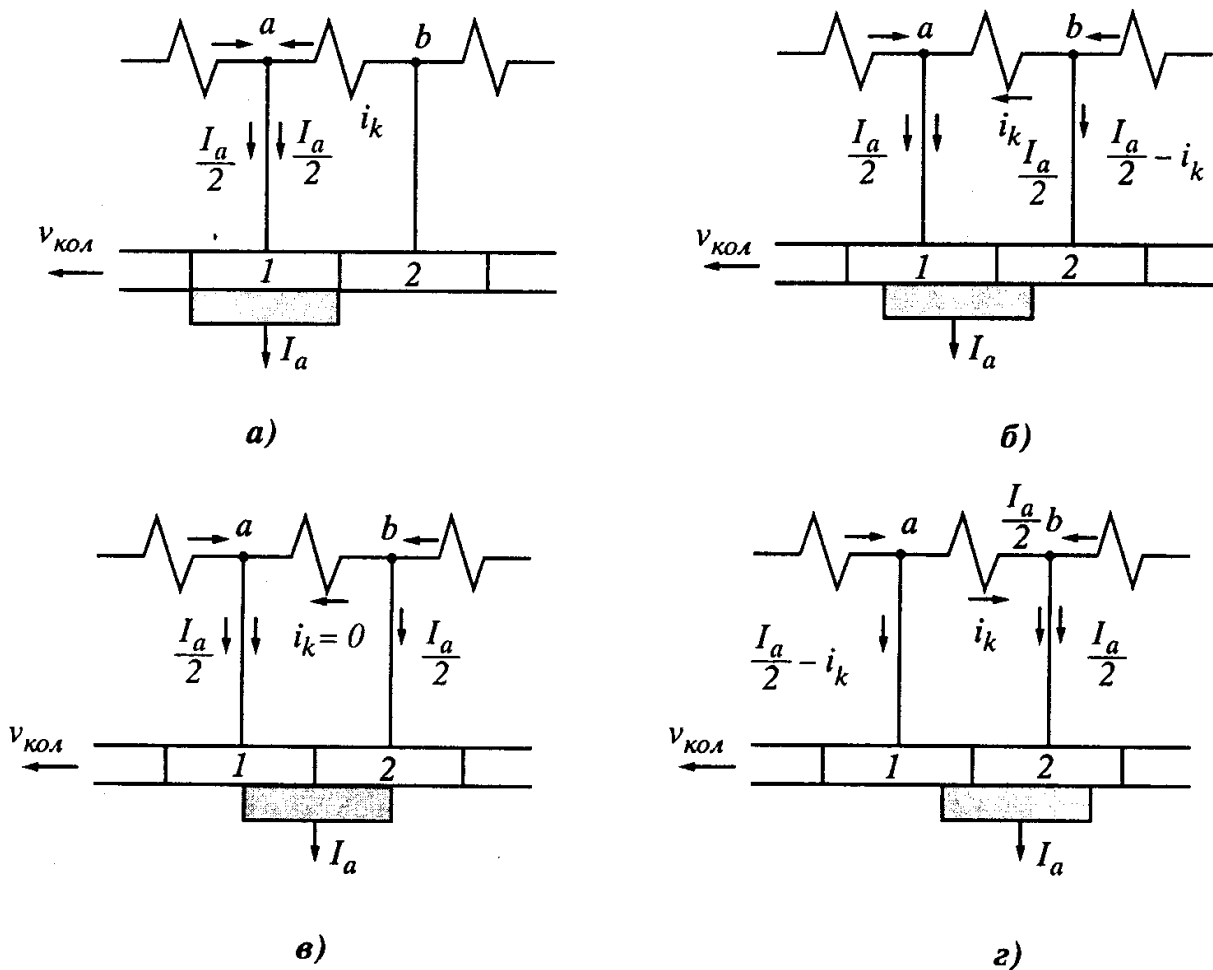


Фиг. 15.13. К.п.д. на ПТМ

вида, показан на фиг. 15.13.

### 15.3.3. Комутация

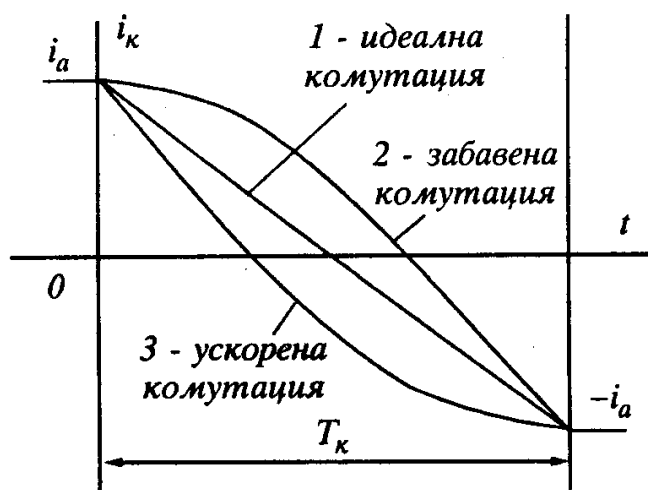
При обясняване на принципа на действие на ПТГ бе посочено, че заедно с преминаването на активните страни на дадена секция от единия полюс към другия и смяната на посоката на е.д.н., същата секция се превключва в другия паралелен клон на КН (вж. фиг. 15.4, фиг. 15.5). Когато ПТГ е натоварен, в нея се сменя и посоката на тока. На фиг. 15.14 са показани три навивки (секции) и положението на колекторните пластини спрямо четката при движението им със скорост  $v_{кол}$ .



Фиг. 15.14. Процес на комутация

Секцията  $ab$  е комутационна. Отначало токовете от двата паралелни клона се сумират в т.  $a$  и се извеждат през колекторната пластина 1 и четката във външната верига (фиг. 15.14а). При преместване на колектора на  $1/4$

от ширината на една колекторна пластина ( $b_{кол}$ ) - фиг. 15.14б, част от тока в десния клон се отклонява през възел  $b$  към колекторна пластина 2, като общата сума от двата тока се запазва. При изместване на колектора с още  $1/4$  от  $b_{кол}$  - (фиг. 15.14в), токовете от двата клона преминават през пластините 1 и 2, а токът в комутиращата секция е нула. При следващото преместване (фиг. 15.14г) токът през пластина 1 намалява, през пластина 2 се увеличава, а  $i_k$  сменя знака си. Когато колекторната пластина 2 застане срещу четката, цикълът на комутацията е завършил, токът в комутиращата секция има същата стойност като в началото, но посоката му е обратна, а самата секция е в левия паралелен клон. Изменението на тока за периода на комутация  $T_k$  представя крива 1 на фиг. 15.15. Това е *идеална линейна комутация*, възможна при условие, че проводимостта на контакта четка - колекторна пластина е правопрпорционална на площта на контакта и в контура на комутиращата секция не действат е.д.н. В действителност, при въртене на ротора линейната скорост на колектора достига 4-5 m/s, при което периодът на комутация е от порядъка на микросекунди. И ако коефициентът на самоиндукция на секцията е  $L_c$ , в контура ще се създаде напрежение  $L_c(di_k/dt)$ , което не може да се пренебрегне. Освен това, вследствие реакцията на котвата (вж. т. 15.3.4) магнитното поле на геометричната неутрална линия не е нула и в комутиращата секция се индуцира допълнително е.д.н. Напреженията нарушават линейността на процеса на комутация, при което се получава т.нар. *забавена* или *ускорена* комутация - фиг. 15.15, криви 2, 3. Това води до увеличаване на токовата плътност в единия от двата края на четката и поява на искрене, в резултат от което колекторният възел се износва по-бързо. За да се компенсира влиянието на тези фактори, четките се изместват на определен ъгъл спрямо геометричната неутрална линия (г.н.л.) или на тази линия се поставят *допълнителни полюси*, чиито намотки се свързват последователно с КН, за да се осигури компенсация при различна стойност на товарния ток. Искрене на четките се получава и при лош механичен контакт с колекторните пластини, вследствие недостатъчно притискане или лошо припасване на кон-



Фиг. 15.15. Изменение на комутиращия ток в процеса на комутация

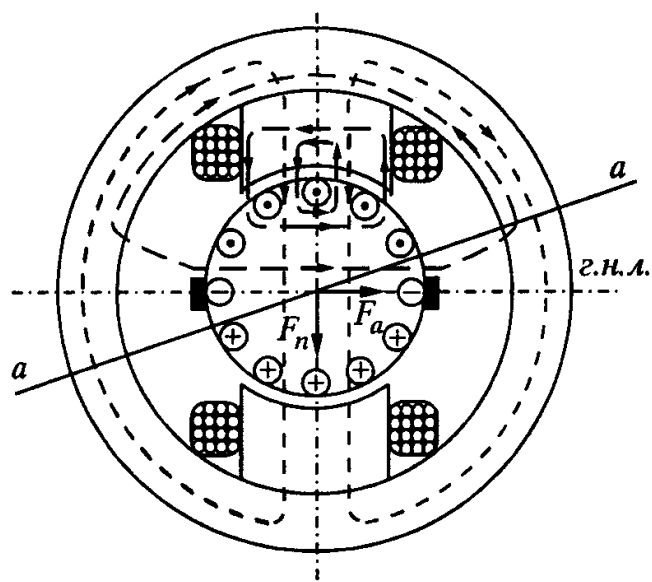
зел се износва по-бързо. За да се компенсира влиянието на тези фактори, четките се изместват на определен ъгъл спрямо геометричната неутрална линия (г.н.л.) или на тази линия се поставят *допълнителни полюси*, чиито намотки се свързват последователно с КН, за да се осигури компенсация при различна стойност на товарния ток. Искрене на четките се получава и при лош механичен контакт с колекторните пластини, вследствие недостатъчно притискане или лошо припасване на кон-

тактните повърхности.

В реалните машини четките обикновено покриват няколко колекторни пластини, което е свързано с особеностите на КН и някои допълнителни изисквания към нея.

#### 15.3.4. Реакция на котвата

При протичане на ток в котвената намотка, в магнитната система се появява още едно м.д.н., което може да се разглежда като получено от ток



Фиг. 15.16. Реакция на котвата

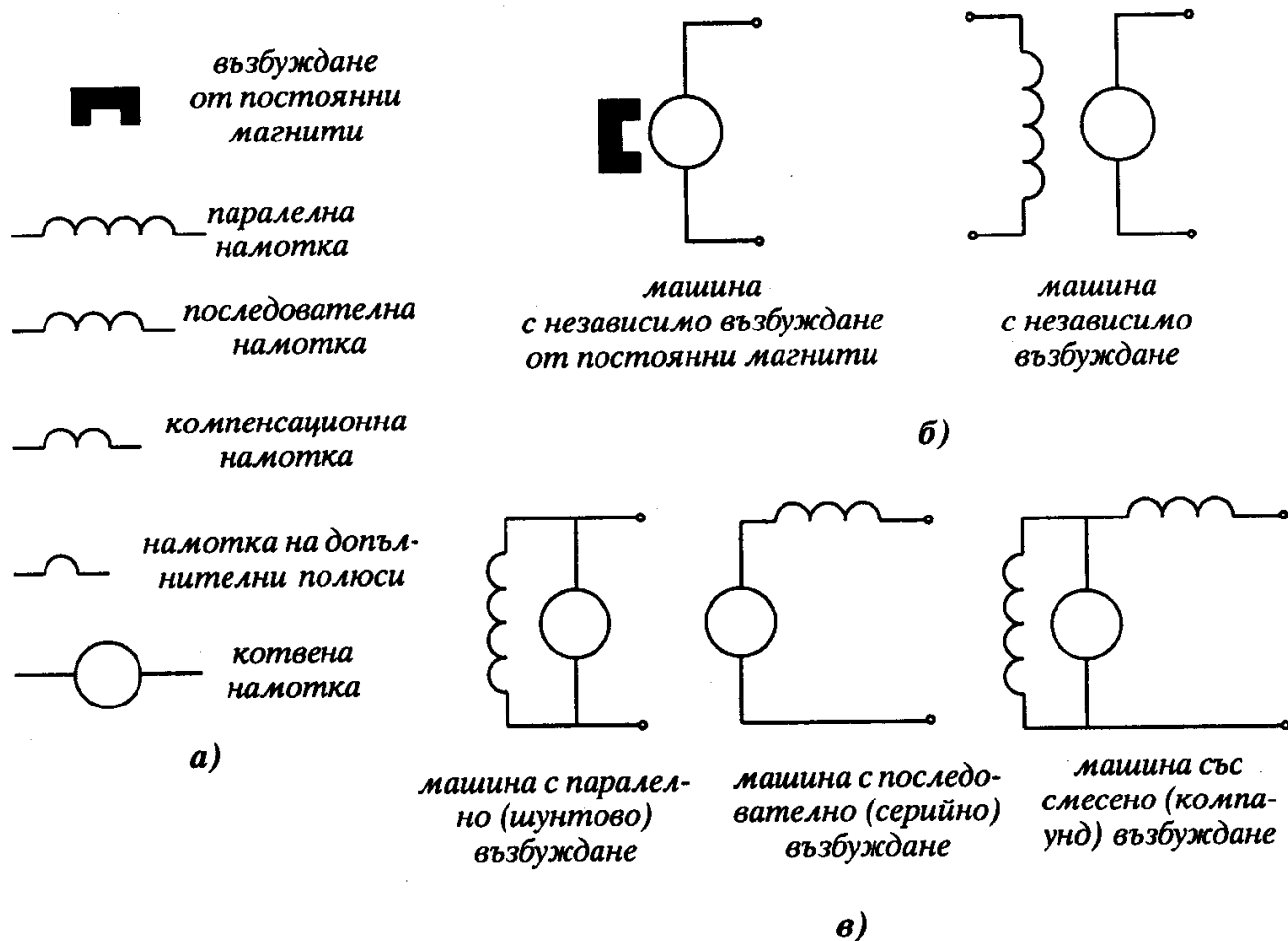
в една фиктивна бобина, съставена от проводниците в ротора (фиг. 15.16). По правилото на десния винт то е насочено надясно, перпендикулярно на м.д.н., създавано от възбудителната намотка (ВН). На фигурата силовите линии на полето на полюсите и на КН са показани с пунктирни линии. Начертани са контурите, които обхващат един, три и пет проводника на КН. Първите два контура се затварят през тялото на ротора и полюса. Там полето на ротора е по-силно, тъй като въздушната междина е малка. Освен това, в лявата половина на горния полюс полетата на ВН и КН се сумират, а в дясната се изваждат. За долния полюс е обратно - отляво се изваждат, а отдясно се сумират. Полето по третия контур е значително по-слабо, заради големите въздушни междини.

Описаната „деформация“ на магнитния поток може да се представи като изместване на г.н.л. на неголям ъгъл по посока, обратна на часовниковата стрелка. Увеличаването на магнитния поток в едната половина на полюсите може да доведе до насищане на желязото с последващо намаляване на общия магнитен поток, а това води до спадане на индуктираното в КН е.д.н.

В някои ПТМ, за да се компенсира реакцията на котвата, в полюсните накрайници се правят канали, в които се разполага намотка, чиито проводници са успоредни на тези в КН. Компенсационната намотка се включва последователно с котвената, но посоката на тока в нея трябва да е обратна на тази в КН.

## 15.4. Условни графични обозначения и класификация на постояннотоковите машини

При чертежите на електрически схеми с електрически машини са приети, за удобство, условни графични означения, с които се изобразяват котвената, възбудителната и други допълнителни намотки, както и тяхното свързване една с друга и към източниците на захранване (фиг. 5.17а).



Фиг. 15.17. Условни графични означения и класификация на ПТМ: а) условни графични означения на намотките на ПТМ; б) ПТМ с независимо възбуждане; в) ПТМ със самовъзбуждане

В зависимост от това как се създава основното магнитно поле на машината, ПТМ се делят на две групи: машини с *независимо* възбуждане и машини със *самовъзбуждане*. Към първата група се отнасят ПТМ с постоянни магнити и тези, чиято възбудителна намотка (ВН) се захранва от отделен (независим) източник на напрежение (фиг. 5.17б). В машините със самовъзбуждане възбудителната намотка се захранва от напрежението, получено в котвената намотка (фиг. 5.17в), и в зависимост от това как се включва ВН, има три типа ПТМ: с паралелно, с последователно и със сме-

сено възбуждане.

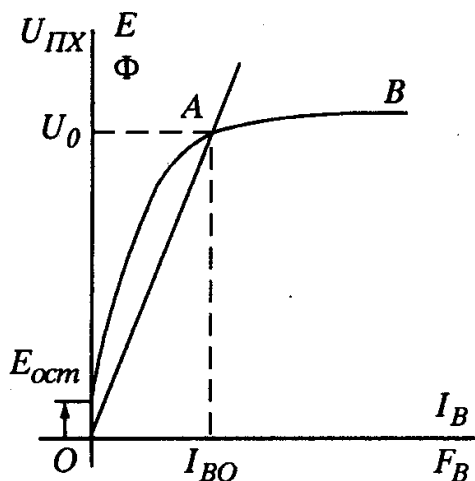
Обикновено мощността, консумирана от ВН, е 5-6 % от пълната мощност на машината. Магнитодвижещото напрежение, създавано от ВН, е  $F_B = w_B \cdot I_B$ , следователно, когато ВН се включва паралелно, тя се изработва от тънък проводник и с голям брой навивки, а при последователно включване - от дебел проводник с малък брой навивки.

**Забележка.** Необходимо е да се прави разлика между използваните в изложението обозначения на ВН и на индуктивна бобина в променливотоковите вериги. В общия случай всяка бобина има активно и индуктивно съпротивление. При постоянен ток индуктивното съпротивление е нула и се проявява само в преходните режими. В стационарен режим се отчита само активното съпротивление на намотките, което обикновено не се отразява на схемите.

В зависимост от режима на работа ПТМ се делят на две групи: генератори и двигатели.

### 15.5. Постояннотокови генератори

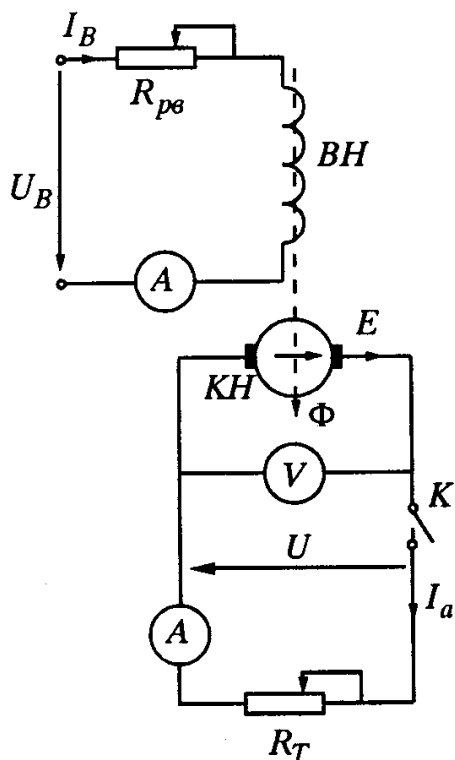
При работа на ПТМ в режим на генератор честотата на въртене на ротора се счита за зададена:  $\omega = \text{const}$ . Всички други величини, характеризиращи работата на генератора, са свързани по определен начин помежду си, но поради нелинейния характер на връзките им обикновено се представят с помощта на графични зависимости. Нека разгледаме най-важните от тях за генераторите с независимо, с паралелно и със смесено възбуждане.



Фиг. 15.18. Схема на генератор с независимо възбуждане

#### 15.5.1. Постояннотоков генератор с независимо възбуждане

Схемата на генератор с независимо възбуждане (ГНВ) е представена на фиг. 15.18: Във веригата на ВН е включен реостат за регулиране на възбудителния ток, а към котвената намотка, с помощта на ключ  $K$ , се включва променливо товарно съпротивление. За да се проследи изменението на токовете и напрежението на котвената намотка, се използват измервателни уреди.



Фиг. 15.19. Характеристика на празен ход на ГНВ

• **Характеристика на празен ход (ХПХ) на ГНВ**

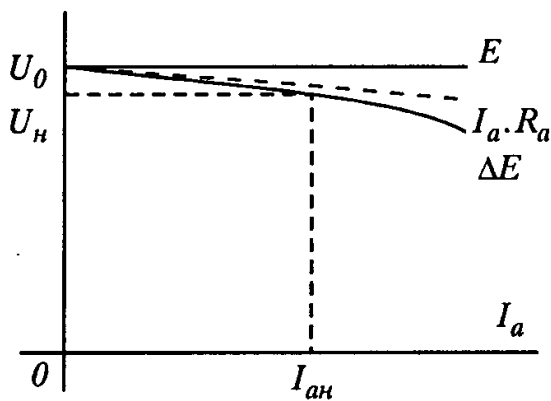
ХПХ е зависимостта  $U_{ПХ} = f(I_e)$  при  $I_a = 0$  и  $\omega = const$ . Получава се при следния опит: Роторът на генератора се върти от първичен двигател с постоянна честота на въртене, веригата на котвената намотка е прекъсната ( $K$  е отворен), токът във ВН е нула, волтметърът, включен към КН, отчита напрежение от няколко волта, което представлява е.д.н. от остатъчния магнетизъм ( $\Phi_{ост}$ ) в магнитната верига на машината ( $E_{ост}$ ). След включване на напрежение към ВН и постепенно увеличаване на тока с помощта на релостата  $R_{\phi}$ , напрежението на празен ход  $U_{ПХ}$  започва да нараства докато магнитната система се насити.

Тъй като  $U_{ПХ} = E = k \cdot \Phi \cdot \omega$  при  $\omega = const$ , ХПХ в друг мащаб представлява зависимостта на магнитния поток на машината от възбудителния ток:  $\Phi = f(I_e)$ . За оптимална стойност на възбудителния ток се приема тази, съответстваща на коляното на ХПХ. По-голямата стойност на  $I_e$  води до слабо нарастване на  $\Phi$ , докато в същото време по-големият ток предизвиква нежелано прегряване на ВН. Понякога тази нелинейна зависимост се замества с линейна в участъка от т. О до т. А (ненаситена машина) и от т. А до т. В (наситена машина), което облекчава анализа. ХПХ е основна характеристика на всички машини с ВН и се снима по схема с независимо възбуждане.

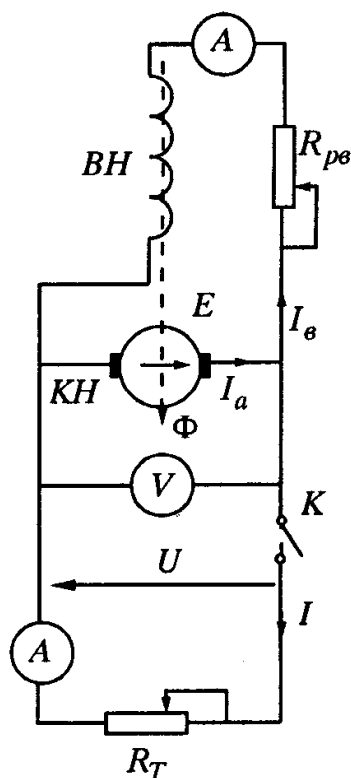
• **Външна характеристика (ВХ) на ГНВ**

ВХ представлява зависимостта на напрежението на котвената намотка от товарния ток. В случая котвеният ток  $U = f(I_a)$  при  $I_e = const$  и  $\omega = const$ .

При затваряне на ключа  $K$  и намаляване на товарното съпротивление котвеният ток ще расте, при което трябва да се очаква, според закона на Ом за цялата верига  $U = E - R_a \cdot I_a$ , линейно спадане на изходното напрежение. В действителност то спада малко по-бързо, тъй като върху основния магнитен поток на машината действа реакцията на котвата (фиг. 15.20).



Фиг. 15.20. Външна характеристика на ГНВ



Фиг. 15.21. Генератор с паралелно възбуждане

В случаите, когато това е необходимо, е възможно изходното напрежение да се поддържа постоянно при натоварване, като за целта се увеличава възбудителният ток, за да компенсира спадането на  $\Phi$  от реакцията на котвата. Зависимостта  $I_e = f(I_a)$  при  $U = const$  и  $\omega = const$  се нарича *регулировъчна характеристика*.

### 15.5.2. Постояннотоков генератор с паралелно възбуждане

Схемата на ПТГ с паралелно възбуждане е представена на фиг. 15.21. Възбудителната намотка е свързана успоредно на котвената намотка и се захранва от нея.

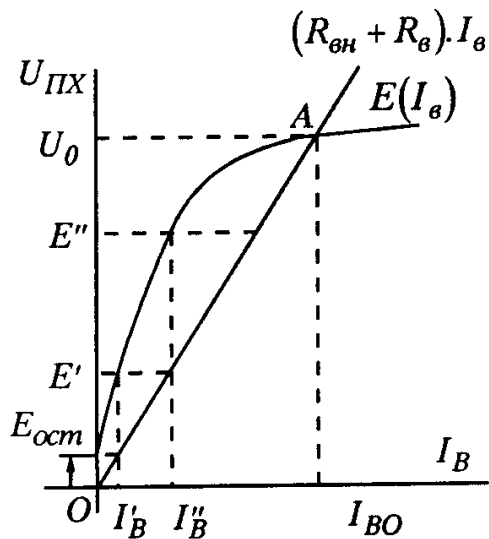
#### • Самовъзбуждане

Както се вижда от схемата, при празен ход токът във възбудителната намотка  $I_e$  зависи едновременно от два фактора: е.д.н., създадено в котвената намотка, и съпротивлението във веригата на ВН.

Процесът на самовъзбуждане може да се проследи на фиг. 15.22, където са показани две функции: ХПХ, т.е.  $E(I_e)$ , и напрежението  $(R_e + R_{pv}) \cdot I_e$ .

Основно значение за самовъзбуждането има наличието на остатъчен магнетизъм в машината и, респективно, на  $E_{ост}$ . Това е.д.н. обуславя протичането на ток  $I_e'$ , но такъв ток, както следва от ХПХ, съответства на е.д.н.  $E'$ . Последното, от своя страна, създава ток  $I_e''$ , а той - е.д.н.  $E''$  и т.н. Възбудителният ток расте, докато графиките на двете функции се пресекат, т.е.  $E = (R_e + R_{pv}) \cdot I_e$  - процесът на самовъзбуждане завършва. Разг-





Фиг. 15.22. Процес на самовъзбуждане на ГПВ

леданият процес е възможен само когато възбудителната намотка е свързана така, че магнитният поток, създаван от  $I_B$ , има същата посока като тази на потока от остатъчния магнетизъм.

При изменение на съпротивлението на реостата  $R_{pв}$  пресечната т. А се мести, понеже се изменя наклонът на правата. Очевидно е, че при големи стойности на  $R_{pв}$  генераторът няма да се възбуди, а при малки - възбудителният ток ще достигне високи стойности, което е нежелателно.

Следователно, условията за самовъз-

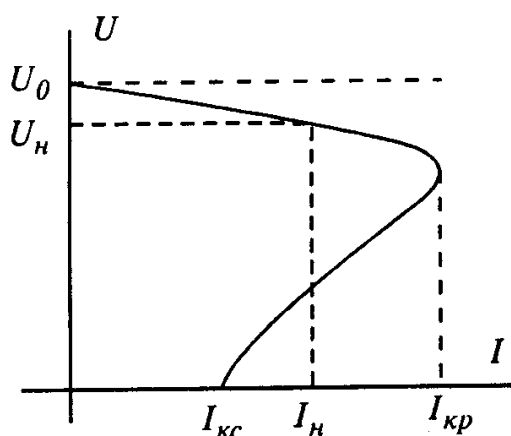
буждане на ГПВ се свеждат до:

1. Наличие на остатъчен магнетизъм.
2. Правилно свързване на ВН.
3. Оптимална стойност на съпротивлението във веригата на ВН.

**Първото** условие почти винаги се изпълнява - достатъчно е машината да е включвана поне веднъж. Ако **второто** условие не е изпълнено, машината не се възбужда - в този случай трябва да се разменят изводите на ВН. За да се изпълни **третото** условие, съпротивлението се избира така, че т. А да се разположи малко над коляното на ХПХ.

#### • Външна характеристика на ГПВ

Външната характеристика на ГПВ се дефинира като  $U = f(I)$  при  $R_{ВН} = const$  и  $\omega = const$  и е представена на фиг. 15.23.



Фиг. 15.23. Външна характеристика на ГПВ

Причините, обуславящи намаляването на напрежението при натоварване са същите, както при ГНВ, но тук е налице още една: е.д.н.  $E$  намалява и поради това, че намалява възбудителният ток, който се определя от напрежението  $U$  на изводите на КН. Това води до по-бързо спадане на напрежението на генератора и до достигане на критична стойност на товарния ток,  $I_{кр}$ , при която то рязко спада до нула. Тогава в котвената верига тече ток на късо съединение, който се обуславя само от  $E_{ост}$ . Този ток обикновено е по-малък от номиналния и не е

опасен за машината.

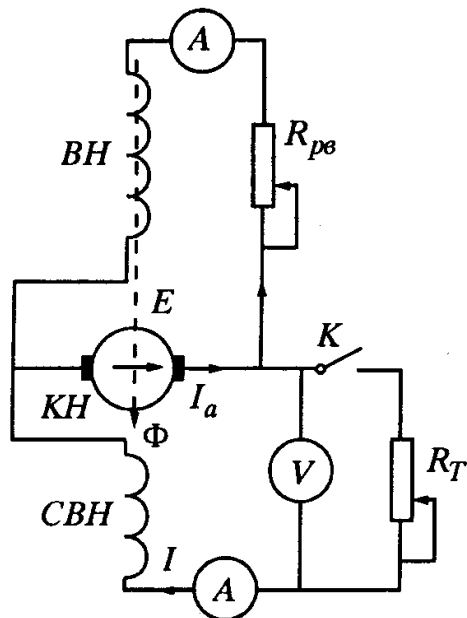
Понятията *номинален ток*, *номинално напрежение*, *номинална честота на въртене* и т.н. се отнасят до стойностите на тока, напрежението и честотата на въртене, за които машината е изчислена (за конкретна машина те са оптимални).

### 15.5.3. Постояннотоков генератор със смесено възбуждане

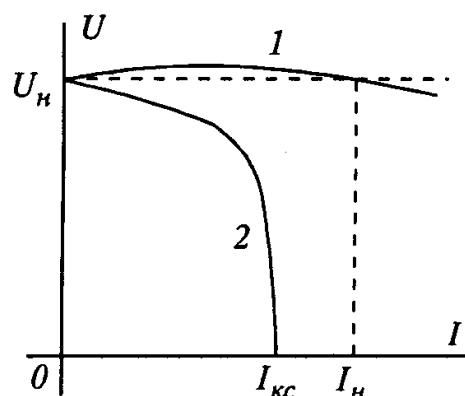
Схемата на генератора със смесено възбуждане (ГСВ) е показана на фиг. 15.24: паралелната (шунтовата) възбудителна намотка е означена с *ШВН*, а последователната (сериената) - със *СВН*.

Основният магнитен поток на ГСВ ( $\Phi$ ) се създава от шунтовата намотка. Сериената намотка създава допълнителен поток  $\Phi_c$ , чиято посока може да съвпада с  $\Phi$  или да бъде обратна, в зависимост от това къде са свързани началото и краят на сериената намотка. В резултат се получават две външни характеристики - при съпосочно (1) и противоположно (2) свързване на *СВН* (фиг. 15.25). При първата характеристика спадането на напрежението при натоварване, характерно за машината с паралелно възбуждане, се компенсира от допълнително е.д.н., създавано от сериената намотка. Така се постига изменение на изходното напрежение, непревишаващо 1% от номиналното в диапазона от празен ход до номинално натоварване.

При противоположно включване на *СВН* увеличаването на натоварването води до бързо спадане на резултантния магнитен поток на машината и на е.д.н., но, както се вижда от фиг. 15.25, на външната характеристика на генератора се образува участък, в който токът остава почти постоянен при



Фиг. 15.24. Схема на генератор със смесено възбуждане



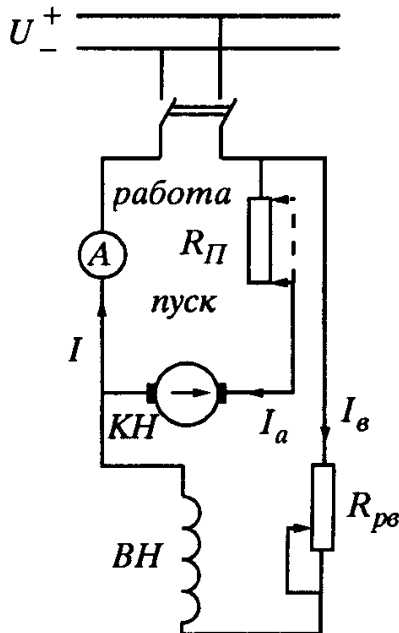
Фиг. 15.25. Външна характеристика на ГСВ

неголямо изменение на напрежението. Този участък съответства на *источник на ток* и прави възможно използването на ГСВ в заваръчната техника.

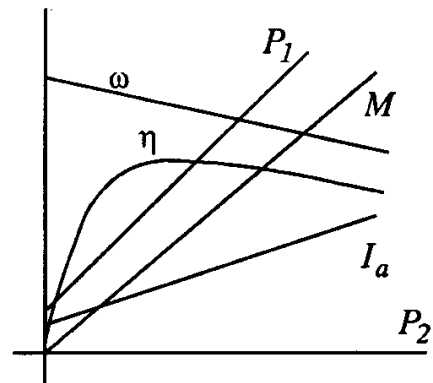
## 15.6. Постояннотокови двигатели

### 15.6.1. Постояннотоков двигател с независимо (паралелно) възбуждане

На фиг. 15.26 е показано свързването на двигателя към постояннотоковата мрежа:



Фиг. 15.26. Двигател с независимо (паралелно) възбуждане



Фиг. 15.27. Работни характеристики на ПТД с НВ

Последователно с котвената намотка е свързан *пусков реостат*, като с П е означено положението на плъзгача при пускане, а с Р - при работа. Възбудителната намотка е свързана към същия източник на напрежение, а при работа - и паралелно с КН. За регулиране на възбудителния ток се използва реостат  $R_{рв}$ . ПТД с малка мощност (до 1kW) обикновено се включват директно към мрежата, но за по-големите двигатели пусковият реостат е задължителен. Причината е следната: от уравнението за напрежението на двигателя

$$U = E + R_a \cdot I_a$$

следва

$$I_a = \frac{U - E}{R_a} ,$$

но при пускане на двигателя роторът е неподвижен, следователно  $E = 0$  и пусковият ток  $I_{aП} = \frac{U}{R_a}$  ще превишава многократно работния ток (за ПТМ

от пример 15.2 отношението на двата тока е 10). Пусковият реостат ограничава тока при пускане и по този начин предпазва веригата на *КН* от значително претоварване. В началния момент  $I_{a\Pi} = \frac{U}{R_a + R_{\Pi}}$ . След завъртане на ротора се появява противое.д.н. и реостатът постепенно се извежда.

Въртящият електромагнитен момент на двигателя е  $M = \kappa \cdot \Phi \cdot I_a$ , а полезният момент на вала се определя като разлика от електромагнитния момент и съпротивителния момент при празен ход,  $M_0$ :

$$M_2 = M - M_0,$$

където  $M_0$  обикновено се приема за постоянна величина.

Номиналната полезна мощност на вала е основен параметър на всеки електродвигател и се определя като произведение от номиналния момент и номиналната честота на въртене:

$$P_{2н} = M_{2н} \cdot \omega_n.$$

Освен  $P_{2н}$ , на табелката с данни на всеки ПТД се посочват още скоростта на въртене,  $n$  в об/мин, номиналното напрежение, номиналният ток и к.п.д. Понякога тази информация не е достатъчна, особено в случаите, когато машината работи с изменение на натоварването в определени граници. В такива случаи е необходимо да се определят *работните характеристики* на машината, които се получават опитно или се изчисляват по каталожни данни: това са зависимостите на  $\omega$  или  $n$ , консумираната мощност  $P_1$ , въртящият момент  $M_2$ , токът  $I_a$  и к.п.д.  $\eta$  от мощността на вала на двигателя (фиг. 15.27). Обърнете внимание, кривите  $P_1(P_2)$  и  $I_a(P_2)$  не започват от нулата, което е свързано със загубите и момента при празен ход. При построяване на работните характеристики за всяка величина се избира подходящ мащаб или тя се взема в относителни единици спрямо избрана базова стойност.

#### • Механична характеристика на ПТД

Едно от ценните качества на ПТД е възможността за просто и евтино *регулиране на честотата на въртене*. По тази причина за тях най-важна е зависимостта на честотата на въртене от момента на вала, т.нар. *механична характеристика (МХ)*. Тя може да се получи от вече изведените уравнения

$$U = E + R_a \cdot I_a,$$

$$E = \kappa \cdot \Phi \cdot \omega,$$

и

$$M = \kappa \cdot \Phi \cdot I_a.$$

След заместване на  $E$  в първото уравнение и съответното преобразуване следва

$$(15.5) \quad \omega = \frac{U - R_a \cdot I_a}{k \cdot \Phi} .$$

Получената зависимост  $\omega(I_a)$  се нарича *скоростна характеристика*. След като в (15.5)  $I_a$  се замени с  $M/k\Phi$ :

$$(15.6) \quad \omega = \frac{U}{k \cdot \Phi} - \frac{R_a}{(k \cdot \Phi)^2} \cdot M ,$$

се получава механичната характеристика  $\omega(M)$ : Както се вижда от последното равенство, при постоянни стойности на захранващото напрежение и на магнитния поток тя представлява права линия. Когато стойностите на  $U$  и  $M$  са равни на номиналните, характеристиката се нарича *естествена* (вж. фиг. 15.28).

При  $M = 0$ , величината  $\omega_0 = \frac{U}{k \cdot \Phi}$  представлява честота на празен ход.

За изясняване на процеса на регулирането е необходимо да се знае, че *регулиране се нарича изменението на честотата на въртене на двигателя при зададен въртящ момент на вала*. Нека разгледаме най-простия случай:  $M_2 = const$ .

Както се вижда от формулата за  $MX$ , възможните начини за регулиране са следните:

- чрез изменение на съпротивлението във веригата на котвената намотка;
- чрез изменение на съпротивлението във веригата на възбудителната намотка;
- чрез изменение на захранващото напрежение.

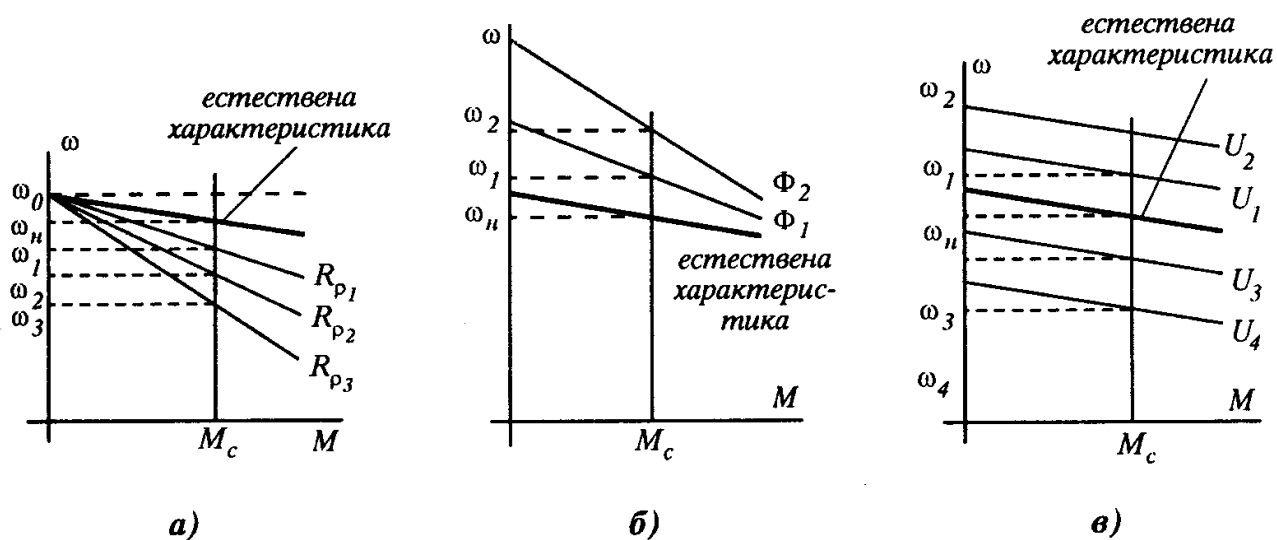
### **1. Изменение на съпротивлението във веригата на котвената намотка**

В този случай последователно с котвената намотка се включва реостат, който, за разлика от пусковия, е оразмерен за продължителна работа при токове от порядъка на  $I_{ан}$ .

Уравнението на  $MX$  се преобразува по следния начин:

$$\omega = \frac{U}{k \cdot \Phi} - \frac{R_a + R_{ap}}{(k \cdot \Phi)^2} \cdot M .$$

Получените механични характеристики при различни стойности на  $R_{ap}$  са представени на фиг. 15.28. Те се наричат изкуствени. Както се вижда от фигурата, увеличаването на  $R_{ap}$  води до намаляване на честотата на въртене при постоянен съпротивителен момент на вала. При този начин на регулиране е възможно само намаляване на  $\omega$ . Регулирането е плавно, лесно се осъществява, но има този недостатък, че в реостата се отделя значителна мощност, която се превръща в топлинни загуби.



Фиг. 15.28. Регулиране на честотата на въртене на ПТД с НВ

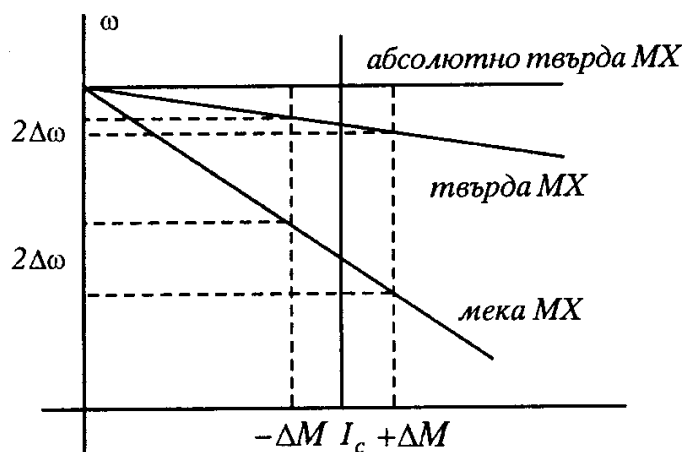
## 2. Изменение на съпротивлението във веригата на възбудителната намотка

При този начин на регулиране се измененя възбудителният ток и, съответно, основният магнитен поток, който приема нови стойности:  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$  ... и т.н. Както следва от уравнението на  $MX$ , намаляването на  $\Phi$  означава увеличаване на скоростта на празен ход и, съответно, на работната скорост, макар че заедно с това се увеличават коефициентът пред  $M$  и стръмността на  $MX$  (фиг. 15.28б).

По принцип е възможно и увеличаване на възбудителния ток, но такъв начин на регулиране не се прилага, тъй като магнитната система се насища и регулирането става неефективно. Поради това регулирането е само в посока на по-високите скорости. Загубите на мощност в реостата са малки, тъй като  $I_e$  е малък.

### 3. Изменение на захранващото напрежение

Най-добрият начин за регулиране на ПТД с НВ е чрез изменение на захранващото напрежение. Той обаче е и най-скъп, тъй като изисква отделен регулируем източник на напрежение за котвената намотка. Както следва от уравнението за  $MX$ , изкуствените характеристики са успоредни на естествената, т.е. те запазват своята *твърдост*, за разлика от предходните два случая. Освен това, при по-ниски напрежения те се разполагат под естествената характеристика, при по-високи - над нея (15.28в). Това означава, че е възможно т.нар. *двузонно регулиране*.



Фиг. 15.29. Твърдост на МХ

Понятието твърдост на МХ е свързано с изменението на честотата на въртене при случайни изменения на съпротивителния момент със стойност  $\Delta M_c$ . На фиг. 15.29 са показани три вида МХ: *абсолютно твърда*, *твърда* и *мека*. При едно и също изменение на момента с  $\pm \Delta M_c$ , изменението на скоростта при последната ще бъде най-голямо.

Изменение на посоката на въртене на ротора, т.е. *реверсиране*, може да се получи чрез промяна на посоката на тока в котвената намотка или, посоката на възбудителния ток, но не и на двете едновременно. Това се вижда от формулата за въртящия момент:

$$M = \kappa \cdot \Phi \cdot I_a.$$

ПТД с НВ имат твърда МХ. В зависимост от изискванията към задвижването (точност, диапазон на регулиране, икономичност, цена и др.) се избира най-подходящият начин на регулиране.

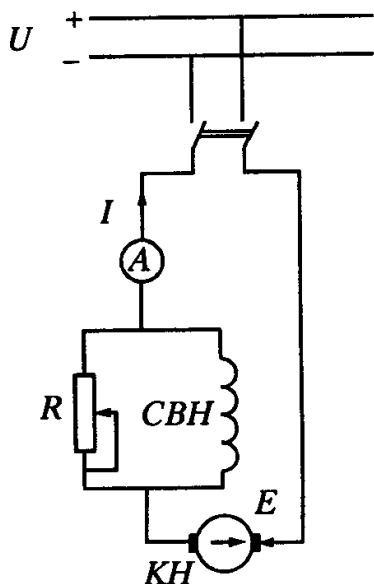
#### 15.6.2. Постояннотоков двигател с последователно възбуждане

Схемата на свързване на постояннотоков двигател с последователно възбуждане е показана на фиг. 15.30:

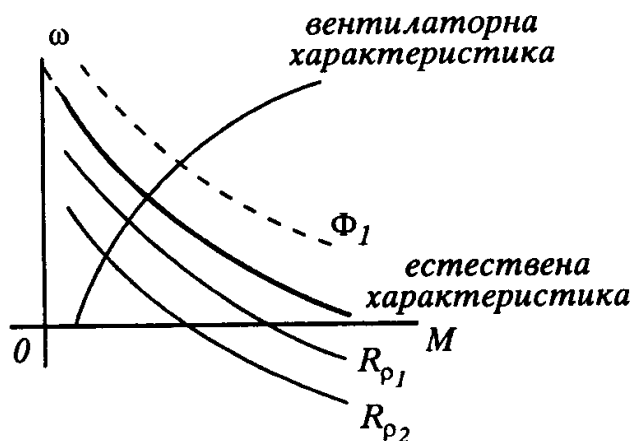
Котвената и възбудителната намотки са свързани последователно, т.е. възбудителният ток е равен на котвения. Ако се приеме, че магнитната верига на двигателя е ненаситена, магнитният поток може да се изрази като  $\Phi = \kappa_\Phi \cdot I_a$  ( $\kappa_\Phi$  - постоянен коефициент) и тогава

$$M = \kappa \cdot \kappa_\Phi \cdot I_a^2.$$

Формулата за МХ се получава след заместване отначало на  $\Phi$ , а след



Фиг. 15.30 Двигател с последователно възбуждане



Фиг. 15.31. Механични характеристики на ПТД с последователно възбуждане

това и на  $I_a$  от формулата за момента

$$I_a = \sqrt{\frac{M}{k \cdot k_\Phi}}$$

в равенството

$$\omega = \frac{U - R \cdot I_a}{k \cdot \Phi} ;$$

$$\omega = \frac{U - R \cdot I_a}{k \cdot \Phi} = \frac{U}{k \cdot k_\Phi \cdot I_a} - \frac{R \cdot I_a}{k \cdot k_\Phi \cdot I_a} = \frac{U}{k \cdot k_\Phi \cdot I_a} - \frac{R}{k \cdot k_\Phi} ,$$

$$\omega = \frac{U}{\sqrt{k \cdot k_\Phi} \sqrt{M}} - \frac{R}{k \cdot k_\Phi} ,$$

където  $R$  е сума от съпротивленията на котвената и възбудителната намотки, и съпротивлението на регулиращ реостат, ако има такъв:

$$R = R_\sigma + R_a + R_{ap} .$$

Видът на естествената  $M\omega$  е показан на фиг. 15.31. Тя е мека  $M\omega$  и има една важна особеност - при малки моменти скоростта бързо нараства и при  $M = 0$  се стреми към безкрайност. Това е опасно за машината, поради



големите центробежни сили, които възникват в ротора. Ето защо тези двигатели никога не се пускат на празен ход или предварително се вземат специални мерки за осигуряване на по-голям момент при празен ход. В някои от случаите се поставя неголяма шунтова намотка, която гарантира наличието на постоянен магнитен поток и ограничаване на скоростта.

На фиг. 15.31 са показани още изкуствените характеристики, получени при различни стойности на  $R_{ap}$ . Увеличаването на това съпротивление води до нарастване на постоянния член в уравнението за  $M_X$ , откъдето следва, че новите  $M_X$  ще се разположат под естествената. Възможно ли е изменение на магнитния поток  $\Phi$ ? Да, чрез шунтиране на  $CBH$ , при което се отклонява част от тока, преминаващ през нея - това води до намаляване на  $\Phi$  и до разполагане на изкуствената  $M_X$  над естествената. Регулиране на честотата на въртене може да се осъществи и чрез увеличаване и намаляване на захранващото напрежение. Фиг. 15.31 е дадена още и  $M_X$  на вентилатор.

Тъй като двигателите с последователно възбуждане допускат значителни претоварвания на вала на двигателя, те се използват като тягови в електрическия транспорт, при подемно-транспортните механизми и др.

### ***15.6.3. Постояннотоков двигател със смесено възбуждане***

ПТД със смесено възбуждане заемат междинно положение спрямо описаните вече два типа двигатели. В зависимост от това магнитният поток на коя от двете намотки (на паралелната или на последователната) преобладава, характеристиките им са по-близки до тези на ПТД с независимо или с последователно възбуждане.

## Шестнадесета глава

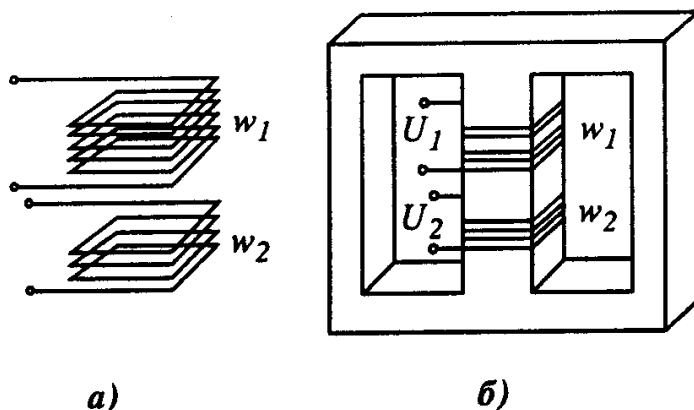
### ТРАНСФОРМАТОРИ

Трансформаторите намират изключително широко приложение в електротехническите устройства и системи - от адаптерите за зареждане на мобилните телефони до атомните електростанции. Създаването и приложението им е свързано предимно с пренасянето на електрическа енергия на големи разстояния и причините, до голяма степен, са икономически. Преминването на електрически ток по електропроводите създава загуби на мощност  $R_{np} \cdot I^2$ , пропорционални на квадрата на тока. Ако една и съща мощност  $U \cdot I$  се предава при ниско напрежение, токът ще бъде голям, а загубите значителни. Ако напрежението се повиши  $k$  пъти,  $k$  пъти ще се намали токът, а  $k^2$  пъти - загубите и количеството мед за проводници. Ползата е очевидна. Освен това, свойствата на трансформатора имат отношение и към променливотоковите машини и по тази причина разглеждането на последните започва именно с трансформаторите.

#### 16.1. Принцип на действие и устройство на трансформатора

Принципът на действие на трансформатора бе разгледан в гл. 1. В общия случай, това е елемент взаимна индуктивност - ако в една бобина протича променлив ток, се създава променлив магнитен поток, който индуцира е.д.н. както в бобината, която го създава, така и в бобина, която частично или изцяло се пробоща от този магнитен поток. Индуктираното е.д.н., според закона на Фарадей, е пропорционално на скоростта на изменение на потока, неговата големина и броя на навивките. В трансформатора става предаване на енергия от един електрически контур във втори контур посредством магнитното поле. Обикновено конструкторите на тези апарати се стремят предаваната енергия да бъде максимална. Действително, в мощните трансформатори к.п.д. надвишава 99%. Един въздушен трансформатор (фиг. 16.1а) не може да бъде ефективен за тази цел и затова се използва феромагнитна сърцевина, която позволява да се получи висока плътност на магнитния поток,  $B$  и да се намалят потоците на разсейване (фиг. 16.1б).

Ако индуктираното във вторичната намотка е.д.н. захранва товарен ре-



Фиг. 16.1. Трансформатори: а) въздушен; б) с феромагнитна сърцевина

зистор, той консумира мощност

$$U_2 \cdot I_2 = S_2 \quad .$$

Ако приемем, че загубите и разсейването в трансформатора са пренебрежимо малки (почти идеален трансформатор\*), последният ще консумира от мрежата мощност  $S_1 = U_1 \cdot I_1$ , равна на  $S_2$ . Следователно

$$U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2 \quad ,$$

откъдето се получава следното равенство:

$$(16.1) \quad \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} = k$$

или

$$U_2 = \frac{U_1}{k} \quad \text{и} \quad I_2 = k \cdot I_1 \quad .$$

Тъй като в първичната намотка  $E_1$  всъщност е противо- е.д.н. и е приблизително равно на  $U_1$ , а  $U_2 \approx E_2$ , и тъй като двете намотки се пробождаат от един и същи поток, то е.д.н. в тях се различават само по броя на навивките, следователно

$$(16.2) \quad \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1 \frac{d\Phi}{dt}}{w_2 \frac{d\Phi}{dt}} = \frac{w_1}{w_2} = k \quad ,$$

където  $k$  е конструктивен параметър и се нарича *коефициент на трансформация*.

Следователно, променяйки  $k$ , при определено напрежение на първичната намотка можем да получим желаното напрежение на вторичната намотка. То може да бъде по-ниско (при  $k > 1$ ) или по-високо (при  $k < 1$ ) от първичното. Естествено, при запазване на предаваната мощност намалява-

\* В идеалния трансформатор токът, необходим за създаване на магнитен поток, също е пренебрежимо малък, тъй като се приема  $\mu \rightarrow \infty$ . - Бел. авт.

нето на  $U_2$   $k$  пъти води до увеличаване на  $I_2$   $k$  пъти, и обратно: увеличаването на  $U_2$  - до намаляване на  $I_2$  .

Съществуват многонамотъчни трансформатори с една първична намотка и няколко вторични за различни напрежения. Последните се използват в захранващите устройства на радиоелектронната апаратура.

• **Формула за е.д.н. в трансформатора**

Нека приемем, че магнитният поток в трансформатора се изменя по синусоидален закон и има вида

$$\Phi(t) = \Phi_m \cdot \cos \omega t \quad .$$

Тогава

$$e_1 = -w_1 \frac{d}{dt}(\Phi(t)) = -w_1 \frac{d}{dt}(\Phi_m \cdot \cos \omega t) = w_1 \cdot \omega \cdot \Phi_m \cdot \sin \omega t = E_{1m} \cdot \sin \omega t$$

От получената формула следва , че

$$E_{1m} = E_1 \sqrt{2} = w_1 \cdot 2\pi f \cdot \Phi_m$$

и

$$(16.3) \quad E_1 = 4,44 w_1 \cdot f \cdot \Phi_m \quad .$$

Аналогично за е.д.н. във вторичната намотка:

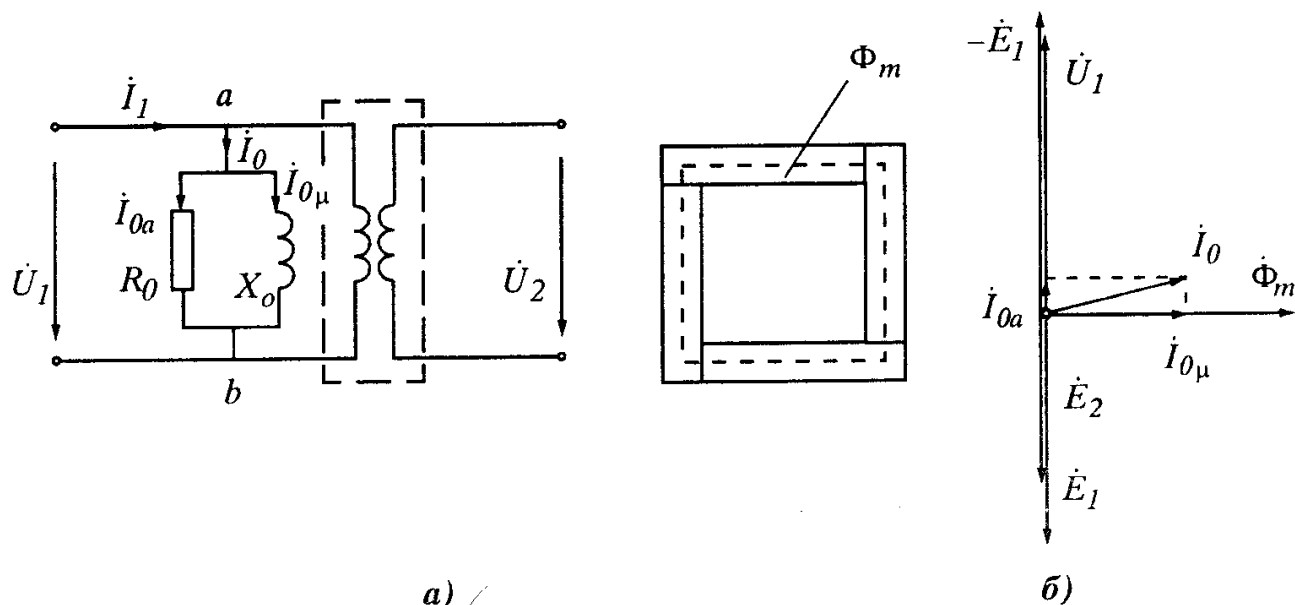
$$E_2 = 4,44 w_2 \cdot f \cdot \Phi_m \quad .$$

Получените формули са изключително важни за променливотоковите машини и апарати.

## 16.2. Ток на празен ход и заместваща схема на трансформатора

Използването на феромагнитна ( $\Phi$ М) сърцевина в трансформаторите значително усложнява анализа на процесите в тях, особено при отчитане на загубите и насищането на  $\Phi$ М материал. На фиг. 16.2 е показана схемата на идеален трансформатор и успоредно на първичната намотка е добавен един клон, който „отговаря“ за създаването на магнитния поток в него.

Токът в този клон се нарича *ток на празен ход*,  $I_0$  . Той има две съставлящи: едната представлява намагнитващ ток,  $I_{0\mu}$  , който създава променлив магнитен поток с амплитуда  $\Phi_m$  ; втората съставляща,  $I_{0a}$  е свързана със загубите във  $\Phi$ М материал от хистерезис и вихрови токове -  $P_{cm}$  . За определен материал тези загуби, изразени във W/kg, се дават от производителя и при известни размери на магнитопровода, стойност на магнитната индукция и честота може да се намери  $P_{cm}$  . Тогава активната съставляща



Фиг. 16.2: а) схема на идеален трансформатор с намагнитващ клон; б) векторна диаграма на тока на празен ход и е.д.н.

може да се определи като

$$I_{0a} = \frac{P_{cm}}{U_1} .$$

Стойността на намагнитващия ток се определя след пресмятане на м.д.н.  $F_{0m}$ , необходимо за създаване на магнитен поток с амплитуда  $\Phi_m$ . Обикновено се използват два вида магнитопроводи: от бедрен (ядрен) и мантиен тип (фиг. 16.1б и фиг. 16.2а). Както бе посочено, такъв магнитопровод трябва да бъде шихтован, т.е. да се направи от отделни пластини, изолирани една от друга. Подреждането на пластините в пакет става със застъпване. Готовият пакет се стяга по определен начин, в зависимост от габаритите и технологията на производство. Магнитопроводът на малките трансформатори в някои случаи се навива от лента студеновалцувана стомана.

И така, след изчисляване на  $F_{0m}$  се намира

$$I_{0\mu} = \frac{F_{0m}}{w_1 \cdot \sqrt{2}} .$$

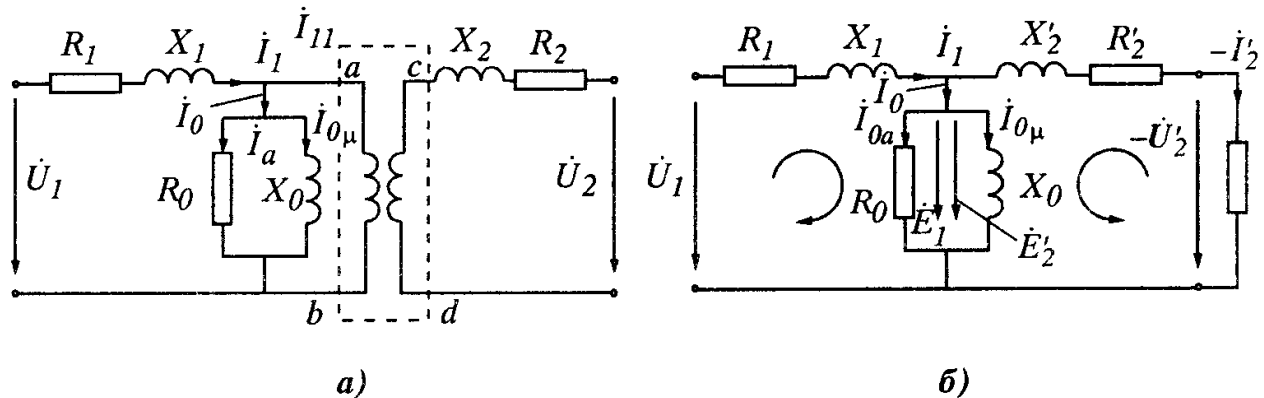
Напрежението върху намагнитващия клон, т.е. между точките  $a$  и  $b$ , е точно равно на индуктираното от магнитния поток е.д.н. в първичната намотка  $E_1$ .

Разположението на комплексните вектори на  $I_{0\mu}$  и  $I_{0a}$  и на сумарния ток

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0\mu}^2}$$

е показано на фиг. 16.2б.

При натоварване на трансформатора токовете  $I_1$  и  $I_2$  създават потоци на разсейване около намотките и загуби в съпротивлението на медния проводник. Тъй като всеки от потоците на разсейване е свързан само с намотката, която го създава, е.д.н. на самоиндукция могат да се изразят чрез индуктивните съпротивления на разсейване  $X_1$  и  $X_2$ . Активните съпротивления са, съответно,  $R_1$  и  $R_2$ . При отчитане на посочените съпротивления, схемата на трансформатора добива вида, показан на фиг. 16.3а.



Фиг. 16.3: а) еквивалентна схема на трансформатора с идеален трансформатор; б) еквивалентна заместваща схема на трансформатора

Активните и индуктивните съпротивления на намотките са изнесени отделно, идеалният трансформатор остава като връзка между първичния и вторичния контур. Тук е важно да се отбележи, че ако токът  $I_2$  е нула, то  $I_{11}$  също е нула, а токът  $I_1$  е равен на  $I_0$ , т.е. на тока на празен ход. Такава схема създава известни неудобства и затова е по-добре идеалният трансформатор да се премахне, като се свържат точките  $a$  с  $c$  и  $b$  с  $d$ , при което  $I_{11}$  става равно на  $\frac{I_2}{k} = I'_2$ , а напрежението  $U'_2 = k \cdot U_2$ . Това се нарича *привеждане на вторичната намотка към първичната* (фиг. 16.3б). Възможно е и обратното - *привеждане на първичната намотка към вторичната*. При това привеждане трябва да се променят и съпротивленията така, че разсейваната в  $R_2$  и запасената в  $X_2$  мощност да остане същата:

$$R_2 \cdot I_2^2 = R'_2 \cdot I'^2$$

откъдето, след заместване с  $\frac{I_2}{k} = I'_2$ , за  $R'_2$  се получава

$$R'_2 = k^2 \cdot R_2$$

Аналогична формула се получава и за индуктивното съпротивление:

$$X'_2 = \kappa^2 \cdot X_2 ,$$

и за товарното съпротивление, което в общия случай е комплексно:

$$Z'_T = \kappa^2 \cdot Z_T .$$

Знаците „ - “ пред тока и напрежението на вторичната намотка се обясняват с фиг. 16.2б, съответстваща на празен ход на трансформатора. Като база е взет магнитният поток  $\Phi_m$ , спрямо който е.д.н. в първичната и вторичната намотки изостава с  $90^\circ$ . За първичната намотка  $\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1$ ,  $\dot{I}_{0a}$  съвпада с  $\dot{U}_1$ , а  $\dot{I}_{0u}$  с  $\dot{\Phi}_m$ . При натоварване, и при условие че  $\dot{U}_2 \approx \dot{E}_2$ , напреженията на изводите на първичната и вторичната намотки са в противофаза. Затова в окончателната схема се появява знакът „ - “, при запазване на общоприетите означения на токовете и напреженията в четириполюсници от този тип.

Схемата на фиг. 16.3б се нарича още *еквивалентна заместваща схема на еднофазния трансформатор*. За нея могат да се запишат следните уравнения, според I и II закон на Кирхоф:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + R_1 \cdot \dot{I}_1 + jX_1 \cdot \dot{I}_1 ,$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - R_2 \cdot \dot{I}_2 - jX_2 \cdot \dot{I}_2 ,$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 - \dot{I}_2' .$$

В първото уравнение е.д.н.  $E_1$  е пренесено отлясно, а във второто уравнение посоката на обхода е избрана така, че всички напрежения да бъдат със знак „ + “.

От третото уравнение може да се получи интересен резултат, ако  $I_2$  се замести с  $\frac{I_2}{\kappa}$ , а  $\kappa$  - с  $\frac{w_1}{w_2}$ :

$$w_1 \cdot \dot{I}_1 = w_1 \cdot \dot{I}_0 - w_2 \cdot \dot{I}_2 ,$$

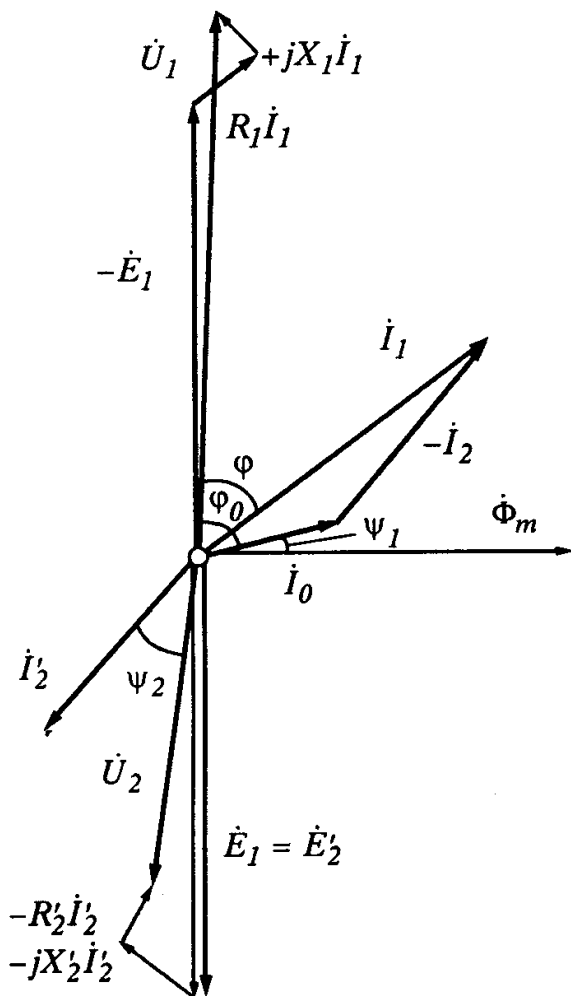
и тъй като всеки член в това равенство представлява м.д.н., то може да се запише както следва:

$$\dot{F}_1 = \dot{F}_0 - \dot{F}_2$$

или

$$\dot{F}_1 + \dot{F}_2 = \dot{F}_0 .$$

Последното равенство се нарича още *основно уравнение на трансформатора*, тъй като отразява начина на предаване на мощност. За даден тран-



Фиг. 16.4. Векторна диаграма на трансформатора

сформатор  $\dot{F}_0$  е постоянна величина, тъй като напрежението на захранващата мрежа и, съответно,  $\dot{I}_0$  са постоянни. Протичането на ток във вторичната намотка и появата на м.д.н.  $\dot{F}_2$  води автоматично до такова нарастване на тока в първичната намотка, че създаденото м.д.н.  $\dot{F}_1$  да компенсира действието на  $\dot{F}_2$ . Както следва от гореизложеното, трансформаторът не само предава с минимални загуби мощност от първичната към вторичната намотка, но и „следи“ да се спазва и съотношението на напреженията и токовете в тях. За да се представят нагледно амплитудно-фазовите съотношения между токовете и напреженията в трансформатора, се използват векторни диаграми.

Редът на построяване на векторна диаграма (фиг. 16.4) е следният:

- на комплексната равнина ( $1, j$ ) по реалната ос се нанася, в предварително определен мащаб, векторът на маг-

нитния поток  $\dot{\Phi}_m$ ,

- избира се мащаб за тока и се нанася токът на празен ход  $\dot{I}_0$ , който изпреварва с малък ъгъл  $\psi_1$  потока  $\dot{\Phi}_m$ ,

- избира се мащаб за напрежението и се нанасят е.д.н.  $\dot{E}_1 = \dot{E}_2$ , които изостават от  $\dot{\Phi}_m$  с  $90^\circ$ ,

- е.д.н.  $\dot{E}_2$  създава ток  $\dot{I}_2$ , като правило, изоставащ на ъгъл  $\psi_2$ ,

- към тока  $\dot{I}_0$  се прибавя  $(-\dot{I}_2)$ , за да се получи тока  $\dot{I}_1$ ,

- сега може да се намери  $\dot{U}_1$  като сума от  $(-\dot{E}_1)$  плюс вектор със същата посока като  $\dot{I}_1$  и големина, равна на  $R_1 \cdot I_1$ , плюс вектор, перпендикулярен на  $\dot{I}_1$  и големина  $X_1 \cdot I_1$ ; когато пред  $j$  има знак „+“, завъртането на  $90^\circ$  е обратно на часовниковата стрелка, а при знак „-“ - по часовниковата стрелка; върхът на последния вектор се свързва с началото на коор-



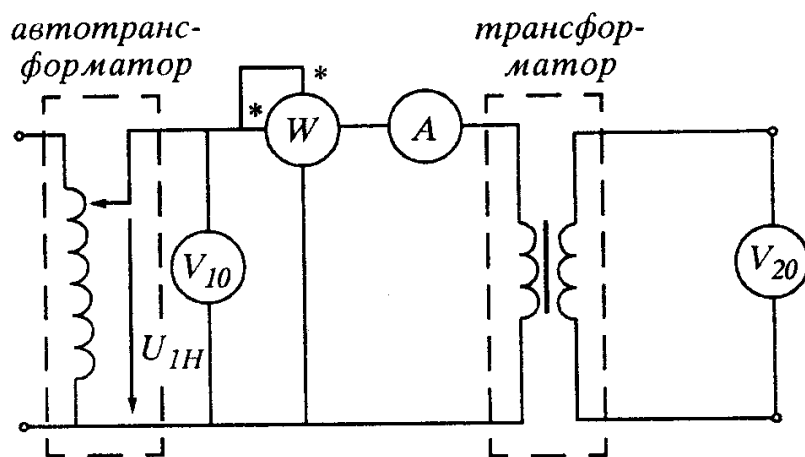
динатната система, при което се получава векторът  $\dot{U}_1$ ,

- векторът на напрежението  $\dot{U}'_2$  се намира като от  $\dot{E}'_2$  се извади първо векторът  $jX'_2 \cdot \dot{I}'_2$ , а след това и  $R'_2 \cdot \dot{I}'_2$ .

### 16.3. Определяне на параметрите на заместващата схема

В реалните силови трансформатори токът на празен ход и напрежението върху активните и индуктивните съпротивления на намотките са относително малки и могат да се пренебрегнат, което приближава тези трансформатори към идеалните. Но за анализа и проектирането им те са важни.

Параметрите на заместващата схема се изчисляват при проектирането на трансформатора, но могат да се определят и експериментално, като за целта се правят следните два опита: на празен ход и на късо съединение.



Фиг. 16.5. Опит на празен ход

#### • Опит на празен ход

За опита на празен ход (ОПХ) се използва схемата, показана на фиг. 16.5:

Вторичната намотка на трансформатора е отворена, а към първичната е подадено номинално напрежение  $U_{10} = U_{1H}$  и в нея тече токът на празен ход  $I_0$ . Тъй като  $I_0$  е малък спрямо номиналния ток  $I_{1H}$ , напреженията върху  $X_1$  и  $R_1$  са незначителни и могат да се пренебрегнат. Това означава, че ватметърът ще отчете мощност, равна на загубите в стоманата, т.е.

$$P_{10} = P_{cm} = R_0 \cdot (I_{0a})^2 = U_1 \cdot I_{0a} = U_1 \cdot I_0 \cdot \cos \varphi_0$$

Като се вземе предвид и векторната диаграма, от това равенство не е трудно да се намери  $\cos \varphi_0$ , а след това

$$I_{0a} = I_0 \cdot \cos \varphi_0$$

$$R_0 = \frac{U_1}{I_{0a}}$$

$$I_{0\mu} = I_0 \cdot \sin \varphi_0$$

и накрая

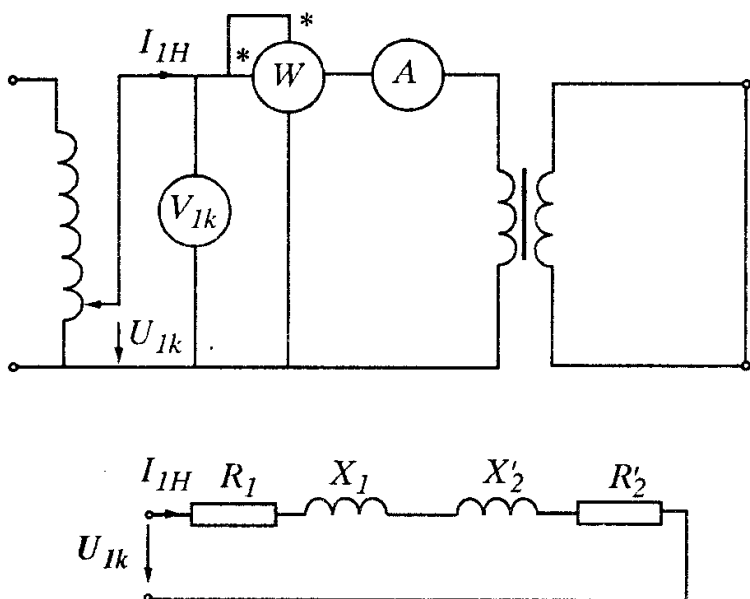
$$X_0 = \frac{U_1}{I_{0\mu}} .$$

**Забележка.** При последователна заместваща схема на намагнитващия клон ( $R_m + jX_m$ ) ще се получат други стойности на активното и индуктивното съпротивление. В разглеждания случай, при паралелна схема

$$I_0 = \dot{U}_0 \cdot Y_0 = \dot{U}_0 (G_0 - jB_0) = G_0 \dot{U}_0 - jB_0 \dot{U}_0 = I_{0a} + I_{0\mu} .$$

При опита на празен ход се определя и коефициента на трансформация, като отношение на напреженията на първичната и вторичната намотки:

$$k = U_{10}/U_{20} .$$



Фиг. 16.6. *Опит на късо съединение*

• *Опит на късо съединение*

За опита на късо съединение (ОКС) се използва схемата на фиг. 16.6:

Вторичната намотка на трансформатора е дадена на късо. Напрежението на първичната намотка  $U_{1k}$  трябва да бъде значително по-ниско от номиналното (5-10%) и се избира така, че токът в нея да бъде равен на номиналния,  $I_{1H}$ . Ако се подаде номинално напрежение,

поради малкото съпротивление на вторичната намотка в нея ще протече много голям ток, а това означава, че и в първичната намотка ще има такъв ток, което ще доведе до недопустимо прегряване и повреда на трансформатора. При ОКС се определят  $U_{1k}$  и консумираната мощност  $P_{1k}$ . Тъй като захранващото напрежение е ниско, ниско е и е.д.н.  $E_{1k}$ , а това означава, че магнитният поток, който го създава, е незначителен. Следователно, намаг-

нитващият ток може да се пренебрегне и тогава заместващата схема се превръща в контур, който съдържа само собствените съпротивления на двете намотки. Когато се положи

$$R_{\kappa} = R_1 + R_2' \quad \text{и} \quad X_{\kappa} = X_1 + X_2$$

следва

$$\dot{U}_{1\kappa} = \dot{I}_{1H} \cdot (R_{\kappa} + jX_{\kappa}) \quad ,$$

откъдето

$$Z_{\kappa} = \frac{\dot{U}_{1\kappa}}{\dot{I}_{1H}} = R_{\kappa} + jX_{\kappa} \quad ,$$

$$z_{\kappa} = \frac{U_{1\kappa}}{U_{1H}} = \sqrt{R_{\kappa}^2 + jX_{\kappa}^2} \quad \text{и} \quad \varphi_{\kappa} = \arctg\left(\frac{X_{\kappa}}{R_{\kappa}}\right) \quad .$$

И тъй като измерените загуби са само в  $R_{\kappa}$ , неговата стойност може да се определи от формулата за мощността, т.е.

$$R_{\kappa} = \frac{P_{1\kappa}}{I_{1H}^2} \quad .$$

Стойността на  $X_{\kappa}$  се намира от формулата за  $z_{\kappa}$ . Стойностите на отделните съпротивления се определят с допълнителни опити. За малките трансформатори може да се приеме  $R_1 \approx R_2' = \frac{R_{\kappa}}{2}$  и  $X_1 \approx X_2' = \frac{X_{\kappa}}{2}$ .

• **Външна характеристика на трансформатора**

С помощта на заместващата схема може да се изследва работата на трансформатора при различни товари. Най-важна е външната характеристика, т.е. зависимостта на напрежението на вторичната намотка от тока в нея  $U_2(I_2)$ . Тя е показана на фиг. 16.7, където относителната стойност на изменението на напрежението  $\Delta u$  се определя като

$$\Delta u = \frac{U_{20} - U_{2H}}{U_{20}} \quad .$$

• **Коефициент на полезно действие на трансформатора**

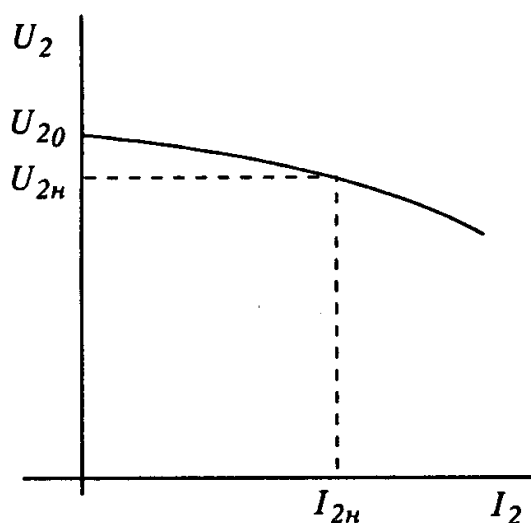
Данните от ОПХ и ОКС могат да се използват за определяне на к.п.д. на трансформатора и неговата зависимост от натоварването:

$$\text{К.п.д.} = \frac{P_{\text{изх}}}{P_{\text{изх}} + P_{\text{заг}}} \quad .$$

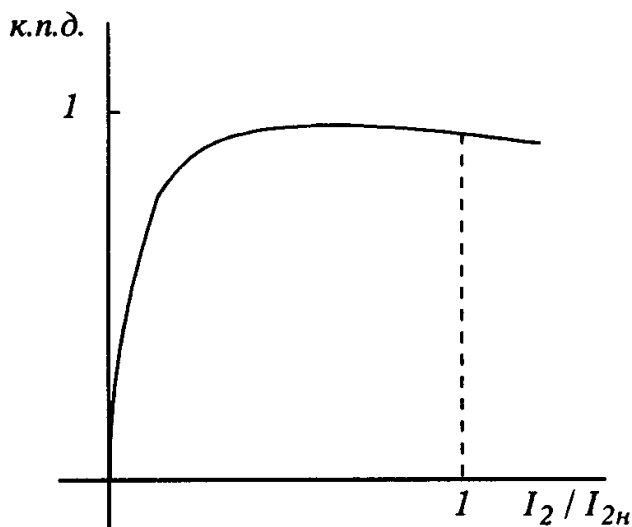
Тъй като изходната мощност е пропорционална на тока  $I_2$ , а загубите в медта - на  $(I_2)^2$ , могат да се вземат съответните мощности при номинален ток и да се умножат по коефициент  $\beta = \frac{I_2}{I_{2н}}$ . Тогава за к.п.д. следва:

$$\text{К.п.д.} = \frac{P_{2н} \cdot \beta}{P_{2н} \cdot \beta + P_{1к} \cdot \beta^2 + P_{10}}$$

Получената крива има вид, типичен за променливотоковите машини (фиг. 16.8).



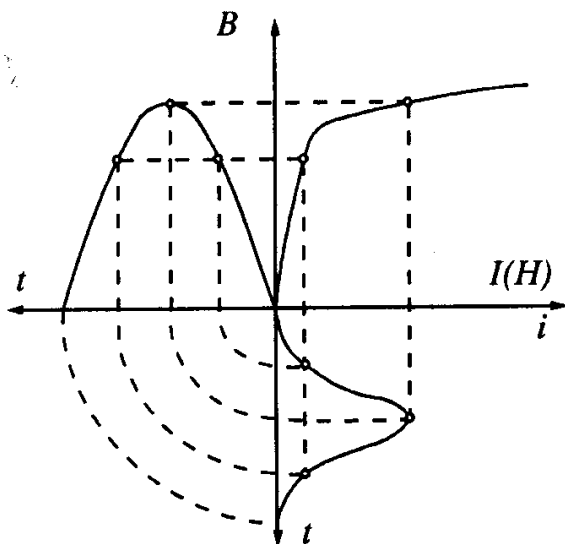
Фиг. 16.7. Външна характеристика на трансформатора



Фиг. 16.8. К.п.д. на трансформатора

• **Влияние на насищането на магнитопровода върху тока на празен ход**

Както бе посочено, при изследването и проектирането на трансформатори е важно да се отчита и нелинейният характер на зависимостта  $B(H)$ . Това е необходимо, тъй като, за да се получи по-голяма плътност на магнитния поток и да се осигури по-добро използване на материала, се навлиза в зоната на насищане на стоманата. Как влияе тази нелинейност на работата на трансформатора? При захранване на първичната намотка със синусоидално напрежение синусоидални трябва да бъдат, съответно, противо-е.д.н.  $e_1$ , магнитният поток в желязната сърцевина  $\Phi$  и токът  $i_{0\mu}$ , който го създава. Тъй като зависимостта  $B(H)$  при по-големи стойности е нелинейна, това означава, че токът  $i_{0\mu}$ , който черпи първичната намотка от мрежата, няма да бъде синусоидален. На фиг. 16.9 зависимостта  $B(H)$  е

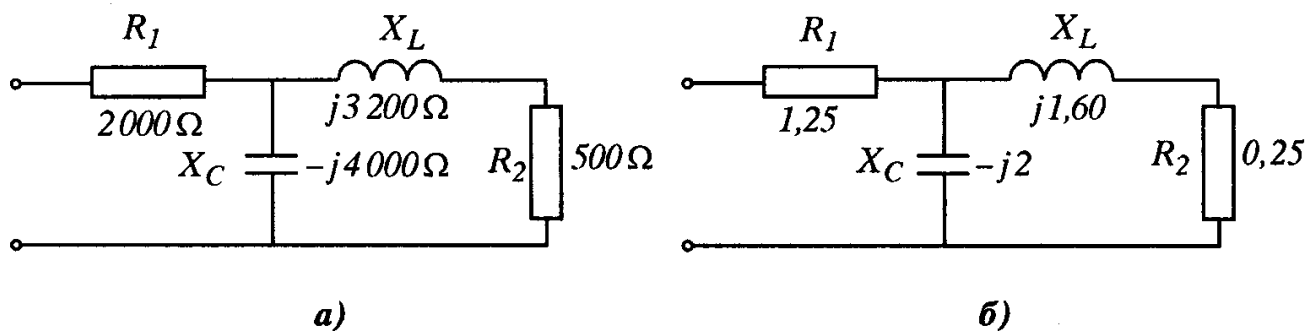


Фиг. 16.9. Несинусоидалност на тока на празен ход

дадена като зависимост  $\Phi(i_{0\mu})$ . Отляво е показана една полувървна на синусоидалния магнитен поток  $\Phi$ , а в четвърти квадрант - токът, който осигурява такъв магнитен поток. Формата на този ток явно не е синусоидална и ако такава периодична функция се разложи в ред на Фурие, ще се види, че върху основната синусоида се наслагват 3-ти, 5-ти и т.н. хармоници. Най-голям от тях е третият и при по-пълнен анализ на трансформаторите това не бива да се пренебрегва. Елиминирането, обаче, на третия хармоник не е желателно, тъй като това ще доведе до изкривяване на формата на  $\Phi$  (максимумът ще се притъпи), а следователно - и на напрежението.

#### 16.4. Параметри на заместващата схема в относителни единици

В много случаи използваните физически величини, характеризиращи параметрите на електротехническите устройства, имат стойности в много широк диапазон и по тази причина е по-удобно да се използват относителни единици (о.е.). Стойността, например, на абсолютната магнитна проницаемост за даден материал е много малка и затова най-често се използва нейната относителна стойност, взета спрямо магнитната проницаемост на вакуума. По аналогичен начин може да се постъпи и спрямо стойностите на съпротивленията в една електрическа верига. На фиг. 16.10а е дадена схема с действителните стойности, а на фиг. 16.10б - същата схема, но с тази разлика, че съпротивленията са записани в относителни единици, като за база е взета стойност  $R_B = 2000 \Omega$ .



Фиг. 16.10. Преминаване към о.е.

Отделните стойности са получени, както следва:

$$R_1 (o.e.) = 2\,500 \, \Omega / 2\,000 \, \Omega = 1,25,$$

$$X_L (o.e.) = 3\,200 \, \Omega / 2\,000 \, \Omega = 1,60,$$

$$X_C (o.e.) = 4\,000 \, \Omega / 2\,000 \, \Omega = 2,00,$$

$$R_2 (o.e.) = 500 \, \Omega / 2\,000 \, \Omega = 0,25.$$

При изследването на схемата резултатите ще се отнасят за всички подобни схеми, а преминаването към действителните стойности става чрез умножаване на  $R_B$ . Разгледаният пример представлява система с параметри в относителни единици с една база. По-често обаче този подход се използва при системи с две бази, както е при електрическите машини и трансформаторите. Обикновено като базови величини се вземат напрежението ( $U_B$ ) и мощността ( $P_B$ ). Важна особеност на такава система о.е. е тази, че от двете базови стойности може да се получат още две - за тока и за съпротивлението (импеданса):

$$I_B = P_B / U_B \quad \text{и} \quad z_B = U_B / I_B .$$

Например при база  $U = 400V$  и  $P_B = 5\,kW$ :

$$I_B = P_B / U_B = (5\,000W) / (400V) = 12,5\,A;$$

$$z_B = U_B / I_B = (400V) / (12,5A) = 32 \, \Omega.$$

Може да се каже, че параметрите на заместващата схема на трансформатора, изразени в относителни единици, малко се отличават за трансформаторите с различна мощност и с различни първични и вторични напрежения. В същото време действителните стойности, например за активното съпротивление, могат да се различават на няколко порядъка. В таблицата по-долу са дадени типичните стойности на тези параметри в о.е. за два диапазона на мощността.

<i>Елемент</i>	<i>3 KVA - 250 KVA</i>	<i>1MVA - 100MVA</i>
$R_1$ и $R_2'$	0,009 - 0,005	0,005 - 0,002
$X_1$ и $X_2'$	0,008 - 0,025	0,03 - 0,06
$X_0$	20 - 30	50 - 200
$R_0$	20 - 50	100 - 500
$I_0$	0,05 - 0,03	0,02 - 0,005

Тези данни са изключително полезни при съставяне на заместващата схема на конкретен трансформатор, чиято мощност и първично и вторично напрежение са известни. От дадените в таблицата стойности се вижда, че токът на празен ход е само  $3 \div 5 \%$  от номиналния при трансформаторите със средна мощност и  $0,5 \div 2 \%$  - при тези с голяма мощност. По тази причина той често се пренебрегва.

---

### Пример 16.1:

Да се определят параметрите на заместващата схема на трансформатор с мощност  $250 \text{ kVA}$  и напрежение  $6000 \text{ V} / 400 \text{ V}, 50 \text{ Hz}$ .

### Решение:

Базовата стойност на съпротивлението на първичната намотка ще бъде

$$z_{B1} = (U_{1\text{ном}})^2 / S_{\text{ном}} = (6000)^2 / 250000 = 144 \Omega .$$

Като се вземат от таблицата съответните стойности в о.е., се получава:

$$R_1 = 0,005 \cdot 144 = 0,72 \Omega ,$$

$$X_1 = 0,025 \cdot 144 = 3,6 \Omega ,$$

$$R_0 = 50 \cdot 144 = 7,2 \text{ k}\Omega ,$$

$$X_1 = 30 \cdot 144 = 4,32 \text{ k}\Omega .$$

Приведените стойности на активното и индуктивното съпротивление на вторичната намотка  $R_2$  и  $X_2$  са същите като  $R_1$  и  $X_1$ , а за да се получат действителните е необходимо последните да се разделят на  $k^2$ . И тъй като  $k = 6000/400 = 15$ , за  $R_2$  и  $X_2$  се получава, съответно:

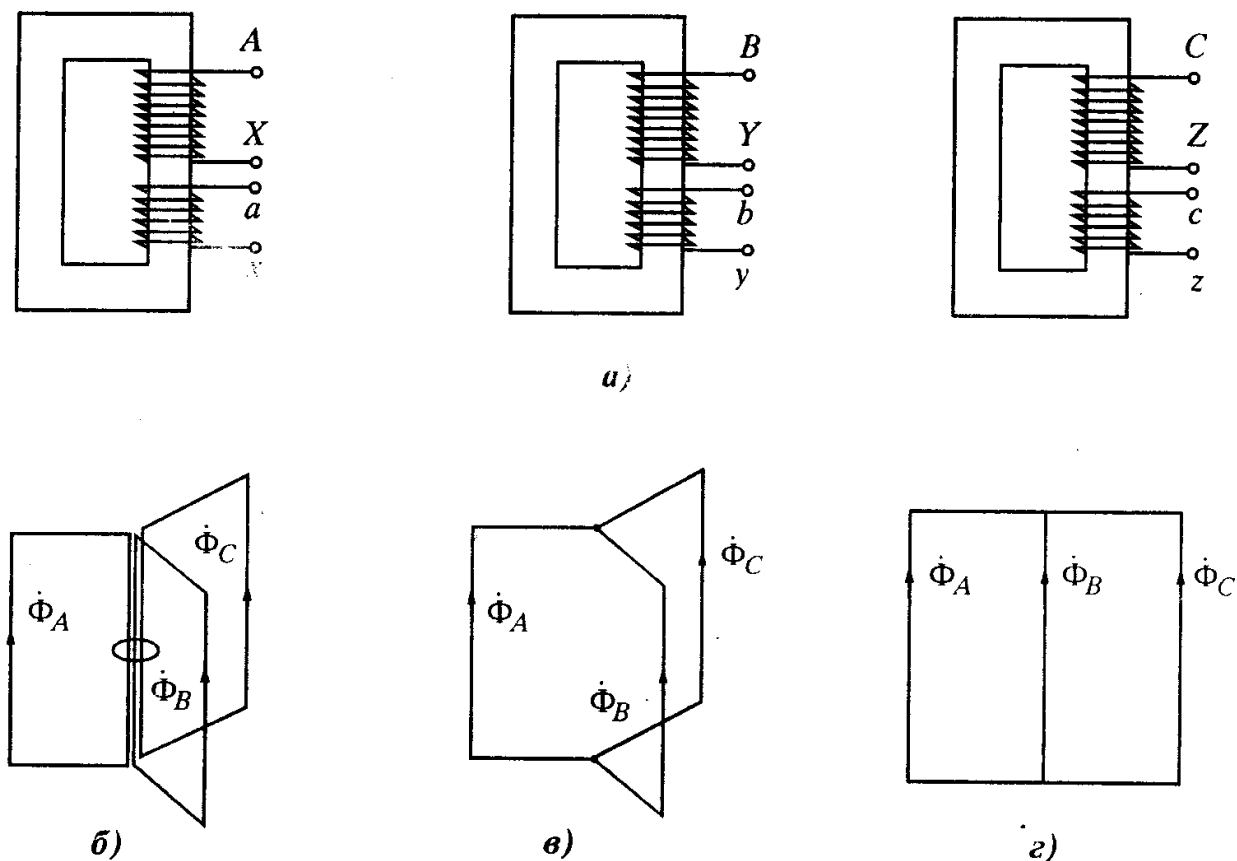
$$R_2 = 0,72/(15)^2 = 3,2 \text{ m}\Omega \quad \text{и} \quad X_2 = 3,6/(15)^2 = 16 \text{ m}\Omega .$$

---

Както за трансформаторите, така и за електрическите машини параметрите на съответната заместваща схема могат да се изразят в относителни единици. В този вид те се дават в някои каталози и справочници.

## 16.5. Трифазни трансформатори

Трансформаторите, които се използват в трифазните мрежи, имат някои особености, които ще разгледаме. В общия случай един трифазен трансформатор може да се състави от три еднакви еднофазни трансформатора, в които броят на навивките на първичните намотки е  $w_{1A} = w_{1B} = w_{1C} = w_1$ , на вторичните -  $w_{2a} = w_{2b} = w_{2c} = w_2$  (фиг. 16.11a), а коефициентът на трансформация е  $k = \frac{w_1}{w_2}$ .



Фиг. 16.11. Трифазни трансформатори

Такава конструкция не е много икономична по отношение на използването на стоманата, но недостатъкът може да се отстрани, без да се отрази на работата на трансформатора: трите еднакви трансформатора от фиг. 16.11a могат да се разположат така, както е показано на фиг. 16.11б (условно са дадени само магнитопроводите). Получава се пространствена магнитна верига, в чиито разклонения действат пулсиращи магнитни потоци с еднаква амплитуда и изместени по фаза на ъгъл  $120^\circ$ . В централното бедро тези потоци се сумират и тяхната сума е равна на нула:

$$\dot{\Phi}_A + \dot{\Phi}_B + \dot{\Phi}_C = 0$$



Следователно, то става излишно. След премахването му конструкцията добива вида, показан на фиг. 16.11в. Трансформатори с такъв магнитопровод, както и такива от фиг. 16.11а, се използват за големи мощности.

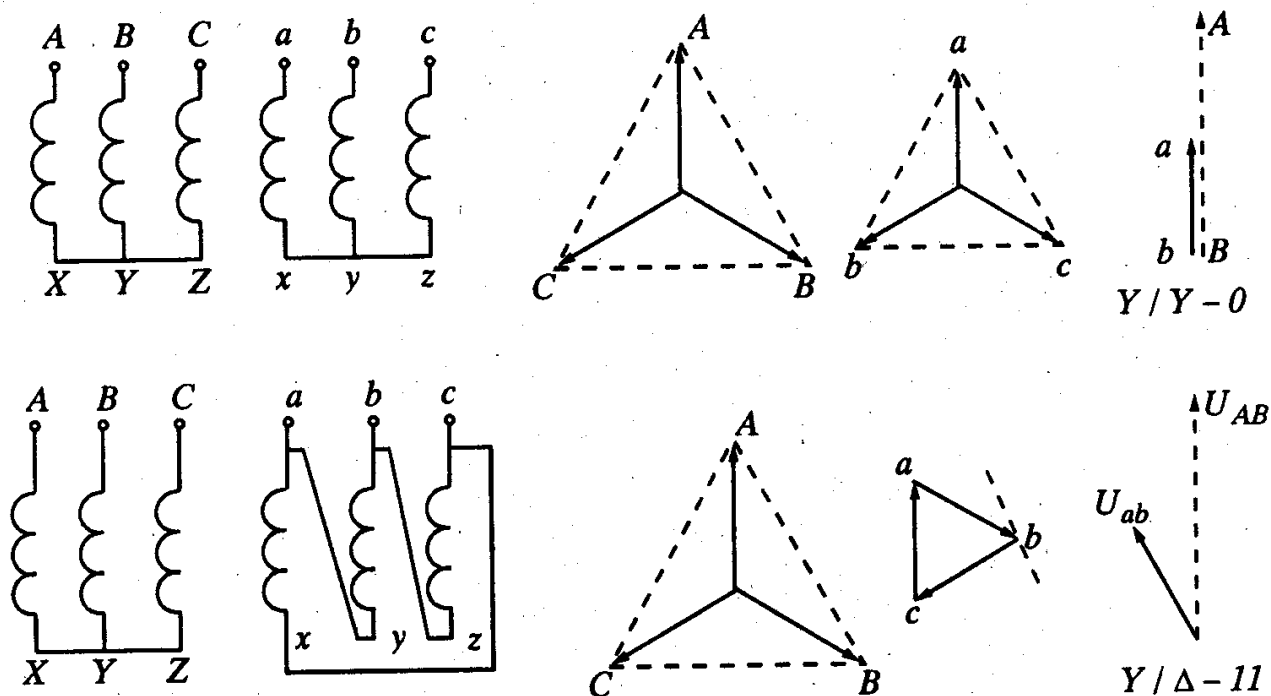
При трифазни мрежи със средна и малка мощност, каквито са корабните, се използват трансформатори с плоска, вместо с пространствена конструкция на магнитопровода (фиг. 16.11г). Такава конструкция е по-проста и технологична, макар да се създава известна несиметрия на магнитната верига, която води до разлика в намагнитващите токове на трите фази. Но тъй като последните са относително малки, тя може да се пренебрегне.

Друга важна особеност на трифазните трансформатори е тази, че съществуват различни варианти на свързване на първичните и вторичните намотки. По тази причина коефициентът на трансформация за линейните и фазните напрежения може да бъде различен. При свързване на двете намотки в „звезда“ (фиг. 16.11а) този коефициент и за двете напрежения е един и същ.

Освен това, фазовото изместване на първичното и вторичното линейни напрежения е нула. Това свързване се означава така: Y/Y-0. Но ако първичната намотка е свързана в „звезда“, а вторичната - в „триъгълник“ (фиг. 16.11б), кое-

фициентът на трансформация за линейните напрежения е  $k_{\text{лин}} = \frac{U_{1\text{л}}}{U_{2\text{л}}} = k \cdot \sqrt{3}$ ,

а фазовото изместване между едноименните напрежения ще бъде  $30^\circ$ . Това свързване се означава така: Y/ $\Delta$ -11.



Фиг. 16.12. Групи на свързване на трифазните трансформатори

Тъй като различните варианти дават фазово изместване, кратно на  $30^\circ$ , а положението на векторите съответства на положението на стрелките на часовника, за удобство този ъгъл се означава със съответния час. При това първичното напрежение винаги трябва да съвпада с положението на голямата стрелка (на 12 часа).

Ако се разменят краищата на отделните фази на вторичната намотка, ще се получат, съответно, *групи на свързване* Y/Y-6 и Y/ $\Delta$ -5.

При включване на трансформатори за паралелна работа освен условията за равенство на първичните и вторичните напрежения трябва да се спазва и изискването те да бъдат и от една и съща група на свързване. А за да се товарят трансформаторите пропорционално на тяхната мощност има още едно, трето условие - равенство на напреженията на късо съединение (вж. т. 16.3).

На корабите силовите трансформатори се използват главно за осигуряване на напрежение за битовите консуматори, радиоелектронната и навигационна апаратура, компютрите и др. Тъй като трифазната мрежа обикновено е 380V с изолирана неутрала, е необходимо това напрежение да се намали до стандартната стойност 230V. Освен това, за работа на някои системи за сигнализация и автоматизирани устройства се използва напрежение 24V.

## 16.6. Специални трансформатори

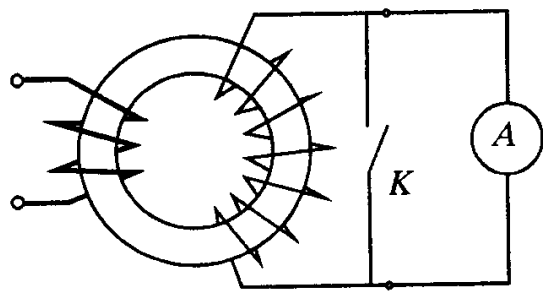
В зависимост от предназначението си трансформаторите имат различна конструкция и особености. Тук ще разгледаме онези, които се използват на корабите.

### • *Заваръчни трансформатори*

Технологията на заваряване изисква голям ток, който може да се получи с помощта на понижаващ трансформатор. Тъй като съпротивлението на електрическата дъга е малко ( $0,1 \div 0,2 \Omega$ ), това означава, че вторичната намотка ще работи в режим на късо съединение и токът ще се определя само от съпротивленията  $R_k$  и  $X_k$ . За да се ограничи този ток, най-добре е да се увеличи  $X_k$ . Това се постига чрез включване на индуктивна бобина с желязна сърцевина във веригата на вторичната намотка. За да се регулира заваръчният ток, в магнитопровода се прави въздушна междина, която може да се променя. Увеличаването ѝ води до намаляване на индуктивното съпротивление и увеличаване на заваръчния ток, а намаляването на въздушната междина, съответно, до намаляване на тока. В някои случаи трансформаторът и индуктивността са конструктивно обединени, в други се предпочита да се увеличат потоците на разсейване с помощта на магнитни шунтове и др.

### • *Измервателни трансформатори*

Използват се в случаите, когато обхватът на измервателните уреди волтметри и амперметри не е достатъчен за измерване на високо напрежение или голям ток.



Фиг. 16.13. Токов трансформатор  
на грешката от натоварване.

• **Трансформаторите на напрежение** са обикновено понижавачи и работят на практика на празен ход, тъй като към вторичната намотка се свързва волтметър - уред с много голямо вътрешно съпротивление. Те се оразмеряват именно за такъв режим на работа и затова трябва да се отбележи, че свързването на повече от един уред води до увеличаване

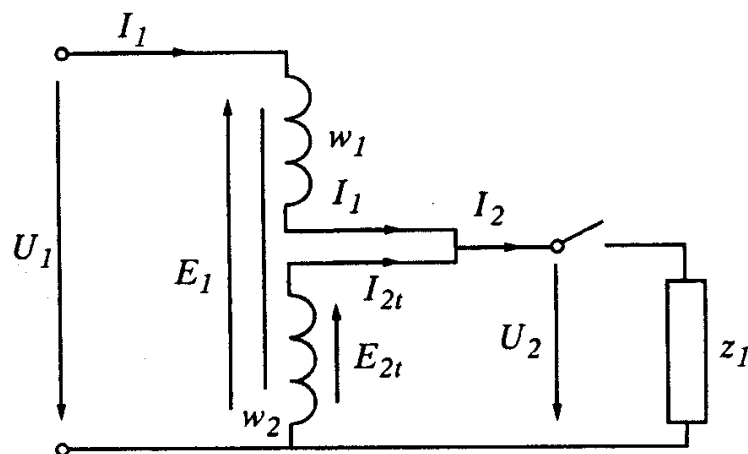
**Трансформатори на ток (ТТ)** се използват значително по-често. В тях, като правило, първичната намотка има една или няколко навивки, а вторичната - десетки или стотици, направени от тънък проводник. Такъв трансформатор е оразмерен за работа в режим на късо съединение, тъй като съпротивлението на амперметъра е незначително. Голямото вътрешно съпротивление на вторичната намотка е достатъчно да ограничи тока в нея до стандартна стойност, най-често 5А. Когато към намотката не е включен амперметър, тя задължително се дава накъсо, тъй като вторичното напрежение е високо и може да бъде опасно за оператора (фиг. 16.13).

Уредът за измерване на голям ток, наречен „ампер-клещи“, се състои от магнетопровод, който обхваща като клещи проводника, в който искаме да определим тока (първична намотка), а вторичната намотка се свързва към отделен или вграден в устройството амперметър.

Съществуват многообхватни токови трансформатори, в които коефициентът на трансформация може да бъде и по-голям от 1.

### 16.7. Автотрансформатори

В разгледаните дотук еднофазни и трифазни трансформатори енергията от първичната към вторичната намотка се предава посредством пулсиращия магнитен поток в желязната сърцевина. Какво ще стане обаче, ако двете намотки на еднофазен трансформатор се свържат електрически по начина, показан на фиг. 16.14?



Фиг. 16.14. Автотрансформатор

Свързването на бобините е съгласувано, при което те се разглеждат като една бобина с брой на навивките  $w_1 + w_2$ ,

представляваща първичната намотка на автотрансформатора (АТ). В нея протича ток на празен ход, който създава основния магнитен поток на трансформатора  $\Phi_m$ , а той от своя страна - е.д.н.  $E_1 = 4,44 \cdot (w_1 + w_2) \cdot f \cdot \Phi_m$ . Вторичната намотка има  $w_2$  навивки с е.д.н.  $E_2 = E_{2t} = 4,44 \cdot w_2 \cdot f \cdot \Phi_m$ . Коефициентът на трансформация на АТ е

$$k_{AT} = \frac{w_1 - w_2}{w_2} .$$

При тази схема енергията от входа към изхода на АТ се предава по два начина - магнитен и електрически. При затваряне на ключа токът през  $z_T$  има две съставлящи:  $I_2 = I_1 + I_{2t}$ , като втората -  $I_{2t}$ , се създава от е.д.н.  $E_{2t}$ . Наличието на ток  $I_{2t}$  поражда м.д.н.  $w_2 \cdot I_{2t}$ , което се компенсира от м.д.н. в намотката  $w_1$ , т.е.  $w_1 \cdot I_1$  и, ако се пренебрегне токът на празен ход, е в сила равенството

$$w_1 \cdot I_1 = w_2 \cdot I_{2t} .$$

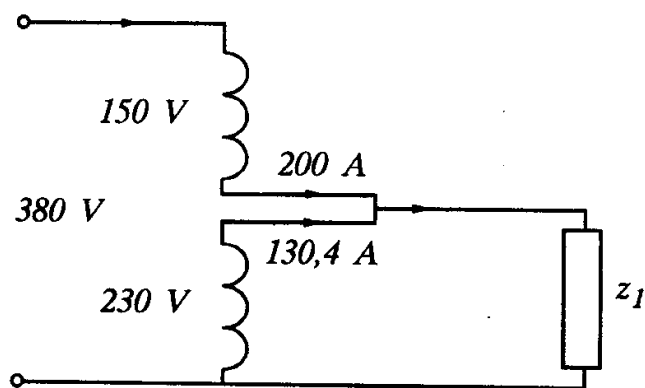
Тъй като  $I_1$  е токът в първичната намотка на АТ, в равенството за тока  $I_2$  трябва да се замести  $I_{2t} = \frac{w_1}{w_2} \cdot I_1$ , откъдето

$$I_2 = I_1 + I_{2t} = I_1 + \frac{w_1}{w_2} \cdot I_1 = I_1 \cdot \left( 1 + \frac{w_1}{w_2} \right) = I_1 \cdot \frac{w_1 + w_2}{w_2} = k_{AT} \cdot I_1$$

### Пример 16.2:

Еднофазен трансформатор има следните данни: 230/150 V, 30 kVA, 50 Hz и е свързан по схемата, показана на фиг. 16.15. Да се определи мощността,

предавана от входа към изхода, при номинални стойности на напреженията и токовете.



Фиг. 16.15

### Решение:

При последователно свързване на намотките към напрежение 380 V, последното ще се разреди пропорционално на броя на навивките на първичната и вторичната намотка, като изходът се свързва с намот-

ката 230 V. Номиналният ток в последната се определя като

$$I_{2t} = \frac{30\,000\text{ VA}}{230\text{ A}} = 130,4\text{ A}.$$

Токът в другата намотка е

$$I_1 = \frac{30\,000\text{ VA}}{150\text{ V}} = 200\text{ A}.$$

Следователно

$$I_2 = I_1 + I_{2t} = 130,4 + 200 = 330,4\text{ A},$$

а предаваната електромагнитна мощност или мощността на АТ е

$$S_{2AT} = U_2 \cdot I_2 = (230\text{ V}) \cdot (330,4\text{ A}) = 75\,992\text{ VA} \approx 76\text{ kVA}.$$

Полученият резултат показва, че трансформатор разчетен за мощност 30 kVA, по схемата на автотрансформатор, предава мощност 2,53 пъти по-голяма.

В общия случай, ако  $S_{2AT} = U_2 \cdot I_2 = U_2 \cdot k_{AT} \cdot I_1$ , за обикновения трансформатор, при същото изходно напрежение, токът е  $I_{2t}$  и

$$S_{2T} = U_2 \cdot I_{2t} = U_2 \cdot (I_2 - I_1) = U_2 \cdot (k_{AT} \cdot I_1 - I_1) = U_2 \cdot I_1 \cdot (k_{AT} - 1).$$

Следователно, отношението на мощностите  $K_S$  ще има следния вид:

$$K_S = \frac{S_{2AT}}{S_{2T}} = \frac{k_{AT}}{k_{AT} - 1}.$$

Това равенство показва, че колкото коефициентът  $k_{AT}$  е по близък до единица, толкова е по-голямо разглежданото съотношение. За пример 16.2

$$k_{AT} = \frac{380}{230} = 1,652, \text{ а } K_S = \frac{1,652}{1,652 - 1} = 2,53.$$

Полученият резултат може да се тълкува и по друг начин: При определена мощност габаритите на автотрансформатора могат да бъдат  $K_S$  пъти по-малки от тези на обикновения трансформатор.

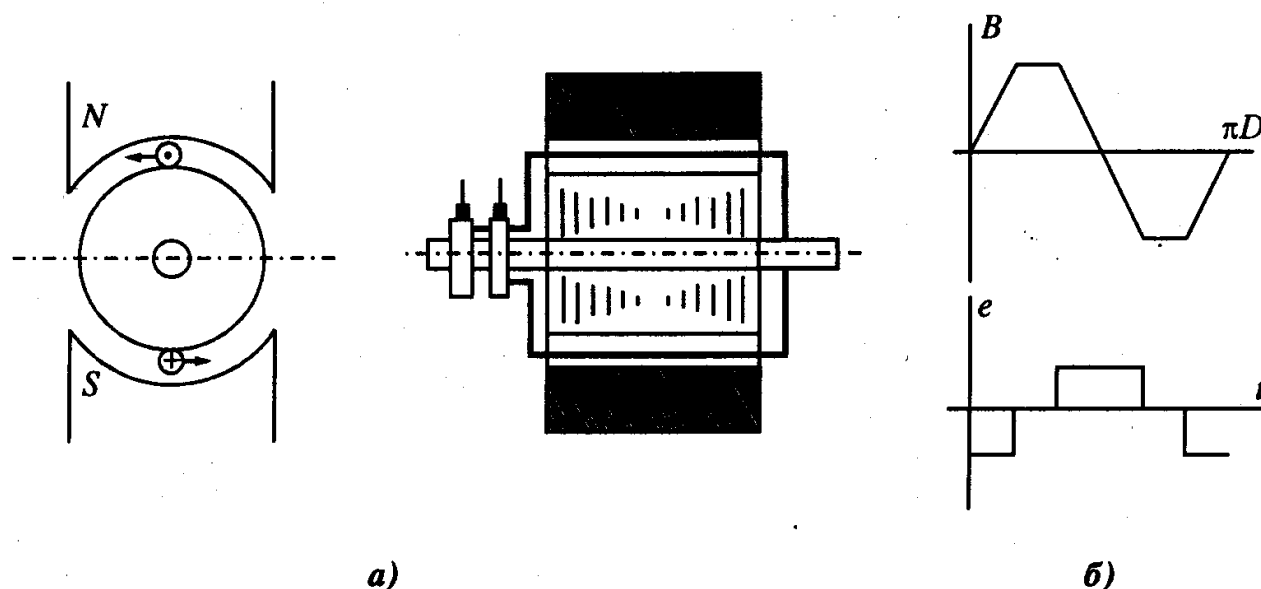
Не бива обаче да се забравя, че АТ изисква повече внимание по отношение на техниката на безопасност, тъй като, за разлика от обикновения трансформатор, първичната и вторичната страна не са електрически разделени. АТ често се използват в лабораторната практика, понеже позволяват плавно регулиране на изходното напрежение с помощта на подвижен контакт на единия от изводите с оголените в определен участък проводници на намотката.

СИНХРОННИ МАШИНИ

В съвременните електроенергийни системи, включващи производство, пренасяне и разпределение на електрическата енергия, синхронните генератори (СГ) заемат основно място. Те се задвижват от газови, парни или водни турбини, бутални двигатели и др. Синхронните генератори произвеждат променливо напрежение с определена стойност и честота, съобразно установените стандарти. Основно значение за работата на тези машини има поддържането на напрежението и честотата на въртене при натоварване в определените от стандарта граници. Тази задача е от изключителна важност за автономните енергетични системи, каквито са корабните.

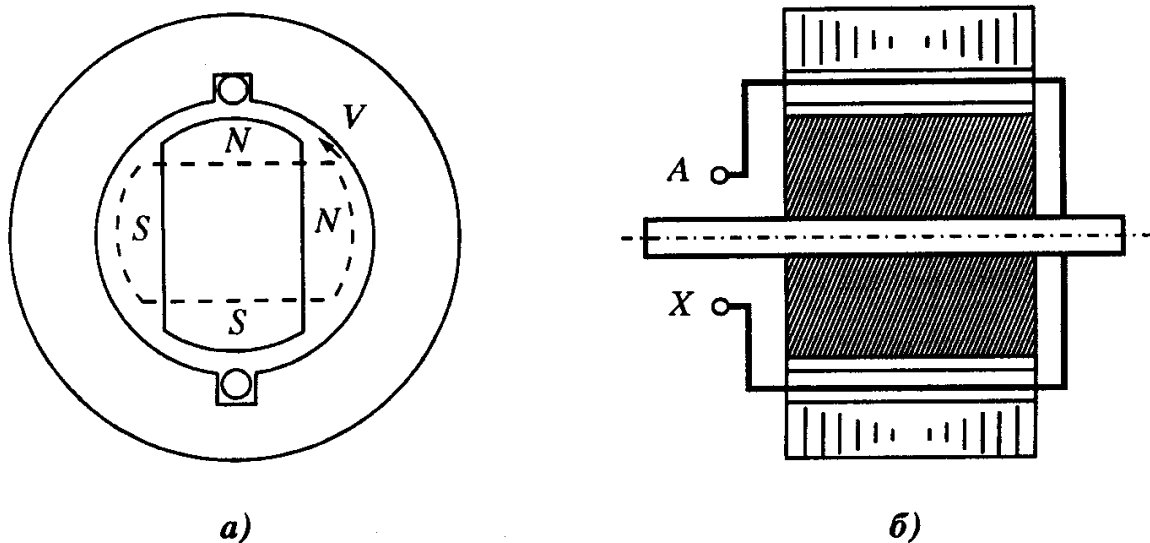
17.1. Принцип на действие и устройство на синхронен генератор (СГ)

Нека разгледаме една проста синхронна машина (СМ) с двуполусна магнитна система (като тази на постояннотоковата) и котвена намотка от една навивка (или секция), поставена на ротора (фиг.17.1а). Краищата на тази навивка са изведени на два изолирани от вала *контактни пръстена*,



Фиг. 17.1. Устройство на еднофазна СМ

които се допират до неподвижни четки. При въртене на ротора с постоянна честота проводниците пресичат силовите линии на магнитното поле и в тях се индуцира е.д.н., чиято стойност се изменя както е показано на фиг. 17.2б. Кривата на магнитната индукция е опростена в сравнение с тази на фиг. 15.7, с цел да се опрости анализа. Полученото променливо напрежение, разбира се, не е синусоидално, но тук се разглежда само една навивка. Същият резултат се получава, ако „обърнем“ конструкцията (фиг. 17.2) и разположим навивката в канали на статора, т.е. котвата стане неподвижна, а полюсите се завъртят. В този случай роторът представлява постоянен магнит или електромагнит с възбудителна намотка, която се захранва от източник на постоянен ток, посредством контактни пръстени.

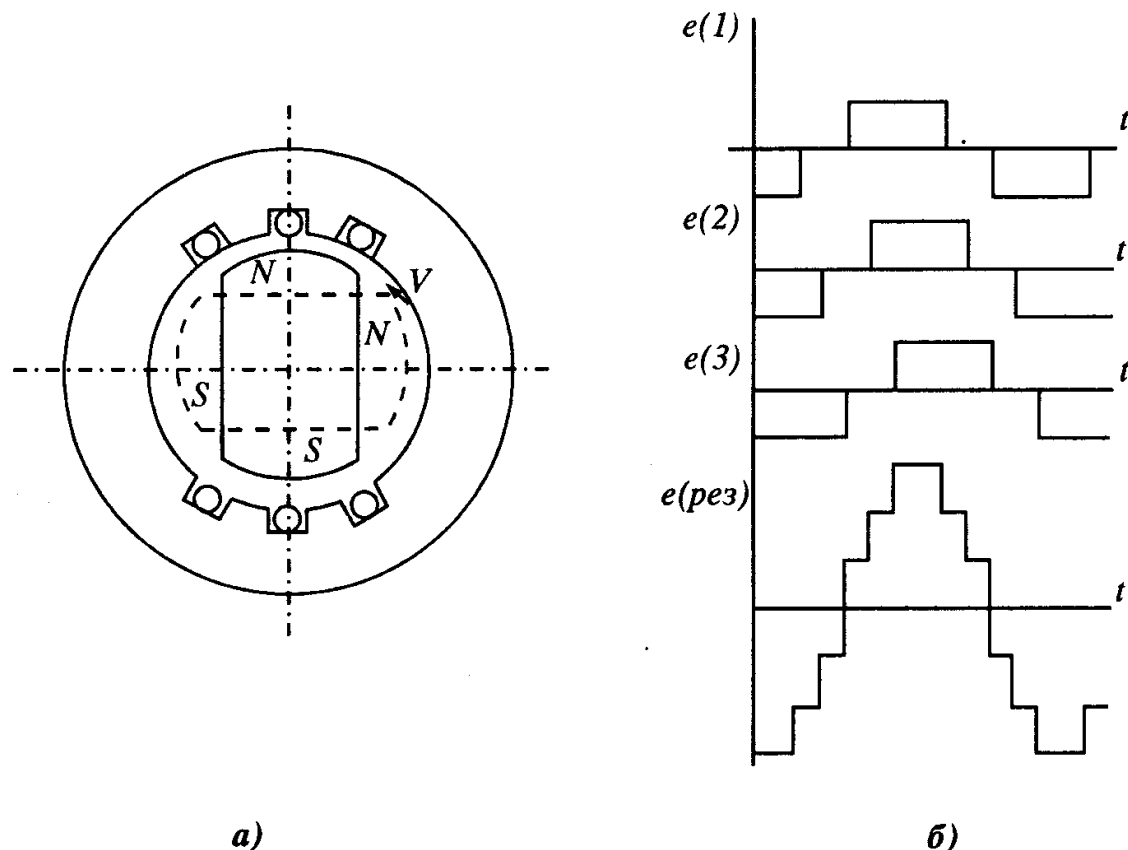


Фиг. 17.2. Устройство на СМ - „обърната“ конструкция

Ако вместо една навивка (секция) в канали на статора се поставят три, чиито оси са изместени, например на  $\pm 30^\circ$ , и които са свързани последователно, индуцираните в тях е.д.н. ще се сумират както е показано на фиг. 17.3.

Получената стъпална форма на  $e.d.n. = f(t)$  е вече по-близка до синусоидалната. Такава периодична функция може да се разложи в ред на Фурие, съдържащ основен хармоник с ъглова честота  $\omega$ , равна на тази на ротора  $\Omega_r$ , и висши хармоници с честоти  $3\omega$ ,  $5\omega$ ,  $7\omega$  и т.н. В този ред амплитудите на висшите хармоници ще бъдат значително по-малки, отколкото в случая с една секция. Възможно е с подходящ избор на броя на каналите и на навивките в тях да се получи форма на резултантното напрежение, максимално близка до синусоидалната. Защо е необходима синусоидална форма? Защото енергията, свързана с висшите хармоници, се разсейва във вид на топлина и се превръща в необратими загуби.

На фиг. 17.3а са показани две положения на магнитната ос на полюсите. С пунктир е показан случаят, когато осите на намотката и на полюсите съвпадат и магнитният поток, пробощащ електрическия контур, е максимален -  $\Phi_m$ , а с плътна линия - положението, когато осите са взаимно перпендикулярни и потокът е нула. Именно в този момент, когато скоростта на изменение на магнитния поток е максимална, максимално е и индуцираното е.д.н., т.е. е.д.н. изостава по фаза от  $\Phi$  с  $90^\circ$  (вж. формулата за е.д.н. и векторната диаграма на трансформатора при празен ход).

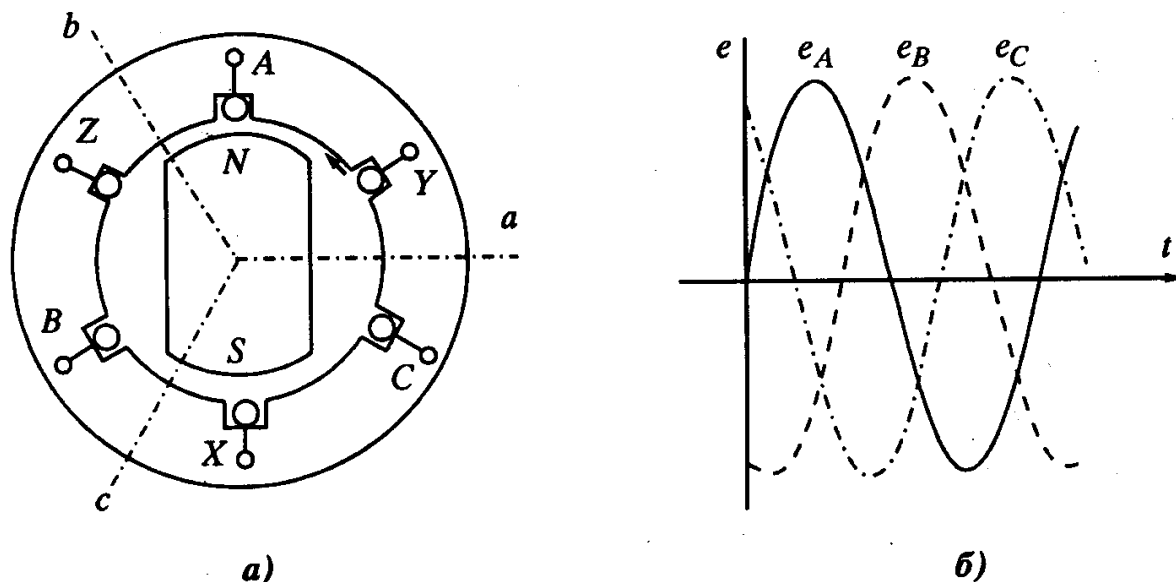


Фиг. 17.3. Разпределена намотка. Сумиране на е.д.н.

Описаната машина е *еднофазна*. Тя лесно може да се превърне в *двуфазна*, ако в каналите на статора се разположат две еднофазни намотки, чиито магнитни оси са взаимноперпендикулярни, и в *трифазна*, ако фазните намотки са три и магнитните им оси сключват ъгли  $120^\circ$  (фиг.17.4а).

За удобство на фиг. 17. 4а е показана само по една навика за всяка фаза и с  $A - X$ ,  $B - Y$  и  $C - Z$  са означени началото и края на всяка от тях. В положението, в което е изобразен роторът, магнитният поток за фаза  $A$  е нула, а е.д.н. има максимум. При указаната посока на въртене след завъртане на  $120^\circ$  е.д.н. ще бъде максимално във фаза  $B$ , а след още  $120^\circ$  - във фаза  $C$ . При достатъчно голям брой канали електродвижещите напреже-

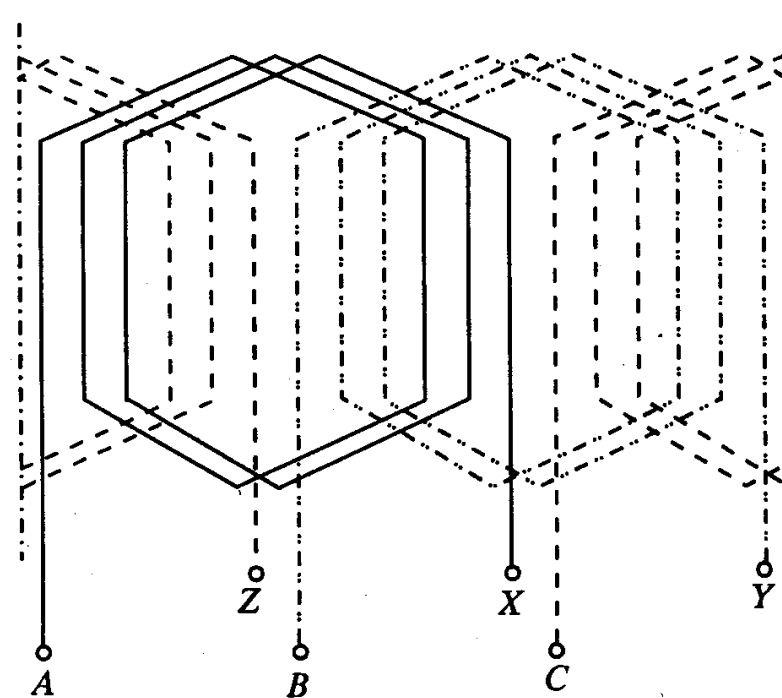




Фиг.17.4. Трифазна СМ. Е.д.н. на трифазна машина

ния ще имат почти синусоидална форма и фазово изместване, както е показано на фиг. 17.4б. Ако една машина има  $z = 18$  канала, в тях може да се разположи трифазна намотка, която се характеризира с брой на каналите на полюс и фаза  $q = z / 2p \cdot m$  ( $2p$  - брой на полюсите,  $m$  - брой на фазите), т.е. при  $2p = 2$  и  $m = 3$ ,  $q = 3$ . На фиг. 17.5 е дадена схема на намотката на такава машина.

Котвените намотки на реалните машини са значително по-сложни (те могат да бъдат двуслойни, със скъсена стъпка и др.). Разгледаната тук кот-



Фиг. 17.5. Схема на намотката на трифазна машина

вена намотка представлява *трифазна разпределена намотка*. Индуцираното в нея е.д.н. освен от стойността на  $\Phi$  и честотата на въртене  $\omega$ , зависи и от т.нар. *коэффициент на разпределение на намотката*,  $k_p$ , който се определя именно от начина на разполагането ѝ в каналите на статора. По тази причина ефективната стойност на е.д.н., за разлика от тази, получена за трансформатора, трябва да се умножи още по един коэффициент на на-

мотката  $k_{n1} = k_p \cdot k_0$ , който освен влиянието на  $k_p$ , отчита и това на някои други фактори чрез коефициента  $k_0$ . Следователно:

$$E_1 = 4,44 w_1 \cdot f \cdot \Phi_m - \text{трансформатор,}$$

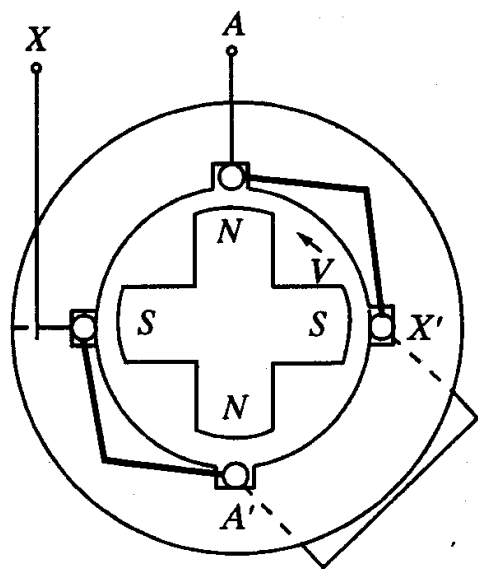
$$E_1 = 4,44 \cdot k_{n1} \cdot w_1 \cdot f \cdot \Phi_m - \text{синхронна машина.}$$

В последната формула  $w_1$  е броят на навивките на последователно свързаните секции в една фаза, а честотата се определя от формулата

$$\omega = 2\pi f = \Omega_1,$$

където  $\Omega_1$  е честота на въртене на вала.

При стандартна честота на напрежението 50 Hz роторът на разглежданата машина трябва да се върти точно с 50 оборота за секунда или с 3 000 оборота за минута. Ако машината е четириполюсна ( $2p = 4$ ), намотката на всяка фаза се разделя на две части, както е показано на фиг. 17.6, при което във всяка от тях едновременно ще се индуцира едно и също е.д.н. При това за един оборот на ротора ще се получат два цикъла на изменение на напрежението.



Фиг. 17.6. Четириполюсна машина

Следователно, за да остане честотата 50 Hz, роторът трябва да се върти с два пъти по-малка скорост. Същите разсъждения може да се направят за шестполюсна ( $2p = 6$ ) машина и т.н. В общия случай

$$\Omega_1 = \frac{2\pi \cdot f}{p}, \text{ rad/s}$$

или

$$n = \frac{60 \cdot f}{p}, \text{ min}^{-1} \text{ или об/мин.}$$

В някои случаи се използва понятието *електрическа ъглова честота*,  $\omega$ , която се отнася за тока и напрежението на СМ, и *механична ъглова честота*,  $\Omega_1$ , която се отнася за въртенето на вала на машината, т.е.:

*механична ъглова честота = електрическа ъглова честота / числове полюси*

$$\Omega_1 = \frac{\omega}{p}$$

## 17.2. Въртящо се магнитно поле

Фундаментално значение за променливотоковите машини има понятието *въртящо се магнитно поле*. В неявен вид то вече бе разгледано - въртящият се ротор на СМ създава именно такова поле, което индуцира променливо напрежение в котвената намотка. Когато СГ се натовари, т.е. когато захранва един или няколко консуматора, във фазите на котвената намотка протичат токове, които създават още един магнитен поток, който се върти с честотата на ротора.

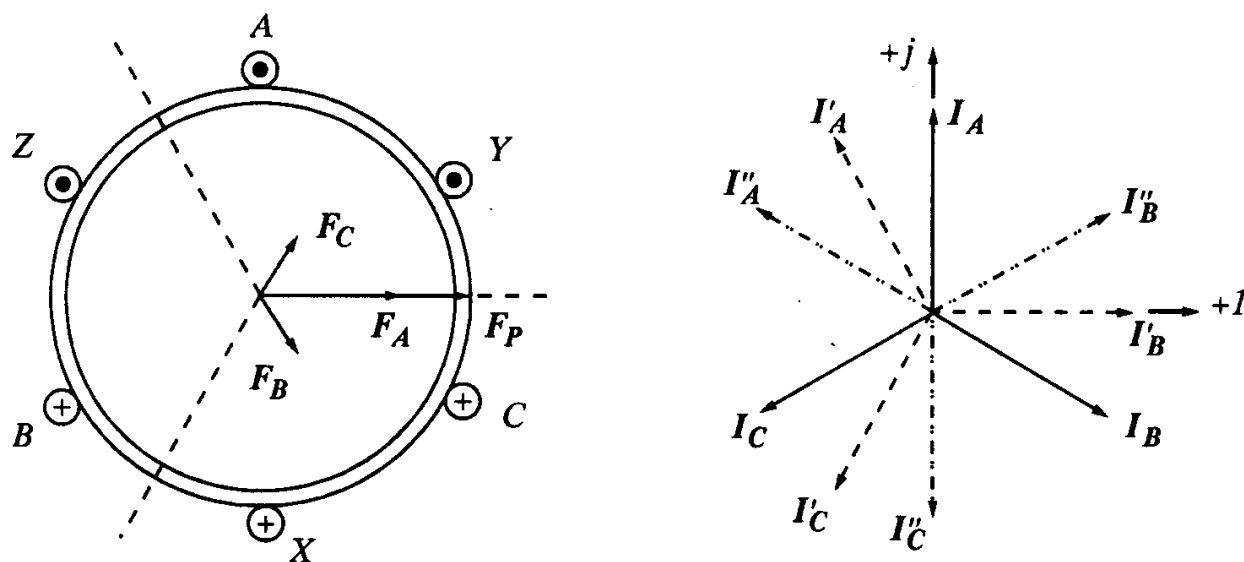
Освен това, както постояннотоковата машина, и синхронната е обратима. Ако статорната намотка се захранва от източник на трифазно напрежение, в нея протичат токове, които създават магнитодвижещо напрежение и съответно магнитен поток, въртящ се с честота, която се определя от честотата на тока и броя на полюсите.

За да се убедим в това нека разгледаме машина с двуполусна трифазна намотка и цилиндричен ротор, която схематично е показана на фиг. 17.7. Токът във всяка от фазите може да се определи от следните формули:

$$i_A = I \cdot \sqrt{2} \cdot \sin \omega t$$

$$i_B = I \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$i_C = I \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t + 120^\circ)$$



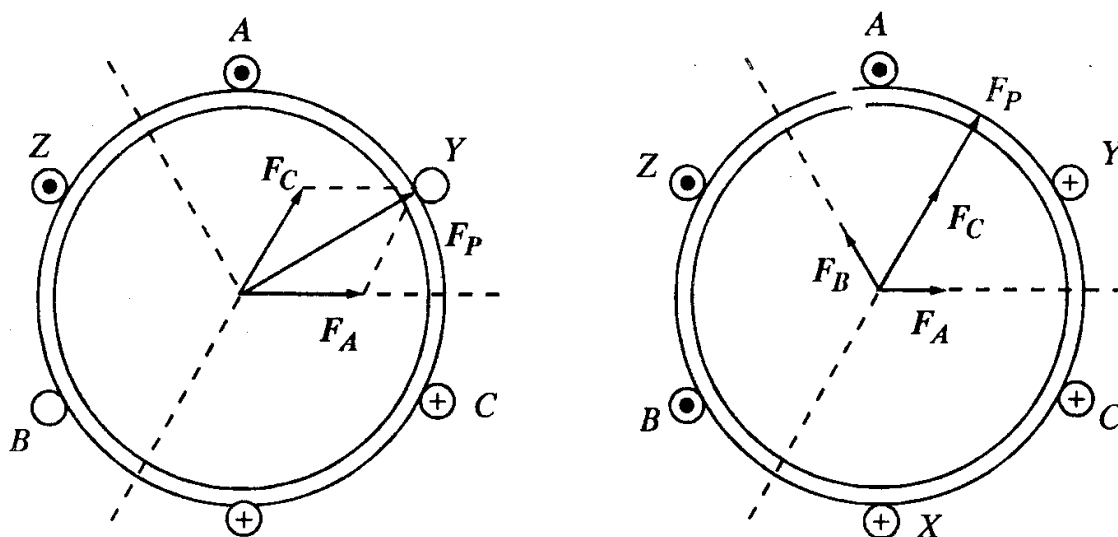
Фиг. 17.7. Магнитодвижещо напрежение на трифазна намотка

Нека разгледаме три стойности на всеки ток, съответстващи на три положения на фазните токове на векторната диаграма на фиг. 17.7 (моментната стойност на тока съответства на проекцията на вектора върху ординатната ос). За удобство записваме стойностите в следната таблица:

Таблица 17.1

$\omega t$	$i_A$	$i_B$	$i_C$	$F_A$	$F_B$	$F_C$
$\pi/2$	$I \cdot \sqrt{2}$	$-I \cdot \sqrt{2} \cdot \cos 60^\circ$	$-I \cdot \sqrt{2} \cdot \cos 60^\circ$	$F_m$	$F_m/2$	$F_m/2$
$\pi/2 + 30^\circ$	$I \cdot \sqrt{2} \cdot \cos 30^\circ$	0	$-I \cdot \sqrt{2} \cdot \cos 30^\circ$	$F_m \cdot \sqrt{3}/2$	0	$F_m \cdot \sqrt{3}/2$
$\pi/2 + 60^\circ$	$I \cdot \sqrt{2} \cdot \cos 60^\circ$	$I \cdot \sqrt{2} \cdot \cos 60^\circ$	$-I \cdot \sqrt{2}$	$F_m/2$	$F_m/2$	$F_m$

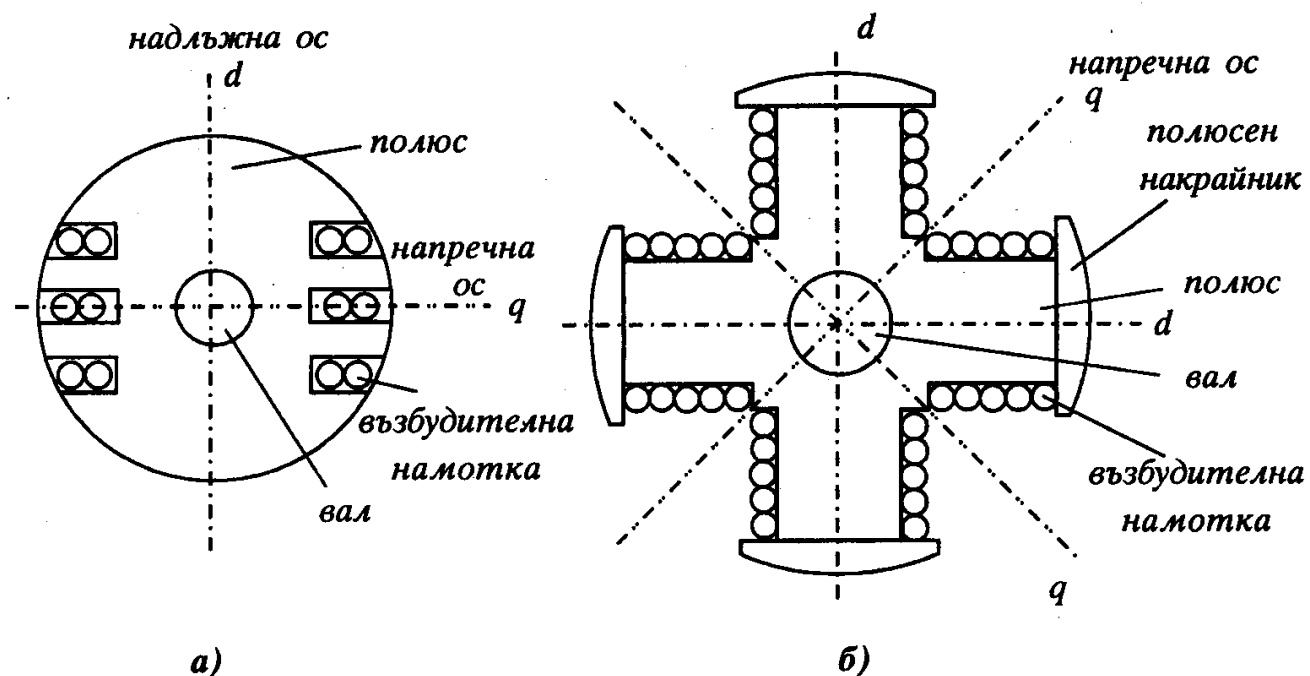
В таблицата са нанесени и м.д.н., чиито стойности са изразени чрез максималната  $F_m = w_1 \cdot I \cdot \sqrt{2}$ . Посоката на векторите се определя по правилото на десния винт, като за положителна е избрана посоката на тока от чертежа към нас в началото на фазата. Векторното сумиране на м.д.н. и в трите случая дава вектор с постоянна големина  $3F_m/2$ , завъртащ се на същия ъгъл, с който нараства фазовият ъгъл  $\omega t$  (фиг. 17.8). Това е вярно за двуполусна намотка. Както видяхме по-горе за е.д.н. на четириполусна машина ( $2p = 4$ ), и тук при изменение на фазовия ъгъл на тока  $\gamma_{el} = \omega t$  изменението на механичния ъгъл е  $\gamma_{мех} = \omega t / p$ , и, съответно, електрическата честота и честотата на въртящото се магнитно поле ще бъдат в отношение  $\Omega_1 = \omega / p$ .



Фиг. 17.8. Завъртане на м.д.н. при нарастване на фазовия ъгъл

Когато СМ работи в режим на двигател, резултантното м.д.н.  $F_p$  създава въртящо се магнитно поле, което се „зацепва“ с магнитното поле на ротора и машината развива въртящ момент.

На фиг. 17.7 роторът е показан условно. Възможни са два варианта на конструкцията - явнополюсна и неявнополюсна - фиг. 17.9:

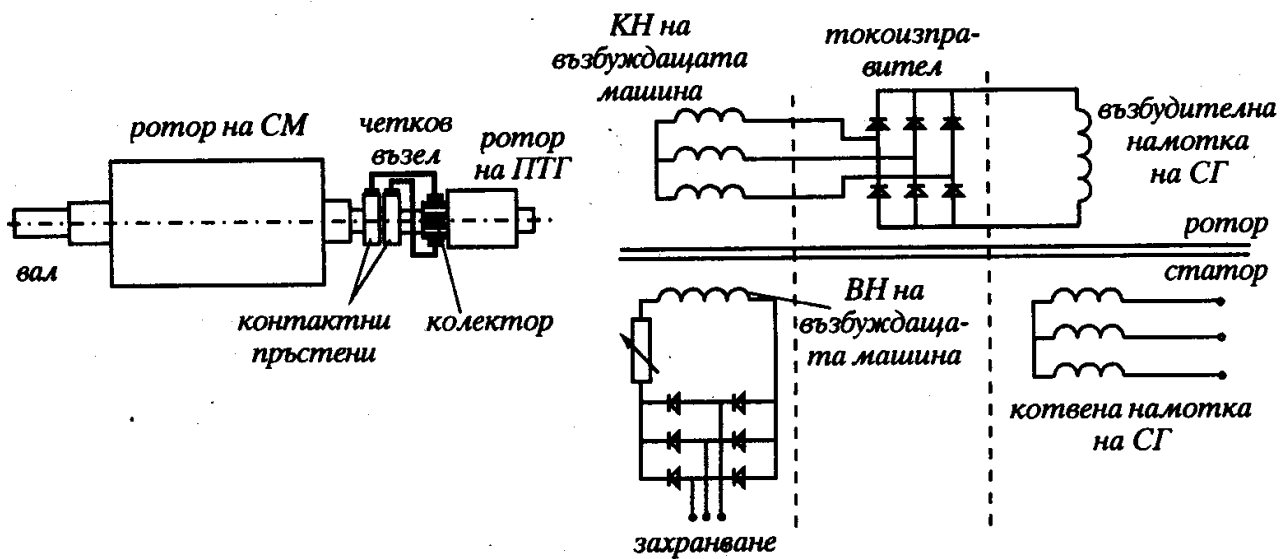


Фиг. 17.9. Ротор на СМ: а) неявнополюсен; б) явнополюсен

Явнополюсният ротор има полюси с възбудителна намотка (ВН) и полюсни накрайници (в случая  $2p = 4$ ). Краищата на възбудителната намотка са свързани към контактни пръстени, през които тя се захранва от външен източник. Това може да бъде и постояннотокова машина, чийто ротор е монтиран на същия вал. Неявнополюсният ротор представлява масивно цилиндрично тяло с канали, в които се разполага възбудителната намотка. Роторът е двуполюсен и такава конструкция се използва в бързоходните машини, наречени турбогенератори. Разликата между двата вида ротори се състои в това, че магнитната проводимост по оста на полюсите (фиг. 17.9, линия  $d$ ) и перпендикулярно на нея (линия  $q$ ) в неявнополюсната машина е на практика една и съща, а в явнополюсната машина същите две проводимости се различават близо два пъти.

За да се избегнат плъзгащите контакти, за осигуряване на захранването на ВН може да се използва безконтактна схема, при която вместо ротор на ПТМ на вала на синхронния генератор (СГ) се поставят трифазна котвена

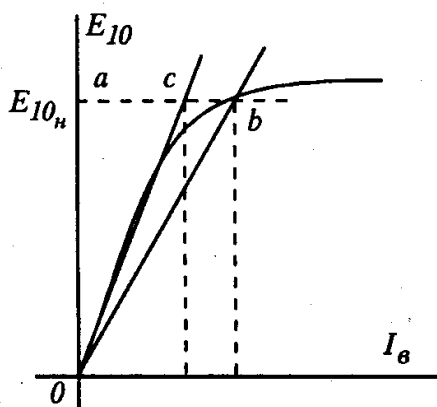
намотка и трифазен изправител, чийто изход директно е свързан с ВН на СГ (фиг. 17.10).



Фиг. 17.10. Захранване на възбудителна намотка

### 17.3. Е.д.н. и реакция на котвата на СГ

**Характеристика на празен ход на СГ.** При празен ход и при постоянна честота на въртене, произвежданото във всяка фаза на котвената намотка е.д.н. ще има постоянна честота  $f$ , а неговата ефективна стойност  $E_{10}$  ще зависи от големината на магнитния поток и, респективно, на възбудителния ток, т.е.  $E_{10} = f(I_B)$ ,  $\Omega_1 = const$ . Както в ПТМ, и тук се наблюдава е.д.н. от остатъчния магнетизъм и хистерезис при увеличаване и намаляване на възбудителния ток. На фиг. 17.11 е показана усреднена крива на ХПХ.



Фиг. 17.11. Характеристика на празен ход на СГ

При  $B = 1,7 \div 1,8 T$  настъпва насищане и затова номиналният режим на работа съответства на коляното на ХПХ, при коефициент на насищане  $k_{нас} = ab/ac = 1,1 \div 1,4$ . Линията  $Oc$  съответства на ненаситена машина, а  $Ob$  - на средно наситено състояние на магнитната система. Използването на линейна зависимост позволява да се опрости анализа на работата на машината при натоварване.

Протичащият в котвената намотка ток създава въртящо се магнитно поле със същата честота на въртене, като тази на ротора. Това оз-

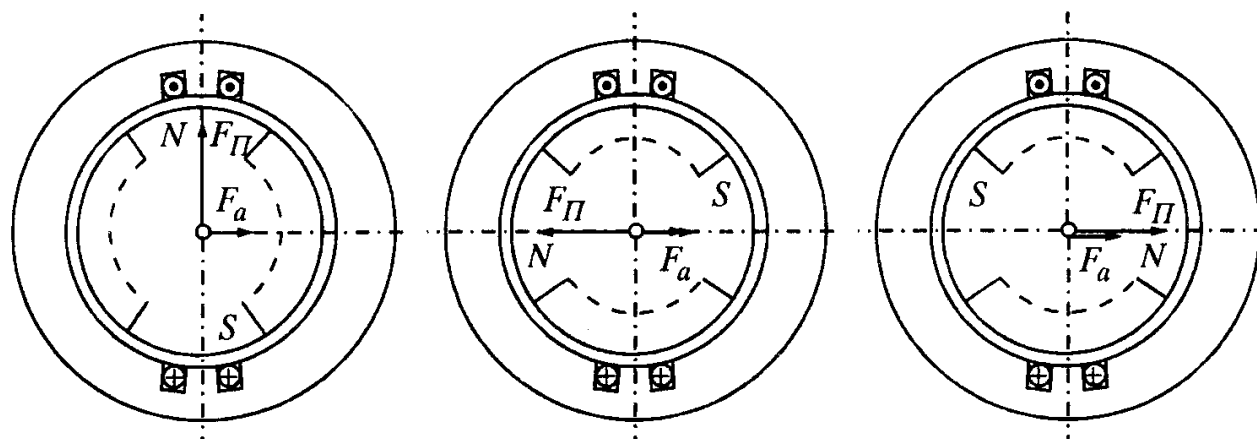
начава, че към полето на ротора ще се добави и полето на реакцията на котвата. Следователно, към е.д.н. от основния магнитен поток трябва да се добави и това от реакцията на котвата, което, от своя страна, зависи от големината на тока и от ъгловото изместване на едното поле спрямо другото.

Нека първо разгледаме реакцията на котвата на машина с неявно-полюсен ротор. Възможни са следните три характерни случая (фиг. 17.12):

а. Е.д.н. при празен ход  $E_{10}$  и токът съвпадат по фаза, т.е. фазовото изместване е  $\Psi = 0$ . Роторът е изобразен в положение, когато е.д.н. във фаза А има максимум, токът във фазата също е максимален и сумарното м.д.н.  $F_a$ , създавано от трите тока, е насочено по оста на фаза А. В този случай двете м.д.н. - на полюсите и на котвата, са взаимноперпендикулярни, а реакцията на котвата се нарича *напречна*.

б. Токът изостава от е.д.н. с  $90^\circ$ , т.е.  $\Psi = -90^\circ$ . На чертежа отново е показан момент, когато токът във фаза А е максимален, но роторът се е завъртял вече на  $90^\circ$ , което означава, че е.д.н.  $E_{10}$  изпреварва тока с  $90^\circ$ . В този случай двете м.д.н. са разположени по оста на полюсите, но  $F_a$  е насочено срещу  $F_{II}$  и реакцията на котвата се нарича *надлъжно размагнитваща*.

в. Токът изпреварва е.д.н. с  $90^\circ$ , т.е.  $\Psi = 90^\circ$ . На чертежа отново е показан момент, когато токът във фаза А е максимален, но роторът изостава с  $90^\circ$ , което означава, че е.д.н.  $E_{10}$  изостава с  $90^\circ$  от тока. В този случай двете м.д.н. са разположени по оста на полюсите и посоките им съвпадат. Реакцията на котвата се нарича *надлъжно намагнитваща*.



Фиг. 17.12. Реакция на котвата на СМ

За да се отчете количествено реакцията на котвата е необходимо да се приведе  $F_a$  към  $F_{II}$ . При неявнополюсен ротор може да се счита, че равни по стойност  $F_a$  и  $F_{II}$  създават еднакъв магнитен поток. Тъй като потокът от реакцията на котвата  $\Phi_a$  при ненаситена машина е пропорционален на  $I_1$ , т.е. на тока в една фаза, електродвижещото напрежение  $E_a$  може да се замени с напрежение върху индуктивно съпротивление  $X_a = 2\pi f \cdot L_a$ , т.е.  $E_a = -jX_a \cdot I_1$ . Следователно сумарното е.д.н. е

$$E_1 = E_{10} + E_a$$

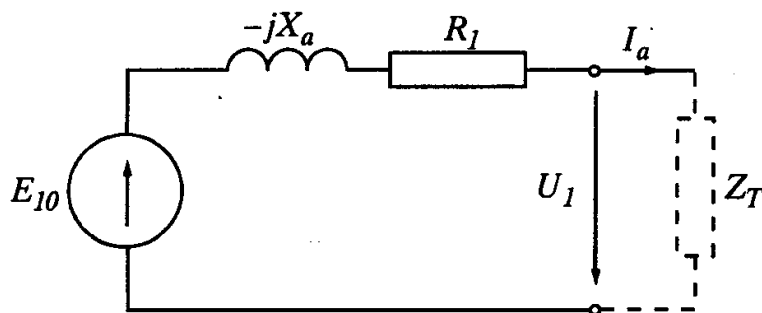
$$E_1 = E_{10} - jX_a \cdot I_1.$$

Напрежението на изводите на една фаза на СМ при натоварване, като се вземе предвид и активното съпротивление на медния проводник  $R_1$ , ще се определи по закона на Ом за цялата верига, т.е. като се извади от е.д.н. напрежението върху вътрешното съпротивление на източника:

$$U_1 = E_1 - R_1 \cdot I_1$$

$$U_1 = E_{10} - jX_a \cdot I_1 - R_1 \cdot I_1.$$

Еквивалентната схема на една фаза е дадена на фиг. 17.13.



Фиг. 17.13. Еквивалентна схема на една фаза на СМ

*Реакция на котвата при явнополюсен ротор.* Тъй като въздушната междина между статора и ротора в този случай е неравномерна (минимална и постоянна под полюса и максимална по напречната ос на ротора), то при едно и също м.д.н.  $F_a$  магнитният поток от реакцията на

котвата ще зависи от положението на ротора. В този случай се прилага теорията на двете реакции на Blondel.

Токът, протичащ в една фаза на разпределената статорна намотка, създава м.д.н. със стъпаловидна форма, подобна на тази за е.д.н., разгледана по-горе. В този случай, обаче, в момент  $t_1$  това е пространствена функция на  $x$  по дължината на окръжността на статора  $\pi D$ . Тя по същия начин може да се разложи в ред на Фурие и съдържа основна синусоида с дължина на вълната  $\pi D$  плюс висши хармоници, чиято амплитуда и честота за-



висят от вида на намотката. Сумата от три вълни, изместени на  $120^\circ$  в пространството и дефазирани на същия ъгъл във времето, дава получения погоре резултат за въртящото се магнитно поле. М.д.н. на основната вълна на  $F_a$  се разлага на две съставки: по надлъжната ос -  $F_{ad}$ , и по напречната ос -  $F_{aq}$ . Всяка от тях се определя като

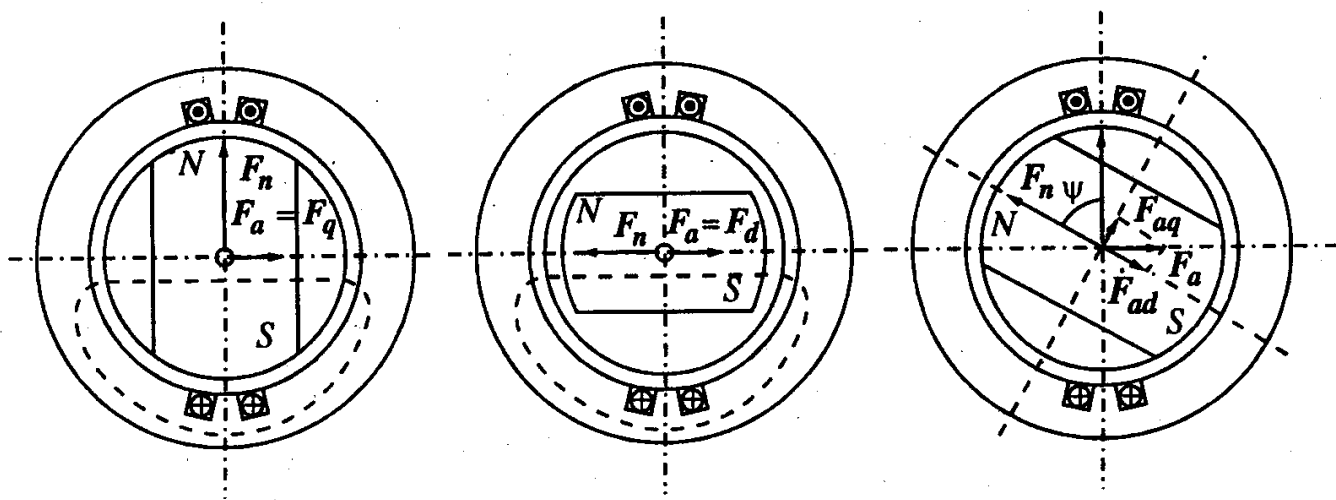
$$F_{ad} = F_a \cdot \sin \psi,$$

$$F_{aq} = F_a \cdot \cos \psi,$$

където  $\psi$  е фазовият ъгъл между векторите на е.д.н.  $E_{10}$  и тока  $I_1$ . В пространството този ъгъл е показан на фиг. 17.14 (в разглеждания случай, при  $p = 1$  механичният и електрическият ъгъл са равни,  $\psi$  е електрически ъгъл). Така например, когато  $\psi = 0$  надлъжна съставка липсва, а напречната е максимална. При  $\psi = \pm 90^\circ$  липсва напречна съставка, а надлъжната е максимална. Тъй като осите  $d$  и  $q$  са фиксирани, за магнитния поток по надлъжната ос може да се въведе коефициент на пропорционалност  $k_{ad}$ , а за напречната ос -  $k_{aq}$ . Стойността на тези коефициенти е в границите

$$k_{ad} = 0,80 \div 0,95,$$

$$k_{aq} = 0,30 \div 0,65.$$



Фиг. 17.14. Реакция на котвата при явнополюсен ротор

По същество  $k_{ad}$  показва степента на намаляване на амплитудата на основния хармоник на полето от реакцията на котвата, вследствие неравномерността на въздушната междина, отнесено към надлъжната ос, а  $k_{aq}$  -

същото, но отнесено към напречната ос. Магнитните потоци  $\Phi_{ad}$  и  $\Phi_{aq}$  създават е.д.н.  $E_{ad}$  и  $E_{aq}$ , които са пропорционални на тока, следователно:

$$E_{ad} = -jX_{ad} \cdot I_d$$

и

$$E_{aq} = -jX_{aq} \cdot I_q,$$

където

$$I_d = I_1 \cdot \sin \psi$$

и

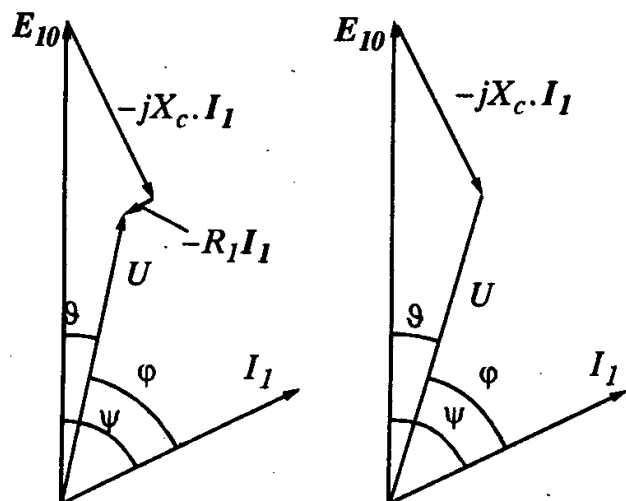
$$I_q = I_1 \cdot \cos \psi.$$

Резултантното е.д.н. при натоварване на СГ с явнополюсен ротор ще бъде

$$E_1 = E_{10} + E_{ad} + E_{aq} = E_{10} - jX_{ad} \cdot I_d - jX_{aq} \cdot I_q.$$

#### 17.4. Векторни диаграми на СГ

Работата на синхронната машина се анализира с помощта на векторни диаграми. В случаите, когато не се отчита насищането на магнитната система, диаграмите се наричат опростени и разглеждането носи повече качествено характер. Количествен анализ се прави с отчитане на насищането по уточнени векторни диаграми.



Фиг. 17.15. Векторни диаграми на СГ при явнополюсен ротор

Векторна диаграма при неявнополюсен ротор. За една фаза на СГ при симетрично натоварване и без отчитане на насищането може да се запише

$$U_1 = E_1 + E_{\sigma_1} - R_1 \cdot I_1$$

или

$$U_1 = E_{10} - jX_a \cdot I_1 - jX_{\sigma_1} \cdot I_1 - R_1 \cdot I_1,$$

където  $E_{\sigma_1}$  представлява е.д.н. от потоците на разсейване, а  $X_{\sigma_1}$  е индуктивно съпротивление на разсейване. Стойността на  $R_1$  в това уравнение е относително малка и послед-

ният член може да се пренебрегне. Тогава

$$U_1 = E_{10} - jX_a \cdot I_1 - jX_{\sigma_1} \cdot I_1 = E_{10} - j(X_a + X_{\sigma_1})I_1 = E_{10} - jX_c \cdot I_1 ,$$

където  $X_c = X_a + X_{\sigma_1}$  се нарича *пълно синхронно* индуктивно съпротивление на синхронната машина. Векторните диаграми, съответстващи на последните две уравнения, са дадени на фиг. 17.15.

---

**Пример 17.1:** Синхронен неявнополюсен генератор за 380 V, 50 Hz има намотка, свързана в триъгълник и синхронно индуктивно съпротивление 0,1  $\Omega$ . Активното съпротивление на една фаза е пренебрежимо малко. При номинално натоварване линейният ток е 1 000 A и  $\cos \varphi = 0,8$ . Да се намери е.д.н. на една фаза при номинално натоварване.

**Решение:**

Както следва от уравнението  $U_1 = E_{10} - jX_c \cdot I_1$ ,

$$E_{10} = U_1 + jX_c \cdot I_1 ,$$

където векторът на фазното напрежение може да се запише като  $U_1 = 380V$ , а фазният ток  $I_1 = 1000 / \sqrt{3} e^{-j\psi}$  A. Ъгълът  $\varphi$  може да се определи като  $\varphi = \arccos 0,8 = 36,87^\circ$  и тогава

$$\begin{aligned} E_{10} &= 380 + j0,1 \cdot (1000 / \sqrt{3}) e^{-j36,87^\circ} \\ &= 380 + 57,74 e^{j90^\circ - j36,87^\circ} = 380 + 57,74 e^{j53,13^\circ} \\ &= 380 + 57,74 \cos 53,13^\circ + j57,74 \sin 53,13^\circ = 414,6 + j46,2 = \\ &= 417,2 e^{j6,36^\circ} V. \end{aligned}$$

Както следва от получения резултат, ъгълът между векторите  $U_1$  и  $E_{10}$  е  $\theta = 6,36^\circ$ . Той е пропорционален на натоварването на СГ и затова се нарича *ъгъл на натоварване*. Този ъгъл е свързан с електромагнитния момент на СМ.

---

Векторна диаграма при явнополюсен ротор. В този случай реакцията на котвата има две съставлящи и всяка от тях ще създава е.д.н., пропорционално на магнитния поток по надлъжната и по напречната ос:

$$U_1 = E_{10} + E_{ad} + E_{aq} + E_{\sigma_1} - R_1 \cdot I_1$$

Е.д.н.  $E_{ad}$  и  $E_{aq}$  могат да се запишат като напрежения върху индуктивните съпротивления  $X_{ad}$  и  $X_{aq}$  при ток  $I_d$  и  $I_q$  съответно, и тогава равенството добива вида

$$U_1 = E_{10} - jX_{ad} \cdot I_d - jX_{aq} \cdot I_q - jX_{\sigma_1} \cdot I_1 - R_1 \cdot I_1.$$

Тъй като  $I_1 = I_d + I_q$ , напрежението от индуктивното съпротивление на разсейване също може да се разбие на две части, следователно:

$$U_1 = E_{10} - jX_{ad} \cdot I_d - jX_{aq} \cdot I_q - jX_{\sigma_1} \cdot (I_d + I_q) - R_1 \cdot I_1.$$

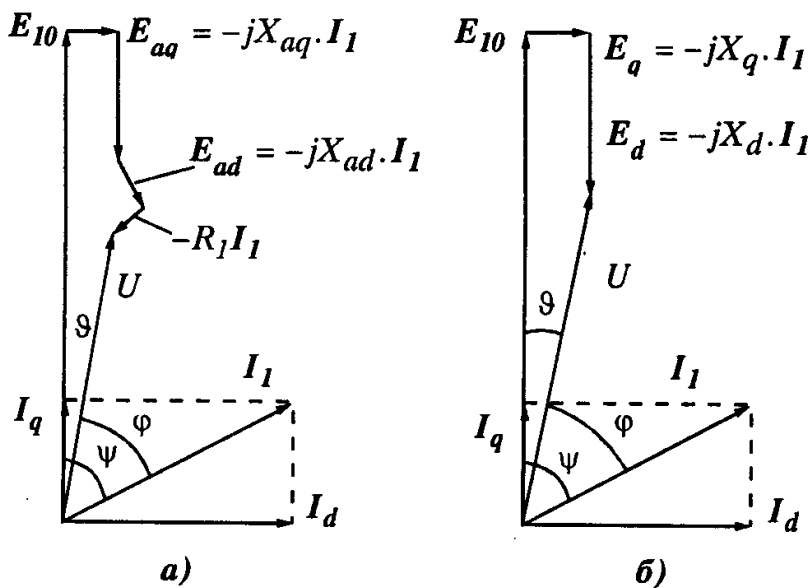
Ако в последното равенство се прегрупират слагаемите и се пренебрегне последния член, се получава:

$$U_1 = E_{10} - jX_d \cdot I_d - jX_q \cdot I_q,$$

където  $X_d = X_{ad} + X_{\sigma_1}$  и  $X_q = X_{aq} + X_{\sigma_1}$  представляват, съответно, синхронни индуктивни съпротивления по надлъжната и напречната ос. По горните уравнения може да се построят векторните диаграми на СГ при явнополюсен ротор - фиг. 17.16.

На фиг. 17.16а е избран ток  $I_1$ , изоставащ спрямо  $E_{10}$  на ъгъл  $\psi$ , при което надлъжната съставляща на тока създава надлъжно размагнитваща реакция на котвата, а напречната съставляща - напречна реакция на котвата. За да се получи напрежението на една фаза при натоварване, от  $E_{10}$  се изваждат последователно всички напрежения върху вътрешните съпротивления.  $\theta$  е ъгълът между векторите  $E_{10}$  и  $U_1$ , а  $\phi$  - ъгълът между  $U_1$  и  $I_1$ .

Фиг. 17.16. Векторни диаграми на СГ при явнополюсен ротор



Фиг. 17.16. Векторни диаграми на СГ при явнополюсен ротор

Фиг. 17.16. Векторни диаграми на СГ при явнополюсен ротор

## 17.5. Мощност и електромагнитен момент на СГ

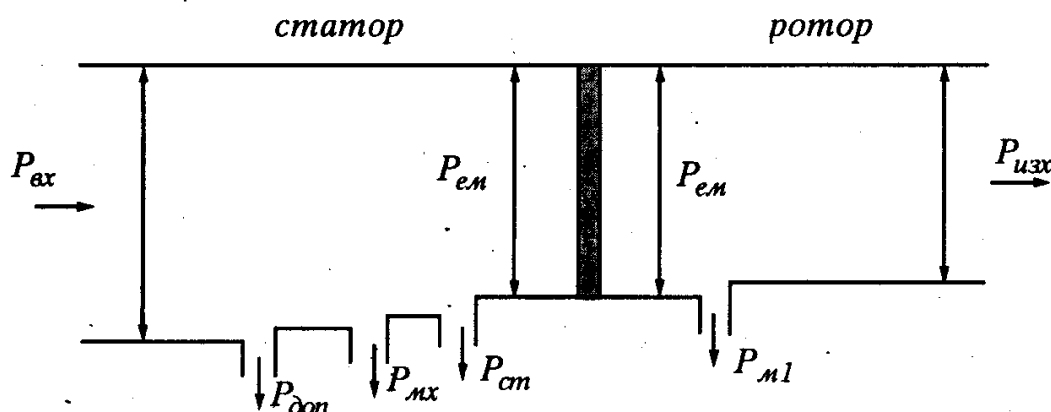
Синхронният генератор преобразува механичната енергия на задвижващата машина в електрическа. Постъпващата в генератора механична мощност може да се изрази по следния начин:

$$P_{ex} = M_{ex} \cdot \Omega_1.$$

На изхода на генератора се получава електрическа мощност

$$P_{изх} = 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \cos \varphi.$$

Разликата между тези две мощности представлява загуби, които съпровождат преобразуването на енергията. Какви са тези загуби и как се разпределят те може да се види от енергийната диаграма, показана на фиг. 17.17, където  $P_{мх}$  са механичните загуби от триене в лагерите и четките, ако има такива, и триене във въздуха (аеродинамични загуби);  $P_{ст}$  - загуби в стоманата на статорния пакет от хистерезис и вихрови токове;  $P_{м1}$  - загуби в медта на котвената и възбудителната намотка ( $I^2 R$ );  $P_{доп}$  - допълнителни загуби, които включват загуби от потоците на разсейване на статорната намотка, от висшите хармоници на м.д.н. на статорната намотка и от зъбните хармоници.



Фиг. 17.17. Енергийна диаграма на СГ

Преобразуваната (или електромагнитната) мощност е равна на входящата мощност минус загубите в стоманата, механичните и допълнителните загуби:

$$P_{ем} = P_{ex} - P_{ст} - P_{мх} - P_{доп}.$$

Ако се пренебрегнат загубите в медта на статорната намотка, може да се приеме, че електромагнитната мощност е равна на изходната, т.е.:

$$P_{ем} = P_{изх}$$

или

$$P_{em} = 3E_1 \cdot I_1 \cdot \cos \psi = 3U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi.$$

Като се използва векторната диаграма на фиг. 17.18 последното равенство може да се преобразува и да се получи проста формула за електромагнитната мощност.

От подобие на триъгълниците  $Oda$  и  $abc$  следва, че ъгълът при връх  $c$  е равен на  $\varphi$ , а дължината на страната  $bc$  е равна:

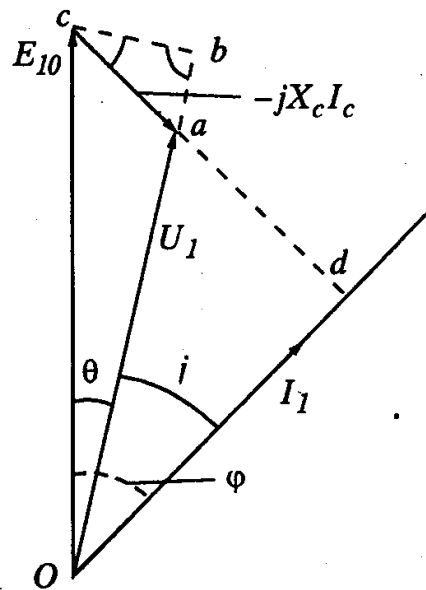
$$E_{10} \cdot \sin \theta = X_c \cdot I_1 \cdot \cos \varphi,$$

откъдето

$$I_1 \cdot \cos \varphi = E_{10} \cdot \sin \theta / X_c.$$

След заместване в равенството за  $P_{em}$  формулата добива вида

$$P_{em} = \frac{3E_{10} \cdot U_1}{X_c} \cdot \sin \theta$$



Фиг. 17.18. Векторна диаграма за определяне на  $P_{em}$

Полученият резултат показва, че при постоянни стойности на е.д.н. и на напрежението върху товара преобразуваната мощност зависи от ъгъла на натоварването  $\theta$ . Максималната стойност на  $P_{em}$ :

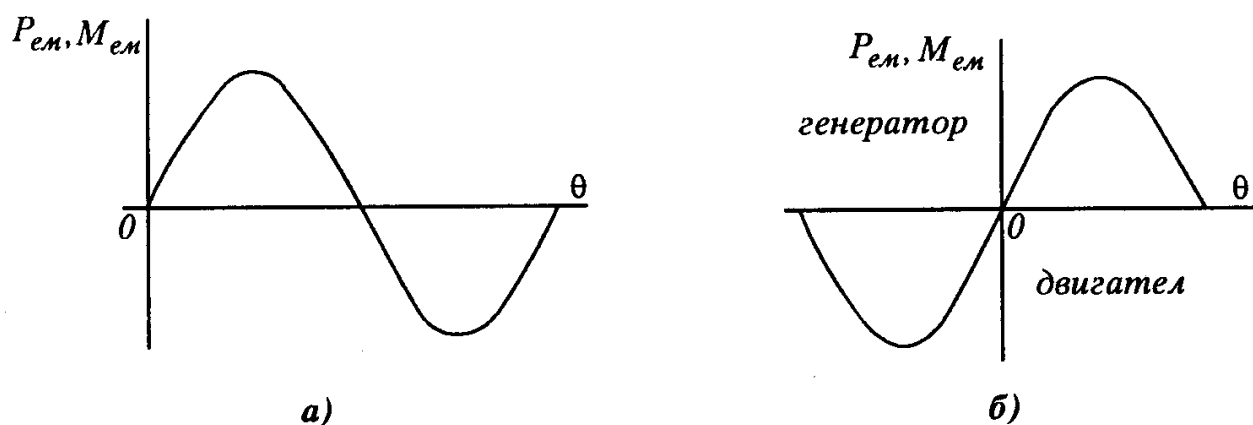
$$P_{em \max} = \frac{3E_{10} \cdot U_1}{X_c}$$

се получава при  $\theta_{кр} = 90^\circ$ . Този ъгъл се нарича обикновено *критичен ъгъл*, тъй като увеличаването на стойността му над  $90^\circ$  може да изведе машината от *синхронизъм* и да предизвика авария. На практика в генераторите  $\theta$  не превишава  $15^\circ \div 20^\circ$ .

Въртящият електромагнитен момент  $M_{em}$  на СМ ще се определи като се раздели мощността  $P_{em}$  на ъгловата честота, която е постоянна величина, следователно

$$M_{em} = \frac{3E_{10} \cdot U_1}{X_c \cdot \Omega_1} \cdot \sin \theta$$

Получената зависимост има същия вид, както и тази за електромагнитната мощност, но в друг мащаб (фиг.17.19).



Фиг. 17.19. Зависимост на  $P_{em}$  и  $M_{em}$  от ъгъла на натоварване

Тъй като електромагнитният момент на синхронната машина в генераторен режим е съпротивителен за задвижващата машина, най-често зависимостта  $M(\theta)$  се представя, както е показано на фиг.17.19б. Максималната стойност, както и по-горе, се получава при  $\theta = 90^\circ$  и е равна на

$$M_{em \max} = \frac{3E_{10} \cdot U_1}{X_c \cdot \Omega_1}$$

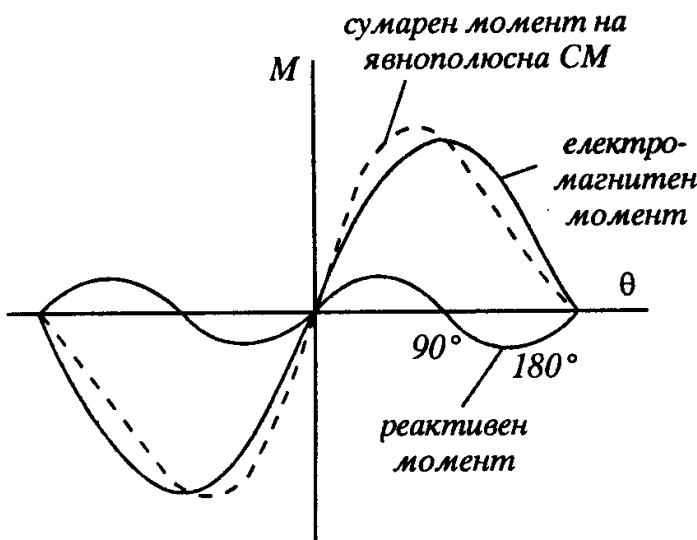
Получените изрази се отнасят за неявнополюсна машина. За да се намерят тези за явнополюсен генератор се използва векторната диаграма на фиг. 17.16, където вместо едно напрежение от реакцията на котвата има две такива, които съответстват на съставлящите на реакцията по надлъжната и напречната ос. Тук ще приведем направо крайния резултат за електромагнитната мощност на явнополюсен СГ:

$$P_{em} = \frac{3E_{10} \cdot U_1}{X_d} \cdot \sin \theta + \frac{3U_1^2}{2} \cdot \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \sin 2\theta$$

Първият член в това равенство е същият, както за неявнополюсен СГ, а вторият представлява допълнителна мощност, която се дължи само на разликата на индуктивните съпротивления по надлъжната и напречната ос и не зависи от възбудането на СГ. Това показва, че явнополюсната машина може да развива мощност и без да има възбудителна намотка. Това свойство на СМ се използва предимно в синхронните двигатели с малка мощност.

Формулата за въртящия момент има следния вид:

$$M_{em} = \frac{3E_{10} \cdot U_1}{X_d \cdot \Omega_1} \cdot \sin \theta + \frac{3U_1^2}{2 \cdot \Omega_1} \cdot \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \sin 2\theta$$



Фиг. 17.20. Въртящ момент на явнополоусна машина

На фиг. 17.20 са показани отделните съставлящи на  $M_{em}$  и сумарният електромагнитен момент.

Допълнителният въртящ момент се нарича *синхронен реактивен момент*. Той увеличава електромагнитния момент на СМ в работната област и измества максимума към по-малките ъгли. Например, при  $E_{10} / U_1 = 1$  и  $X_d / X_q = 2$  максимумът е при  $60^\circ$ .

## 17.6. Характеристики на СГ

В т. 17.3 беше разгледана характеристиката на празен ход (ХПХ) на СГ. Тук ще разгледаме още характеристиките на симетрично късо съединение, външна и регулировъчна.

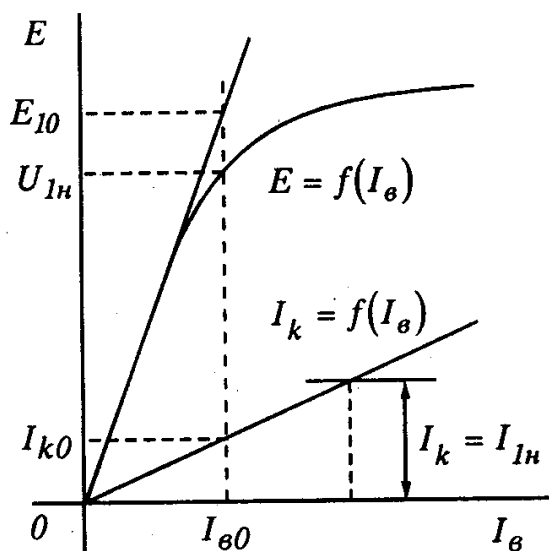
*Характеристика на симетрично късо съединение.* Това е зависимостта на тока в котвената намотка от тока във възбудителната намотка, при дадени накъсо всички фази на котвената намотка, т.е.  $I_k = f(I_e)$  при  $U_1 = 0$  и  $n_1 = const$  - фиг. 17.21. Тъй като активното съпротивление на една фаза е много по-малко от индуктивното, може да се счита, че фазните токове имат чисто индуктивен характер и, следователно, създават надлъжно размагнитваща реакция на котвата. При това условие характеристиката ще бъде линейна. На фиг. 17.21 е нанесена още характеристиката на празен ход. Като се използват тези две характеристики може да се намерят  $X_d$  и  $X_c$ .

От получените по-горе уравнения за напреженията на една фаза:

$$U_1 = E_{10} - jX_c I_1 \text{ - за неявнополоусна машина,}$$

$$U_1 = E_{10} - jX_d \cdot I_d - jX_q \cdot I_q \text{ - за явнополоусна машина,}$$





Фиг. 17.21. Характеристики на празен ход и късо съединение

следва

$$X_c = \frac{E_{10}}{I_{k0}},$$

където  $E_{10}$  и  $I_{k0}$  се вземат от графиките.  $E_{10}$  съответства на ненаситена машина. При отчитане на насищането се взема съответната точка от ХПХ, а стойностите на индуктивното съпротивление намаляват. При явнополюсна машина трябва да се има предвид това, че  $I_d = I_{k0}$ , а  $I_q = 0$ , следователно:

$$X_d = \frac{E_{10}}{I_{k0}}.$$

### Пример 17.2:

СГ с мощност 200 кVA има номинално напрежение 480 V, честота 50 Hz и номинален възбудителен ток 5A. Генераторът е свързан в звезда с изолиран звезден център. Получени са следните данни от опитите на празен ход и късо съединение:

- празен ход:  $I_{BH} = 5A$ ,  $U_{10\text{лин}} = E_{10\text{лин}} = 540V$ ,
- късо съединение:  $I_{BH} = 5A$ ,  $I_{1k\text{лин}} = 300A$ .

При подаване на постоянно напрежение 10 V към два от изводите е измерен ток 2.25 A. Да се определи синхронното индуктивно съпротивление на генератора.

### Решение:

Схемите на трите опита са показани на фиг. 17.22:

1) изчисляваме активното съпротивление на една фаза при постоянен ток:

$$2R_1 = \frac{U_{пост}}{I_{пост}},$$

откъдето  $R_1 = \frac{10}{2.25} = 0,2\Omega$ ;

2) измереният ток на късо съединение е фазен ток  $I_{1k} = I_{1k\text{лин}} = 300A$ ;

3) фазното напрежение при празен ход е  $E_{10} = \frac{E_{10 \text{ лнн}}}{\sqrt{3}} = 311,8V$ ;

4) съпротивлението на една фаза с отчитане на  $R_1$  е

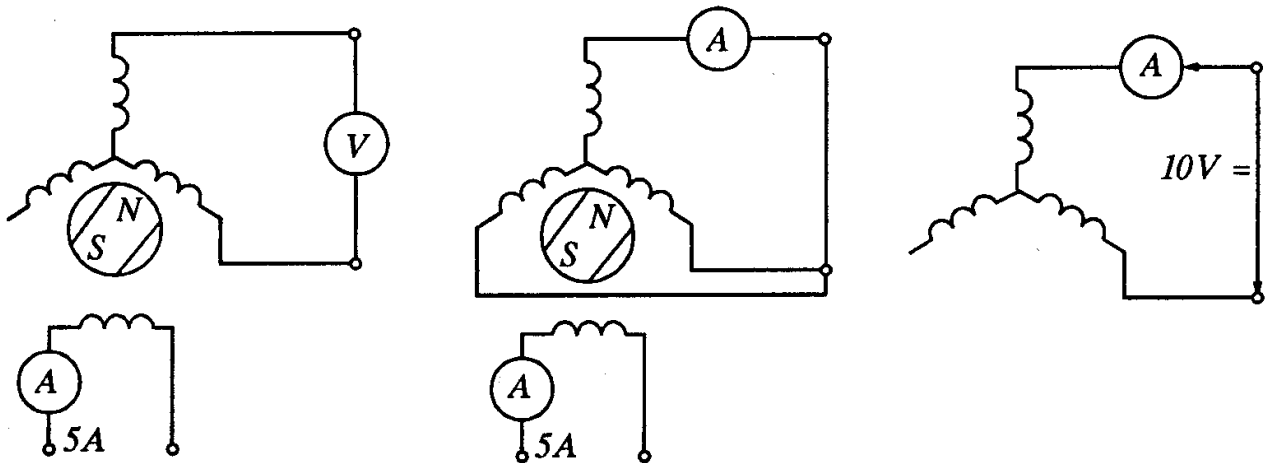
$$z_1 = \frac{E_{10}}{I_{1k}} = \frac{311,8}{300} = 1,04 \Omega$$

и тъй като  $z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_c^2}$ ,  $X_c = \sqrt{z_1^2 - R_1^2} = 1,02 \Omega$ ;

5) ако се пренебрегне  $R_1$ , за индуктивното съпротивление се получава

$$X_c = z_1 = 1,04 \Omega.$$

Както се вижда от получения резултат, стойността на активното съпротивление влияе слабо на  $X_c$ .



Фиг. 17.22. Определяне на параметрите на СГ

В някои случаи е удобно да се използва като характерен параметър на СГ *отношението на късо съединение* (ОКС), което представлява отношението на номиналния котвен ток към тока на късо съединение при възбудителен ток  $I_{в0}$ , който при празен ход създава е.д.н., равно на номиналното напрежение:

$$ОКС = \frac{I_{1k}}{I_{1н}}$$

Като се вземе предвид, че  $X_c = \frac{E_{10}}{I_{k0}} = \frac{U_{1n}}{I_{k0}}$ , ОКС може да се изрази и

по следния начин:

$$ОКС = \frac{U_{1n}}{X_c \cdot I_{1n}} = \frac{1}{X_c / z_B} = \frac{1}{X_c} (o.e.),$$

където  $z_B = \frac{U_{1n}}{I_{1n}}$  е базовото съпротивление на СГ, а  $X_c(o.e) = \frac{X_c}{z_B}$  е синх-

ронното индуктивно съпротивление в относителни единици. Ако машината е явнополюсна,  $X_c$  се замества с  $X_d$ .

За СГ със средна и голяма мощност тези параметри имат следните стойности:

- неявнополюсни СГ:  $X_c = 1,4 \div 1,9$ ,
- явнополюсни СГ:  $X_d = 1,4 \div 2$ , а  $X_q = 0,7 - 1$ .

Важно е също така да се отбележи, че при посочените стойности на  $X_c$  и  $X_d$  токът на късо съединение е по-малък от номиналния ток на машината, откъдето следва, че за нормално натоварване на генератора при работа в автономна мрежа трябва да се регулира възбудителния ток на генератора.

*Външна характеристика.* Това е зависимостта на напрежението от тока в котвената намотка при постоянен възбудителен ток, постоянна скорост на въртене и  $\cos \varphi$  на товара, т.е.  $U_1 = f(I_{1T})$  при:  $I_b = const$ ,  $n_1 = const$  и  $\cos \varphi = const$  - фиг. 17.23а.

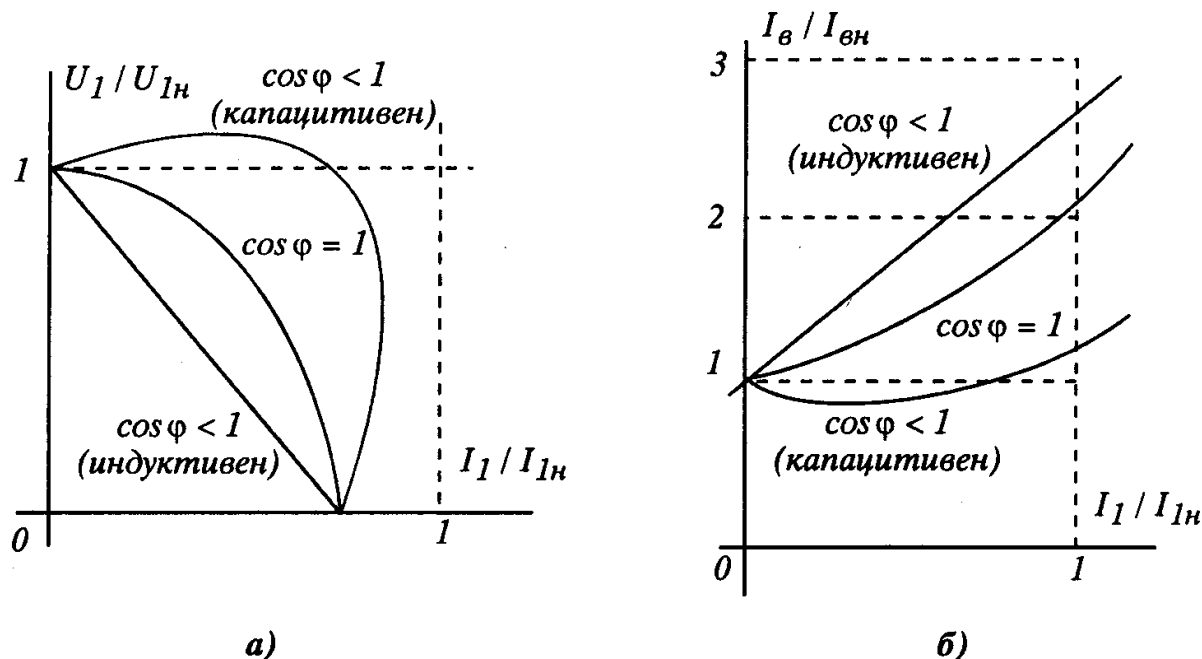
При натоварване на генератора, вследствие реакцията на котвата, напрежението ще се променя по различен начин (зависимостите са дадени в о.е.):

1)  $\cos \varphi = 1$  - напрежението спада поради увеличаване на напрежението във вътрешното съпротивление на фазата  $R_1 + jX_c$  и слабото насищане от напречната реакция на котвата;

2)  $\cos \varphi < 1$  (индуктивен) - спадането на напрежението е по-голямо вследствие надлъжно размагнитващата реакция на котвата;

3)  $\cos \varphi < 1$  (капацитивен) - реакцията на котвата е надлъжно намагнитващата, което води до нарастване на напрежението, но това нарастване е ограничено поради насищането на машината.

**Регулировъчна характеристика.** Това е зависимостта  $I_b = f(I_{IT})$  при:  $U_1 = const$ ,  $\cos \varphi = const$  и  $n_1 = const$ , фиг. 17.23б. Както при постояннотоковия генератор, тя показва как трябва да се изменя възбудителния ток, за да се запази напрежението на генератора постоянно при натоварване. В автономните електроенергетични системи, каквито са корабните, се предвижда автоматично регулиране на напрежението в определени граници.



Фиг. 17.23. Характеристики на СГ: а) външна, б) регулировъчна

### 17.7. Паралелна работа на СГ

В съвременния свят електрическата енергия за битови и промишлени цели се произвежда от синхронни генератори. Но отделно работещи генератори се срещат рядко (резервно или аварийно захранване, бордови източници на електроенергия и др.). Паралелната работа на синхронни генератори в една енергосистема има следните предимства:

- 1) няколко генератора могат да захранват по-голям товар;
- 2) при работа на повече генератори се увеличава надеждността на системата;
- 3) възможно е изключване на някои генератори за профилактика и ремонт;
- 4) повишава се к.п.д. на системата, тъй като включените генератори могат да работят с номинално натоварване - при увеличаване например на натоварването се включват допълнителни мощности, а при намаляване се изключват.

### 17.7.1. Включване на СГ към мрежата или друг СГ

За да се избегне резкият скок на тока, който може да задейства защитата или да повреди генератора, при включване е необходимо да се спазват следните условия, основани, съответно, на равенството на моментните стойности на напреженията на мрежата и на генератора за всяка фаза:

$$u_m = u_z$$

или

$$U_{mm} \cdot \sin(\omega_m t - \varphi_m) = U_{zm} \cdot \sin(\omega_z t - \varphi_z),$$

откъдето следва:

$$U_{mm} = U_{zm} \text{ или } U_m = U_z,$$

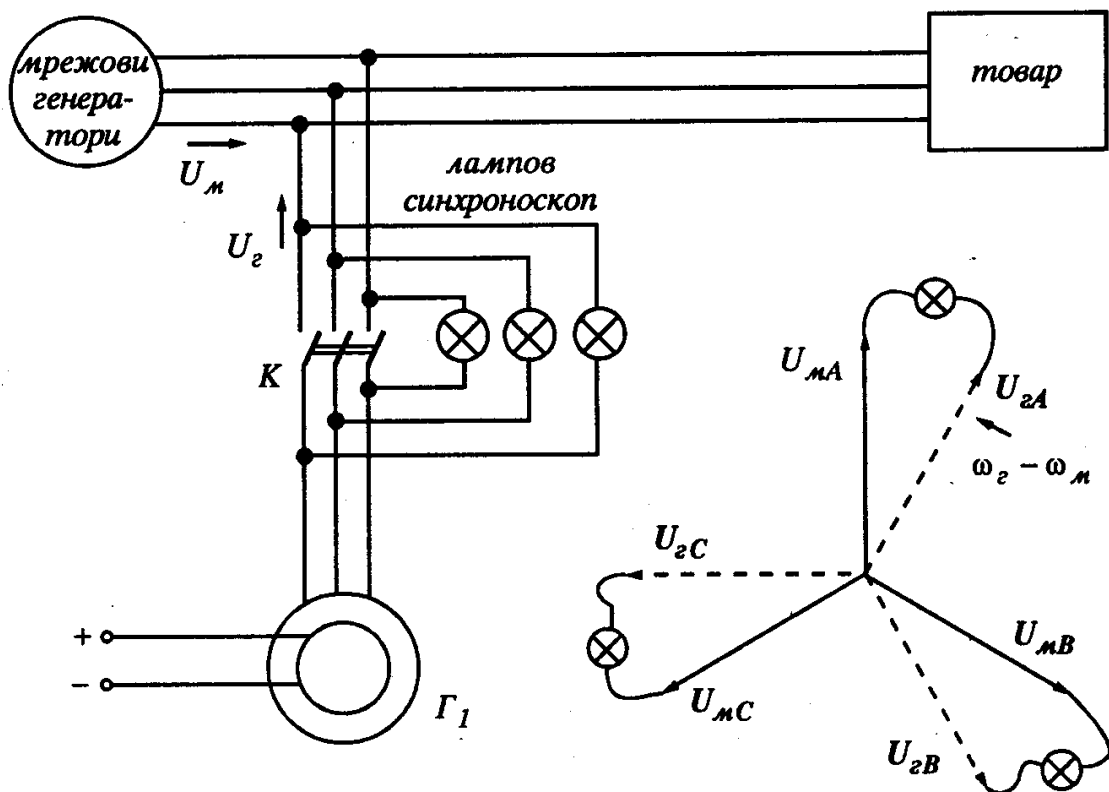
$$\omega_m = \omega_z \text{ или } f_m = f_z$$

и

$$\varphi_m = \varphi_z$$

при еднаква поредност на фазите на мрежата и генератора.

Съвкупността от операции за включване на СГ се нарича *синхронизация*. За поясняване на поредността на тези операции се използва схемата, показана на фиг. 17.24, на която е дадена трифазна система, състояща се от



Фиг. 17.24. Включване на СГ към мрежата

група СГ, към които е включен товар. Включването на генератора  $\Gamma_1$  към работещата мрежа става посредством ключа  $K$ . Между едноименните фази на генератора и на мрежата има свързани лампи с номинално напрежение, равно на двойното фазно напрежение на генератора. Синхронизацията се състои в следното:

1) Установява се честота на  $\Gamma_1$ :  $f_2 \approx f_m$ , като при това  $f_2$  леко превишава  $f_m$ .

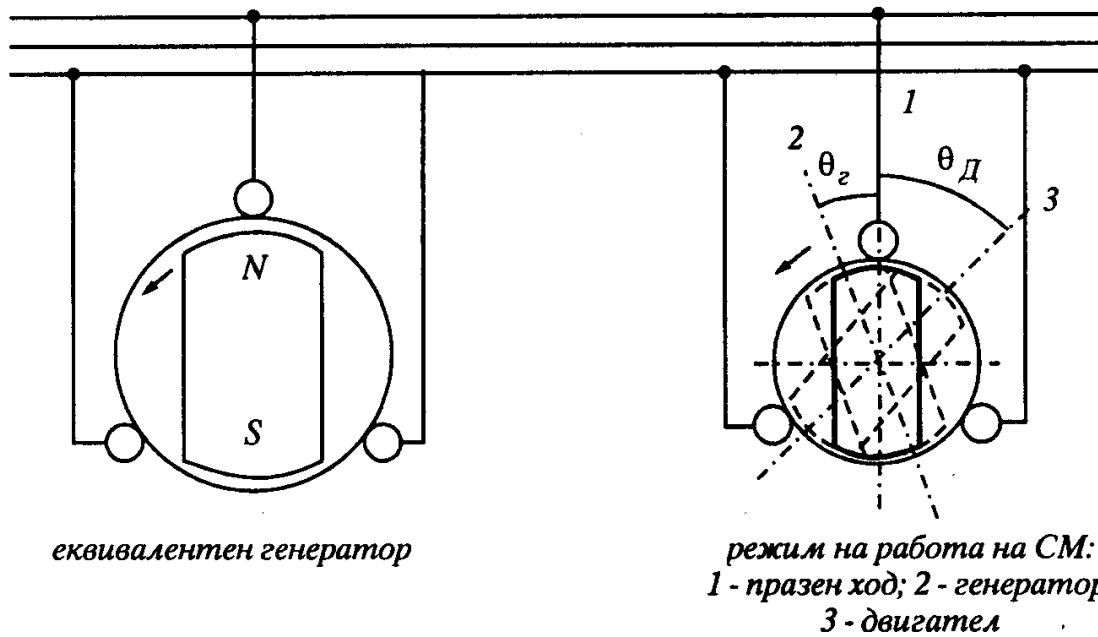
2) Установява се равенство на напреженията  $U_m = U_2$ .

3) Съвпадането на векторите  $U_m$  и  $U_2$  се контролира с помощта на лампов или друг синхроскоп. При близки честоти и еднаква поредност на фазите лампите едновременно бавно светват и гаснат (при обратен ред на фазите на СГ лампите светват и гаснат една след друга). Включването става в момент, когато лампите изгаснат - тогава напрежението между точките, където е свързана всяка лампа, е нула. Това може да се види от векторната диаграма на фиг. 17.24. Звездата на напреженията на СГ, поради малката разлика в честотите, бавно ще догонва звездата на напреженията на мрежата, а разликата между съответните два вектора, т.е. напрежението върху лампата, постепенно ще намалява докато стане нула, когато векторите съвпадат.

Вместо лампи могат да се използват нулеви волтметри или други уреди. Включването на мощни СГ се извършва с помощта на автоматични устройства.

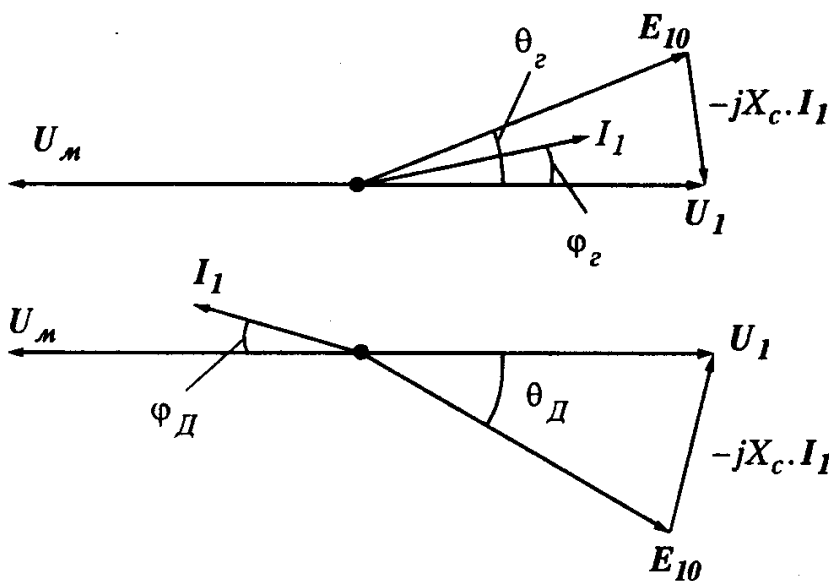
### 17.7.2. Паралелна работа на СГ с мрежата

След включване на СГ към мрежата и след завършване на процеса на самосинхронизация  $\Gamma_1$  има честота на въртене  $f_2 = f_m$  и напрежение  $U_2 = U_m$ . Векторите на тези две напрежения спрямо външния товар съвпадат по фаза, но един спрямо друг са в противофаза - изместени на  $180^\circ$  (фиг. 17.24 и фиг.17.26). При мрежа с безкрайно голяма мощност тяхната големина и фаза не могат да се променят. При празен ход СГ  $\Gamma_1$  нито консумира, нито отдава мощност в мрежата,  $I_1 = 0$ . Роторът се върти синхронно с ротора на еквивалентния мощен генератор. За да се натовари включеният генератор е необходимо да се увеличи въртящият момент на ротора, при което той ще се измести на ъгъл  $\theta_2$  спрямо началното положение (фиг. 17.25).



Фиг. 17.25. Работа на СМ след включване към мрежата

Изместването на ротора означава и изместване на вектора  $E_{10}$  на същия ъгъл (фиг. 17.26), което води до появата на напрежение  $\Delta U = -jX_c \cdot I_1$ :



Фиг. 17.26. Векторни диаграми на СМ в режим на генератор и двигател

Стойността на  $\Delta U$  е такава, че да удовлетвори равенството

$$U_1 = E_{10} - jX_c \cdot I_1$$

(За да се опрости анализът, уравнението е написано за СМ с неявни полюси.)

Отдаваната от генератора мощност е

$$P_2 = 3U_1 \cdot I_1 \cos \varphi_2$$

и има положителен знак, тъй като ъгълът между  $U_1$  и  $I_1$  е по-малък от

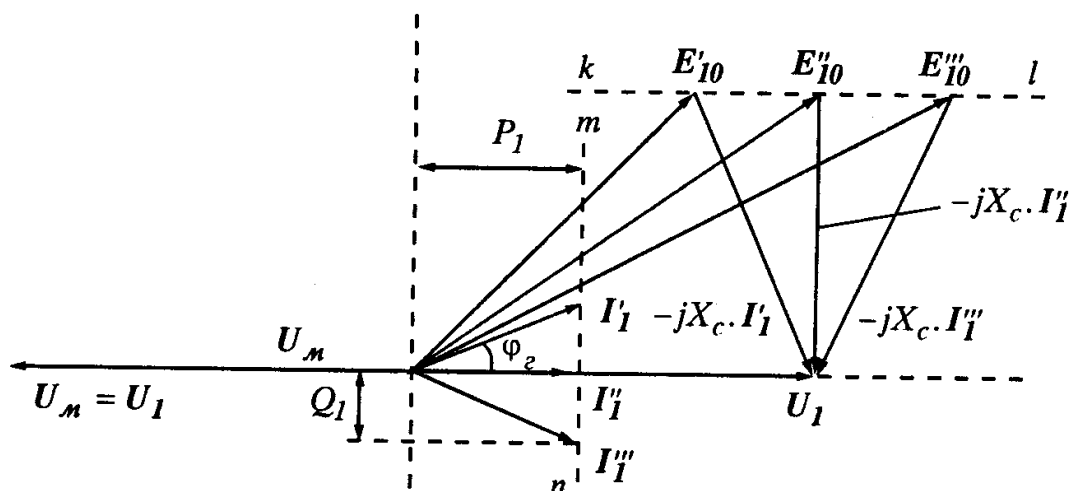
$90^\circ$ . Спрямо мрежата тази

мощност е отрицателна, т.е. тя приема мощност.

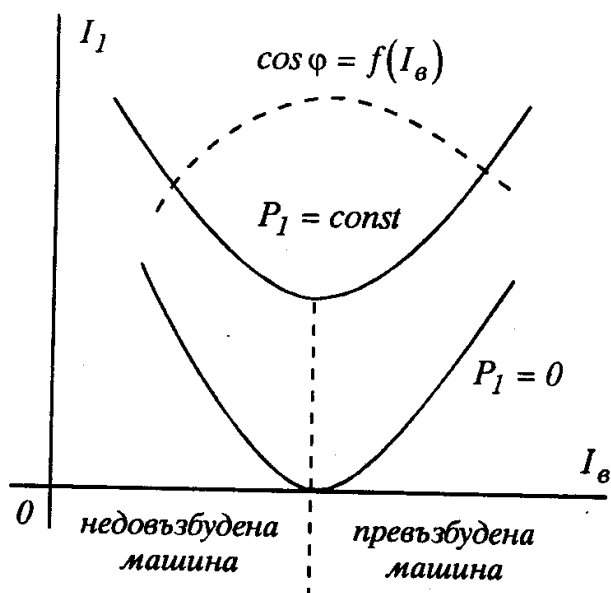
Ако към ротора се приложи съпротивителен момент, роторът ще изостане с ъгъл  $\theta_D$ . Ще изостане и  $E_{10}$ , но в този случай, както се вижда от векторната диаграма, ъгълът между тока  $I_1$  и напрежението  $U_1$  е  $180^\circ + \varphi_D$ ,

което показва, че СМ черпи мощност от мрежата, т.е. работи в режим на двигател.

Синхронните генератори имат едно важно свойство - при постоянно натоварване  $P_2 = 3U_1 \cdot I_1 \cos \varphi_2 = const$ , чрез изменение на възбудителния ток, респективно на  $E_{10}$ , е възможно да се получи  $\cos \varphi_2 = 1$ , което съответства на минимален товарен ток при същата мощност. Нека разгледаме векторната диаграма на фиг. 17.27: Както следва от формулата за  $P_2$ , при постоянно напрежение мощността ще бъде постоянна, ако  $I_1 \cos \varphi_2 = const$ . Това означава, че върхът на вектора на тока ще се движи по вертикалната линия  $mn$ ,



Фиг. 17.27. Работа на СГ при  $P_2 = const$  и изменение на възбудянето



Фиг. 17.28

перпендикулярна на вектора на напрежението. В определен мащаб това е линия на постоянната мощност. В същото време върхът на вектора  $E_{10}$  ще се движи по линията  $kl$ , която в друг мащаб също е линия на постоянната мощност. На фиг. 17.28 е показано как се изменя токът на генератора при изменение на възбудителния ток при  $P_2 = const$  и различни стойности на  $\cos \varphi_2$  на товара. Това подсказва как може да се получи най-ефективно предаване



на електрическа мощност от СГ към консуматорите. При работа на СМ в режим на двигател, чрез подходящо регулиране на възбудането може да се направи корекция на  $\cos \varphi_2$  на група консуматори, работещи заедно със синхронния двигател.

### 17.8. Синхронни двигатели

Конструкцията на синхронните двигатели (СД) с голяма мощност не се отличава по принцип от тази на СГ. Особеното при тях е, че те не могат да се пуснат в ход с пряко включване към мрежата. Това се дължи на факта, че скоростта на въртящото се магнитно поле е относително голяма и, например, при 1 500 об/мин то прави един оборот за 0,04 секунди - време, за което не е възможно полето да захване ротора и да го ускори до тази скорост. Затова, преди да се включи захранващото напрежение е необходимо роторът да се развърти с помощта на друга машина до скорост, близка до синхронната. След това се подава напрежение на статорната намотка и накрая се включва възбудителната намотка. Тъй като относителната скорост на въртене на полето и на ротора е малка, става „зацепване“ на двете полета и роторът *влиза в синхронизъм*.

Друг начин за пускане на СД е този с използване на честотен регулатор, който позволява постепенно увеличаване на честотата на напрежението, подавано към статорната намотка, респективно на въртящото се магнитно поле, докато се достигне желаната скорост.

Най-широко разпространение, обаче, има т.нар. *асинхронно пускане*: На ротора се поставя още една, накъсо съединена намотка - като на асинхронен двигател, която осигурява развъртане на ротора до скорост, близка до синхронната. Физическата страна на процеса на асинхронното пускане е разгледана в гл. 18.

При натоварвания на синхронния двигател, непревишаващи максималния въртящ момент, машината се върти с постоянна честота, която не зависи от натоварването, т.е. синхронният двигател има *абсолютно твърда* механична характеристика.

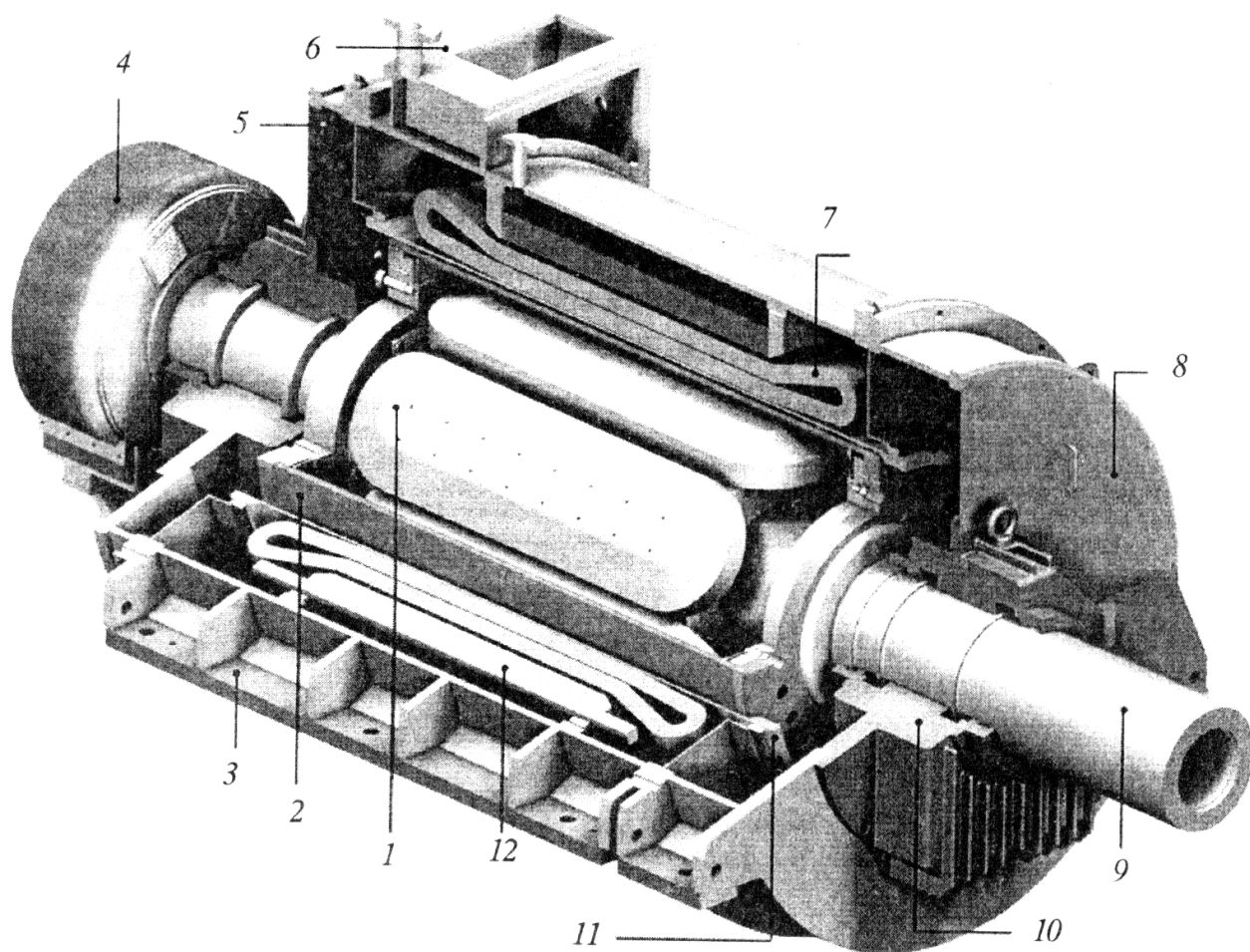
Мощните СД са подходящи за използване в производствени системи, където има асинхронни двигатели, за подобряване на коефициента на мощност на системата.

#### *Синхронни машини със свръхпроводящи намотки*

Приложението на мощни СД на корабите е свързано с разработката на синхронни машини със свръхпроводящи (СП) намотки. През 2003 г. са започнали изпитванията на СД с мощност 5 MW, като прототип на двигател за гребни електрически уредби (ГЕУ).

На фиг. 17.29 схематично е показана конструкцията на синхронен двигател с възбудителна намотка от високотемпературен свръхпроводник (ВТСП).

Използването ВТСП с висока плътност на критичния ток позволява необходимият магнитен поток да се създаде без използване на желязна сърцевина, което води до намаляване на масата и габаритите на машината. Статорната намотка се изработва от мед. Тя представлява трифазна разпределена намотка, разположена в цилиндър от шихтован феромагнитен материал, който в случая играе ролята на феромагнитен екран. При оформяне и укрепване на намотките се използват специални немагнитни материали. Специална криогенна система осигурява охлаждането на роторната намотка, а за да се подобри топлоизолацията на ротора той е поставен във вакуумен кожух. Роторната намотка се захранва от безконтактен възбуди-



Фиг. 17.29. Конструкция на синхронен двигател със СП намотка: 1 - свръхпроводяща роторна намотка; 2 - вакуумен кожух; 3 - монтажна планка; 4 - безчетков възбудител; 5 - танк за старторния охладител; 6 - изводна кутия; 7 - старторна намотка (Си); 8 - корпус; 9 - изходен вал; 10 - лагеруване; 11 - екран; 12 - феромагнитен екран

тел, разположен в корпуса на синхронната машина, а статорната намотка на двигателя - от трифазен полупроводников инвертор.

Важен показател за работата и за цената на мощните генератори и двигатели със СП намотки са загубите на мощност, сравнени с тези в конвенционалните машини. Загубите в медта и стоманата на статора по принцип не се променят. За разлика от тях, загубите в роторната намотка на практика се свеждат до нула, намаляват се два-три пъти и загубите за възбуждане. Топлинната мощност, която се отнема от СП ротор е незначителна, но мощността, консумирана от криогенната система е многократно по-голяма. Например, за да се отнемат 100 W при температура 30 °K е необходима 10 kW охлаждаща мощност (данните са за генератор 3,725 MW), което представлява 0,26% от номиналната мощност на генератора. Вентилационните загуби са свързани само с охлаждането на статорната намотка и са значително по-малки от общите вентилационни загуби в конвенционалните машини.

Използването на синхронни двигатели със СП намотки в ГЕУ е целесъобразно поради това, че те заемат 20% от пространството, на което се разполагат конвенционалните дизелови пропульсивни двигатели със същата мощност. На освободеното място на търговските кораби може да се разположи допълнителен товар, а на военните - допълнителна апаратура, оръжие, гориво и да се осигури повече място за екипажа. Такъв кораб ще изисква по-малко хора за работа и поддръжка.

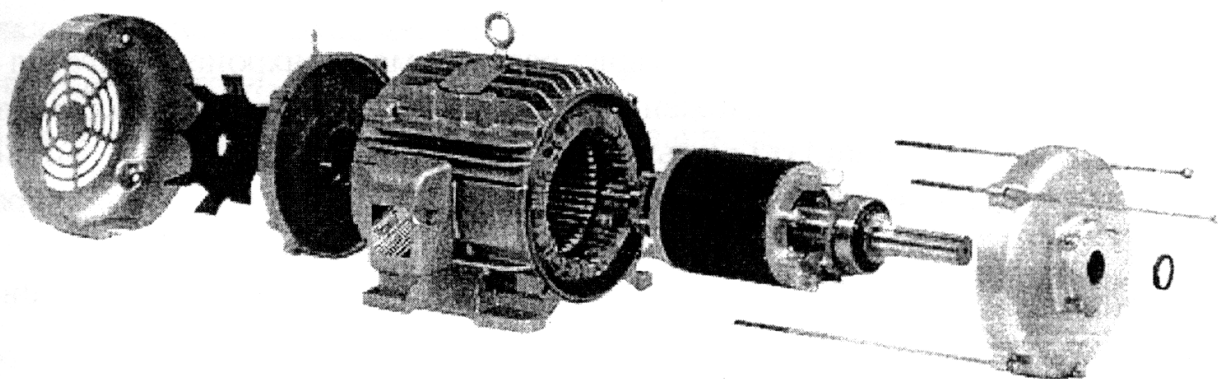
Мощни синхронни машини със СП намотки се разработват понастоящем в САЩ, Япония, Русия и др., по проекти, финансирани от държавата и големи фирми.

## Осемнадесета глава

### АСИНХРОННИ МАШИНИ

#### 18.1. Устройство и принцип на действие

- **Статор.** Състои се от статорен пакет с канали, в които се разполага трифазна разпределена намотка (фиг. 18.1).



Фиг. 18.1. Устройство на асинхронната машина

Конструкцията е същата като на синхронната машина, но тъй като на асинхронни машини се прави по-често ремонт, добре е да се знае малко повече за нея. Статорният пакет е изготвен от листов електротехническа стомана, като отделните пластини са стегнати със специални скоби или са заварени. В каналите първо се поставя канална изолация (картон или пластмаса), след които се полагат секциите. Последните се укрепват в канала с помощта на дървени клинове. След полагане на намотката се оформят и бандажират челните съединения. Навитият статорен пакет се импрегнира със специален лак. Следва престъргване на външната повърхност на статорния пакет до определен размер и набиване в чугунен или алуминиев корпус. На корпуса има клемна (изводна) кутия, в която се свързват краищата на статорната намотка. Двигателите с малка мощност се правят с фланцево закрепване, а по-големите имат лапи, чрез които се закрепват към плоска повърхност.

- **Ротор.** Представлява цилиндрично тяло, което се състои от вал с набит на него роторен пакет с канали по външната повърхност. В каналите се разполага роторна намотка. Тя най-често *се състои от медни или алумини-*

еви пръчки, които се поставят в каналите без изолация, като краищата им се дават нахъсо с нахъсо съединяващи пръстени. Такава намотка се нарича кафезна, тъй като без сърцевината прилича на въртящ се кафез за катеричка. В някои случаи роторната намотка е трифазна разпределена, свързана в „звезда“, като краищата са изведени на три контактни пръстена. Към тях се включва трифазен реостат или друга схема. Ротор с такава намотка се нарича *навит* ротор. Преди сглобяване на двигателя роторът се балансира, а неговата съосност с тази на статора се осигурява от лагерните капаци. Въздушната междина между външната повърхност на ротора и вътрешната повърхност на статора обикновено е 0,2-0,3 mm. Използването на по-качествени материали и усъвършенстването на технологията на производство позволява да се намалят габаритите на двигателя, а масовото производство - да се намали цената.

• *Принцип на действие.* Нека първо разгледаме асинхронен двигател с навит ротор: Роторът е неподвижен. При подаване на напрежение към статорната намотка в машината се създава въртящо се магнитно поле. То индуцира в статорната и роторната намотки е.д.н., подобно на трансформатора, с тази разлика, че в случая полето е въртящо се, а не пулсиращо.

Е. д. н. в една фаза на статорната намотка ще бъде както за синхронна машина:

$$E_1 = 4,44 \cdot k_{H1} \cdot w_1 \cdot f_1 \cdot \Phi_m \quad ,$$

а за роторната намотка:

$$E_2 = 4,44 \cdot k_{H2} \cdot w_2 \cdot f_2 \cdot \Phi_m = 4,44 \cdot k_{H2} \cdot w_2 \cdot f_1 \cdot \Phi_m \quad .$$

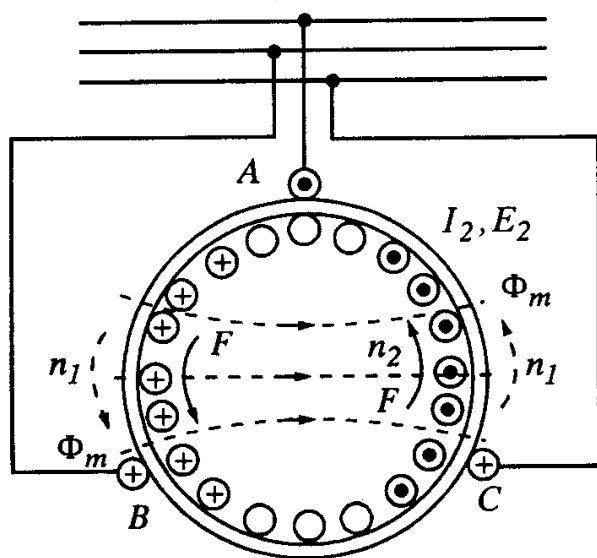
Тук и в следващите изрази долният индекс 1 обозначава статора, а 2 - ротора.

При неподвижен ротор  $f_2 = f_1$ .

Ще припомним, че  $f_1 = \frac{p \cdot \Omega_1}{2\pi}$ .

Ако вторичната намотка се даде нахъсо, в нея протича ток. При взаимодействие на този ток с въртящото се магнитно поле върху проводниците действа сила и се създава въртящ момент. По аналогичен начин „работи“ и кафезната намотка. Описаното взаимодействие е представено на фиг. 18.2.

Магнитният поток е показан в момент, когато токът във фаза А е макс.



Фиг. 18.2. Създаване на въртящ момент в АМ

симален. При въртене на магнитното поле с честота  $\Omega_1 = \frac{2\pi \cdot n_1}{60}$ , силови-те линии пресичат проводниците на роторната намотка и по правилото на дясната ръка индуцират в тях е.д.н. с посока към нас в дясната половина, и към чертежа - в лявата (по-рано правилото беше формулирано за движещ се проводник и неподвижно поле; тук е обратното, но като използваме принципа на относителност на движението, следва да насочим палеца на дясната ръка надолу). В същото време протичащият в ротора ток и магнитното поле си взаимодействат и по правилото на лявата ръка се създават сила и въртящ момент, насочени в посоката на въртене на магнитното поле. Последното като че ли „влачи“ ротора. Под действие на въртящия момент роторът се ускорява, но заедно с това е.д.н.  $E_2$  във вторичната намотка намалява, понеже намалява относителната скорост на въртене на ротора спрямо полето  $n_1 - n_2$  ( $n_1$  и  $n_2$  са честоти на въртене на полето и на ротора в обороти за минута). Честотата на е.д.н. се определя като

$$f_2 = \frac{p \cdot (\Omega_1 - \Omega_2)}{2\pi} = \frac{p \cdot (n_1 - n_2)}{60}$$

При двуполусна машина ( $p = 1$ ) честотата на въртящото се магнитно поле е  $n_1 = 3\,000$  об/мин и когато роторът е неподвижен, т.е.  $n_2 = 0$ ,  $f_2 = 50$  Hz. Когато роторът се ускори до  $0,5 n_1$ , честотата  $f_2$  ще стане  $25$  Hz, до  $0,8 n_1 - 10$  Hz, до  $0,95 n_1 - 2,5$  Hz.

Намаляването на  $E_2$  води до намаляване на тока в ротора, следователно намалява и въртящият момент. Когато скоростите се изравнят, последният става нула. Това показва, че *асинхронният двигател развива въртящ момент само когато роторът се върти със скорост по-малка от тази на полето*. По тази причина двигателите от този тип се наричат *асинхронни*.

Ако с помощта на друга машина роторът се ускори до скорост  $n_2 > n_1$ , асинхронната машина (АМ) ще премине в режим на генератор и ще преобразува механичната енергия на задвижващата машина в електрическа, която ще отдава в мрежата.

И накрая, ако роторът се завърти в посока, обратна на тази на магнитното поле, АМ ще премине в режим на *електромагнитна спирачка*.

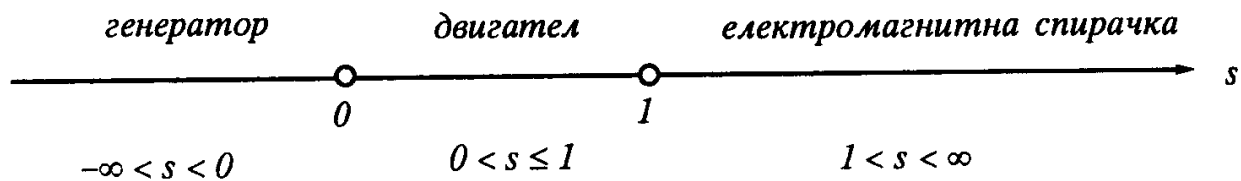
При анализа на работата на АМ се въвежда понятието хлъзгане, което се определя по следния начин:

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

Хлъзгането може да се запише още и така:

$$s = \frac{\Omega_1 - \Omega_2}{\Omega_1} .$$

Както следва от горната формула, при  $n_2 = 0$ , хлъзгането  $s = 1$ , а при  $n_1 = n_2$ ,  $s = 0$ .



Ако дясната страна на равенството за  $f_2$  умножим и разделим на  $n_1$ , ще получим следната формула:

$$f_2 = p \cdot (n_1 - n_2) \cdot n_1 / n_1 \cdot 60$$

$$f_2 = s \cdot f_1 .$$

Използването на  $s$  позволява да се опростят уравненията, описващи работата на АМ, и да се сведат до известните вече уравнения и заместваща схема за трансформатора.

## 18.2. Описание на процесите в асинхронната машина

### • Празен ход на АМ

При отворена роторна намотка и неподвижен ротор разликата спрямо трансформатора е само в това, че токът на празен ход е относително голям, тъй като в магнитната верига на машината има въздушна междина. В АМ той достига 20 ÷ 40% и затова не може да се пренебрегне. **Коефициентът на трансформация по напрежение** се отличава само по това, че в него се появяват коефициентите на намотките:

$$k_U = \frac{E_1}{E_2} = \frac{4,44 \cdot k_{H1} \cdot w_1 \cdot f_1 \cdot \Phi_m}{4,44 \cdot k_{H2} \cdot w_2 \cdot f_1 \cdot \Phi_m} = \frac{k_{H1} \cdot w_1}{k_{H2} \cdot w_2} .$$

При трифазна вторична намотка **коефициентът на трансформация по ток** е същият:

$$k_I = \frac{k_{H1} \cdot w_1}{k_{H2} \cdot w_2} .$$

При кафезна намотка всяка пръчка трябва да се разглежда като една

фаза ( $w_2 = \frac{1}{2}$ ) и затова въпросният коефициент трябва да отчита и броя на фазите  $m_1$  и  $m_2$  на първичната и на вторичната намотка, съответно:

$$k_I = \frac{m_1 \cdot k_{H1} \cdot w_1}{m_2 \cdot k_{H2} \cdot w_2} .$$

При привеждане на вторичната намотка към първичната, т.е. на роторната към статорната намотка, за напреженията се използва коефициент  $k_U$ , за токовете -  $k_I$ , а за съпротивленията -  $k_U \cdot k_I$ , вместо  $k^2$ , както е за трансформатора.

• *Описание на процесите при въртене на ротора*

В АМ вторичната намотка е дадена накъсо и токът  $I_2$  в нея зависи от е.д.н., което от друга страна се определя от относителната честота на въртене на ротора, т.е. от хлъзгането -  $E_2(s)$ . В общия случай токът в една фаза на ротора се определя както следва:

$$I_2 = \frac{E_2(s)}{z_2(s)} ,$$

където  $z_2(s)$  е съпротивлението на една фаза на роторната намотка при въртене. Величините  $E_2(s)$  и  $z_2(s)$  могат да се представят по следния начин:

$$E_2(s) = 4,44 \cdot k_{H2} \cdot w_2 \cdot s \cdot f_1 \cdot \Phi_m = s \cdot E_2 ,$$

където  $E_2$  е е.д.н. при неподвижен ротор и

$$z_2(s) = \sqrt{R_2^2 + X_2(s)^2} .$$

Тъй като индуктивното съпротивление от потока на разсейване на роторната намотка  $X_2(s)$  е пропорционално на  $f_2 = s \cdot f_1$ , следва

$$X_2(s) = s \cdot X_2 ,$$

където  $X_2$  е индуктивно съпротивление при неподвижен ротор.

След заместване във формулата, за  $z_2(s)$  се получава

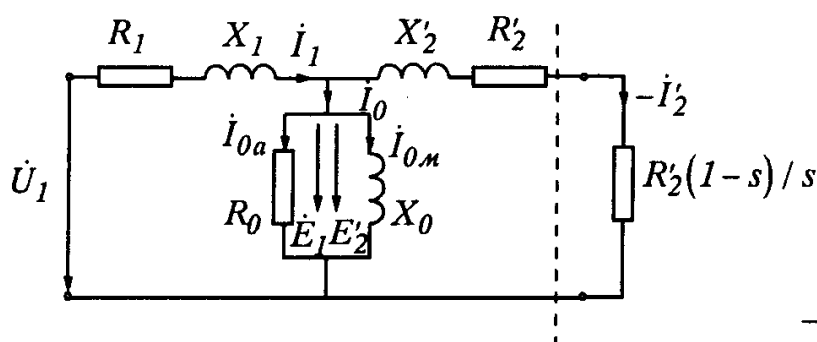
$$z_2(s) = \sqrt{R_2^2 + s^2 \cdot X_2^2} = s \cdot \sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_2^2} ,$$



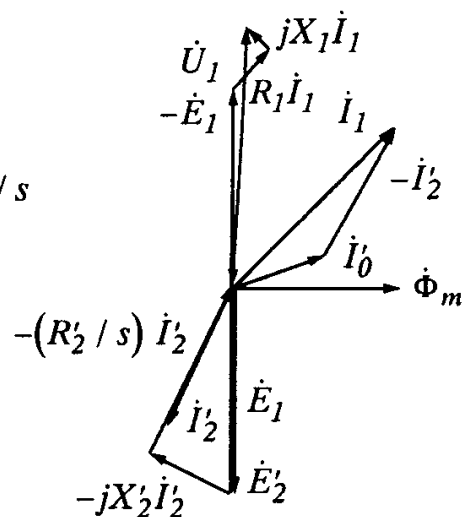
а след заместване във формулата за тока:

$$I_2 = \frac{E_2 s}{z_{2s}} = \frac{s \cdot E_2}{s \cdot \sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_2^2}} = \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_2^2}}$$

От това равенство се вижда, че процесите, свързани с въртенето на ротора, могат да се отчетат чрез заместване на  $R_2$  с  $\frac{R_2}{s}$ . Действително, при въртене на ротора с честота, близка до синхронната, когато хлъзгането е малко (около 0,01 при празен ход), съпротивлението на роторната намотка е голямо и токът е малък, при  $s = 0$  той става нула. Когато роторът е неподвижен и хлъзгането е единица, съпротивлението е малко, а токът - много голям и опасен за машината. Така например, ако при включване роторът не се завърти, двигателят веднага трябва да се изключи или в схемата за управление да се предвиди съответната защита. На фиг. 18.3 е дадена еквивалентната заместваща схема за една фаза на АД.



Фиг. 18.3. Заместваща схема на АД



Фиг. 18.4. Векторна диаграма на АД

Параметрите на вторичната намотка са приведени към първичната, съпротивлението  $\frac{R_2'}{s}$  е представено като  $\frac{R_2'}{s} = R_2' + \frac{R_2'(1-s)}{s}$ . Може да се покаже, че мощността, която се отделя в съпротивлението  $\frac{R_2'(1-s)}{s}$ , е

равна на електрическата мощност, която се преобразува в механична в АД.  
 На заместващата схема на АД съответстват следните уравнения:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + R_1 \cdot \dot{I}_1 + jX_1 \cdot \dot{I}_1 \quad , \\ 0 &= \dot{E}_2' - \left( \frac{R_2'}{s} \right) \cdot \dot{I}_2' - jX_2' \cdot \dot{I}_2' \quad , \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_0 - \dot{I}_2' \quad . \end{aligned}$$

За разлика от трансформатора, във второто уравнение отляво има нула, тъй като роторната намотка е дадена накъсо, а  $R_2'$  е заместено с  $\frac{R_2'}{s}$ .

Векторната диаграма, построена по горните уравнения, и заместващата схема са дадени на фиг. 18.3 и фиг. 18.4.

Както се вижда от фиг. 18.4, токът на празен ход  $\dot{I}_0$  изпреварва магнитния поток  $\dot{\Phi}_m$  поради наличието на загуби в стоманата. Токът  $\dot{I}_2'$  изостава от е.д.н.  $\dot{E}_2'$  във вторичната намотка, вследствие нейния активно-индуктивен характер. Токът  $\dot{I}_1$  се намира като сума от  $\dot{I}_0$  и  $(-\dot{I}_2')$ , а напрежението  $\dot{U}_1$  се определя като към вектора  $(-\dot{E}_1)$  се прибавят векторите на напреженията  $R_1 \dot{I}_1$  и  $jX_1 \dot{I}_1$ . Токът  $\dot{I}_1$  изостава от напрежението  $\dot{U}_1$  на ъгъл  $\varphi_1 < \frac{\pi}{2}$ , а консумираната мощност на двигателя може да се изчисли по формулата

$$P_1 = m_1 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 \quad ,$$

където  $m_1$  е броят на фазите на асинхронния двигател.

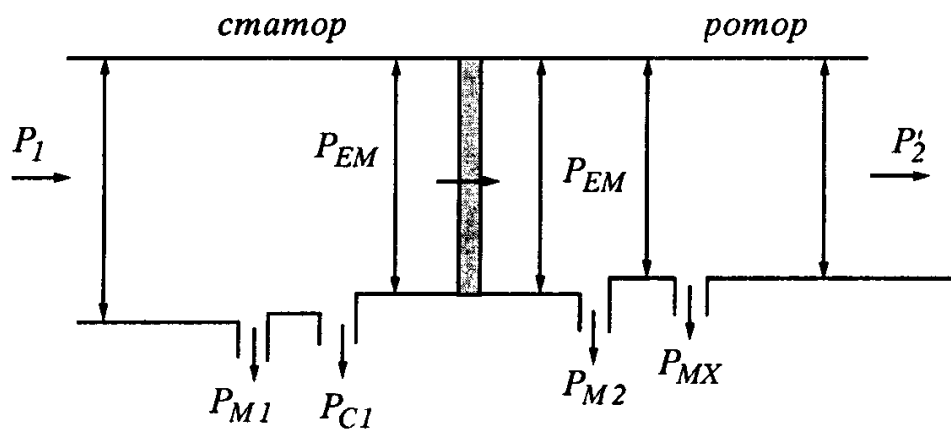
### 18.3. Енергийна диаграма и въртящ момент на асинхронната машина

#### • Енергийна диаграма

Нека разгледаме разпределението и преобразуването на постъпващата от мрежата електрическа мощност в асинхронния двигател, като използваме енергийната диаграма на фиг. 18.5.

1. АД консумира от мрежата мощност  $P_1 = m_1 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1$ .

2. Част от тази мощност покрива загубите в медния проводник на статорната намотка, които са  $P_{M1} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_1^2$ , и загубите в стоманата  $P_{C1}$  от хистерезис и вихрови токове.



Фиг. 18.5. Енергийна диаграма на АД

3. Останалата част се предава през въздушната междина към ротора посредством въртящото се магнитно поле. Това е електромагнитната мощност на АМ:

$$P_{EM} = P_1 - P_{M1} - P_{C1} .$$

Тя може да се запише още и така:

$$P_{EM} = \Omega_1 \cdot M ,$$

където  $\Omega_1$  е ъгловата честота на въртене на електромагнитното поле, а  $M$  - въртящият електромагнитен момент на двигателя.

4. Част от мощността, постъпила в ротора, се изразходва за покриване на загубите в роторната намотка  $P_{M2} = m_2 \cdot R_2 \cdot I_2^2$ .

5. Останалата част представлява механична мощност,  $P_2'$ :

$$P_2' = P_{EM} - P_{M2} ,$$

която, аналогично на електромагнитната мощност, може да се запише като

$$P_2' = \Omega_2 \cdot M ,$$

където  $\Omega_2$  е ъгловата честота на въртене на ротора в rad/s.

6. Полезната механична мощност на вала на двигателя  $P_2$  се определя като от мощността  $P_2'$  се извадят механичните загуби  $P_{MX}$  от триене в лагерите, във въздуха и др.:

$$P_2 = P_2' - P_{MX} .$$

7. Коефициентът на полезно действие на машината се определя по един

от вариантите на формулата

$$К.п.д. = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - P_{Загуби}}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_{Загуби}} .$$

• *Въртящ момент*

От равенството за  $P_2' = P_{EM} - P_{M2}$  след заместване се получава

$$\Omega_2 \cdot M = \Omega_1 \cdot M - m_2 \cdot R_2 \cdot I_2^2 ,$$

откъдето

$$\Omega_1 \cdot M = \Omega_2 \cdot M - m_2 \cdot R_2 \cdot I_2^2$$

или

$$(\Omega_1 - \Omega_2) \cdot M = m_2 \cdot R_2 \cdot I_2^2 .$$

Ако лявата част се умножи и раздели на  $\Omega_1$  и се използва формулата за хлъзгането  $s$  :

$$(\Omega_1 - \Omega_2) \frac{\Omega_1}{\Omega_2} \cdot M = m_2 \cdot R_2 \cdot I_2^2 ,$$

за въртящия електромагнитен момент се получава

$$M = \frac{m_2 \cdot R_2 \cdot I_2^2}{\Omega_1 \cdot s} .$$

Тази формула не е подходяща за анализ на въртящия момент в зависимост от хлъзгането, тъй като токът в ротора също е функция на  $s$ . За да се избегне това неудобство, токът и съпротивлението на една фаза на роторната намотка се привеждат към статорната намотка, като се използват посочените по-горе коефициенти  $k_U$  и  $k_I$ . След извършване на съответните преобразувания формулата добива вида

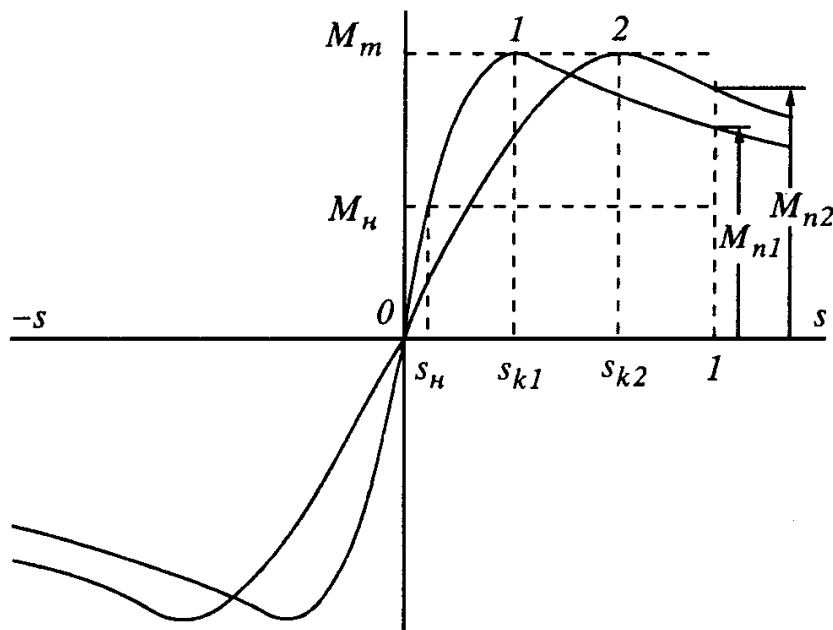
$$M = \frac{m_1 \cdot R_2' \cdot I_2'^2}{\Omega_1 \cdot s} .$$

Приведеният ток  $I_2'$  може да се определи като се използва заместващата схема за една фаза на АД. Окончателният резултат, след известно опрос-

тяване, има следния вид:

$$M = \frac{m_1 \cdot U_1^2}{\Omega_1} \frac{R_2'/s}{(R_1 + R_2'/s)^2 + (X_1 + X_2')^2}$$

За качествен анализ на тази формула е удобно да се използва графичната зависимост  $M(s)$ , показана на фиг. 18.6.



Фиг. 18.6. Зависимост на въртящия момент от хлъзгането

Нека разгледаме крива 1, като започнем от  $s = 1$ . Това означава, че роторът е неподвижен. При включване се създава *пусков въртящ момент*,  $M_{n1}$ , чиято стойност се получава като в израза  $M(s)$  се положи  $s = 1$ . Под действие на пусковия момент роторът започва да се върти, скоростта нараства,  $s$  намалява. Едновременно с това се увеличава и въртящият момент, който достига максимална стойност при хлъзгане  $s_{k1}$ , а след това започва да намалява, докато се изравни с товарния *номинален момент* и се установи номиналната честота на въртене, на която съответства номинално хлъзгане,  $s_n$ . Ако товарният момент се намали и двигателят се остави да работи на празен ход, скоростта се увеличава още малко, но не може да достигне синхронната, тъй като съществува съпротивителен момент от триене, т.е. *момент на празен ход*,  $M_0$  (на чертежа не е показан). Ако се приложи външен въртящ момент, честотите на въртене на ротора и на магнитното поле отначало ще се изравнят ( $s = 0$ ), а когато роторът започне да се върти по-бързо от полето ( $s < 0$ ) асинхронната машина ще създаде съпротивителен момент ( $-M$ ), т.е. ще премине в режим на генератор. В този режим зависимостта  $M(-s)$  има същия характер, както и в двигателен режим.

Разглежданата функция има два екстремума  $\pm M_m$ . Стойността на максималния момент  $M_m$  може да се получи като  $M(s)$  се диференцира по  $s$  и

производната се приравни към нула, т.е.  $\frac{dM(s)}{ds} = 0$ . Хлъзгането  $s_{k1}$ , което удовлетворява това равенство, се нарича **критично хлъзгане**. След заместване в  $M(s)$  на  $s$  с  $s_{k1}$  се получава стойността на  $M_m$ . Хлъзгането  $s_{k1}$  се нарича критично, тъй като увеличаването на съпротивителния момент на вала на двигателя до определена стойност ще се компенсира с нарастване на въртящия момент, но при хлъзгане  $s_{k1}$  последният ще започне да намалява и роторът ще спре. Машината влиза в режим на **късо съединение** и трябва да се изключи.

Отношението на максималния момент към номиналния характеризира **претоварващата способност** на АД:

$$k_m = \frac{M_m}{M_n}, \text{ като } k_m = 1,7 - 2,2 .$$

Отношението на пусковия момент към номиналния се нарича **кратност на пусковия момент** на АД:

$$k_n = \frac{M_n}{M_n}, \text{ като } k_n = 0,7 - 1,8 .$$

Очевидно, при пускане на АД под товар  $k_n$  трябва да има стойности, близки до горната граница на диапазона, а при пускане на празен ход - до долната граница.

Пусковият момент на АД зависи от активното съпротивление на роторната намотка  $R'_2$ . Неговото нарастване води до „разтягане“ на кривата  $M(s)$ , при което максималният момент остава същият, но стойността при  $s = 1$  се увеличава - *крива 2* на фиг. 18.6.

При определена стойност на  $R'_2$  пусковият момент може да стане равен на максималния. Обикновено това се постига в двигателите с навит ротор, където през плъзгащите контакти може да се включи трифазен остатат с подходящо съпротивление. След развъртане на ротора реостатът се извежда и краищата на намотката се дават накъсо. Друг начин за увеличаване на  $R'_2$  е чрез промяна в конструкцията на кафезната намотка. В роторния пакет се разполагат две кафезни намотки - една в друга, или каналът се прави със специална форма. При пускане вътрешната кафезна намотка има по-голямо индуктивно съпротивление, което е равносилно на изтласкване на роторния ток към външния кафез, а това означава намаля-

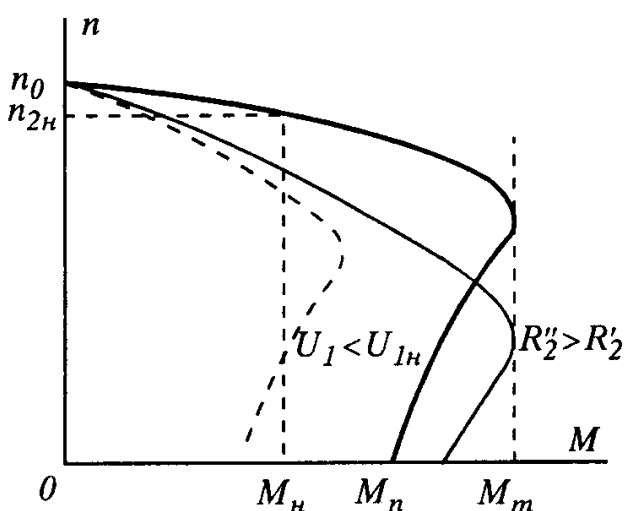
ване на еквивалентното сечение на намотката, съответно увеличаване на съпротивлението.

• **Механична характеристика**

Зависимостта  $M(s)$  не е много удобна за ползване, когато се разглежда честотата на въртене като функция от въртящия момент на АМ. Като се използва вече известната формула

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{\Omega_1 - \Omega_2}{\Omega_1} ,$$

$M(s)$  може да се преобразува във вид  $\Omega_2(M)$  или в друг мащаб в  $n_2(M)$  и ще изглежда, както е показано на фиг. 18.7.

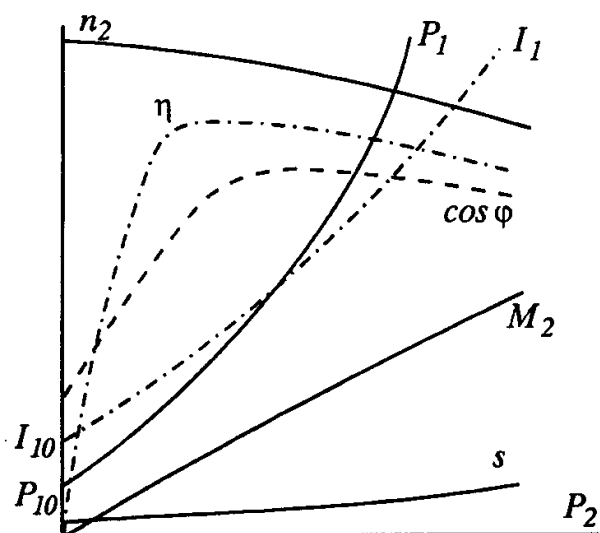


Фиг. 18.7. Механична характеристика на АД

Както се вижда от фигурата, в работната си част механичната характеристика (МХ) на асинхронния двигател прилича на тази на постоянно-токовия двигател с паралелно възбуждане. АД може да работи устойчиво при натоварване до  $M_m$ . Ако се превиши тази стойност, двигателят спира. Начертаната с по-дебела линия крива представлява *естествената механична характеристика* на АД, получена при номинално захранващо напрежение и без допълнително съпротивление в роторната намотка. На същата фигура е дадена и МХ при понижено напрежение. Вижда се, че в случая намалява максималният момент, който е пропорционален на  $U_1^2$ .

**18.4. Работни характеристики на асинхронната машина**

Работните характеристики на АМ, подобно на постоянно-токовите двигатели, включват зависимостта на консумираната мощност  $P_1$  и консумирания фазен ток  $I_1$ , полезния въртящ момент на вала на двигателя  $M_2$ , честотата на въртене на ротора  $n_2$  и к.п.д. от мощността на вала на двигателя  $P_2 = M_2 \cdot \Omega_2$  при постоянна ефективна стойност и честота на захран-



Фиг. 18.8. Работни характеристики на АД

ващото напрежение. Към посочените зависимости следва да се прибавят още две, които могат да се получат от тях, а именно:  $\cos \varphi_1(P_2)$  и  $s(P_2)$  - фиг. 18.8. Работните характеристики се получават експериментално или се изчисляват по каталожни данни, или още при проектирането на машината.

### 18.5. Регулиране на честотата на въртене на асинхронните двигатели

Тук ще бъдат разгледани основните принципи на регулиране на честотата на въртене на АД. Конкретните схеми, свързани с регулирането

и тяхното описание, са представени в раздел IX, гл. 24 „Корабни електрозадвижвания“.

Честотата на въртене на АД може да се запише по следния начин:

$$n_2 = n_1(1-s) = \frac{60 \cdot f_1}{p} \cdot (1-s) .$$

От тази формула следват три начина за регулиране на честотата на въртене:

1. Изменение на честотата на захранващото напрежение.
2. Изменение на броя на чифтовете полюси.
3. Изменение на хлъзгането при зададен съпротивителен момент на вала.

Нека ги разгледаме поотделно:

• **Изменение на честотата на захранващото напрежение.** При този начин на регулиране, за да се запазят получените по-рано съотношения, е необходимо да се вземе предвид следното: изменението на честотата води до пропорционално изменение на индуктивните съпротивления на намотките. Както следва от формулата за максималния момент на двигателя (при  $R_1 = 0$ ),

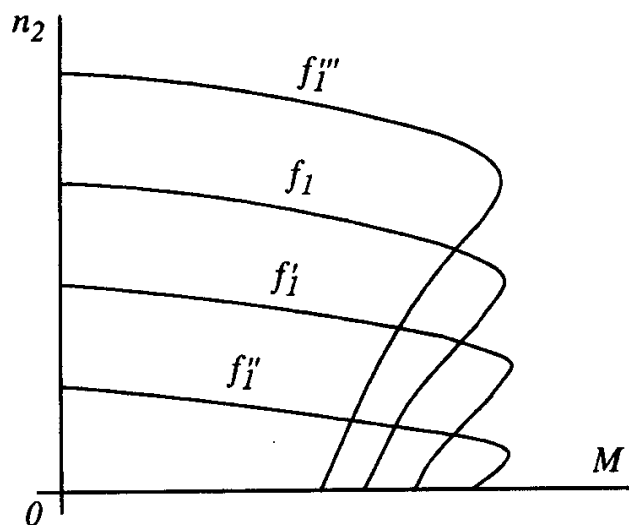
$$M_m = \frac{(m_1 \cdot U_1^2)}{2\Omega_1(X_1 + X_2')} ,$$

където  $\Omega_1 = 2\pi f/p$ , а  $X_1 = 2\pi f_1 L_1$  и  $X_2' = 2\pi f_1 L_2'$ . За да се запази  $M_m = const$



е необходимо при изменение на честотата, заедно с нея да се променя и ефективната стойност на напрежението, така че

$$M_m = \frac{C \cdot U_1^2}{f_1^2} = \text{const} \quad \text{или} \quad \frac{U_1}{f_1} = \text{const} .$$

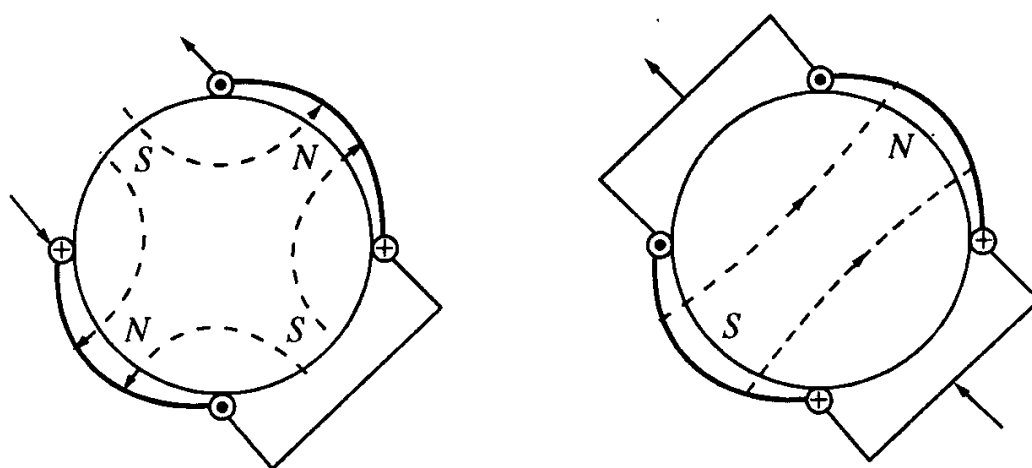


Фиг. 18.9. Механични характеристики на АД при регулиране на честотата на захранващото напрежение

Механичните характеристики при този начин на регулиране за различни честоти са показани на фиг. 18.9. Кривата при честота  $f_1$  представлява естествената характеристика. При по-ниски честоти от номиналната ( $f_1'$  и  $f_1''$ ) изкуствените МХ са разположени под естествената, а при по-високи ( $f_1'''$ ) - над нея.

• **Изменение на броя на чифтовете полюси.** Този начин на регулиране се реализира чрез промяна в свързването на отделните части на статорната намотка - фиг. 18.10.

Принципно този въпрос бе изяснен при разглеждането на въпроса за преминаване от двуполусна към четириполусна намотка в синхронната машина. Такава намотка при показаните на фигурата начини на свързване на една фаза осигурява въртящо се магнитно поле с 4 и 2 полюса. В първия случай синхронната скорост на въртене е 1 500 об/мин, а във втория - 3 000 об/мин.



Фиг. 18.10. Изменение на броя на чифтовете полюси за една фаза на статорната намотка

И тъй като роторът на асинхронната машина няма полюси, в еднаква степен е възможна работа и на двете честоти на въртене. Чрез превключване на статорната намотка е възможно да се получи трикратно и четирикратно изменение на скоростта, но обикновено се правят двускоростни и, по-рядко, трискоростни АД.

• *Изменение на хлъзгането при зададен съпротивителен момент на вала*

На фиг. 18.7, където е дадена естествената МХ на АД, са показани още две криви: при увеличено съпротивление в роторната намотка и при намалено напрежение. Първата крива съответства на регулиране на скоростта чрез изменение на съпротивлението в ротора при номинален въртящ момент на вала - пресечната точка на МХ и на линията на момента ( $M_n$ ) при увеличаване на съпротивлението се премества надолу, което означава намаляване на честотата на въртене. Вижда се, че диапазонът на изменение не е голям.

При втората крива ефектът е същият, но заедно с това силно намалява претоварващата способност на двигателя, което е нежелателно. АД, предназначени за такова регулиране, имат роторна намотка с голямо активно съпротивление, а в някои случаи роторът представлява масивен цилиндър от стомана или чугун.

## 18.6. Асинхронни двигатели с малка мощност

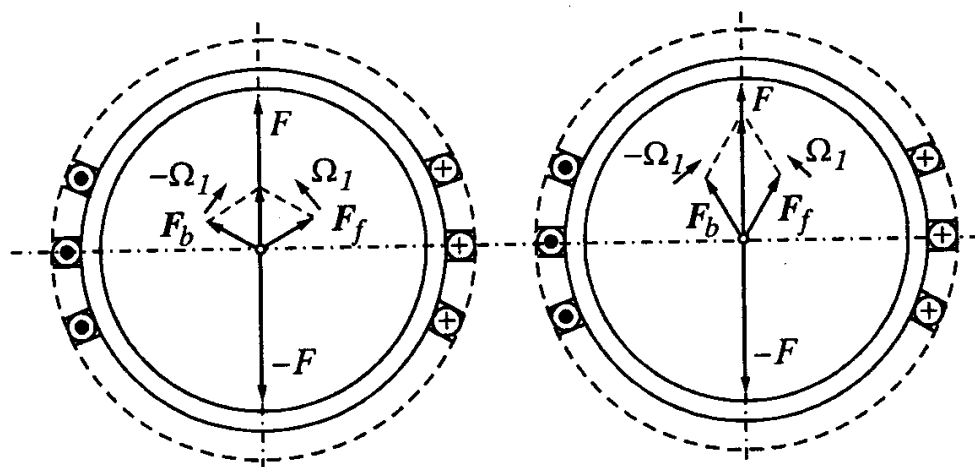
Поради простото си устройство и технологичност асинхронните двигатели намират широко приложение и в задвижването на различни машини и механизми с малка мощност, в системите за автоматично управление, в битовата техника.

За тази цел в света годишно се произвеждат милиони АД с мощност до 1 kW. Една част от тях са трифазни и по принцип не се отличават от разгледаните дотук асинхронни двигатели. Значителен дял имат АД с еднофазно захранване или т.нар. еднофазни АД. Трета група образуват специалните асинхронни двигатели за автоматичните устройства.

### 18.6.1. Еднофазни асинхронни двигатели

Основно значение за работата на асинхронната машина има създаването на въртящо се магнитно поле, което при взаимодействие с накъсо съединената роторна намотка създава въртящ момент. При положение, че се включи само едната фаза, в машината се създава *пулсиращо магнитно поле*, което не отговаря на посоченото условие. На пръв поглед това е така, но в действителност, ако роторът се завърти в една или друга посока, например с ръка или по друг начин, той се ускорява и достига скорост близка до синх-

ронната, но малко по-ниска от нея. Защо се получава така? На фиг. 18.11 условно са показани статорът и роторът на АМ само с една фазна намотка, по която тече синусоидален ток. Магнитодвижещото напрежение е означено с  $F$  - вектор, който пулсира в указаното направление. Този вектор може да се замести с

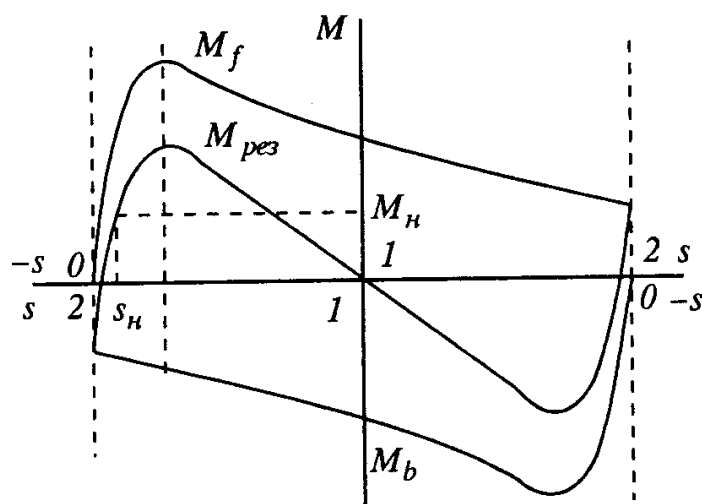


Фиг. 18.11. Разлагане на пулсиращо поле на две кръгови полета

да се замести с два равни по големина и въртящи се в противоположни посоки с една и съща скорост вектора:  $F_f$  - с ъглова скорост  $\Omega_1$ , и  $F_b$  - с ъглова скорост  $-\Omega_1$ . Може да се каже, че в машината съществуват две кръгови въртящи се магнитни полета,

всяко от които действа върху ротора, създавайки въртящ момент по разглеждания по-горе начин.

На фиг. 18.12 е показана зависимостта  $M(s)$  за право  $M_f(s)$  и обратно



Фиг. 18.12. Въртящ момент в еднофазния АД

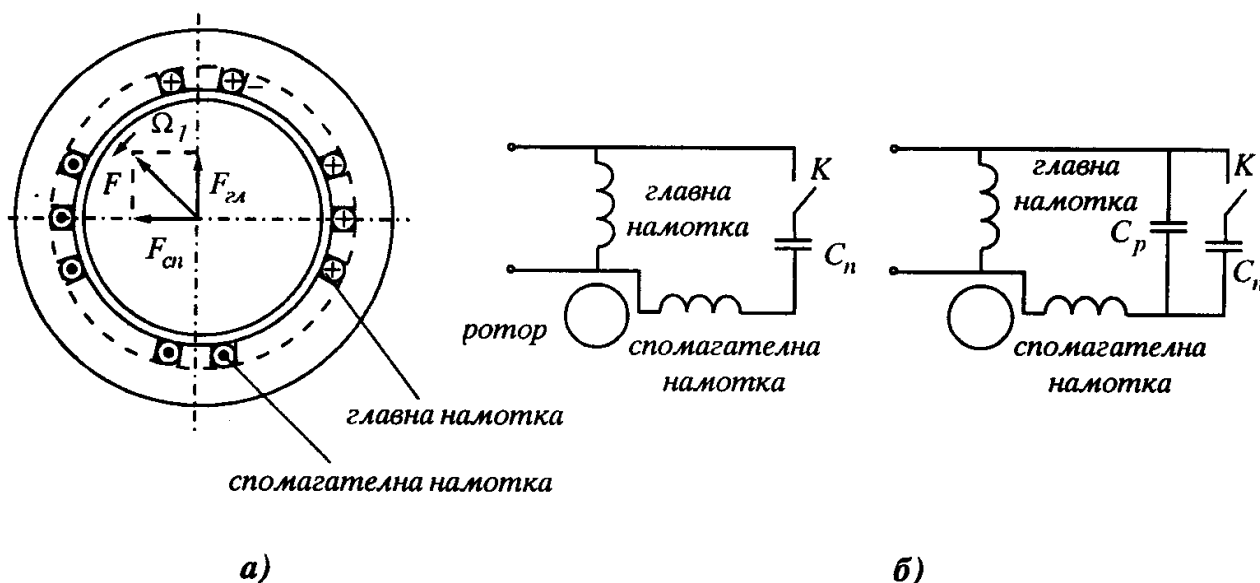
$M_b(s)$  въртящото се магнитно поле. Точката, съответстваща на хлъзгане  $s = 1$  (неподвижен ротор), е една и съща за двете полета. Кривата  $M_f(s)$  за диапазона  $0 < s < 2$  е разположена в горната половина на чертежа, а кривата  $M_b(s)$  за същия диапазон - в долната половина и има отрицателен знак. Хлъзгане  $s = 2$ , както това следва от формулата за  $s$ , означава, че роторът се върти в посока, обратна на тази на полето със скорост, равна на синхронната.

Обърнете внимание, че там, където за правото поле  $s = 0$ , за обратното хлъзгането е  $s = 2$  и където за обратното поле хлъзгането е  $s = 0$ , за правото то е  $s = 2$ . От кривата на сумарния

$$M_{рез}(s) = M_f(s) + M_f(s)$$

се вижда, че такъв двигател няма пусков момент  $M_{рез}(1) = 0$ , но такъв веднага ще се появи, стига роторът да се завърти в права или обратна посока.

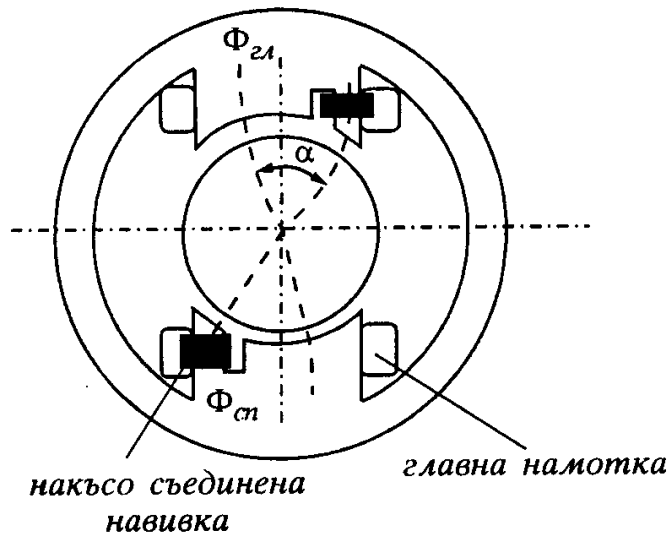
За да се получи необходимият пусков момент, при включване на еднофазния двигател се постъпва по следния начин: В каналите на статора (фиг. 18.13а) се поставя още една намотка - *спомагателна или пускова*, чиято магнитна ос е перпендикулярна на оста на *главната намотка*, разгледана погоре.



Фиг. 18.13. Пускова намотка и схема на включване на еднофазния АД

За да се получи въртящо се магнитно поле при наличие на две пулсиращи магнитни полета, е необходимо да се изпълнят следните условия: а) равенство на амплитудите на м.д.н.:  $F_{2L} = F_{cn}$ , и б) изместване по фаза на  $90^\circ$ . Това може да се покаже по същия начин, както за трифазната машина, или да се направи аналогия с кръга, който описва лъчът в електроннолъчевата тръба на осцилоскопа, когато на хоризонтално и вертикално отклоняващите пластини се подаде едновременно синусоидално напрежение с една и съща честота и фазово изместване на  $90^\circ$ . Ако амплитудите са различни или дефазирането не е точно  $90^\circ$ , на екрана се появява елипса. По същите причини и въртящото се поле може да бъде елиптично. Но и това в някои случаи е достатъчно. Фазовото изместване на тока в спомагателната намотка спрямо тока в главната може да се реализира чрез включване на кондензатор във веригата на първата, както е показано на фиг. 18.13б. С помощта на ключа  $K$  кондензаторът се включва докато трае процесът на

пускане и след това се изключва. В някои случаи се използва работен кондензатор  $C_p$ , който осигурява кръгово въртящо се поле при работа, а пусковият кондензатор - допълнителен капацитет  $C_n$  за кръгово поле при пускане. Тъй като токът в главната намотка изостава от захранващото напрежение



Фиг. 18.14. АД с екранирани полюси

на ъгъл  $\varphi_{г\lambda}$ , капацитетът на кондензатора  $C_n$  или  $C_n + C_p$  се подбира така, че токът във веригата на спомагателната намотка да изпреварва захранващото напрежение на ъгъл  $\varphi_{сп}$ , така че

$$\varphi_{г\lambda} + \varphi_{сп} = 90^\circ.$$

В някои случаи - при липса на трифазно захранване, трифазният АД може да се включи към еднофазна мрежа по специална схема, като се използват един или повече кондензатори. Най-разпространените схеми и капацитетите, из-

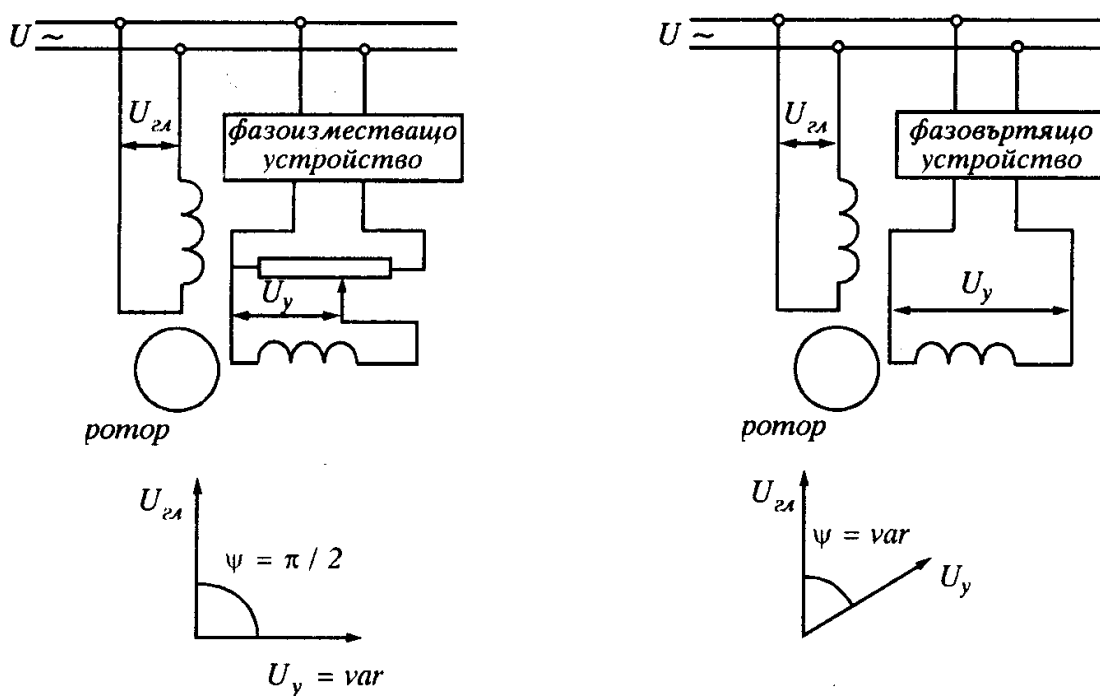
числени за тях, обикновено се дават в справочниците. При такова включване трифазният АД работи с не повече от 60% от номиналната си мощност.

От машините с малка мощност в практиката широко разпространение имат *еднофазните асинхронни двигатели с екранирани полюси*. Те се използват главно за задвижване на помпи и вентилатори. На фиг. 18.14 е показано принципното устройство на двигател от този тип:

Статорът има явни полюси с намотка, която се включва към захранващата мрежа. Във всеки полюс има канал, който отцепва част от него. На отцепената част от полюса е поставена накъсо съединена навивка от дебел проводник. При протичане на ток в главната намотка се създава пулсиращо магнитно поле,  $\Phi_{г\lambda}$ , което преминава през основната част на единия полюс, ротора, другия полюс и се затваря през ярема на статора. Друга част от потока,  $\Phi_{сп}$ , преминава през екранираните полюси, ротора и също се затваря през ярема. Тези два потока са изместени пространствено един спрямо друг на ъгъл  $\alpha$  и освен това са дефазирани във времето. Това е достатъчно да се създаде елиптично въртящо се поле, което създава въртящ момент в двигателя. Посоката на въртене е от неекранираната част на полюса към екранираната. Този тип двигатели имат тази особеност, че са нереверсивни, т.е. не е възможно да се смени посоката на въртене, което ги прави подходящи за посочените задвижвания.

### 18.6.2. Асинхронни изпълнителни двигатели (АИД)

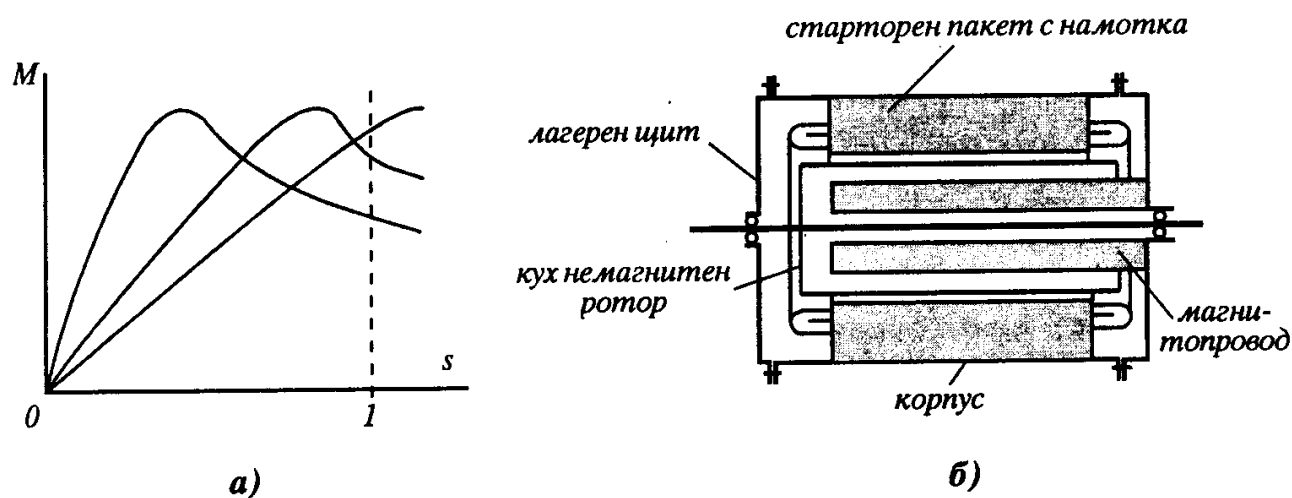
Асинхронните изпълнителни двигатели (АИД) са предназначени да преобразуват управляващото напрежение или неговата фаза в ъглова скорост в системите за автоматично управление. АИД се изработват двуфазни, за честоти от 50 до 1 000 Hz и с мощност от няколко десети от вата до няколкостотин вата. За разлика от еднофазните АД, тук двете намотки са еднакви и захранването им е разделено - фиг. 18.15. Тези двигатели трябва да отговарят на следните изисквания: малък инерционен момент и линейност на механичната характеристика, малка електромеханична константа, широк диапазон и плавност на регулирането.



Фиг. 18.15. Схема на включване на АИД

Показаната схема дава възможност поотделно да се променя или само амплитудата на напрежението на едната фаза при дефазирание  $90^\circ$ , или само фазовият ъгъл между двете напрежения при еднаква амплитуда. Очевидно, и при двата вида управление (амплитудно и фазово) АИД ще работи прединно с елиптично поле.

За да се осигури линейност на механичната характеристика, съпротивлението на роторната намотка трябва да се увеличи дотолкова, че максималният момент на двигателя да се получи при хлъзгане по-голямо от 1 - фиг. 18.16a. Това условие се реализира в три вида АИД: 1) с накъсо съединен ротор, 2) с кух немагнитен ротор и 3) с кух феромагнитен ротор. На фиг.



Фиг. 18.16. Зависимост  $M(s)$  и АИД с кух немагнитен ротор

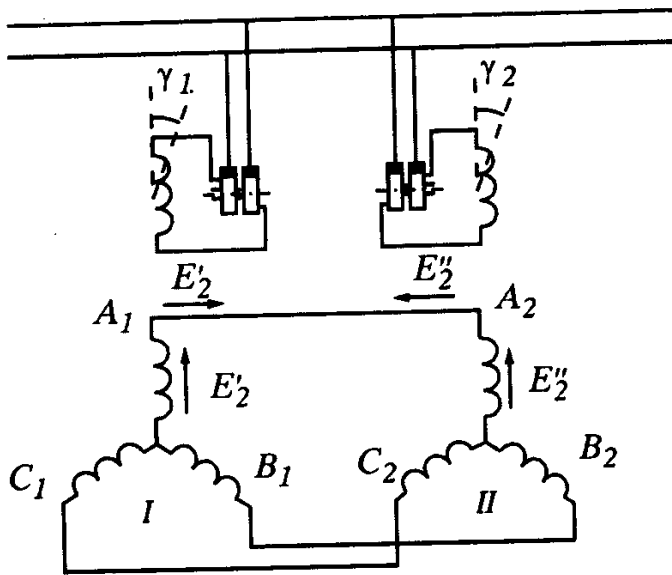
18.16б е показана схематично конструкцията на двигател с кух немагнитен ротор. Роторът представлява тънкостенна чаша от алуминий, закрепена с дъното си към вала. Тя се разполага във въздушната междина, образувана от статора и вътрешен шихтован цилиндър, през който се затваря магнитния поток на двигателя. Поради относително голямата въздушна междина тези двигатели имат ниски енергетични показатели, но, за сметка на това - високо бързодействие, което се дължи на малкия инерционен момент на ротора.

### 18.7. Селсини

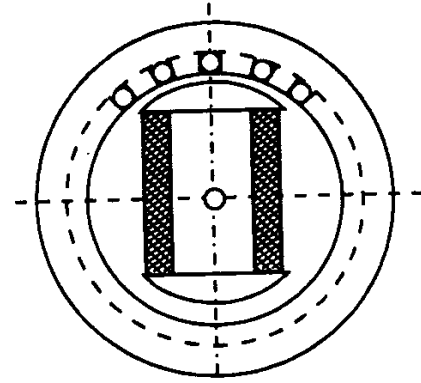
*Селсините* са електрически машини, които се използват в системите за синхронна връзка, където осигуряват едновременно завъртане или едновременно синхронно въртене на два или повече вала, между които няма механична връзка. Названието произлиза от думата *самосинхронизация* (self synchronization - *англ.*). В практиката се използват предимно два вида синхронна връзка: система за синхронно въртене (електрически вал) и система за синхронно завъртане - система за предаване на ъгъл. На корабите се прилага предимно втората - за дистанционно управление, регулиране и контрол.

Селсините, създадени за тази цел, са трифазни и еднофазни. *Трифазните селсини* не се отличават по конструкция от асинхронните двигатели с навит ротор, а *еднофазните* обикновено имат трифазна разпределена намотка на статора и явнополюсен ротор с намотка, която се захранва от източник на променливо напрежение с честота 50 или 400(500) Hz през контактни пръстени.

Нека разгледаме работата на два еднофазни селсина, свързани, както е показано на фиг. 18.17.



статор с трифазна намотка  
и явнополюсен еднофазен ротор



Фиг. 18.17. Включване на еднофазни селсини в индикаторен режим на работа

Това е схема за работа на селсини в *индикаторен режим*. Нека приемем, че левият е „селсин-датчик“ (СД), а десният - „селсин-приемник“ (СП). Към възбудителните намотки на роторите на двете машини се подава променливо напрежение с честота  $f_1$ . Протичащият в тези намотки ток създава пулсиращо магнитно поле. В начално положение, когато ъгълът на завъртане  $\gamma$  е нула, индуцираните в отделните фази на трифазните намотки електродвижещи напрежения са равни по големина и насочени едно срещу друго, и в намотките ток не тече. Ефективните стойности на тези е.д.н. са:

$$E_A = E_\Phi \cdot \cos \gamma = E_\Phi \cdot \cos(0^\circ) \quad ,$$

$$E_B = E_\Phi \cdot \cos(\gamma - 120^\circ) = E_\Phi \cdot \cos(0 - 120^\circ) \quad ,$$

$$E_C = E_\Phi \cdot \cos(\gamma + 120^\circ) = E_\Phi \cdot \cos(0 + 120^\circ) \quad .$$

При нарастване на ъгъла  $\gamma_1$  в СД равновесието се нарушава и вследствие разликата между  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  (ъгъл на завъртане на СП) се получава и разлика в съответните е.д.н.:

$$E'_A - E''_A = E_\Phi \cdot \cos \gamma_1 - E_\Phi \cdot \cos \gamma_2 \quad ,$$

$$E'_B - E''_B = E_\Phi \cdot \cos(\gamma_1 - 120^\circ) - E_\Phi \cdot \cos(\gamma_2 - 120^\circ) \quad ,$$

$$E'_C - E''_C = E_\Phi \cdot \cos(\gamma_1 + 120^\circ) - E_\Phi \cdot \cos(\gamma_2 + 120^\circ) \quad .$$



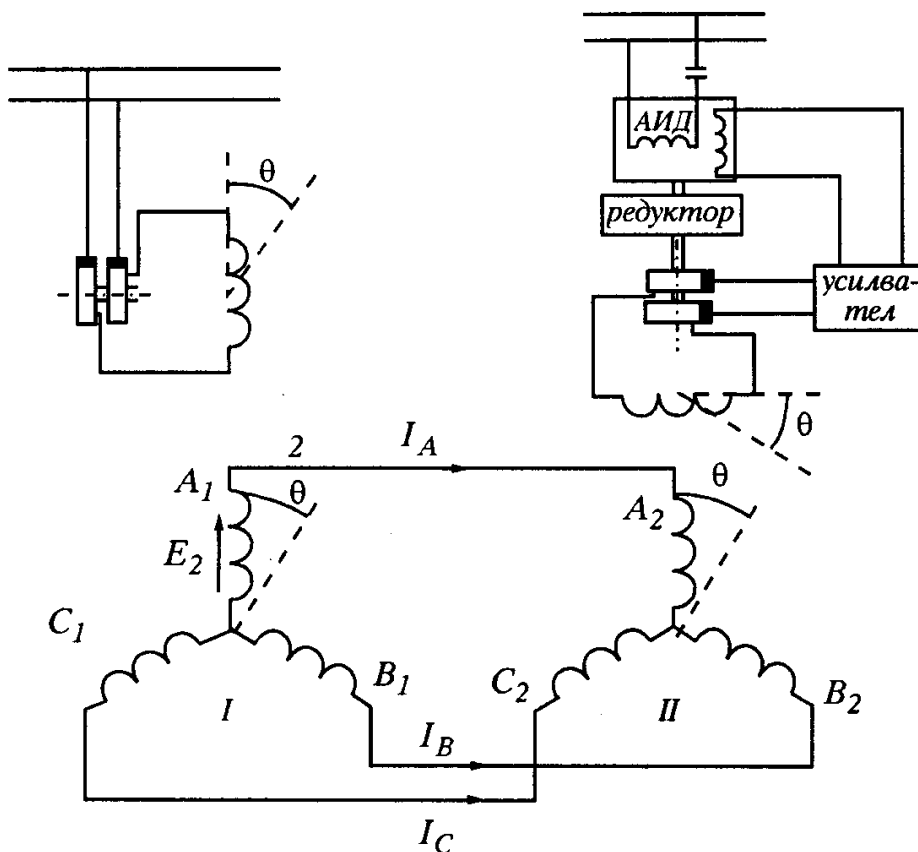
В отделните контури протичат токове, които при взаимодействие с магнитното поле на ротора на селсина-приемник създават синхронизиращ въртящ момент, принуждаващ ротора да се завърти на същия ъгъл ( $\gamma_2 \approx \gamma_1$ ). Стойността на синхронизиращия момент се определя по формулата

$$M = M_m \sin(\gamma_1 - \gamma_2) .$$

Естествено, синхронизацията се извършва с някаква грешка, която, за да бъде по-малка, изисква по-голям максимален момент  $M_m$ . Важна характеристика на селсина е специфичният синхронизиращ момент, който се определя по следния начин:

$$M_{\text{спец. син. м.}} = M_m \sin 1^\circ = 0,0175 M_m .$$

Върху грешката при отработване на ъгъла влияе още съпротивлението на линията, свързваща СД и СП, тъй като при неговото увеличаване ще се намали въртящият момент. Друг фактор е съпротивителният момент на товара, т.е. на вала на селсина-приемник. Тъй като по условие разглежданият режим е индикаторен, този момент трябва да е минимален.



Фиг. 18.18. Работа на селсина в трансформаторен режим

В случаите, когато селсинът-приемник трябва да преодолява съпротивителния момент на определен механизъм, селсините се включват по друга схема, при която СП работи в трансформаторен режим - фиг. 18.18.

Трифазните намотки на СД и СП са включени както по-рано, а оста на ротора на селсина-приемник е перпендикулярна на тази на ротора на селсина-датчик. В това

положение, в статорната намотка на СД се индуцират е.д.н.:

$$\begin{aligned}E_A &= E_\Phi \cdot \cos \theta \quad , \\E_B &= E_\Phi \cdot \cos(\theta - 120^\circ) \quad , \\E_C &= E_\Phi \cdot \cos(\theta + 120^\circ) \quad ,\end{aligned}$$

които в случая не се компенсират с равни и противоположни е.д.н., а създават токове в съответните фази на СД и СП. При  $\theta = 0$  тези токове създават пулсиращо магнитно поле, насочено по оста на фаза А и перпендикулярно на оста на роторната намотка на СП, при което в последната е.д.н. не се индуцира. При завъртане на ротора на СД е.д.н. в неговата статорна намотка се променят и токовете в статорната намотка на СП създават пулсиращо магнитно поле, изместено на ъгъл  $\theta$  спрямо началното положение. В този случай в роторната намотка на СП се индуцира е.д.н. с ефективна стойност

$$E_{\text{ром СП}} = E_\Phi \cdot \sin \theta$$

и честота, равна на честотата на напрежението, което захранва роторната намотка на СД. Напрежението  $E_{\text{ром СП}}$  се подава през контактните пръстени и четките към усилвател, който захранва управляващата намотка на асинхронен изпълнителен двигател. В резултат на това роторът на АИД се завърта и през редуктор движението се предава към ротора на СП. Последният започва да се върти в същата посока както и роторът на СД, докато се нулира действието на пулсиращото магнитно поле, т.е. докато оста на ротора на СП застане перпендикулярно на полето. Мощността на АИД се определя от механизма, който трябва да отработи зададения ъгъл.

Нарастването на  $E_{\text{ром СП}}$  при изменение на ъгъла с  $1^\circ$  се нарича *стръмност* на индуктираното е.д.н. и се определя като

$$\Delta E_{\text{ром СП}} = E_\Phi \cdot \sin 1^\circ = 0,0175 E_\Phi \quad .$$

Стръмността има стойности в границите  $0,5 \div 2 \text{ V/grad}$ .

Селсините, подобно на измервателните уреди, се характеризират с клас на точност, който показва допустимата грешка при отработване на зададения ъгъл в разгледаните режими.

## Деветнадесета глава

### ЕЛЕКТРИЧЕСКИ АПАРАТИ

#### 19.1. Функции и предназначение на електрическите апарати

Електрическият апарат е електрическо съоръжение, което е предназначено за управление, регулиране, преобразуване, контрол и защита на електрическите вериги и електрическите машини.

*Функциите на електрическите апарати*, съобразно предназначението им, са:

1. Управление: включване, изключване, превключване на електрическа верига с определени параметри.

2. Регулиране: разпределение на тока в консуматорите при определена зависимост, изменение на тока във веригата по определен закон, стабилизиране на електрическите величини ток, напрежение и мощност.

3. Контрол: контролиране на параметрите на електрическите величини и формиране на изисквана информация.

4. Защита: защита на товара и електрическите съоръжения от късо съединение, претоварване, изменение на честотата и др.

5. Усилване: усилване на електрическите величини ток, напрежение, мощност в различни видове товари при постоянен и при променлив ток.

6. Преобразуване: преобразуване на параметрите на тока по големина, форма, честота и др., както и на свързаните с тока величини.

#### 19.2. Класификация на електрическите апарати

*Класификацията на електрическите апарати се извършва по следните основни признаци:*

1. По напрежение: по вид на напрежението - постоянно, променливо с промишлена честота, променливо с висока честота; по големина на напрежението - ниско (до 1 000 V), средно (от 1 до 35 kV), високо (от 35 до 220 kV) и свръхвисоко (над 220 kV).

2. По принцип на действие: електромагнитни, електродинамични, електростатични, полупроводникови, с топлинно действие и др.

3. По условия на работа: нормални, тропически, морски, условия на взривоопасност, условия на пожароопасност и др.

4. По степен на автоматизация: с ръчно управление, с полуавтоматич-

но и автоматично управление.

5. По функционално предназначение: управление, регулиране, контрол и защита, усилване и преобразуване.

Съществуват и други признаци на класификация: условия за експлоатация, начин на комутиране, електронизация на възли и др.

### 19.3. Електромагнитни механизми

#### 19.3.1. Електромагнитни сили между феромагнитни полюси

Електромагнитните силови взаимодействия лежат в основата на принципа на действие на електромагнитните механизми, които намират много широко разпространение в различни области на техниката.

Използваните електромагнитни механизми, наричани често електромагнити, имат разнообразни конструкции и характеристики.

От физическа гледна точка работният процес в електромагнитните механизми се свежда до преобразуване на електрическата енергия в механическа, което представлява работа, извършвана при преместване на подвижната им част - котвата.

На фиг. 19.1а и фиг. 19.2а са показани две от най-използваните конструкции в електрическите апарати:

Електромагнитът се състои от възбудителна намотка и магнитопровод (магнитна верига). Намотката е навита от изолиран проводник върху скелет (макара) с кръгло, квадратно или правоъгълно сечение.

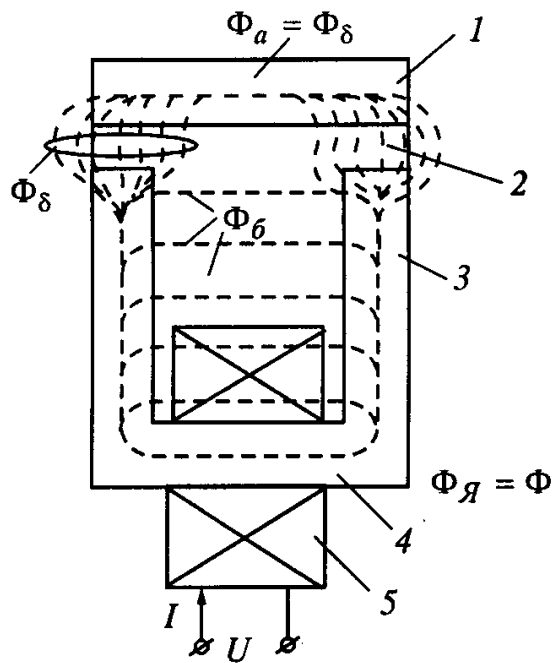
На фиг. 19.1б е дадена още еквивалентната схема на магнитната верига на апарата. Поради относително големите въздушни междини, тук трябва да се отчита и потокът на разсейване,  $\Phi_{\sigma}$ . След включване на бобината към източник на постоянно напрежение токът достига установена стойност  $I$ , която се определя само от активното съпротивление на бобината. Запазената в нея енергия във вид на магнитно поле е

$$(19.1) \quad W_{\text{маг}} = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2 \quad .$$

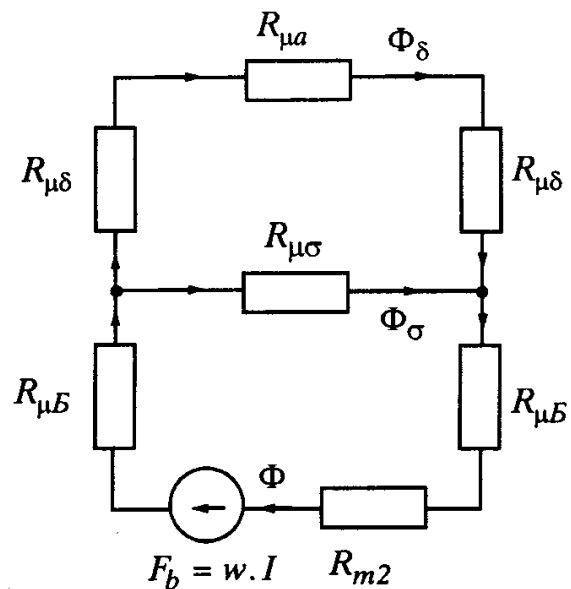
Както бе показано в гл. IV, т. 4.2:  $L = w^2/R_{\mu}$ , където  $w$  е брой на навивките, а  $R_{\mu}$  - магнитно съпротивление.  $R_{\mu}$  в разглежданата конструкция се определя главно от съпротивлението на двете въздушни междини, което е значително по-голямо от това на железните участъци и може да се приеме,

че  $R_{\mu} = \frac{2\delta}{\mu_0 S_{\delta}}$ . След заместване във формула (19.1) се получава

$$W_{\text{маг}} = \frac{1}{2} (wI)^2 \frac{\mu_0 \cdot S_{\delta}}{2\delta} \quad .$$



a)



б)

**Фиг. 19.1. Магнитна верига и електрическа заместваща схема на електромагнит:**  
 1 - котва; 2 - въздушна междина; 3 - бедро; 4 - ярем; 5 - намотка

Ако е възможно преместване на подвижната част на магнитопровода, т.е.  $\delta$  е променлива, то силата на привличане, която действа на подвижната част, може да се определи като

$$(19.2) \quad F_{\text{мех}} = \frac{dW_{\text{маг}}}{d\delta} = \frac{1}{4} (wI)^2 \frac{\mu_0 \cdot S_{\delta}}{\delta^2} .$$

### Пример 19.1:

Какъв ток е необходим, за да се създаде сила 1N в електромагнитния механизъм от фиг. 19.1a, при условие, че  $\delta = 1 \text{ mm}$ , сечението на магнитопровода е  $4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ ,  $w = 200$ . Потоците на разсейване да се пренебрегнат, а съпротивлението на железните участъци да се счита равно на нула.

### Решение:

Използва се формулата за  $F_{\text{мех}}$ . Заместват се известните числени стойности:

$$1 = \left(\frac{1}{4}\right) \cdot 200^2 I^2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{4 \cdot 10^{-4}}{(1 \cdot 10^{-3})^2} ,$$

$$I = 1,6 \cdot \pi \cdot I^2 ,$$

откъдето

$$I = 0,446 \text{ A} .$$

### 19.3.2. Статични характеристики на електромагнитните механизми

Определят се при неподвижна котва или при условие, че тя се движи с малка скорост. Всъщност, необходимо е електромагнитните процеси в механизма да се определят само от положението на котвата и да не се влияят от скоростта на движението ѝ.

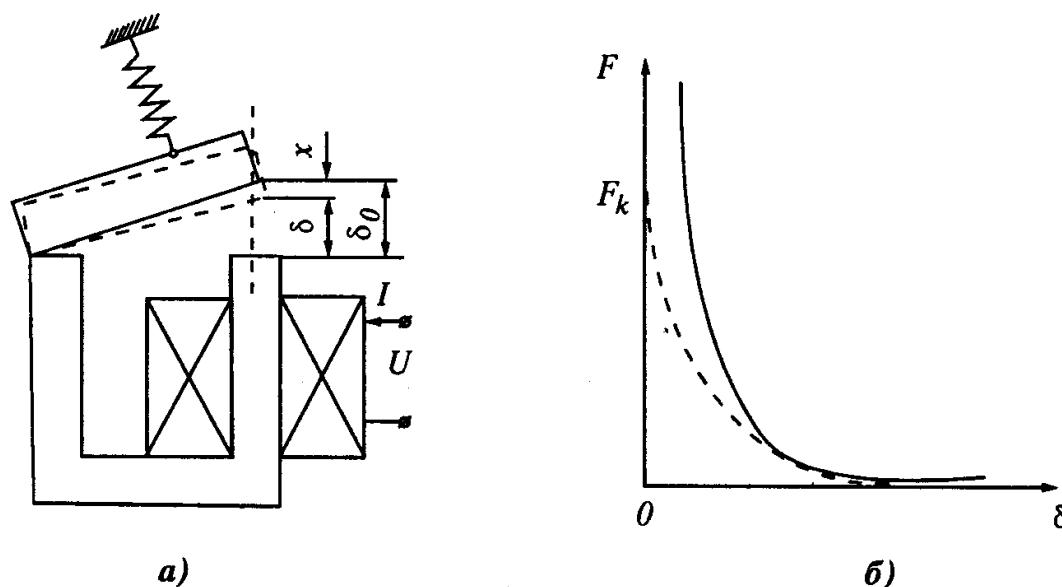
*Най-важните статични характеристики на електромагнитните механизми са следните:*

#### 1. Електромеханична (тягова) характеристика:

Представлява зависимостта на електромагнитната сила,  $F$  от положението на котвата,  $\delta$  при неизменна стойност на приложеното напрежение или на тока в намотката на електромагнита:

$$(19.3) \quad F = f(\delta) \quad \text{при} \quad U = const, \quad \text{респ.} \quad I = const.$$

Видът на тази характеристика се определя от формула (19.2) и е показан на фиг. 19.2б. Тя зависи още и от конструкцията на електромагнитния механизъм и захранването на бобината. Както следва от формулата, при  $I = const$ , когато  $\delta \rightarrow 0$ , силата се стреми към безкрайност. В действителност обаче това не е възможно, тъй като при  $\delta = 0$  магнитното съпротив-



Фиг. 19.2. Магнитна верига и статична тягова характеристика на електромагнит, клапанен тип

ление  $R_\mu$  се определя от съпротивлението на железните участъци, което по-рано беше пренебрегнато. Реалната тягова характеристика е показана с пунктирна линия на същата фигура.

Като се пренебрегне влиянието на краевия и разсеяния поток, електромагнитната сила за произволно положение на котвата може да се определи от формулата на Максвел:

$$(19.4) \quad F = \frac{1}{2} \frac{\Phi_\delta^2}{\mu_0 \cdot S} = \frac{B_\delta^2 \cdot S}{2\mu_0} ,$$

където  $B_\delta$  е индукцията във въздушната междина,  
 $S$  - сечение на магнитопровода.

### 2. Товарна характеристика

Представлява зависимостта между електромагнитната сила и стойността на напрежението, приложено на котвата (или на тока през намотката) при определено положение на котвата  $\delta$ :

$$(19.5) \quad F = f(U) , \quad F = f(I) \quad \text{при} \quad \delta = const.$$

При идеализираните условия на разглеждане на тази характеристика, тя представлява уравнение на хипербола от втора степен.

### 3. Условна полезна работа (условна работоспособност)

Определя се с интеграла от произведението на електромагнитната сила и възможния ход на котвата (фиг. 19.3):

$$(19.6) \quad A_y = F \cdot (\delta - \delta_{кр}) ,$$

където  $\delta - \delta_{кр}$  е възможният ход на котвата,

$\delta_{кр}$  - въздушната междина при затворена котва.

Дефинира се още и номинална условна полезна работа,  $A_H$ . Тя се посочва от завода-производител чрез лицето на опростена фигура (правоъгълник, трапец). За даден електромагнитен механизъм номиналната условна работа има максимум за определен ход на котвата.

За да се извърши избор на определен електромагнитен механизъм, е необходимо да се познават и други характеристики, като характеристика на загряването, маса за единица условна полезна работа и др., които пряко зависят от конструкцията на електромагнитния механизъм.

## 19.4. Електрически контакт

### 19.4.1. Общи сведения и определения

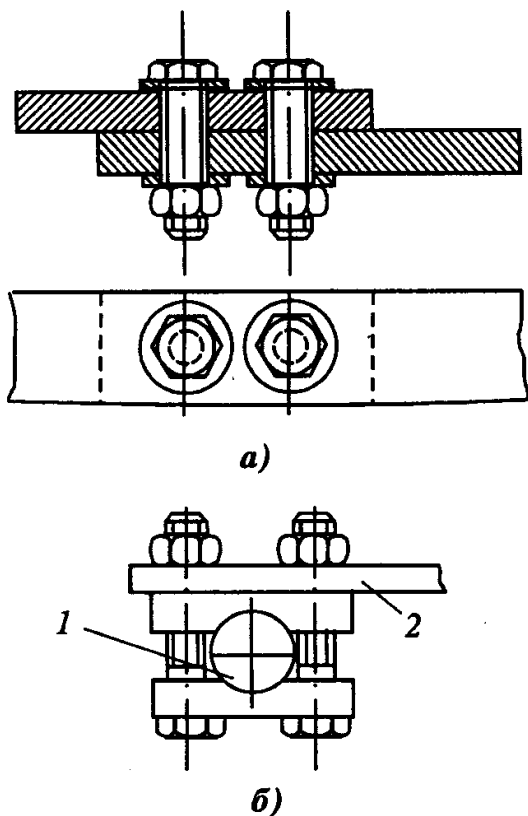
Електрическият контакт е звено от електрическата верига, което има възможност да я затваря или да я прекъсва, когато в нея тече или не електрически ток.

Двата тоководещи елемента, между които се осъществява електрическият контакт, се наричат контактни тела, а тяхната съвкупност - контактното съединение. За осъществяване на електрическия контакт е необходимо двете контактни тела да бъдат притиснати едно към друго с механична сила, която се нарича контактен натиск.

В зависимост от предназначението им, контактните съединения се разделят на три големи групи:

**1. Неподвижни (свързващи) контактни съединения.** Служат само за съединяване на различни звена от електрическата верига между неподвижни части в места, където не е необходимо да се правят изключвания за прекъсване на тока. Тези контактни съединения имат само едно работно състояние - включено.

Неподвижните контакти, които се използват в електрическите апарати, са много разнообразни. Два типични примера са показани на фиг. 19.3.



Фиг. 19.3. Неподвижни контактни съединения: а - болтово съединение на шини; б - контакти на релета с плоски пружини

Неподвижните контакти, които се използват в електрическите апарати, са много разнообразни. Два типични примера са показани на фиг. 19.3.

Неподвижните контактни съединения трябва да гарантират продължителна надеждна работа на уредбите, в които участват. Това може да се постигне, ако електрическото съпротивление на контакта е неизменно. Подобно изискване може да се удовлетвори при положение, че контактният натиск се запази постоянен по време на експлоатацията и състоянието на контактните повърхности, физичните и химичните свойства на материала на контактните тела не се променят.

**2. Подвижни (комутиращи) контактни съединения.** Служат за включване, изключване и превключване на електрическите вериги. При работа те могат да бъдат във включено, в изключено или в междинно (в процес на включване или



на изключване) състояние.

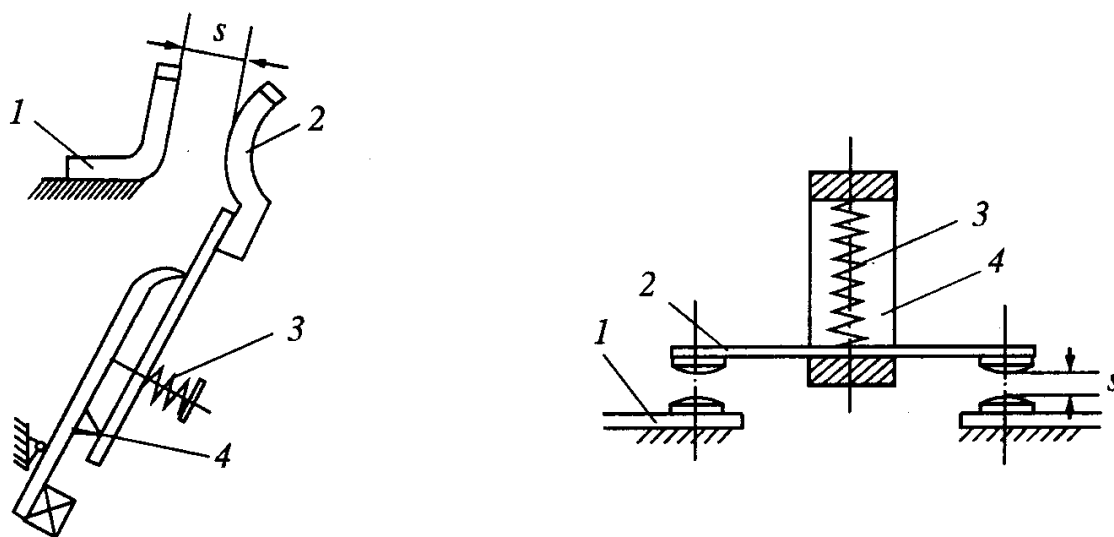
Подвижните контактни съединения са главна съставна част на комутационните апарати и имат голямо разпространение и много конструктивни разновидности. По предназначението си в силнотокните апарати те се делят обикновено на работни (главни) и дъгогасителни:

Работните контактни съединения се шунтират от дъгогасителните, като при прекъсване на веригата главните се прекъсват по-рано и електрическата дъга се образува между дъгогасителните. По този начин работните контакти се предпазват от действието на дъгата.

Контактните тела на подвижните контактни съединения са подвижни - тези, които са свързани с подвижната част на апарата, и неподвижнисвързаните с основата на апарата и оставащи неподвижни по време на включване и изключване.

Контактният натиск при подвижните контактни съединения се осъществява обикновено от пружини, наречени контактни. Те се проектират така, че да бъдат напрегнати и преди контакта и да осъществяват т. нар. предварителен контактен натиск.

На фиг. 19.4 са показани някои видове подвижни контактни съединения.



Фиг. 19.4. Контактна система на контактор: 1 - неподвижно контактено тяло; 2 - подвижно контактено тяло; 3 - контактна пружина; 4 - подвижно контактено звено;  $s$  - разтвор за контактната система

**3. Плъзгащи контактни съединения.** Служат за осъществяване на електрическа връзка между части, които се движат една спрямо друга. Типичен пример за такова контактено съединение е контактът между тролите и тролейните проводници при електрическите превозни средства. Нормално те са във включено състояние и поради това често се разглеждат като разновидност на неподвижните контактни съединения.

#### 19.4.2. Явления при контактуването

• **Контактно съпротивление.** Появата на контактното съпротивление,  $R_K$  се дължи главно на две причини: Първата е свързана със замърсяванията и окисите върху контактните повърхности, които водят до увеличаване на съпротивлението на електрическата верига. Втората, не по-маловажна, причина се състои в това, че при притискането на двата проводника допирането се осъществява не с целите повърхности,  $s$ , а само с отделни площадки, наречени допирни точки, чиято сумарна площ  $s_D$  зависи от големината на контактния натиск и механичното напрежение на смачкване на материала, с други думи, от неговите физични свойства. При това картината на разпределението на тока се изменя и в сравнение с целия проводник напречното сечение не се използва напълно ( $s_D < s$ ). Именно това води до увеличаване на съпротивлението във веригата.

Прието е съпротивлението, дължащо се на окиси и замърсявания върху контактните повърхности, да се нарича повърхностно контактното съпротивление ( $R_{KПОВ}$ ), а това, свързано с деформацията на токоразпределението - преходно контактното съпротивление ( $R_{KПР}$ ).

$$(19.7) \quad R_K = R_{KПОВ} + R_{KПР} .$$

Силно влияние върху контактното съпротивление оказва контактният натиск. Увеличаването му води до намаляване на контактното съпротивление, тъй като се изтласкват замърсяванията, разрушават се окисните слоеве, увеличава се броят на допирните точки и се увеличава общата допирна площ на контактните тела.

Контактното съпротивление на електрическите контакти трябва да бъде малко. Това се налага от редица съображения - да не се изменят параметрите на дадена верига от гледна точка на загряването на контактното съединение и др.

• **Материали за контактни тела.** Съществуват три основни вида материали, които се употребяват за контактни тела - метали, метални сплави и металокерамични материали. Най-широко приложимите метали, като материали за контактни тела за силнотокowi апарати, са медта и среброто. Те имат добра топлинна и електрическа проводимост, но са меки и не са устойчиви на износване. И двата материала се окисляват силно, а окисите увеличават контактното съпротивление. В това отношение среброто има предимството, че при загряване окисите му се разлагат, контактните тела се самопочистват и контактното съпротивление остава почти неизменно. В медните контактни тела при загряване контактното съпротивление се

увеличава. По-голямо приложение намира среброто, а медта, за да се избегне окисляването, се покрива с други метали - сребро, кадмий или никел. Алюминият също може да бъде използван, но за неподвижни контактни съединения, и то посребрени или помеднени, тъй като в противен случай контактните тела се окисляват силно.

Като материали за маломощни контактни тела се използват среброто, златото (във вид на галванични покрития), паладият, волфрамът, алюминият и някои сплави.

От металните сплави намират приложение сплавите на среброто с малки примеси на мед или кадмий, които повишават твърдостта на контактните тела и ги правят устойчиви на заваряване.

Металокерамичните материали представляват обикновено композиции от два компонента: единият - материал с висока електрическа проводимост, а другият - труднотопим материал. Сред тях с добри свойства са композициите от сребро и кадмиев окис, от сребро и никел, от сребро и графит, от мед и волфрам, и др.

Най-съществено влияние върху контактното съпротивление оказва преминаващият през съединението електрически ток.

Влияние върху контактното съпротивление оказват и някои процеси, свързани с експлоатацията на контактната система: процесите на електротермична, електрохимична и механична ерозия на контактните тела.

Основният критерий за качеството и състоянието на една контактна система е безспорно стойността на контактното съпротивление и неговото изменение при експлоатацията на контактната система.

## 19.5. Електрическа дъга

### 19.5.1. Общи сведения

• *Комутацията* на електрическите вериги представлява съвкупност от внезапни промени на тока в тях. Внезапните промени представляват обикновено включвания и прекъсвания, които се осъществяват с помощта на комутационните електрически апарати, които могат да бъдат контактни и безконтактни.

Качеството на комутацията на електрическите вериги се определя от времето и дълбочината на комутацията, и от комутационните пренапрежения, а за контактните апарати, при които се появява дъга или искра - от обема на йонизираните газове, електрическото износване на контактите, звуковите и светлинни ефекти при гасеното на дъгата и др.

• *Дълбочината на комутацията* представлява отношение на съпротивлението между контактните повърхности в изключено ( $R_{изкл.}$ ) и вклю-

чено ( $R_{вкл.}$ ) състояние:

$$h_K = \frac{R_{изкл.}}{R_{вкл.}}$$

и дава възможност да се прецени качеството на прекъсването. При контактните апарати  $h_K = 10^{12} - 10^{14}$ , а при безконтактните  $h_K = 10^4 - 10^7$ .

• **Времето на комутацията** се определя от продължителността на процеса включване или изключване, която трябва да бъде минимална. Времето на комутацията обикновено е 0,01 - 0,1 s.

Най-труден и определящ за електрическите апарати е стадият **изключване на веригата**. При изключването натрупаната в системата електромагнитна енергия трябва да се изразходва. Това означава, че магнитното поле, създадено в бобините на електромагнитните устройства или най-малко около проводниците, с прекъсването на тока трябва в същия момент да стане нула, което е невъзможно. Но неговото рязко намаляване е причина в тях да се индуцира е.д.н., чиято стойност е от порядъка на стотици волтове

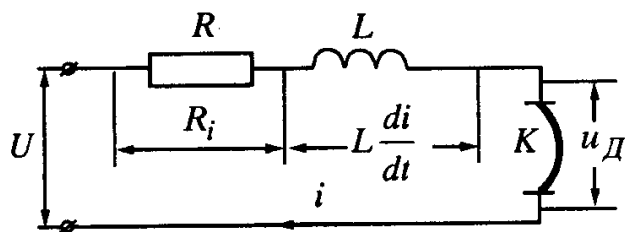
$$\left( e = -L \cdot \frac{di}{dt} \right).$$
 Наличието на толкова високо напрежение между разделящите

се контактни повърхности е причина в газовата среда да възникне електрически разряд - **тлеещ** или във вид на **електрическа дъга**:

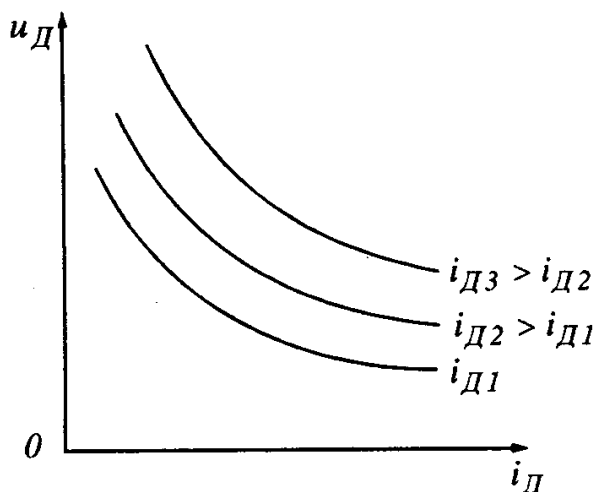
**Тлеещ разряд** възниква в случаите, когато прекъсваният ток е по-малък от 0,1 А, а напрежението - сравнително високо.

**Електрическата дъга** е частен случай на електрически разряд в газова среда, при който между двойката разделени електроди протича ток. Този ток се определя от токоносителите - електрони, йони, частици разтопен метал и др., които се намират в пространството между електродите или възникват по различни причини. Дъговият разряд възниква при големи токове. Температурата в централните части на дъгата е много висока - при електрическите апарати може да достигне  $6\ 000 \div 18\ 000^\circ\text{C}$ . Дъгата престава да гори, ако се нарушат условията, при които е възможен този вид електрически разряд. Това може да се постигне чрез дейонизиране на междината между контактите или чрез удължаване и разкъсване на дъгата. След изгасване на дъгата междуконтактното пространство се превръща в изолатор с определено пробивно напрежение и изолационно съпротивление.

Появата на електрическа дъга при изключване затруднява условията на комутация на електрическите вериги. Процесът се удължава, настъпва разрушаване на контактните тела, възможен е пожар в изолацията и др. Ето защо в електрическите апарати се вземат винаги мерки за нейното бързо и



Фиг. 19.5. Схема на изключван контур



Фиг. 19.6. Статична характеристика на електрическата дъга

ефикасно гасене.

Електрическата дъга възниква и при включване - когато разстоянието между контактните тела се намали дотолкова, че да се получи пробив. Тя продължава да гори, докато контактите се допират. Възможно е да се запали неколккратно през времето на вибриране на контактната система, но допълнителни мерки за нейното изгасяване не се предвиждат.

• **Условия за горене и изгасяване на дъгата.** В най-простия случай изключваният контур може да се състои от последователно свързани резистор,  $R$ , индуктивен елемент,  $L$  и контактната система на изключващия апарат,  $K$ , включени към източник с напрежение,  $U$  (фиг. 19.5). Режимът на работа на тази електрическа верига при изключване се определя от уравнението

$$(19.8) \quad u = Ri + L \frac{di}{dt} + u_D .$$

Решаването на (19.8) е възможно, ако са известни коефициентите  $R$  и  $L$ , и зависимостта  $u_D = f(i_D)$ , наречена статична характеристика на дъгата. Тази функция е нелинейна и практически не може да се опише аналитично, тъй като напрежението между електродите, където гори електрическата дъга (напрежение на дъгата), зависи от много фактори, а не само от нейния ток. Статичната характеристика на дъгата е показана на фиг. 19.6. Намалването на напрежението при увеличаване на тока се обяснява със засилването на йонизацията след запалването и по време на горенето на дъгата. При това положение напрежението, при което дъгата гори устойчиво, е по-ниско. При неизменни други условия напрежението на дъгата е по-високо, когато нейната дължина  $l_D$  е по-голяма.

### 19.5.2. Дъгогасителни устройства

Дъгогасителното устройство е съставна част на комутационните електрически апарати и е предназначено да осигури условия за бързо изгасява-

не на електрическата дъга, без получаване на опасни пренапрежения при малко износване на контактните тела. На практика всички апарати имат дъгогасителни устройства.

Видовете дъгогасителни устройства и начините за осигуряване на условията за изгасяване на електрическата дъга са доста разнообразни. Тук ще бъдат разгледани някои от тях:

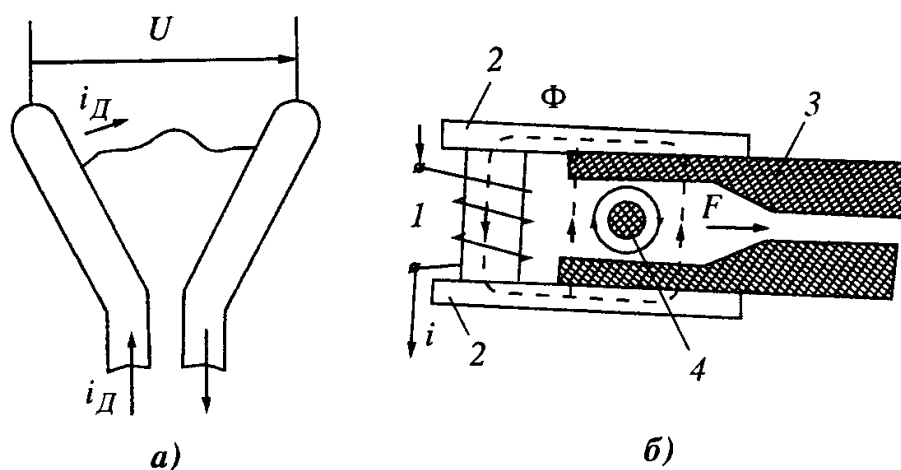
### 1. Просто прекъсване на дъгата

Този начин се прилага при апарати за постоянен ток до 10 А и за променлив ток до  $60 \div 70$  А. Изключването се извършва в спокоен въздух, като дължината на дъгата се увеличава чрез увеличаване на разстоянието между контактните тела. Охлаждането е естествено - от въздуха и неговото естествено топлинно движение спрямо дъгата.

### 2. Продуване на дъгата с въздушна струя

Този начин може да се осъществи при наличие на вентилационна или компресорна уредба, която се включва преди разделянето на контактните тела. Под нейно влияние дъгата се охлажда, удължава и разкъсва.

### 3. Въздействие върху дъгата с магнитно поле

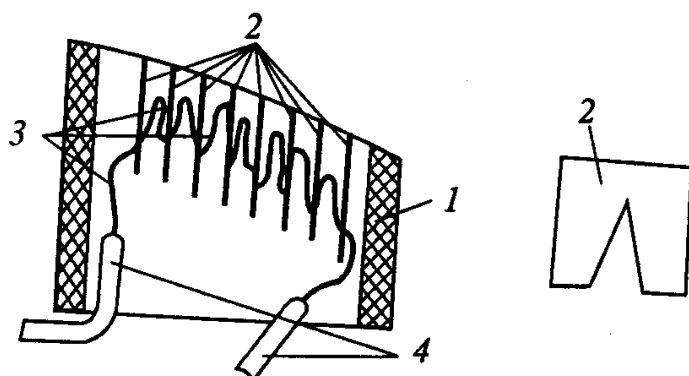


Фиг. 19.7. Гасене на дъгата с магнитно поле: 1 - дъгогасителна намотка; 2 - магнитопровод; 3 - дъгогасителна камера; 4 - електрическа дъга

Принципът на гасенето почива върху получаването на електродинамични сили, които се стремят да разтегнат електрическия контур. В някои случаи за погасяването е достатъчна силата, получена от взаимодействието на тока и собственото магнитно поле на дъгата (фиг. 19.7а), понякога е „канализирано“ с по-

мощта на допълнителни феромагнитни елементи в близост до контактните тела. В други случаи магнитното „продуване“ се усилва с помощта на допълнително напречно магнитно поле, създадено от специална „дъгогасителна“ намотка (фиг. 19.7б). В този случай скоростта на преместване и удължаване на дъгата е голяма, което води до по-силно охлаждане и подобряване на характеристиката  $u_D = f(i_D)$ . Методът се комбинира с използването и на дъгогасителни камери с тесни канали. Дъгогасителната намотка се включва

обикновено последователно на дъгата, защото в този случай е възможно използването на магнитно продухване както при постоянен, така и при променлив ток. При гасене на постояннотокови дъги магнитно продухване може да се осъществи и чрез използване на постоянен магнит вместо електромагнит.



**Фиг. 19.8.** Дъгогасителна камера с дейонна решетка: 1 - дъгогасителна камера; 2 - дъгогасителни пластини; 3 - електрическа дъга; 4 - електрически контакти

Дъгогасителните камери с дейонна решетка са разпространени по-широко в комутационните апарати за променлив ток и ниско напрежение. При променлив ток са необходими по-малък брой пластини и, следователно, камерата е по-лека и по-евтина - фиг. 19.8.

#### 19.6. Електрически апарати за управление

Електрически апарати за управление са тези, чрез които се осъществява пускане, защита и управление на конкретни консуматори: контролери, командоапарати, реостати, контактори и релета за управление, защита и автоматика.

По-голямата част от електрическите апарати от тази група са предназначени за чести включвания. Поради това, освен комутационна способност, те трябва да имат и определена износоустойчивост.

**Контролерът** е многопозиционен апарат с ръчно управление, който служи за превключване под товар във веригите на двигателите при спазване на строго определена последователност на превключването. Следователно той може да бъде разглеждан като съвкупност от прекъсвачи, свързани механично помежду си. Контролерът има предимство пред другите ръчни прекъсвачи, тъй като изискваната последователност на превключване се осъществява много просто и сигурно. Контролерите с резистори се използват за пускане на двигатели със средна мощност.

#### 4. Дъгогасителни камери

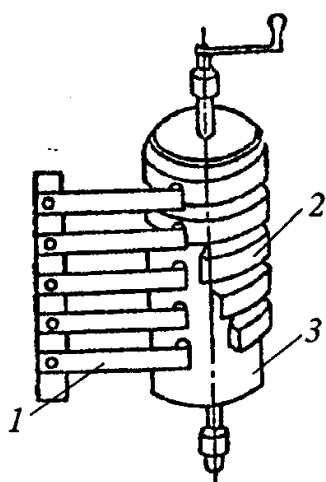
Предназначението на дъгогасителните камери е да се канализира и удължи дъгата и да се ограничи зоната на разпространение на йонизирани газове, с което се създават и по-благоприятни условия за изгасяването ѝ. Дъгогасителните камери се използват много широко - практически при всички комутационни апарати за токове, по-големи от 10 А.

Конструкцията на контролерите е проста и сигурна, изолирането на частите под напрежение става лесно, размерите на целия апарат не са големи. Поради това контролерите се използват широко във всички области на електрозадвижването.

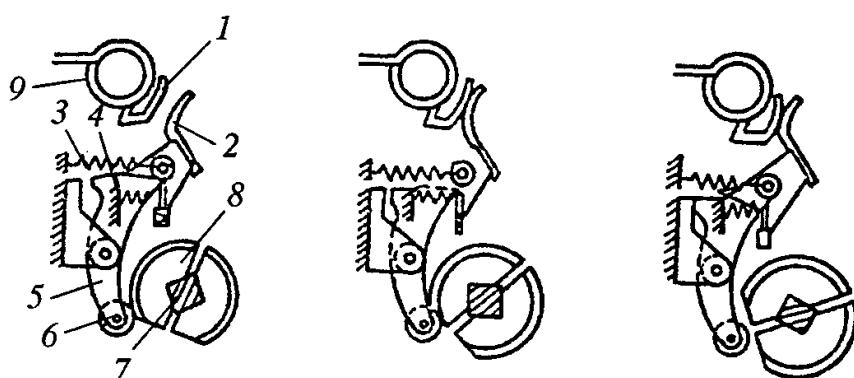
Според конструкцията си контролерите се делят на барабанни, ексцентрикови (гърбични) и плоски:

**Барабанните контролери** (фиг. 19.9) се състоят от неподвижни контакти 1, закрепени на изолирана щанга, и вал 3, върху който във вид на сегменти са разположени подвижните контакти 2. При въртене на барабана, в зависимост от разположението на подвижните контакти върху него, различните контактни двойки се затварят в определена последователност и могат да бъдат включени с различна продължителност. Барабанните контролери се използват за включвания до 250 за броя в час.

На фиг. 19.10 е показано действието на **ексцентриковия контролер** и се вижда процесът на затварянето на една двойка контакти (неподвижен - 1, подвижен - 2). Движението на подвижния контакт се осъществява от ексцентрика 8, разположен върху вала 7 и пружините 3 и 4. Останалите елементи са ролката 6, която се търкаля по ексцентрика и облекчава движението на системата, и лостът 5, чрез който се предава движението на вала до подвижния контакт. Когато ролката 4 се търкаля по дъгата на гърбицата 8, контактите са отворени, но щом попадне в изреза ѝ, подвижният контакт се приближава под действието на пружините до неподвижния и веригата се затваря. Тази конструкция позволява да се монтират върху вала голям брой ексцентрици с различно разположение и съответни контактни системи. Този вид контролери се изработват за по-голям брой включвания в час - до 600, защото контактната им система има по-голяма износоустойчивост.



Фиг. 19.9. Барабанен контролер



Фиг. 19.10. Ексцентриков контролер



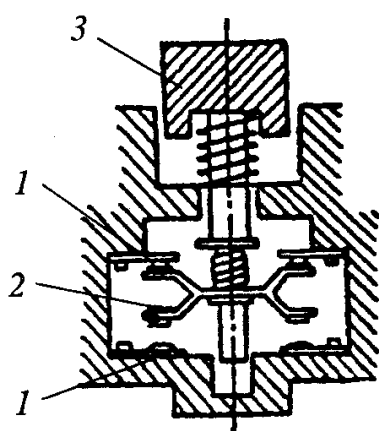
При *плоските контролери* неподвижните контакти са разположени в една равнина, а подвижните се плъзгат върху тях.

### 1. Командоапарати

Командоапаратите са съоръжения, предназначени за превключване във веригите за управление на силовите електрически апарати (контакторите). Понякога те се използват и за непосредствено пускане на електрически машини с малка мощност, за включване на електромагнити и други съоръжения. Командоапаратите могат да се управляват ръчно - с бутони, ключове, командоконтролери, или да се привеждат в действие от контролирания механизъм - пътни превключватели.

### 2. Бутони за управление

Това са най-простите командоапарати. Използват се в различните схеми за пускане, спиране и реверсиране на двигателите, за включване и изключване на веригите на електромагнитите на контакторите, които комутират главни вериги. На фиг. 19.11 е показано устройството на бутон за управление: неподвижни контакти 1, подвижни - 2, бутон 3. Бутоните се изработват за напрежение до 500 V (постоянно и променливо), но не са предназначени за прекъсване на големи токове - променлив ток до 3 A (500 V), а постоянен - до 0,15 A (при 440 V).



Фиг. 19.11. Бутон за управление: 1 - неподвижни контакти; 2 - подвижни контакти; 3 - бутон

### 3. Контактори

*Предназначение и общи изисквания към контакторите:*

*Контакторите* са комутационни апарати, предназначени за чести включения и изключения в електрическите вериги при натоварване. Управляват се дистанционно. Затварянето на контактите им може да се осъществява чрез електромагнитно, пневматично или хидравлично задвижване. Най-голямо разпространение имат електромагнитните контактори, които са два вида: постояннотокови - еднополюсни, и променливотокови, обикновено триполюсни.

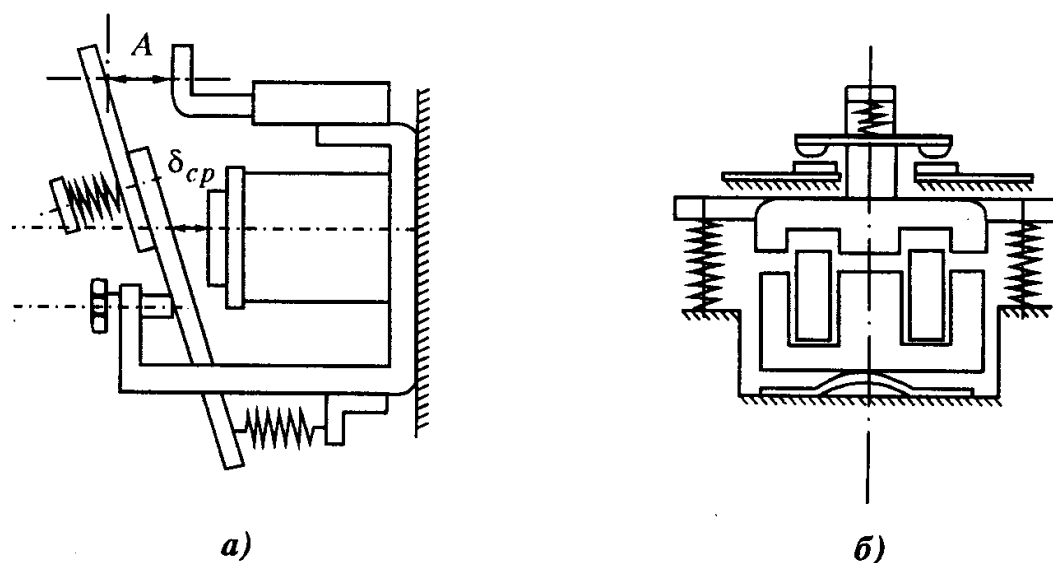
*Контакторите за постоянен ток* са предназначени да комутират (включват и изключват) постояннотокови вериги и имат електромагнит за постоянен ток.

*Променливотоковите контактори* комутират променливотокови ве-

риги. Техният електромагнит е за променлив ток, но при отговорни изпълнения е за постоянен ток.

Наред с високата механична и електрическа износоустойчивост, контакторите трябва да имат малки размери и маса.

При подаване на напрежение към бобината на електромагнита в него се създава магнитно поле и се привлича подвижната му част, наречена котва. Подвижният контакт, свързан с котвата, затваря или изключва главната верига - фиг. 19.12. Дъгогасителната система осигурява бързо гасене на дъгата, което спомага за намаляване на износването на контактите. Освен главните контакти, контакторът има няколко допълнителни маломощни контакти (блок-контакт) за съгласуване на работата на контактора с другите апарати, а също и термична защита.



Фиг. 19.12. Конструктивни схеми на контактори: а) контактор с ротационно движение на контакторната система; б) контактор с постъпателно движение на контакторната система

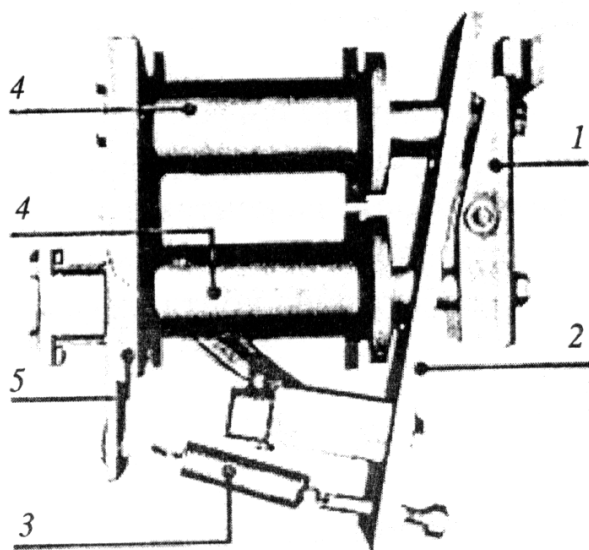
#### А. Контактори за постоянен ток

Постояннотоковите контактори се произвеждат в голямо разнообразие по номинален ток, напрежение, брой на контактите и конструктивно изпълнение - фиг. 19.13.

Основен параметър, който определя габаритите на контактора, е неговият номинален ток. Това е токът, за който са оразмерени контактите му и при който е гарантирана тяхната електрическа износоустойчивост.

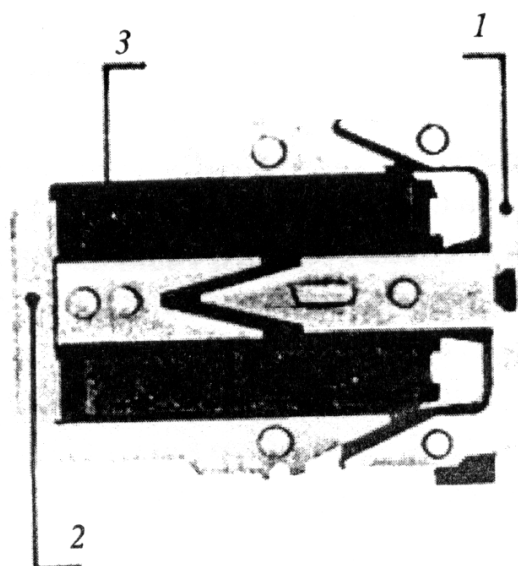
Контактите на апарата са подложени на най-силно електрическо и механично износване поради големия брой включвания и тежките условия на работа. За предотвратяване на вибрациите на контактите контактната пружина трябва да създава необходимия контактен натиск. Неподвижният контакт трябва да бъде закрепен твърдо. Пружината, която служи за изключване

*Електромагнит на постоянотоков контактор с ротационно движение на контактната система*



1. Ограничител на движението на подвижната част на магнитната верига.
2. Котва.
3. Възвратна пружина.
4. Бобина.
5. Неподвижна част на магнитната верига.

*Електромагнит на постоянотоков контактор с постъпателно движение на контактната система*



1. Подвижна част на магнитната верига.
  2. Неподвижна част на магнитната верига.
  3. Бобина.
- Възвратната пружина не е изобразена на тази схема.*

Фиг. 19.13

на контактора след прекъсване на управляващия ток в неговата бобина, се нарича възвратна. Тя трябва да осигурява голяма скорост на изключване, за да може възможно най-бързо да се изгаси дъгата, която се поражда между контактите.

В контакторите за постоянен ток се предвижда обикновено магнитно продухване на дъгата за ускоряване на изгасването ѝ. За целта в дъгогасителните камери се вграждат постоянни магнити.

Електромагнитната система на контактора се състои от електромагнит, чийто магнитопровод служи за закрепване на редица детайли. Подвижната част - котвата на електромагнита, се привежда в движение от силата на привличане, която електромагнитът създава при подаване на сигнал, и от възвратната пружина, когато сигналът се прекъсне. Към котвата на електромагнита са закрепени подвижният контакт и тоководещият елемент, който представлява в повечето случаи гъвкаво медно въже.

*Блок-контактите* са свързани обикновено с главната контактна система и при включването или при изключването им включват или прекъс-

ват веригите на други апарати.

Намотките на електромагнитите се предвиждат за различни напрежения, обикновено в границите  $24 \div 80 \text{ V}$ , но могат да бъдат и за по-високи - до  $220 \text{ V}$ . Напреженията на силовите вериги, които контакторът може да прекъсва, са също различни. В зависимост от тях е и конструкцията на дългогасителната система. Ето защо при избор на контактори трябва да се имат предвид условията, при които те ще работят.

Важен показател за контакторите е времето за включване и за изключване. Например общото време за включване на контакторите е около  $0,08 \text{ s}$ , а времето за изключване -  $0,03 \div 0,05 \text{ s}$ . Този показател определя дали контакторът е бързодействащ или не - условие, важно за системите на задвижване и регулиране.

### ***Б. Контактори за променлив ток***

Контакторите за променлив ток служат за същите цели, както и контакторите за постоянен ток, и се състоят практически от същите възли. На фиг. 19.14 е показано принципното устройство на променливотоков контактор.

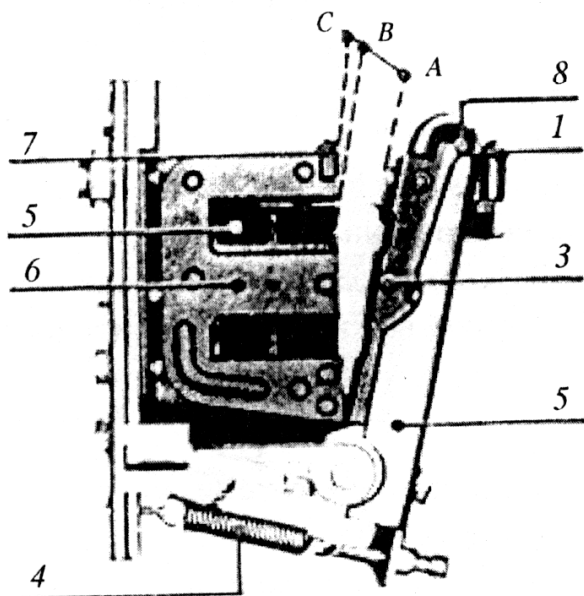
Електромагнитът след включване на намотката му към напрежение привлича котвата. Котвата е свързана с вала на контактора и чрез него с контактната система, чиито контакти се намират в дългогасителна камера. Заедно с главните контактни тела се задвижват и блок-контактите.

Наред с приликата си с контакторите за постоянен ток, променливотоковите имат някои особености:

Характерно за намотката на електромагнита на променливотоковия контактор е това, че освен активно, тя има и реактивно съпротивление, като обикновено  $x \gg r$ . Поради това броят на навивките в бобините на променливотоковите контактори е много по-малък от този на постоянно-токовите - приблизително 10 пъти, при еднаква стойност на напрежението. Поради това тяхното активно съпротивление е малко и загубите в намотката - също. Намотката на електромагнита на контактора за променлив ток се загрява допълнително от загубите на енергия, които променливият магнитен поток създава в магнитопровода. Ето защо формата им е такава, че контактът с магнитопровода е малък - те са плоски (с малка височина) и широки.

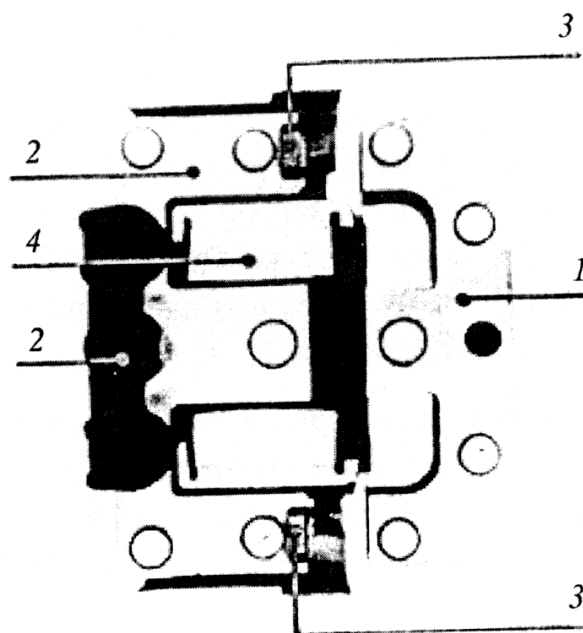
Магнитната система на променливотоковите контактори се изработва от листов стомана заради загубите в нея, а при постоянно-токовите - от плътен материал. За разлика от постоянно-токовите контактори, магнитопроводът на променливотоковите има късосоединена навивка, поставена за намаляване на пулсациите на резултантния магнитен поток и на вибрациите на котвата.

*Електромагнит на променливо-токов контактатор с ротационно движение на контактната система*



1. Ограничител на движението на подвижната част.
2. Подвижна част на магнитната верига.
3. Котва.
4. Възвратна пружина.
5. Бобина.
6. Неподвижна част на магнитната верига.
7. Късосъединена навивка.
8. Успокоител.

*Електромагнит на променливо-токов контактатор с постъпателно движение на контактната система*



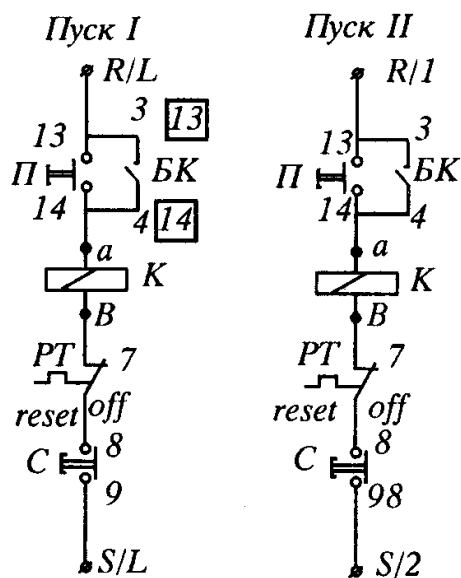
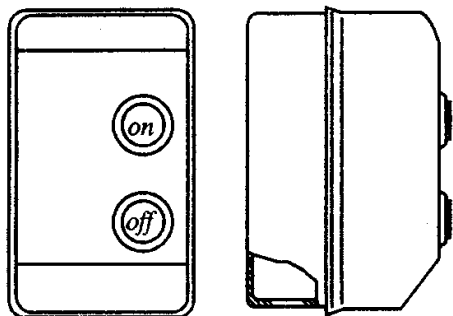
1. Подвижна част на магнитната верига.
  2. Неподвижна част на магнитната верига.
  3. Късосъединена навивка.
  4. Бобина.
  5. Успокоител.
- Възвратната пружина не е изобразена на тази схема.*

**Фиг. 19.14**

Времето за включване и изключване на двата вида контактатори се различава значително. Както пълното време за включване, така и времето за изключване на контактаторите за променлив ток е 2-3 пъти по-малко от съответните времена при постоянно-токовите контактатори.

#### **4. Магнитни пускатели**

Магнитните пускатели се състоят от един или два контактатора и топлинни релета, монтирани заедно - фиг. 19.15. Магнитният пускател с един контактатор се нарича нереверсивен. С магнитните пускатели се осъществява пускането, изключването и защитата на асинхронните електродвигатели.



Фиг. 19.15

ли от самопроизволни пускания при появяване на напрежение, след като е било прекъснато, и защита от претоварване. Магнитният пускател с два контактора се използва и за реверсиране на двигателите, затова се нарича реверсивен.

Пускателите са предназначени за включване и изключване на двигатели, а контакторите комутират произволен товар. По принципно устройство те са аналогични, като в пускателите се вграждат допълнителни елементи за защита.

За подобряване на условията за комутация в електрическите апарати се използват полупроводникови елементи.

### 19.7. Електрически апарати за регулиране

Електрическите апарати за регулиране са предназначени да осигурят

на товара (обект на регулирането) изискваните електрически параметри или величини. Такива могат да бъдат ток или напрежение в схемата на захранване на товара, температура на нагряване на определен обект и др.

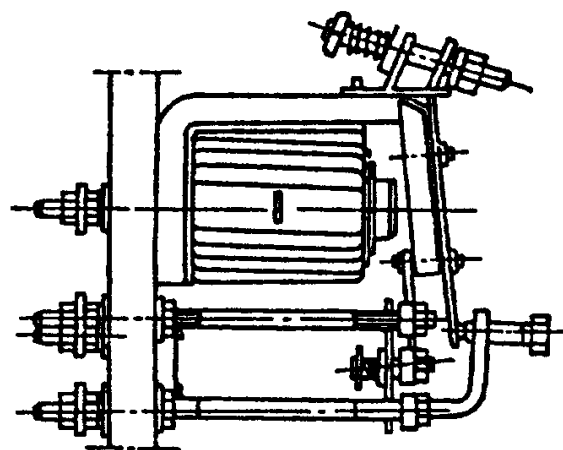
В категорията на електрическите апарати за регулиране съществена област заемат стабилизаторите на ток или напрежение, или мощност.

### 19.8. Електрически апарати за контрол и защита

Електрическите апарати за контрол и защита контролират електрическата или неелектрическата величина на определен входен параметър, като при необходимост и по предназначение могат да извършват и комутация на електрическата верига, при което се постига защитата ѝ.

Контролирането на входния параметър (електрически или неелектрически) се извършва с първичен преобразувател (датчик), в който зависимостта на изходния сигнал от входния има непрекъснат характер. Формирането на изходния сигнал може да бъде скокообразно (релейно), което се постига с включване или изключване на контакт при достигане на контролируемия параметър до зададена величина (контактно реле) или с рязко

изменение на електрическото съпротивление на изхода (безконтактно реле). Сравнението на контролируемата величина със зададената (еталонна) се извършва в измервателен орган, като участващата величина може да бъде ток, напрежение, мощност, фазова разлика и др. Токовото реле реагира на големината на тока, протичащ през намотката му. Релето за напрежение заработва, когато контролируемото напрежение стане по-високо (реле за максимално напрежение) или по-ниско от зададеното (реле за минимално напрежение). Релето за мощност реагира при изменението на мощностите, а посоченото реле за енергия - при изменение на посоката на енергийния поток.



Фиг. 19.16. Постояннотоково електромагнитно реле

#### • Релета

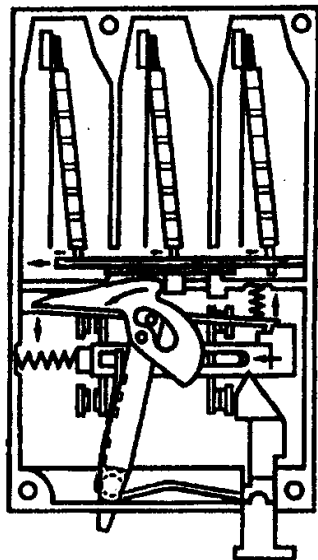
Релето е устройство с дискретно (прекъснато) действие, което има две устойчиви състояния - включено и изключено, 1 и 0. Типичен пример за това е обикновеното контактно електромагнитно реле (фиг. 19.16), което има две устойчиви състояния на входа - наличие или липса на електрически сигнал, и две на изхода - затворени или отворени контакти. Характерно за релето е, че и при плавно изменение на входната (управляващата) величина, изходната (управ-

ляваната) се изменя скокообразно (с отсечка).

Според принципа на действието си електрическите релета са *електромагнитни* (електромеханични), *електронни* (полупроводникови), *магнитни* и др. Могат да бъдат още *хидравлични* (струйни), *пневматични*, *центробежни*, *топлинни* (терморелета), *фоторелета* и т.н. Електромагнитните релета са контактни релета, а електронните и магнитните - безконтактни. Според областта на приложение има релета за автоматиката, за управление и защита на електрозадвижванията и за релейна защита на енергийните системи.

#### • Топлинни релета

Топлинните релета (терморелетата) са наречени така, защото принципът на работата им се базира върху изменението на физичните свойства на някои от техните органи под действието на топлината при нагриването им с електрически ток. Като елементи, които изменят силно свойствата си под действието на температурата, широко разпространение имат биметалните. Биметалът представлява пластина от два метала със силно различава-



Фиг. 19.17. Термично реле

щи се коефициенти на линейно разширение. За това при загряване, поради различното им удължаване, биметалът се изкривява.

На фиг. 19.17 е показано принципното устройство на топлинно реле. То се състои от биметална пластина и нагревателен елемент, през които преминава токът за консуматора. При определено загряване биметалът се изкривява нагоре и отпуска лостчето, което под действието на пружината се наклонява наляво и отваря контактите. След изстиването релето може да бъде върнато в изходно положение чрез натискане на бутона. Съществуват релета, при които възстановяването на изходното положение става автоматично.

### 19.9. Електрически апарати за разпределителни уредби

Електрическите апарати, които се използват в уредбите за разпределяне на електрическата енергия, са два основни вида: прекъсвачи и разединители.

**Прекъсвачите** са комутационни апарати с достатъчно голяма комутационна възможност за включване и за изключване на веригата. Избират се по номинален ток и по т. нар. комутационна възможност, която трябва да бъде по-голяма от тока на късо съединение на клемите им.

Комутационната възможност се оценява числено чрез тока, който може да се комутира.

**Разединителите** са комутационни апарати, с които се разделят видимо части от електрическа мрежа, между които не бива да има електрическа връзка. Разединителите не се оразмеряват за прекъсване на ток, поради което тяхното действие се съгласува с работата на прекъсвачите. Включването на всеки разединител трябва да става преди включването на последователно свързания с него прекъсвач, а изключването - след изключването на прекъсвача. При ниски напрежения и малки токове разединителите са в състояние да включват и да изключват електрически ток. Тогава те се наричат също прекъсвачи, но са с малка комутационна възможност. Поради тази им прилика с прекъсвачите те се разглеждат обикновено заедно с неавтоматичните прекъсвачи.

В зависимост от начина на задействането им, апаратите за разпределителните уредби са три вида:

- прекъсвачи и разединители (неавтоматични и автоматични);



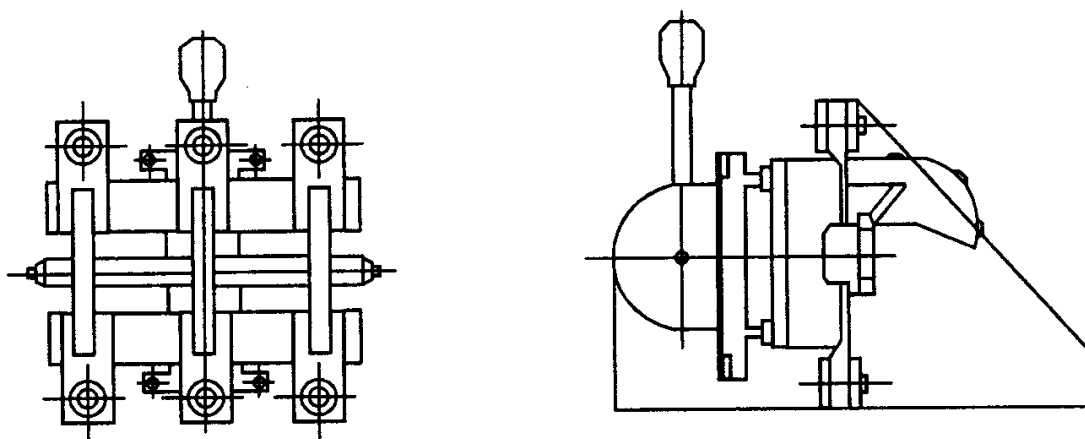
- стопяеми предпазители;
- щепселни съединения.

### 1. Неавтоматични прекъсвачи

Неавтоматичните прекъсвачи са предназначени за комутиране на електрическите вериги само по желание на оператора. Те могат да се използват и като прекъсвачи, и като разединители. Номиналните им токове могат да достигнат няколко кА. Комутационната им възможност е, общо взето, малка, честотата на комутациите - също.

**А. Ръчни лостови прекъсвачи** (фиг. 19.18) - комутационни апарати с ръчно задвижване, предназначени за сравнително редки включения и изключения на електрическите консуматори в дадена мрежа. Те са най-простите апарати, използвани в мрежите с напрежение до 500 V.

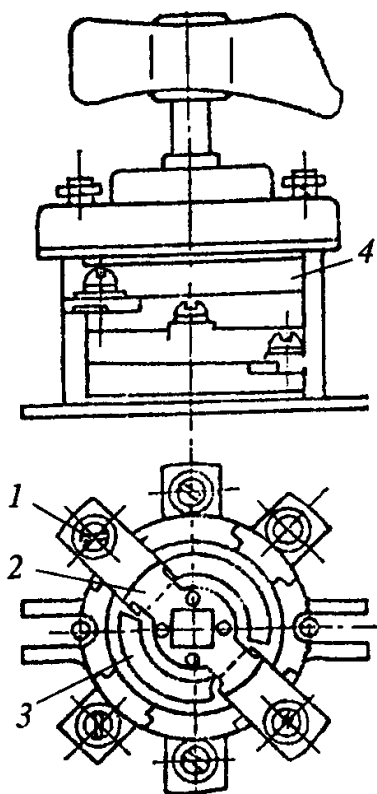
Лостовите прекъсвачи, които се използват за прекъсване на ток, се снабдяват с дъгогасителни камери.



Фиг. 19.18. Общ вид на лостов прекъсвач

**Б. Пакетни прекъсвачи** (фиг. 19.19) - многостепенни апарати, предназначени за редки превключвания във вериги с малка мощност (ток до 400 А). Могат да бъдат едно-, дву-, три- и многополюсни.

Конструктивно се състоят от комплект ексцентрикови плочки от изолационен материал 4, които са закрепени върху подвижен вал. Подвижните контакти 2 се поставят върху тези пластини, а неподвижните 1 - между плочките, и се притискат от тях. Към подвижния контакт са монтирани фиброви шайби 3 с отвор между тях, малко по-голям от дебелината на неподвижните контакти. Те изпълняват ролята на дъгогасителни камери за електрическата дъга, която се получава при изключване. Превключването се извършва чрез завъртане на ръкохватката на прекъсвача на определен ъгъл. Пакетният прекъсвач може да бъде сглобен от пластини, които



Фиг. 19.19. Пакетен прекъсвач

дават възможност за едновременно превключване на няколко вериги, например три, но те могат да бъдат така подбрани и разположени, че превключването на отделните вериги да става в определена последователност.

Пакетните прекъсвачи се използват широко в осветителните уредби, в силовите вериги и във веригите за управление.

## 2. Предпазители

**Предпазителите** са комутационни апарати, които защитават уредбите от сравнително големи претоварвания и от токове на късо съединение.

Основна част на предпазителя е проводник или лента от мед, сребро или цинк. През предпазителя преминава токът, който тече към консуматора. При големи стойности на тока топлината, отделяна в проводника или лентата на предпазителя, предизвиква неговото силно загряване и стопяване. В резултат на това веригата се прекъсва. От начина на действие на тези предпазители произлиза и наименованието им - предпазители със стопяема вложка или стопяеми предпазители.

Предпазителите, които се използват най-често, са обикновени - за номинални токове до 63 А (фиг. 19.20) и високомощни - до 1 000 А. Обикновените предпазители се състоят от гнездо, в което се поставя патрон със стопяема вложка.

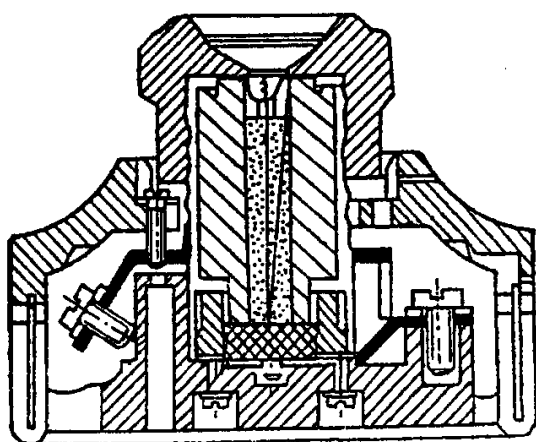
Зависимостта на времето за стопяване от тока на стопяемата жичка е показана на фиг. 19.21 и се нарича времетокова характеристика на предпазителя. От графиката се вижда, че съществуват токове, при които вложката на предпазителя няма да се стопи. Минималният ток, при който вложката се стопява, се приема

$$I_{min} = (1,05 - 1,9) I_H ,$$

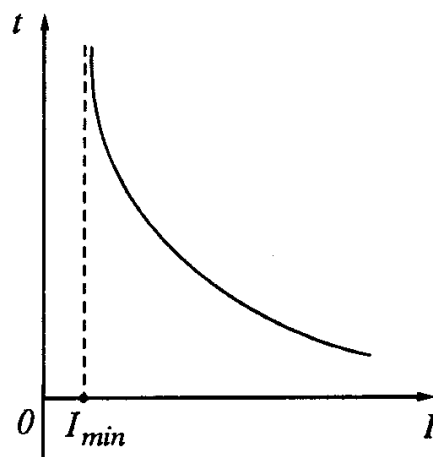
където  $I_H$  е номиналният ток на стопяемия елемент. Този извод показва, че предпазителите със стопяема вложка не могат да защитават дадена верига от малки продължителни претоварвания.

Защитната характеристика на предпазителите се използва за правилния им избор. Те трябва да отговарят на следните условия: да не прекъсват веригата при кратковременните претоварвания при пускане на системите; да изключват сравнително бързо при не много големи претоварвания, за да се

избягнат повреди и пожари в съоръженията; да осигуряват селективност на изключването.



Фиг. 19.20. Обикновен стопяем предпазител



Фиг. 19.21. Защитна характеристика на стопяем предпазител

### 3. Автоматични въздушни прекъсвачи

• **Изисквания към автоматичните прекъсвачи.** Автоматичният въздушен прекъсвач е комутационен апарат с ръчно включване, предназначен за автоматично изключване на веригите при възникване на недопустими претоварвания и токове на късо съединение в тях, голямо понижение на напрежението, изменение на посоката на мощността и т. н. Автоматичните прекъсвачи се използват и за редки включения и изключения при нормални условия.

• **Принцип на действие.** Според величините, на които трябва да реагира, автоматичните прекъсвачи се разделят на: 1) прекъсвачи за максимален ток; 2) прекъсвачи за минимален ток; 3) прекъсвачи за минимално напрежение; 4) прекъсвачи за обратна мощност.

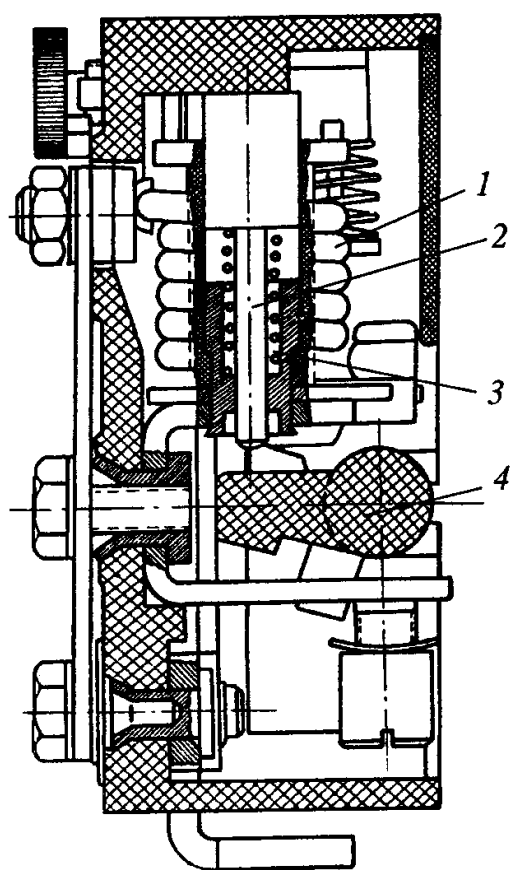
1. **Прекъсвачи за максимален ток.** Прекъсват веригата, ако токът в нея достигне стойност, превишаваща зададената. При ток, по-голям от този, за който апаратът е настроен, електромагнитът преодолява силата на пружината и прекъсвачът се изключва под действието на пружината. Като се регулира силата на пружината, може да се регулира токът на задействане в границите  $(1-2) I_H$ .

2. **Прекъсвачи за минимален ток.** Служат за прекъсване на веригата, ако токът в нея стане по-малък от зададена стойност. В този случай силата на електромагнита намалява и под действието на пружината прекъсвачът изключва.

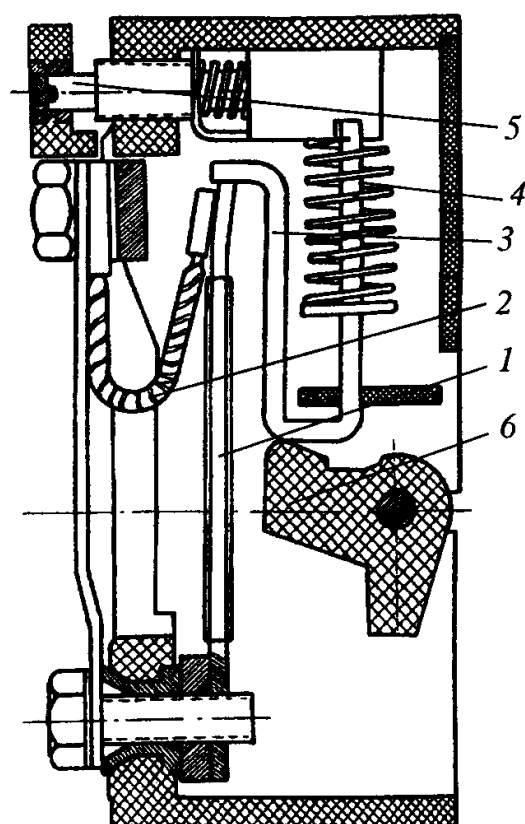
3. *Прекъсвачи на минимално напрежение.* Изключват веригата, ако напрежението в мрежата стане по-ниско от определена стойност. В такъв случай електромагнитът изгубва възможността си да поддържа равновесие с пружината, нарушава се зацепването и прекъсвачът се изключва.

Въздушните прекъсвачи се изработват в повечето случаи комбинирани за различни защиты, например с максимална по ток и с минимална по напрежение, с максимална по ток и със защита за обратна мощност, с термична защита и др. Такива прекъсвачи се наричат универсални.

*Основни параметри на прекъсвачите са:* номинален продължителен ток, номинално напрежение, максимален ток на изключване, собствено и пълно време на изключване.



Фиг. 19.22. Електромагнитен изключвател на мощностен защитен прекъсвач, тип А1: 1 - токова намотка; 2 - изключващ лост; 3 - възвратна пружина; 4 - изключваща рейка



Фиг. 19.23. Термичен изключвател на мощностен защитен прекъсвач, тип А1: 1 - термобиметална пластина; 2 - гъвкава тоководеща връзка; 3 - изключвателна скоба; 4 - пружина; 5 - настройващ винт; 6 - изключваща рейка

• *Устройство на автоматичните въздушни прекъсвачи.* Всеки прекъсвач има основа, върху която се монтират различните му възли и детайли, и капак, с който те се закриват и предпазват от прах, от чужди тела и пр. Всеки апарат има дъгогасително устройство, чиято конструкция трябва да спомага за най-бързото изгасяване на електрическата дъга, възникнала при прекъсването на веригата. Разглежданите прекъсвачи се наричат въздушни, защото средата, в която става гасенето на дъгата, е въздух. В прекъсвачите има контактна система, която може да се състои от няколко вида основни и дъгогасителни контакти. Освен това, в прекъсвача се разполагат елементите за защита - максималнотокова (фиг. 19.22), термична (фиг. 19.23) и др.

## РАЗДЕЛ VII. ЕЛЕКТРООБЗАВЕЖДАНЕ НА КОРАБА

### Двадесета глава

#### КОРАБНО ЕЛЕКТРООБЗАВЕЖДАНЕ И КОРАБНИ ЕЛЕКТРИЧЕСКИ СТАНЦИИ

##### 20.1. Видове корабно електрообзавеждане

Съвременният кораб е наситен с различни технически средства. Голяма част от тях работят с използването на електрическа енергия и функционирането на кораба е свършено невъзможно без непрекъснатото му снабдяване с електроенергия. *Комплексът от корабни устройства, реализиращ генерирането, предаването, разпределянето и преобразуването на електрическата енергия в механична за различни механизми или в други видове енергия - например топлинна, светлинна и пр., а също и в информация с различно предназначение, се нарича корабно електрообзавеждане.*

За мащабите на използването на електроенергията може да се съди от това, че например на най-разпространените в българския търговски флот кораби с водоизместване около 10-20 хил. тона номиналната сумарна мощност на монтираното електрообзавеждане е между 2 000 и 6 000 kW. Характерно за корабоплаването на всички развити морски страни е непрекъснатото повишаване на показателите за степента на насищането на корабите с електрообзавеждане.

*Източниците на електрическа енергия на кораба са електромашинни агрегати с генератори за променлив или постоянен ток и акумулаторни батерии. Предаването на енергията от източниците до консуматорите се осъществява и разпределя чрез електрическата мрежа, включваща кабелите и разпределителните устройства.*

*Консуматорите на електроенергията по своето предназначение се разпределят в няколко групи: корабни електродвижвания, електронавигационни устройства, радиотехнически средства, прибори за осветление, електронагревателни устройства, различно технологично обзавеждане и прибори за управление, контрол и защита.*

Електродвижванията консумират до 80 - 90% от цялата електроенергия, произведена на кораба и включват електродвижванията на рулеви устройства, котвено-швартовите устройства, спомагателните механизми на главната силова уредба (компресори, сепаратори, помпи и др.), па-

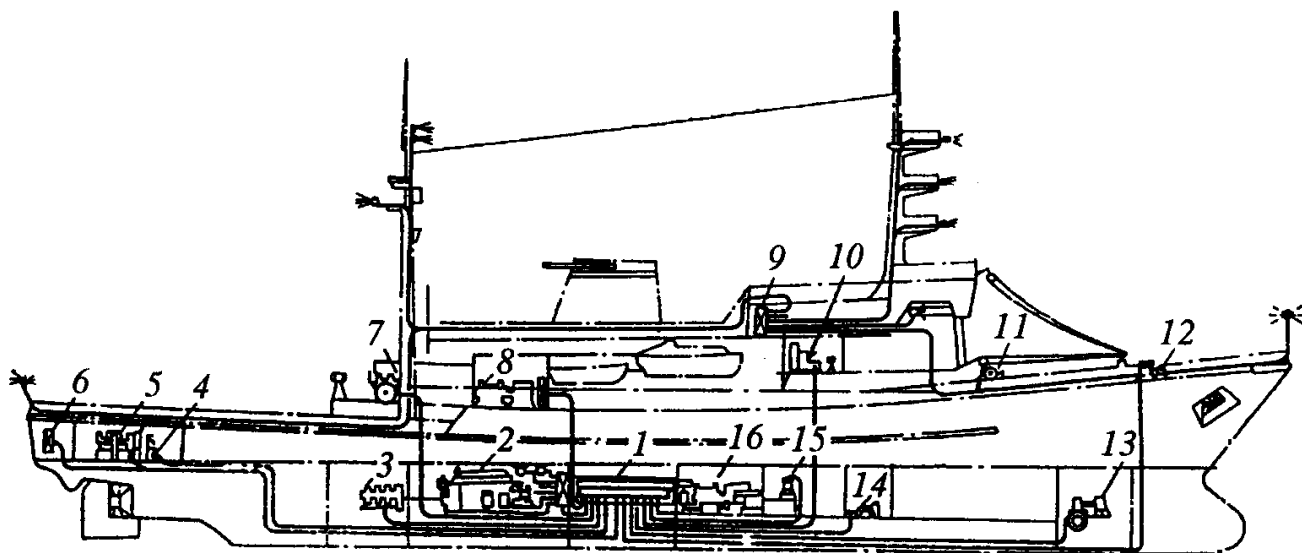
лубните товарни устройства, помпите и устройствата, обслужващи различните корабни системи (баластна, осушителна и др.). Тези електрозадвижвания са от най-мощните на кораба.

За комутирането (включването и изключването) на участъците от електрическата мрежа и отделните консуматори, и за защита на уредбите се използват електрическите апарати - контактори, релета, предпазители, пускови и регулиращи реостати, пускатели, пакетни изключватели, разединители, автоматически изключватели (автомати) и др. Те се делят на комутационни, пускови, за регулиране и защита. Често в един апарат се съвместяват няколко функции.

За осветлението на корабните помещения, палуби, прибори и устройства се използват различни видове лампи - с нажежаема жичка, люминисцентни лампи, различни газоразрядни източници на светлина. Светотехническото обзавеждане се различава според неговото предназначение - общо осветление, прожекторно осветление, местно осветление, специално, аварийно, подводно, взривозащитено, сигнално и т.н.

Електротермичното обзавеждане се използва за отопление, за подгръване на маслото, горивото, водата, за електрическите машини, илюминаторите, обзавеждането в кухнята и т.н.

На фиг. 20.1 е показана схемата на разположението на основните елементи на електрообзавеждането, източниците и консуматорите на електрическа енергия.



Фиг. 20.1: 1 - главно разпределително табло в машинното отделение, 2 - главен двигател, 3 - механизъм за изменение на стъпката на винта, 4 - шпил на кърмата, 5 - рулева машина, 6 - междинно разпределително табло, 7 - буксирна лебедка, 8 - аварийна електростанция, 9 - разпределително табло за сигнално-отличителните светлини, 10 - радиорубка, 11 - товарна лебедка, 12 - брашпил на носа, 13 - подрулващо устройство, 14, 15, 16 - механизми с различно предназначение

Електроенергетичните корабни уредби днес, като правило, са високо автоматизирани. За управлението им се използват различни устройства (най-често електронни и микропроцесорни) за автоматизация и контрол: устройства за стабилизация на честотата и напрежението, за синхронизиране на генераторите, за разпределение на товарите между генераторите, за включване на резервните генератори, за контрол и измерване на съпротивлението на изолацията, за контрол и управление на температури и налягания в различни механизми и уредби, и т.н. Корабните електрозадвижвания също са с автоматично или полуавтоматично управление - например системата на автопилот, успокоителите на клатенето на кораба и др. Тези системи и устройства са разположени практически по целия кораб в различни помещения.

## **20.2. Условия на работа на корабното електрообзавеждане. Правила и изисквания към него**

В суровите условия на експлоатация на кораба електрообзавеждането е подложено на различни агресивни въздействия - вибрация и удари, изменение на температурата на околната среда в широки граници, влага, соли и пари на различни нефтопродукти във въздуха, обливане с вода (сладка или морска). Преходът на корабите с неограничен район на плаване от една климатична зона в друга води до честа промяна в тези условия, което също влияе неблагоприятно на обзавеждането. Отрицателното въздействие на околната среда е особено силно при продължително плаване в условията на тропически климат. Проявява се в интензивното падане на роса върху повърхностите на електрообзавеждането, кондензация на вода в затворените обеми на електрическите машини и апарати, кристализация на соли върху повърхностите на изделията. Всичко това води до влошаване на електрическите свойства на изолационните материали и усилена корозия на металите.

Парите на нефтопродуктите, намиращи се във въздуха на различните помещения, се отлагат върху тоководещите и изолиращите детайли, образувайки маслен слой върху тях, който разкъква изолацията и, в съчетание с праха от въздуха (особено въглищен или прах от различни товари), създава токопроводящи участъци. Под действието на електрическата дъга в апаратите и колекторите на машините, прахът, съединявайки се с маслото, образува коксоподобен нагар, който повишава преходното съпротивление на контактите. Това създава условия за бързо и неравномерно износване на контактните пластини и, като резултат - намаляване на срока на работа на апаратите.

Механическите натоварвания също усложняват работата на корабно-



то електрообзавеждане. При работа на винта и другите корабни механизми в корпуса на кораба възникват вибрации. Като правило, те са на кърмата, където в повечето случаи е разположено машинното отделение и по-голямата част от електрообзавеждането. Най-голямата им интензивност е от 0,05 до 0,5 mm при честота няколко херца, като на отделни места в конструкциите може да бъде и по-висока. Вибрациите могат да предизвикат деформация на някои детайли, ускорено износване на съединенията, нарушение на изолацията и прекъсване на кабелните жила. Ето защо представляват сериозна опасност за обзавеждането.

Клатенето и ударните натоварвания от въздействието на вълните по корпуса на кораба предизвикват осеви и радиални премествания на роторите на електрическите машини, които се предават на лагерите, довеждайки до тяхното ускорено износване.

Влиянието на климатичните и механични въздействия върху електрообзавеждането прави необходимо предприемането на допълнителни конструктивно-технически и организационни мерки, осигуряващи сигурната работа на електрообзавеждането при тези условия. Пълната зависимост на функционирането на съвременния кораб от електрообзавеждането в нормални експлоатационни и, още повече, при аварийни условия налага високи изисквания към тези мерки. Глобалният характер на корабостроенето и корабоплаването определя необходимостта от координирането на усилията на всички морски държави за осигуряването на ефективността на тази дейност.

База на правилата за построяване и експлоатация на корабите представлява Международната конвенция по охрана на човешкия живот на море („SOLAS“). Въз основа на нейните изисквания националните класификационни организации (за Р България - Българският корабен регистър (БКР)) периодически преиздават и актуализират Правила за класифицирането и построяването на морските кораби, в които се регламентират проектирането, построяването и осигуряването на експлоатацията на кораба по начин, определящ сигурността на кораба.

Освен правилата на Регистъра за корабно електрообзавеждане, се съблюдават и следните документи:

- препоръки на Международната електрическа комисия (IEC);
- държавни стандарти за различните видове обзавеждане;
- вътрешни правила и нормативи за производство и техническа експлоатация на различно обзавеждане.

За всяко изделие се формулира степен на защита на корпуса му, с оглед на вероятността от механични въздействия и попадане на вода върху изделието. Тези защитни изпълнения имат следните означения: IP00, IP20, IP22, IP23, IP44, IP55, IP56 и IP58. В тях *първата цифра* след буквеното обоз-

начение означава *степента на защита на персонала и степента на защита на машината от попадане на различни тела*, както следва: 0 - отсъства защита; 2 - защита от предмети с размер над 12 mm; 4 - защита от твърди тела с размери над 1 mm; 5 - защита от прах. *Втората цифра* означава *защита от попадане на вода*, както следва: 0 - липсва защита; 2 - защита от капки при наклон до 15°; 3 - защита от дъжд; 4 - защита от пръски; 5 - защита от водна струя; 6 - защита от вълни, 8 - херметичност при продължително потопяване във вода.

В зависимост от това къде е разположено изделието, в Правилата се регламентира степента на защита, която изделието трябва да има. Например обзавеждането в машинното отделение следва да е със степен на защита IP23, изделията, които се монтират по палубите - IP56, а изделията, които могат да работят продължително време под вода - IP58.

Основна цел на изискванията на Правилата на класификационните организации е надеждната работа на обзавеждането, която се осигурява с мерки в следните направления:

- чрез използването на по-съвършени конструкции;
- чрез използването на висококачествени материали;
- чрез контрол на различните етапи на технологията на производството на изделията;
- чрез проверка с тестови изпитвания на обзавеждането за гарантиране на определено качество, включващи изпитвания при гранично високи и ниски температури, при вибрации, при солена мъгла, при различни електромагнитни смущения и други изпитвания, в зависимост от характера на изделието.

Тези мерки се регламентират и се контролират от представител на класификационните организации при всички етапи на производството на всяко изделие - от неговото проектиране до слизането му от производствената линия.

### **20.3. Обща характеристика, основни понятия и видове корабни електрически станции**

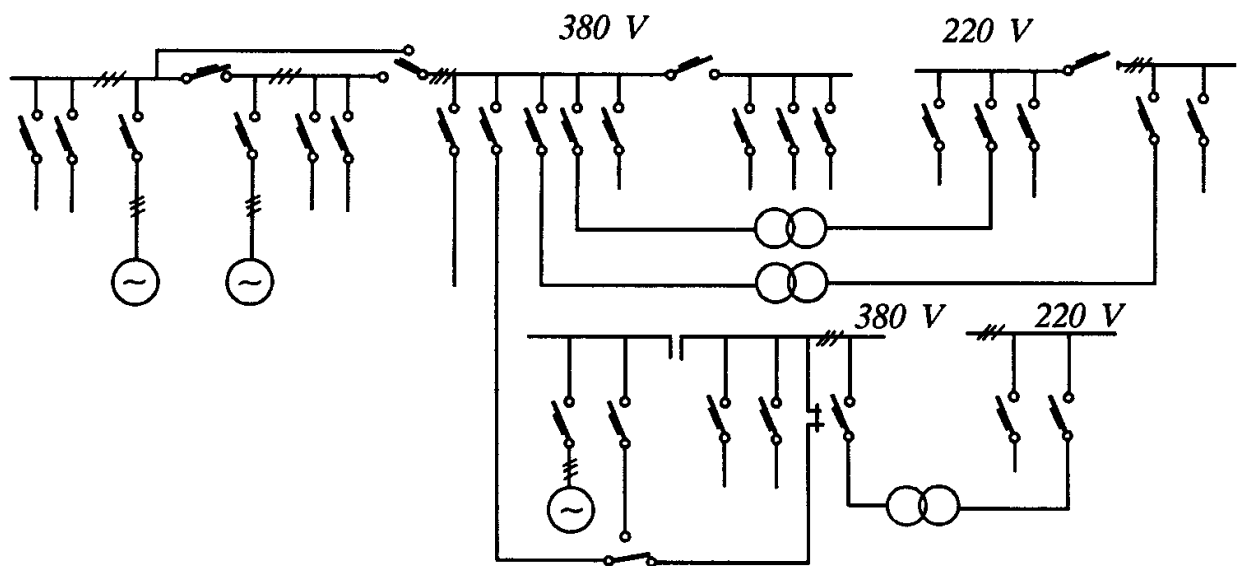
Основен източник на електрическа енергия на корабите днес е корабната електростанция (КЕС). Мощността на електростанцията на всеки кораб зависи от мощността на монтираното електрообзавеждане и най-често е пропорционална на корабната силова уредба (около 180 kW на всеки 1 000 к.с. от тази уредба), достигайки на един съвременен кораб до няколко MW. На повечето от по-големите кораби в българския търговски флот тази мощност е между 2 и 3 MW, на луксозните пътнически кораби - между 10 и 16 MW, а на самолетоносачите достига 50 MW.

Електроенергията се произвежда най-често от автономни дизелгенераторни агрегати. Най-разпространените двигатели на тези агрегати са дизели с номинални обороти 500-750 в минута, намерили широко приложение поради следните предимства: постоянна готовност за пуск и последващо натоварване, моторесурс (работни часове до капитален ремонт) около 20-40 хил. часа, относително висок к.п.д. (около 30-35%). Дизелите като първични двигатели имат и недостатъци - неравномерен въртящ момент, ниска претоварваща възможност (до 10%), високо ниво на шум и вибрации. На корабите от българския търговски флот, без изключение, са монтирани именно такива дизелови двигатели.

Като първични двигатели за корабните генератори могат да бъдат използвани парни или газови турбини. Парните турбини са първият тип двигатели за генераторите, прилагани от преди доста години. Поради сериозните им недостатъци - нисък к.п.д., големи габарити и бавно въвеждане в действие, днес приложението им е много рядко, а на съвременните кораби - само при наличие на атомна електроенергетична уредба.

Газовите турбини са по-перспективни - те са компактни, имат по-висок к.п.д. и значително по-висока претоварваща способност. Недостатъците им са висок шум, високи номинални обороти и произтичащата от това необходимост от редуктор. Използват се на военни кораби, но в българския флот нямат приложение. Най-често електрическата станция се състои от три до пет генератора, разположени в машинното отделение на кораба. Освен тях, на лодъчна палуба се разполага още един аварийен генератор, предназначен да захранва най-отговорните корабни консуматори, когато основните генератори в машинното отделение са извън строя.

Най-разпространената схема на електрическа станция е представена на фиг. 20.2. Тя е дадена в *еднолинеен план* - начинът на опростено представяне на схемите, при който се чертае само едната фаза, а с три наклонени черти върху нея се посочва, че за останалите две фази свързването е аналогично. Както се вижда от фигурата, генераторите захранват главното разпределително табло (*ГРТ*). За всеки генератор в него е предвидена отделна секция, в която се разполагат измервателни прибори към генератора, автоматика, комутационна и защитна апаратура. В главното табло от отделни секции се захранват захранващите линии (фидери) за различните консуматори и междинни разпределителни табла (*МРТ*): за консуматорите 380 V - директно, а за консуматорите 220 V - през трансформатори, които се резервират един друг. Между *ГРТ* и аварийното разпределително табло (*АРТ*), захранвано от аварийния дизелгенератор (*АДГ*), има връзка, която е организирана така, че определени консуматори (най-отговорните) получават захранване от *АДГ* при отпадане на напрежението на шините на *ГРТ*.



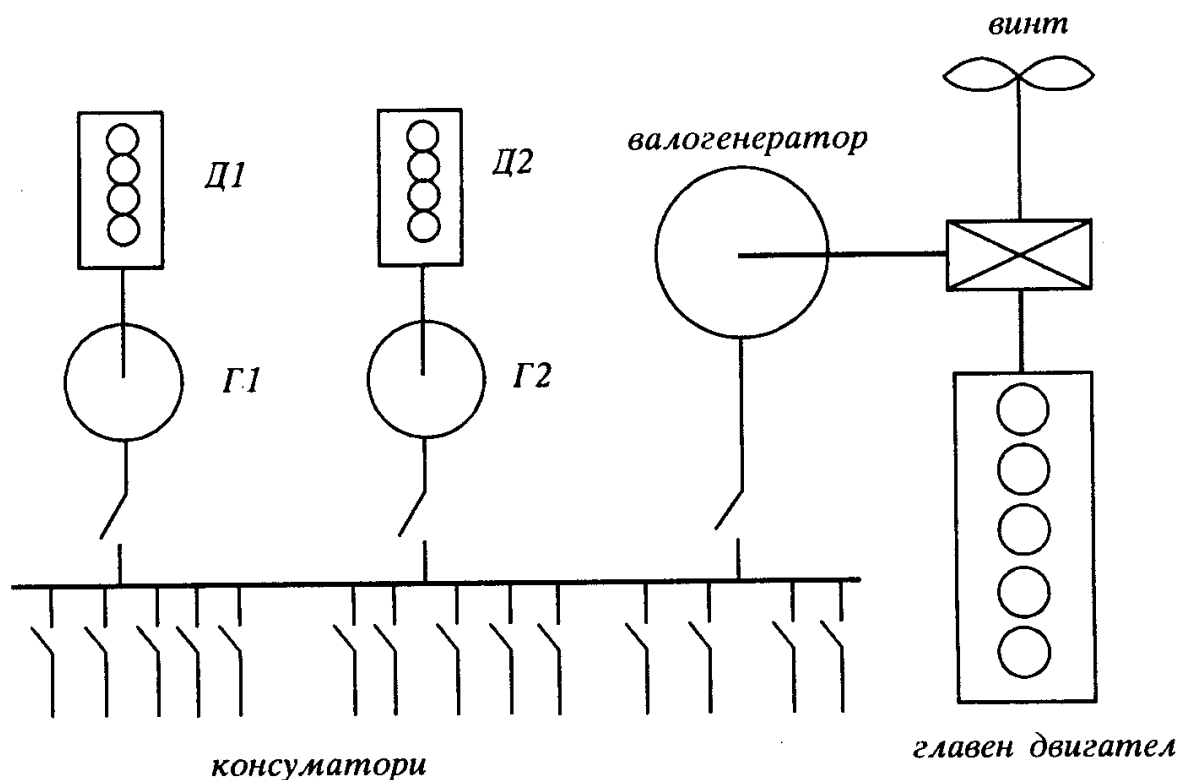
Фиг. 20.2

Стремешът на конструкторите да бъдат повишени икономическите показатели на КЕС е довел до схеми на електрическите станции, различни от посочените. Пример за това са електрическите станции, в състава на които има утилизационен турбогенератор. Утилизационните турбогенератори са уредби, които използват енергията на изгорелите газове от главната силова уредба (дизелната уредба за задвижване на винта). Тази енергия се преобразува в механична посредством котел (наричан утилизационен) и турбина. Мощността на утилизационния турбогенератор е около 200 - 500 kW и удовлетворява значителна част от нуждите на електроенергия на кораба по време на ход. Такъв турбогенератор има включен в състава на КЕС на българския танкер „Хан Аспарух“.

Друга възможност за снижаване на експлоатационните разходи по производството на електрическа станция е включването на валогенератор в състава на КЕС. Валогенератор се нарича генераторът, който използва механическа енергия от вала на винта на кораба. Валогенераторът е свързан с главния дизел посредством редуктор. Тъй като в зависимост от режима на експлоатация на кораба валът не винаги се върти с постоянна скорост, често се използват различни системи за стабилизация на честотата на генерираната електроенергия. Тези системи могат да бъдат механични (Conspeed - редуктор) или електрически, основани на използването на различни видове преобразуватели на честота - напр. системата Freson на фирмата „Siemens“, при която генераторът се възбужда от тиристорен преобразувател на честота с честота на хлъзгането на вала спрямо синхронната скорост, или системата на фирмата „АЕГ“, при която чрез зависим инвертор се стабилизира

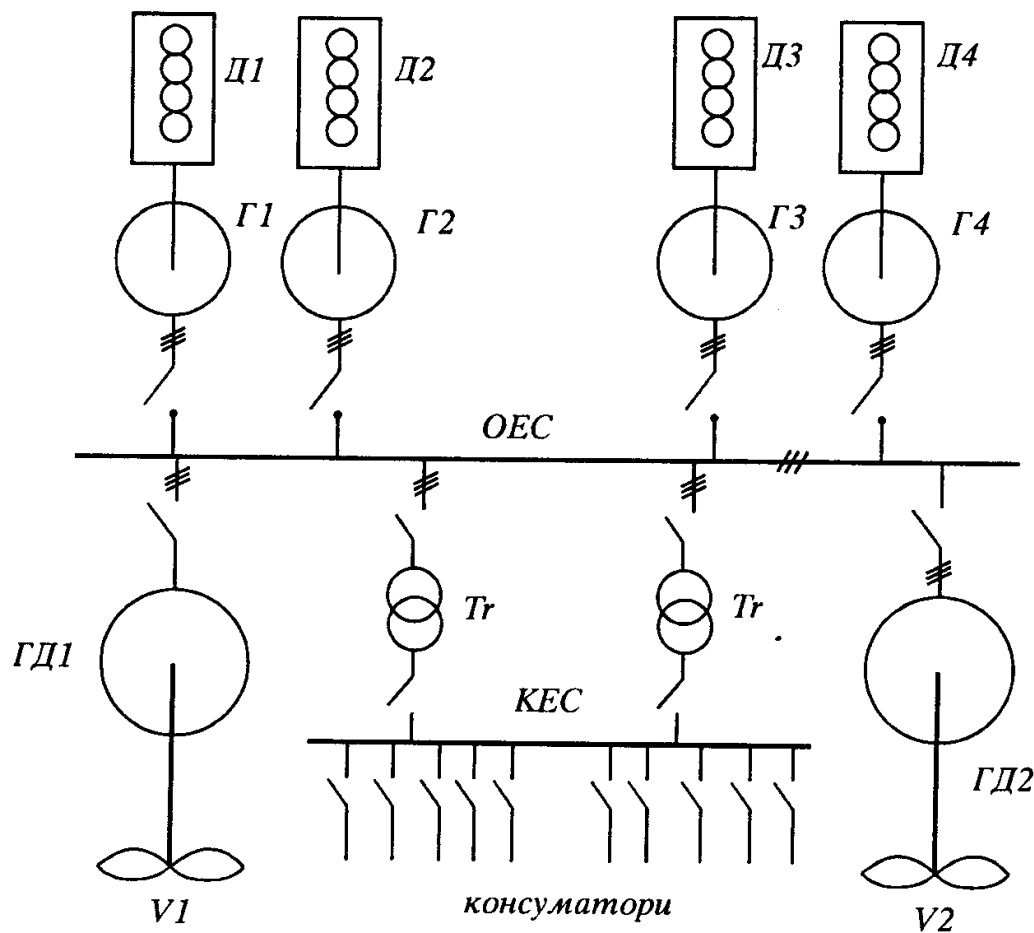
честотата на цялата генерирана електроенергия. Ако корабът е предвиден за продължителна експлоатация по линия, където рядко се налага предприемането на маневри, то е възможно валогенераторът да бъде от най-прост тип - редуктор без всякаква стабилизация, или да се използва винт с регулируема стъпка.

Валогенератори има на много български кораби - на „Балчик“ и „Смолян“ те са свързани с главния двигател през редуктор, а винтът е с регулируема стъпка; на „Добруджа“ е използвана система с управляем редуктор, стабилизиращ оборотите; на „София“ и „Пловдив“ - система „АЕГ“ с инвертор в статора на генератора. Схема на корабна електрическа станция с валогенератор е дадена на фиг. 20.3.



Фиг. 20.3

За някои видове кораби (например риболовните и рибопреобладаващите) са характерни режими на експлоатация на електрическата станция и главната силова уредба, при които максималното натоварване на главната силова уредба съвпада с минимално натоварване на КЕС, и обратно. Освен това, главната силова уредба и КЕС са съизмерими по мощност. При такива кораби един от най-подходящите начини за намаляване на експлоатационните разходи и за подобряване на показателите за ефективност на монтираното обзавеждане е обединяването на главната силова уредба и електрическата станция в общ електроенергиен комплекс, захранващ както корабните консуматори, така и двигателя за винта на кораба. Схемата на обе-



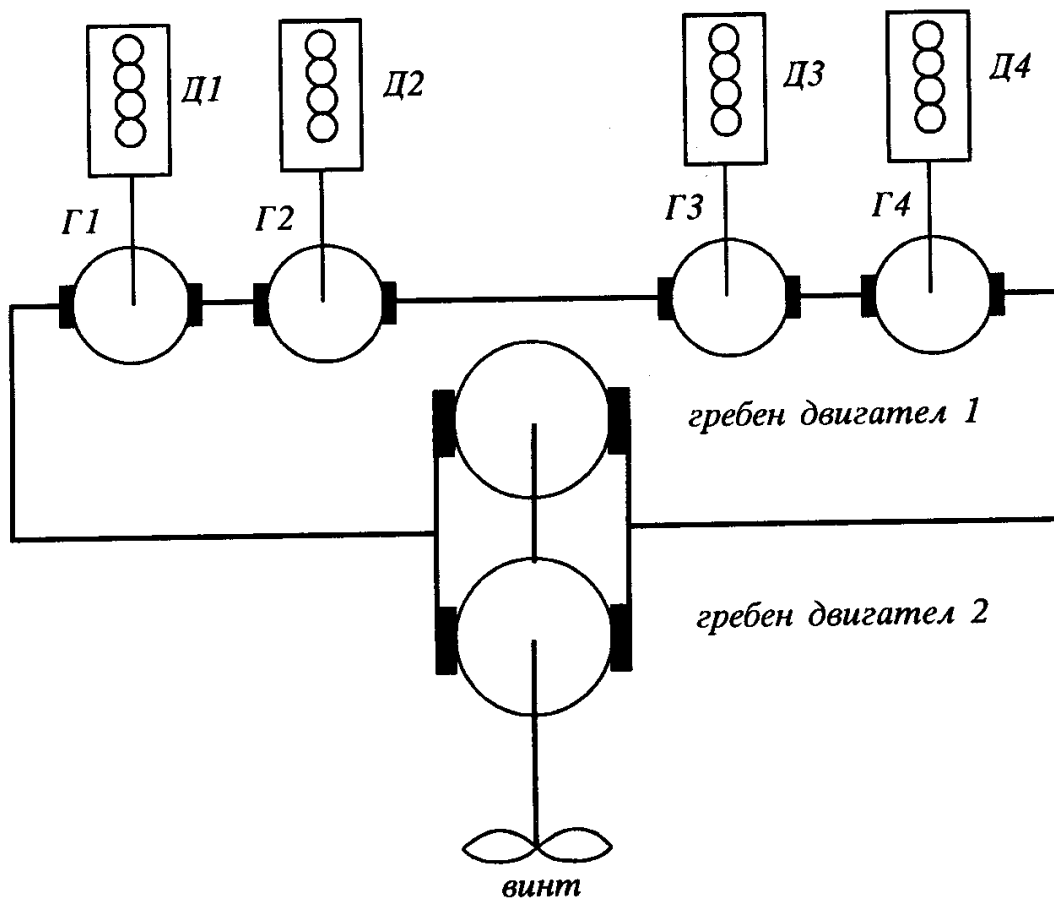
Фиг. 20.4

динена електростанция е показана на фиг. 20.4.

Тези електростанции са много разпространени и на различните кораби от техническия флот, където често се налага задвижването на вала да има специални механични характеристики. Те често са над 10 MW и, поради възможността да бъдат използвани високооборотни дизели вместо нискооборотен реверсивен дизел за въртене на вала, позволяват силовата уредба да бъде с относително ниски габарити.

На пътническите кораби се използват електростанции, които захранват с енергия един или няколко двигателя, задвижващи един или няколко корабни винта. Такива електростанции се наричат гребни, а енергийната уредба - система за електродвижение на кораба. Системата позволява да се намали дължината на валовата линия, което осигурява по-малки вибрации на корабния корпус и, следователно, по-голям комфорт за пътниците. Гребните електрически станции често са с много големи мощности. На прочутия кораб „Нормандия“, построен в 1934 г., е била използвана електростанция с генератори, задвижвани от турбини с мощност 200 MW. Гребните

електрозадвижвания позволяват да се формират специални характеристики на задвижването на винта на кораба (т.нар. ескаваторни характеристики). На ледоразбивачите например задвижването на винта трябва да развива определен момент при попадане под винта на леден блок. По тази причина често тези електростанции се изпълняват на постоянен ток, при което формирането на специалните характеристики става по-лесно. На фиг. 20.5 е показана опростена принципна схема на такава електростанция.



Фиг. 20.5

При проектирането на корабната електрическа станция винаги се спазват следните изисквания:

- натоварването на работещите генератори в продължителен режим на експлоатация (ходови, стоянка с товарни операции и пр.) трябва да бъде около 80%; в кратковременен режим (авариен, маневра) - и по-малко от 70%,

- желателно е електростанцията да има резерв от мощност от поне 20%, които да покриват нуждите на монтирани допълнително консуматори през време на срока на експлоатацията на кораба,

- броят и типоразмерите на генераторните агрегати следва да бъдат минимални, генераторните агрегати - по възможност еднакви, а номинал-

ната им мощност да осигурява нормална експлоатация на кораба при положение, че един от агрегатите е в профилактичен ремонт.

Всички тези условия се съчетават, естествено, с изискването за максимална ефективност на уредбата и минимални производствени разходи.

#### **20.4. Параметри и качество на електрическата енергия**

*Корабната електроенергетична система* (КЕС) следва да осигурява сигурно, надеждно и икономично генериране и разпределяне на електрическа енергия с необходимото качество. Техничко-икономическите показатели на КЕС като цяло се определят от рационалния избор на вида на електрическия ток (постоянен или променлив), честотата и номиналната стойност на напрежението в мрежата. Тези величини определят и основните параметри на електроенергетичната система.

• *Вид на тока.* По правилата на Българския корабен регистър на корабите се допуска използването както на променлив (еднофазен или трифазен), така и на постоянен ток. На съвременните кораби токът е преди всичко променлив. Основната причина за това са по-високите технически и икономически показатели на електрическите машини за променлив ток (най-вече асинхронните двигатели). Асинхронните двигатели представляват най-голямата група консуматори на кораба. Поради отсъствието на колекторен апарат, в сравнение с постояннотоковите двигатели, те са по-сигурни и удобни в експлоатацията, тъй като изискват много по-малко обслужване. Освен това са с около 20-30% по-евтини, а по отношение на теглото и габаритите - с от 20 до 50% по-изгодни.

Използването на променливия ток дълго време е било задържано поради лошите пускови характеристики (големи пускови токове) и ниските възможности за регулиране на скоростта на въртене на асинхронните двигатели. Многоскоростните двигатели дълги години са основната алтернатива. Днес вече са разработени мощни (до стотици kW) транзисторни преобразуватели на честота, позволяващи плавно регулиране на скоростта на въртене на асинхронните двигатели, управление на пусковия процес и цялостното динамично поведение на задвижваните механизми. Тези преобразуватели имат приемлива цена и значително по-малки габарити от досега използваните управляващи станции.

Предимствата на електрообзавеждането при променлив ток са особено съществени за корабите с мощни електроенергетични уредби.

Понастоящем постояннотоково електрообзавеждане се използва на корабите с химически източници на ток и в гребните електрически уредби.



• **Напрежението** в корабните електроенергетични уредби определя показателите за габарити и тегло на обзавеждането, неговата надеждност и едновременно с това определя и степента на опасност от поразяване от електрически ток. Ето защо при избирането на рационалната стойност на напрежението винаги се прави компромис между няколко обстоятелства: Стойността на напрежението определя в най-голяма степен теглото и стойността на кабелните траси, които при по-ниски напрежения са пропорционално по-високи. Непрекъснатото нарастване на установените мощности на корабите води до непрекъснато повишаване на теглото и стойността на кабелите, тъй като при дадено напрежение и мощност токът, а следователно и сеченията на кабелите, нарастват пропорционално. Поради това е налице стремеж за непрекъснато повишаване на стойностите на допустимите напрежения.

Правилата на БКР и другите класификационни организации допускат използването на различни стойности на напрежението, в зависимост от вида на електрообзавеждането и условията на неговата експлоатация. Номиналните напрежения за различни консуматори са дадени в табл. 20.1.

Таблица 20.1

Консуматори	Постоянен ток, V	Променлив ток, V
1. Задвижване на различни механизми	220	380
2. Отоплителни прибори в каютите	220	220
3. Осветление, сигнализация, вътрешни връзки	220	220
4. Щепселни розетки в сухи помещения	220	220
5. Щепселни розетки за преносими инструменти	24	42
6. Щепселни розетки за преносими лампи	24	24
7. Розетки за преносими лампи във влажни помещения	12	24

По-високи стойности на напрежението - от 380 V до няколко kV, се допускат рядко и само на кораби със значителна мощност на електростанцията.

• **Честотата** на генерираното напрежение най-често е 50 или 60 Hz, в зависимост от националните стандарти и предполагаемия район на експлоатация на кораба. Както е известно, използваната честота в Европа е 50 Hz, а на американския континент - 60 Hz. Стремеж за повишаване на честотата за някои консуматори е налице на военните кораби, поради малките

габарити на обзавеждането.

• **Качеството на електроенергията** зависи от съвкупност от показатели, определящи допустимата мярка за отклоненията на амплитудите, средноквадратичните стойности, честотата, фазите и др., от номиналните им стойности, а също и за отклоненията в синусоидалната форма на променливите. Представлява изключително важна характеристика на работата на корабната електроенергетична система.

Показателите за качество се контролират от класификационните организации, контролиращи корабостроенето и корабоплаването - БКР, английският и германският Лойд регистър, Детнорске Веритас, руският морски регистър и др. Нормите за качеството са резултат от продължителна стандартизационна работа, свързана с изпитания и продължителни наблюдения върху работата на обзавеждането.

Съгласно тези норми трайното отклонение на напрежението на шините на ГРТ следва да бъде в рамките от  $\pm 2,5\%$ . Отклоненията на напрежението по време на преходен процес при включване на товар в рамките на номиналния следва да бъдат не по-големи от  $\pm 15\%$ , като възстановяването на напрежението трябва да става в рамките на 1 секунда.

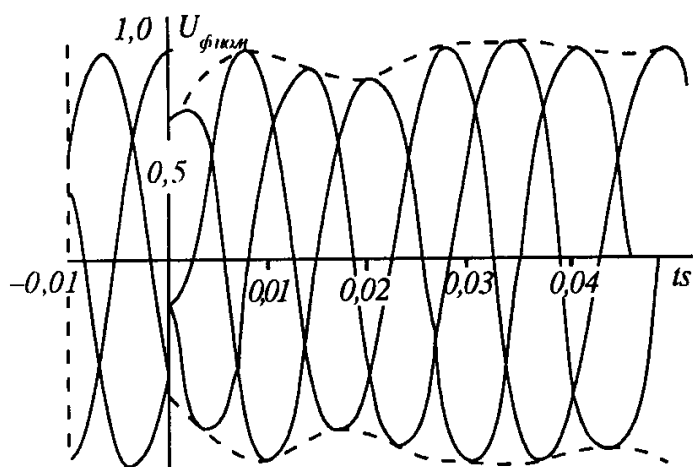
Трайното допустимо отклонение на честотата следва да бъде до  $\pm 5\%$ , като в динамичен режим при включване на товар отклоненията остават в рамките на  $\pm 10\%$ .

Допустимата несиметрия в натоварването на генераторите по фазите му не трябва да надвишава 20%.

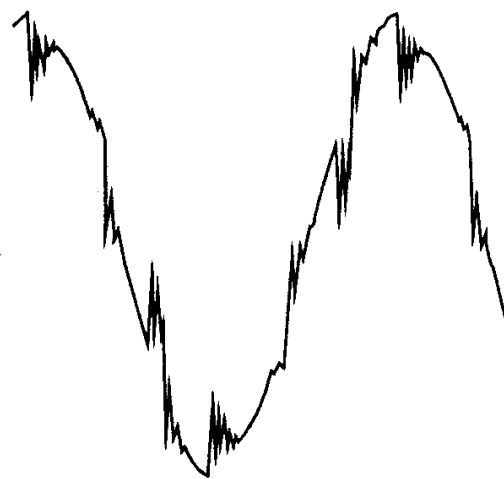
През последните години сред корабните консуматори все по-често се срещат мощни полупроводникови изправители и преобразуватели на честота. Обектите на тяхното приложение и примери за използването им вече бяха посочени. Характерно за този тип консуматори е обстоятелството, че те са нелинеен тип, тъй като при синусоидално захранване токът през тях не е синусоиден. Понеже синхронните генератори представляват източници на напрежение с индуктивно вътрешно съпротивление, производната от несинусоиден ток през тях създава на клемите им значителни по големина високочестотни падове на напрежения.

Изменението на напрежението, резултатът от преходен режим и възникващото изкривяване във формата на напрежението, вследствие работата на мощни преобразуватели, захранвани от корабната мрежа, са показани на фиг. 20.6 и фиг. 20.7. Формата на тези изкривявания зависи от много фактори - съотношение между мощностите на генератора и преобразувателя, параметри и конструкция на генератора, дължина на кабелните траси, вида на останалите консуматори, захранвани от генератора, режима на работа и схемата на преобразувателя и т.н. Поради тази причина

се нормира един коефициент на несинусоидалност, който отчита съотношението между средноквадратичните стойности на всички висши хармонични в напрежението и средноквадратичната стойност на първата (основна) синусоидална съставна. Този коефициент не трябва да надвишава 5%.



Фиг. 20.6



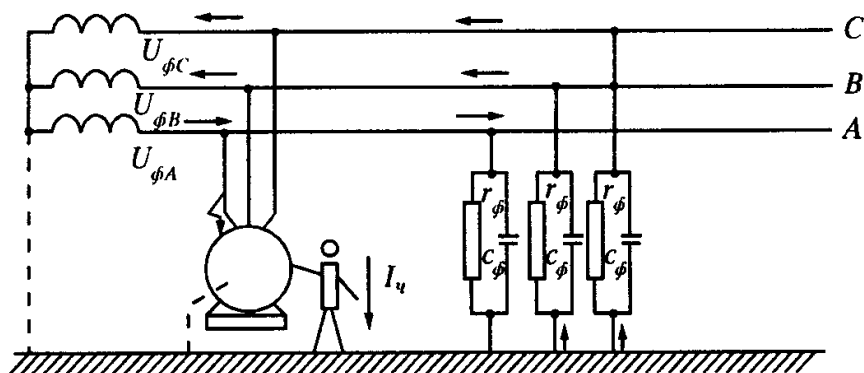
Фиг. 20.7

В процеса на съвместната работа между различните консуматори и източниците на електрическа енергия възникват различни взаимни влияния, свързани с въздействие върху качеството на електрическата енергия. В отделни случаи взаимното влияние може да бъде толкова силно, че да наруши нормалната работа на редица устройства. Най-чувствителни към качеството на енергията сред тези устройства са средствата за автоматика и електронната техника. Проблемът за взаимното влияние между различните консуматори и източници на електроенергия е прието да се нарича **електромагнитна съвместимост** между различните консуматори и електроенергетичната система. Осигуряването на качеството на електроенергията, необходимо за нормалното функциониране на корабната електроенергетична система, е сложна и важна задача, която се решава на всички етапи на проектирането на корабната електроенергетична система и компонентите ѝ.

• **Заземяването** е задължително средство за намаляване на опасността от поразяване на персонала, обслужващ експлоатацията на електрическите уредби при евентуално попадане на корпуса им под напрежение. Заземяване се нарича електрическото съединяване на корпуса на заземяваното устройство с металическия корпус на кораба (или със специален метален лист на дървените или железобетонни кораби). Заземяването се извършва и с цел да се снесе потенциалът на статичните заряди по обзавеждането,

които се натрупват в процес на прехвърляне на течности и движението на нефтопродукти по време на клатене, за защита на радиоапаратурата от смущения и защита от попадане на мълнии.

За да се намали вероятността от поражение с електрически ток, в КЕС се използва, за разлика от бреговите електростанции, система с незаземен звезден център. В този случай, както се вижда от фиг. 20.8, ако съпротивленията на изолацията са достатъчно големи (стотици  $k\Omega$ ), напрежението, под което ще попадне човек при докосване на една от фазите, няма да е опасно. Счита се, че съпротивлението на човека е около  $1 k\Omega$ . Едновременното докосване на две фази обаче го поставя в значително по-тежки условия. Независимо от неутралата или съпротивлението на изолацията,



Фиг. 20.8

човекът попада под линейното напрежение. Но едновременното докосване на два проводника е с много по-малка вероятност и подобна ситуация не се приема за критерий за безопасност.

Напреженията, използвани днес в КЕС, при определени об-

стоятелства могат да бъдат смъртоносни - известни са такива случаи при поражение с променлив ток  $65 V$ . Затова правилата на Международната електрическа комисия изискват спазването на специални мерки при напрежения над  $55 V$ . Независимо от това обаче, нарастването на мощностите на съвременните КЕС поставя сериозни икономически и технически проблеми, решаването на които изисква преминаване към по-високи напрежения. Следва да се очаква, че в скоро време в мощните КЕС, едновременно със съществуващите, ще се използват все по-често и по-високи стойности на напреженията.

## УПРАВЛЕНИЕ НА КОРАБНИТЕ ГЕНЕРАТОРИ

### 21.1. Системи за възбуждане на генераторите

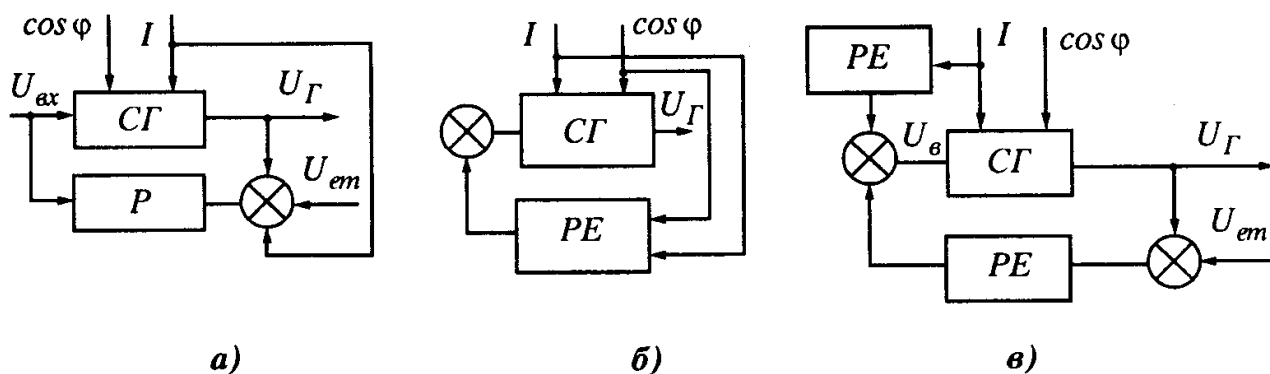
#### 21.1.1. Принципи на построяване на системите за регулиране на напрежението на синхронните генератори

Корабните синхронни генератори имат най-често електромагнитно възбуждане, т.е. възбуждане от електромагнит, с намотка, захранвана с постоянен ток. Като източник на електроенергия се използва или допълнителна машина, или статичен преобразувател от полупроводникови прибори и трансформатори. Широко разпространение са получили системите за самовъзбуждане, при които енергията за възбуждане е част от генерираната от статора електроенергия. Тези системи дават възможност да бъдат реализирани компактни конструкции с висока надеждност, осигуряващи необходимото качество на електрическата енергия.

Ясно е, че основните изисквания към функционирането на системите за възбуждане се определят от достигането на формулираните изисквания за качество на електрическата енергия. Освен тях трябва да се отбележи още едно изискване, което, както ще бъде показано по-късно, е свързано с осигуряването на сигурната работа на устройствата за защита на станцията при късо съединение. Това е изискването за осигуряване на ток на късо съединение до сработване на защитата в рамките на 3-4 пъти номиналния ток. Т.е., системата за възбуждане при късо съединение на шините на генератора трябва да осигури такова възбуждане, че токът на късо съединение в статора да е равен на около 4 пъти номиналния.

В системите за регулиране на напрежението се използват двата основни принципа за регулиране, известни от теорията на автоматичното регулиране - по отклонение на регулируемата величина и по компенсация на въздействието, както и тяхната комбинация. Ще припомним, че и в двата принципа регулирането се осъществява чрез обратна връзка. При системите за регулиране по отклонение обратната връзка действа така, че регулиращото (входното) въздействие е функция от отклонението на регулируемата величина от зададената ѝ стойност. На фиг. 21.1а е показана структурната схема на такава система. Синхронният генератор е представен като обект на регулиране с вход - напрежението на възбуждане, изход - статорното напрежение, и въздействия - товарният ток и факторът на мощност

на товара. Напрежението на статора се сравнява с еталонно такова и се преобразува от регулатора  $P$  в напрежение на възбуждане. Разглежданият принцип има това достоинство, че е универсален, т.е. управлява напрежението на генератора независимо от причините, довели до отклонение на напрежението. Тези причини могат да бъдат най-различни - например, освен товара: изменение на параметрите на генератора вследствие на температурата, отклонение на скоростта на въртене, дори възникнала повреда.



Фиг. 21.1

При системите за регулиране по компенсация на въздействието обратната връзка осъществява регулиране на напрежението на възбуждане под действието на смущаващото въздействие. Системите за регулиране, построени по този принцип, най-често се наричат системи за компаундиране. Структурната схема на подобна система за възбуждане е показана на фиг. 21.1б. Тези системи са прости и сигурни. Известен недостатък е това, че се компенсира въздействието само на този фактор, по който е реализирана обратната връзка. Не се компенсират отклонението на скоростта и изменението на съпротивлението на възбудителната намотка при натоварването на генератора (достига до 30%). Компенсацията на тези фактори е също осъществима, но това би усложнило системата.

Възможно е съвместно прилагане на двата принципа, което съчетава достоинства им. Всъщност, по този начин са построени всички съвременни системи за възбуждане. Структурната схема на такава система е показана на фиг. 21.1в.

Функционалната връзка между входните величини и напрежението на възбуждане се нарича закон на регулиране на възбуждането.

Най-простият закон, прилаган в тези системи, е пропорционалният закон, при който напрежението на възбуждане се изменя пропорционално на отклонението на напрежението от зададената му стойност, т.е.

$$U_B = K \cdot \Delta U_G \ .$$

Този закон се нарича П-закон на управление. Очевидно е, че за достигането на малка стойност на отклонение на напрежението е необходимо повишаването на коефициента  $K$ , наричан коефициент на усилване. Но това увеличаване води до влошаване на устойчивостта на системата (напрежението на генератора е склонно към колебания), а също и до влошаване на динамиката на процеса на регулиране. С повишаването на изискванията към статическата точност се налага използването на по-сложни закони на регулиране, каквито са пропорционално-интегралният или ПИ-законът на регулиране. При такъв закон управляващото въздействие (напрежението на възбуждане) може да бъде записано както следва:

$$U_B = \int k \cdot \Delta U_G \cdot dt + K \cdot \Delta U_G \quad .$$

Статическата точност при този закон е много висока, практически отклонението на напрежението на клемите на генератора от зададеното е 0 V. Такъв закон, включващ интегрална съставна, се нарича астатичен закон, т.е. без статична грешка при регулирането.

### *21.1.2. Системи за компаундирне. Основни съотношения и структура*

Както бе показано в гл. 17, синхронната машина може да бъде разглеждана като източник на е.д.н. с индуктивно вътрешно съпротивление. Ако се пренебрегнат насищането и някои други подробности, е.д.н. на генератора е пропорционално на напрежението или тока на възбуждане. Тогава за напрежението на клемите на генератора можем да запишем следните зависимости:

$$U = E_G - j \cdot X_C \cdot I_C ; \quad E_G = k \cdot I_B \quad .$$

Ако се въведе законът на регулиране

$$I_B = K \cdot |k_U \cdot U + k_I \cdot I_C| \quad ,$$

става лесно да се покаже, че при определени стойности на коефициентите напрежението на клемите може да бъде неизменно. Придавайки физически смисъл на горните съотношения и базирайки се на тях можем да твърдим, че ако реализираме система за възбуждане, която да осигурява ток на възбуждане на генератора, равен на сума от две съставни - едната пропорционална на напрежението на клемите на генератора, а другата - пропорционална на тока в статора, ще осигурим постоянство на напрежението на статора.

Реализацията на този закон на регулиране предполага:

1. Осъществяване на обратна връзка по напрежението на генератора с

напреженов трансформатор.

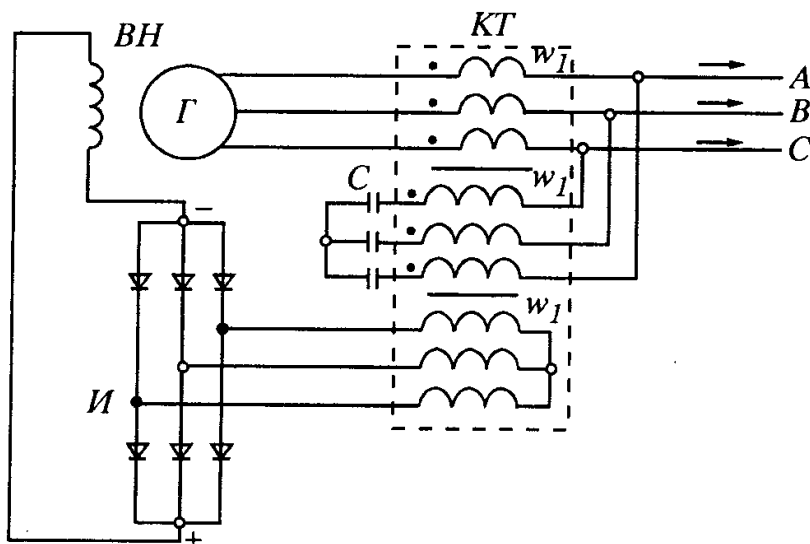
2. Осъществяване на обратна връзка по ток с токов трансформатор.

3. Сумиране и изправяне на получения сигнал и използването му за възбуждане на генератора.

Обратните връзки по напрежение и ток се наричат напреженов и токов канал. Особеното е, че сигналът от трансформатор на напрежение представлява източник на напрежение, а сигналът от токовия трансформатор - източник на ток. Както е известно, непосредственото сумиране на източник на ток и източник на напрежение не е възможно, единият от тях трябва да бъде преобразуван. Ето защо има много варианти на преобразуване и сумиране на сигналите, което от своя страна води до голямо разнообразие на схеми на системи за компаундиране. Различаваме системи за компаундиране с последователно електрическо сумиране, паралелно електрическо сумиране, електромагнитно сумиране, токово компаундиране (т.е. сумиране след изправяне), амплитудно-фазово компаундиране (векторно сумиране на канала на тока и напрежението), еднофазни и трифазни системи, и т.н.

### 21.1.3. Примери на схемни решения на системи за компаундиране

• Система за компаундиране с електромагнитно сумиране с тринамотъчен трансформатор и индуктивен или капацитивен компаундиращ елемент. На фиг. 21.2 е показана схемата на тази система. Тя е много разпространена и с някои разновидности се прилага на синхронните генератори българско производство, на руските генератори, на генератори на фирмата „Siemens“ и др.



Фиг. 21.2

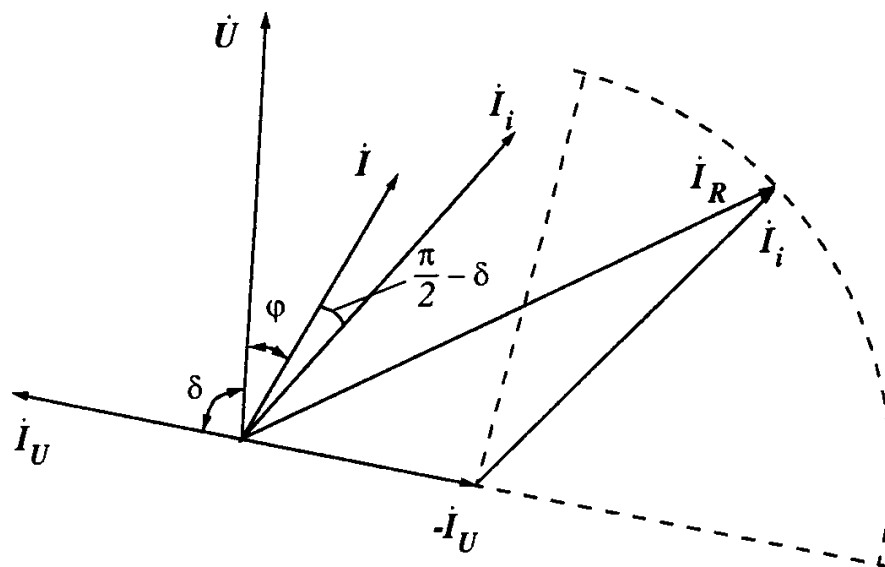
Основен елемент в схемата е трифазният сумиращ тринамотъчен трансформатор или, както се нарича съобразно утвърдилата се терминология, компаундиращ трансформатор. По конструкция той не се различава от обикновения трансформатор. На магнитопровода за всяка фаза са разположени по три намотки - първата се нарича напреженова и се зах-



ранва през индуктивност или кондензатор от напрежението на статора, втората се обтича от тока на генератора, а третата се захранва през изправител възбудителната намотка. Често пъти за настройка на системата вторичната и напреженова намотка се правят с промеждутъчни изводи.

Особеното в работата на компаундиращия трансформатор е режимът, в който работи трансформаторът. Кондензаторът, свързан последователно в напреженовата намотка (наричан компаундиращ кондензатор или компаундиращ елемент) се оразмерява така, че неговият импеданс е 3-4 пъти по-голям от приведеното към първичната намотка активно съпротивление на намотката за възбуждане на генератора. Индукцията в трансформатора в номинален режим е 2-3 пъти по-ниска от индукцията на насищане. Компаундиращият елемент превръща статорното напрежение в източник на ток и в трансформатора се сумират две м.д.н.: едната - пропорционална на напрежението на генератора, а другата - пропорционална на тока. Така трансформаторът сумира векторно два магнитни потока, единият от които е пропорционален на напрежението, а другият - на тока на генератора. Трансформаторът работи като източник на ток спрямо възбудителната намотка и, следователно, не бива да работи на празен ход.

Друга важна особеност на този начин на сумиране е, че при активен товар двете м.д.н. се сумират векторно под ъгъл  $90^\circ$ , а при индуктивен товар - аритметично по една ос. Той е подобен на сумирането на потока, създаван от възбудителната намотка и реакцията на статора. Ето защо по този начин на сумиране на съставните на м.д.н. в компаундиращия трансформатор при определени коефициенти в компаундиращия трансформатор има възможност да се компенсира изцяло реакцията на статора в синхронната машина и да се поддържа напрежението на генератора постоянно.



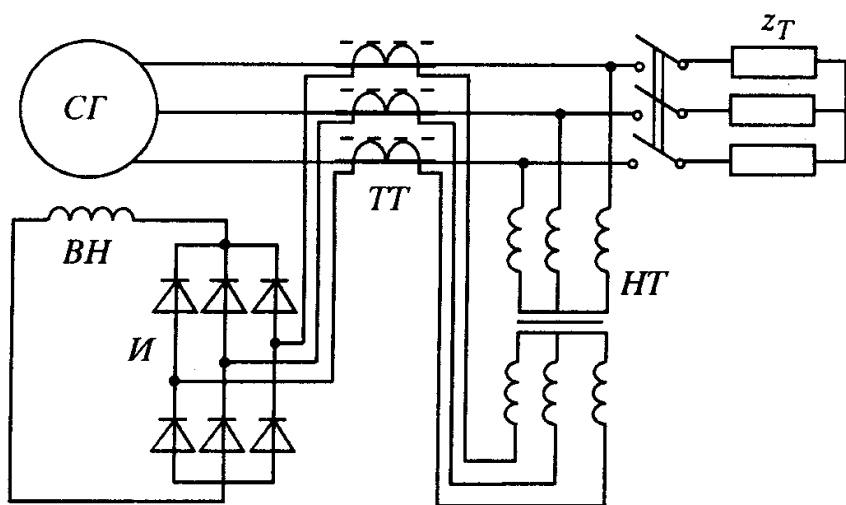
Фиг. 21.3

Векторната диаграма на токовете и напреженията е показана на фиг. 21.3. Токът в напреженовата намотка на трансформатора е отбелязан като  $\dot{I}_U$  и изпреварва вектора на напрежението на ъгъл  $\delta$ , който най-често е равен на 70-80 ел. градуса. Ако токът в статора  $\dot{I}$  изостава на ъгъл  $\phi$ ,

токът  $I_i$  в токовата намотка на трансформатора ще изостава от него на ъгъл ( $\pi/2 - \delta$ ). Векторното сумиране на създаваните от тях потоци при посочения избор на начало на намотките ще определи токът във вторичната намотка  $I_R$ .

Възможно е вместо кондензатор да се използва друг реактивен елемент, например индуктивност. Векторното сумиране се запазва и работата на схемата е подобна.

• Система с последователно електрическо сумиране и токов трансформатор с въздушна междина. По тази схема се произвеждат системите за възбуждане на генераторите на фирмата „Раде Кончар“ (югославска, понастоящем в Словения). Опростената схема (без изводите за настройка по трансформатора) е показана на фиг. 21.4.



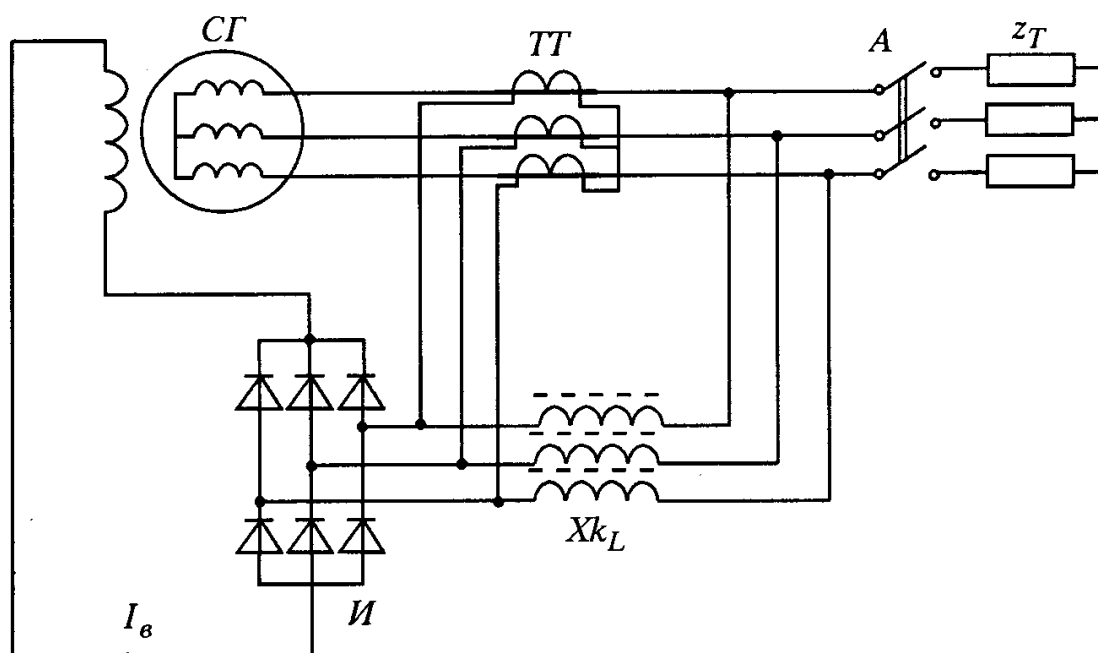
Фиг. 21.4

Особеното в конструкцията на токовия компаундиращ трансформатор е това, че в ярема на магнитопровода на трансформатора, на пътя на основния магнитен поток има въздушна междина. Конструкцията на трансформатора е такава, че позволява регулирането на въздушната междина, с което се регулират ха-

рактеристиките на системата за възбуждане. Тази въздушна междина променя параметрите на токовия трансформатор така, че индуктивното съпротивление на намагнитване на трансформатора се намалява значително и той се превръща от източник на ток в източник на напрежение. Индуктивното съпротивление на намагнитване в еквивалентната схема играе ролята на компаундиращ елемент. Източникът е пропорционален на тока на генератора и като такъв се сумира последователно с източника, пропорционален на напрежението на генератора. И при този начин на сумиране електродвижещите напрежения, пропорционални на тока и напрежението в статора на генератора, се сумират под ъгъл, близък до  $90^\circ$  при активно натоварване на генератора, и аритметично (по една ос) при индуктивно натоварване. Аналогично, и при тази схема напрежението се стабилизира.

• Система с паралелно електрическо сумиране. Системата е използвана в генераторите, произведени в бившата ГДР от фирмата „АЕГ“ и други

фирми. Схемата е показана на фиг. 21.5.



Фиг. 21.5

Начинът на работа на системата е аналогичен на начина на работа на описаните по-горе системи. Напрежението на генератора се преобразува в източник на ток, който се сумира с източника на ток от токовия трансформатор директно на входните клеми на изправителя. В представената схема каналът на напрежение е без трансформатор, така, както се прилага от фирмата „Dessau“. Генераторите на тази фирма са с високоомни възбудителни намотки и, следователно, по-голямо напрежение на възбуждане. По принцип обаче е възможно използването на напреженов трансформатор.

#### 21.1.4. Коректори на напрежението в системите за компаундиране. Схемни особености и примери

Системите за амплитудно-фазово компаундиране, независимо от простотата и надеждността, с която се характеризират, не могат да удовлетворят изцяло изискванията, поставени към устройствата за управление на синхронните генератори в състава на КЕС.

Изискванията за качеството на напрежението непрекъснато нарастват и днес почти всички класификационни организации допускат отклонение на напрежението не повече от  $2,5\% U_{nom}$ . Системите за компаундиране при най-щателна настройка позволяват да се достигне точност на поддържане на напрежението около  $5\%$ , тъй като не са в състояние да компенсират влиянието, освен на товарния ток, и на други фактори като изменение на скоростта на въртене на първичния двигател, изменение на параметри-

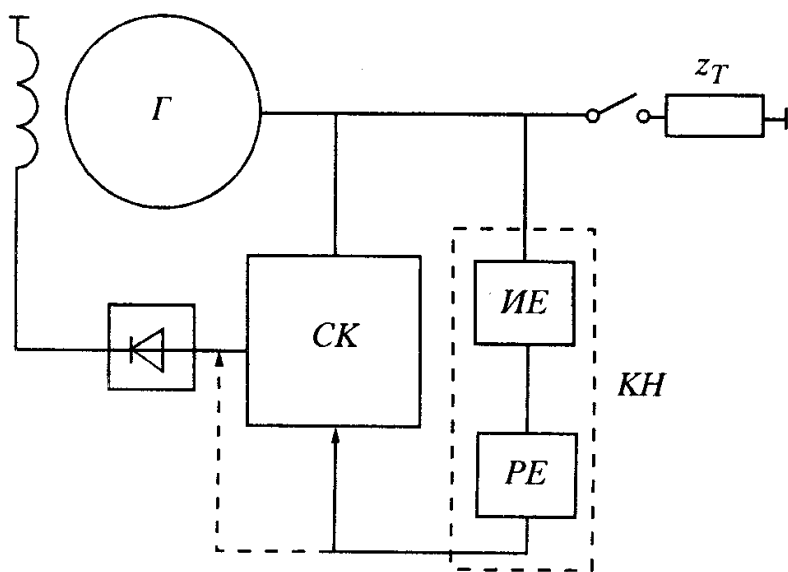
те на устройствата с времето, изменение на температурата на околната среда и други.

За отстраняване на влиянието на тези фактори системата следва да има освен обратна връзка по въздействие и регулиращ контур, способен да коригира тока на възбуждане така, че отклонението на напрежението на генератора да не превишава допустимото.

Този допълнителен канал на регулиране, работещ по принципа на управление по отклонение като отрицателна обратна връзка, се нарича коректор на напрежението.

Коректорът на напрежение не подменя изцяло системата на компаундиране в процеса на регулиране. Той представлява допълнителен контур на регулиране, позволяващ достигането на най-добро качество на регулирането в статически и динамически режими. Наличието на система за компаундиране (СК) значително облекчава изискванията към коректора на напрежение по отношение коефициента на усилване и времеконстанта на регулиране, така че такава двуконтурна система, съчетавайки достоинства на двата принципа на регулиране, осигурява високи показатели на процеса на регулиране.

Блок-схемата на система за възбуждане, включваща СК и коректор на напрежението, е показана на фиг. 21.6. Входът на коректора на напрежение е включен към статора на СГ, а изходът му въздейства на системата за компаундиране. Коректорът на напрежение обикновено включва два функционални възела, които условно можем да наречем измерител на напрежението (ИЕ) и регулиращ елемент (РЕ). Предназначението на измерителния елемент е да формира сигнал, пропорционален на отклонението на



Фиг. 21.6

напрежението на СГ от номиналното му значение, а на регулиращия елемент - да обезпечи корекция на тока на възбуждане на генератора, въздействайки най-често на системата за компаундиране.

В качеството на регулиращи елементи се използват най-различни устройства, чиито параметри могат да бъдат управлявани електрически. Като управляеми ключове например се използват тиристори, като

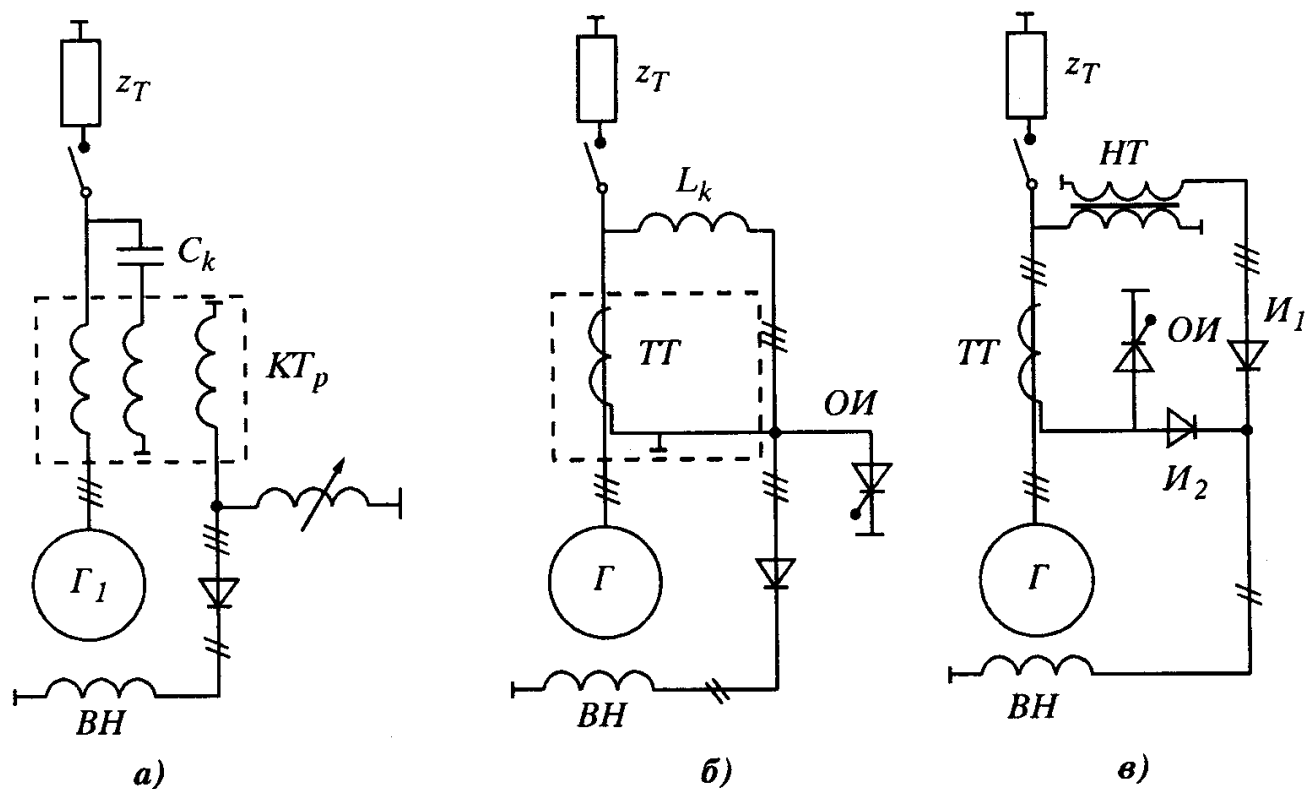
управляеми индуктивности - магнитни усилватели и дросели с подмагнитване. Обикновено чрез тези устройства се коригира тока на възбуждане по два начина:

- а) чрез „отбиране“ на известна част от тока на възбуждане;
- б) чрез въздействие върху системата за компаундиране така, че да се променят нейните параметри или съпротивлението на компаундиращия елемент  $X_k$ .

Първият способ - „отбиране“ на известна част от тока, се прилага при две условия: първо - СК да работи като източник на ток, т.е. тя е с паралелно сумиране на сигналите от токовия трансформатор (ТТ) и напреженовия трансформатор (НТ), и второ - системата да е „прекомпаундирана“, т.е. в областта на номиналните токове тя да осигурява ток на възбуждане повече от необходимия.

На фиг. 21.7а, б, в са показани начините за включване на регулиращи елементи, работещи на отбиране на тока към система за компаундиране (СК). Системата за компаундиране и регулиращият елемент в различни варианти са показани в еднолинеен план.

На фиг. 21.7а е показана схемата на компаундиране с тринамотъчен трансформатор и капацитивен компаундиращ елемент, където в качеството на регулиращ елемент е използван дросел с подмагнитване (ДР). Дроселът е включен на променливотоковата страна на изправителя в системата за компаундиране и се управлява във функция от отклонението на напре-



Фиг. 21.7

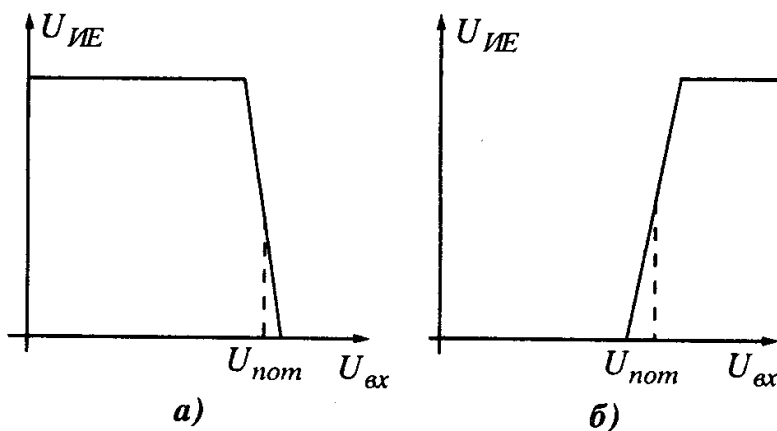
жението. Когато напрежението на клемите надвиши стойността на номиналното напрежение, токът за подмагнитване се увеличава и индуктивното съпротивление на дросела се намалява. Тъй като СК работи като източник на ток, част от тока на възбуждане се отклонява в ДР. Токът през възбудителната намотка намалява, намалява се и напрежението на генератора.

На фиг. 21.7б е показан вариант, в който като регулиращ елемент са използвани тиристори, даващи „на късо“ за определени интервали от периода променливотоковия вход на изправителя в СК. Тъй като СК работи като източник на ток (на схемата е посочена СК с електрическо сумиране и индуктивен компаундиращ елемент), това не довежда до авария. Продължителността на интервала от периода, през който тиристорите са отпушени, се определя от схемата за управление на тиристорите (на фигурата последната не е показана) като функция от отклонението на напрежението от номиналното. Тъй като СК е прекомпаундирана, при натоварване на генератора напрежението се повишава и под действието на появилото се отклонение се изработва сигнал за отпушване на тиристорите, чиято фаза се определя от отклонението на напрежението от зададената му стойност.

На фиг. 21.7в е показана схема, в която по аналогичен начин с тиристори се регулира само големината на съставната от канала на тока. Тиристорите са включени паралелно на входа на изправителя в схема с електрическо сумиране. Управлението на тиристорите се извършва аналогично на предходния случай.

#### • Измервателен елемент

Измервателният елемент е важен възел в коректора на напрежение. От неговата характеристика зависят в много голяма степен статичната точност, обезпечавана от системата за възбуждане и нейните динамични качества. Характеристиката „вход - изход“ на измервателния елемент е най-често от вида, показан на фиг. 21.8а.

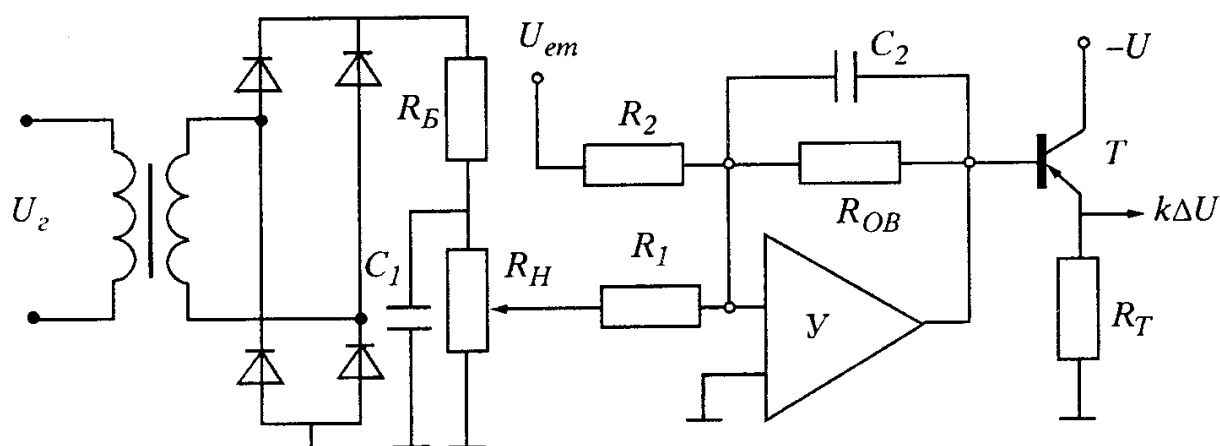


Фиг. 21.8

Изборът на измервателен елемент с характеристика от вида „а“ или „б“ се определя от начина на свързване и специфичните особености на регулиращия елемент. Така например, ако измервателният елемент въздейства на дросела с подмагнитване, използван в схемата на фиг. 21.7а, токът на подмагнит-

ване трябва да расте при увеличаване на напрежението, т.е. измервателният елемент трябва да има характеристика от вид „а“. Ако дроселът с подмагнитване се използва като КЕ (фиг. 21.8а), измервателният елемент трябва да намалява тока на подмагнитване при намаляване на напрежението (фиг. 21.8б).

Два са основните показатели, определящи качеството на измервателния елемент: неговата чувствителност (или коефициент на усилване) и времеконстанта. Коефициентът на усилване се определя от наклона на характеристиките около точката, определена от  $U_{nom}$ . Колкото по-стръмен е този наклон, толкова коефициентът на усилване е по-голям. Времеконстантата на измервателния елемент най-често се определя от времеконстантата на филтъра на изправителя, след който става сравняването на напрежението на генератора с еталонно такова. Времеконстантата на този филтър често е от порядъка на няколко периода и съществено влияе на процеса на регулиране. При значителни времеконстанти и коефициент на усилване системата за възбуждане може да влезе в режим на автоколебание. Примерна схема на измервателен елемент в коректор на напрежение е показана фиг. 21.9.

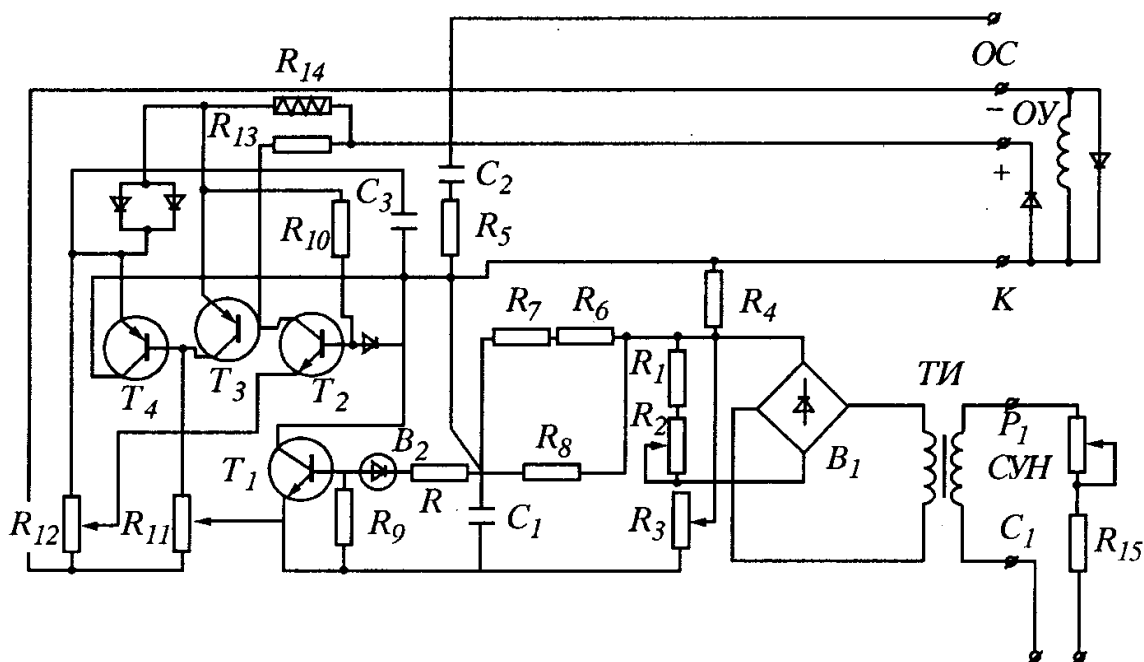


Фиг. 21.9

Изправеното напрежение на генератора се сравнява с еталонното напрежение (стабилизирано постоянно напрежение) на входа на операционен усилвател. Посредством кондензатора  $C_2$  в обратната връзка на усилвателя се филтрира променливата съставна в напрежението. Коефициентът на усилване на измервателния елемент се определя от съотношението на съпротивленията  $R_{OB} / R_1$ , а времеконстантата - от произведението  $R_{OB} \cdot C_2$ . Изходът на операционния усилвател се подава към усилвател на мощност, най-често на базата на емитерни повторители.

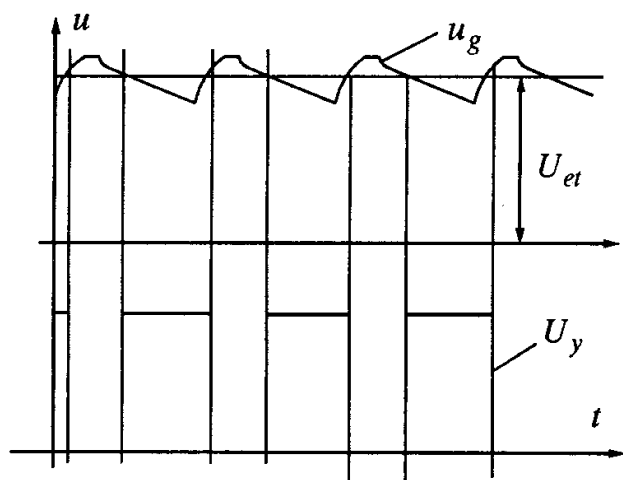
Измервателен елемент по подобна схема се използва от фирмата "Stronberg" - Финландия.

Съветските синхронни генератори са снабдени с измервателни елементи КН-2, построени по схемата, показана на фиг. 21.10.



Фиг. 21.10

Действието на схемата се пояснява от временните диаграми, показани на фиг. 21.11. Изправеното и филтрирано в определена степен напрежение се подава към базата на транзистор  $T1$ , последователно с която е включен ценов диод  $B2$ . В моментите, в които напрежението на генератора превишава напрежението на стабилизация на ценовия диод, транзисторът



Фиг. 21.11

$T1$  е отпушен. При изменение на величината на входното напрежение съотношението между отпушено и запушено състояние на транзистора се променя, а следователно се променя и средното значение на получаваното импулсно напрежение. Последното се усилва по мощност с импулсния усилвател, построен на транзисторите  $T2$ ,  $T3$  и  $T4$ . Намотката на отбирация дросел, който се управлява от коректора, се включва в колектора на транзистор  $T4$  към



клемите, означени с  $K$  и  $(-)$ .

Разбира се, възможни са много други варианти, които често се създават от фирмите-производители преди всичко от съображения за патентна чистота. Тук са споменати най-вече тези, които се използват на българските кораби.

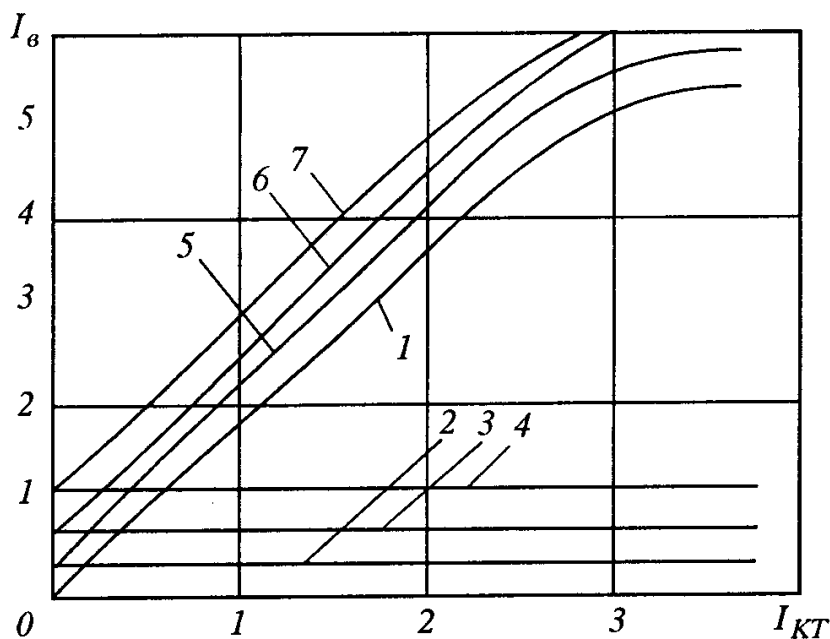
## 21.2. Външни характеристики на системите за възбуждане

За оценка на работата на системата за възбуждане или за откриване на евентуални повреди в нея е много удобно използването на външните им характеристики. Особено удачно и нагледно е представянето им в графична форма и прилагането им в графоаналитични методи за синтез и изследване на тяхната работа.

По аналогия с външните характеристики на синхронните генератори, външните характеристики на системите за възбуждане се определят като семейства характеристики във вид  $I_B = f(I_G)$  при различни напрежения на клемите на генератора (т.е. канала на напрежение)  $U_{KH} = var$  или във вид  $I_B = f(U_G)$  при различно натоварване на генератора  $I_G = var$  при постоянен фактор на мощността на товара.

Първото от тези семейства характеристики, често се нарича, отново по аналогия със синхронните машини, семейство регулировъчни характеристики.

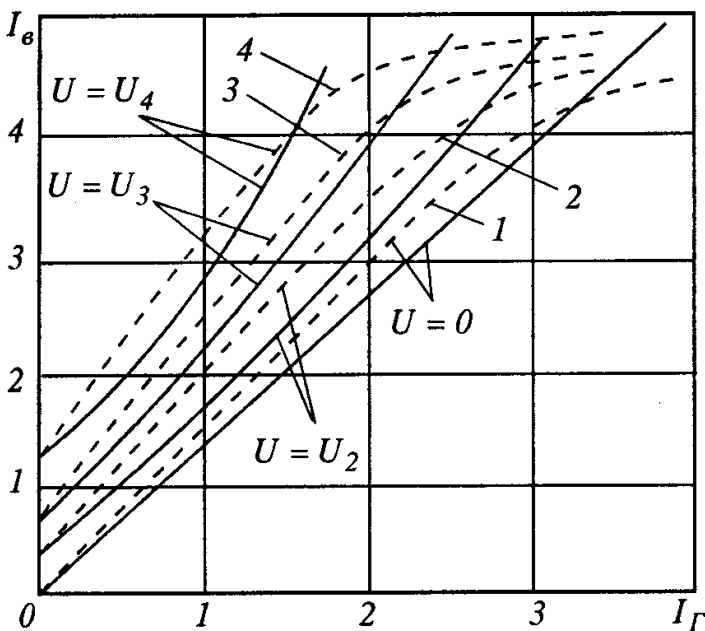
Съгласно блок-схемите и принципните схеми, разгледани по-горе, входни величини за системата за компаундиране представляват напрежението в канала на напрежението ( $KH$ ), тока и неговата фаза в канала на тока ( $KT$ ), а изходна величина е токът на възбуждането.



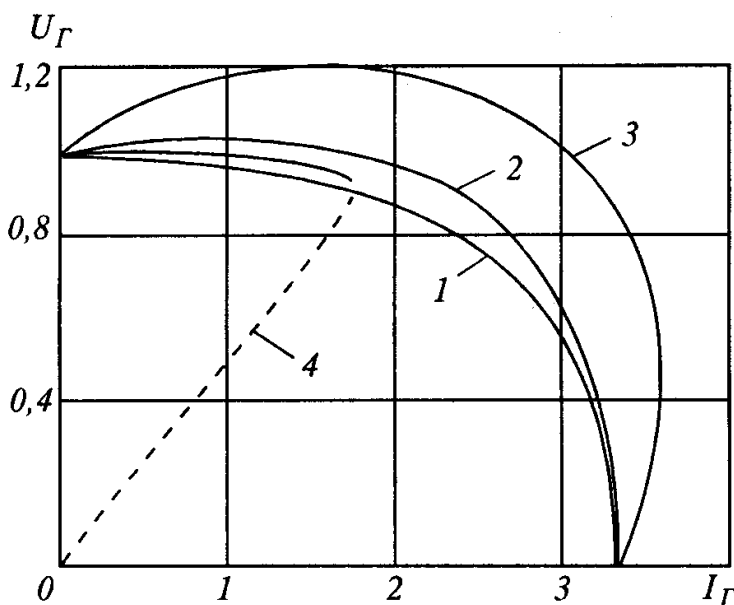
Фиг. 21.12

Ако в системата за пряко токово компаундиране с последователно свързване на токов и напреженов канал ( $KT$  и  $KH$ ) като  $CG$ , подадем от странични източници ток в  $KT$  и напрежение в  $KH$ , очевидно ще получим зависимост като тази на фиг. 21.12 (крива 1).

Зависимостта отначало е линейна, а след насищането на трансформатора на ток коефициентът на пропорционалност между тока през КТ и обезпечавания ток за възбуждане се намалява постепенно. Обратно, ако подаваме определено напрежение на КН при нулев ток през СГ, очевидно получаваната зависимост ще представлява крива линия, паралелна на оста на тока (криви 2, 3, 4 на фиг. 21.12). При съвместно действие на двата канала ще получим семейство характеристики - криви 5, 6, 7, като алгебрична сума от крива 1 и криви 2, 3, 4, тъй като с помощта на изправителите се извършва алгебрично сумиране. Ако системата е за амплитудно-фазово компаундиране, зависимостите ще имат същия характер, само че резултантните криви ще получим като геометри-



Фиг. 21.13



Фиг. 21.14

ческа сума в зависимост от фазовата разлика между тока в КТ и напрежението в КН (криви 1, 2, 3, 4 на фиг. 21.13). Припомняме, че тези криви представляват характеристиките на регулатора, осъществяващ положителна обратна връзка. Ето защо като съпоставим тези характеристики със семейството регулировъчни характеристики на генератора (характеристиките на обекта на регулиране) можем да определим устойчивите състояния на системите от пресечните точки на двете семейства характеристики. Тези устойчиви състояния определят точки от външната характеристика на генератора, разглеждан съвместно със системата на възбуждане, т.е.  $U_G = f(I_G)$  при определен постоянен фактор на мощността на товара.

Външната характеристика, получена от кривите на фиг. 21.14, е показана на с крива 1. За друго значение на фактора на мощност на товара характерис-

тиката за системи с амплитудно фазово компаундиране ще има вида, показан от крива 2, а ако системата е за пряко токово компаундиране - от вида, показан с крива 3.

Извършеният анализ дава възможност да бъде направен извода, че точността на системата за компаундиране зависи от факта доколко регулировъчните характеристики на системата за компаундиране са близки до тези на синхронния генератор. Това се определя най-вече от подбора на коефициентите на трансформация на КТ и КН, а също така и от големината на компаундиращия елемент. Характерна точка на външната характеристика е трайният ток на късо съединение. Очевидно, той се определя от тока, при който настъпва насищане на токовия трансформатор. Големината на този ток обикновено се избира между (3 - 4)  $I_{nom}$ . Тази стойност се приема от съображение за нормална работа на защитата на станцията в режим на късо съединение.

Разгледаните характеристики се отнасят до системи, работещи по принципа на регулиране по компенсация на въздействието. При построяването на външната характеристика на синхронен генератор със система за регулиране по отклонение по-удобно се оказва използването на характеристиките  $I_B = f(U_G)$  при различно натоварване на генератора  $I_G = var$  при постоянен фактор на мощността на товара.

На фиг. 21.15 е представена структурата на схема на СГ с тиристорна система за възбуждане, работеща по принципа на регулиране по отклонение. При намаляване на напрежението на входа на блока за сравнение се изработва сигнал, който системата за управление на тиристорите преобразува във фазов ъгъл на отпушване на тиристора. При намаляване на напрежението под определена стойност тиристорите винаги се отварят в нулата на полупериода и към намотката за възбуждане се прилага максимално възможното напрежение. Подобно ограничение има характеристиката и при увеличение на напрежението на входа, само че в този случай системата намалява тока до минимум. Обикновено зоната на изменение на входното напрежение, в която изходното напрежение е много малко, е около 5 - 8 %  $U_{nom}$ .

Работата на синхронния генератор със система за регулиране само по отклонение в различни режими илюстрира крива 4 на фиг. 21.14. Външната характеристика има участък на неустойчива работа, даден с пунктир, и напомня характеристиката на постояннотоковия генератор с шунтово възбуждане. Поради отсъствието на токов канал системата не обезпечава траен ток на късо съединение. Такава е характеристиката на полските генератори със система тип TUR, която е много разпространена на корабите, строени между 1980 г. и 1990 г. у нас за Пароходство „Български морски



флот“. Тази схема на възбуждане ще бъде разгледана във варианта, произведен до 1990 г. (фиг. 21.15) - с проста силова схема, без трансформатори и само с канал на напрежение. Каналът представлява полууправляем тиристорен изправител от тиристорите *TU17* и *TU8* и диодите *D21* и *D20*, включен между звездния център на генератора и едно от фазните напрежения. Системата може да се разглежда като класическа система за регулиране по отклонение. Особеност на генератора е относително високоомната възбудителна намотка, с напрежение на възбуждане около 35 волта, относително голямата времеконстанта на ротора и форсировъчна възможност на системата около 2,2 пъти. Благодарение на тези особености, удачно съчетани с параметрите на управляемия изправител, системата осигурява качествено регулиране.

Особеност в дадения измерителен елемент е използването на сложна дванадесетфазна схема на изправяне - трансформаторът *Tr55* е с две системи вторични намотки, свързани съответно в триъгълник звезда и два последователно свързани изправителя и измервателния мост от диодите *D51*, *D52*, *D53* и *D54*. Тази схема на изправяне позволява достигането на много малки пулсации на изправеното напрежение, които допълнително се изглаждат с дросела *Dr56*. Благодарение на неголемите пулсации габаритът на последния е сравнително неголям, а времеконстантата е малка, което обезпечава добри динамични качества на коректора.

### 21.3. Безчеткови синхронни генератори и техните системи за възбуждане

Конструкцията на безконтактните синхронни генератори, разгледана в гл. 17, е особено перспективна за корабните синхронни генератори поради отсъствието на контактен апарат и, вследствие на това, по-опростено обслужване. Трябва да подчертаем, че по тази причина този тип конструкция през последните 10 години решително се наложи в новопостроените кораби.

Възбудителят в безконтактния синхронен генератор може да бъде разглеждан като своеобразен машинен усилвател, включен на входа на генератора, за какъвто, както бе посочено по-горе, ще разглеждаме възбудителната намотка.

Следователно, можем да предположим, че системите за възбуждане на такива генератори по своята структура няма да се отличават от вече разгледаните, освен по своята изходна мощност.

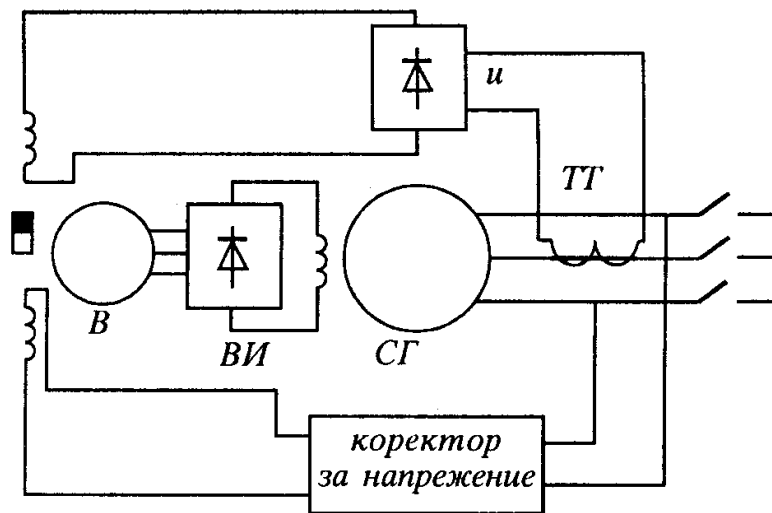
Все пак, въвеждането на такъв машинен усилвател в контура на възбуждане налага някои особености:

*Първо* - като всяка машина, възбудителната има типична характеристика с участък на насищане след достигането на определена индукция. Това

насищане ще оказва влияние върху възбудането на генератора тогава, когато възбудането на изхода на възбудителя трябва да е максимално, т.е. в два случая - при форсиране на възбудането при включване на товар и при късо съединение. По тази причина тези възбудители се конструират така, че в нормални режими да работят с относително ниска индукция, така че при форсиране на напрежението и при късо съединение да осигуряват необходимото рязко повишаване на напрежението.

*Второ* - възбудителната намотка на възбудителката има определена времеконстанта, поради която, нарастването или намаляването на тока става с известно закъснение. По тази причина добро качество на управлението в преходен процес се достига по-трудно и много от схемните решения на системите за възбудане на безконтактните синхронни генератори са насочени именно към преодоляване на този недостатък.

Ще разгледаме три схеми на системи за възбудане на безчеткови синхронни генератори, които в много отношения са типични за прилаганите решения при такава конструкция на машината:



Фиг. 21.16

На фиг. 21.16 е показана схемата на българските синхронни генератори, тип БСГ.

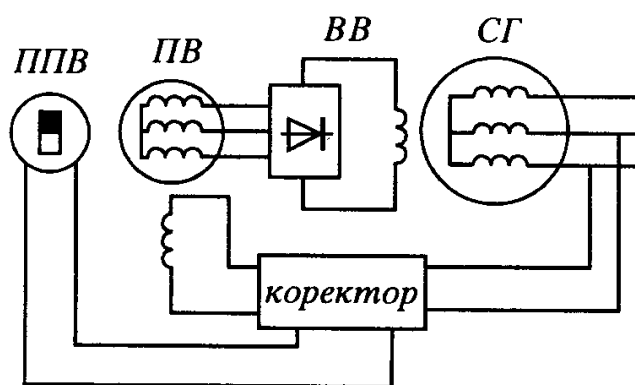
Схемата е аналогична на разгледаните по-горе системи за възбудане. Включва управляем от коректора еднофазен напрежен трансформатор и еднофазен или трифазен токов трансформатор (ТТ) с изправител и, които в този случай са значително по-малки по габарити,

тъй като възбудителят играе роля на усилвател на мощност. Освен това те работят на различни възбудителни намотки, като създаваните от тях съставни се сумират магнитно в общия поток в машината. Това облекчава работата на коректора, тъй като напрежението от токовия канал не се прилага и върху крайните транзистори, регулиращи големината на напреженовата съставна.

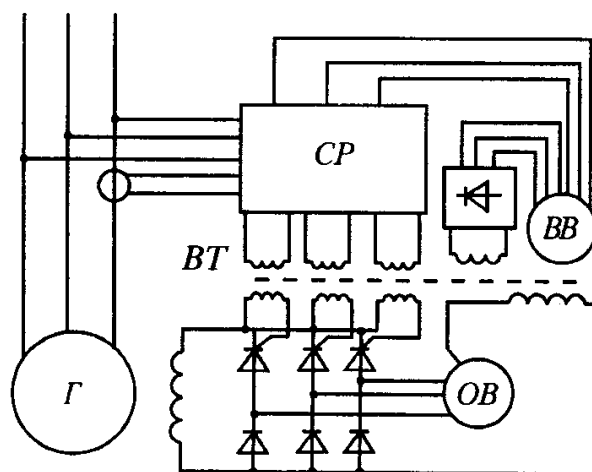
Друга важна особеност на безчетковите генератори, намерила място и в разглежданата схема, е възможността да се облекчи процеса на самовъзбудане чрез вграждането на постоянни магнити в някой от полюсите. По този начин остатъчното напрежение в тези генератори е повишено до 80 V, което, освен това, облекчава работата на коректора.

На фиг. 21.17 е показана схемата за възбуждане на генераторите, произведени от фирмата „AvK“ (Германия). Вместо да се използва за източник на енергия за захранване на подвъзбудителя система за компаундиране, на общия вал на агрегата е монтиран маломощна синхронна машина (ППВ), възбудена от постоянен магнит. Генерираната енергия от тази машина е достатъчна за захранване на намотката на подвъзбудителя (ПВ) и в режим на късо съединение, поради което отпада необходимостта от токов трансформатор. Генераторът, реализиран по тази схема, е много компактен и се управлява във всички режими от електронен коректор на напрежение, построен по принципа на регулиране по отклонението.

Схемата, показана на фиг. 21.18, се използва от фирмата „ASEA“ (Швеция) и показва стремежа да бъде преодолян един от посочените по-горе недостатъци на безконтактните синхронни генератори - тяхното влошено бързодействие при регулиране на напрежението, вследствие инертността на подвъзбудителя.



Фиг. 21.17



Фиг. 21.18

Схемата напомня тази от фиг. 21.17, но с разликата, че помощната електрическа машина *ВВ* с постоянни магнити възбужда подвъзбудителя *ОВ* в максимална степен, като напрежението, подавано на възбудителната намотка на основния генератор *Г*, се регулира чрез управляем въртящ се тиристорен изправител. Импулсите за отпушване на тиристорите се подават от системата за регулиране *СР* към въртящите се тиристори през въртящи се трансформатори *ВТ*.

Благодарение на възможността да се форсира рязко възбуждането на машината чрез въртящия се тиристорен изправител, системата достига много добри динамични показатели като възстановява напрежението при включване на товар за по-малко от 0,15 секунди. Както се вижда от схемата обаче, това качество е достигнато на относително висока технологична цена поради значителното усложняване на конструкцията на машината.

## 21.4. Начално възбуждане и гасене на полето

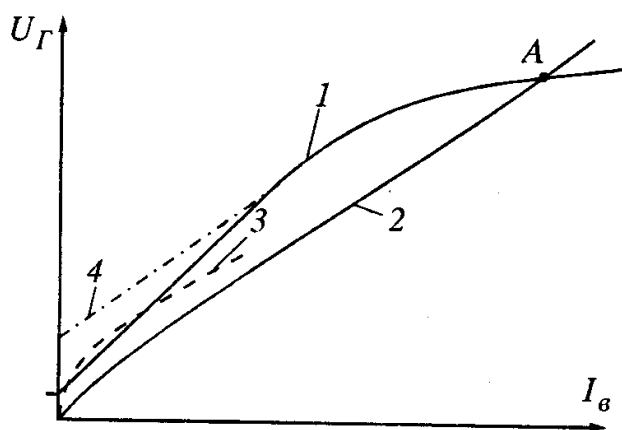
### 21.4.1. Начално самовъзбуждане

Осигуряването на сигурно възбуждане на генератора след неговото развъртане е важно условие за нормалната експлоатация на всеки дизелгенераторен агрегат.

Процесът на началното възбуждане на системите за компаундиране на синхронните генератори не се различава по своята същност от процеса на начално възбуждане на постояннотокови генератори с шунтово възбуждане. Условието за неговото възникване са две : наличие на остатъчно намагнитване на стоманата на възбудителната система на машината и определено съотношение между параметрите на системата на възбуждане и генератора (илюстрирано графично по-долу).

Процесът протича по следния начин: при развъртане на генератора, вследствие остатъчното намагнитване на стоманата, от която е изпълнена машината, на клемите ѝ се появява остатъчно е.д.н. Под действието на това е.д.н. каналът на напрежение създава определен ток на възбуждане. Този ток обезпечава нарастване на е.д.н. на клемите на машината. Каналът на напрежението отново увеличава тока на възбуждане и т.н. Започва лавинообразен процес на нарастване на напрежението, който след като генераторът започне да се насища, се преустановява. На фиг. 21.19 са представени характеристиката на празен ход на генератора (крива 1) и зависимостта между тока на възбуждане, който обезпечава канала на напрежението (крива 2).

Ординатата на т. А ще определи стойността на напрежението, до което ще се самовъзбуди генераторът. По такъв начин каналът на напрежението реализира положителна обратна връзка между напрежението на клемите на генератора и тока на възбуждане. От графиката се вижда, че процесът на самовъзбуждане може да



Фиг. 21.19

възникне само ако разположението на кривите 1 и 2 е по начин, съвпадащ с представения на схемата. Това означава, че този процес може да се обезпечи, ако:

- генераторът има достатъчно остатъчно намагнитване;
- включването на клемите на изправителя към намотката за възбуждане е такова, че възникналият ток създава е.д.н., съпосочно с ос-

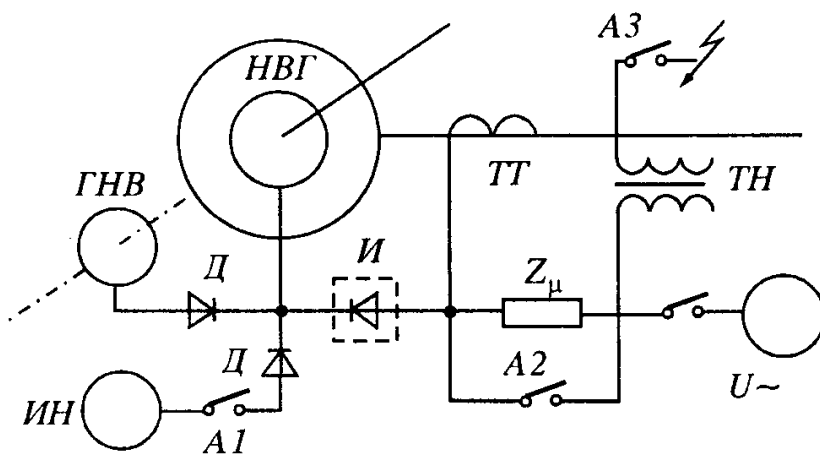


татъчното е.д.н;

- коефициентът на трансформация в КН е такъв, че характеристиката на последния (крива 2) е вдясно от характеристиката на празен ход на генератора (1).

Реализиране на тези условия често се оказва трудно, тъй като остатъчното е.д.н. на генератора обикновено е едва  $2 \div 5\%$ . Вследствие нелинейността на характеристиката на диодите в полупроводниковия изправител, характеристиката на КН в началния участък не е линейна и е възможно в известна област тя да се намира вляво от характеристиката на празен ход на генератора (крива 3). Тогава самовъзбуждане не възниква. Процесът на самовъзбуждане зависи и от характера на компаундиращия елемент. При индуктивен компаундиращ елемент консумираният ток от КН създава размагнитваща реакция в статора на генератора, възпрепятстваща самовъзбуждането. При капацитивен компаундиращ елемент, обратно - реакцията на статора облекчава самовъзбуждането. В системите за възбуждане се използват редица способности за облекчаване на самовъзбуждането, основани на въвеждането на допълнителни елементи в нея или чрез конструктивни изменения в генератора, с цел да се повиши неговото остатъчно е.д.н. Посредством подбор на материала или поставянето на блокчета постоянни магнити в полюсите на ротора се постига значително остатъчно напрежение, достигащо до 10-20 и повече  $V$  (крива 4).

Широко разпространение са получили способите, схематично представени на фиг. 21.20 и осигуряващи сигурно самовъзбуждане при по-неблагоприятно разположение на характеристиките на празен ход и канала на напрежението. Източник за постоянно напрежение (ИН), най-често акумулаторна батерия, се включва кратковременно с ключа А1 през диод Д към намотката за възбуждане. По този начин е.д.н. на клемите на генератора се повишава достатъчно, за да започне процес на самовъзбуждане. След



Фиг. 21.20

като системата за компаундиране обезпечи напрежение, по-високо от това на акумулатора, диодът Д се запушва.

Друг способ се състои в поставянето на вала на маломощен генератор за начално възбуждане (ГНВ), включван също през диод. Действието му е аналогично, като диодът обезпечава „изключване-

то“ на ГНВ след като СК повиши напрежението на клемите на възбудителната намотка.

Възможно е да се включи и променливотоков източник към компаундиращия елемент чрез ключ  $A1$ . Кратковременното даване „на късо“ на компаундиращия елемент чрез ключ  $A1$  позволява характеристиката на КН да се наклони рязко в дясно, като по този начин се обезпечат благоприятни условия за самовъзбуждане. Прилага се и метод, при който кратковременно се дава „на късо“ фазата на генератора (ключ  $A2$ ), благодарение на което в процеса на начално самовъзбуждане участва и каналът на тока. Често в схемата за компаундиране се предвиждат резонансни контури, които „изправят“ нелинейния начален участък на характеристиката на КН.

#### *21.4.2. Гасене на полето*

Гасене на полето се нарича процесът на бързото намаляване на полето на генератора, извършвано с цел да се намали е.д.н. на генератора до допустима величина. Подобна необходимост възниква, ако например поради повредена изолация част от намотката на ротора или статора се окаже дадена „на късо“, което довежда до нарушение на магнитната симетрия на машината и поява на вибрации. Късото съединение в статора на генератора представлява тежка авария и единственият способ за намаляване на размерите на последствията е форсираното снимане на възбуждането. От устройствата за гасене на полето се изисква достатъчно бързо действие при снимане напрежението на генератора до значение, при което възникналата електрическа дъга гасне.

Най-разпространеният способ за гасене на полето е разреждането на електромагнитната енергия, натрупана в индуктивността на намотката, върху съпротивление. Този начин се използва най-вече в генераторите с машинни възбудители. Съпротивлението се включва към намотката с контактор, след което с друг контактор се изключва възбудителят.

В системите за компаундиране условията на гасене на полето се отличават в известна степен от тези в системите с машинни възбудители. В системите за компаундиране с паралелно сумиране системата за възбуждане представлява източник на ток, за който е недопустимо разкъсването на товарната верига. Ето защо гасенето на полето се осъществява посредством шунтирането на системата за възбуждане с контактор. Шунтирането може да се осъществи както на постояннотоковата, така и на променливотоковата страна на изправителя. При шунтиране откъм променливотоковата страна на изправителя токът в намотка за възбуждане протича през диодите на изправителя или през обратен диод, свързан паралелно на намотката. Времеконстантата, с която затихва процесът, е времеконстантата  $T_D$  на генератора.

## 21.5. Паралелна работа на корабните генератори

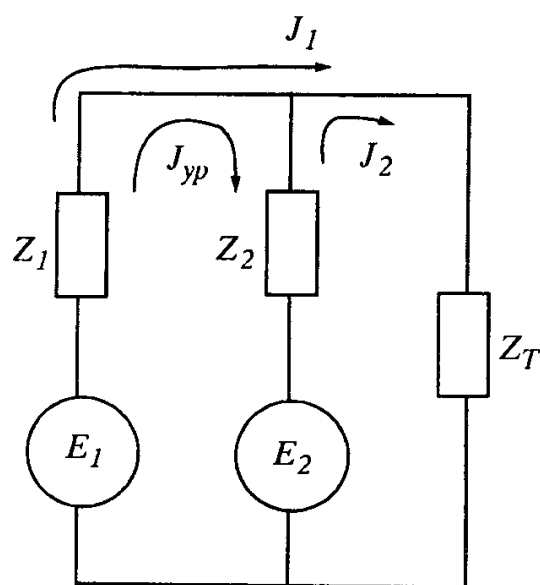
### 21.5.1. Общи сведения

Захранването на корабните консуматори се осигурява както от автономно работещи, така и от паралелно работещи генераторни агрегати. При паралелна работа на корабните генератори се опростява схемата на разпределение на електрическата енергия, намалява се числото на комутационните апарати и на кабелните връзки. Друго важно предимство на паралелната работа е възможността да се обезпечи непрекъснато захранване на консуматорите при прехвърляне на натоварването от един генераторен агрегат на друг, както и да се достигне по-добро натоварване на генераторите и най-ефективното им използване.

Всичко това обуславя широкото използване на паралелната работа на източниците на електрическа енергия на корабите, независимо от наличието на известни нейни недостатъци. Към по-важните от тях се отнася необходимостта от специални средства и способности за включване на генераторите в паралел, увеличаване на токовете на късо съединение и усложняване на защитата, необходимост от по-квалифицирано обслужване. Освен това, при паралелна работа възникват и задачи, свързани с необходимостта за пропорционално разпределяне на товарите и устойчивостта на работата на агрегатите.

Правилата на Регистъра и другите квалификационни организации изискват товарите да се разпределят пропорционално на мощностите на генераторите с отклонения, непревишаващи  $+10\%$  от номиналната мощност на машината.

При паралелна работа на два източника на електрическа енергия между



Фиг. 21.21

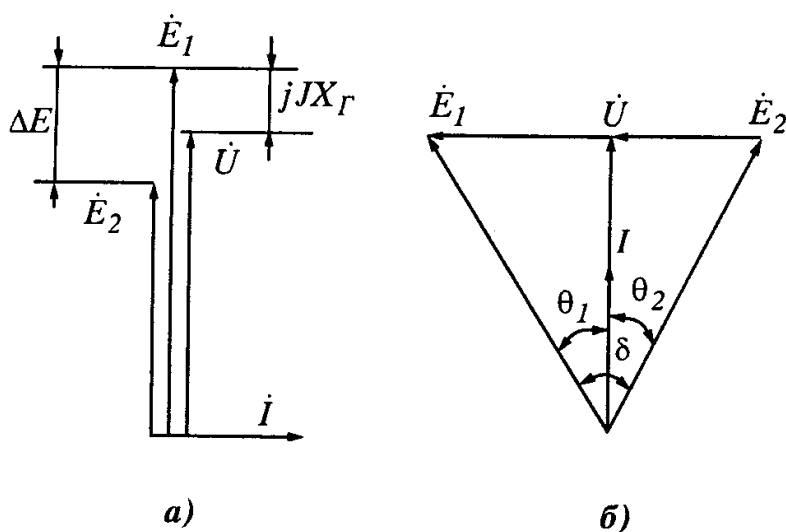
тях се образува контур, в който са включени е.д.н. на двата източника последователно с техните вътрешни съпротивления  $E_1$  и  $E_2$ ,  $Z_1$  и  $Z_2$  (фиг. 21.21). Очевидно, че при разлика на двете е.д.н. между тях ще възникне уравнителен ток, който в същност и довежда до неравномерното натоварване на източниците. При генераторите за постоянен ток е.д.н. зависят от възбуждането, като посредством възбуждането, изравнявайки е.д.н., се постига равномерно разпределение на натоварването.

При синхронните генератори е.д.н. са променливотокови и се характеризират с

модул и фаза. Посредством възбуждането може да се изменя само модула на е.д.н., а фазата се определя от положението на възбудителната намотка, т.е. на ротора в пространството. Освен това, вътрешните съпротивления на генераторите имат практически чисто индуктивен характер. Ето защо, разпределението на товарите при синхронните генератори съществено се отличава от разпределението на товарите в постояннотоковите генератори.

Да предположим, че е.д.н. на генераторите  $E_1$  и  $E_2$  съвпадат по положение в пространството, но са различни по големина (фиг. 21.22а). В затворения контур, образуван от статорите на двата генератора, ще има разлика от е.д.н. Това е.д.н. ще предизвика уравнителни токове в генераторите. Ако приемем, че към тях не са включени товари, то индуктивното съпротивление на генераторите е много по-голямо от активното. Следователно: Токът през генераторите ще бъде ориентиран на  $90^\circ$  по отношение на е.д.н. и падът на напрежението, който той създава, ще се сумира с  $E$  и ще се изважда от  $E_1$ . Следователно, токът  $I$  създава размагнитваща реакция за първия генератор и намагнитваща - за втория. Тъй като уравнилният ток е реактивен, той не натоварва първичните двигатели и не влияе на активната мощност (фиг. 21.22б). Поради това, посредством въздействие на тока на възбуждане на генератора може да се влияе *само* върху реактивното натоварване на генератора. Трябва да се подчертае, че отдаваната активна мощност от генераторите остава неизменна.

Нека приемем, че роторите на генераторите се намират в такова положение в пространството, че между е.д.н.  $E_1$  и  $E_2$  съществува ъгъл  $\delta$  (фиг. 21.22б). Ако електродвижещите сили са равни по амплитуда, то падовете на напрежение, които ще създава възникналият уравнителен ток  $I$ , ще бъдат перпендикулярни на напрежението на клемите на генератора, като за единия



Фиг. 21.22

ния генератор този пад ще изпреварва напрежението на ъгъл  $\theta$ , а за другия ще изостава на ъгъл  $\theta_2$ . Следователно мощностите, отдавани от генераторите ще бъдат такива, че възникналият момент на вала на единия генератор ще бъде двигателен, а на другия - генераторен (т.е. спиращ). Т.е., под действието на момента генераторът, чието е.д.н.

изостава, ще се стреми да се развърти, а генераторът, чието е.д.н. изпреварва - да намали това изпреварване. Този момент се нарича синхронизиращ и се стреми да удържи роторите на генераторите в едно и също положение в пространството. Компенсирането на синхронизиращия момент и удържането по този начин на е.д.н. на генераторите на определен ъгъл помежду им е възможно само чрез увеличение (или намаление) на момента на механическата сила на вала на генератора. Ето защо, увеличаването на момента на първичния двигател на генератора довежда до увеличаване на ъгъла, като по този начин се изменят електромагнитната мощност и отдаваната активна енергия от генератора. Едновременно с това трябва да подчертаем, че паралелната работа на синхронните генератори КЕС се отличава от тази на генераторите в бреговите станции, включени към мощна мрежа. Различията се състоят в това, че:

а) изменението на възбудането в процеса на регулиране на реактивната мощност води до промяна на напрежението на мрежата;

б) изменението на активните мощности води също до промяна на напрежението на мрежата;

в) изменението на натоварването на единия генератор (активно или реактивно) води до промени на натоварването на другия генератор.

Затова, строго казано, преразпределението на активните и реактивни мощности между два генератора, *при условие, че напрежението се поддържа постоянно*, изисква едновременно въздействие на първичните двигатели и на възбудането на синхронните машини. Във връзка с това системите за регулиране на напрежението и скоростта на първичните двигатели се въвеждат допълнителни устройства, които обезпечават изискваната точност при разпределение на товарите при съхранение на неизменно напрежение на шините.

### **21.5.2. Разпределение на реактивните товари между паралелно работещи генератори**

Както бе изяснено по-горе, ако е.д.н. на двата генератора са различни, между тях протича уравнителен ток, който създава размагнитваща реакция в генератора с по-голямо е.д.н., и намагнитваща в този, чието е.д.н. е по-малко. В резултат на това режимът на генератора се установява при усреднено напрежение на клемите на генераторите.

Такъв процес е характерен за синхронните генератори, възбудани от системи за възбудане, в които не се осъществява обратна връзка по тока на генератора. В генераторите със СК, използвани в КЕС, разпределението на реактивната енергия се различава от описаното.

Да предположим, че два СГ със СК работят паралелно и имат еднакви е.д.н. Нека под действието на някакъв фактор, например нееднаквост в тем-

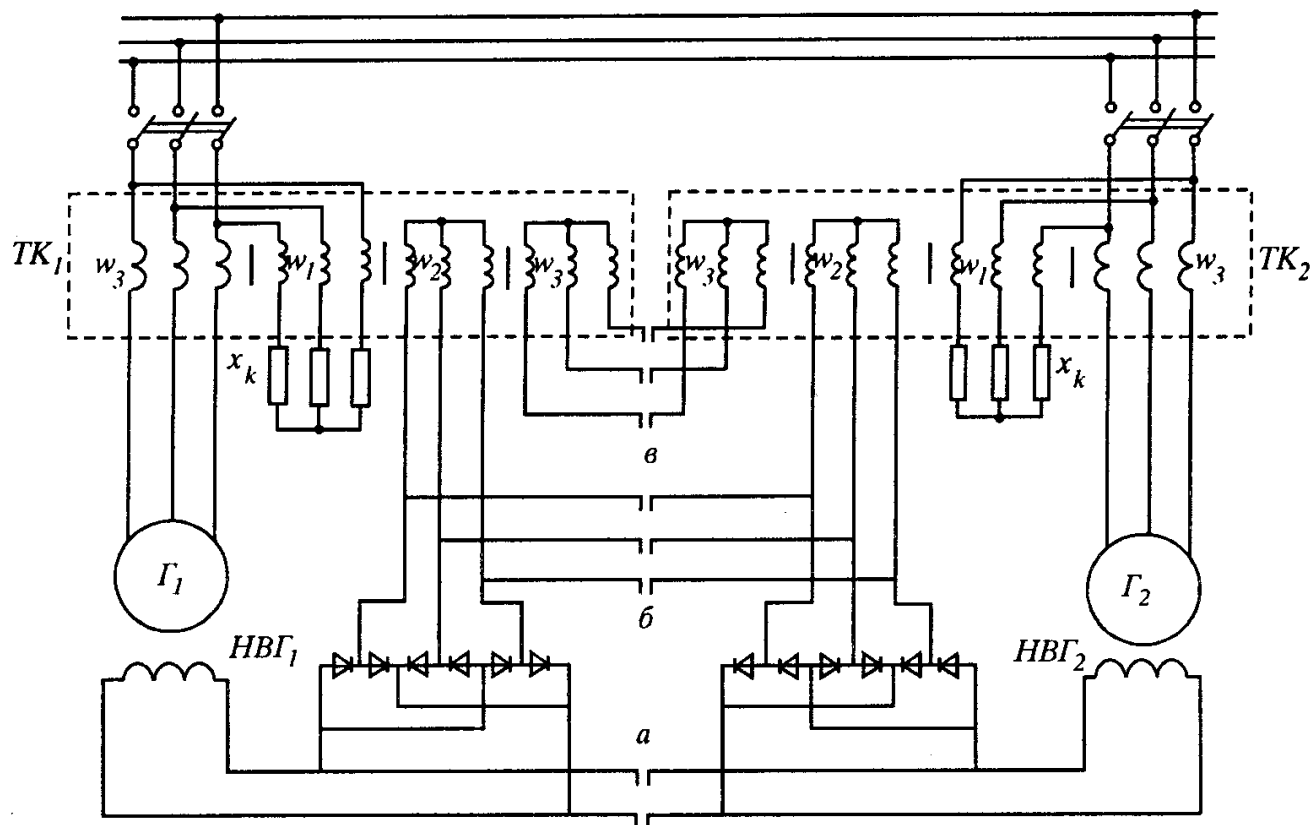
пературата на двата генератора или промяна на външния товар, в статорите на генераторите се появи разлика в реактивното натоварване, т.е. единият генератор се натовари повече, а другият - по-малко. Тъй като при използването на СК токът на възбуждане е функция от тока в статора, както и от фактора на мощност, то системата на възбуждане на генератора, който е с по-голям реактивен ток в статора, ще увеличи неговото възбуждане. Тъй като е.д.н. на генератора ще се увеличи, генераторът ще възприеме още по-голяма част от реактивното натоварване. Съответно натоварването на другия генератор ще се намали и неговата система за възбуждане ще намали тока на възбуждане.

Следователно, наличието на СК води до увеличаване на разликата в натоварването на генераторите, като единият от тях изцяло се развъзбужда, а другият се претоварва.

За отстраняване на този ефект при генераторите, снабдени със СК, се използват преди всичко уравнителни връзки в системите за възбуждане или в допълнителни устройства. За системите за компаундиране без коректори на напрежение обикновено се използват уравнителни съединения. На фиг. 21.23 са показани начините, по които се въвеждат тези уравнителни връзки между намотките на възбуждане на синхронните генератори - обозначени са с буква „а“. Този вид уравнителни съединения се прилагат при генератори с еднаква мощност и еднакви възбудителни системи.

След включване на уравнителните съединения напрежението върху възбудителните намотки се установява по-малко от това на генератора с по-големи е.д.н. и по-голямо от това на генератора с по-малко е.д.н. При промяна на реактивното натоварване на станцията напрежението на възбудителните намотки се изменя еднакво, което води до равномерно разпределение на товарите. Разпределението на товарите е неудовлетворително, единствено при включване на генератор към вече работещ, тъй като подключваният генератор има по-ниска температура на възбудителната намотка и нейното съпротивление е по-малко от това на генератора, работил продължително. Токът на възбуждане в подключвания генератор ще бъде по-голям при еднакво напрежение на клемите, следователно реактивното му натоварване ще бъде по-голямо.

Уравнителните съединения могат да бъдат въведени и на променливотоковата страна на изправителите. И в този случай действието на съединенията е същото. Такива уравнителни съединения се въвеждат при СК с последователно сумиране на КГ и КН. В случаите, когато генераторите имат различни мощности и, съответно, различни по величина напрежения на възбуждане, в системите за възбуждане се предвиждат допълнителни намотки  $w_3$  на компаундиращите трансформатори  $TK_1$  и  $TK_2$  (фиг. 21.23).



Фиг. 21.23

Числото на намотките (коэффициентът на трансформация на тези намотки) се подбира по такъв начин, че напреженията върху тях да бъдат еднакви при еднакви относителни натоварвания на генераторите. Общ недостатък на разглежданите способи е, че те не могат да се използват, когато генераторите са не само различни по мощност, но и с различен тип СК.

Системите за възбуждане, снабдени с коректор на напрежение, позволяват да бъде въведен на входа на коректора допълнителен сигнал, пропорционален на разликата на реактивните токове в статора. Въвеждането става чрез уравнителни съединения между допълнителни устройства на входа на коректорите, реагиращи на реактивното натоварване на генераторите по такъв начин, че този сигнал се получава само при паралелна работа на генераторите. Т.е., докато при автономна работа законът на регулиране на възбуждането е

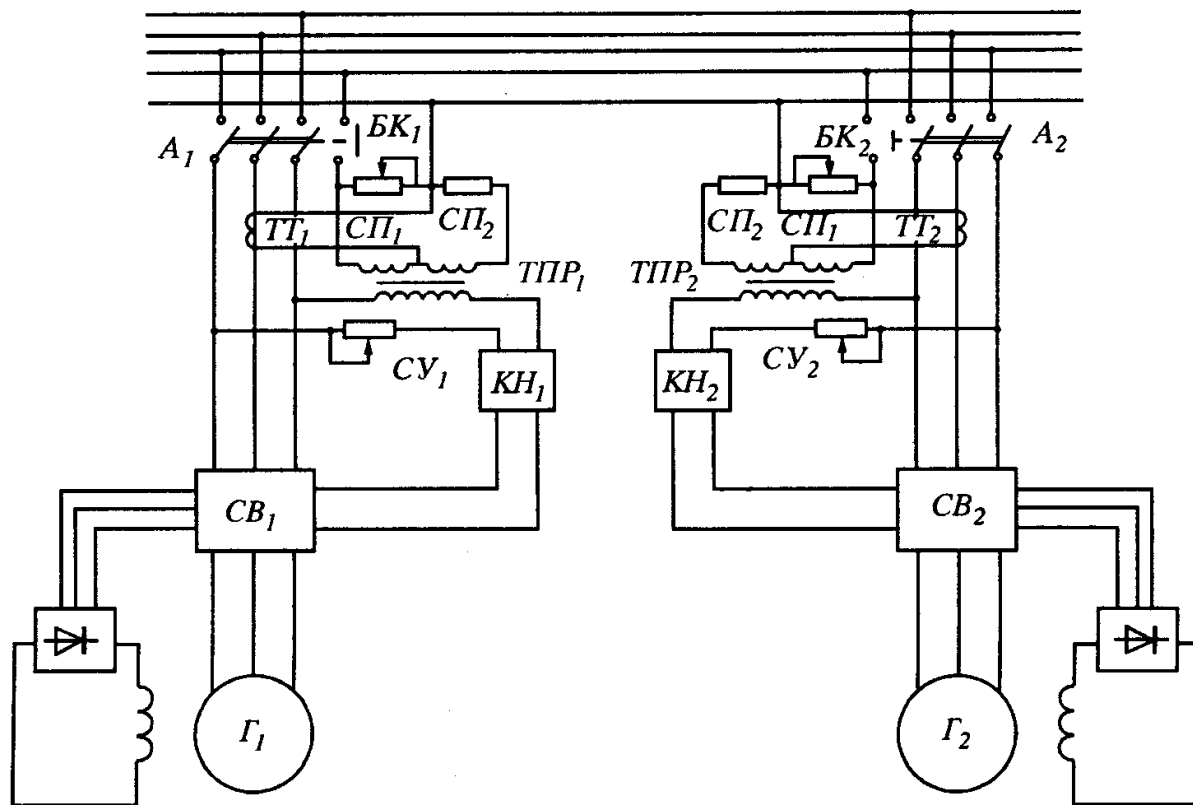
$$U_B = f(U, I, \cos \varphi, \Delta U) ,$$

при паралелна работа той става

$$U_B = f(U, I, \cos \varphi, \Delta U, \Delta I_P) .$$

Такова устройство, използвано в съветските синхронни генератори, тип МСК и ГСС, е показано на фиг. 21.24.: Устройството се състои, по същество, от датчици за реактивен ток, между които при работа се включва урав-

нителен контур. Датчикът за реактивен ток се състои от диференциален трансформатор  $ТПР$  (трансформатор със средна точка в едната намотка), токов трансформатор  $ТТ$  и съпротивления  $СП_1$  и  $СП_2$ . Двете първични намотки на трансформатора  $ТПР$  със съпротивленията  $СП_1$  и  $СП_2$  образуват мост, в диагонала на който е включен токовият трансформатор  $ТТ$ . Вторичната намотка на  $ТПР$  е включена последователно с коректора на напрежение  $КН$ . При това, токовият трансформатор  $ТТ$  е включен във фаза  $B$ , а  $КН$  във фазите  $A - C$ . При автономна работа, ако съпротивлението  $СП_1$  е равно на  $СП_2$ , токът от токовия трансформатор обтича по равно двете съпротивления. Началото и краищата на първичната намотка  $ТПР$  са така свързани, че напреженията на двете намотки са насрещни, а напрежението на вторичната намотка, включена последователно в  $КН$ , е равно на 0. При паралелна работа на двата генератора съпротивленията  $СП_1$  се запааралелват посредством контактите  $БГ_1$  и  $БГ_2$ . Тогава ако двата генератора не са еднакво натоварени, напрежението върху  $СП_2$  е различно и върху вторичната намотка на  $ТПР$  се появява напрежение, чиято фаза съвпада с фазата на тока. Тъй като  $КН$  е включен във фазите  $A-C$ , а  $ТТ$  във фаза  $B$ , то ако натоварването на генераторите е активно, напреженията се сумират

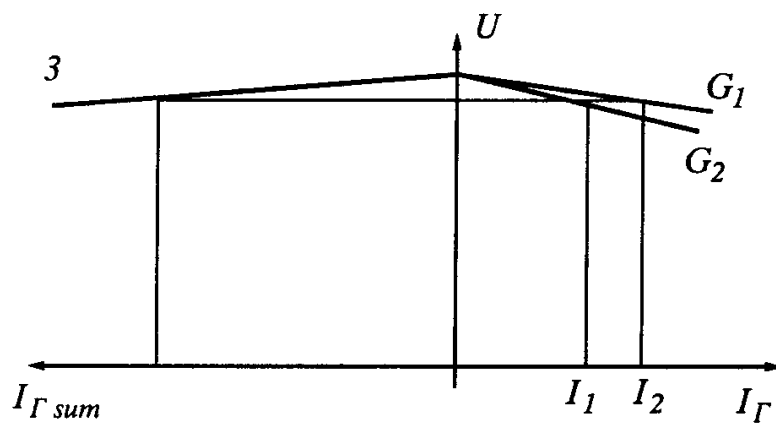


Фиг. 21.24

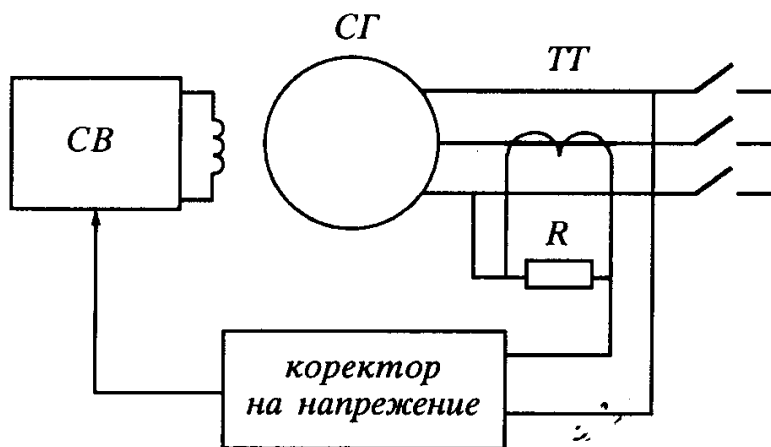


под ъгъл  $90^\circ$ . В образувания триъгълник това напрежение е хипотенуза, която по абсолютна стойност практически е равна на катета, който е пропорционален на напрежението на мрежата. Но ако токът в  $TT$  е реактивен, тези напрежения се сумират алгебрически и напрежението, което се подава на коректора, се отличава от напрежението на единия катет. Това напрежение е пропорционално на напрежението на генератора плюс (или минус) разликата в реактивното натоварване.

Възможно е разпределение на реактивните товари и без уравнителни съединения. Както се вижда от фиг. 21.25, ако два генератора имат линейни външни характеристики  $G_1$  и  $G_2$  при индуктивно натоварване с лек наклон (статизъм), то външната характеристика на електростанцията ще бъде правата 3, получена при сумирането на токовете на генераторите  $I_1$  и  $I_2$  при едно и също напрежение. При определено натоварване на станцията реактивните токове ще се разпределят между генераторите обратнопропорционално на наклона на



Фиг. 21.25



Фиг. 21.26

техните външни характеристики. Ако тези характеристики са с еднакъв наклон, то разпределението на реактивния товар ще бъде равномерно.

Този начин на разпределение е подходящ при коректори, осигуряващи висока точност на поддържане на напрежението. На фиг. 21.26 е показана схемата на свързване на коректора, използвана от фирмите „АЕГ“, „АвК“ и други производители.

Коректорът на напрежение е с интегрален закон на регулиране, осигуряващ отклонение на напрежението в установен режим  $0\text{ V}$ . На входа му се подава линейното напрежение между две фази (напр.  $U_{AC}$ ), последователно свързано с напрежението от токов трансформатора.

тор, свързан в третата фаза. Токовият трансформатор е натоварен на активно съпротивление и падът върху него е пропорционален на тока във фазата. Този пад се сумира под ъгъл  $90^\circ$  при активен товар и алгебрично - при индуктивен. Тъй като коректорът се стреми да поддържа напрежението на входа му постоянно, външната характеристика ще бъде постоянна при активен товар и леко наклонена при индуктивен. Този наклон се определя от големината на съпротивлението товар на токовия трансформатор. То се подбира така, че отклонението на напрежението при номинален индуктивен товар да съставлява 2%.

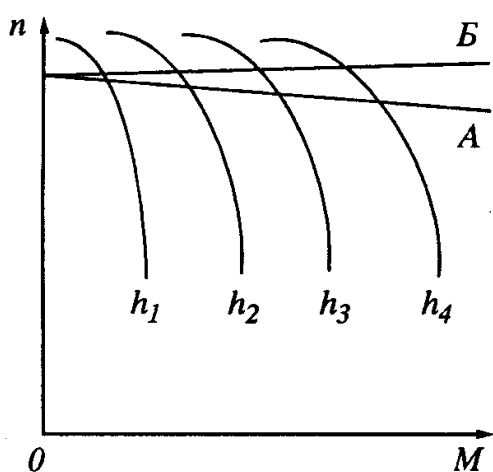
При този начин на разпределение на товарите е от голямо значение напреженията на празен ход да са еднакви в максимална степен, както и външните характеристики да имат еднакъв наклон. В противен случай системата е много чувствителна към всяка разлика в характеристиките.

## 21.6. Регулиране на честотата и разпределение на активните товари

Задачата за регулиране на честотата е тясно свързана със задачата за разпределение на активната мощност между агрегатите, тъй като и в двата случая се въздейства върху момента на първичния двигател (най-често дизел) посредством количеството на впръскваното в цилиндрите гориво.

### 21.6.1. Регулиране на честотата

Дизеловият двигател, използван в качеството на първичен двигател за корабните синхронни генератори, представлява обект на регулиране, чието поведение при натоварване се илюстрира от основните статически характеристики  $M = f(n)$ . При постоянно количество на подаваното гориво това са кривите  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $h_3$  и  $h_4$  (фиг. 21.27). Тези характеристики сочат



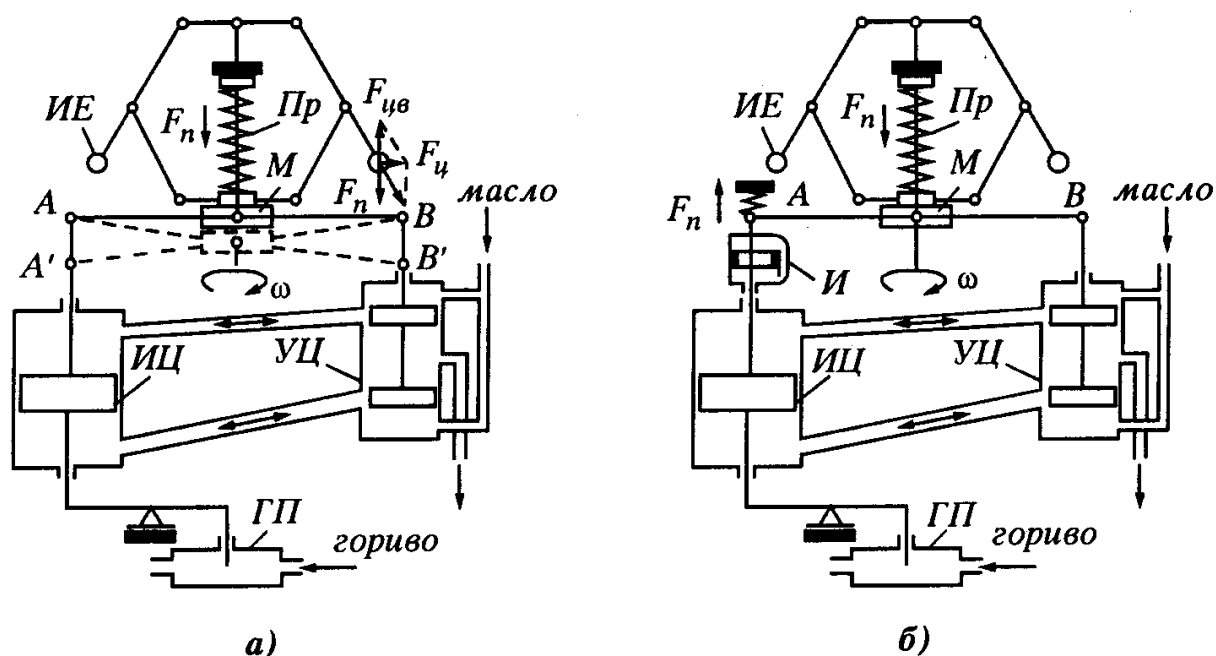
Фиг. 21.27

как се изменят оборотите и мощността при натоварване на двигатели със съпротивителен момент при константно положение на топливната рейка, т.е. при константно количество на подаваното гориво. Характерно за дизеловите двигатели е, както се вижда и от графиката, оборотите на двигателя рязко да падат при натоварване. Нормално всички дизели се използват само с регулатори. Характеристиките на дизел със система за автоматично регулиране на оборотите са представени на фиг. 21.27 от кривите А (със статичен регулатор) и Б (с

астатичен регулатор).

Понастоящем в корабните електроенергетически уредби имат широко разпространение центробежните регулатори на скоростта с пряко и непряко действие. В двигателите с мощност до 1 000 к.с. се използват най-често регулатори с пряко действие, а на по-мощните двигатели - с непряко действие.

В регулаторите с пряко действие изменението на положението на центробежния механизъм се предава на изпълнителната система (подаване на гориво) посредством лостова система. В регулаторите с непряко действие това въздействие се предава посредством усилвател - сервомотор. Центробежните регулатори се изпълняват със статическа и астатическа (изодромна) характеристика. Опростената им кинематична схема е показана на фиг. 21.28а - регулатор със статическа характеристика, и фиг. 21.28б - с астатична характеристика.



Фиг. 21.28

Основен възел на центробежния регулатор представлява измервателният елемент *ИЕ*, изпълнен от въртящи се тежести. Въздействието на измервателния елемент върху лоста *AB* е уравнивено от пружината *Пр*, така че при номинална скорост на въртене на агрегата буталото на *B* се намира под действието на еднакво налягане на маслото отгоре и отдолу в цилиндъра и буталото на сервомотора се намира в неподвижно състояние. При изменение на скоростта под действието на изменилата се центробежна сила равновесието на силите се нарушава. Но в първият момент след изменението на скоростта налягането на маслото в сервомотора е еднакво и краят на лоста остава неподвижен. После *B* се премества надолу. Мас-

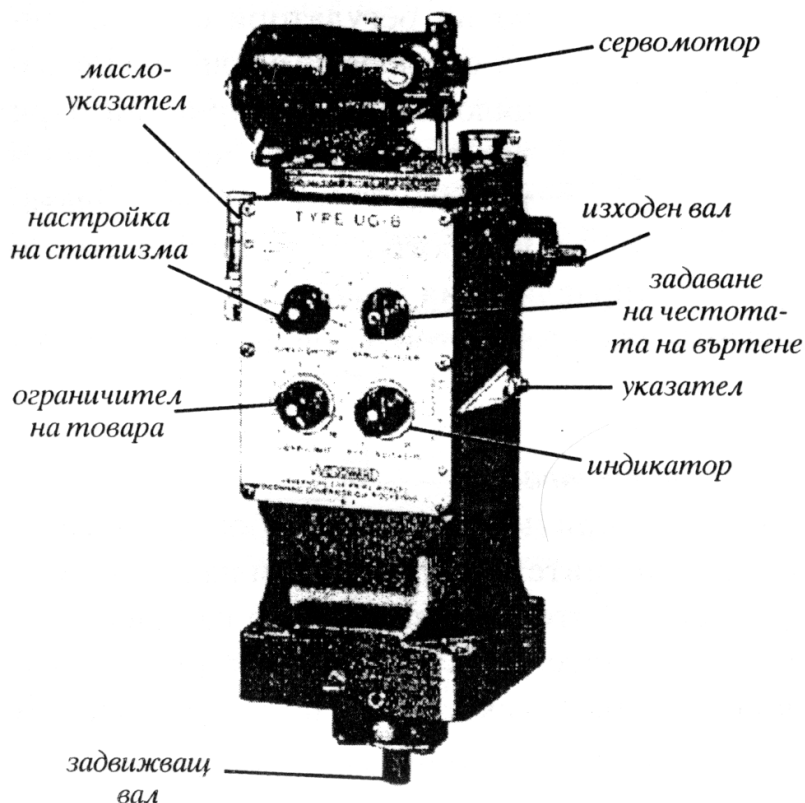
лото постъпва в горната част на цилиндъра на сервомотора, при което неговото бутало се премества надолу и се подава, съответно, повече гориво. Преместването надолу на края *A* на лоста *AB* предизвиква движение на лоста *AB* нагоре, при което маслопроводните се затварят при ново равновесно положение.

На фиг. 21.28б е показана опростената принципна схема на регулатор с непряко действие с астатическа характеристика. Пружината *Pr* и масленият демпфер (изодром) *I* образуват интегрираща обратна връзка, обезпечаваща астатична характеристика.

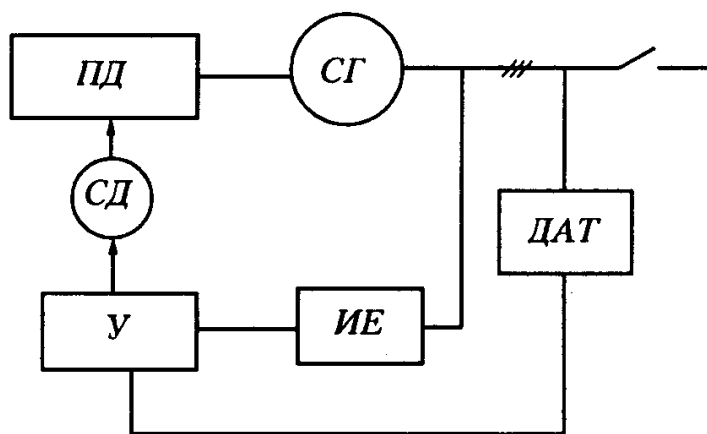
В началото процесът на регулиране протича по същия начин. При увеличение на натоварването скоростта на агрегатите се намалява, лостът *AB* се премества надолу и в двигателя се подава повече гориво. Пружината на изодрома се стреми да върне лоста в първоначалното положение, част от маслото се прелива от половината с повишено налягане в другата. Действието на пружината няма да се прекрати, докато регулаторът не заеме първоначално положение, като сервомоторът въздейства на дизела, заставяйки го да достигне зададеното значение на регулируемия параметър. Следователно, влиянието на обратната връзка е само по времето на преходния процес, т.е. обратната връзка е интегрираща и регулаторът има астатична характеристика. По този начин регулаторът на оборотите работи като система за регулиране по отклонението. С помощта на тези регулатори се достига точност на регулирането от 2 до 4 % в статически режим и 5 до 8 % - в динамически.

Външният вид на най-разпространения регулатор, тип UG-8 и органите му за управление са показани на фиг. 21.29.

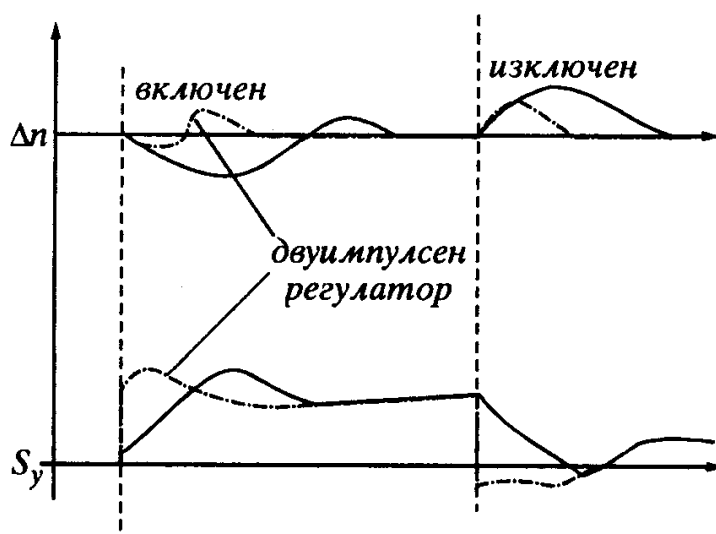
Значително по-добри резултати се постигат с т.нар. двуимпулсни регулатори. Това са регулатори, представляващи комбинирани системи за регулиране, в които освен обратна връзка по отклонението на скоростта е



Фиг. 21.29



Фиг. 21.30



Фиг. 21.31

въведена и обратна връзка по товара. Структурната схема на такава система е показана на фиг. 21.30. Най-често такива системи се изпълняват с електрически устройства за разлика от разгледания елементарен механичен регулатор. В качеството на измервателен елемент (ИЕ) се използва резонансен контур, а като датчик на натоварването (ДАТ) - датчик на активен ток, построен на основата на фазочувствителен изправител. Сигналите се сумират с усилвател (У), който управлява серводвигателя (СД) за подаване на гориво.

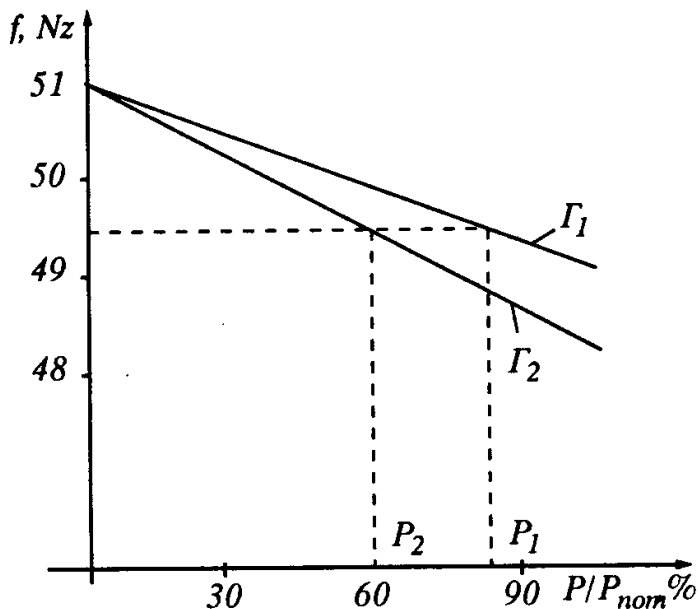
Днес от водещите фирми в тази област се произвеждат подобни регулатори с аналогична структура, реализирани изцяло на цифров принцип. При тях параметрите на различните звена могат да бъдат задавани програмно в широки грани-

ци, в зависимост от параметрите на управлявания дизел.

Преходният процес при центробежен регулатор и при двуимпулсен регулатор е показан на фиг. 21.31.

### 21.6.2. Разпределение на активните товари

Разпределението на активните товари на паралелно работещите генератори се определя от наклона на външните характеристики на първичния двигател с неговия регулатор на оборотите. При включване на товар последният се разпределя между генераторите, като този чийто първичен двигател има по-малко наклонена характеристика, взема по-голяма част от товара (фиг. 21.32 - генератор  $G_1$ ). Очевидно, степента на неравномерност на разпределение на товарите зависи от съвпадението на характеристиката по наклон (по статизъм) и по положение спрямо оборотите при нулево натоварване (празен ход).

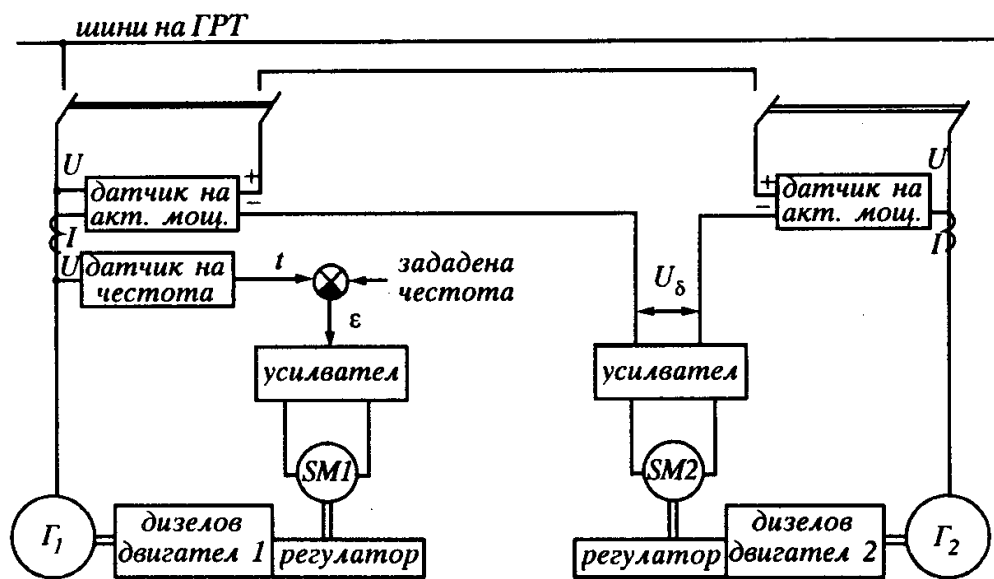


Фиг. 21.32

Автоматическо равномерно разпределение на активните товари, пропорционално на мощностите в целия диапазон на изменение на товара от празен ход до номинален товар, може да бъде обезпечено само при съвършено еднакви механически характеристики на двигателите. Практически достигането на такова съвпадение е невъзможно, а разликите в наклона, особено при по-висока точност на поддържане на оборотите, може да доведе до претоварване на единия от генераторите и ненаатоварване на другия.

В зависимост от разположението на характеристиките една спрямо друга е възможно единият от генераторите да влезе в двигателен режим. Ето защо, все по-широко разпространение намират системи за управление на КЕС, в които разпределението на активните товари се осъществява посредством въвеждането на обратни връзки между регулаторите на първичните двигатели. Структурата на тази част от такава система на разпределение на товарите е показана на фиг. 21.33.

С датчик на активна мощност се измерва натоварването на всеки агрегат. Изходите на тези датчици са включени през блок-контакти на генераторните автомати към усилватели. По този начин разликата от активното натоварване между генераторите създава сигнал на изхода на усилвателя,



Фиг. 21.33

който управлява серводвигателя на първичния двигател. Под въздействието на този сигнал характеристиката на първичния двигател се премества нагоре или надолу. Единият от генераторите се приема за базисен или водещ, като изборът му е произволен. Тогава преместването на характеристиките на останалите генератори се осъществява пропорционално на мощността на генераторите. Такива системи обезпечават точност на поддържане на оборотите под 1% и разлика в натоварването на генераторите под 5%.

Такова управление на една част от българските кораби е вградено в използваната система „Паралел“ (българско производство), а на друга - в устройствата за синхронизация и разпределение на товарите „Selco“ (холандско производство).

### **21.7. Включване на генераторите в паралелна работа**

Процесът на включване на корабните генератори в паралел се нарича синхронизация. Основните особености на този процес бяха разгледани в анализа на работата на синхронната машина при включването ѝ към мощна мрежа (гл. 17, т. 17.8). По-долу ще бъдат дадени някои допълнителни сведения, касаещи този процес в корабните електростанции.

Синхронизацията представлява преходен режим, свързан с изменение на конфигурацията и параметрите на схемата на разпределение на електрическа енергия и на режима на работа на агрегатите. Този режим е съпроводен с възникването на уравнителни токове, моменти и отклонения на напрежението, зависещи от началните условия, при които се извършва комутацията.

Най-добро качество на процеса на включване в паралел е налице тогава, когато началните условия в системата са такива, че уравнителни токове и моменти, а следователно и отклонения на напрежението, не възникват.

За получаването на включване в паралел на генератори за постоянен ток е необходимо да се изравни напрежението на включвания генератор с напрежението на шините.

За получаването на включване в паралел на генератори за променлив ток е необходимо да се съблюдават следните условия:

- а) еднакъв порядък на следване на фазите на генераторите;
- б) равенство на напрежението на клемите на генераторите и мрежата;
- в) равенство на честотите на генератора и мрежата (или работещия към товара генератор);
- г) равенство на началната фаза на моментните стойности на напрежението на генератора и мрежата.

На практика, естествено, съществуват отклонения от тези условия. Ето

защо е важно да знаем до какво водят отклоненията от тези условия и каква е тяхната допустима величина.

Първото условие се изпълнява лесно, зависи от полагането на кабелите и обикновено се проверява при първоначално пускане на генераторите посредством проверка на посоката на завъртане на асинхронен двигател.

При разлика в напрежението на генераторите възниква реактивен уравнителен ток (тъй като индуктивните съпротивления на генераторите са много по-големи от активните). Уравнителният ток е размагнитващ по отношение на генератора с по-голямо е.д.н. и намагнитващ по отношение на генератора с по-малко е.д.н. Автоматическите регулатори на напрежението на генераторите обезпечават точност на поддържане на напрежението 1 - 3 % в статични режими, но при включването в паралел са възможни и отклонения от порядъка на 6 - 8 %, предизвикани от включването или изключването на някои корабни консуматори. Отклонения от този порядък са напълно допустими и не предизвикват значителни уравнителни токове, когато в системите за разпределяне на товарите са предвидени уравнителни съединения.

При неравенство на честотите единият от агрегатите ще има излишък от кинетична енергия, под действието на която ще възприеме уравнителна активна мощност. Ако разликата в честота не е голяма и ако честотата на подключвания генератор е по-висока, генераторът веднага след включването му ще възприеме известна активна мощност и ще разтовари работещите генератори. Този случай е най-благоприятен и при включване на генераторите в паралел те се стремят да обезпечат малко по-висока честота на подключвания генератор (с няколко десети от херца).

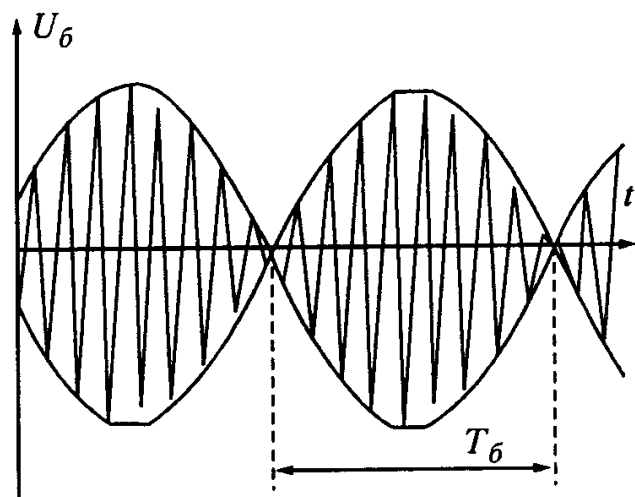
Ако честотата на подключвания генератор е с десети от херца по-ниска, той ще влезе в двигателен режим и ще натовари станцията.

Фазовата разлика между напреженията на генераторите всъщност не е постоянна, между роторите винаги съществува някаква минимална разлика на честотите, поради което тя се изменя периодически от 0 до 360°. Тогава разликата между моментните стойности на напреженията ще бъде

$$u = (U_{1m} + U_{2m}) \cdot \sin\left(\frac{\omega_1 t + \omega_2 t}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\omega_1 t - \omega_2 t}{2}\right),$$

т.е. напрежението представлява синусоидална функция със средноаритметична честота, чиято амплитуда се променя също по синусоидален закон с честота, равна на полуразликата от честотите на генераторите. Такава функция се нарича „биеща“. Напрежението на биене между два генератора е показано на фиг. 21.34. Максималното значение на напрежението на биене се достига при фазова разлика между напреженията на генераторите, равно на 180°.





Фиг. 21.34

Включването на генераторите в паралел е най-благоприятно при напрежение на биене, равно на 0, т.е. при фазова разлика 0. При фазова разлика  $180^\circ$  възникващият ударен ток е по величина колкото тока на късо съединение на генератора и може да доведе до аварийно състояние на КЕС.

В зависимост от това в каква степен се съблюдават разглежданите условия, съществуват три метода на синхронизация: точна, груба и самосинхронизация.

#### • Точна синхронизация

При точната синхронизация се цели максимално съблюдаване на изброените по-горе условия за включване. Този метод се приема за основен, тъй като в максимална степен се изпълняват всички изисквания към процеса на синхронизация и се обезпечават оптимални условия за протичане на преходния процес.

Включването се извършва в следната последователност:

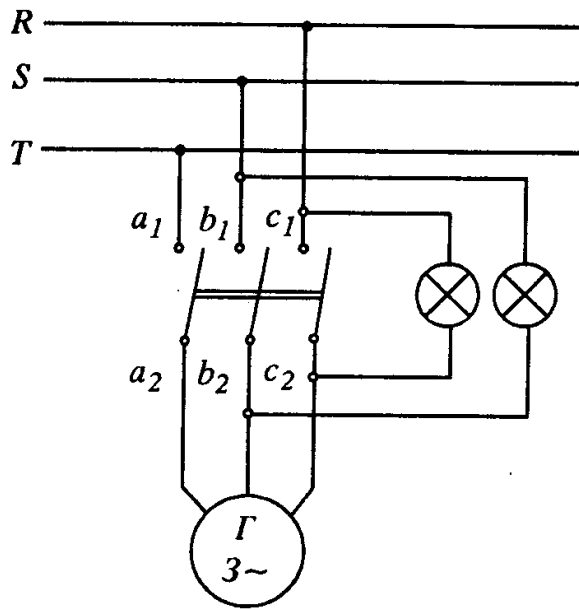
1. С помощта на регулатора на възбуждане по волтметъра се изравняват напреженията.

2. Въздействайки на серводвигателя, който е свързан с регулатора на подаването на гориво, се изравняват в максимална степен честотата на генераторите с тази на шините, като честотата се контролира с помощта на честотомер.

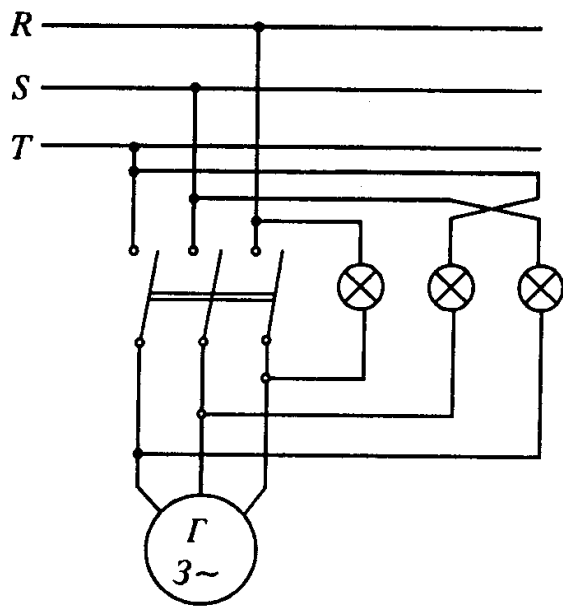
3. Посредством превключвател се включва ламповият или стрелкови синхроскоп към мрежата и генератора. Регулирайки серводвигателя, се цели възможно най-бавното въртене на стрелката (или загасване на лампите), при което честотата на подключвания генератор остава малко по-висока. В момента, когато стрелката на прибора сочи знака за съвпадение на фазите (или в момента на загасване на лампите), се включва генераторният автомат.

Както вече бе посочено, моментът, в който фазовата разлика е нула, се определя от лампов или стрелкови синхроскоп. Ламповият синхроскоп бе показан в гл. 17, т. 17.8. На корабите се използват два варианта на тази схема - схема, при която включването се извършва „на тъмно“ (при

загаснали лампи) - фиг. 21.35, или по схемата с „въртене на огъня“ - фиг. 21.36.



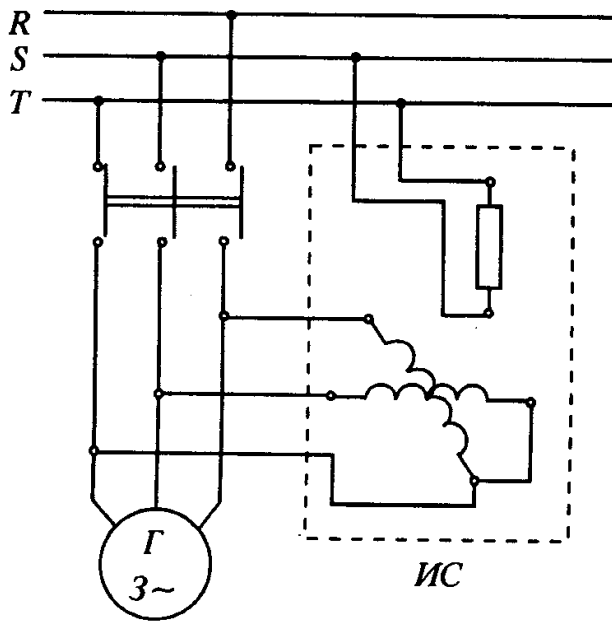
Фиг. 21.35



Фиг. 21.36

В схемата на „тъмно“ при съвпадение на фазните напрежения на генераторите напрежението към лампите е равно на нула едновременно на всички лампи. При свързване по схемата „с въртене на огъня“ това напрежение се получава последователно във времето на всяка лампа и те светват в последователност, зависеща от това, кой от генераторите се върти по-бързо. Ако при свързване на лампите по схема „с въртене на огъня“

последните светват едновременно, или обратно - при свързване „на тъмно“ лампите светват последователно, това означава, че последователността на следване на фазите на генератора на станцията не е еднаква и следва да се промени.



Фиг. 21.37

На фиг. 21.37 е показана схемата на свързване на стрелкови индукционен синхроскоп (ИС). Синхроскопът представлява индукционна машина с несиметрична роторна намотка. При взаимодействие на полето на статора, възбудено от напрежението на мрежата, с полето на ротора, възбудено от напрежението на подключвания генератор, се

получава момент, който върти ротора със скорост, равна на разликата от скоростите на двете полета. За да се изключат възможните грешки на обслужващия персонал при включване по метода на точна синхронизация, процесът на включване най-често се автоматизира.

Осъществяването на точна синхронизация изисква от обслужващия персонал достатъчна квалификация и определено време за включването. При неточно включване могат да възникнат уравнителни токове, зависещи от момента на включването. Те могат да се определят от съотношението

$$I_{ур} = \frac{K_y \cdot 2U_m}{(X'_{d1} + X'_{d2})} \cdot \frac{\sin \delta}{2} ,$$

където  $X'_{d1}$  и  $X'_{d2}$  са преходни съпротивления на генераторите;

$K_y$  - коефициент, отчитащ възникващата при всеки преходен режим аperiодична съставна (за КЕС  $K_y$  се движи в границите 1,6 - 1,8);

$\delta$  - фазовата разлика между напрежението на генератора и мрежата.

#### • Груба синхронизация

Методът на груба синхронизация се отличава от метода на точната по това, че не се спазва четвъртото изискване за минимална фазова разлика. Естествено, и изискванията към останалите условия също не са прецизирани. При този метод, за да се ограничи големината на евентуалния уравнителен ток включването става с контактори по верига, в която има допълнителна индуктивност (реактор). Големината на реактора се определя така, че възникващият скок на тока да не предизвиква отклонение на напрежението, по-голямо от допустимото от Регистъра - 15%. След влизане на генераторите в синхронизъм тази верига се шунтира от генераторните автомати.

Тъй като процесът на груба синхронизация е краткотраен, реакторите се пресмятат на кратковременен режим на работа. Допустимата разлика в честотите на генераторите, при която те успешно влизат в синхронизъм, обикновено е около 0,5 - 2 Hz. Поради изключването на необходимостта да се контролира фазовата разлика между напреженията на генераторите, методът е намерил сравнително широко разпространение на корабите, особено на тези без прецизна автоматика. Така се изключва възможността за авария при неточно включване, както това се получава при точната синхронизация. Достойнства на метода са краткото време, за което може да бъде осъществена синхронизацията - особено важно в аварийни условия, както и това, че се автоматизира с лекота. Известен недостатък е необходимостта от реактори и допълнителна комутационна апаратура.

### • Самосинхронизация

По този метод подключваният генератор се развърта от първичния двигател до скорост, близка до синхронната. Генераторът е невъзбуден, като намотката му на възбуждане е включена към съпротивление, превишаващо около 6-8 пъти съпротивлението на възбудителната намотка, и е изключена от системата за възбуждане. Скоростта на въртене се контролира по оборотомера на дизела. След това генераторът се включва към шините на електростанцията. След спадането на възникналия скок на тока в статора се включва възбуждането към възбудителната намотка и генераторът се ввлича в синхронизъм. Това става под действието на възникналите асинхронен, реактивен и синхронен момент на вала на генератора. Асинхронният момент е резултат от взаимодействието на полето на статора и полето на индуцираните в демпферните намотки токове. При морските СГ демпферните намотки са „силни“ и възникващият асинхронен момент е значителен. Развъртането на ротора до подсинхронна скорост става под действието на този момент.

Недостатък на метода е възникването на значително отклонение в напрежението (50% при равни мощности на генераторите), поради което в корабни условия той се използва извънредно рядко.

### 21.8. Устойчивост на паралелната работа на корабните синхронни генератори

Синхронната машина има едно особено свойство - всички синхронни генератори, работещи заедно в паралел към единна мрежа, независимо от разстоянието помежду им, от първичния им двигател, регулаторите им, мощността на генераторите и други техни параметри, се въртят не само с абсолютно еднаква скорост, но и синхронно.

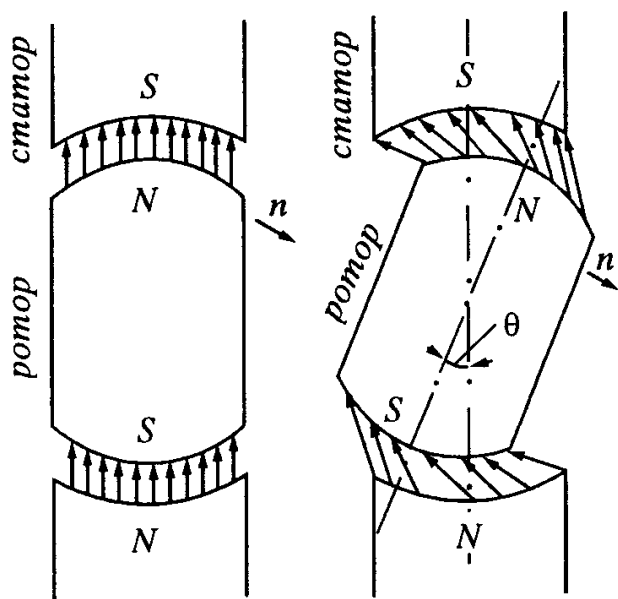
Причината за това е възникващият между роторите на генераторите синхронизиращ момент, който променя натоварването на двигателите, развърта допълнително изоставащите ротори и задържа изпреварващите. Този момент създава допълнителна гъвкава връзка между агрегатите и ги удържа в равновесие. В енергосистемата постоянно възникват някакви смущения (въздействия), които я извеждат от това равновесно състояние. Стремешът на системата да се възвръща в равновесно състояние наричаме устойчивост на системата - важно условие за сигурната и нормална работа на системата.

Върху устойчивостта оказват голямо влияние параметрите на еле-

ментите на системата, регулаторите, режимите на работа - проблем, който възниква винаги при анализа на устойчивостта.

В зависимост от големината на смущаващите въздействия в литературата са въведени две понятия - статична устойчивост (за малки въздействия) и динамична (за значителни по своя ефект въздействия). Строго погледнато, разлика в поведението на системата при значителни и малки въздействия има поради различните нелинейности в системата.

Процесите на възникване на синхронизиращ момент илюстрира опростено моделът на синхронния генератор, представен на фиг. 21.38, където полето на статора и полето на ротора са представени като еквивалентни магнити, между които посредством магнитните силови линии съществува



Фиг. 21.38

еластична връзка. При празен ход осите на полюсите на статора и ротора, въртейки се синхронно, съвпадат и ъгълът  $\theta$  между тях е равен на 0. Отдаваната от генератора мощност е равна на нула и след пренебрегване на загубите ще приемем, че и подвежданата механическа мощност е нула.

Ако увеличим подаването на гориво, ще се появи двигателен момент. Роторът ще получи положително ускорение и ще започне да избързва, предизвиквайки разтягане на магнитните силови линии. В резултат на това ще протече уравнителен ток и

генераторът ще развие определен електромагнитен момент,  $M_{\Gamma}$ , който ще компенсира момента на първичния двигател и след времето на преходния процес ще се установи равновесие. Роторът ще избързва на определен ъгъл. Тези процеси се определят от уравненията на движение:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{(M_{\text{Д}} - M_{\Gamma})}{T_{\text{мех}}} ; \quad \theta = \int \omega_{\text{ром}} \cdot dt .$$

При наличие на спирачен момент на вала на синхронната машина е обратно - роторът започва да изостава, моментът, развиван от синхронната машина е с отрицателен знак (двигателен момент), отрицателно е и значението на ъгъла. Между развиваната електромагнитна мощност и ъгъла  $\theta$  съществува функционална зависимост. Тази зависимост за явнополюсна-

та машина е

$$P = \frac{U \cdot E_d \cdot \sin \theta}{X_d} + U^2 \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) = M_r \cdot \omega ,$$

където  $X_d$  и  $X_q$  са индуктивните съпротивления на статора по надлъжната и напречна ос;

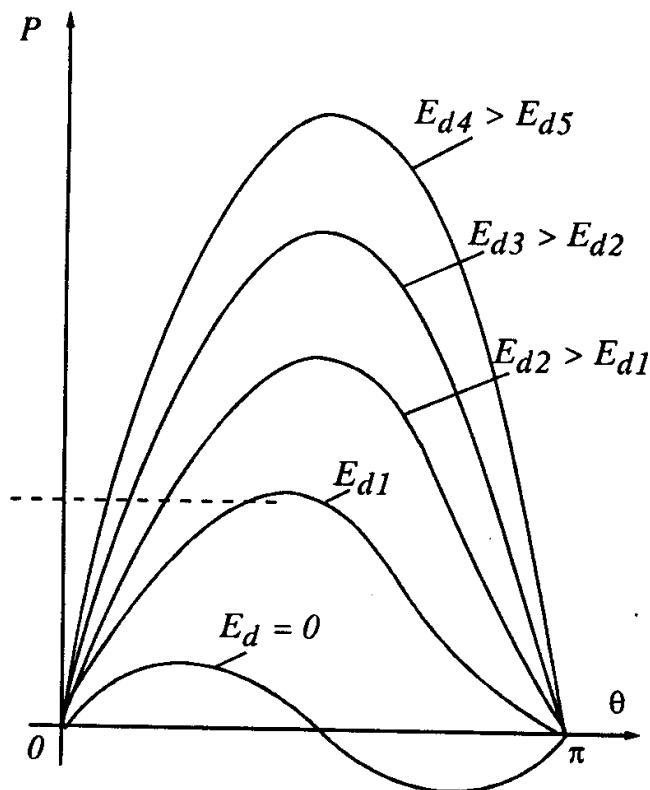
$U$  - напрежението на клемите на машината;

$E_d$  - е.д.н. на машината, пропорционално на тока на възбуждане.

Както се вижда от тази зависимост, мощността има две съставни - първата зависи от възбуждането, а втората - не зависи. Тя е значително по-малка и се определя от магнитната несиметрия на машината (от разликата в параметрите  $X_d$  и  $X_q$ ). Втората съставка е обусловена от възникването на т.нар. реактивен момент, като резултат на затварянето на магнитния поток по контура с по-висока магнитна проводимост.

Горната зависимост се нарича ъглова характеристика на синхронната машина. Ъгловите характеристики при различни значения на тока на възбуждане образуват семейство, показано на фиг. 21.39.

Ъгловите характеристики за неявнополусната машина могат да бъдат получени като частен случай при  $X_q = X_d$ . В корабните електрически станции токът на възбуждане зависи от отдаваната мощност, благодарение на



Фиг. 21.39

автоматичните регулатори на възбуждането. Областта на ъгловата характеристика, в която отдаваната мощност (следователно и електромагнитният момент) се увеличава с увеличаването на  $\theta$ , съответства на устойчива паралелна работа на машината. Областта, в която мощността се намалява при увеличаването на  $\theta$ , съответства на неустойчива работа.

Статическа устойчивост при паралелна работа може да се нарече възможността на синхронната машина да остане в синхронизъм при генераторен режим, при постепенно изменение на товара.

Загубата на статическата устойчивост става поради това, че

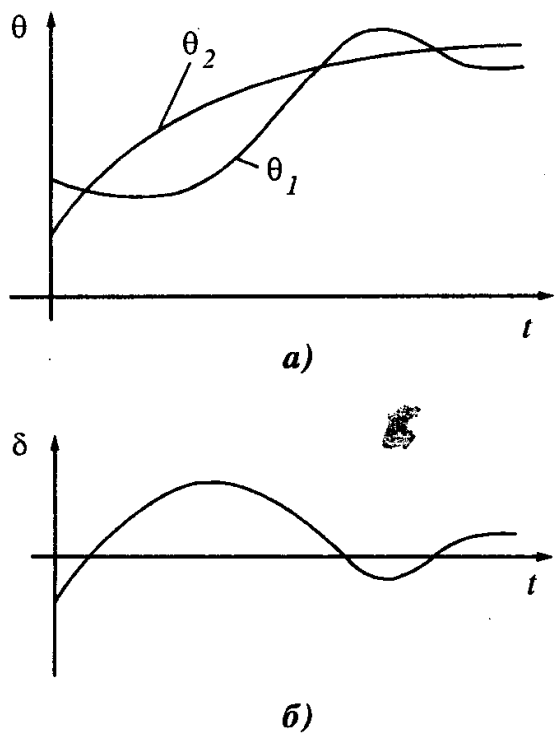
външните сили, действащи на ротора и заставащи го да изпреварва или изостава от полето на статора, не се уравновесяват с електромагнитната сила, възникваща в синхронната машина при изменението на ъгъл  $\theta$ . Отношението на максималната мощност към номиналната характеризира претоварващата способност на генератора. От последното съотношение следва, че претоварващата способност е толкова по-малка, колкото по-голям е ъгъл  $\theta_{nom}$ .

Отношението  $dP/d\theta$  се нарича синхронизираща мощност. Нарушението на статическата устойчивост е най-вероятно или при значително понижение на напрежението на шините, или ако поради някаква причина, свързана с неизправност на възбудителната система, значително се намали потокът на възбуждане на машината.

Способността на генератора да издържа внезапни значителни изменения на товара без излизане от синхронизъм се определя, както бе посочено, от динамическата устойчивост. Внезапно изменение на товара обикновено възниква при включване или изключване на значителни по мощност консуматори, при изключване на един от паралелнорботещите генератори, а също така и при късо съединение в мрежата. Обикновено колкото по-голяма е статическата устойчивост, толкова по-голяма е и динамическата. Но статически устойчива система може да се окаже динамически неустойчива.

Да разгледаме как протичат електромеханичните процеси в системата при внезапно изменение на товара. Бе изяснено, че на всяко значение на мощността при постоянни  $E_d$  на генератора съответства определено положение на ротора спрямо статора. При внезапно изменение на механическата мощност на вала на генератора не може да възникне мигновено изменение на положението на ротора, тъй като ротора заедно с първичния двигател, има значителна инерционност. Ето защо, след увеличението на механическата мощност роторът на генератора ще започне да се измества в посока на увеличаване на ъгъл  $\theta$ . Поради инертността му той няма да се установи на това значение на ъгъла, което съответства на новата мощност, а ще се отклони на по-голям ъгъл. След това ще започне обратно движение на ротора, но той пак няма веднага да се установи на съответното значение на ъгъл  $\theta$ .

По този начин роторът ще извършва колебателни движения относно някакво средно положение, съответстващо на новата мощност. При тези колебания разликата между положението на роторите на двата генератора, която се характеризира от ъгъл  $\delta = \theta_1 - \theta_2$ , може да се окаже толкова голяма, че генераторите да излизат от синхронизъм.



Фиг. 21.40

За КЕС е характерно наличие на паралелна работа на генератори, които са съизмерими по мощност. Нарушаването на режима на работа в такава енергосистема предизвиква колебания на роторите на всички генератори. Еднотипните генератори обикновено извършват еднакви колебания. Генераторите с разни мощности или различни първични двигатели (дизел, турбина) извършват колебания, отличаващи се по честота. На фиг. 21.40 са показани измененията на ъглите  $\theta_1$  и  $\theta_2$  на дизел-генератор и турбогенератор (а) и относителната разлика (ъгъл  $\delta$ ) между двата ротора (б). При съизмерими по мощност генератори, за разлика от статическата устойчивост, динамическата им

вече се определя именно от ъгъл  $\delta$ . Относителният ъгъл на разминаване на роторите за еднакви по мощност и тип генератори с еднакви първични двигатели и с регулатори, имащи еднакви характеристики, е сравнително не голям, тъй като колебанията на роторите са с еднакъв период. Следователно, динамическата устойчивост на еднотипни генератори не предизвиква особени опасения. Но при паралелна работа на генератори с различна мощност и различни първични двигатели ъгълът на разминаване може да се окаже толкова голям, че генераторите да излязат от синхронизъм.

Да предположим, че в мрежа, захранвана от два паралелно работещи СГ с различни първични двигателя (турбина и дизел), става късо съединение на не голямо разстояние от шините. Напрежението на клемите на генераторите рязко пада и, следователно, рязко се намалява моментът, който генераторите създават на вала на първичния двигател. Поради различния запас на кинетична енергия на роторите и поради различното действие на регулаторите на двигателите, които не могат веднага да въздействат за намаляване на въртящия момент, роторите започват да се развъртат с различно ъглово ускорение. Дизелгенераторите, които имат значително по малки времеконстанти, значително изпреварват турбогенераторите. Освен това, при напрежение, близко до нула, синхронизиращата мощност между генераторите също е близка до нула. Генераторите се оказват „изолирани“ едни от други, работещи разделно. След известно време защитата сработва и изключва късото съединение. Електромагнитната връзка между ротори-



те на генераторите се възстановява, но между роторите може да съществува такъв ъгъл, че е.д.н. на генераторите да са практически насрещни.

При това положение могат да възникнат значителни ударни натоварвания, под действието на които генераторите да излязат от синхронизъм. Ето защо колкото по-бързо бъде изключено късото съединение, толкова по-успешно роторите на генераторите няма да се разминат значително. По тази причина в КЕС се използва значително по-бързодействаща защита, отколкото в бреговите електростанции. При паралелна работа на турбогенератори и дизелгенератори обикновено се оказва, че късото съединение следва да бъде изключено за време, не повече от 0,2 секунди. При паралелна работа на дизелгенератори то може да бъде 0,5 секунди и повече. Подобни процеси на разминаване на роторите възникват и при включване на значителен товар, тъй като вследствие на различната инертност на първичните двигатели генераторите възприемат различен товар,

Съществено влияние на динамическата устойчивост оказва бързодействието на регулаторите на първичните двигатели и на възбуждането на генераторите. Обикновено колкото по-голямо е това бързодействие, толкова по-висока е динамическата устойчивост. Ефективно средство за повишаване на динамическата устойчивост на генераторите представлява и наличието на демпферни (успокоителни) намотки на ротора. Корабните СГ се правят най-често със „силна“ успокоителна намотка. Но такава намотка значително намалява реактанса на генератора и води до големи стойности на токовете на късо съединение, което е нежелателно.

Анализът на въпросите, свързани с динамическата устойчивост за КЕС, включващи различни по мощност и тип генератори, както и консуматори (напр. подрулващи устройства, трални лебедки и пр.), съизмерими с мощността на отделните генератори, изисква особено внимание. Разпространените аналитични методи за нейната оценка обикновено са разработени за брегови станции и често се оказват недостатъчно точни за КЕС, където е необходимо едновременно отчитане на значителен брой фактори.

## **21.9. Автоматично управление на корабните електрически станции**

### ***21.9.1. Предназначение и функция на уредбите за автоматизация***

След главната силова (двигателна) уредба, електрическата станция на кораба е най-важната корабна система и нейната безаварийна и нормална работа определя сигурността на експлоатацията на кораба. В тази връзка автоматичното изпълнение на операциите, свързани с нейното управление, е един от най-важните показатели за техническото равнище на кораба.

За да бъде ефективна, желателно е системата за автоматично управление да обхваща практически всички режими на работа на станцията, които

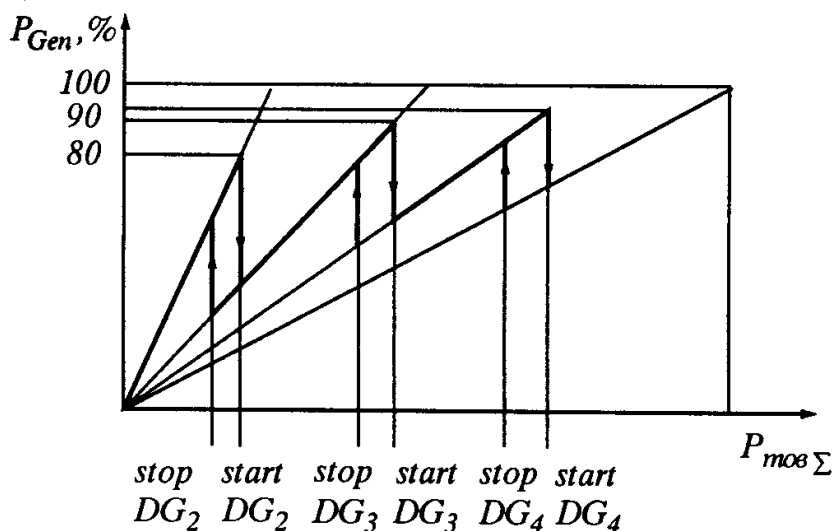
са:

- нормален експлоатационен режим и контрол върху параметрите на работата,
- маневрен режим с включен резерв и избирателно включване на големи консуматори,
- аварийен режим,
- следавариен режим с възстановяване на работоспособността на станцията.

За управлението на тези режими системата трябва да притежава следните функционални възможности:

- Автоматично пускане по възможно най-съкратена програма и включване към шините на дизелгенератор с определен номер след отпадане на напрежение на шините ( функция black-out).

- Пускане и спиране на генераторите в зависимост от товара. Пускането на всеки дизелгенератор следва да става при условие, че на шините има 20% резерв по мощност, т.е. включването на втория дизелгенератор трябва



Фиг. 21.41

да стане при натоварване на първия над 80%, на третия - след натоварване на двата работещи генератора до 90%, и т.н. Нивата за включване и изключване се задават с известен хистерезис и съответстват на графиката, показана на фиг. 21.41.

- Синхронизиране на генераторите (най-често по метода на точ-

на синхронизация) и разпределение на активните товари чрез въздействие върху регулаторите на дизелите.

- Регулиране на честотата. Въздействайки върху регулаторите на дизелите при разпределение на товарите, системата допълнително стабилизира и честотата на въртене (до  $\pm 0,5\%$ ), осигурявайки по този начин по-голяма ефективност на задвижванията на всички първични механизми.

- Програмирано натоварване на генераторите. Това става след възстановяване на напрежението на шините, като в определена последователност се пускат мощните отговорни консуматори, за да се избегне претоварването на станцията поради пусковите токове на двигателите. Програмираният пуск включва и контрол върху пусковия процес на най-мощния консума-

тор (напр. подрулващо устройство), при което пускът се разрешава само след развъртането на допълнителен дизелгенератор, осигуряващ необходимия резерв по мощност.

- Предварително и периодично смазване на дизелгенераторите след тяхното спиране.

- Защита на електрическата станция от претоварване по ток и късо съединение, и на дизелите от ниско налягане на масло, липса на поток и висока температура на охлаждащата вода, свръхоборот, обратна мощност и претоварване по мощност (Майерова защита).

- Контрол и индикация на състоянието на други параметри, както и самоконтрол върху нормалната работа на самата система, изправността на нейното захранване и кабелните връзки към отговорни датчици или изпълнителни механизми.

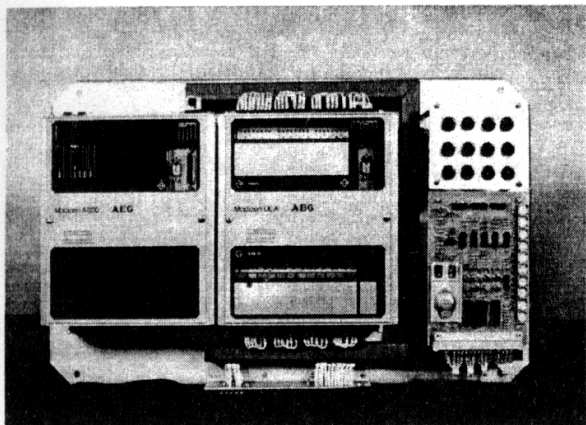
### *21.9.2. Елементна база и конструкция*

Първите системи за автоматизация на работата на електрическата станция са реализирани от различни модули, електронни релета, отделни устройства (например синхронизатори) и значителна по обем релейно контакторна схема. Подобни схеми, базирани на модули и концепция от фирмата „SELCO“, бяха монтирани на повечето кораби от нашия флот, строени в края на 80-те и началото на 90-те години на миналия век. Тези кораби още са в експлоатация. Разбира се, системата изпълнява горепосочените функции само в основната им част, като самоконтролът практически отсъства.

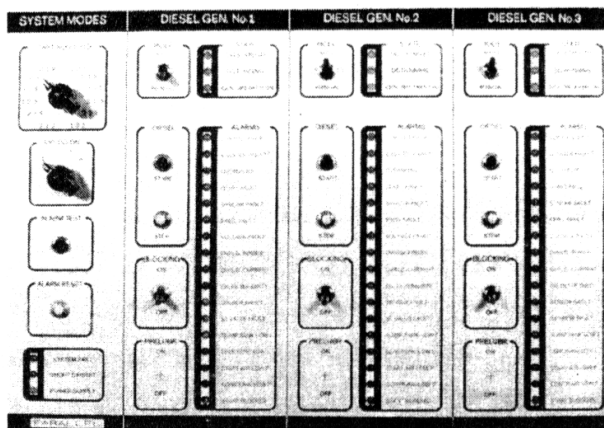
От същия период са и системите „Шипка“ и „Ижора“, монтирани на корабите руска постройка и реализирани на транзисторна логика. Техни предимства са по-малките габарити, добрата компоновка на системата и нагледният мнемо-панел за управление на схемата.

Най-добрите образци, създадени през 90-те години на ХХ в., са фирмите „Norcontrol“, „Asea“, „Siemens“, „AEG“ и др. Разработени са на специализирана микропроцесорна база, с много опционални възможности, покриващи практически всички варианти на корабни електрически станции. Гарантират опростена комуникация с други управляващи системи, произведени от същите фирми, и осигуряват реализацията на обща система за централизирано управление на кораба.

През същия период у нас бе разработена системата „Паралел“, монтирана към настоящия момент на 20 кораба. Изградена е на модулен принцип, т.е. от модули за всеки генератор и общ управляващ модул, и се базира на стандартни програмируеми контролери - общопромислено и морско изпълнение, на фирмата „Modicon-AEG“. Програмируемите контролери са компютърни устройства със структура и програмен език, подходящо ориен-



a)



б)

Фиг. 21.42

тирани към управление на машини, механизми и системи с електрически изпълнителни устройства. Високата им надеждност, гъвкавост и приспособимост към различни цели и относително ниската им цена ги прави особено подходящи и за приложение на корабите. Външният вид на общ управляващ модул и на информационно-задаващия панел е показан на фиг. 21.42а, б.

## Двадесет и втора глава

### ПРЕХОДНИ ПРОЦЕСИ В КОРАБНОТО ЕЛЕКТРОЗАХРАНВАНЕ

#### 22.1. Обща характеристика на задачите за изследване на преходните процеси в КЕС

Преходни процеси в корабните електрически станции се наричат всички процеси, свързани с промяна на режимите на натоварване и работата на електроагрегатите. Условно тези процеси се разпределят в три групи:

- Нормални експлоатационни процеси, при които промяната на натоварването или на режима на работата не води до излизане на някой от параметрите на работа извън нормите. Към тези процеси се отнесят включването или изключването на статичен товар, пускането, развъртането, натоварването или изключването на асинхронен двигател, процесите при регулиране на възбуждането, оборотите и др.

- Аварийни преходни процеси - процесите, при които е налице толкова рязка промяна на натоварването, че съществува възможност за повреда на агрегатите и е наложително спешно аварийно излизане от този режим. Такива преходни процеси са късото съединение (трифазно глухо късо съединение или еднофазно на корпус или между две фази), неправилната синхронизация, изпадането от синхронизъм и пр.

- Особени експлоатационни режими - режимите, в които агрегатите могат да работят относително по-дълго време, но при които е налице работа при параметри на електрическата енергия извън нормираните. Такива са режимите на несиметрично натоварване, повреди в системите за управление, възбуждане или разпределение на товарите и пр. При тях също е необходима намеса на обслужващия персонал или включването на защитни устройства.

Посочените процеси са изключително важни за нормалната експлоатация на корабната енергийна уредба - обикновено оказват съществено влияние на качеството на електрическата енергия и на режима на работа на генераторите и консуматорите, и са определящи при избора на комутационно-защитна апаратура и някои параметри на регулаторите на първичните двигатели и системите за възбуждане на генераторите. В някои частни случаи, съобразно тяхното протичане се определя дори и структурата на КЕС.

Причина за възникващите преходни процеси в КЕС е най-често изме-

нението на параметрите на системата, което води от своя страна до изменение на параметрите на режима. Късото съединение например е предизвикано от рязкото изменение на съпротивлението на веригата, към която работи генераторът, т.е. от изменение на параметрите на системата. Като резултат от късото съединение възниква рязко изменение на тока и напрежението, които са основни на режима на КЕС.

Задачите за изследване на преходните процеси се разделят също на три групи:

- При изследване на нормални експлоатационни, аварийни и следаварийни преходни процеси основен резултат е оценката на качеството на електрическата енергия и свързаното с него определяне на параметрите на регулаторите.

- При изследване на аварийните режими резултатите от изследването се използват при оразмеряване на комутационно-защитната апаратура, както и на някои конструктивни елементи на устройствата, с оглед последните да издържат възникващите тежки натоварвания. Следаварийните процеси са свързани с прехода от аварийен режим към нормален експлоатационен, както и с определянето на устойчивостта на КЕС.

Изследването на несиметрични и други особени режими е необходимо за по-правилното оразмеряване на агрегатите и техните системи за управление.

Трябва да се подчертае, че особеностите на автономните (в частност корабните) електрически станции определят важни специфики в протичането на тези процеси в КЕС, поради което винаги можем да пренесем изводите от изследването на преходните процеси в бреговите ЕС към корабните. Тези особености са:

- Отсъствие на мощна мрежа като буфер, който поема резките натоварвания. Следователно са налице резки изменения на напрежението и честотата при натоварване.

- Наличие на къси линии на предаване на електроенергията. Параметрите на тези линии се отличават със значително по-ниска реактивност и по-високо омично съпротивление.

- Наличие на съизмерими времеконстанти на генераторите и първичните двигатели. Следователно, не е възможно да се прилага детерминирано (разделно) изследване на електромеханичните процеси, свързани с изменението на ъгловите скорости и положението на роторите, и на електромагнитните процеси, свързани с изменението на потокосцепленията, напреженията, токовете, което често се приема като основен момент в процеса на изследване.

- Съизмеримост на мощностите на генераторите и товарите.
- Значителното бързодействие на регулаторите.
- Тежки аварийни условия, вследствие ниската стойност на напрежението в КЕС и големите стойности на възникващите токове.

Изследването на преходните процеси дори в отделно взет елемент на КЕС-генератора е свързано със значителни трудности, породени от сложното математическо описание на обекта. Трудностите се увеличават при обединението на тези елементи в система.

Отделните елементи придобиват нови свойства в процесите в КЕС и могат съществено да се отличават от процесите във всеки отделен генератор. Така например включването на активно съпротивление в линията на паралелно работещи генератори може да доведе до колебание в системата при стабилна автономна работа, а регулаторите при паралелна работа могат рязко да изменят характеристиките на процесите както количествено, така и качествено. Ето защо при преходните процеси в КЕС следва основното внимание да се съсредоточи върху единното изследване на електромагнитните и електро-механичните процеси.

Основен математичен апарат за описание на тези явления, който може да даде достатъчно диференцирана, пълна и точна представа за протичащите процеси, е описанието на процесите посредством диференциални уравнения. Тъй като диференциалните уравнения на електрическите машини са нелинейни, се използва методът на преобразуване с помощта на изобразяващите вектори. Преобразуваните уравнения на електрическите машини (уравнения на Парк-Горев) позволяват вместо с нелинейните диференциални уравнения на електрическите машини да се оперира с линейни, без въвеждането на груби опростявания, позволяващи само качествена оценка на явленията.

Законите на регулирането на възбудането на генераторите и на оборотите на първичните двигатели се описват на основата на средствата и методите, възприети в теорията на автоматическото регулиране.

Инженерните методи за изследване са свързани най-често с приложението на апарата на преобразуването на Лаплас за решение на обикновени диференциални уравнения и честотните методи, разработени в теорията на автоматическото регулиране. При изследването на сложните съвременни КЕС обаче все по-остро се чувстват ограниченията, налагани от тези методи, и произтичащата от това невъзможност за всестранно изследване на процесите. Тези ограничения са свързани с възможността да се изследват сравнително прости и главно линейни (или линеаризирани) обекти. Тяхното прилагане при някои типове нелинейности, като умножение на две функции, които често се срещат при описанието на КЕС, е въобще невъзможно.

Съвременните изчислителни техники позволяват най-пълно и точно да бъдат изследвани преходните процеси в КЕС. Сред тях с огромни възможности и потенциал са програмните пакети *MathCad* и *MatLab*.

## 22.2. Общи сведения за математичния апарат за изследване на преходните процеси в КЕС

Анализът на преходните процеси в корабните електроенергетични системи изисква познаването на диференциалните уравнения на машината.

Синхронната машина представлява система от магнитно взаимосвързани намотки, чието относително положение при въртене на ротора непрекъснато се изменя в пространството. Следователно, коефициентите на взаимните индуктивности между намотките зависят от положението на ротора и при въртенето му се изменят по синусоидален закон. В уравненията на потокосцепления коефициентите пред токовете ще бъдат синусоидално изменящи се функции, а от тук и диференциалните уравнения на синхронната машина ще бъдат нелинейни (с променливи коефициенти). Аналитично решаване на такива диференциални уравнения е невъзможно.

Все пак, за решаването им са разработени методи, които преобразуват уравненията във вид, позволяващ тяхното аналитично решение. В основата на преобразуването е представата за изобразяващия вектор:

Във въздушната междина на електрическата машина при захранване на трифазната статорна намотка със симетрично трифазно напрежение, под действието на токовете в трите фази, възниква въртящо се магнитно поле. То може да се представи с пространствен въртящ се вектор, като във всеки момент въртящият се вектор се определя по модул и фаза от токовете в отделните фази и, обратно, моментните стойности на токовете във фазите могат да бъдат определени по съответен начин от вектора.

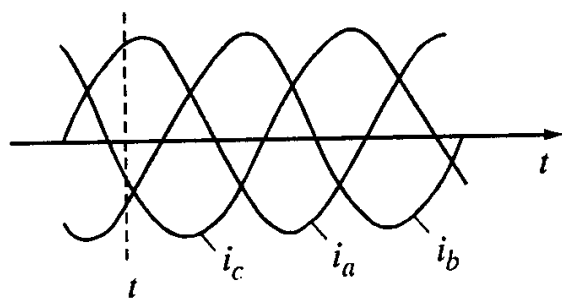
Оказва се, че всички величини в машината - напрежения, токове, потокосцепления и пр., могат да бъдат представени чрез такива векторни функции, получени от моментните стойности на съответните променливи, и обратно - по векторната функция винаги могат да бъдат получени съответните моментни стойности на променливите. Такава векторна функция е изобразяващият вектор, който се определя по следния начин (например за тока):

$$I = 2/3(i_a \cdot 1 + i_b \cdot a + i_c \cdot a^2) \quad ,$$

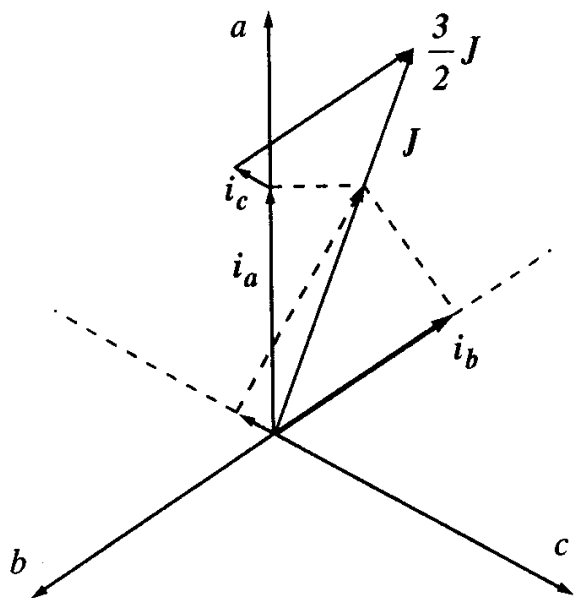
където  $i_a, i_b, i_c$  са моментните значения на съответните фазни токове;

$1, a, a^2$  - единични вектори, ориентирани по фазите  $a, b, c$ .





a)



б)

Фиг. 22.1

Връзката между моментите значения на синусоидалните променливи и техния изобразяващ вектор е показана на фиг. 22.1а, б. От фигурата се вижда, че чрез сумиране на вектори с големина, равна на значенията на синусоидите в даден момент и ориентирани по трите фазни оси, ще се получи въртящ се вектор. Тази операция на формиране на вектора съответства на математическия израз за изобразяващия вектор.

В статичен режим, когато роторът се върти синхронно с полето на статора, изобразяващият вектор на тока или напрежението ще бъде неподвижен относно координатната система, а проекциите на двете оси ще представляват постоянни числа.

Както всеки вектор, така и изобразяващият може да бъде представен чрез проекциите си в различни координатни оси. Най-често се използва ортогонална система  $d-q$ , която се върти със скоростта на въртене на ротора и чиито оси  $d$  и  $q$  съвпадат,

съответно, с надлъжната и напречна ос на ротора.

В съвременната теория на преходните процеси в електроенергетичните системи се използват преобразувани уравнения на синхронните машини. Преобразуването на уравненията включва два съществени момента: първо - променливите в уравненията на статорните и роторните намотки се разглеждат в обща въртяща се с ротора координатна система, и второ - трифазната система намотки на статора се еквивалентира с двуфазна, между тях взаимната индуктивност е вече нула. Горното преобразуване се осъществява с помощта на изобразяващия вектор и позволява да бъдат получени уравнения за синхронната машина без променливи коефициенти. По определени съотношения от променливите в тези преобразувани уравнения на машината винаги могат да се намерят моментните значения на фазните променливи (напрежение, токове и пр.).

Теорията на това преобразуване е разработена от Парк, Горев, Алябиев, Кимбарк, Конкордиа, Корн, Страхов и др. Уравненията, свързващи

моментните стойности на променливите (напр. за тока)  $i_a, i_b, i_c$  във фазите на статора и проекциите на съответния изобразяващ вектор върху координатните оси  $d$  и  $q$ , са следните:

$$I_d = 2/3 \left[ i_a \cdot \cos \omega t + i_b \cdot \cos (\omega t - 120^\circ) + i_c \cdot \cos (\omega t - 240^\circ) \right] ,$$

$$I_q = 2/3 \left[ i_a \cdot \cos \omega t + i_b \cdot \cos (\omega t - 120^\circ) + i_c \cdot \cos (\omega t - 240^\circ) \right] .$$

Диференциалните уравнения на явнополюсна синхронна машина без демпферна клетка приемат вида

$$U_q = \frac{d\psi_q}{dt} + (1-s) \cdot \psi_d + I_q \cdot R_s ,$$

$$U_q = \frac{d\psi_d}{dt} + (1-s) \cdot \psi_q + I_d \cdot R_s ,$$

$$U_r = \frac{d\psi_f}{dt} + I_r \cdot R_r ,$$

$$\psi_d = X_d \cdot I_d + X_{ad} \cdot I_r ,$$

$$\psi_d = X_q \cdot I_q ,$$

$$\psi_d = X_d \cdot I_d + X_{ad} \cdot I_r ,$$

$$s = \frac{\omega_{nom} - \omega}{\omega_{nom}} ,$$

където  $U_d, U_q, I_d, I_q, \psi_d, \psi_q, U_r, I_r, \psi_r$  са, съответно, проекциите на изобразяващите вектори на токовете, напреженията и потокосцепленията в статора и ротора;

$X_d, X_q, X_{ad}, X_r, R_s, R_r$  - съответно, индуктивностите по надлъжната и напречна оси на машината, взаимната индуктивност между статора и ротора, индуктивността на ротора и активните съпротивления на статора и ротора.

Между горните уравнения и описанието на синхронната машина с теорията на двете реакции (вж. т. 17.5, гл. 17, раздел IV) в статичен режим съществува пряка връзка. Тази връзка е обусловена от факта, че теорията на двете реакции разглежда не реалния магнитен поток във въздушната

междина, а неговите съставни по напречната и надлъжната ос, за които магнитната проводимост е постоянна.

### 22.3. Преходен процес при включване на товар към синхронен генератор с независимо възбуждане

Изследването на този най-прост преходен процес е съществено, понеже позволява да бъдат направени важни качествени изводи за поведението на синхронния генератор в преходни режими.

Нека предположим, че включваният товар е индуктивен и генераторът е възбуден до напрежение  $U = U(-0) = 1$ .

Решението на горната система уравнения за този случай е

$$u(t) = U_{\infty} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{T_d}\right) \right] + U(+0) \exp\left(-\frac{t}{T_d}\right),$$

където  $U_{\infty}$  е установената стойност на напрежението след затихване на преходния процес;

$U(+0)$  - стойността на напрежението в началото на преходния процес в момента  $t(+0)$ .

От своя страна:  $U_{\infty} = \frac{U(-0) \cdot X_T}{X_T + X_d}$ , а  $U(+0) = \frac{U(-0) \cdot X_T}{X_T + X'_d}$ ,

където  $U(-0)$  е стойността на напрежението до началото на преходния процес в момента  $t(-0)$ ;

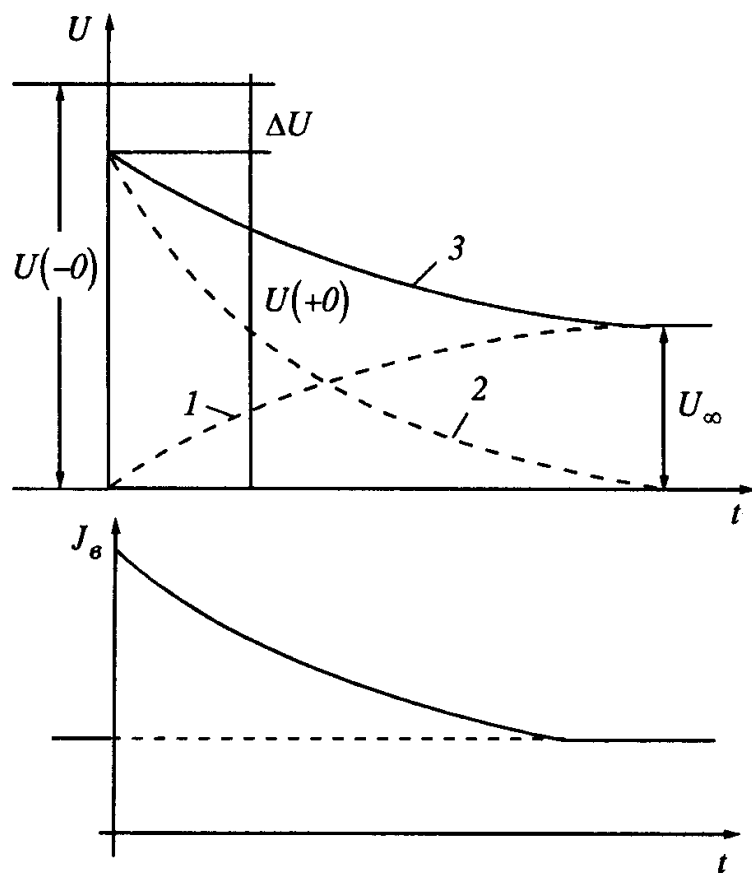
$X_T$  - индуктивното съпротивление на товара;

$X_d$  - индуктивното съпротивление на генератора по надлъжната ос;

$X'_d$  - преходно индуктивното съпротивление на генератора.

Както следва от формулата по-горе, напрежението се определя от изменението на две съставни. Първата зависи само от значението на напрежението за възбуждане, приложено към клемите на възбудителната намотка след началото на преходния процес, а втората - от значението на потока в машината до началото на преходния процес, т.е. магнитното състояние на машината до момента на комутация. Първата компонента се изменя по експоненциално нарастващ закон, а втората - по експоненциално спадащ. На

фиг. 22.2, представяща графиката на изменение на напрежението на клемите на генератора, те са отбелязани, съответно с 1 и 2, а с 3 е обозначена резултантната крива.



Фиг. 22.2

често двигател. Тя може да бъде модифицирана, като съпротивлението на товара се изрази чрез мощността на двигателя и кратността на пусковия ток. В този си вид тя е

$$U(+0) = U(-0) \frac{X'_d}{X'_d + \frac{U_{nom}}{I_{\text{дв. ном}} \cdot K_{\text{П}}}}$$

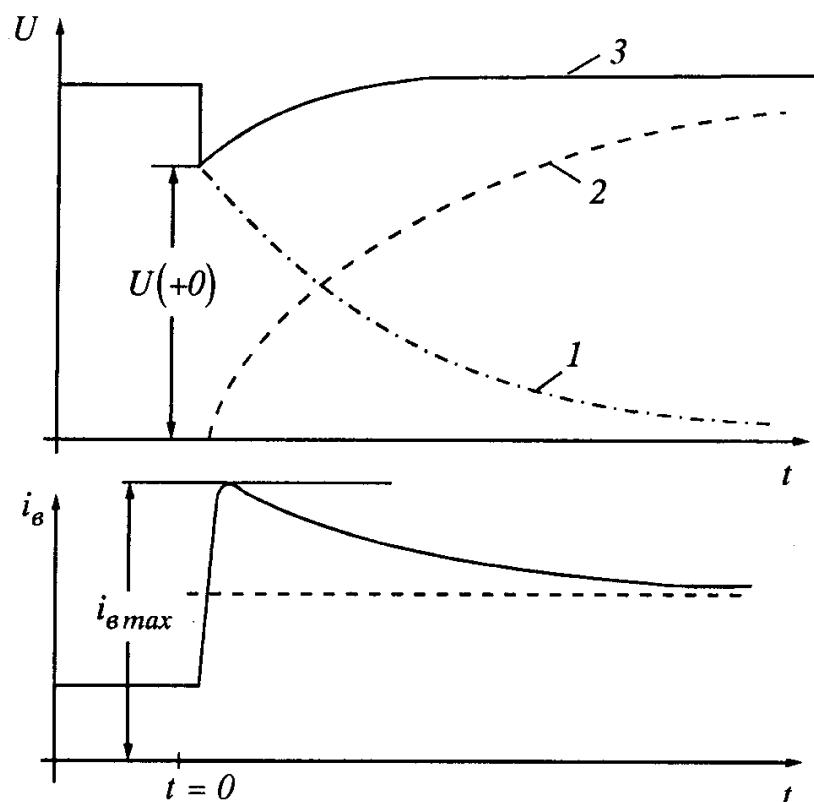
където  $U_{nom}$ ,  $I_{\text{дв. ном}}$  са номиналните напрежение и ток на двигателя, а  $K_{\text{П}}$  - коефициентът за пусковия ток на двигателя.

Лесно може да се докаже, че ако едновременно с включването на товара се увеличи напрежението на възбуждане  $(1 + x_d)$  пъти, напрежението на генератора след протичането на преходния процес ще се възстанови до първоначалната си стойност. Графиките, изобразяващи кривите за този пре-

Характерно за напрежението е скокообразното му изменение в първия момент след комутацията. Тази стойност винаги представлява интерес при оценка на преходния процес. Както бе посочено, значението на напрежението в първия момент след включването на товара, се определя от магнитния поток в машината до началото на преходния процес и е равно на

$$U(+0) = U(-0) \cdot \frac{X_T}{X_T + X'_d}$$

Тази формула е често използвана в практически изчисления за очакваните внезапни изменения при включване на товар, най-



Фиг. 22.3

ходен процес, са показани на фиг. 22.3: 1 - компонентът в напрежението, обусловен от началния поток, 2 - компонентът, определен от напрежението на възбуждане, 3 - резултантната крива. От анализа им следва важният извод, че посредством въздействие от системата за възбуждане не може да се измени началната стойност на напрежението след комутацията на товара, тъй като компонентът, зависещ от напрежението на възбуждане в началния момент след комутацията, винаги е нула.

Както се вижда от фиг. 22.3, токът на възбуждане също се изменя рязко, след което експоненциално спада. В основата на това явление е обстоятелството, че в началния момент на преходния процес потокосцеплението във въздушната междина на машината остава неизменно и първоначалното изменение на тока в ротора компенсира възникналия в статора ток.

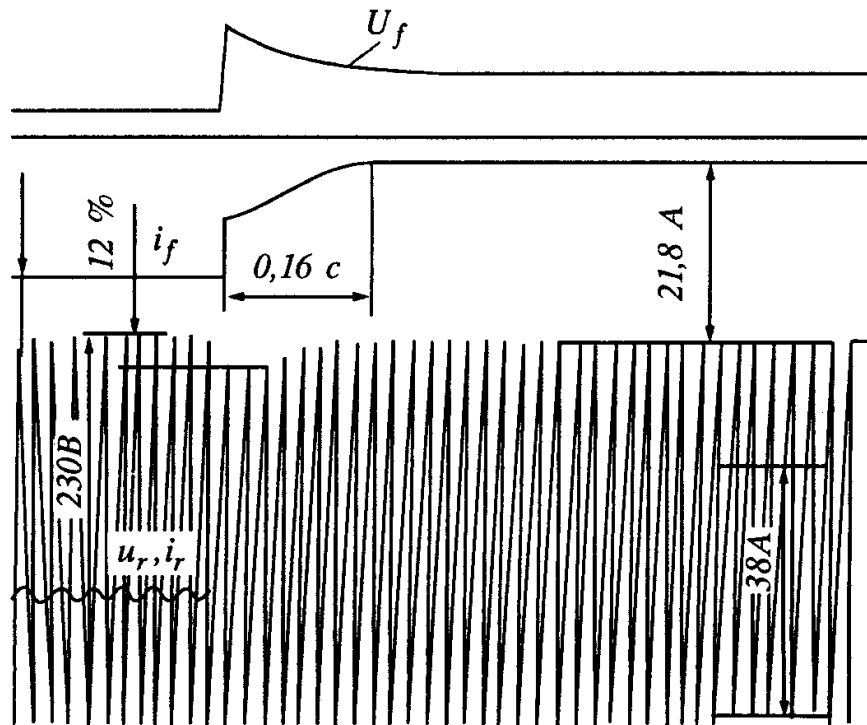
#### 22.4. Преходни процеси при включване на товар към синхронен генератор със система за възбуждане

Преходните процеси при включване на товар към СГ със система за регулиране на възбуждането в значителна степен зависят от типа на системата за възбуждане и нейните параметри. Затова те са разгледани последователно, с акцент върху особеностите им за системите за компаундиране, системите по отклонение и комбинираните системи.

На фиг. 22.4 е показана осцилограма на преходния процес в СГ, тип МСА-724 със система за компаундиране (СК) с капацитивен компаундиращ елемент.

При включване на товара токът в токовата намотка рязко се увеличава. Поради възникналата производна в ротора на СГ, токът в намотката за възбуждане също се увеличава до значение, при което потокосцеплението на роторната намотка остава неизменно. То обаче е недостатъчно да ком-

пенсиря увеличеният магнитен поток на токовата намотка. Поради голямата индуктивност на роторната намотка вторичният ток в компаундиращия трансформатор не може рязко да се увеличи и токът на намагнитване рязко се увеличава. Напрежението на възбуждане се увеличава до напрежението на насищане на токовия трансформатор. С нарастването на тока на възбуждане и на вторичния ток на компаундиращия трансформатор, напрежението на възбуждане постепенно се намалява до напрежението, обезпечавано от СК при дадения товар в статичен режим.



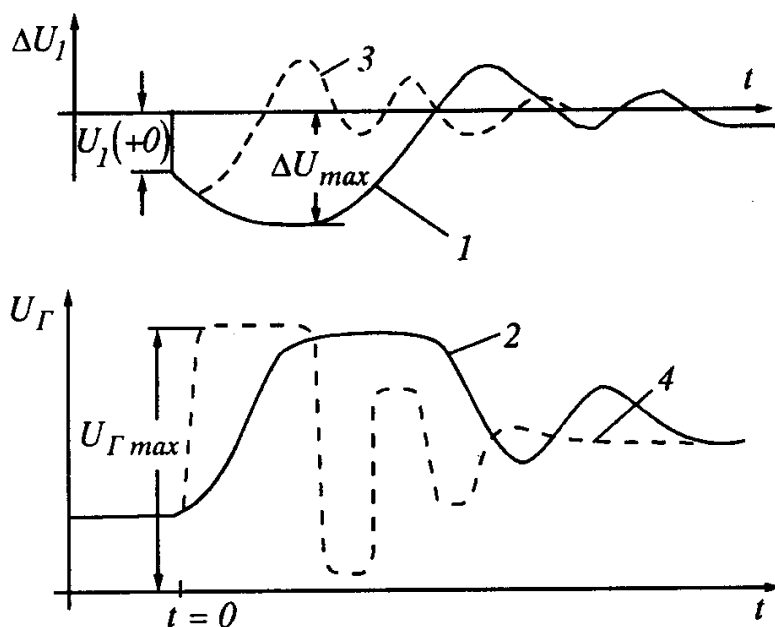
Фиг. 22.4

Ето защо компаундиращият трансформатор в преходен режим проявява форсиращи свойства, които влияят благоприятно на преходния процес, като се намалява времето за възстановяване на напрежението.

В системите за възбуждане, реализирани на принципа регулиране по отклонение, характерът на преходния процес почти изцяло се определя от два параметъра на системата за обратна връзка: времеконстанта  $\tau$  и коефициентът на усилване. В системата за регулиране по отклонение отсъства токовият трансформатор с благоприятното влияние на форсиращите му свойства.

Както е известно от теорията на автоматичното регулиране, коефициентът на усилване определя статичната точност, с която се поддържа напрежението. За да се осигури точност, не по-лоша от 2%, коефициентът на усилване трябва да има доста високи стойности. При тях запасът от устойчивост на системата за регулиране намалява. Често пъти, поради инерт-

ността на филтрите във веригата за измерване или инертността на подвзбудителя при безконтактните синхронни генератори, преходният процес в системите за регулиране, построени по принципа на регулиране по отклонението на напрежението от зададената му стойност, се характеризира с известна колебателност.



Фиг. 22.5

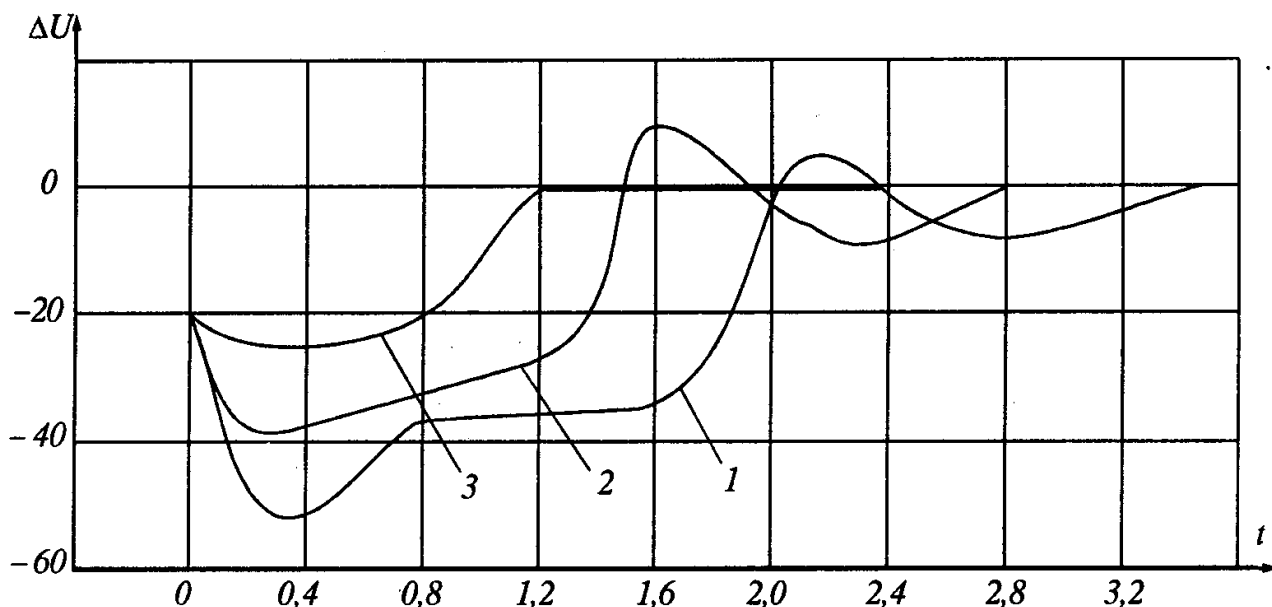
На фиг. 22.5, която показва преходния процес при включване на товар в такава система, колебателността е в границите на едно-две колебания, което е приемливо. Показан е и сигналът на изхода от коректора, който определя процеса.

Влиянието на системата за възбуждане се проявява особено отчетливо върху преходния процес при пускане на асинхронен двигател. По време на пусковия процес той може да бъде разглеждан като променливо съпротивление,

което е най-малко при нулеви обороти и се променя с развъртането на двигателя. Промяната не е линейна, а зависи по сложен закон от оборотите. При развъртян двигател съпротивлението е от 5 до 10 пъти по-голямо (зависимост от натоварването) от съпротивлението в началото на процеса. Понеже, от своя страна, развиваният в процеса на развъртане момент на двигателя зависи от напрежението, начинът на регулиране влияе рязко върху цялостния процес.

На фиг. 22.6 е показано изменението на напрежението при включване на двигател към генератор с три различни вида системи за възбуждане:

Крива 1 показва преходния процес при система за регулиране по отклонение със значителна инертност на коректора на напрежение, а крива 2 - преходния процес при система за регулиране по отклонение с по-малка инертност на коректора на напрежение или наличие на инертност, вследствие използването на синхронен възбудител и изправител. Крива 3 изобразява преходния процес при система за компаундиране с токов канал. В този случай времето на преходния процес е по-малко. По-малък и за по-кратко време е и провалът в напрежението.



Фиг. 22.6

## 22.5. Преходни процеси при късо съединение на корабните синхронни генератори

### 22.5.1. Обща характеристика

Късите съединения в КЕС представляват сериозен аварийен режим, вследствие на който може да бъде нарушена работоспособността на станцията.

Късите съединения в корабните мрежи могат да възникнат поради нарушение на изолацията на различно оборудване, остаряването и влошаването на изолационните ѝ свойства, механически повреди или неправилна експлоатация. При късо съединение токът в повредения участък на линията рязко нараства, вследствие на което в него могат да възникнат значителни топлинни или механични натоварвания.

Снижаването на напрежението в останалите участъци на линията води до нарушаване на нормалната работа на включените консуматори. Възможно е също и нарушение на устойчивата паралелна работа на генераторите.

Ето защо, режимът на късо съединение е опасен не само за КЕС, но и за цялото корабно обзавеждане. Поради това е особено важно корабното електрообзавеждане да бъде оразмерено по такъв начин, че да издържа възникващите значителни претоварвания, а защитата бързо да ликвидира аварията или да предотврати развитието ѝ.

Късите съединения, които могат да възникнат в КЕС, са еднофазни (на корпус), двуфазни и трифазни. Обикновено отначало възниква едно- или двуфазно късо съединение, което преминава в трифазно. Тъй като най-



тежки по отношение на възникващите електродинамични и термични натоварвания са симетричните трифазни къси съединения, в последващото изложение са изследвани именно те.

Към основните особености на корабните електросистеми, оказващи съществено влияние на развитието на процеса на късо съединение, следва да се отнесат:

1. относително ниските напрежения в мрежата, значителните мощности на генераторите и използването на паралелна работа на последните - поради тях възникващите абсолютни значения на токовете на къси съединения многократно превъзхождат токовете на късо съединение в бреговите станции с близка мощност;

2. относително малките съпротивления на линията, поради малката дължина на кабелните траси и отсъствието на трансформатори - това също води до големи кратности на възникващите токове;

3. наличието преди всичко на асинхронни двигатели в качеството на товар на станцията - при късо съединение последните преминават в режим на генериране на реактивна мощност, което предизвиква значително увеличаване на тока в точката на късо съединение.

Поради тези причини изследването на токовете на късо съединение в КЕС има своята специфика, а методите, прилагани в бреговата ЕС за расчета на този режим, изискват съответна корективна и отчитане на гореизброените особености.

### *22.5.2. Анализ на процесите при симетрично късо съединение в синхронния генератор с независимо възбуждане*

Изследването на режима на внезапно късо съединение в синхронния генератор ще извършим с помощта на уравненията на Парк, цитирани по горе.

Изразът, който се получава след решаването на диференциалните уравнения при неизменно възбуждане и начални условия за потока на машината, съответстващ на потока при номинално напрежение на празен ход на генератора, има следния вид във векторна форма:

$$\bar{I}(t) = \frac{\bar{U}(-0)}{jX'_d} \exp\left(-\frac{t}{T'_{ds}} - jt\right) - \left[ \frac{\bar{U}(-0)}{jX'_d} - \frac{\bar{U}(-0)}{jX_d} \right] \exp\left(-\frac{t}{T'_d}\right) - \frac{\bar{U}(-0)}{jX_d} .$$

Полученият израз е описан в координатна система, въртяща се синхронно с ротора. За физическия анализ на процесите е по-удобно същият

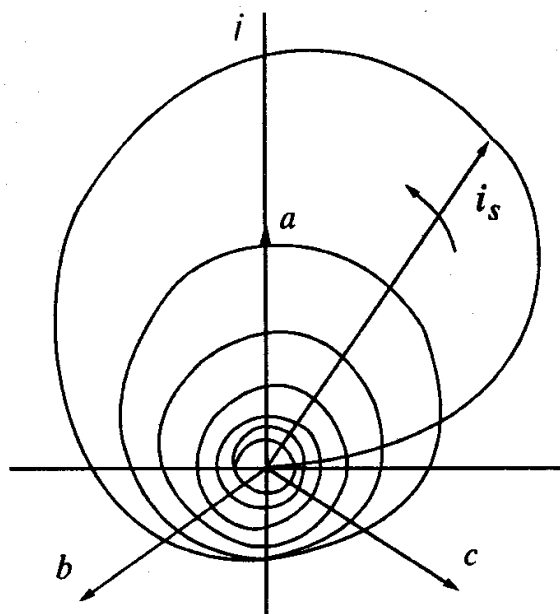
израз да бъде приведен в неподвижна координатна система  $\alpha, \beta$ . Полученият резултат е

$$\bar{I}(t) = \frac{\bar{U}(-0)}{jX'_d} \exp\left(-\frac{t}{T_s}\right) - \bar{U}(-0) \left[ \frac{1}{jX'_d} - \frac{1}{jX_d} \right] \exp\left(-\frac{t}{T'_d} + jt\right) - \frac{\bar{U}(-0)}{jX_d} \cdot \exp(jt)$$

като изразът обикновено се използва в следната форма:

$$I(t) = I'_0 \cdot \exp\left(-\frac{t}{T_s}\right) - (I'_0 - I_\infty) \exp\left(-\frac{t}{T'_d} + jt\right) - I_\infty$$

където  $I'_0$  е начално значение на т.нар. преходна съставна, а  $I_\infty$  - установеното (трайно) значение на тока на късо съединение.



Фиг. 22.7

На фиг. 22.7 е показан ходографът на изобразяващия вектор на тока на късо съединение, съответстващ на горния израз, а на фиг. 22.8 - моментните стойности на токовете в трите фази, получени при проектирането на вектора върху осите  $a, b$  и  $c$ .

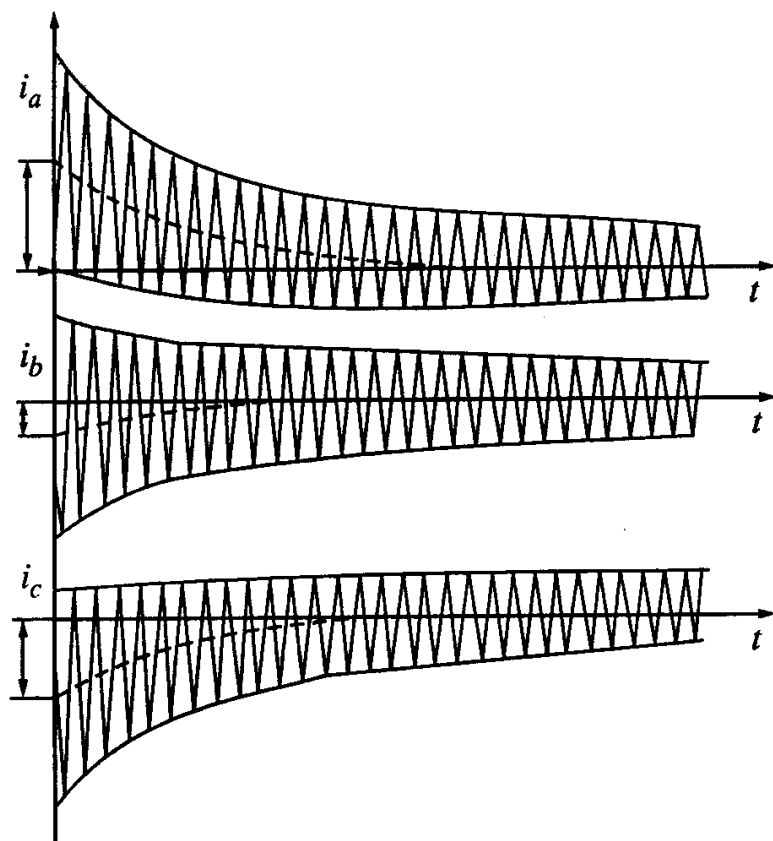
Очевидно, токовете на късо съединение в трите фази не са еднакви и в първия полупериод само в една от фазите ударният ток може да достигне максималната теоретична стойност.

Изведените съотношения дават възможност да бъдат направени следните изводи:

1. Токът на късо съединение съдържа компонент, затихващ експоненциално. Той се нарича аperiодична съставна. Последната затихва с преходната времеконстанта на статора,  $T_a$ .

2. Периодичната съставна затихва с преходната времеконстанта на ротора  $T_d$  и се изменя от значение  $U/Z_{к.с.}$  в момента  $t = 0$  до стойността на трайния ток на късо съединение, осигуряван от системата за възбуждане при затихване на преходния процес.

3. Периодичната и аperiодичната съставна в началния момент на късото съединение са равни помежду си и са с обратен знак.



Фиг. 22.8

Влиянието на системата за възбуждане на процеса на късо съединение се проявява преди всичко в големината на трайния ток на късо съединение, т.е. в крайната фаза на процеса. Както бе нееднократно отбелязано, този ток се определя от действието и параметрите на токовия канал в системата за възбуждане; неговата стойност възлиза на 3-4 пъти номиналния ток и от тази стойност генераторният автомат трябва да изключи веригата на късо съединение след 0,4-0,5 секунди.

## 22.6. Защити в КЕС

Основните нарушения на нормалната работа на КЕС или нейните елементи са следните:

- недопустимо намаляване на съпротивлението на изолацията на кабелите, намотките на машините, апаратите и другите електрически елементи и устройства в системата;
- повишаване на съпротивлението на контактните съединения (клемите, апаратите и др.);
- прекъсване на кабели, тоководещи жила, проводници, намотки и др.;
- късо съединение в различни места на мрежата;
- претоварване на двигателите, вследствие механически неизправности в механизмите, задвижвани от двигателя;
- неизправности в работата на автоматичните устройства на управление и контрол.

Причините за тези неизправности най-често са случайни - дефекти на материалите, пропуски в технологиите на изработка и монтаж на изделията, агресивното въздействие на морските условия на експлоатация (влага, попадане на масла, морска вода, основи или киселини), външни механически претоварвания, вибрации и удари, електрически въздействия (атмос-

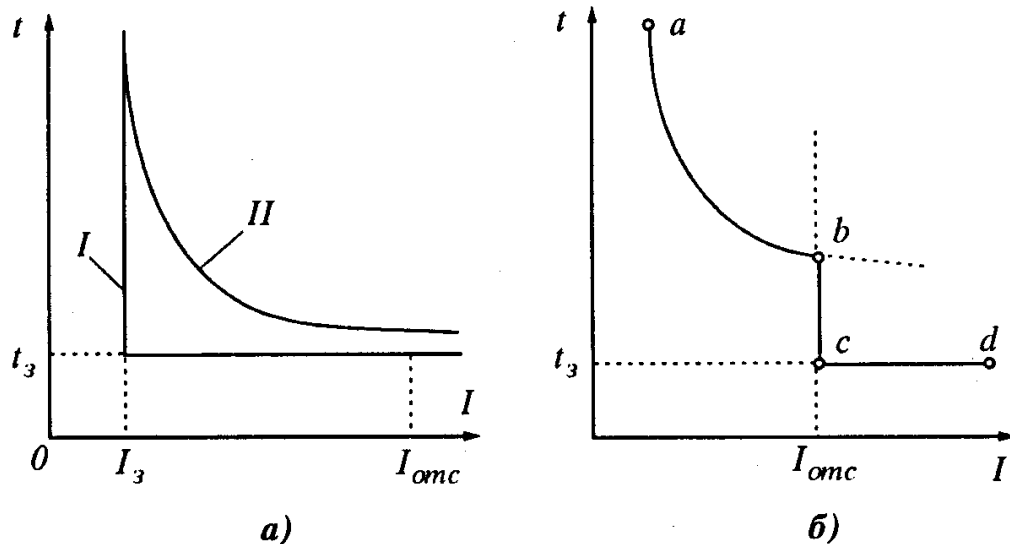
ферни явления и статично електричество), стареене на материалите и износване на детайлите и, най-после, неспазване на правилата на експлоатация и грешки на обслужващия персонал.

Последствията от посочените нарушения в нормалната работа на КЕС се проявяват във възникването на големи (в сравнение с номиналните) токове, ненормално повишаване или понижаване на напрежението, възникване на ударни моменти, повишаване на температурата на отделни части, излизане от строя на отделни устройства, възникване на пожар и дори катастрофи. Затова всяка система за защита на КЕС и устройствата към нея трябва да притежават следните качества:

- бързодействие;
- избирателност (селективност), т.е. способност за изключване само на повредения участък или елемент от системата;
- надеждност;
- електродинамична и термична устойчивост, т.е. способност без механически повреди или обгаряния да се изключват пределни по своята големина токове на късо съединение.

Системата за защита в КЕС е построена върху използването на автоматични изключватели (автомат) с максималнотокова защита, предпазители, токови релета и релета за мощност и устройства за автоматично разтоварване, основната част от които е разположена в ГРТ. С помощта на тези устройства се реализира защитата на всички основни елементи на корабните електроенергетични системи - генераторите, секциите на ГРТ, фидерите на мрежата, двигателите, трансформаторите и устройствата за управление на сигнализация и измерване.

Основните характеристики, които дават параметрите на действието на апаратите за защита, са ампер-секундните характеристики, които показват при какъв ток и след колко секунди сработва съответният апарат (фиг. 22.9). Характеристиката на апаратите с релейна токова отсечка (фиг. 22.9а) е отбелязана на фигурата с *I*. При този тип характеристика времето на изключване не зависи от големината на тока. Характеристиката, отбелязана с *II*, е на предпазителите, при които времето за сработване се изменя в зависимост от големината на тока. На фиг. 22.9б е показана характеристиката на автоматичен изключвател (автомат). На участъка *a-b* на тази характеристика действието на автомата е определено от термичен изключвател (много често изпълняван от биметална пластина), а на участъка *b-c-d* - от действието на релейна токова отсечка. Тези автомати често се наричат още универсални или с комбинирана (термична и максималнотокова) защита, тъй като тя съчетава начина на действие на предпазителите и токовите релета.



Фиг. 22.9

В автоматите често се добавя и напреженово реле, което изключва при понижено напрежение (минимално-напреженова защита).

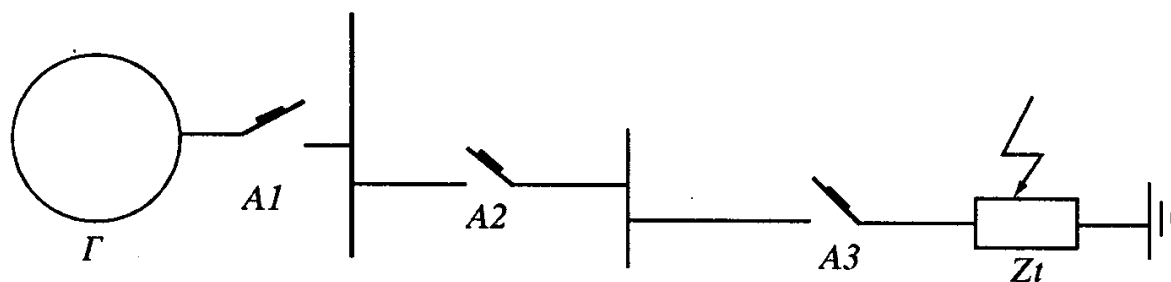
Автоматите, в които е възможно да се регулира времето на сработване на токовата отсечка, се наричат селективни.

### 22.6.1. Защита на основните елементи на корабните електроенергетични системи

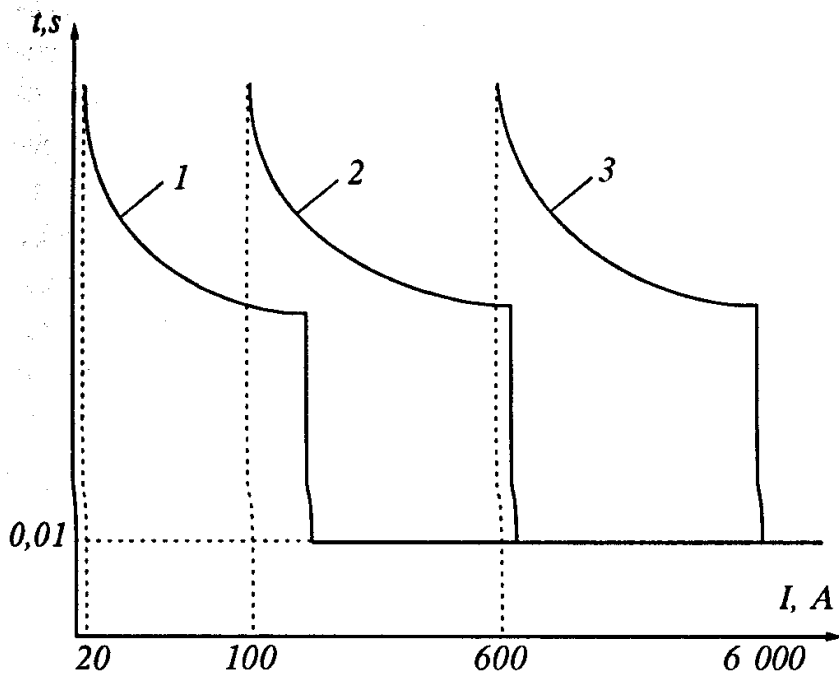
#### 22.6.1.1. Защита на мрежите

Защитата на мрежите се осъществява посредством използването на т.нар. *максималнотокова защита* - защитата, задействаща се тогава, когато токът в защитаваната линия превиши определена стойност, наричана ток на сработване на защитата.

На фиг. 22.10 е показана радиална мрежа с три участъка и едностранно захранване с генератор. На всеки участък е поставена защита с автоматически изключватели. При възникване на късо съединение на всеки един от участъците, токът на късо съединение може да задейства автоматите на всички участъци, разположени между източника на захранване и мястото на повредата. За да бъде защитата селективна, трябва да сработи защитата, разположена най-близко до точката на късо съединение.

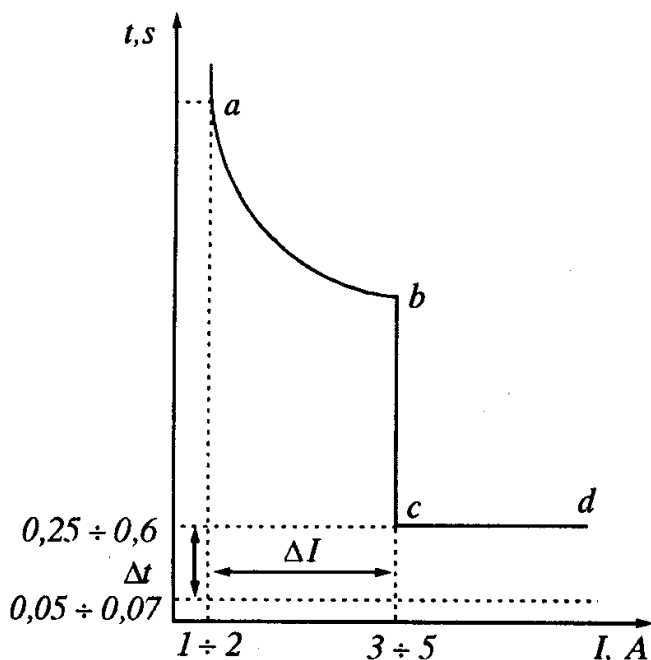


Фиг. 22.10



Фиг. 22.11

за сработване на токовата отсечка е еднакво и те няма да работят селективно. За да се осигури селективна работа е необходимо автоматът, който е най-близо до генератора, да има най-голямо време на сработване. Това се достига като генераторният автомат е винаги селективен и с най-голямо време на сработване. Характеристиката на такъв автомат е показана на фиг. 22.12.



Фиг. 22.12

На фиг. 22.11 са показани характеристиките на трите автомата, включени последователно до точката на късо съединение. Очевидно, ако токът не превишава 100 А, ще изключи автомат 1, до 600 А - автомати 1 и 2, генераторният автомат няма да изключи и да остави без напрежение шините. Автоматите при тези условия ще работят селективно.

Ако обаче токът на късо съединение надвишава 6 000 А, времето

Ако станцията е много мощна, тогава и за отделни фидери се използват селективни автомати. Тогава селективност се достига посредством настройката на времето на сработване на автоматичните изключватели по такъв начин, че времето на сработване на всеки автомат, който е по-близо до източника, да е по-голямо от това на по-отдалечения. За да работи надеждно защитата със селективни автомати, или при съвместно действие на селективни и неселективни автомати или предпазители, следва да бъде обезпечена разлика във времето на сработване  $0,1 \div 0,2$  секунди. При защита на съседни

участъци с предпазители обезателно се осигурява време между сработването на стопилките, равно на разликата във времето на сработване на стопилки, отличаващи се поне на две степени по скалата на номиналните токове на стопилките. Тъй като по този начин на действие на защитата времето на сработване на генераторния автомат нараства значително (около  $0,3 \div 0,5$  s), използването на този метод за обезпечаване на селективност поставя важно условие към външната характеристика на системите за възбуждане на генераторите. Условието се състои в необходимостта в системата за възбуждане обезателно да е включен токов канал, осигуряващ траен ток на късо съединение, тъй като за това време ( $0,5 \div 0,6$  s) свободните процеси обикновено затихват или не осигуряват ток, по-голям от тока на сработване на защитата. Ето защо трайният ток на късо съединение на генераторите следва да бъде равен на 3-4 пъти номиналния ток на генератора.

Максималнотоковата защита се настройва не само на определено време на сработване, но и на определен ток на сработване. След сработването на защитата, след време  $t_{кс}$  напрежението на генератора рязко нараства. Редица двигатели, които са останали включени към шините и за това време са намалили своите обороти, след нарастването на напрежението се намират в режим, близък до пусковия, и консумираният от тях ток е относително голям. Затова настройката на защитата трябва да бъде такава, че токът на сработване да бъде над максимално възможния ток при изключване на късото съединение. Като се имат предвид хистерезисът на действието на защитата и необходимият коефициент на запас, приема се, че този ток трябва да бъде между  $1,3 \div 2$  от пъти номиналния ток.

#### **22.6.1.2. Защита на генераторите**

Защитата на генераторите обикновено се реализира в съответствие с тяхната мощност, назначение и условия на работа. Генераторите на КЕС обикновено имат сравнително неголяма мощност (под 1 MW). За тях е характерна работа в паралел, при който е възможно навлизане на генератора в двигателен режим на работа. Ето защо за корабните генератори днес се приема за достатъчно да се защитават от:

- претоварвания;
- външни къси съединения (максимална защита);
- преход в двигателен режим (насочена защита);
- еднофазни съединения на корпус чрез контрол за състоянието на изолацията.

В генераторите следва да бъде предвидена и възможност за гасене на полето. Мощните генератори (над 100кWA) следва да се защитават също така и от вътрешни къси съединения, посредством диференциална защита.

### 22.6.1.3. Защита на трансформаторите

В КЕС обикновено се използват трансформатори с относително не-голяма мощност - до няколко десетки или стотици кА. За защитата на такива трансформатори обикновено се приема за достатъчна максимална защита и токова отсечка, а също и контрол на състоянието на изолацията. Защита се осъществява с автоматичен изключвател на първичната и вторична страна на трансформаторите или с автоматичен изключвател и предпазител.

### 22.6.1.4. Защита на двигателите

Двигателите в КЕС се защитават най-често от:

- къси съединения;
- претоварвания;
- работа на две фази;
- понижено напрежение.

Защитата от къси съединения най-често се осъществява с автоматични изключватели или предпазители. Голямо разпространение при двигателите до 20 до 30 kW е получила защитата с предпазители. Особеност при избора на предпазител е, че стопилката не трябва да прегаря от действието на пусковия ток. Поради това тя се избира обикновено по условието  $I_{cm} = (2-4) I_{nom}$ , в зависимост от условията на пускане.

Защитата от претоварване се осъществява от топлинните разединители в автоматичните изключватели или от топлинни биметалически релета (когато за защита от къси съединения се използват предпазители). Топлинните релета имат значителни недостатъци - влияят се от околната температура, не са достатъчно чувствителни, не гарантират сигурна защита от токовите претоварвания, възникващи при работа на двигателя на две фази.

При отпадане на една от фазите, под действие на възникващото пулсиращо поле двигателят продължава да се върти, но включените две фази се претоварват по ток с около до 40% - този режим е опасен и води до прегаряне на двигателя. Ето защо, в случай че защитата от къси съединения е изпълнена с предпазител, за защита на двигателя се използват различни релета за обратна последователност, появяваща се при несиметрична работа. Най-често това са три токови трансформатора, включени в статора на двигателя, чийто вторични намотки са свързани последователно в триъгълник. При симетрично натоварване сумата от трите фазни тока е нула и, следователно, на изхода от това реле с токови трансформатори сигнал няма да има. При нарушаване на това условие възниква сигнал.

Защитата от понижено напрежение е необходима, тъй като при него се намалява моментът на двигателите. Последните могат да спрат, консуми-



райки значителен ток, а при възстановяване на напрежението се намират в режим, близък до пусковия и претоварващ генераторите. Затова е целесъобразно при понижаване на напрежението автоматично да се изключват неотговорните консуматори. На отговорните консуматори такава защита не се поставя. Ролята на защита от понижено напрежение (минимално напреженова защита) се изпълнява от контактор в статорната верига на двигателя, който се използва и за включване, и за изключване на двигателя. В определени случаи (при мощни двигатели) могат да бъдат използвани автоматични изключватели с вградени напреженови релета, които изключват автомата при понижаване на напрежението.

## Двадесет и трета глава

### ИЗПОЛЗВАНЕ НА АКУМУЛАТОРИТЕ В СИСТЕМИТЕ ЗА КОРАБНО ЕЛЕКТРОЗАХРАНВАНЕ

#### 23.1. Корабни акумулаторни батерии

Корабните акумулаторни батерии са важен алтернативен източник на електрическа енергия, тъй като акумулаторните батерии се използват в устройствата за непрекъснато захранване на най-важните информационни системи, чието захранване е единствено резервирано - разнообразните системи за управление и контрол на различни отговорни агрегати и средствата за радионавигационно осигуряване на кораба.

Освен в тези системи, акумулатори се използват за стартиране на аварийния дизелгенератор, както и за аварийно осветление.

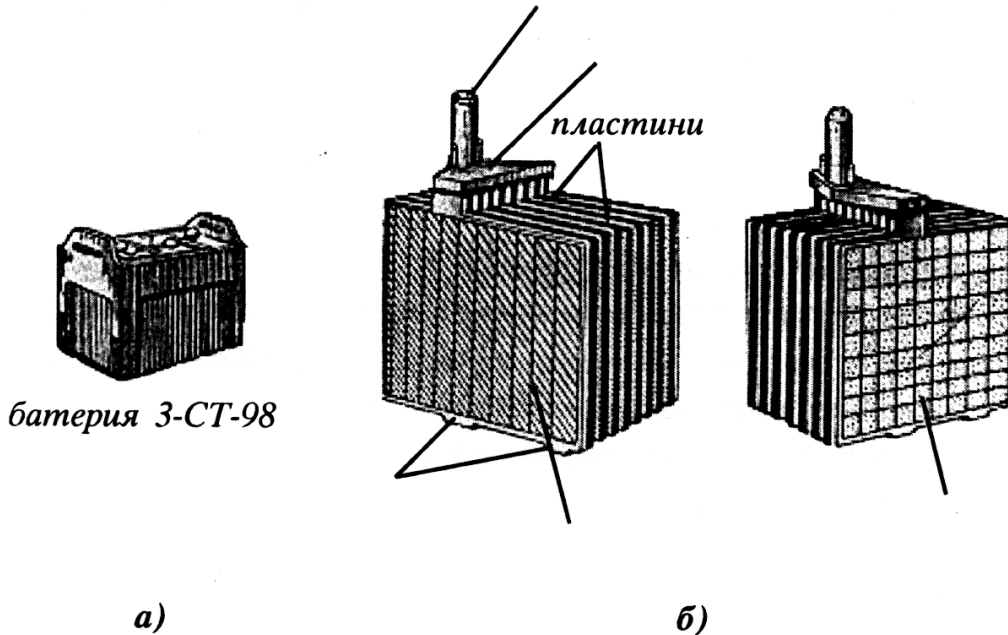
Понастоящем се използват киселинни оловни акумулатори - най-вече желязно-никелови, кадмиево-никелови и сребърно-цинкови.

Основните акумулатори, в сравнение с киселинните, имат по-голямо вътрешно падение на напрежението, но едновременно с това притежават по-голяма механична здравина и голям срок на служба. Подходящи са за захранване на вериги, в които претоварването е малко вероятно, например - средства за връзка, сигнализации и аварийно осветление. Сребърно-цинковите акумулатори превъзхождат киселинните по отношение на габаритите.

##### *23.1.1. Кратка характеристика на киселинните оловни акумулатори*

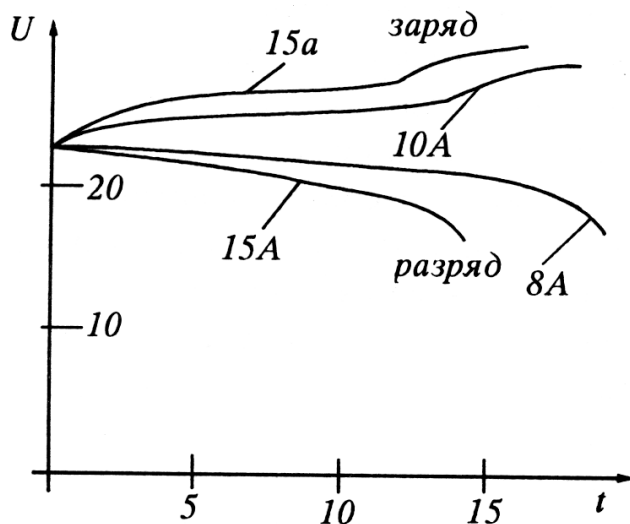
Оловният акумулатор представлява съд от киселинно-устойчив материал (например ебонит), в който са поместени, редувайки се, положителни и отрицателни пластини. Отрицателните пластини са винаги с една повече - за предотвратяване изкорубването на положителните пластини, което възниква, когато електрохимическата реакция протича само от едната страна на пластината. Положителните пластини се изработват от олово, примесено със 6-8 % примеси за увеличаване на механическата здравина. Изпълняват се във вид на решетка, запълнена с пореста маса, състояща се от оловен двуокис ( $PbO_2$ ). Отрицателните пластини са също решетъчни, запълнени с гъбесто олово. Пластините се запояват към две оловни баретки, на които се намират изводите за включване на акумулатора (фиг. 23.1). За намаляване на размерите и вътрешното съпротивление на акумулатора

между пластините се оставя неголямо разстояние. Между положителните и отрицателните пластини на акумулатора, с цел предотвратяване на къси съединения, се установяват сепаратори, при които повърхността, обръната към страната на положителните пластини, е оребрена с вертикални ребра. Сепараторите се изработват от специално обработен шперплат, порест ебонит и пореста пластмаса.



Фиг. 23.1

При експлоатация на акумулаторите от пластините на дъното на съда пада активна маса. За предотвратяване на късите съединения, които биха могли да възникнат при това, на дъното има призматични канали, служещи като опора за пластините и образувачи на дъното пространство, предназначено за отделящата се утайка.



Фиг. 23.2

Акумулаторният съд се запълва с воден разтвор на химически чиста сярна киселина и се затваря с капак, на който има отверстия за извеждане на баретките, заливане на акумулатора с електролит и изход на газовете, образувачи се по време на работа. Електродвижещото напрежение на оловните акумулатори е пропорционално на плътността на електролита и е свързано с нея.

Напрежението на електродите зависи от големината на е.д.н. и въл-

решното съпротивление на електролита в порите на активната маса. На фиг. 23.2 са представени кривите на е.д.н. и напрежението на клемите на акумулатора по време на неговото зареждане и разреждане. Както се вижда от фигурата, в началото на зареждането е.д.н. и напрежението на клемите бързо нарастват, вследствие увеличаването на плътността на електролита в порите и на повърхността на пластините. След това започва процес на дифузия, съпроводен с повишаване на плътността на електролита, намиращ се между пластините. Благодарение на голямото количество електролит в акумулатора, този процес протича относително бързо. Във връзка с това относително бавно се повишават е.д.н. и напрежението на клемите на акумулатора. Вътрешното съпротивление на акумулатора при това намалява, вследствие увеличаването на плътността на електролита. Зарядният режим приключва с бурно газоотделяне, способстващо размесването на електролита. При това, обаче, се повишава температурата на акумулатора, отделя се гърмящ газ и се рушат пластините. За намаляване на отрицателния ефект от газообразуването, в края на зареждането следва да се намали силата на зарядния ток.

В началото на разрядния режим е.д.н. и напрежението на клемите на оловните акумулатори се понижават бързо, благодарение на разходването на сярна киселина в порите и на повърхността на пластините. По-нататък, в резултат от дифузията на сярната киселина, плътността на електролита се понижават не само в порите и на повърхността на пластините, но и между тях. Този процес протича относително бавно, при това намаляват и, съответно, е.д.н. и напрежението на клемите на акумулатора. Вътрешното съпротивление нараства за сметка на намаляването на плътността на електролита. При разряда на акумулатора се образува оловен сулфат, който се отлага върху пластините и вътре в порите на активната маса, като по този начин намалява тяхното сечение и затруднява дифузията на сярната киселина в порите на пластините. Вследствие на това плътността на електролита вътре в порите започва рязко да намалява в края на разряда. Едновременно с нея бързо падат е.д.н. и особено напрежението на клемите на акумулатора, поради рязкото увеличаване на неговото вътрешно съпротивление. При това разрядът на акумулатора трябва да се приключи. Продължаването на разряда на акумулатора при малка плътност на електролита в порите на активната маса води до изменение на химическите реакции в него и до поява на необратими процеси, предизвикващи повреда на пластините.

Капацитет на акумулатора се нарича количеството електричество, което той отдава при разряд от начално състояние, съответстващо на пълно зареждане, до крайно състояние, съответстващо на допустими крайни значения на напрежението.

Капацитетът на акумулаторите зависи от тяхната конструкция. Освен това, за един и същ акумулатор капацитетът зависи от големината на разрядния ток, температурата, началната плътност на електролита и срока на служба на акумулатора.

### **23.1.2. Кратка характеристика на основните акумулатори**

Произвеждат се два типа основни акумулатори - желязо-никелови и кадмиево-никелови. Положителните пластини в желязо-никеловите акумулатори се състоят от набор перфорирани стоманени тръбички, закрепени в стоманени никелирани рамки. Тръбичките са запълнени с активна маса, представляваща смес от хидрат на никеловия окис с парченца никел. Отрицателните пластини се състоят от перфорирани стоманено-никелови клетки, запълнени със смес от раздробено желязо - железни и живачни окиси, закрепени в стоманени никелирани рамки. В качеството на електролит се използва воден разтвор на калиев хидроокис, с добавка на неголямо количество литиев хидроокис. Положителните и отрицателните пластини на основните акумулатори се монтират на две стоманени никелирани пръчки. Към тях се присъединяват стоманени никелирани изводи. За предотвратяване на късите съединения пластините се изолират с ебонит. Пластините на акумулатора, никелирани предварително, се поместват в стоманен съд със стоманен капак. Изолират се от стените на съда с ебонитови изолатори. Капакът на съда има отверстия за изводите на пластините, запълване на акумулатора с електролит, доливане с вода и извеждане на образуващите се газове. Изводите се изолират от капака чрез гумени уплътняващи втулки. Напрежението на основните акумулатори съставлява средно около 1,25 V. За получаване на по-големи напрежения основните акумулатори се събират в батерии.

### **23.2. Зареждане и разреждане на акумулаторите**

Преди въвеждането на новите електрически акумулатори в експлоатация, те следва да бъдат запълнени с електролит, плътността на който зависи от типа на акумулатора и условията за неговото използване. Температурата на наливания електролит не трябва да превишава 25 °C. Всеки елемент следва да бъде зает 10-15 mm над горния край на пластините. От 3 до 12 часа след заливането с електролит акумулаторът се поставя за зареждане. Температурата на електролита в акумулатора преди започването на зареждането не трябва да превишава 25-30 °C. Един от способите за зареждане се явява зарядът при постоянна сила на тока. Първото зареждане на оловно-киселинните акумулатори при въвеждането им в експлоатация се извършва с 0,8 от номиналното значение на тока и продължава до започва-

нето на обилно газоотделяне от всички елементи. Като признак за завършване на зареждането служи установяването на постоянно напрежение на клемите на акумулатора и постоянна плътност на електролита в течение на последните три часа. По време на заряда температурата на акумулаторите се контролира. Ако приближава до  $45^{\circ}\text{C}$ , зарядният ток се намалява двойно или акумулаторите се изключват и оставят да изстинат до  $30^{\circ}\text{C}$ , след което зареждането продължава. Повишаването на температурата на акумулаторите над  $45^{\circ}\text{C}$  е недопустимо, тъй като води до рязко снижаване на срока на службата им. Продължителността на първия заряд възлиза на 25-50 часа, в зависимост от времето на съхранение на акумулаторите до въвеждането им в експлоатация. Като правило, към края на първото зареждане плътността на електролита се оказва различна от нормата, предвидена от инструкцията за дадения тип акумулатор. В такива случаи тя се довежда до номинална стойност чрез доливане на дестилирана вода, ако е по-висока от нея, или на разтвор от сярна киселина със специфично тегло 1,4, ако е по-ниска. Довеждане на плътността до номиналната се извършва обезателно в края на зареждането, когато бурното газообразуване способства размесването на електролита. Последващите зареждания на акумулатора се извършват с постоянен ток с номинална големина. Както и при първото зареждане, край на зареждането се контролира по следния начин: чрез обилното газообразуване и постоянството на напрежението и плътността на електролита в течение на трите последни часа, а също и чрез количеството ампер-часове, придадени на акумулаторната батерия по време на зареждането.

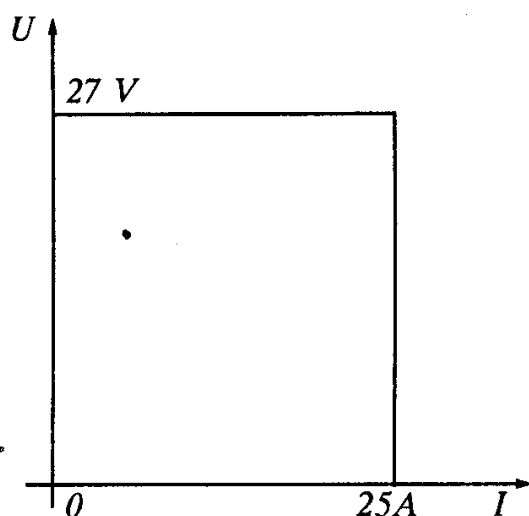
Срокът на служба на оловно-киселинните акумулатори се увеличава, ако в края на зареждането, по време на обилното газообразуване, се снижи силата на зарядния ток. Поради това е целесъобразно зареждането на този тип акумулатори да се провежда на две степени. При основните акумулатори обикновено се прилага едностепенен заряд. Първата степен на зареждането се провежда при номинален ток и трае до началото на силно газообразуване. Втората степен започва при достигане на напрежение 2,35 - 2,4 V на един елемент. Първата степен трае около 8 часа. За това време акумулаторите се зареждат до 90 % от капацитета си, в случай че са били напълно разредени. Втората степен се провежда при 0,5 от номиналния ток и трае 3-7 часа. При нормален заряд акумулаторът трябва да придобие 115 - 120% от капацитета, получен при предшестващия разряд. Презареждането, както и недозареждането, са нежелателни и вредни за оловните акумулатори. Акумулатори, разредени с по-малко от 40 % от капацитета им, следва да се зареждат направо втора степен. Напрежението на оловно-киселинните акумулатори в края на заряда зависи от силата на зарядния ток, температурата на електролита, вътрешното съпротивление, наличието на вредни приме-

си в електролита. Основните акумулатори се зареждат с номинален ток до края на заряда. Те, както и киселинните, не допускат повишаване на температурата над  $45^{\circ}\text{C}$ . Като признак за окончателен заряд на основните акумулатори служи бурното газообразуване, постоянството на напрежението в последните три часа от зареждането и количеството придадени амперчасове. При основните акумулатори, в отличие от оловно-киселинните, плътността на електролита остава постоянна и затова не може да служи като признак за завършване на зареждането. В редица случаи акумулаторните батерии работят в режими, изискващи непрекъснат заряд със слаб ток. Такова зареждане обикновено се провежда с малък ток, близък по величина до вътрешните загуби в акумулаторите и способен да поддържа батерията напълно заредена. Режимът на непрекъснато зареждане се осъществява, обичайно при напрежение на източника на ток на един елемент  $2,1 - 2,2\text{V}$  за оловно-киселинните, и  $1,7 - 2\text{V}$  - за основните акумулатори. Съхранението на оловно-киселинните акумулатори в незаредено състояние съществено снижава техния срок на служба. За разлика от тях, основните акумулатори могат да се съхраняват в незаредено състояние и не се „боят“ от презареждане.

### 23.3. Устройства за зареждане на корабните акумулатори

Най-често използваните корабни зарядни устройства са реализирани чрез понижаващи трансформатори и управляеми изправители, изпълнени като отделно табло.

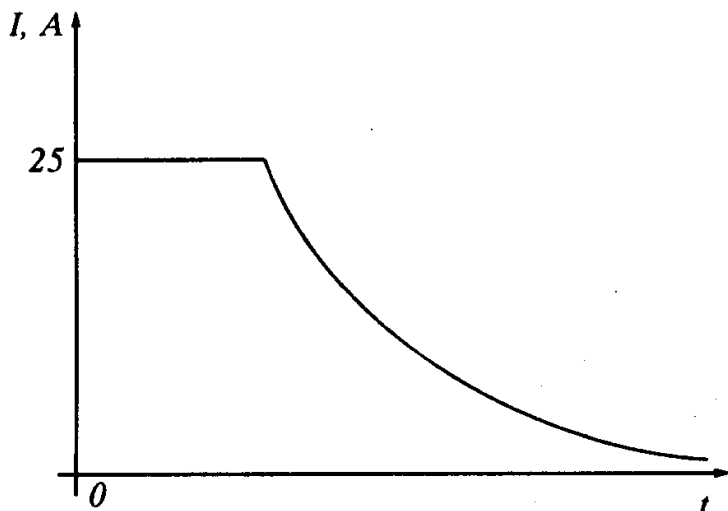
Днес най-разпространени са зарядните устройства, при които управляемият изправител се регулира така, че получаваната външна характеристика на източника има два участъка: участък със стабилизирано напрежение и участък със стабилен ток. Такава характеристика е показана на фиг.



Фиг. 23.3

23.3. Участъкът със стабилно напрежение трябва да бъде с висока степен на стабилност, най-добре с астатична характеристика (т.е., отклонението на напрежението на този участък е 0) при стойност на напрежението, равна на напрежението на акумулатора при края на заряда, и ток на подзаряд, малко по-голям от тока на саморазряд на акумулатора. За повечето оловни акумулатори това напрежение е около  $27\text{ V}$ .

Ако акумулаторът е разреден, напрежението на клемите му е по-ниско от нап-

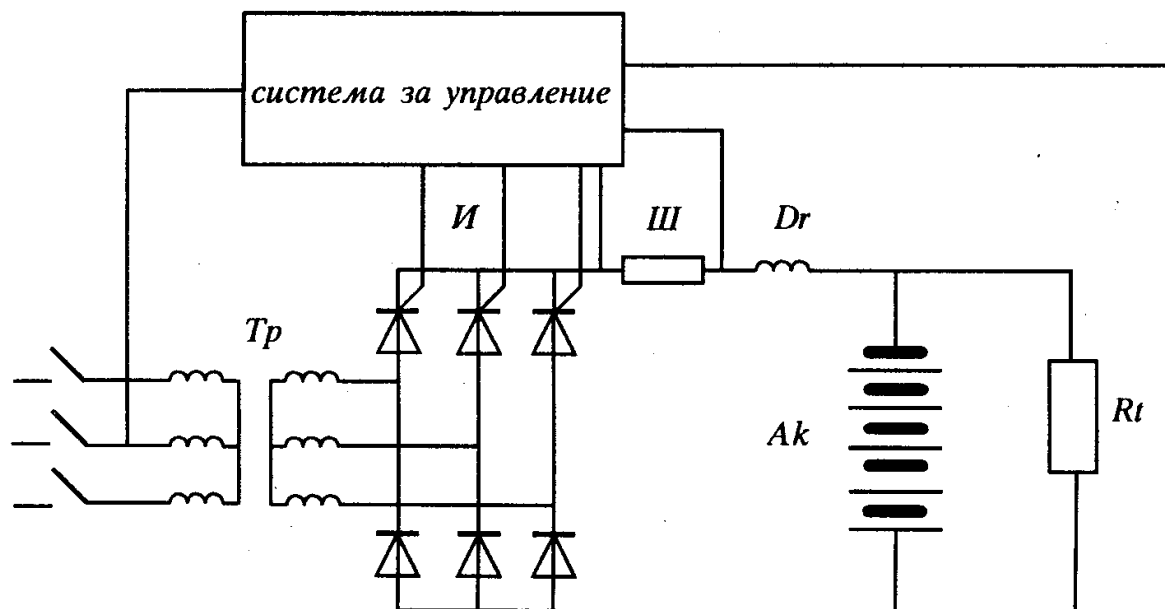


Фиг. 23.4

режението на участъка със стабилно напрежение и акумулаторът се зарежда продължително време с постоянен ток. След достигане на напрежението на акумулатора до напрежението на стабилизация, токът през акумулатора постепенно започва да спада до стойност, която компенсира тока на саморазряд и поддържа акумулатора в заредено състояние. Такъв заряден процес не само е най-благоприятен за акумулатора, но е и най-подходящ за експлоатацията на акумулаторите в корабните уредби (фиг. 23.4).

По-горе бе подчертано, че акумулаторите представляват аварияен резервен източник за най-отговорните консуматори, между които приоритетни са средствата за автоматика. По тази причина в корабите, построени през последните десетилетия, зарядните устройства на акумулаторите изпълняват ролята и на непрекъсваемо захранване на тези средства (източници от типа UPS). Най-простата, но и най-ефективна схема на такъв UPS с едновременно зареждане и поддържане на акумулаторите в готовност, е показана на фиг. 23.5.

По-горе бе подчертано, че акумулаторите представляват аварияен резервен източник за най-отговорните консуматори, между които приоритетни са средствата за автоматика. По тази причина в корабите, построени през последните десетилетия, зарядните устройства на акумулаторите изпълняват ролята и на непрекъсваемо захранване на тези средства (източници от типа UPS). Най-простата, но и най-ефективна схема на такъв UPS с едновременно зареждане и поддържане на акумулаторите в готовност, е показана на фиг. 23.5.



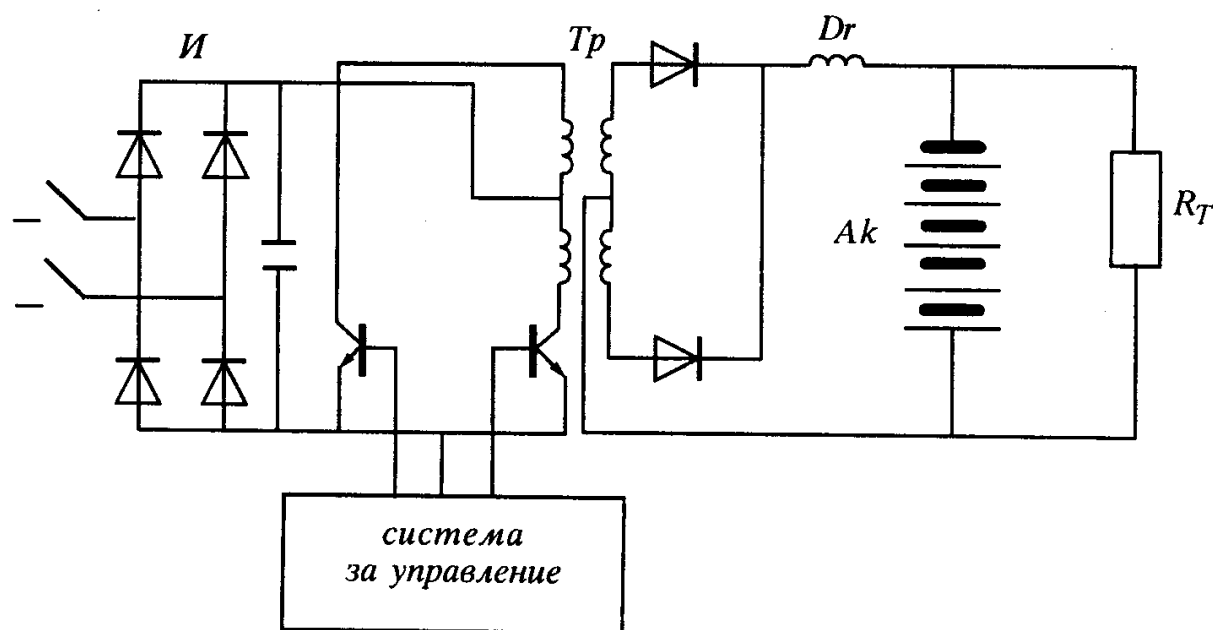
Фиг. 23.5



Схемата представлява заряден източник с характеристика от типа, показан на фиг. 23.3, към който са свързани акумулаторите и средствата за автоматика в паралел. Схемата е известна като захранване на автоматиката с акумулатори в „буфер“. По нея са построени изправителите на фирмите „Siemens“, „Nife“, „Asea“, а също и българските изправители ТЗУ и АКАУ. Тези изправители са на различен номинален ток, за да отговорят на двете разпространени тенденции за построяване на схемите на захранване на средствата за автоматика - захранване от обща акумулаторна батерия, и децентрализирано захранване, при което всяка система за автоматика се захранва от собствена акумулаторна батерия със собствен източник на захранване.

По редица причини от технико-икономически характер днес приоритетно е децентрализираното захранване. Тази схема стана предпочитана след като се появили акумулаторите, които не изискват поддръжка, и капсулованите акумулатори, от една страна и, от друга, малогабаритните зарядни устройства с промеждутъчни преобразуватели на честота. Пример за такова зарядно устройство е показаната на фиг. 23.6 схема на UPS 27/25, монтирано на всички български кораби, строени след 1992 г.

Основна особеност на този тип зарядни устройства е това, че мрежо-

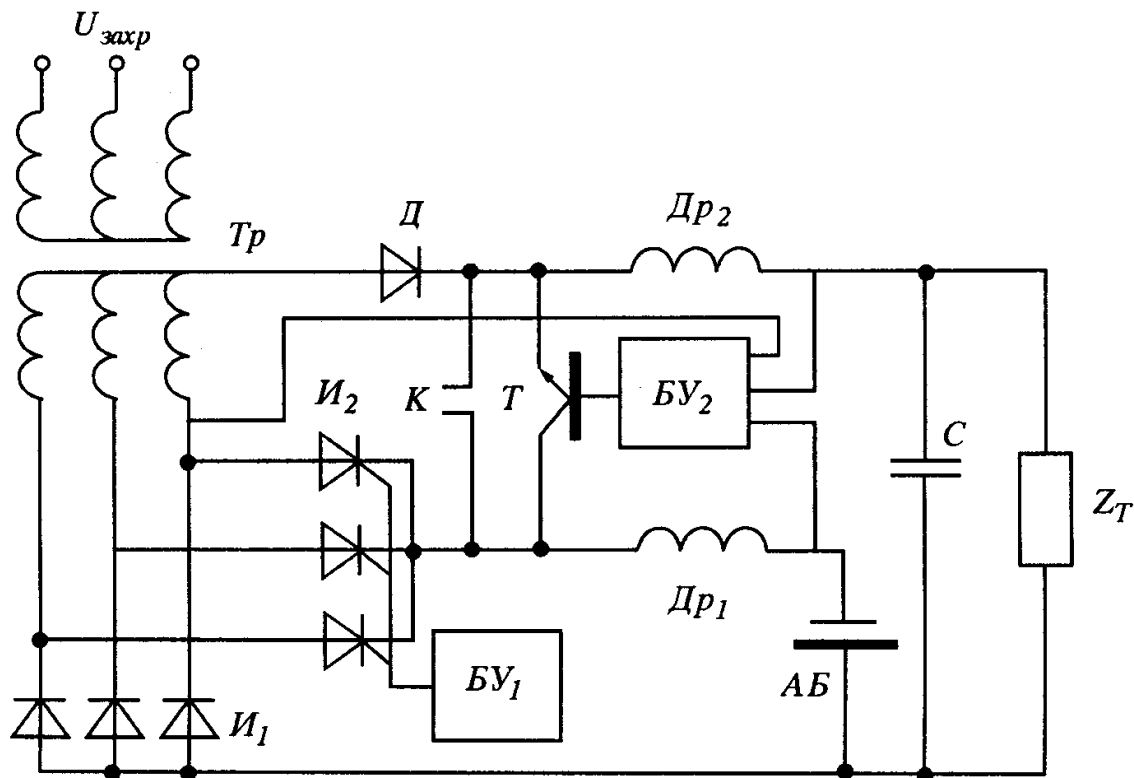


Фиг. 23.6

вото напрежение се изправя, филтрира и с помощта на транзисторен преобразувател със средна точка се преобразува в променливо напрежение с повишена честота (в конкретното устройство около 800 Hz, в аналогични устройства на други фирми - многократно по-висока). Понижава се с трансформатор и се изправя. Получаването на характеристика с участъци на стабилно напрежение и стабилен ток става посредством обратни връзки по ток и по напрежение, регулиращи времето на отпушено състояние на

транзисторите (широчинно-импулсна модулация на преобразуваното напрежение). Благодарение на работата на трансформатора, при висока честота неговите габарити рязко падат.

За съжаление, схемата в „буфер“ не може да се използва при системи на захранване с основни акумулатори. При използване на алкални акумулатори напрежението на зареждане към тях може да надхвърли 30 и повече волта. Такова напрежение е недопустимо за консуматорите за постоянен ток, поради което веригата за зареждане се разделя от веригата за зареждане. Пример за такава схема е показан на фиг. 23.7. Тази схема е използвана в токоизточника ТЗД 60/40, монтиран на много български кораби.



Фиг. 23.7

Схемата се състои от два изправителя, захранвани от общ трансформатор. Единият е полууправляем тиристорен изправител и служи за зареждане на акумулаторите, а другият - неуправляем трифазен със средна точка, захранващ корабните консуматори. При отпадане на захранването от корабната мрежа акумулаторите се свързват безинерционно към консуматорите чрез транзисторен ключ, който впоследствие, след намаляване на напрежението на акумулаторите, се шунтира с контактор.

Тъй като веригата на зареждане на акумулаторите при наличие на напрежение на корабните шини е разделена от тази на консуматорите, е възможно напрежението при заряд да достига стойности значително над 32 V, което и е необходимо за зареждане на алкалните акумулатори.

#### **23.4. Мерки за безопасност при обслужване на акумулаторите**

Експлоатацията на акумулаторните батерии в корабните електрически уредби изисква съблюдаване на определени условия за обслужването им. При изготвяне на електролита на киселинните акумулатори е необходимо сярната киселина да се влива на тънка струйка във водата, като през цялото време разтворът се разбърква със стъклена пръчка. Забранено е категорично вливането на вода в киселината - влятата вода кипи, нагрива се бързо и образува заедно с киселината пръски, от както е възможно да пострада работещият персонал. При обслужването на акумулаторните батерии е допустимо използването на електрически лампи, но не и на открит огън, тъй като той може да предизвика взрив на гърмящ газ, образувал се под капака на акумулаторите. В случаите, когато акумулаторните батерии се разполагат в специални помещения, последните следва да се вентилират добре, за да се предотврати натрупването на гърмящ газ. Разполаганите в тези помещения проводници и прибори трябва да удовлетворяват изискванията за взривобезопасност. Съхраняването и експлоатацията на киселинни и основни акумулатори в едно помещение не се допуска, тъй като парите на киселините разрушават основните акумулатори, а парите на основите - киселинните.

Ремонтът на акумулаторни батерии, при който е необходимо използването на нагревателни прибори (например за запояване) или открит огън, задължително следва да се извършва в отделни, добре вентилируеми помещения.

Съобразно изискванията на Българския корабен регистър, когато акумулаторните батерии са разположени в специални помещения, трябва да са с принудителна вентилация, за да се избегне концентрацията на взривоопасни газове. Вентилацията трябва да се включва автоматично в режим на заряд.

Най-големи проблеми от гледна точка на безопасността при алкалните батерии възникват при приготвянето на електролит за тях. Както и при киселинните акумулатори, при работа с алкалните трябва да се ползват защитни очила, ръкавици и предпазна престилка.

Всички тези сериозни експлоатационни проблеми са наложили в последните години нова тенденция в организацията на резервните акумулаторни хранвания. Нейната същност се състои в снабдяването на всяка автоматична система, изискваща резервно хранване, с автономна батерия и автономно зарядно устройство. Най-често автономните хранвания са на базата на капсуловани батерии по гел-технология, които не изискват доливане на електролит и друго обслужване. Тъй като в този случай батериите са малки по капацитет, не се налага събирането им в отделно помещение. Използването на много зарядни устройства се компенсира икономически от отпадането на дълги хранващи кабели с голямо сечение.

## Двадесет и четвърта глава

### КОРАБНИ ЕЛЕКТРОЗАДВИЖВАНИЯ

#### 24.1. Основи на електрозадвижването

##### 24.1.1. Основни сведения за корабните електрозадвижвания

За задвижване на различни механизми на корабите широко се използват електродвигатели.

*Електрозадвижването представлява електромеханична система, включваща: електродвигател, механична предавка и система за управление на електродвигателя.*

Електрозадвижването е основно звено в системите за механизация и автоматизация на процесите на кораба. Особено значение придобива на съвременните кораби с безвахтено обслужване.

Безопасната и безаварийна експлоатация на кораба изисква основни познания за правилния подбор на режимите на работа на електрозадвижването на механизмите, с които работят вахтените офицери. Особено място е отредено на работата с палубните и товаро-разтоварните съоръжения.

Системата *електрозадвижване - работен механизъм* е съставена от три групи механични звена: ротор на двигателя (Д), предавателен механизъм (ПМ) и подвижна част на работния орган (РО). Състоянието ѝ се определя от съотношението на механичните сили и моменти: двигателни и съпротивителни.

Роторът на двигателя като механично звено се характеризира с ъглова скорост, масов инерционен момент, двигателен (въртящ) момент и механични загуби, които съпровождат въртенето му.

Друга характерна величина е пълната механична мощност на двигателя, която се предава на работния орган. Той може да бъде съставен от един или няколко елемента, които или се въртят с определена ъглова скорост, или се движат постъпателно с определена линейна скорост. Тогава механичната инертност на РО се изразява, съответно, чрез общия масов инерционен момент на всички елементи, движещи се спрямо собствената ос на въртене, или чрез масата на всички тела, които извършват постъпателно движение. Движението на РО е съпроводено с механични загуби.

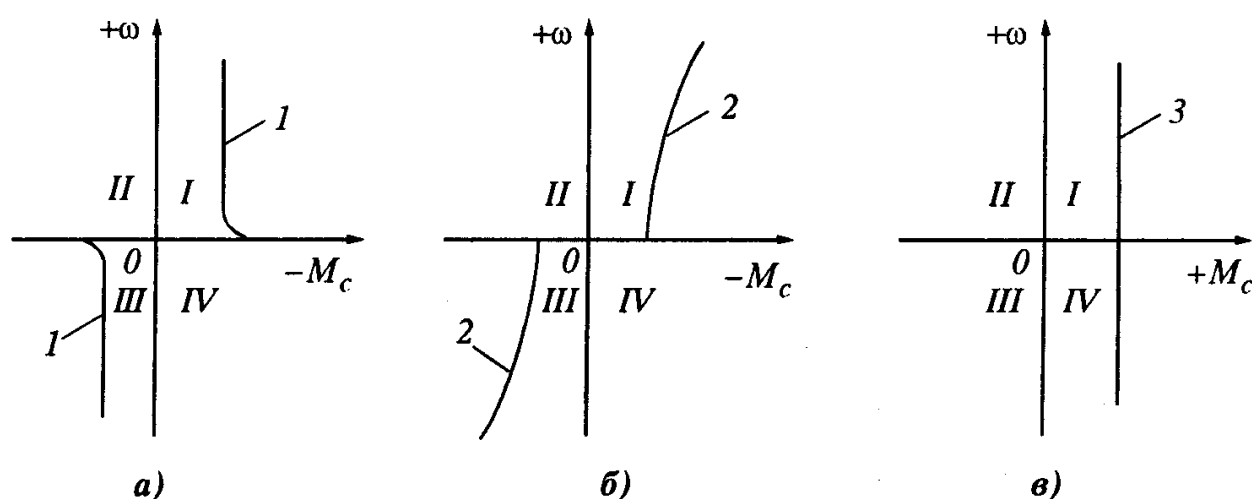
Предавателният механизъм е междинно звено от кинематичната верига на движението. Предаването на момента неизбежно е съпроводено с триене, т.е. с механични загуби. В най-общия случай ПМ се състои от ~~п~~дъл

брой елементи, всеки от които извършва въртливо движение. Ъгловата скорост на който и да е от тях се означава с  $\omega_i$ , а масовият му инерционен момент спрямо собствената ос на въртене - с  $J_i$ . Броят на инерционните моменти, които характеризират предавателния механизъм, е най-малко равен на броя на различните ъгли скорости, които притежават неговите елементи. Твърде показателно за ПМ е общото преводно отношение  $i$ , което се дефинира като отношение на неговата входна ъглова скорост към изходната. Ъгловата скорост на двигателя винаги е входна за ПМ, а при въртливо движение тази на РО е изходна:

$$(24.1) \quad i = \omega_{ex} / \omega_{изх} > 1 \quad \text{или} \quad i = \omega_D / \omega_{РО}$$

Най-често активният момент се създава от електродвигател, а съпротивителният - от работната машина. За величините, характеристиките и съотношенията на моментите на електродвигателите може да се съди от характеристиките им (вж. гл. 15 - фиг. 15.27, фиг. 15.28, фиг. 15.29, фиг. 15.31, фиг. 18.7, фиг. 18.8, фиг. 18.9 и др.). Най-често моментът на РО е съпротивителен. При спускането на товари и в други подобни случаи той е активен и има постоянна стойност. В електрозадвижването е прието моментът на РО да се нарича статичен.

РО се характеризират с голямо разнообразие, но съществува възможност да бъдат типизирани в зависимост от вида на механичните им характеристики. В най-общ случай могат да бъдат разделени в три групи, чиито характеристики са представени на фиг. 24.1: на корабите най-често се използват РО с вентилаторна характеристика (фиг. 24.1б) - такива са всички центробежни помпи, вентилатори, гребни винтове и др. Всички товаро-



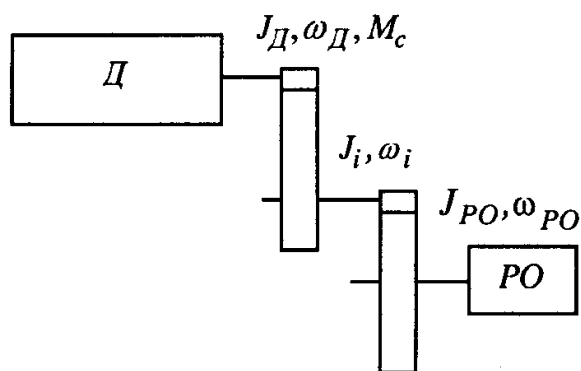
Фиг. 24.1. Механични характеристики на работни машини: а)  $M_c$  зависи само от посоката на движение; б)  $M_c$  зависи от посоката и скоростта на движението; в)  $M_c$  не зависи от посоката и скоростта на движението

разтоварни и котвени устройства, могат да бъдат причислени към РО с потенциален статичен момент (фиг. 24.1в). От характеристиката се вижда, че моментът остава с постоянна величина и неизменна посока, независимо от посоката на движение и величината на скоростта. Например потенциалната енергия на товара създава момент, зависещ от масата на повдигнатото тяло. Третият тип РО (фиг. 24.1а) създават съпротивителен момент, насочен винаги срещу посоката на движението - типичен пример са транспортната лента и загубите от триенето в лагерите и предавките.

Свързването на подвижните части на електродвигателя и РО е най-често директно - чрез механичен съединител. Тогава скоростите на Д и РО са еднакви. В немалко случаи Д и РО са свързани чрез ПМ и РО се движи със скорост, различна от скоростта на Д.

На фиг. 24.2 е показана примерна механична система Д - ПМ - РО. Общите загуби от триене в трите механични звена се означават с  $\Delta P(W)$ . Те са мощността, с която се преодоляват загубите от триене в цялата механична система. Тази мощност винаги действа против съществуващото движение, затова се нарича съпротивителна и е винаги за сметка на източника на механична енергия - най-често двигателя. В този случай потокът на мощността е право насочен, т.е. от Д към РО - например при вдигане на тежест или движение по наклон нагоре. Тогава РО е консуматор и двигателят покрива и двете мощности:

$$(24.2) \quad P_D = \Delta P + P_{PO} .$$



Фиг. 24.2. Кинематична схема на реална система

Обратно насочен поток на механичната мощност се наблюдава при спускане на тежест, движение по наклон надолу и някои други малки изключения. Тогава източник на механична енергия е РО, а двигателят е консуматор:

$$(24.3) \quad P_{PO} = \Delta P + P_D .$$

С  $M_{PO}$ ,  $F_{PO}$  и  $P_{PO}$  се означават въртящият момент, силата и мощността на работния орган. Тези величини

се наричат *статични*, защото, ако работният орган бъде задвижван с постоянна скорост ( $\omega_{PO}$  или  $v_{PO}$ ) може да поддържа неограничено дълго време неизменна тяхната стойност. При право насочен поток те се наричат *съпротивителни*, тъй като, извършвайки полезна работа, действат противно

на съществуващото движение. От казаното е ясно, че в механичната система съществуват две мощности с един и същ характер. Тяхната сума се нарича общо *статична съпротивителна мощност*:  $P_c, W$ .

### 24.1.2. Динамика на електрозадвижванията

Поведението на електромеханичната система *електрозадвижване - работен орган* се определя от съотношението на механичните усилия, действащи върху нея. Затова се описва със законите на механиката.

#### 24.1.2.1. Уравнение на движението на механична система

Законът, по който се осъществява движението на елементарна механична система, се описва с уравнението за равновесие на силите/моментите, които действат върху нея.

Третият закон на Нютон, приложен при реални условия, изразява равновесието на силите, действащи върху постъпателно движещото се тяло, а именно:

$$(24.4) \quad F_D - F_c = m \cdot \frac{dv}{dt}, \quad N$$

Аналогично на това равенство може да се запише уравнението за равновесие на моментите за елементарна механична система:

$$(24.5) \quad M - M_c = J \cdot \frac{d\omega}{dt}, \quad N.m,$$

където  $M$  е въртящият момент на електродвигателя;

$M_c$  - статичният момент на приведената към оста на електродвигателя система;

$J$  - приведеният инерционен момент на системата.

Дясната част на (24.5) представлява разлика от два момента:  $M$  и  $M_c$ .

Затова и изразът  $J \cdot \frac{d\omega}{dt}$  е също момент, наричан динамичен:

$$(24.6) \quad M_{дин} = J \cdot \frac{d\omega}{dt}$$

Анализът на (24.5) показва, че големината и знакът на ъгловото ускорение  $d\omega/dt$  във всеки момент се определят от  $M_{дин}$ . Следователно, характерът на движението се определя от  $M_{дин}$ , както следва:

1. Ако  $M_{дин} = 0$ , то  $\frac{d\omega}{dt} = 0$ , което означава, че системата се движи равно-

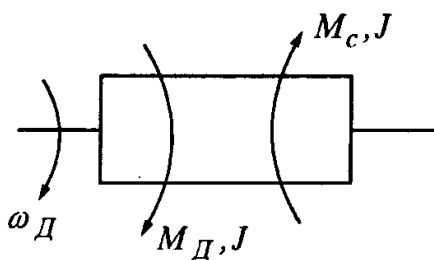
мерно с  $\omega = const \neq 0$  или поддържа трайно състояние на покой ( $\omega = 0 = const$ ). Този режим на работа на електрозадвижването се нарича *установен*.

2. Ако  $M_{дин} \neq 0$ , то  $\frac{d\omega}{dt} \neq 0$ . Това означава, че системата се движи ускорително или замеднително, т.е. с непрекъснато изменяща се скорост. Този режим на работа на двигателя се нарича *неустановен* или *преходен*.

### 24.1.2.2. Привеждане на механичната система Д - ПМ - РО

Всяка механична система може да бъде представена като елементарна, което дава възможност сложни механични системи да се разглеждат, описват и анализират много по-лесно.

С допустима за практиката точност може да се приеме, че звената на механичната система Д - ПМ - РО са съставени от идеално твърди тела, между които не съществуват хлабини. При такава постановка движението на работния орган съответства на движението, което извършва задвижващият го двигател, независимо от големия брой на елементите в кинематичната верига. Затова всяка реална механична система може да бъде представена като едно въртящо се идеално твърдо тяло, което извършва обща работа със същата мощност  $P_c$  и притежава кинетична енергия, равна, във всеки момент, на общата енергия на реалната система.



Фиг. 24.3. Кинематична схема наведена система

Приема се, че то се върти с ъглова скорост, равна на ъгловата скорост на двигателя, и се нарича *приведена механична система* (фиг. 24.3). В тази система действат два момента: двигателен момент,  $M_D$  и съпротивителен, който представлява приведен към вала на двигателя статичен момент,  $M_c$ :

$$(24.7) \quad M_c = \frac{P_c}{\omega_D}$$

Приведената механична система притежава масов инерционен момент, който представлява сума от приведените към вала на двигателя инерционни моменти на движещите се части на работния орган.

За една реална механична система може да се каже, че е заместена с приведена, ако са известни числените стойности на величините  $\omega_D$ ,  $M_D$ ,  $M_c$  и  $J$ .



Приведеният статичен момент  $M_c$  при въртящ се РО се определя с помощта на формулата

$$(24.8) \quad M_c \cdot \omega_D = M_{PO} \cdot \omega_{PO} \cdot \frac{1}{\eta_{np}} \quad ,$$

където  $\eta_{np}$  е к.п.д. на механичната предавка.

След като се разделят лявата и дясната част на равенството на  $\omega_D$  и се положи  $\omega_D / \omega_{PO} = i$ , се получава:

$$(24.9) \quad M_c = M_{PO} \cdot \frac{1}{\eta \cdot i} \quad .$$

Приведеният статичен момент  $M_c$  при постъпателно движение на РО със скорост  $v_{PO}$  се определя с израза

$$(24.10) \quad M_c = \frac{F_{PO} \cdot v_{PO}}{\omega_D} \cdot \frac{1}{\eta_{np}} \quad .$$

Приведеният инерционен момент  $J$  се определя от условието за равенство на кинетичните енергии на приведената и на реалната системи. Кинетичната енергия на тяло с въртливо движение се изразява чрез формулата

$$E_{кин} = J \cdot \frac{\omega^2}{2}, \text{ а на тяло с постъпателно движение - чрез } E_{кин} = m \cdot \frac{v^2}{2}.$$

Тогава кинетичната енергия на приведената система се определя от израза

$$(24.11) \quad E_{кин} = J \cdot \frac{\omega_D^2}{2} \quad .$$

Кинетичната енергия на реалната система е сума от кинетичните енергии на всички движещи се нейни съставни елементи. При въртливо движение на РО тя се изразява, както следва:

$$(24.12) \quad E_{кин} = J_D \cdot \frac{\omega_D^2}{2} + \sum_{k=1}^n J_k \cdot \frac{\omega_k^2}{2} + J_{PO} \cdot \frac{\omega_{PO}^2}{2} \quad ,$$

а при постъпателно:

$$(24.13) \quad E_{кин} = J_D \cdot \frac{\omega_D^2}{2} + \sum_{l=1}^n J_k \cdot \frac{\omega_k^2}{2} + m_{PO} \cdot \frac{v_{PO}^2}{2} \quad ,$$

Приведеният инерционен момент  $J$  при въртящ се РО се определя от

$$(24.14) \quad J = J_D + \sum_{\kappa=1}^n J_{\kappa} \cdot \frac{\omega_{\kappa}^2}{\omega_D^2} + J_{PO} \cdot \frac{\omega_{PO}^2}{\omega_D^2} ,$$

откъдето след заместване на  $\omega_D/\omega_{\kappa} = i_{\kappa}$  окончателно се получава

$$(24.15) \quad J = J_D + \sum_{\kappa=1}^n J_{\kappa} \cdot \frac{1}{i_{\kappa}^2} + J_{PO} \cdot \frac{1}{i^2} .$$

Изразът може да се опрости, като влиянието на ПМ се отчете чрез коефициента  $\delta$ , стойността на който обикновено варира от 1,1 до 1,3:

$$(24.16) \quad J = \delta \cdot J_D + J_{PO} \cdot \frac{1}{i^2} .$$

Приведеният инерционен момент при постъпателно движение на РО се определя от

$$(24.17) \quad J = J_D + \sum_{\kappa=1}^n J_{\kappa} \cdot \frac{1}{i_{\kappa}^2} + m_{PO} \cdot \frac{v_{PO}^2}{\omega_{PO}^2} .$$

След въвеждане на коефициент  $\delta$  се получава

$$(24.18) \quad J = \delta \cdot J_D + m_{PO} \cdot \frac{v_{PO}^2}{\omega_{PO}^2} .$$

Често в каталозите на двигателите се дават данни не за инерционния момент,  $J_D$ , а за т.нар. махов момент на ротора,  $GD^2$ , който представлява произведението на теглото на ротора и диаметъра на квадрат. За да се получи  $J_D$  в система SI

$$(24.19) \quad J_D = \frac{GD^2}{4g} , \text{ kgm}^2 ,$$

където  $g, m/s^2$  е земното ускорение.

Изразите дават възможност да бъдат определени приведените величини  $M_c$  и  $J$ , и с това успешно да се замести и най-сложната реална система с друга проста, приведена система.

### 24.1.3. Съвместна работа на електродвигател и работен орган

Скоростта на движение на системата електродвигател - работна машина е функция на всички въздействия, непосредствено приложени върху нея. От тях управляващи са величините на двигателя ( $M$ ), определени от хранящия източник ( $U, f$  и др.) и параметрите на неговите вериги ( $R$  и  $X$ ), включително и начинът на свързването им ( $Y, \Delta, YY$ , и др.). Основно смущаващо въздействие/съпротивление е товарът  $M_c$ .

Зависимостта  $\omega = f(M)$  се нарича *механична характеристика* и може да бъде изразена графично, таблично или аналитично. В електрозадвижването обикновено се използва нейното графично изображение. Механичната характеристика на всеки двигател е непрекъснатата линия, която един единствен път пресича както ординатната, така и абсцисната ос. Всяка точка от нея съответства на един възможен установен режим. Формата ѝ е специфична за различните видове двигатели.

На фиг. 15.27, фиг. 15.28, фиг. 15.29 и фиг. 15.31 (вж. гл. 15) са показани механични характеристики на двигатели за постоянен ток, а на фиг. 18.7, фиг. 18.8, фиг. 18.9 (вж. гл. 18) - на двигатели за променлив ток. Ясно е, че почти всички двигатели при увеличаване на товара намаляват скоростта си, но в различна степен.

Показател за степента на това намаляване е твърдостта на механичната характеристика,  $\beta$ :

$$(24.20) \quad \beta = \frac{dM}{d\omega} .$$

Механичните характеристики на електродвигателите съществено се различават по своята твърдост. Дори за различни участъци от една и съща характеристика, стойността на  $\beta$  може да бъде различна. Прието е *твърда*

механична характеристика да се нарича тази, за която  $\beta = \frac{\Delta\omega}{\omega_0} \cdot 100\% < 10\%$ ,

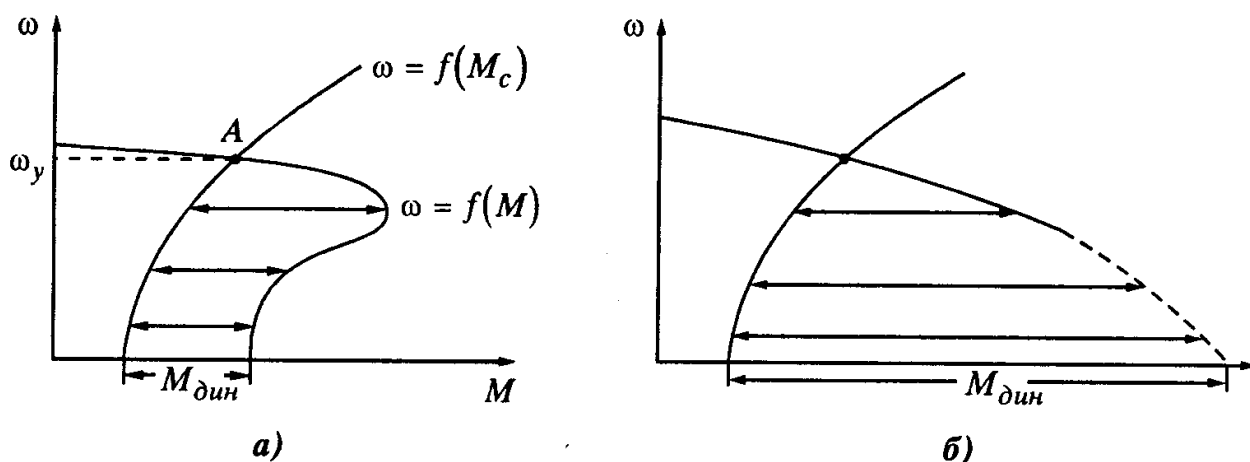
а *мека* - когато  $\frac{\Delta\omega}{\omega_0} \cdot 100\% > 10\%$ .

Реципрочната стойност на твърдостта се нарича *наклон на механичната характеристика*.

Механичната характеристика на работната машина:  $M_c = f(\omega)$ , отчита големината и посоката на приведения статичен момент  $M_c$ , който се създава във въртящата се със скорост  $\omega_c$  механична система при реализиране

на определена работа. В зависимостта  $\omega$  е аргумент, защото е невъзможно реализиране на работа без движение.

Механичната характеристика на работната машина  $M_c = f(\omega)$  най-често се изобразява графично. Тя представлява линия, която понякога е прекъснатата. Условно е прието да се нанася в координатна система  $M_c - \omega$ , на която началото съвпада с това на координатната система на електродвигателя  $M - \omega$ , а положителното направление на абсцисната ос  $M_c$  съвпада с отрицателното на  $M$ . Така разположени двете координатни системи се явяват най-удобни за графично изобразяване на съвместната работа на Д - РО. Формата на  $M_c = f(\omega)$  е специфична за различните производствени механизми (фиг. 24.1).



Фиг. 24.4. Установен режим на работа на механична система

Поведението на задвижваната система се описва с уравнение (24.5). От неговия анализ се вижда, че при едни и същи масо-инерционни характеристики на системата времето за преходните процеси ще зависи обратно-пропорционално на динамичния момент - на разликата между двигателния и статичния момент. Същият анализ може да бъде направен с помощта на графичните механични характеристики на двигателя и работния орган. На фиг. 24.4а са представени механичните характеристики на асинхронен двигател и задвижвания от него вентилатор. Тъй като пусковият момент на асинхронния двигател е малък, времето за пускане на такава система е значително - достига и понякога надвишава една минута. Ако двигателят е за постоянен ток и със значително по-голям пусков момент (фиг. 24.4б), времето за завършване на пусковия процес е много по-кратко.

Установеният режим за работа на системата се определя от пресечната точка на двете механични характеристики.

От съществено значение за нормалната работа на котвените електрозадвижвания е оценката на обстановката - например при обирание на котвената верига. Понякога статичният момент на котвеното устройство нарас-

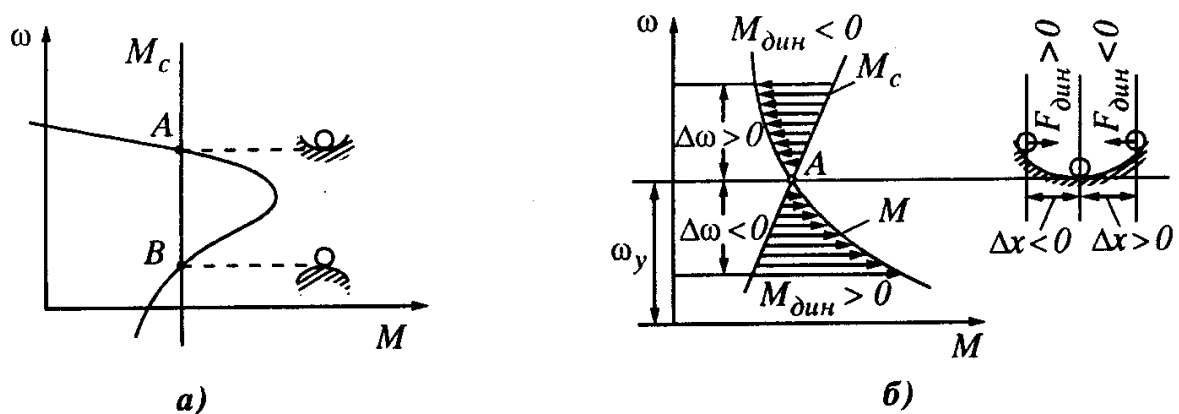
тва толкова, че електродвигателят спира, макар че е абсолютно изправен. В такива случаи е необходимо да се изпълнят мероприятия за намаляване на статичния момент: например най-малък ход на главния двигател за намаляване налягане на котвената верига.

#### 24.1.4. Установен режим на работа на електрозадвижването. Критерий за статична устойчивост

Механичните характеристики  $\omega = f(M)$  и  $M_c = f(\omega)$  определят поведението на приведената механична система. Ако съгласно приетите условия се нанесат в обща координатна система, те ще се пресекат в една точка (рядко в повече) - т. А, фиг. 24.5. Тя съответства на единствения режим, за който  $M$  и  $M_c$  са еднакви по големина и различни по посока при една и съща скорост. За нея  $M_{дин} = 0$ . При посочените на фиг. 24.5 две характеристики, т. А отговаря на единствения възможен установен режим на приведената механична система, защото е общ за двигателя и работната машина. Всички величини, които са свързани с този режим, са неизменни и се наричат *установени* ( $\omega_y, M_y$  и т.н.) За опростяване, абсцисната ос се означава с  $M$ , независимо че върху нея се нанася и  $M_c$ .

Ако непредвидена причина (например нежелано моментно изменение на товара) изведе за момент системата от установения режим, в който работи, и след това тя е в състояние да се върне към него, работата на системата в този режим е устойчива, и обратно. Неустойчивата работа на една система е практически невъзможна. Устойчивостта на системата се осигурява чрез подходящ подбор на формата на механичните характеристики на двигателя и на работния механизъм. Тази устойчивост е статична.

Ако в момент, когато дадена система работи в т. А (фиг. 24.5а или фиг. 24.5б), скоростта се увеличи ( $+\Delta\omega$ ), веднага ще се появи динамичен момент с посока, противоположна на съществуващото движение ( $-M_{дин}$ ).



Фиг. 24.5

Съгласно уравнение (24.5) той ще причини намаляване на скоростта до възстановяване на режима от т. А. Ако първоначално скоростта е намаляла ( $-\Delta\omega$ ), съгласно посочените фигури се появява  $+M_{дин}$ . Той ще ускори движението и работата в т. А пак ще се възстанови.

Следователно, установеният режим в т. А е устойчив, а неравенството

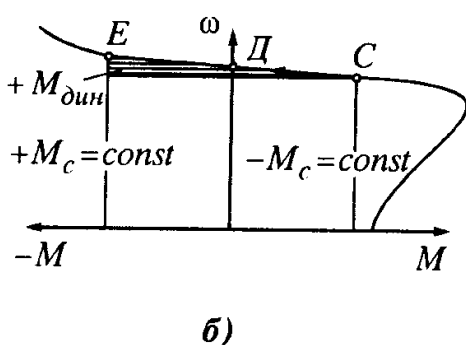
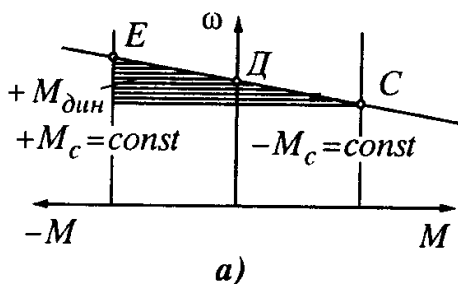
$$(24.21) \quad \frac{M_{дин}}{\Delta\omega} < 0$$

е критерий за статична устойчивост на приведената система.

Работата в т. В от фиг. 24.5а, съгласно (24.5), е неустойчива. Моментното нарастване на  $\omega (+\Delta\omega)$  е съпроводено с поява на  $+M_{дин}$ , който ще ускорява още повече системата. Това означава, че системата ще премине на работа в т. А. Моментното намаляване на скоростта ( $-\Delta\omega$ ) ще накара системата да спре, защото появилият се ( $-M_{дин}$ ) ще забави системата до спиране.

### 24.1.5. Режимы на работа на двигателите

Възможните режими на работа за всеки двигател са два: *двигателен* и *електрическо спиране*. Двигателят може да осъществи електрическо спиране по три различни начина: генераторно спиране, динамично спиране и



спиране чрез противовключване. Оценката на който и да е режим на работа на двигателя става много бързо с използване на механичните характеристики, ако се съпоставят големината и посоката на скоростта, с която се движи роторът на двигателя (ведената механична система) с големината и посоката на скоростта  $\omega_0$ , с която той би се движил, ако  $M_c = 0$ .

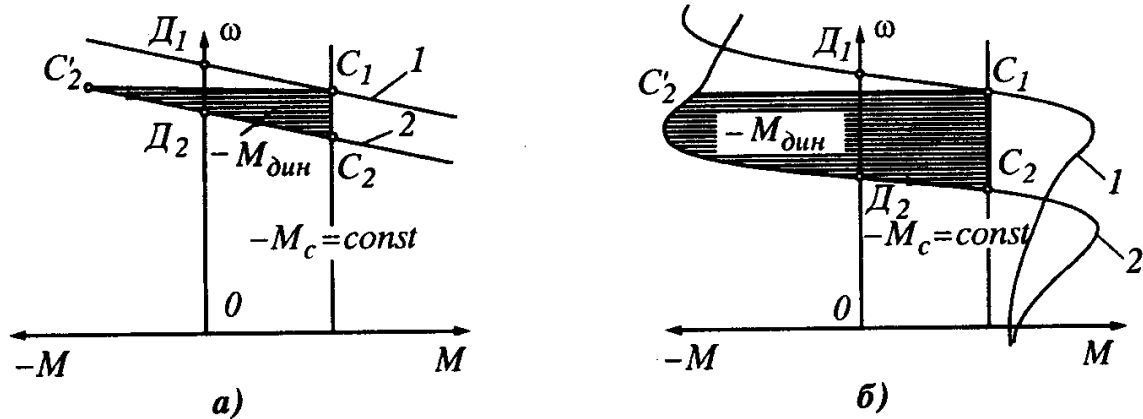
*Двигателен* е всеки режим на работа на електрическата машина, при който роторът ѝ се върти в същата посока на  $\omega_0$ , но с по-малка скорост ( $|\omega| < |\omega_0|$ ).

*Граница между двигателния и генераторния режим* е идеалният празен ход. Тъй като при него  $\omega = \omega_0$ , за двигателя за постоянен ток  $E = U$  и затова  $I_a$  и  $M$  са нула, а за асинхронния  $s = 0$ ,  $E_{2s} = 0$ ,  $I_2 = 0$  и затова  $M = 0$ .

Фиг. 24.6. Генераторно спиране без смяна на механичната характеристика: а) на двигател за постоянен ток с независимо възбуждане; б) на асинхронен двигател

Двигателят може да премине от двигателен режим в режим на генераторно спиране по два начина:

- когато някаква промяна ускори ротора му до  $\omega > \omega_0$  (фиг. 24.6);
- когато чрез подходяща промяна на управляващото въздействие (преминаване на друга механична характеристика) се причини такова намаляване на  $\omega_0$ , че тя да се окаже по-ниска от  $\omega$ , с която роторът се движи в този момент (фиг. 24.7).



Фиг. 24.7. Генераторно спиране с промяна на механичната характеристика:  
 а) на двигател за постоянен ток с независимо възбуждане;  
 б) на асинхронен двигател

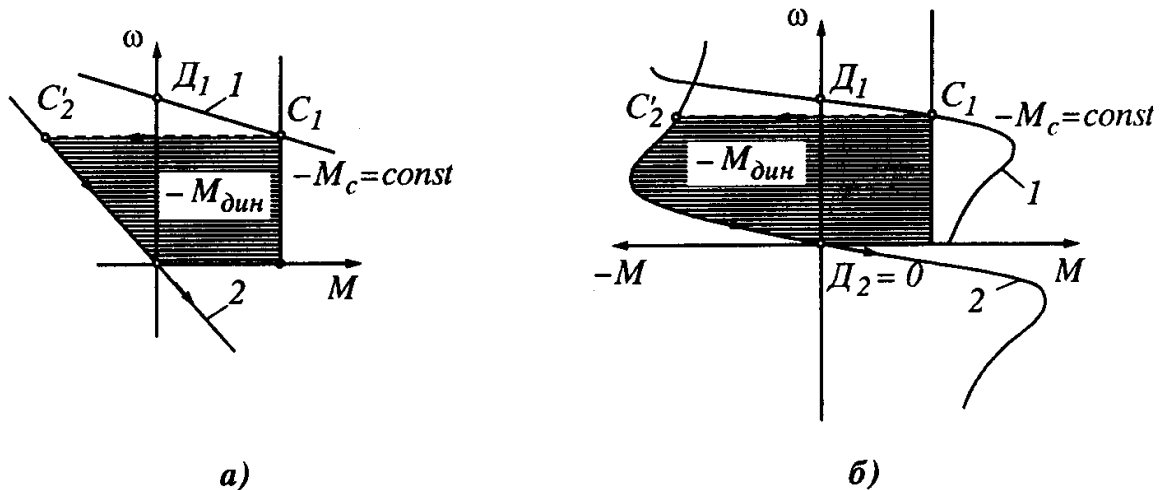
Генераторното спиране никога не довежда механичната система до състояние на покой, а само ограничава скоростта на въртене на ротора на двигателя/приведената механична система.

Динамично спиране е всеки режим на работа на двигателя, при който след превключване на електрическата схема роторът му спира, т.е.  $\omega_0 = 0$ . На този режим съответства минаващата през координатното начало механична характеристика. Динамичното спиране е режим, специално предназначен за превръщане на нормална схема на включване в изкуствена (фиг. 24.8).

За двигател за постоянен ток такъв режим се получава, като котвата на двигателя се изключи от захранващата мрежа и се включи към товарно съпротивление ( $\omega_0 = 0$ , защото  $U = 0$ ) - фиг. 24.8а. Възбудителната намотка остава включена към захранващото я напрежение. Котвеният ток се прокарва от е.д.н.  $E$  на двигателя. Ето защо посоката му е обратна на посоката в двигателен режим. Това води до промяна в посоката на електромагнитния момент, който действа обратно на съществуващото движение, поддържано от инерцията на масата или силите на тежестта.

Режимът на динамично спиране за асинхронния двигател се получава

като статорната намотка се изключи от захранващата мрежа и се включи към източник за постоянен ток. С това в статора вместо въртящо се магнитно поле се създава неподвижно магнитно поле, т.е.  $\omega_0 = 0$ . В него по инерция или от силите на тежестта се върти роторната намотка (фиг. 24.8б). Така, съгласно закона на Ленц, се създават условия за поява на електромагнитен момент с посока, обратна на съществуващото движение.



Фиг. 24.8. Динамично спиране при реактивен момент: а) на двигател за постоянен ток с независимо възбуждане; б) на асинхронен двигател

Всяка електрическа машина в режим на динамично спиране работи като генератор, чиято електрическа енергия се превръща в топлина. Тъй като е.д.н. намалява при малки скорости, намалява и спирацията момент, а роторът на двигателя не спира. Скоростта е близка, но не е равна на 0.

Спиране чрез противовключване е всеки режим на работа на двигателя, при който роторът му се върти в посока, противоположна на електромагнитния въртящ момент, противоположна на посоката, с която би се въртял, ако  $M_c = 0$ , т.е.  $\omega$  и  $\omega_0$  са с противоположни посоки.

За двигателя за постоянен ток противоположните посоки на  $\omega$  и  $\omega_0$  означават, че  $E$  и  $U$  имат еднакъв знак, който определя посоката на котвения ток  $I_a$ . Така например

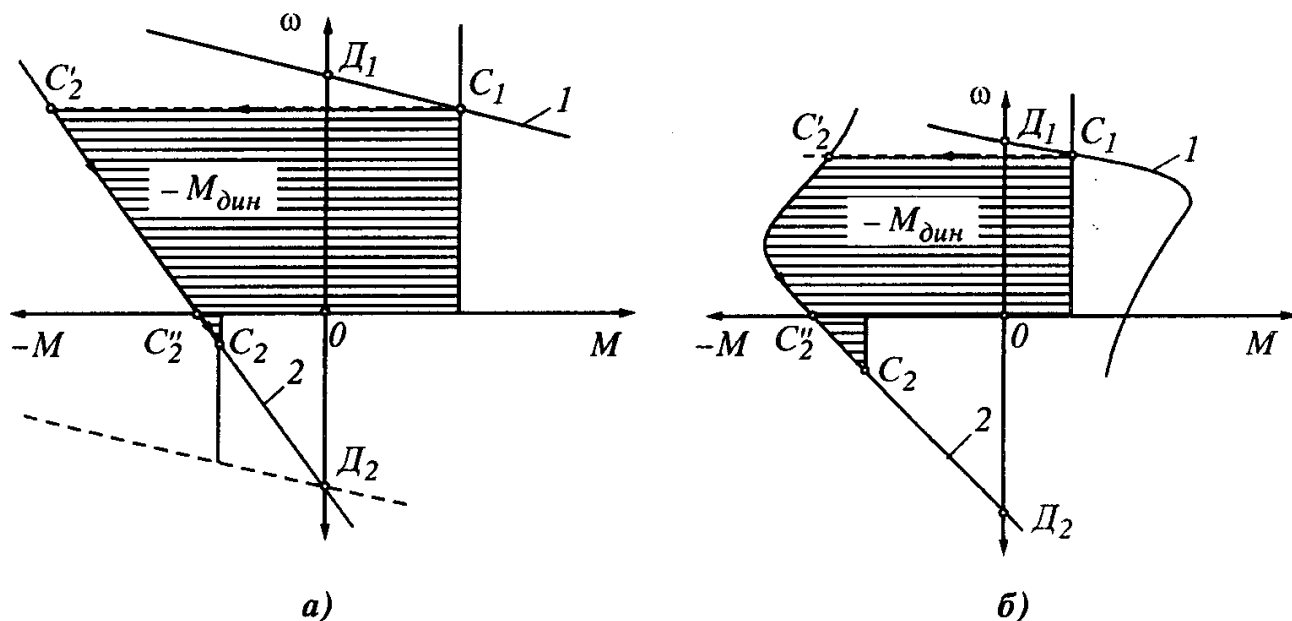
$$(24.22) \quad I_a = \frac{-U - E}{R_{np} + R_a}$$

Режимът на противовключване създава предпоставка за протичане на най-голям ток в сравнение с всички останали режими. Ето защо в този режим е задължително да се включи допълнителен резистор в котвената



верига  $R_{np}$ , който да сведе тока до допустимия  $I_{a,max}$ . Резисторът  $R_{np}$  трябва да има съпротивление, почти равно на  $R_a$  в първия момент на пускане.

При преминаване от двигателен режим (т.  $C_1$ ) в режим на противовключване (т.  $C_2$ ) котвеният ток на машината сменя посоката си - фиг. 24.9а.



Фиг. 24.9. Спиране чрез противовключване: а) при смяна на поляритета на котвата на двигател за постоянен ток с независимо възбуждане; б) при смяна на посоката на въртящото се магнитно поле на асинхронен двигател

За асинхронния двигател противоположни  $\omega$  и  $\omega_0$  означават, че роторът и въртящото се магнитно поле се движат в противоположни посоки, т.е.  $s > 1$ . Режимът на противовключване може да настъпи след смяна на посоката на въртящото магнитно поле, докато движението продължава по инерция в старата посока, или след промяна на посоката на движението при неизменно въртящо магнитно поле (фиг. 24.9б).

Електродвигател, който работи в режим на противовключване, консумира електрическа енергия от мрежата, както и от тази, която се създава под действието на силите на инерцията или силите на тежестта.

#### 24.1.6. Регулиране на скоростта на въртене на електродвигателите

Често се налага да се измени скоростта на РО на производствената машина, независимо дали моментът  $M_c$  се е променил или не. Целесъобразното изменение на скоростта на електрозадвижването в зависимост от изискванията на технологичния процес се нарича *регулиране на скоростта* и има за цел постигането на рационален режим на работа на производствената машина или изменението на нейната производителност. Движението на един телфер с пълзяща скорост например е необходимо за постигането на

по-голяма точност при фиксирането на крайно положение на товара. Ако той работеше само с тази скорост, производителността му щеше да бъде твърде малка. Затова е предвидена още една, по-голяма скорост.

По принцип, съществуват два начина за регулиране на скоростта на РО: *чрез изменение на предавателното отношение  $i$  на предавателния механизъм или чрез регулиране на скоростта на двигателя*. Вторият начин е за предпочитане, защото предполага по-малък обем на производствената машина и възможност за безстепенно регулиране. (Възможностите за регулиране на скоростта на електродвигателите са разгледани в гл. 15 и гл. 18.)

**Основните качествени показатели**, по които се оценяват различните начини за регулиране на скоростта на електродвигателя, са:

1. **Диапазон на регулирането**,  $D$  - представлява отношението на максималната към минималната установена скорост, с която двигателят с товар  $M_c = M_{c,зад}$  може да работи при регулирането:

$$(24.23) \quad D = \frac{\omega_{max}}{\omega_{min}} .$$

Например, ако  $\omega_{max} = 100 \text{ rad/s}$ , а  $\omega_{min} = 20 \text{ rad/s}$ , то  $D = 5:1$ .

Регулирането е толкова по-качествено, колкото по-голямо е отношението  $D$ , т.е. колкото по-голяма е  $\omega_{max}$ , а  $\omega_{min}$  - по-малка. Естествената механична характеристика на двигателя разделя диапазона на две зони: до основна скорост и над нея.

Видът на производствената характеристика на работната машина оказва съществено влияние върху  $D$ . Ако върху семейство от механични характеристики на двигателя, получени при различни състояния на едно от управляващите въздействия, се нанесе производствената характеристика на работната машина (РМ), ще се установи годността на двигателя да работи по този начин. От фиг. 24.10 се вижда, че двускоростен асинхронен двигател с превключване на броя на полюсите по схема  $\lambda \lambda / \lambda$  реализира успешно производствена характеристика  $M_c = const$ , а при превключване на намотките по схема  $\lambda \lambda / \Delta$  - характеристика  $P_c = const$ .

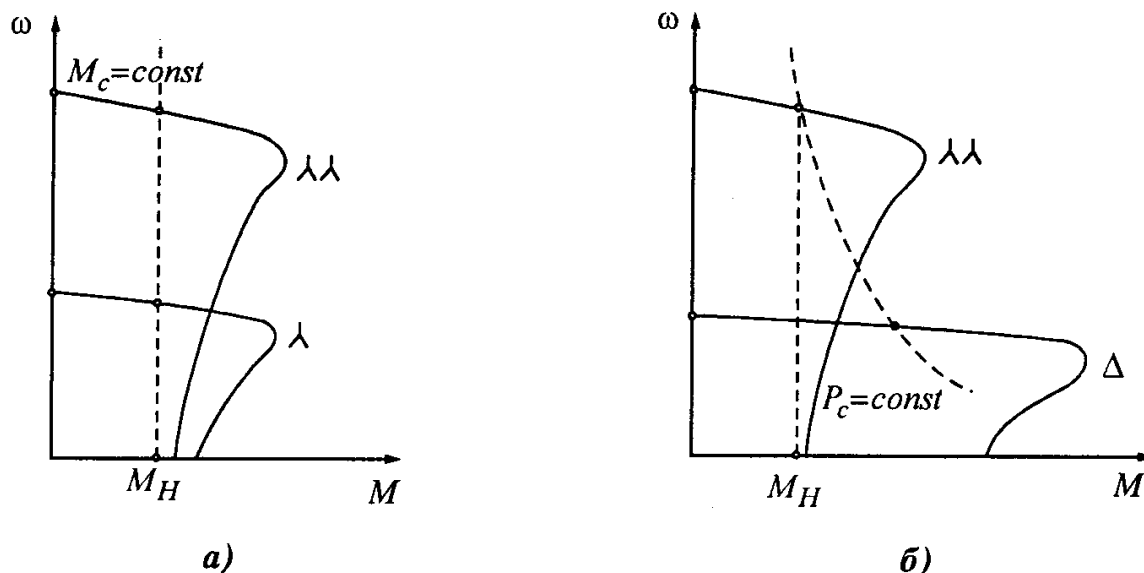
2. **Плавност на регулирането**,  $\phi$  е отношението на коя да е ъглова скорост към съседната на нея, но по-малка. Двете скорости се реализират при промяна в състоянието на едно от управляващите въздействия при работа на двигателя в установен режим със зададен товар  $M_{c,зад}$ :

$$(24.24) \quad \phi = \frac{\omega_i}{\omega_{i-1}} \geq 1 .$$

37 3467

За двускоростен асинхронен двигател, например,  $\phi = 2$ .

Всяко състояние на управляващото въздействие определя една степен на регулиране. За целия диапазон на регулиране  $\omega = const$ . Колкото плавноста е по-близка до 1, толкова относителният скок на скоростта при преминаване от една към друга степен е по-малък, т.е. регулирането е по-плавно, по-качествено. Когато  $\omega = 1$ , регулирането е безстепенно.



Фиг. 24.10. Двускоростен асинхронен двигател със схема за превключване на броя на полюсите: а)  $\lambda\lambda/\lambda$  - реализира  $M_c = const$ ; б)  $\lambda\lambda/\Delta$  - реализира  $P_c = const$

3. Стабилност на работата на електрозадвижването (точност на регулирането на скоростта) - представлява съответствието между зададената и действителната скорост на двигателя при възможно най-големи колебания на  $M_{c,зад}$ . Върху стабилността влияе силно твърдостта на механичната характеристика,  $\beta$ . Въпреки това, чрез  $\beta$  не може да се направи количествена оценка на стабилността, тъй като при едно и също несъответствие между зададената и действителната скорост, твърдостта на характеристиката на по-мощния двигател е по-голяма. Затова за целта се използва *относителната твърдост на механичната характеристика*,  $\nu$  за дадения режим ( $M_{c,зад}$ ,  $\omega_{зад}$ ). Тъй като обикновено  $M_{c,зад} = M_H$  и  $\omega_{зад} = \omega_H$ , за относителната твърдост може да се запише

$$(24.25) \quad \nu = \beta \cdot \frac{\omega_{зад}}{M_{c,зад}} = \beta \cdot \frac{\omega_H}{M_H} .$$

4. Саморегулиране на скоростта на двигателя - представлява изменение на скоростта под действието на  $M_c$ , без промяна в състоянието на управляващото въздействие. Ясно е, че това понятие се осмисля при работа на двигателя на една характеристика. Двигателят за постоянен ток с последователно възбуждане притежава естествена механична характеристика с най-голямо саморегулиране.

#### 24.1.7. Режими на работа на електродвигателите

Режимът, за който е оразмерен да работи всеки електродвигател, е неговият *номинален режим*. При работа в него температурата на намотките е най-близка, равна, но не по-голяма от допустимата за класа на изолацията им,  $\tau_{дон}$ .

Стандартизирани са осем вида номинални режими, за всеки от които се произвеждат двигатели. От тях ще разгледаме само основните три:

1. *Режим на продължителна работа*,  $S_1$  - двигателят работи с постоянно външно натоварване и продължителност, достатъчна да се достигне топлинно равновесие. Очевидно е, че продължителността на работа не влияе върху максималното прегряване на двигателя. Повечето от произвежданите двигатели са оразмерени да работят в продължителен режим,  $S_1$ . При работа в номинален режим такива електродвигатели винаги достигат установената температура,  $\tau_y$ . Нейната стойност е по-висока от всички преходни  $\tau$ , както и от установеното прегряване за допустимите режими, различни от номиналния режим. То удовлетворява условието

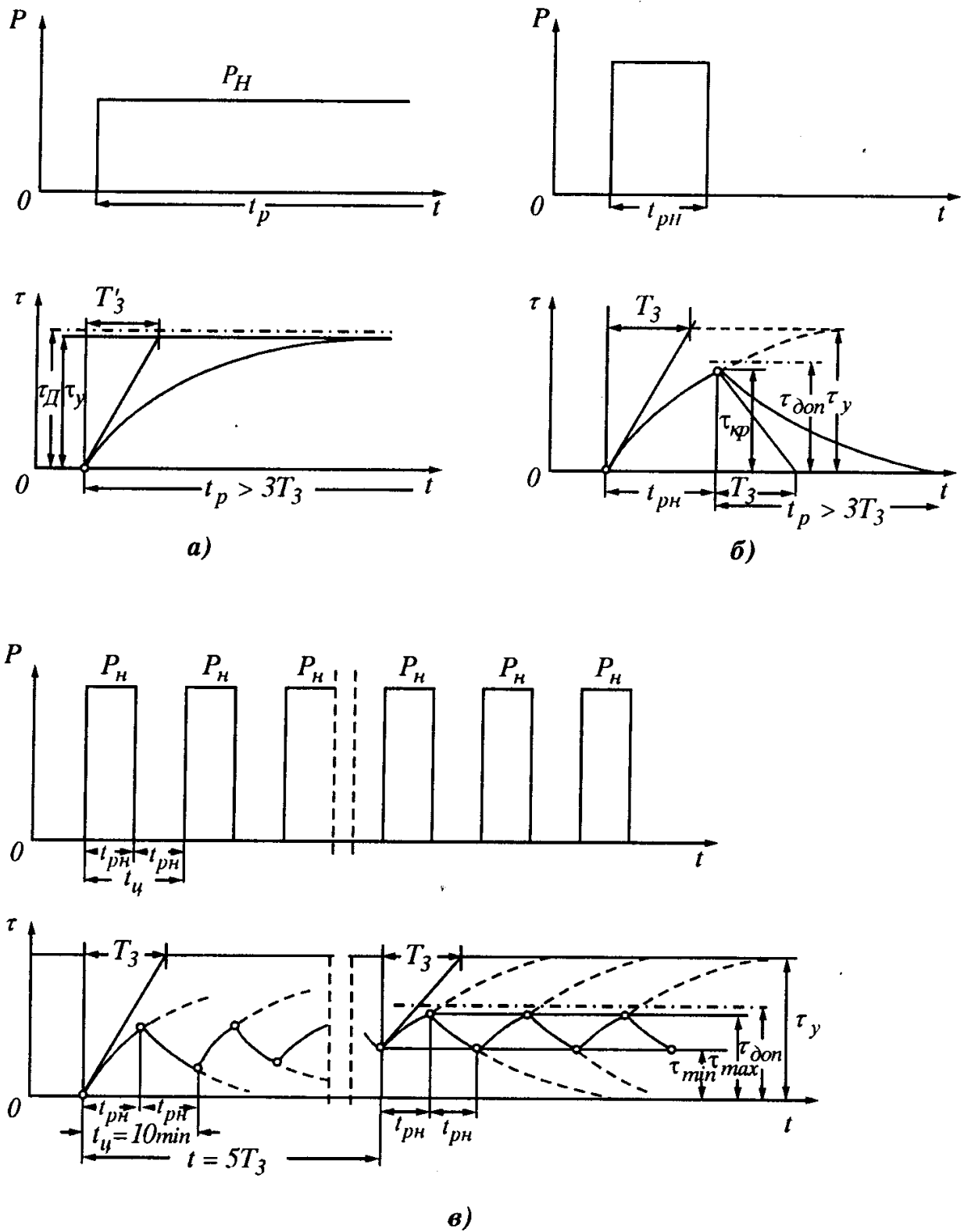
$$(24.26) \quad \tau_y < \tau_{дон} .$$

Номиналният режим на продължителна работа е единствен за двигателя - фиг. 24.11а.

2. *Режим на кратковременна работа*,  $S_2$  - двигателят работи при постоянно външно натоварване с определена продължителност, недостатъчна за достигане на топлинно равновесие, след което следва електрическо изключване с продължителност, достатъчна за охлаждане на машината до изходно състояние ( $\tau = 0$ ).

Най-голямото прегряване  $\tau$ , което двигателите, оразмерени за  $S_2$ , достигат при работа в номинален режим, е преходната стойност на  $\tau$  в момента на всяко електрическо изключване - крайно пренагряване,  $\tau_{кр}$ . То трябва да удовлетворява условието

$$(24.27) \quad \tau_{кр} < \tau_{дон} .$$



Фиг. 24.11. Номинални режими на работа на електродвигателите: а) режим на продължителна работа,  $S_1$ ; б) режим на кратковременна работа,  $S_2$ ; в) режим на повторно-кратковременна работа,  $S_3$

За режим  $S_2$  се произвеждат специално оразмерени двигатели, на които освен мощностите, е стандартизирана и продължителността на работата им,  $t_{рн}$ . Стойностите на  $t_{рн}$  са: 10, 30, 60 и 90 min. Всеки двигател за режим  $S_2$  трябва да може да работи с едно и също  $\tau_{кр}$  при всички  $t_{рн}$ . Останалите номинални величини остават почти неизменни. Следователно, номиналните режими на кратковременна работа са четири. Един от тях е показан на фиг. 24.11б.

3. *Режим на повторно-кратковременна работа*,  $S_3$  - двигателят работи при постоянно външно натоварване с определена продължителност, недостатъчна за достигане на топлинно равновесие, след което следва електрическо изключване с продължителност, също недостатъчна за охлаждане на двигателя до  $\tau = 0$ . За  $S_3$  стандартно са приети шест включвания в час, т.е: период на цикъла е  $t_{ц} = 10 \text{ min}$ . Промените на  $\tau$  от момента на първото му включване до изключването му след  $t > 3T_3$  са показани на фиг. 24.11в. От фигурата се вижда, че отначало във всеки следващ цикъл двигателят се включва при все по-високо  $\tau_{нач}$  и затова се изключва при все по-висока  $\tau_{кр}$ . След  $\tau = 5T_3$ , за всяко следващо включване минималната температура ( $\tau_{min}$ ) остава постоянна, както и  $\tau_{кр}$  при изключване ( $\tau_{max}$ ). Най-високата температура, която двигателите, оразмерени за  $S_3$ , достигат след неограничено дълга работа в номиналния си режим, е  $\tau_{max}$ . Тя трябва да удовлетворява условието

$$(24.28) \quad \tau_{max} < \tau_{доп} .$$

Времената  $t_p$ ,  $t_0$  и  $t_{ц} = t_p + t_0$  се обединяват чрез отношението  $\frac{t_p}{t_p + t_0}$ , изразено в %. То се нарича *относителна продължителност на работа*,  $\varepsilon$ :

$$(24.29) \quad \varepsilon = \frac{t_p}{t_p + t_0} \cdot 100 = \frac{t_p}{t_{ц}} \cdot 100, \% .$$

Стандартизираните стойности на  $\varepsilon$  ( $\varepsilon_H$ ) са 10, 25, 40 и 60%. Всеки двигател, оразмерен за  $S_3$ , трябва да може да работи с едно и също  $\tau_{max}$  при всички  $\varepsilon_H$ . Следователно, номиналните режими на повторно-кратковременната работа на двигателя са също четири. Един от тях е основен - пълните му номинални данни са отразени в каталога, придружаващ двигателя, а част

от тях - и върху производствената му табелка. За останалите номинални режими на същия двигател в каталога са дадени само  $P$  и  $n$ .

#### 24.1.8. Необходими данни и избор на електродвигател

Едва в края на проектирането на производствената машина, когато вече е избран и предавателният механизъм, се прави избор на електродвигателя. На този етап на конструктора са известни: 1) категорията на средата, в която ще работи производствената машина; 2)  $U$  на разпределителните линии на обекта, на който тя ще работи; 3) необходимо ли е регулиране на скоростта на РО чрез електродвигателя - ако е необходимо, какви  $D$ ,  $\phi$  и  $v$  трябва да се осигурят и при какъв зададен режим; 4) производствената характеристика на двигателя; 5) стойността на  $M_c$  при най-трудното очаквано пускане на РМ -  $M_{cn}$ ; 6) стойността на  $M_c$  при най-голямото очаквано кратковременно претоварване -  $M_{c,max}$ , и 7) товаровата диаграма на РМ.

Товаровата диаграма на РМ:  $M_c = f(t)$ , изразява изменението на създавания от РМ съпротивителен момент при неограничено дълго реализиране на възможно най-тежките технологични операции. За РМ тя е това, което е номиналният режим за двигателя, защото оразмеряването ѝ се извършва съобразно нея. Характерът на извършваната от РМ работа определя формата на нейната товарова диаграма. Когато  $M_c$  не зависи от времето, е прието товарът да се нарича *постоянен* - фиг. 24.12а, а когато  $M_c$  е функция от  $t$  - *променлив*.  $M_c$  може да се изменя скокообразно (фиг. 24.12) или плавно (фиг. 24.13).

Когато се очаква РО в изчислителен режим да се движи без прекъсване, в товаровата диаграма на РМ няма паузи (фиг. 24.12а, фиг. 24.13). Когато се очаква РО да бъде ту в движение, ту в покой, в нея ще се появят паузи (почивки). Времето на работа,  $t_{cp}$  в една товарова диаграма може да има една (фиг. 24.12б) или повече (фиг. 24.12в) стойности. Какъвто и да е техният брой, товаровата диаграма може да се прегрупира така, че да се открие цикличност в изменението на товара - фиг. 24.12. Тогава

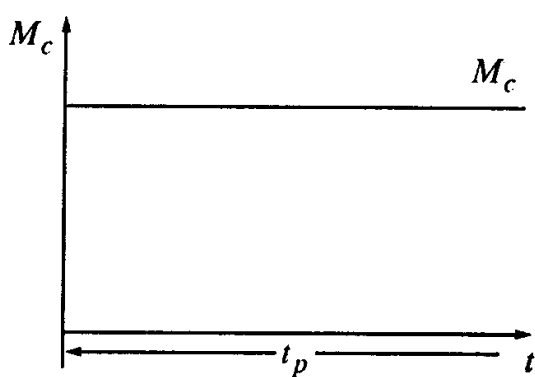
$$(24.30) \quad t_p = \sum_{i=1}^n t_{pi} \quad ,$$

$$(24.31) \quad t_0 = \sum_{i=1}^m t_{0i} \quad ,$$

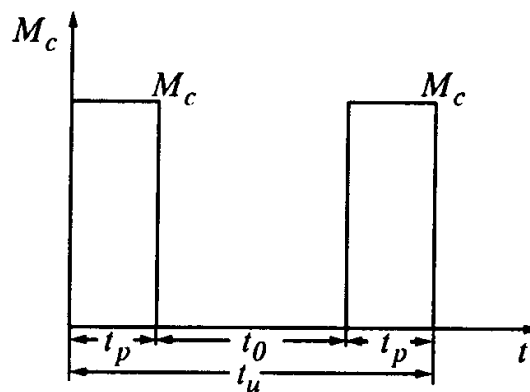
където  $n$  и  $m$  отразяват броя на различните стойности, съответно, за  $t_p$  и  $t_0$ .

Относителната продължителност на работа,  $\epsilon$  на РМ по товарната диаграма е

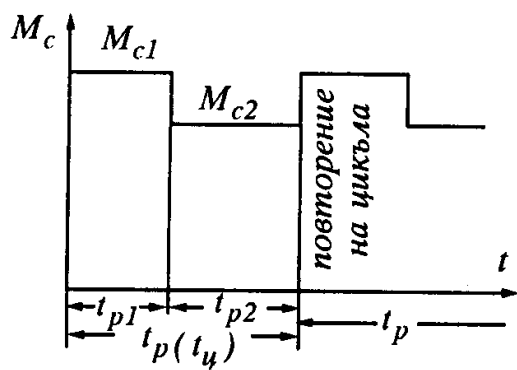
$$(24.32) \quad \epsilon = \frac{\sum_{i=1}^n t_{pi}}{\sum_{i=1}^n t_{pi} + \sum_{i=1}^m t_{0i}} \cdot 100 = \frac{\sum_{i=1}^n t_{pi}}{t_{\text{ц}}} \cdot 100\% ,$$



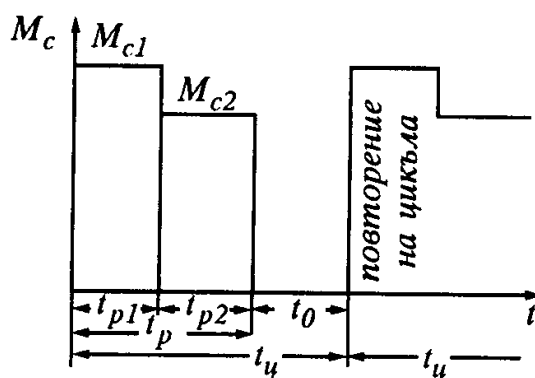
а)



б)



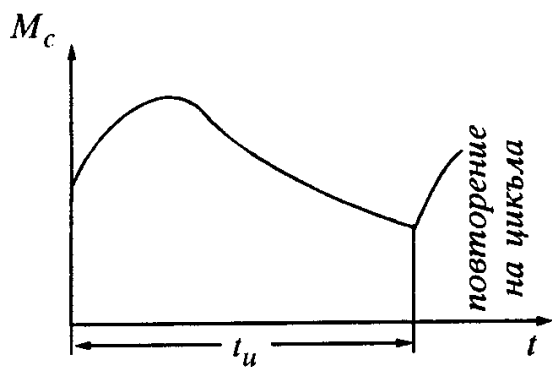
в)



г)

Фиг. 24.12. Товарни диаграми на работни машини: а) при постоянен товар без прекъсване (пауза); б) при постоянен товар и наличие на паузи; в) при променлив товар без прекъсване (пауза); г) при променлив товар и наличие на паузи





**Фиг. 24.13. Товарова диаграма на работна машина с плавно изменящ се непрекъснат товар**

Когато  $\varepsilon > 60\%$  при  $t_{\text{ц}} < 10 \text{ min}$ , режимът на работа на РМ се нарича продължителен; когато  $15\% < \varepsilon < 60\%$  при  $t_{\text{ц}} < 10 \text{ min}$  - повторно-кратковременен, а в останалите случаи - кратковременен.

Товарова диаграма на РМ се нарича и зависимостта  $P_c = f_1(t)$ . Тя може да се слее с  $M_c = f(t)$ , само ако  $\omega = \text{const}$ . Товарови диаграми на двигателя са още и зависимостите  $P = f_1(t)$  и  $I = f_2(t)$ .

С достатъчна за практиката точност при продължителен режим, при кратковременен с рядко пускане и спиране, и при повторно-кратковременен с не повече от шест включвания в час, може да се пренебрегнат преходните процеси. Тогава двете товарови диаграми се сливат. В такъв случай, ако  $M_c = \text{const}$ , е прието да се казва, че двигателят работи с постоянен момент,  $M$ .

**• Избор на двигател за работа с постоянен момент**

При известни данни за работния механизъм и за изискванията на работния процес се избира електродвигател. При продължителен режим на работа изборът може да се прави от гледна точка на най-добрите масо-габаритни показатели, цена на електрозадвижването и др. Изборът включва:

- избор на номинална честота на въртене;
- избор на номинална мощност;
- избор на претоварваща способност;
- избор на конструктивно изпълнение.

Изборът на номиналната честота на въртене,  $n_{\text{ном}}$  е свързан с много от важните показатели и характеристики на задвижването. Например, изборът на  $n_{\text{ном}}$  определя предавателното число на редуктора, ако такъв е необходим за осигуряване на определената честота на въртене на работната машина. Например в гребните електрически уредби бавноходните електродвигатели се свързват директно с гребния винт, а бързоходните - чрез редуктор. За някои приложения се проектират специални електродвигатели.

Изискването за *най-подходящ по мощност двигател*, който да не се загрява недопустимо, ще бъде изпълнено, ако при реализиране на товаровата диаграма на РМ двигателят работи с номинални данни или близки до тях. Когато на двигателя предстои да задвижва РМ, която ще работи в про-

дължителен режим, условието е изпълнено, ако

$$(24.33) \quad P_H \geq P_C .$$

Когато РМ ще работи в кратковременен режим, условието изисква

$$(24.34) \quad P_H \geq P_C \quad \text{при} \quad t_{HH} \geq t_P ,$$

а когато РМ ще работи в повторно-кратковременен режим:

$$(24.35) \quad P_H \geq P_C \quad \text{при} \quad \varepsilon_H \geq \varepsilon .$$

Условията (24.33), (24.34) и (24.35), наричани *условия за избор на двигател по загряване*, гарантират оптимално използване на избрания двигател в топлинно отношение. Неравенствата в тях показват, че изчислителната мощност на РМ често не съвпада с гамата на мощностите на произвеждащите двигатели, както и че действителните  $t_P$  и  $\varepsilon$  не съвпадат със стандартните.

От каталога на двигателя за желаното *напрежение* се търси, в зависимост от режима, такова  $t_{PH}$  или  $\varepsilon_H$ , че да бъде изпълнена втората част от неравенствата. След това се търси такова  $P_H$ , че да се изпълни и всяко едно от условията (според режима). Двигателят, който отговаря на тези условия, е търсеният от нас най-подходящ по мощност. Отчитат се неговите номинални данни и тип.

Всеки избран двигател трябва да бъде *проверен за достатъчен пусков момент*,  $M_n$  и *максимален момент*,  $M_{max}$ . За да се направи такава проверка, трябва чрез отчетените номинални данни на двигателя да се изчислят неговите  $M_n$  и  $M_{max}$ . Ако е изпълнено неравенството  $M_n > M_{cn}$ , двигателят ще може да приведе системата от състояние на покой в движение. Ако е изпълнено условието  $M_{max} \geq M_{c,max}$ , двигателят ще преодолее очаквания  $M_{c,max}$ , дори ако в този момент напрежението е спаднало до допустимата стойност.

Изискванията за *конструктивно изпълнение* на двигателя са свързани с мястото и условията на работа: температура на околния въздух, влажност, агресивна среда, вибрации и др.

## 24.2. Управление на корабните електрозадвижвания

### 24.2.1. Общи понятия и обозначения

Чрез управление на електрозадвижванията се осигурява правилната работа на механизмите/системите, в съответствие с изискванията на поддържаня технологичен процес. Процесът на управление включва реализация

на функциите: пускане, спиране, смяна на посоката на движение, регулиране на скоростта, производителността на производствения механизъм и др.

Системата за управление на електрозадвижванията включва обекта на управление и устройствата за управление. В състава на обекта на управление участват: електродвигателите, захранващите ги устройства и задвижваните работни органи. Устройствата за управление представляват все разнообразни елементи на системи за автоматично управление: отворени, затворени, комбинирани, аналогови, дискретни, цифрови, следящи, програмни, програмируеми, адаптивни и т.н. Обект на настоящото издание е само ръчното управление на електрозадвижванията с помощта на релейно-контакторни схеми.

Релейно-контакторните схеми предоставят ограничени възможности за управление на електрозадвижванията: пускане, спиране, реверсиране, и рядко - регулиране на честотата на въртене. Системите за релейно-контакторно управление се строят с релета, контактори, прекъсвачи и други апарати с релейно действие.

Електрическите схеми отразяват принципа на управление и последователността на операциите, които се изпълняват от елементите на схемата за управление и електродвигателя/работния орган. Чертаят се за неработно състояние: РО са неподвижни, захранването към схемите за управление е изключено.

Електрическите схеми биват: блокови, структурни, принципни, монтажни, разгънати, на външните връзки и др.

На принципните схеми се представят всички елементи и връзките между тях, така че принципът на действие на системата да е ясен. За проследяване на последователността на действие на елементите се чертаят разгънати схеми, при които елементи на един апарат се чертаят на различни места, но се обозначават по един и същи начин. Така удобно и бързо се изяснява действието на системата/схемата.

Електрическите вериги на двигателя се наричат силови и понякога се изчертават с по-дебели линии, а веригите на апаратите за управление се наричат оперативни и се чертаят с тънки линии.

За изобразяване на различните елементи в схемите за управление се използват условни графични знаци. Елементите на схемите се чертаят в състояние при изключено захранване. Когато захранването е изключено, релетата/контакторите са в такова състояние, че веригата с НО контакти е прекъсната, а веригата с НЗ контакти - свързана.

В таблица 24.1 са приведени някои обозначения, използвани у нас, държавите от ЕС и САЩ.

Сравнителна таблица на основните условни обозначения

Наименование	Руски и български стандарти, остарели		Европейски стандарт и нов български стандарт		Стандарт на САЩ	
	силов	помощен	силов	помощен	силов	помощен
Нормално отворен контакт						
Нормално затворен контакт						
Контакт със закъснение при включване						
Контакт със закъснение при изключване						
Предпазител със стопяема вложка						
Реле	термично магнитно 		термично магнитно 			
Бобина на контактор						
Трифазен асинхронен двигател						
Разединител						
Прекъсвач автоматичен					магнитен магнитно-термичен 	

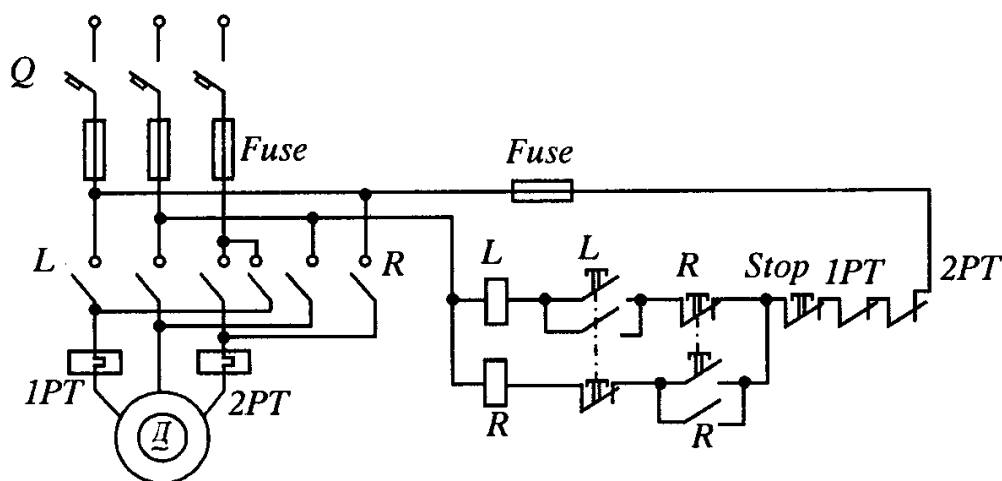
### 24.2.2. Схеми за управление на електрозадвижванията

Все още най-широко разпространение на корабите намират релейно-контакторните схеми за управление на електрозадвижванията, а от тях най-често се използват магнитните реверсивни/нереверсивни пускатели. Назначението на схемите за управление на електрозадвижванията е да осъществяват управлението и защитата на електродвигателите в процеса на работа на всички възможни режими на работа на производствените механизми, както и автоматизацията на процесите.

#### 24.2.2.1. Магнитен реверсивен/нереверсивен пускател

Магнитният пускател се използва за управление и защита на задвижвания с асинхронни двигатели (АД), позволяващи пряко пускане. Автоматизира процесите пускане, спиране, реверсиране и защита на електродвигателя.

Схемата на пускателя е представена на фиг. 24.14: състои се от два контактора (ляво -  $L$  и дясно -  $R$ ), автоматичен прекъсвач,  $Q$ , предпазители  $Fuse$ , топлинни релета  $1PT$  и  $2PT$ , и бутонни прекъсвачи /включватели  $Stop$ ,  $L$ ,  $R$ . Ако контакторът е един, пускателят е нереверсивен.



Фиг. 24.14

В силовата верига на електродвигателя са включени:  $Q$ ,  $Fuse$ , силовите контакти на  $L$  или  $R$  и нагревателните елементи на  $1PT$  и  $2PT$ . Управляващата част включва бобините на контакторите  $L$  и  $R$ , бутоните  $L$ ,  $R$  и  $Stop$ , както и НЗ контакти на  $PT1$  и  $PT2$ .

**Действие на схемата:** След ръчно включване на  $Q$  схемата е готова за действие. След натискане на единия от бутоните -  $L$  (ЛЯВО) или  $R$  (ДЯСНО), протича ток през бобината на съответния контактор, той зарежда и затваря НО контактите, като отваря НЗ контактите. Статорната намотка на двигателя се включва към захранващата мрежа и двигателят тръгва. Блок-контактите  $L$  и  $R$  поддържат съответната верига на бобините на контакто-

рите след отпускане на бутона ПУСК ( $L$  или  $R$ ). С натискането на бутона *Stop* двигателят спира от силите на триене, тъй като се прекъсват веригите на бобините на контакторите. В случай че желаем реверсиране на двигателя, натискаме противоположния бутон ПУСК.

Схемата осигурява следните блокировки и защиты:

- защита от претоварване;
- защита от къси съединения;
- защита от самопускане (нулева защита);
- защита при понижаване на захранващото напрежение;
- блокировка от едновременното заработване на контакторите  $L$  и  $R$ .

В по-сложни схеми за управление защитите и блокировките имат и други допълнителни функции.

Последната блокировка може да бъде реализирана както механически (вж. показаната схема), така и електрически с НЗ електрически контакти.

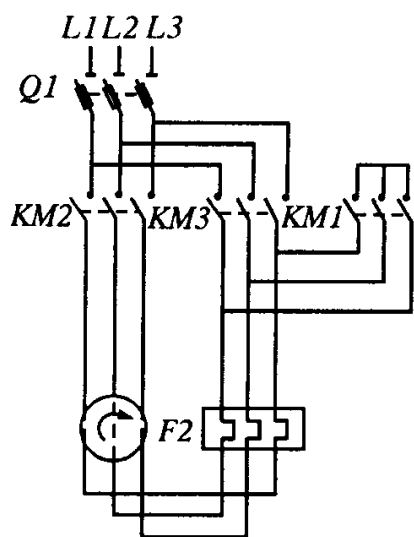
#### ***24.2.2.2. Релейно-контакторна схема за пускане на трифазен асинхронен двигател, чрез превключване на статорните намотки от схема „звезда“ в схема „триъгълник“***

При директно включване към мрежата, статорната намотка на АД се включва направо към пълното напрежение на мрежата. Поради големия пусков ток, на мощни АД може да се получи голям пад на напрежение в мрежата, с последващи смущения в работата на останалите консуматори, захранвани от същата мрежа.

Един от начините за пускане на АД с накъсо съединен ротор с понижено напрежение е чрез превключване на статорната намотка от схема „звезда“ в схема „триъгълник“. Пускането по този начин е възможно само за двигатели, които работят нормално при свързване на статорната намотка в „триъгълник“. Необходимо е шестте края на статорната намотка да бъдат изведени в клемната кутия.

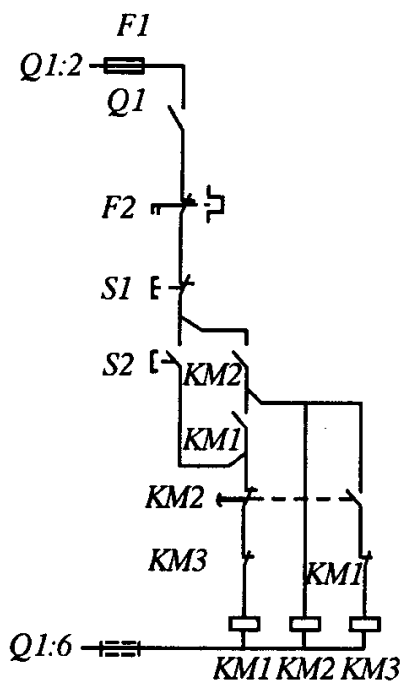
Към схемата (фиг. 24.15а и фиг. 24.15б) се подава напрежение посредством затваряне на прекъсвача  $Q1$ . Асинхронният двигател се пуска с натискане на пусковия бутон  $S2$ . Пусковият бутон затваря веригата на бобината на контактора  $KM1$ , който свързва статорните намотки на двигателя по схема „звезда“. Помощен контакт на  $KM1$  затваря веригата на бобината на линейния контактор  $KM2$ . Главните контакти на контактора  $KM2$  в статорната верига на двигателя подават към статорната намотка трите фази на мрежовото напрежение и двигателят се развърта, включен по схема „звезда“. Контакторът  $KM2$  има включени два помощни контакта - един нормално отворен, който блокира (шунтира) пусковия бутон и той може да се отпусне, и един нормално затворен с времезакъснение, включен последователно на бобината на контактора  $KM3$ . Затвореният помощен контакт се отваря и

силова верига

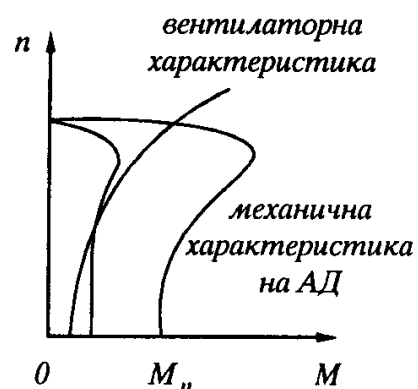


а)

оперативна верига



б)



в)

Фиг. 24.15

предпазва от зароботване на контактора  $KM3$  при работещ контактор  $KM1$ . При изтичане на зададеното времезакъснение този контакт се затваря, като едновременно отваря куплирания към него помощен контакт във веригата на бобината на контактора  $KM1$ . Свързването „звезда“ на намотките се разкачва и те се свързват по схема „триъгълник“. Линейният контактор  $KM2$  остава включен. Спирането на електродвигателя става чрез натискане на бутона  $S1$ , с който се прекъсва веригата на работещия контактор  $KM1$  (или на  $KM3$ ) и на линейния контактор  $KM2$ . Контактите изключват и двигателят спира. Схемата осигурява защита на електродвигателя от претоварване чрез термично биметално реле  $F2$  и максималнотокова защита, осигурена от автоматичния изключвател  $Q1$ . Вградените в изключвателя предпазители осигуряват защитата от междуфазни къси съединения.

При съединение „звезда“ фазното напрежение на двигателя ще бъде  $U_{\phi} = U_{\lambda} / \sqrt{3}$ , а фазният ток:  $I_{\phi} = I_{\lambda}$ . При съединение „триъгълник“:  $U_{\phi} = U_{\lambda}$  и  $I_{\lambda} = I_{\phi}$ . Отношението на пусковия момент при „звезда“ към пусковия момент при „триъгълник“ е  $M_{\lambda} / M_{\Delta} = 1/3$ . Същото е и отношението на пуско-

вия ток при „звезда“ към пусковия ток при „триъгълник“:  $I_{\lambda} / I_{\Delta} = 1/3$ . Следователно, при пускане в „звезда“ фазното напрежение се намалява  $\sqrt{3}$  пъти, а пусковият ток и пусковият момент - 3 пъти. Поради намаления пусков момент, пускането „звезда - триъгълник“ може да се осъществи само при празен ход или при малки натоварвания на двигателя (фиг. 24.15в).

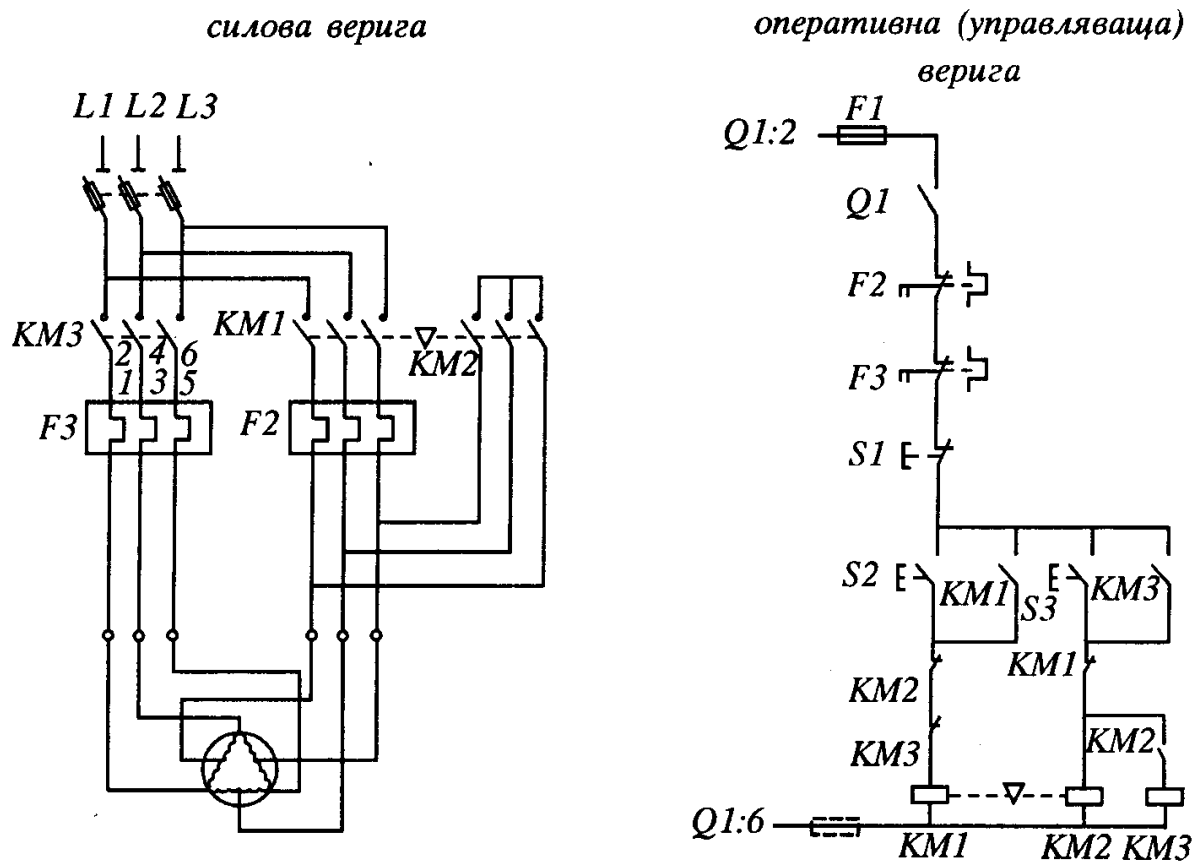
### **24.2.2.3. Релейно-контакторна схема за управление на двускоростен трифазен асинхронен двигател**

Регулирането на скоростта чрез изменение на броя на чифтовете полюси на статорната намотка е практически възможно само за АД с накъсо съединен ротор. За целта е необходимо статорната намотка да е секционирана, с изведени краища на секциите. При превключване на схемата на свързване на отделните секции се получава различен брой чифтове полюси. АД, на които може да се изменя броят на чифтовете полюси, се наричат многоскоростни. Най-разпространени са двускоростните АД, на които чифтовете полюси могат да се изменят в отношение 2:1 и, следователно, скоростта на двигателя ще се изменя в същото съотношение, т.е. регулирането на скоростта е на степени. В практиката най-често се срещат две схеми на превключване на броя на чифтовете полюси на АД в отношение 2:1, т.е. от последователно в паралелно свързване на секциите на статорната намотка: превключване от единична в „двойна звезда“ и превключване от „триъгълник“ в „двойна звезда“.

Към схемата (фиг. 24.16) се подава напрежение чрез затваряне на прекъсвача  $Q1$ . Асинхронният двигател се пуска с натискане на пусковия бутон  $S2$ , който затваря веригата на бобината на контактора  $KM1$ , свързващ статорните намотки на двигателя по схема „триъгълник“. Главните контакти на контактора  $KM1$  в статорната верига на двигателя подават към статорната намотка трите фази на мрежовото напрежение и двигателят се развърта с ниска скорост, включен по схема „триъгълник“. Контактният  $KM1$  има включени два помощни контакта - един нормално отворен, който блокира (шунтира) пусковия бутон и той може да се отпусне, и един нормално затворен, включен последователно на бобините на контакторите  $KM2$  и  $KM3$ . Нормално затвореният контакт се отваря и предпазва от заработване на контакторите  $KM2$  и  $KM3$  при работещ контактор  $KM1$ . При желание за преминаване към по-висока скорост, се натиска пусковият бутон  $S3$ , който затваря веригата на бобините на контакторите  $KM2$  и  $KM3$ . Свързването „триъгълник“ на намотките се разкачва и те се свързват по схема „двойна звезда“. Главните контакти на контактора  $KM3$  в статорната верига на двигателя подават към статорната намотка трите фази на мрежовото напрежение и двигателят се развърта с висока скорост, включен по схема



„двойна звезда“. Контакторът *KM3* има включени два помощни контакта - един нормално отворен, който блокира (шунтира) пусковия бутон и той може да се отпусне, и един нормално затворен, включен последователно на бобината на контактора *KM1*. Нормално затвореният контакт се отваря и предпазва от зареждане на контактора *KM1* при работещи контактори *KM2* и *KM3*. Спирането на електродвигателя става чрез натискане на бутона *S1*, с който се прекъсва веригата на работещия контактор *KM1* (или на *KM3*) и *KM2*. Контакторите изключват и двигателят спира. Схемата осигурява защита на електродвигателя от претоварване чрез термични биметални релета *F2* и *F3* и максималнотокова защита, осигурена от автоматичния изключвател *Q1*. Вградените в изключвателя предпазители осигуряват защитата от междуфазни къси съединения.



Фиг. 24.16

При свързване на статорната намотка в „триъгълник“ двигателят консумира мощност

$$(24.36) \quad P_{\Delta} = 3U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi .$$

При свързване в „двойна звезда“ токът във всяка фаза ще се увеличи два пъти, поради паралелното свързване на двете секции, но фазното нап-

режение ще се намали с  $\sqrt{3}$  пъти. Мощността при „двойна звезда“ ще бъде

$$(24.37) \quad P_{\lambda} = 3 \frac{U_{\phi}}{\sqrt{3}} 2 I_{\phi} \cos \varphi .$$

Ако се приеме, че факторът на мощността е постоянен, отношението на мощностите ще бъде  $P_{\lambda} / P_{\Delta} = 2 / \sqrt{3} = 1,155$ .

Следователно, регулирането на скоростта чрез превключване „триъгълник - двойна звезда“ е целесъобразно да се извършва при постоянна мощност. Тъй като при превключването мощността се изменя незначително, а скоростта се е увеличила, моментът на двигателя ще намалее.

Най-често на корабите се използват трискоростни АД с три отделни намотки или с две намотки: едната се превключва, а другата - не. Такива АД се използват за задвижване на котвено-вързални устройства.

Обикновено втората скорост е с най-голяма мощност и е за предпочитане да бъде използвана в особено тежки случаи на обирание (вдигане) на котвата. Третата скорост се използва само при бързо обирание на свободно въже.

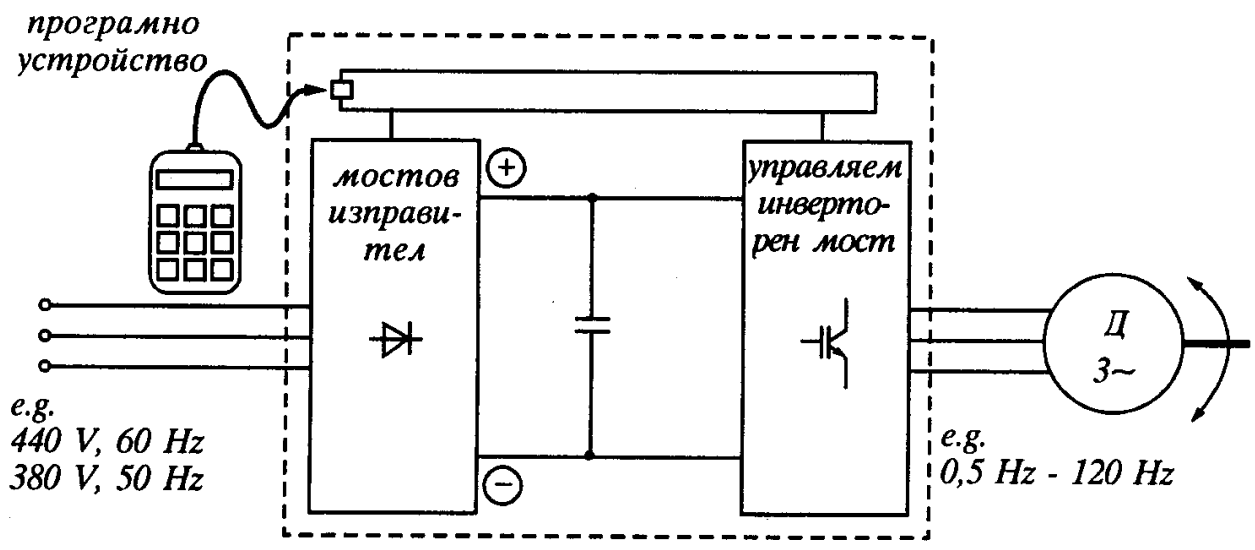
Вместо с бутоните, схемата и многоскоростният електродвигател се управляват с помощта на командоконтролер. Схемата осигурява защитата на електродвигателя във всички режими на работа. Предвижда се и режим на автоматично обирание/натягане на въжетата и др.

#### **24.2.2.4. Честотно управление на асинхронен двигател**

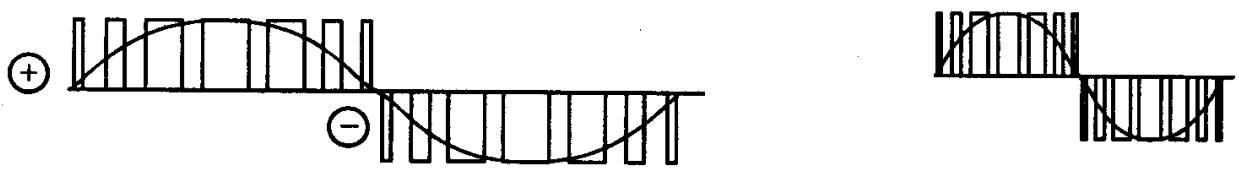
Развитието и достиженията на технологиите за производство на мощни електронни елементи (тиристоры и транзисторы) налага все по-широко използване на електронни преобразуватели за управление на АД. Първите варианти на трифазните инвертори са разработени с тиристоры. Напоследък, след появата на нови мощни транзисторы, все по-често се използват мощни транзисторни инвертори.

Блоковата схема и напрежението на една фаза след инвертора при две различни честоти са представени на фиг. 24.17 и фиг. 24.18. Този тип схеми за управление на АД имат множество предимства, които подобряват качествата на електрозадвижването: широк диапазон на регулиране на честотата на въртене на ротора, регулиране на напрежението, неголям обем и тегло на електронните устройства, достатъчно висока надеждност, удовлетворителна цена, икономичност на регулирането и др.

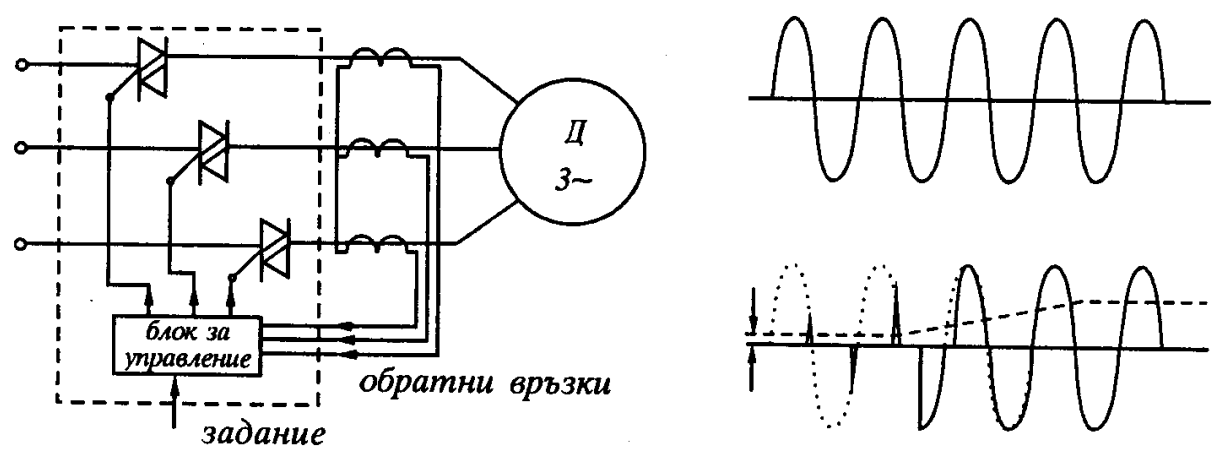
Напоследък все по-широко се използват електронни схеми за „мек пуск“ на АД - фиг. 24.19. Плавният пуск на АД се осъществява с помощта на електронен регулатор на трифазно напрежение.



Фиг. 24.17



Фиг. 24.18

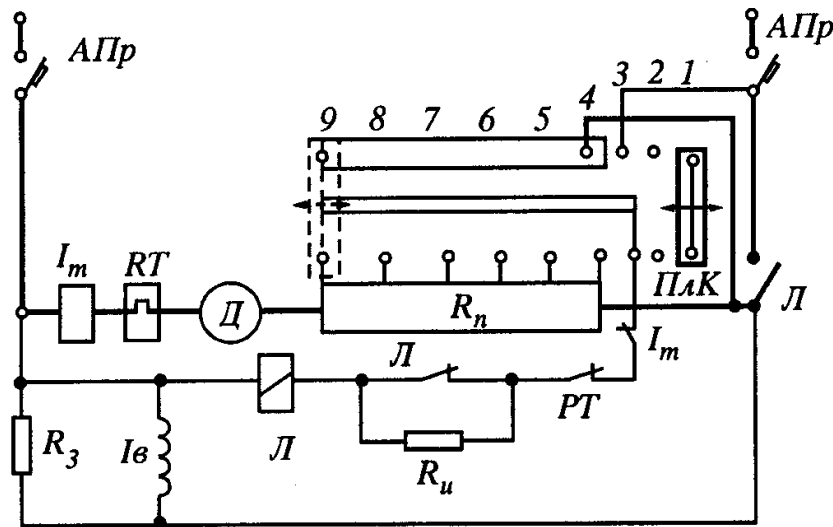


Фиг. 24.19

Подобни електронни схеми намират широко приложение за управление на универсални колекторни двигатели.

### 24.2.3. Пусков реостат

Пусковият реостат се използва за ръчно пускане и спиране на постояннотокови двигатели, както и за защитата им при работа (фиг. 24.20). Състои



Фиг. 24.20

се от: автоматичен прекъсвач,  $АПр$ , линейен контактор,  $Л$ , максимално токово реле,  $I_m$ , реле термично,  $РТ$ , пусково,  $R_n$ , защитно,  $R_3$  и икономично,  $R_u$  съпротивления; плъзгащи превключващи контакти,  $ПлК$ .

*Действие на схемата:* След ръчно включване на  $АПр$  схемата е готова за работа. Контактната пластина на плъзгащите контакти  $ПлК$  се

премества последователно от първото до последното положение, с което пускането на двигателя приключва. Работата на двигателя започва в положение 3 на  $ПлК$  - тогава през бобината на  $Л$  протича ток и контакторът заработва. При това се затварят котвената и възбудителната вериги на електродвигателя  $Д$ . В котвената верига е включено цялото пусково съпротивление  $R_n$ . Освен това, помощният контакт на  $Л$  включва  $R_u$  във веригата на бобината на  $Л$ . Така се намалява токът за поддържане на  $Л$ . Пусковият процес завършва едва след шунтиране на цялото пусково съпротивление  $R_n$ . Тъй като  $R_n$  не е разчетено по мощност за продължителна работа, трябва да бъде шунтирано навреме.

Спирането на електродвигателя става с изключването му от мрежата - с връщането на  $ПлК$  в положение 2 или 1. Схемата на пусковия реостат осигурява следните защиты и блокировки:

- защита от претоварване;
- защита от къси съединения;
- защита от самопускане (нулева защита);
- защита при понижаване на захранващото напрежение;
- защита при бързо шунтиране на  $R_n$ .

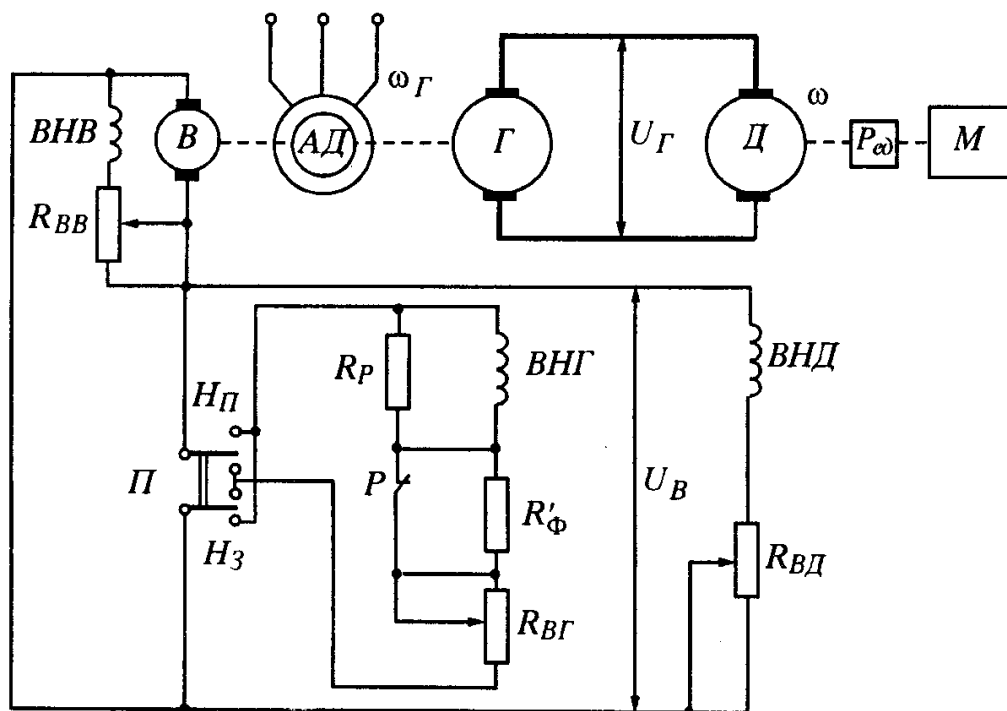
При продължително претоварване на електродвигателя се задейства  $РТ$ , а при краткотрайно нарастване на тока -  $I_m$ . И в двата случая се обез-

точва бобината на  $L$  и двигателят се изключва от електрическото захранване. С правилния подбор на  $R_u$  се избира минималното напрежение, при което електромагнитната сила на привличане освобождава  $L$  и двигателят спира. За да тръгне електродвигателят,  $ПК$  трябва да се постави/върне в положение 3. С това се осъществява нулевата защита. При изключване на възбудителната намотка от захранващата мрежа се индуцира е.д.н. на самоиндукцията. За да не се повреди изолацията ѝ, се използва  $R_3$ . Понякога намотката се дава накъсо от  $ПК$ , поставен в положение 2.

*Пускането трябва да завършва след пълно шунтиране на  $R_n$ .*

#### 24.2.4. Електрозадвижваща система „генератор - двигател“

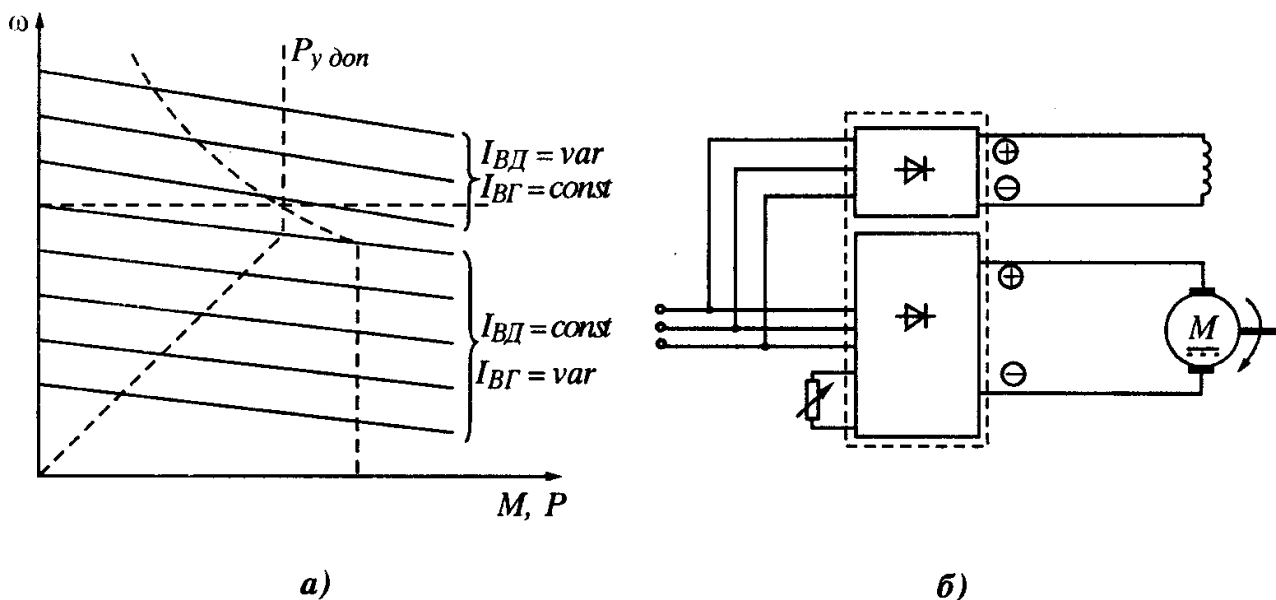
Системата „генератор - двигател“ (Г-Д) - фиг. 24.21, се състои от първичен асинхронен двигател, АД, генератор за постоянен ток,  $\Gamma$ ; възбудител,  $B$  (също генератор за постоянен ток, но с много по-малка мощност от  $\Gamma$ ) и двигател,  $\Delta$ , който чрез редуктор  $P_{ед}$  привежда в движение механизма  $M$ . Първичният асинхронен двигател АД е включен в трифазна променливотокова мрежа и захранва с механична енергия възбудителя  $B$  и генератора  $\Gamma$ . Възбудителят  $B$  е генератор с паралелно възбуждане и на изводите му се получава напрежение  $U_B$  веднага след развъртането на асинхронния двигател. Това напрежение захранва възбудителните намотки на генератора и на двигателя, и може да се регулира чрез реостата  $R_{BB}$ . Когато превключвателят  $\Pi$  е в средно положение, към възбудителната намотка на генератора



Фиг. 24.21. Система „генератор - двигател“ (Г-Д)

ВНГ не се подава напрежение. Тогава възбудителният поток  $\Phi_{\Gamma} = 0$ ,  $U_{\Gamma} = 0$  и двигателят не се върти, въпреки че през възбудителната му намотка протича ток, определен от  $R_{ВД}$ . Пускането на системата Г-Д става като превключвателят П се включи в положение  $H_{П}$  за въртене на двигателя в посока напред, или  $H_{З}$  - за въртене в посока назад (системата Г-Д е реверсивна). При това, през възбудителната намотка на генератора протича ток, определен от съпротивленията в нейната верига -  $R_{ВГ}$ ,  $R_{\Phi}$  и  $R_{P}$ , който възбужда поток  $\Phi_{\Gamma}$ . На изводите на генератора се получава напрежение  $U_{\Gamma}$ , което се подава към двигателя Д и той се развърта. Скоростта на Д може да се регулира по същия начин, както при двигател с независимо възбуждане, захранван от постояннотокова мрежа, чрез изменение на напрежението  $U_{\Gamma}$ , което е функция на  $I_{ВГ}$ . Единственото различие при системата Г-Д е увеличеното съпротивление на котвената верига, поради което механичните характеристики имат по-голям наклон и, следователно, по-малка твърдост. На фиг. 24.22а са показани механичните характеристики, които се получават при система Г-Д. Нанесени са и графиките  $M_y = f(\omega)$  и  $P_y = f(\omega)$ , които характеризират условията на натоварване при регулиране на скоростта. До номиналната скорост регулирането трябва да се извършва при  $M_c = const$ , а над нея - при  $P_c = const$ .

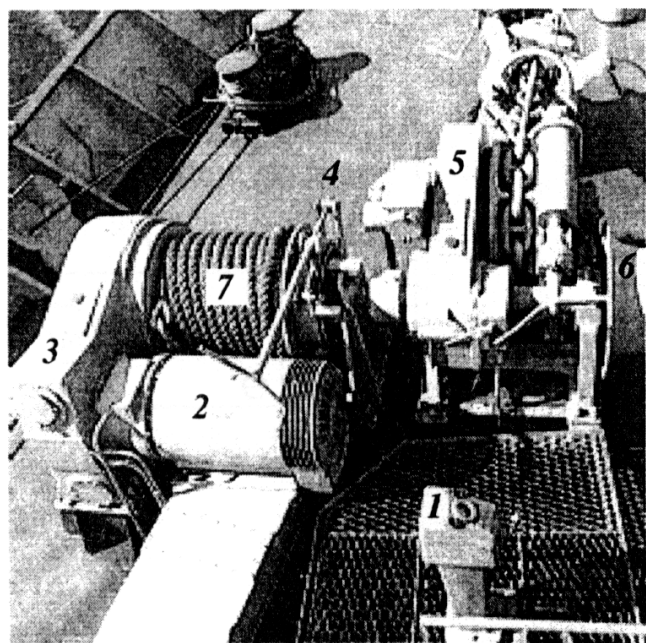
Подобни характеристики имат и електрозадвижванията от системата „управляем изправител-двигател“ (УИ-Д), показана на фиг. 24.22б.



Фиг. 24.22

### 24.3. Автоматизирано управление на корабните електрозадвижвания

Производствената дейност на съвременните кораби е свързана с реализирането и управлението на различни производствени процеси: товарене; разтоварване; превоз; производство и преработване на товари в най-разнообразни варианти. Всички те са свързани с получаването и преобразуването или използването на механична, топлинна или химическа енергия. Най-често преобразуванията се реализират с помощта на управляеми електрозадвижвания за променлив ток, а управлението представлява пускане, спиране, реверсиране, регулиране на производителността/честотата на въртене, позициониране и т.н. В крайна сметка, автоматизираното управление се превръща в работа на електрозадвижванията в продължителен, кратковременен или повторнократковременен режим на работа. Изборът на режима на работа, включването, изключването, превключването и управлението на производителността се управляват в зависимост от особеностите и алгоритъма на работа на всеки конкретен работен механизъм. Алгоритъмът и схемата на управление могат да бъдат реализирани с помощта на дискретни и интегрални електронни елементи, изпълняващи аналогови, числени и изчислителни процеси/функции, като обработваната информация за начина на протичане на процесите придобива все по-голям обем. Така съвременните схеми за управление на електрозадвижванията стават затворени системи за автоматично управление. В гл. 4 са представени блоково-функционални схеми на система за автоматизирано управление на обекти за управление/електрозадвижвания.



Фиг. 24.23

Най-широко приложение на българските кораби имат котвено-вързалните устройства с трискоростни АД (фиг. 24.23), където: 1 е колонката на командоконтролер; 2 - трискоростен АД; 3 - редуктор; 4 - лентова спирачка; 5 - редуктор и „звезда“ на котвено-то устройство; 6 - барабан на шпила; 7 - барабан за шпрингово въже.

Схемите за управление и автоматизация на управлението на многоскоростни АД осигуряват работата на многоскоростни АД във всички предвидени от проектантите и квалифи-

кационните организации режими на използване. Най-често схемите за управление предвиждат последователно преминаване от първа до трета скорост, като автоматично се спазват всички условия за ускоряване на електродвигателя/котвеното устройство. Този алгоритъм се спазва независимо от действията на оператора и нарушенията на техническите изисквания за използване на устройствата.

Принципите на изграждане на съвременните схеми за управление на корабните електрозадвижвания не освобождават от отговорност операторите. Те са длъжни да познават инструкциите за работа с всеки механизъм и да управляват електрозадвижването в пълно съответствие с тях. Задължително е например да се знае, че най-голям въртящ момент развива АД на брашпила на втора скорост; че ръкохватката на командоконтролера трябва да се върне на втора скорост и отново да се премести на трета, ако е необходимо бързо да се обира свободно въже, а междувременно е сработила токовата защита за работа на електродвигателя на трета скорост, и т.н.

## **24.4. Гребни електрозадвижвания (ГЕУ)**

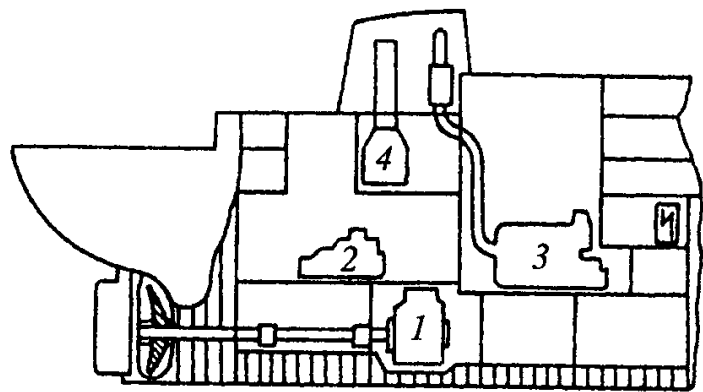
### **24.4.1. Основни понятия и видове ГЕУ, предимства и недостатъци**

Най-разпространените уредби, чрез които всеки кораб се привежда в движение посредством гребния винт, са уредбите, при които винтът получава въртливо движение директно от дизелов двигател. Съществуват обаче и уредби, при които дизеловият двигател привежда в движение електрически генератор, който от своя страна захранва електродвигател, задвижващ гребния винт. Такъв тип уредби, при които става двукратно преобразуване на механичната енергия, необходима за задвижване на кораба (от механична в електрическа и отново в механична), се наричат *гребни електрозадвижвания* или *гребни електрически уредби* (ГЕУ).

Този начин за задвижване на кораба става все по-перспективен за корабите от Световния флот. Днес почти 100% от новите круизни кораби са с електрозадвижване, а Военноморският флот на САЩ още през 2000 г. обяви намеренията си за преминаване на новите военни кораби към ГЕУ.

Възможни са гребни уредби с различни типове двигатели. Най-разпространената схема е тази, при която се използва енергията на няколко дизелгенераторни агрегата за задвижване на един или няколко гребни електродвигателя, въртящи съвместно гребен вал с винт. Схемата на разположението на основните агрегати в машинно отделение е показана на фиг. 24.24: 1 е гребният двигател, 2 - вспомогателните дизелгенератори, 3 - главният дизел, 4 - котелната уредба. Възможно е обаче използването и на други начини за привеждане на кораба в движение - например посредством





Фиг. 24.24

роторни двигатели (при подводниците), крилчати дигатели, водометни двигатели, двигателни гондоли и пр.

• **Видове ГЕУ.** ГЕУ са няколко вида, в зависимост от основните принципи на компоновката им. Преди всичко се делят на *постояннотокови ГЕУ* и *променливотокови ГЕУ*, въз основа на типа на

използваната електрическа енергия. Съществуват и ГЕУ за променлив и постоянен ток, при които електрическата енергия се генерира от променливотокови генератори, изправя се от полупроводникови изправители и се преобразува в механична от постояннотокови двигатели. По този начин се съчетават достоинства на променливотоковите уредби с добрите възможности за регулиране на постояннотоковите двигатели. В резултат на развитието на полупроводниковите технологии стана възможно създаването на променливотокови ГЕУ с полупроводникови преобразуватели, захранващи асинхронни двигатели.

В зависимост от типа на първичните източници на енергия, ГЕУ са *дизелови, турбинни* или *атомни*: Дизеловите имат най-висок к.п.д., в тях най-често се използват неревърсивни високооборотни дизели на  $1\ 000-1\ 500\ \text{min}^{-1}$ , което позволява да се намалят габаритите на уредбата, при мощност за всеки агрегат около  $8\ 000-12\ 000\ \text{MW}$ .

В турбоелектрическите гребни задвижвания като първичен източник на енергия се използва парна или газова турбина. Скоростта на въртене на такива турбинни уредби е  $3\ 000-6\ 000\ \text{min}^{-1}$ , а мощността на единичен турбоагрегат е значително по-голяма от тази на дизеловите агрегати.

Атомните ГЕУ са значително по-мощни и сложни от другите корабни силови уредби. Получаваната в ядрения реактор топлина се използва за получаване на пара, която задвижва турбоелектрически агрегати. Този тип уредби изисква по-висока степен на автоматизация и значително по-висококвалифицирано обслужване от персонала. Коефициентът на полезно действие е приблизително такъв, същия като обикновените паротурбинни уредби, но за сметка на танковете за съхранение на гориво се увеличават полезният обем на кораба и неговата автономност.

• **Видове кораби, на които се използват ГЕУ.** От правилния избор на типа на първичния двигател и вида на уредбата, на етапа на проектиране на кораба в голяма степен се определят неговите технико-икономически по-

казатели. При този избор трябва да се преценяват и сравняват най-важните от тях - мощността на уредбата, коефициентът на полезното ѝ действие, типът на използваното гориво, масата и габаритите на уредбата, удобствата при нейната компановка на кораба, автономността ѝ и други изисквания към кораба.

Гребните електрозадвижвания са се наложили като най-подходящи за различните видове кораби, при които е необходимо гребната уредба да работи при често маневриране и промяна на скоростта на въртене, при висока надеждност в тежки условия на плаване, при необходимост от основната енергетична уредба на кораба да се захранва и друго корабно електрообзавеждане. Прилагането им на пътническите кораби позволява вследствие на намалената валова линия да се достигнат по-малки вибрации на корпуса и, съответно, по голям комфорт за пътниците. Пример за това е използването на ГЕУ на един от най-новите съвременни лайнери „Queen Mary 2“. При ледоразбивачите и риболовните траулери, благодарение на големите възможности за гъвкаво управление на момента и скоростта на въртене на винта, се оказва възможно достигането на оптимални характеристики на задвижването на кораба. Използването на ГЕУ е целесъобразно и на кораби от техническия флот (буксири, дълбачки, плаващи кранове и др.).

• **Предимства и недостатъци на ГЕУ.** Гребните електрозадвижвания имат следните *предимства*, осигурили им широко приложение:

• Отсъствие на твърда механична връзка на гребния винт с първичния двигател, което позволява по-голяма свобода при компановането на обзавеждането в машинното отделение и намаляване на дължината на валовата линия.

• Възможност за използване на високооборотни двигатели като първични източници на механична енергия, което намалява чувствително габаритите на уредбата и, съответно, необходимия обем за нейното разполагане на кораба.

• Широк диапазон на регулиране на оборотите на винта и възможност за формиране на оптимални характеристики на задвижването.

• Висока икономичност при продължителна работа на малки и средни честоти на въртене на винта.

• Възможност за гъвкаво използване на енергията на няколко първични механични уредби и, като следствие - повишена живучест на кораба, удобства при ремонта и ефективна експлоатация на отделните агрегати в състава на уредбата.

• Възможност за използване на част от енергията на гребната електростанция за захранване на общокорабната електрическа мрежа.

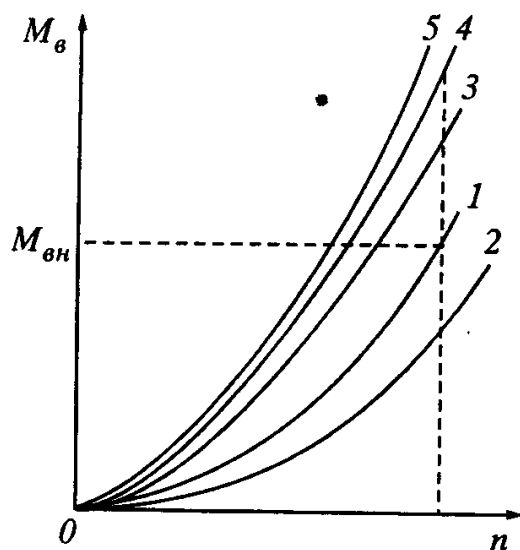
### Недостатъци:

- малко по-големи начални инвестиции и по-висока цена;
- малко по-нисък коефициент на полезно действие;
- по-голяма численост на обслужващия персонал.

### 24.4.2. Особености на корабните ГЕУ

*Особености на товарните характеристики на ГЕУ, определени от винта.* Очевидно е, че за да се построи правилно едно електрозадвижване, следва преди всичко да се познава добре начинът на неговото натоварване.

Корабните двигатели придават ускорение на масата вода в направление, противоположно на движението на кораба. Силата, с която системата на задвижване оттласква масата вода, е равна на силата, задвижваща кораба. Тази сила се предава чрез гребния вал и упорния лагер на корпуса на кораба и се нарича *задвижваща* или *упорна сила*. Упорната сила и моментът на съпротивление на винта зависят от много фактори - плътността на водата, диаметъра и стъпката на винта, конфигурацията на лопатките на винта, скоростта на движение на кораба и скоростта на въртене на винта. Тази зависимост не може да бъде представена в явна математическа форма. Ето защо, едновременно с теоретическите изследвания, се прибегва към изпитванията на модели, с помощта на които се определят криви, показващи натоварването, създавано от корабния винт.



Фиг. 24.25

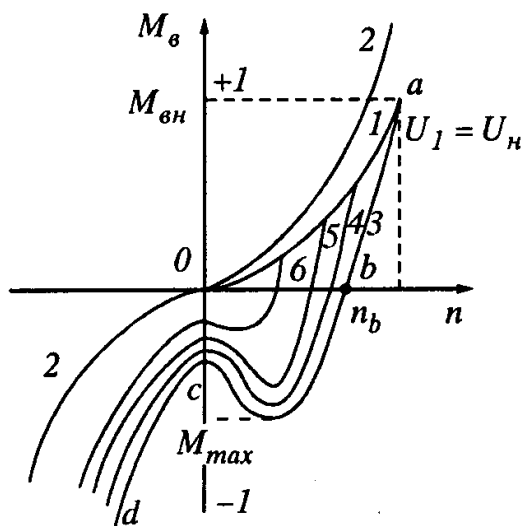
На фиг. 24.25 са показани зависимостите между съпротивителния момент, развиван от винта, и честотата на въртене на същия при различни условия на плаване: крива 1 показва тази зависимост при плаване в спокойна и свободна вода, крива 2 - при намалено газене; крива 3 - при буксиране; крива 4 - при швартован кораб, крива 5 - при плаване във води с дребен лед.

Тези криви могат да бъдат апроксимирани със зависимостта

$$M = K_g \cdot n^2 ,$$

където  $n$  е скоростта на въртене на винта, а  $K_g$  - коефициент, зависещ от условията на плаване и характеристиките на винта.

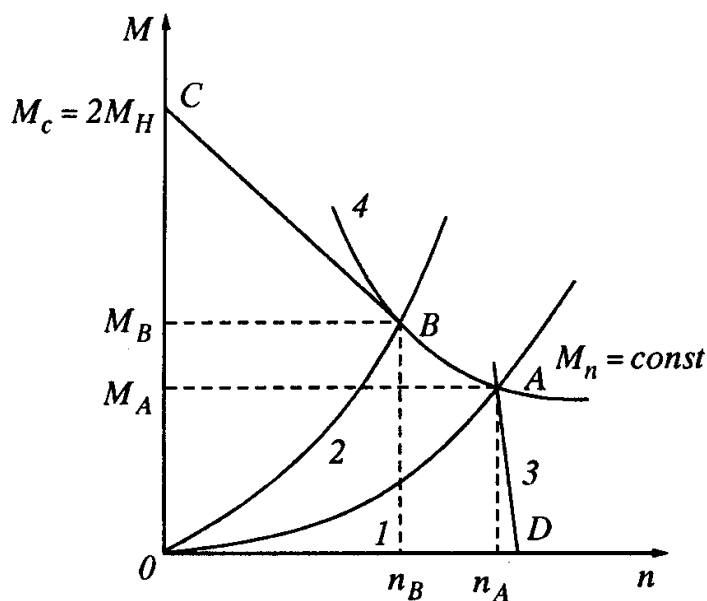
При маневра и при реверс на хода на кораба тези характеристики съществено променят вида си - фиг. 24.26: с 1 е отбелязана характеристиката за преден ход в свободна вода, с 2 - швартовата характеристика, с 3 - реверс



Фиг. 24.26

сивната характеристика при номинална скорост, с 4, 5 и 6 - реверсивните характеристики при съответно по-малки скорости. Този вид на реверсивната характеристика показва, че гребното електрозадвижване трябва да позволява работа в генераторен режим, когато потокът на обтичащата кораба вода увлича винта така, че развиваният момент сменя знака си.

За избора на електродвигател на електрозадвижването е необходимо да са известни следните характеристики: характеристиката на винта при свободно движение в спокойна вода и номинално газене, швартовата характеристика - при неподвижен кораб, реверсивната характеристика при номинална скорост и буксировъчната - за буксирите и други кораби от техническия флот. Електрозадвижването трябва да работи така, че да осигурява дълбоко регулиране на скоростта на въртене в свободна вода, работа при постоянна мощност при преход към швартова характеристика и максимален момент, не по-голям от двукратния при случайно заклиняване

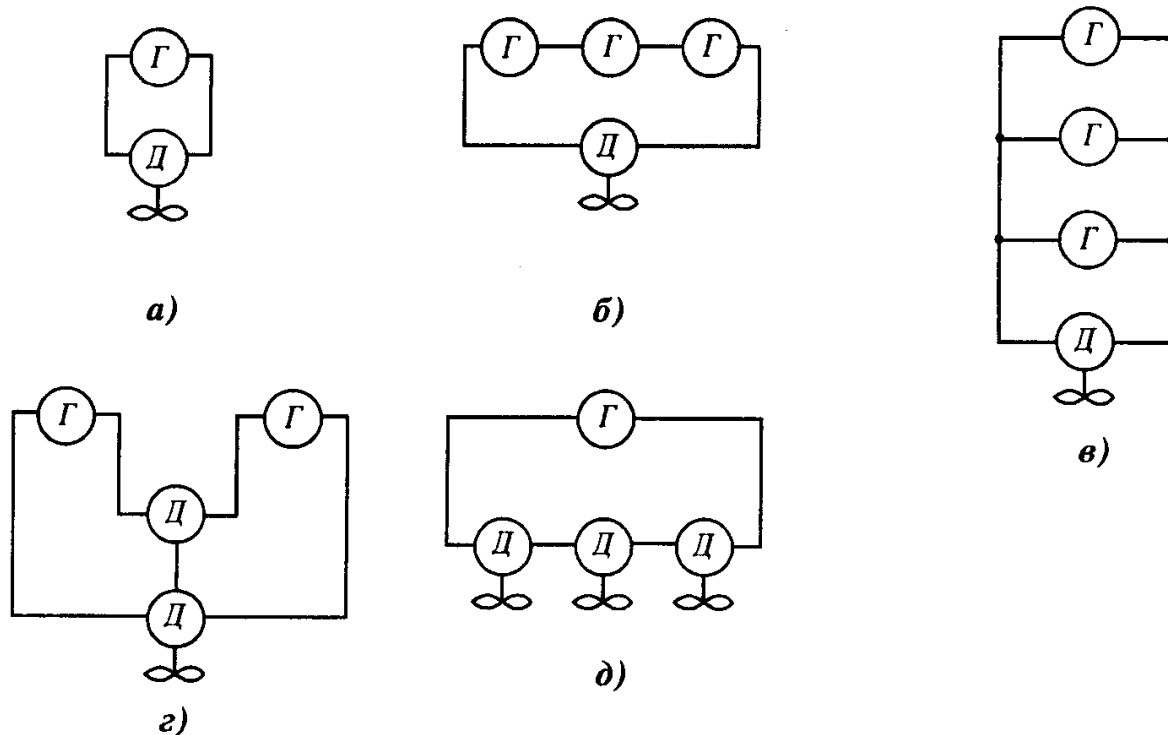


Фиг. 24.27

на винта. Това означава, че електрозадвижването трябва да има външна характеристика, подобна на характеристика 3 от фиг. 24.27, на която с 1 е обозначена швартовата характеристика, с 2 - характеристиката на винта в свободна вода, с 3 - характеристиката на задвижването, с 4 - кривата, при която мощността на вала е постоянна. Точката  $M_c$  определя развивания момент от гребната уредба при заклиняване на винта.

На фиг. 24.27 са съпоставени характеристиката на винта в свободна вода (1), швартовата характеристика (2) и желаната характеристика (3) на електрозадвижването. Различните видове електрозадвижвания се доближават до тези характеристики в различна степен, в зависимост от особеностите си.

• **Основни схеми на ГЕУ.** Поради сравнително лесното управление на постояннотоковите задвижвания чрез възбудителния ток на двигателя, на гребните уредби, построени преди няколко десетилетия, са прилагани основно уредби за постоянен ток. Вариантите им се отличават по броя на двигателите, последователното или паралелно свързване на генераторите и двигателите, и други схемни особености, водещи до различни предимства по отношение на оптималното използване на мощностите, габаритите и теглото на комутационната апаратура и разпределителните табла, и пр. Най-разпространените схеми на постояннотокови ГЕУ са дадени на фиг. 24.28а, б, в, г, д.

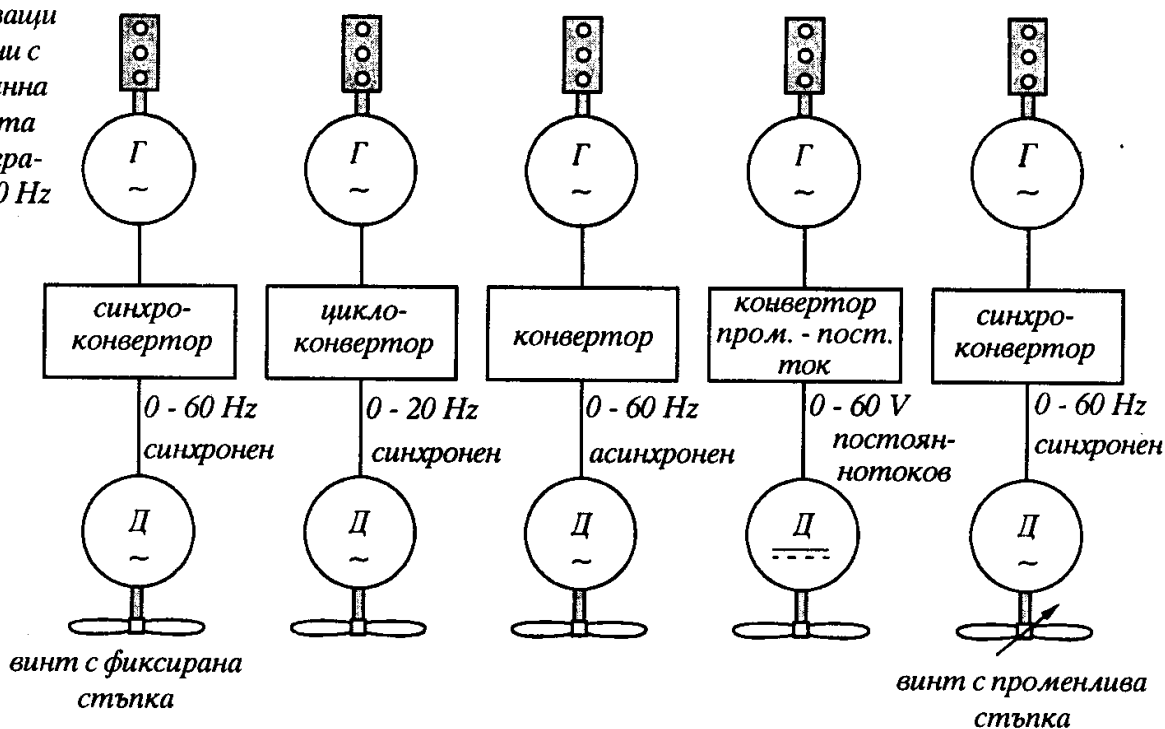


Фиг. 24.28

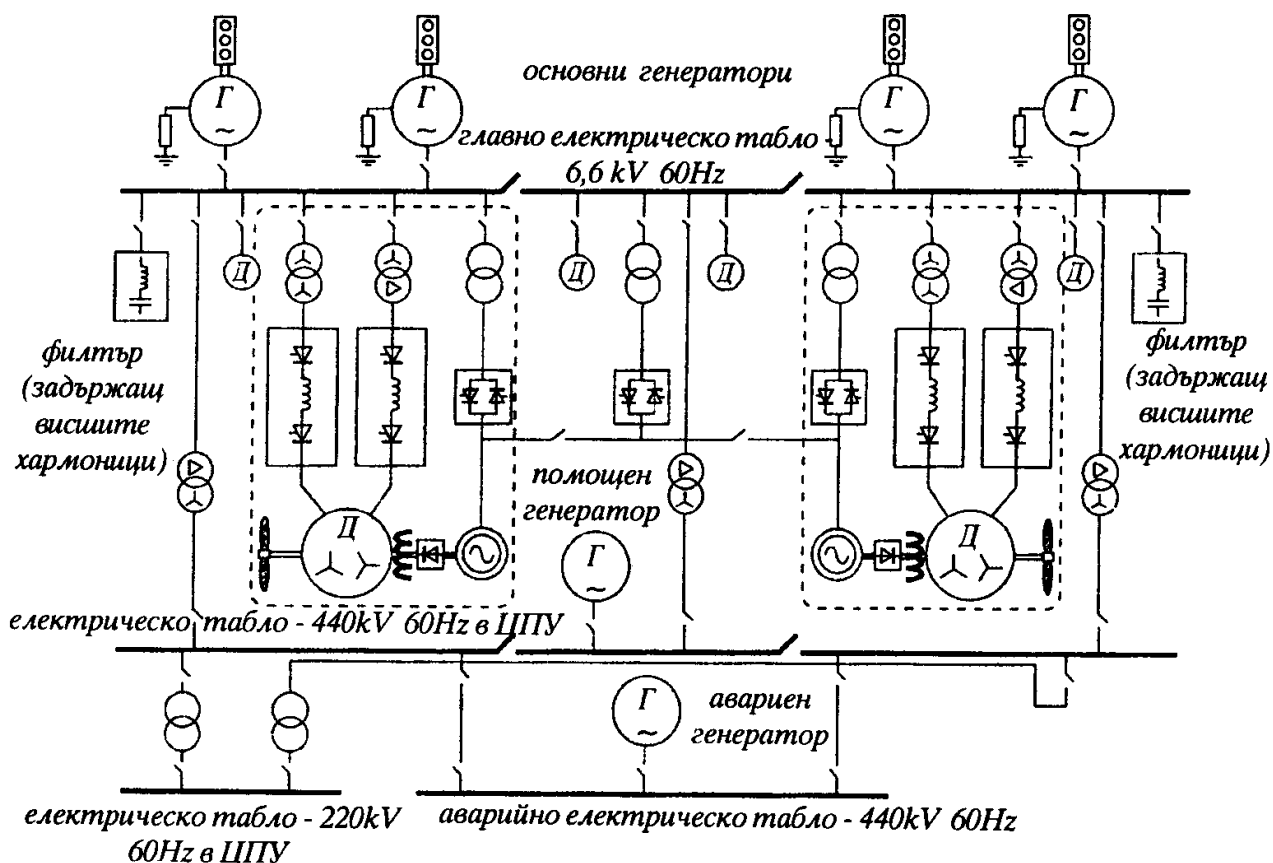
Понастоящем значително по-разпространени са ГЕУ за променлив или променливо-постоянен ток, при които електрическите генератори са най-често променливотокови, а двигателите - постояннотокови, управлявани през изправител, синхронни или асинхронни, управлявани от преобразувател на честота от различен тип. Варианти на такива схеми са дадени на фиг. 24.29, включително и с винт с регулируема стъпка, което облекчава изискванията към задвижването.

Общата схема на гребна енергетическа уредба, позволяваща захранването на два винта с помощта на полупроводникови преобразуватели и корабната мрежа, е показана на фиг. 24.30. Източниците на енергия са четири дизелгенератора, произвеждащи ел. енергия с напрежение 6,6 кV. Главни-

задвижващи  
машини с  
постоянна  
честота  
на генера-  
тора 60 Hz



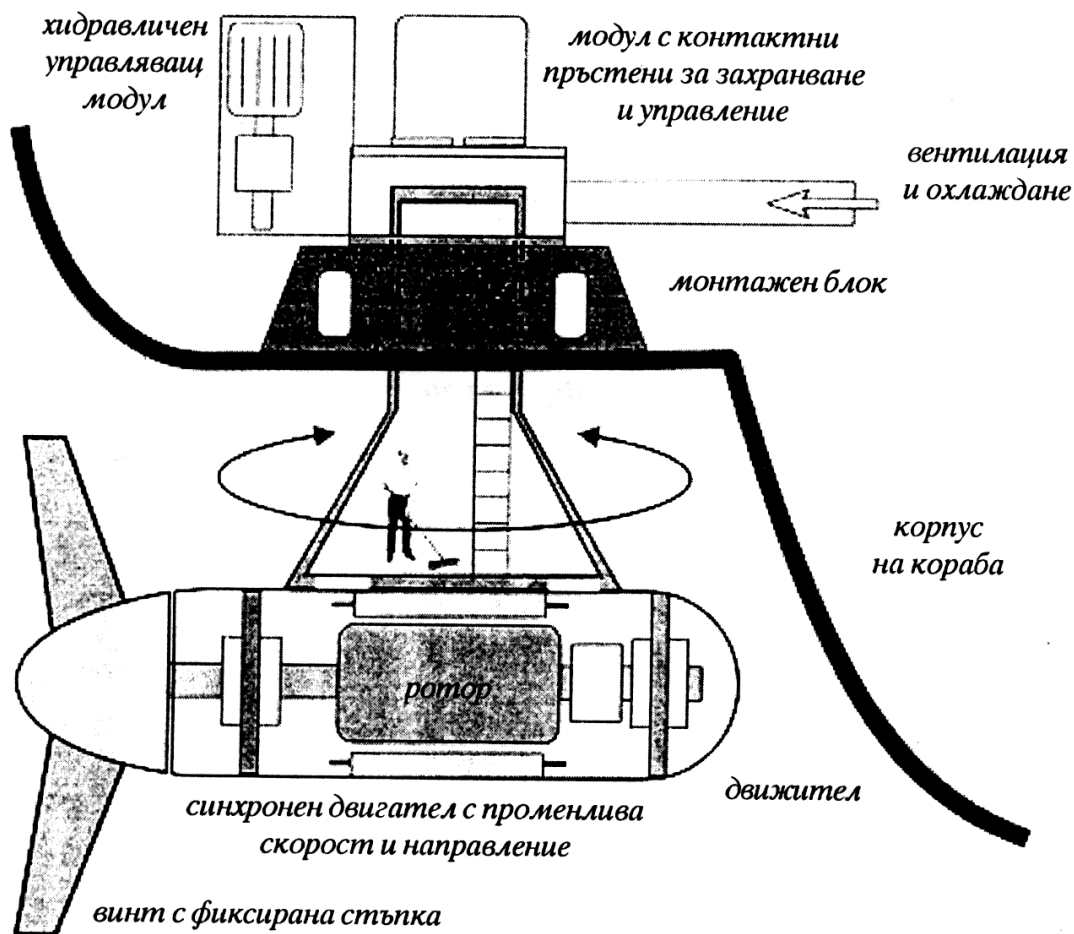
Фиг. 24.29



Фиг. 24.30

те шини са отделени от корабните с трансформатори, а преобразувателите на честота захранват две системи статорни намотки на всеки от синхронните двигатели. Поради обратното влияние на изправителите върху мрежата към главните шини са предвидени филтри, които да компенсират изкривяванията, предизвикани от преобразувателите. Корабната шинна система предвижда и захранване по два фидера от аварийен генератор.

На фиг. 24.31 е показана структурата на гребно електрозадвижване, при което захранваният от преобразувател асинхронен двигател е монтиран заедно с винта във от корпуса, в т. нар. гондола.



Фиг. 24.31

Гондолата може да се върти и около вертикалната си ос на закрепването с помощта на хидравлична система, като по този начин гребното задвижване поема ролята и на руля на кораба. Използването на преобразуватели на честота прави такова задвижване много ефективно и рязко намалява габаритите му. Както бе посочено по-горе, задвижвания от подобен тип се използват на много от модерните круизни кораби.

## Двадесет и пета глава

### КОРАБНИ ЕЛЕКТРИЧЕСКИ СИСТЕМИ ЗА УПРАВЛЕНИЕ, БЕЗОПАСНОСТ И СВРЪЗКА

#### 25.1. Корабни телеграфни системи

За осигуряване на безопасната експлоатация на корабите се налага използването на различни системи за предаване и приемане на информация от най-разнообразен характер. Нещо повече, както разнообразието на информацията, така и средствата за предаването/приемането ѝ се развиват непрекъснато.

Корабните телеграфни системи са едни от първите електрически системи за предаване на информация и управление на корабите. И сега се използват телеграфни системи за надежна връзка между мостика и машинното отделение (МО), както и с други постове за управление на кораба.

*Корабният машинен телеграф* се използва за предаване на заповеди за привеждане на главната енергетична установка в необходимото за предстоящата дейност състояние на кораба: маневриране, ход или стоянка. Телеграфът трябва да осигурява:

- предаване на заповеди за управление от мостика или крилата към машинното отделение, ЦПУ или местния пост за управление;
- потвърждаване на приетата от машинното отделение заповед чрез изпращане на отговор;
- задействане на сигнални средства, докато не бъде правилно потвърдена приетата заповед;
- излъчване на сигнал за тревога и блокиране на действието при грешно отработване на хода, особено при грешно реверсиране на ГД;
- изпращане на сигнал от машинното отделение до мостика при повреда на ГД и необходимост от понижаване на скоростта или спиране.

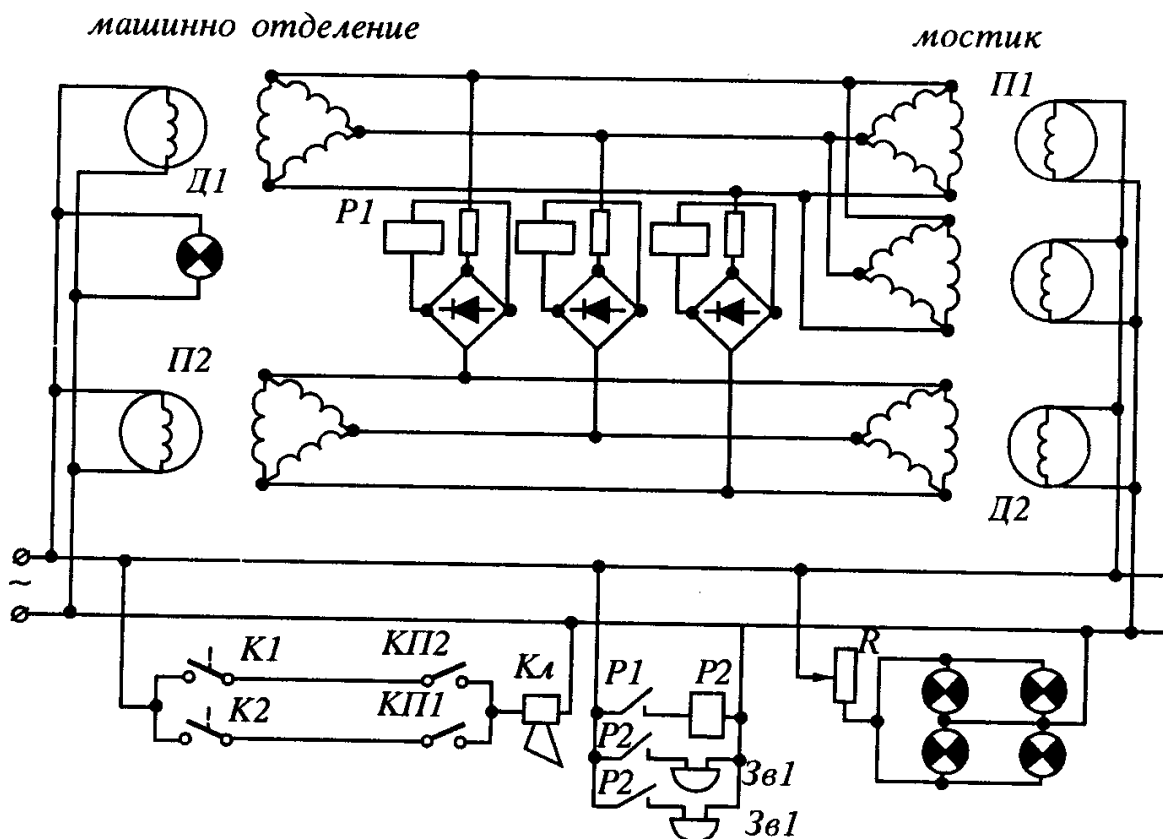
Корабният машинен телеграф е индикаторно-сигнална система за синхронна връзка. Той съдържа две независими системи за синхронна връзка и предаване на заповеди. Всяка система има два селсина - датчик и приемник. В някои случаи приемниците могат да бъдат повече от един. Всеки пост за управление съдържа датчик и приемник, които са елементи на различни системи, но са обединени в едно тяло. В колонката на мостика селсинът-датчик се използва за предаване на заповеди, а селсинът-приемник за приемане на отговорите от МО, докато в колонката на МО селсинът-датчик се



използва за даване на отговор, а селсинът-приемник за приемане на командата. Предвидена е и обратната възможност - заповедите да се дават от МО, а отговорите - от рулевата рубка на мостика.

Между двете независими информационни системи се включва чувствителният елемент на звукова сигнална система, която излъчва едновременно звуков сигнал на мостика и в МО при регистриране на най-малкото разсъгласоване.

На фиг. 25.1 е представена унифицирана схема на машинен телеграф, изпълнена от пет еднофазни селсина, работещи в индикаторен режим.



Фиг. 25.1

От схемата се вижда, че възбудителните намотки на всички еднофазни селсини се захранват от един и същи източник на еднофазно променливо напрежение. Наличието на захранващото напрежение се регистрира със сигнални лампи. На мостика силата на светене може да се регулира с цел избягване на заслепяването нощем.

Вторичните намотки на селсините са свързани в схема „триъгълник“. Роторът на всеки датчик се фиксира с помощта на механичен фиксатор. Преместването му става ръчно. Роторът на приемника заема само зададеното от датчика положение. Схемата работи по следния начин: Командата се

задава от мостика от селсина-датчик *Д2*. Завъртането на ротора на *Д2* на ъгъл  $\gamma$  означава отработване на същия ъгъл в МО от селсина-приемник *П2*.

Ако в МО забележат промяната, отговарят с преместване на ротора на датчика *Д1* в указаното от ротора на *П2* положение и приемниците *П1* потвърждават изпълнението на командата. Ако двете системи не се намират в указаното или друго равновесно положение (състояние), поне едно от релетата *Р1* ще заработи, ще се затвори контактът *Р1* във веригата на бобината на релето *Р2*. След заработването на *Р2* ще се включат звуковите и други сигнализиращи устройства (*Зв1* и *Зв2*) както на мостика, така и в МО. Сигнализиращите устройства ще работят дотогава, докато двете системи не се приведат в равновесно състояние. Така се подават командите от мостика и отговорите от МО: най-малък, малък, среден или пълен ход, напред или назад.

При грешно отработване (отговаряне) на посоката „преден“ или „заден“ ход е предвидена втора сигнализираща звукова система, изградена с помощта на крайни прекъсвачи *К1*, *К2* и *КП1*, *КП2*.

За повишаване на надеждността в работата на машинния телеграф скàлите са разделени на сектори (обикновено 9). Секторите на мостика се осветяват с регулируема осветеност.

Подобно е устройството и действието на котелните и рулевите телеграфи. На техните скàли са изписани съответстващите команди за предаване към котелното отделение или към румпелното отделение. Обикновено рулевият телеграф е дублиран с рулеви указател.

Според величината на въртящия момент, развиван от приемниците, в системите за синхронна връзка селсините работят в индикаторен или трансформаторен режим. Вторият режим се използва при задвижване на някои работни механизми.

Ако корабът има не един, а повече винтове (главни двигатели), за всеки винт трябва да бъде предвиден отделен машинен телеграф.

## **25.2. Звукови и светлинни сигнализации**

Независимо от развитието на средствата за комуникация, на корабите задължително се предвижда звукова и светлинна сигнализация за подаване на сигнали в нормални и аварийни условия на експлоатация на кораба.

*Сигналните отличителни ходови светлини* са от изключително значение за безопасното плаване нощем. Затова са предвидени система за сигнализиране за прекъсване на линията за захранване (изгоряла крушка), както и възможност за дублиране на ходовите отличителни светлини. Ходовите светлини позволяват правилно да се определи как ще стане разминаването/изпреварването с останалите кораби. Освен това могат да се излъчват и

специални сигнали за опасност: „опасен товар“, „липса на ход“, „липса на управление“ и т.н.

Много често се налага използването на светлинен „морзов ключ“ - „ал-дис“, при запитвания, както и на специални мощни прожектори при изпълнението на операции за търсене и спасяване на пострадали или пък при преминаване през теснини.

При лоша видимост се използват мощни звукови източници „тифони“. Най-често тифоните работят с въздух под налягане, но клапанът за въздуха се управлява с електромагнит. Тифонът може да се задейства ръчно от бутони или с механичен привод, намиращи се в рулевата рубка. Обикновено се предвижда и автоматизирано програмно управление.

**Авралната сигнализация** трябва да достига и до всички части на кораба без изключение, независимо от състоянието на корабната електроенергетична система. Затова се захранва и от акумулаторна батерия, работеща в буферен режим на заряд. В нормални условия захранването на авралната сигнализация става от захранващ блок, а при обезточване на системата захранването се превключва към акумулаторната батерия.

Тъй като звуковите сигнали са най-разнообразни, се използват различни електроакустични устройства: звънци, камбани, ревуни, клаксони и др.

Авралната сигнализация се задейства ръчно от рулевата рубка. Тя е изпълнена с помощта на мощни звънци (камбани) за постоянен ток херметичен/водозащитен тип, които се захранват чрез кабели и разпределителни кутии и стопяеми предпазители за всяка линия.

За правилното излъчване и приемане на авралните сигнали се предвижда поставянето на легенда във всяка каюта и всички общи помещения.

Звуковите/светлинните сигнали се излъчват във вид на точки и тирета, като в морзовата азбука.

Поради изключителната опасност при използването на **CO<sub>2</sub> системата** за гасене на пожари, се предвижда специална звукова и светлинна сигнализация за включено гасене със същата система, която е специално обозначена и озвучена.

На пасажерските кораби е силно развита **битовата сигнализация**, подобна на хотелската сигнализация.

На корабите с безвахтено обслужване е предвидена звукова и светлинна сигнализация, наречена „**вахтен механик**“, свързана със системата за централизиран контрол на главната енергетична установка. На мостика и в каютите на главния механик и на вахтените механици се монтират сигнални табла от оповестителната уредба на системата за централизиран контрол и безвахтено обслужване. Подобни оповестителни табла има и в местата за почивка на личния състав, както и в канижелите. На всички изброени опо-

вестителни табла излиза звуков и светлинен обобщен сигнал за проблем с някой от параметрите, следени и контролирани от системата за централизиран контрол.

**Пожароизвестителната сигнализация** е задължителен атрибут на всеки съвременен кораб. Нейната задача е да открие и да сигнализира възникнал пожар или опасност от възникване на пожар, като обозначава и мястото на огнището му. За целта се използват звънциите на авралната сигнализация. Те могат да се изключат от вахтения помощник, от таблото, монтирано в рулева рубка, дори преди да е потушен пожара.

Управляващият блок на пожароизвестителната уредба е произведен на базата на електронни елементи интегрално изпълнение (най-често). Той следи непрекъснато състоянието на „лъчите“ (линиите), с включени пожароизвестителни датчици и бутонни постове. Поради изключителната отговорност, пожароизвестителната уредба се захранва от две места: от аварийното разпределително табло и от акумулаторна батерия.

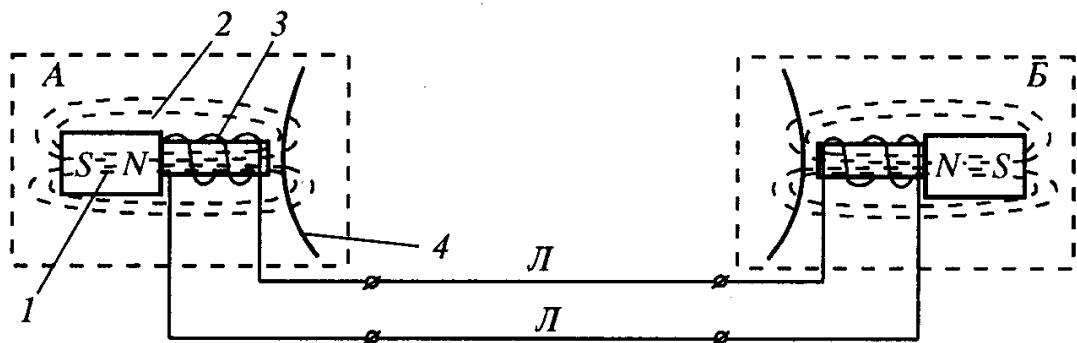
По принцип, във всеки лъч могат да бъдат включени датчици от различен тип, както и бутонни постове. Датчиците могат да бъдат: температурни, диференциални и димови. Температурните датчици се произвеждат да сигнализират за температури от 70° до 90°C. Диференциалните датчици сигнализират за нарастването на температурата, преди още да са сработили температурните датчици. Димовите датчици сигнализират преди повишаването на температурата, още при появата на дим или пламък. Често ги наричат йонизационни датчици. За повишаване на надеждността на сработване някои фирми произвеждат такива датчици, използвайки и радиоактивни материали. Други фирми използват фотоефекта за изработване на димови датчици.

Управляващият блок следи състоянието на всеки лъч чрез непрекъснато измерване на постоянния ток, консумиран от всеки лъч. Ако лъчът е изправен, консумираната от линията мощност е минимална и показва, че линията не е прекъсната. Ако линията се прекъсне, токът е нула и такова състояние се сигнализира като повреда. Ако се наруши състоянието на изолацията на който и да е от проводниците на линията, също се сигнализира. При задействането на който и да е датчик токът на линията става максимален и за линията се сигнализира „пожар“. Освен това се задейства авралната сигнализация и се прекъсва захранването на вентилаторите или се прекратява достъпа на въздух (кислород) към помещението, в което е възникнал пожарът. Ръчните бутонни постове също задействат сигнализацията за пожар и се разполагат в коридорите, надстройката и други помещения - близо до изходите/вховете.

### 25.3. Корабни системи за телефонна свързка

На корабите са намерили приложение следните телефонни системи: без-батерийни (без захранване), батерийни, работещи с източник на захранване, и безжични (радио-) телефонни системи. Обикновено батерийните и радио-телефонните използват акумулаторни батерии, работещи в буферен режим на зареждане. Напоследък батерийните телефонни системи се развиват с изключителна бързина и с използване на последните технологии в развитието на средствата за комуникации. Всеки от вариантите на батерийните телефонни системи може да работи определено време при обезточване на кораба.

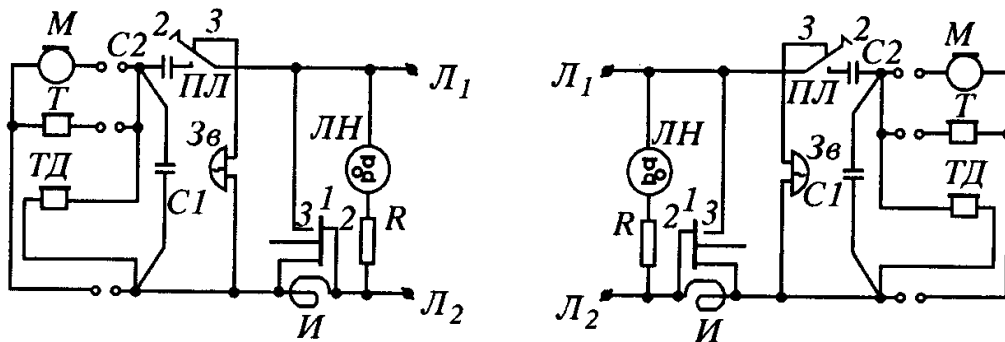
На фиг. 25.2 е дадена схема, поясняваща действието на *безбатерийната телефонна система*. От нея се вижда, че микрофонът и телефонът са с еднаква конструкция. Във всеки от тях има постоянен магнит 1, ядро 2, бобина 3 и феромагнитна мембрана 4. Магнитът създава постоянен магнитен поток, привличащ мембраната. При разговор мембраната на микрофона трепти с честотата и амплитудата на звуковите вълни. Механичното трептене на мембраната променя въздушната междина (магнитния поток) в магнитната верига. Промяната на магнитния поток индуцира е.д.н. с честота и амплитуда като на механичните трептения. През линията за свързка и бобината на слушалката протича ток със същата честота. Токът на бобината предизвиква изменение на магнитния поток в слушалката. Променливият магнитен поток на слушалката предизвиква трептене на мембраната, а тя генерира звукови вълни като звуковите вълни в микрофона. Постоянният магнит е необходим за засилване на звука и изключва появата на изкривявания.



Фиг. 25.2

На фиг. 25.3 е дадена прищипната електрическа схема на широкоразпространения безбатерийен телефонен апарат „ТАК-Б“ и начинът на свързването му с още един. Те са абсолютно еднакви и са изградени от: микрофон  $M$  и телефон  $T$ , монтирани в обща микротелефонна гарнитура, свързана със щепселно съединение, допълнителен телефон  $ТД$ , поляризован звънец за променлив ток  $Зв$ , сигнална неорова лампа  $ЛН$ , индуктор за променлив ток  $I$  с контактите 1, 2 и 3, лостов превключвател  $ПЛ$  с контактите 1, 2 и 3, конден-

зитор  $C1$  и кондензатор  $C2$ , намаляващ тока през линията при смет микро- телефон и случайно повикване от трети апарат. В телефоните „ТАК-Б“ се използват еднакви устройства за микрофон и телефон - диференциални елек- тромагнитни капсули ДЭМ-4М. Кондензаторът  $C1$  изравнява честотните характеристики на микрофона и телефона. Допълнителният телефон се поставя на второто ухо, за да се изключи шума в помещението. Той може да бъде използван и като по-надежден телефон, тъй като е свързан директно в електрическата верига, а не със щепселно съединение.



Фиг. 25.3

Такава **директна телефонна свързка** се предвижда задължително меж- ду мостика и ЦПУ (МО). Работата ѝ се състои в следното: Повикването на абоната става със завъртане на индуктора  $I$ . Микрофонната гарнитура може да бъде снета или да се намира на апарата. Ако гарнитурата се нами- ра на апарата, с въртенето на индуктора светва  $ЛН$  и звъни  $Зв$ . Ако гарни- турата е снета, при завъртане на  $I$  светва  $ЛН$ , а  $Зв$  не звъни. Освен това променливото напрежение на  $I$  се подава към свързания абонат през ли- ниите  $Л1$  и  $Л2$ . Тогава звънецът  $Зв$  на абоната звъни, а  $ЛН$  свети. Така абонатът разбира, че го търсят по телефона. След като се вдигнат и двете телефонни гарнитури, контактите  $ПЛ$  се превключват. Изключва се звъне- цът, а се включва разговорната верига.

Освен директната, може да се реализира и **командна телефонна свързка**, която се осъществява с помощта на комутатор. Обикновено на централ- ния телефон е предвиден комутатор с 10 поста. С комутатора може да се из- бира абонатът и да се звъни само на него, а не на всички абонати. Всички аба- нати могат да повикат централния. Те могат да говорят и помежду си, но централният телефон трябва да повика втория абонат. Периферните теле- фони се монтират в отговорни помещения и постове. Командната телефонна свързка позволява свързка на централния абонат с всички абонати.

Телефонната свързка по системата с комутатори обединява по някол- ко поста. На всеки пост има телефонен апарат с превключватели (кому- татор). Абонатите от такава система могат да се набират, повикват и да раз- говарят помежду си.

Разгледаните дотук безбатерийни телефонни системи се отличават с изключителна надежност и се използват за служебни цели. Както се вижда от изложението, за нормалната им работа не е необходим източник на захранване. Поради това те могат да работят неограничено време след обезточване на кораба. Недостатък е, че могат да се използват за свързка на ограничени разстояния, тъй като нямат усилвател, компенсиращ затихването на сигнала в дългата линия.

Комуникациите между абонатите могат да се осъществяват и с приоритетно избиране. Например капитанът може да прекъсне всеки воден телефонен разговор и да отдаде разпорежданията, нетърпящи отлагане. В такива случаи няма зает абонат.

*Батерийните телефонни системи* се използват за осъществяване на кабелна или безжична свързка на по-големи разстояния. Исторически първи са корабните автоматични телефонни централи (КАТЦ). Първите им варианти са били реализирани със стъпкови избирачи, релейни схеми, а следващите варианти - с квазиелектронни елементи. Изработвали са се с по-малко или 100 абоната. Напоследък все по-широко приложение на корабите намират цифровите и микропроцесорните телефонни централи, особено на модерните пасажерски кораби, където абонатите достигат хиляди.

Всяка батерийна телефонна система съдържа микрофон въгленов тип, телефон, проводяща среда (проводници или ефира) и логическа система, осъществяваща електрическата връзка между конкретни два абоната.

Първите варианти на КАТЦ се характеризират със значителен разход на електрическа енергия, грешки при избирането на абоната и лошо качество на свързката. Особено сериозни проблеми са създавали вибрациите, високите нива на естествения шумов фон и температурните изменения.

Електронните варианти на КАТЦ аналогов тип намаляват значително напрежението и консумацията на електрическа енергия, като подобряват чувствително, но недостатъчно, както качеството на разговора, така и верността на избора на абоната.

Използването на последните достижения в микропроцесорните технологии снижава изключително разхода на електрическа енергия. Грешките при избиране на абоната са изключение, а качеството на телефонния разговор, дори и с жичен телефон, е на изключително ново ниво.

За подобряване на качеството на свързката в условията на висока шумност се използват не микрофони, а остеофони. Те приемат не звуковите колебания, а колебанията на лицевите кости в процеса на говорене.

С въвеждането в сила на последните анекси към Конвенцията „STCW“ използването на радиотелефонна и сателитна свързка за осигуряването на сигурността и безопасността на плаване на корабите от съвременния морски флот стават задължителни, а проблемите с осъществяването на надеж-

дна свръзка с брега остават в историята. Вече е абсолютно нормално от кораба да се осъществява отлична и надеждна свръзка с всеки телефонен абонат, в която и да е точка по света и в Космоса.

**GMDSS** системите работят изключително надеждно като осъществяват радиотелефонна и телексна свръзка, както и когато излъчват и приемат автоматично сигнали за бедствие при необходимост.

На съвременните кораби е нормално използването на местна система за радиосвръзка между всички членове и гости на екипажа. Такива системи използват преносими пейджъри и GSM радиотелефони.

На корабите намират приложение **УКВ радиотелефонни и проговорни уредби за свръзка**, особено по време на маневра при заставане/снемане на кея, на котва, буксирни операции и други подобни случаи. В такива случаи намират приложение говорителите с вградени микрофони. Тези системи позволяват двустранна комуникация, без използването на ръцете. Подобни проговорни уредби се използват и за оповестяване на екипажа и пасажерите в битовите помещения и каютите.

#### **25.4. Магнитно поле на кораба**

Магнитното поле на кораба е слабо поле. В най-общ план то се проявява в изменението на магнитното поле на земята в обема на кораба и около него. Основни източници на корабното магнитно поле са **намагнитеността** на феромагнитните материали, от които е построен кораба, както и **работата на електрообзавеждането** на кораба. В зависимост от материалите, използвани при строителството на кораба, основният дял на магнитното поле на кораба възниква вследствие на източниците от първия или втория тип. За повечето от корабите това е намагнитеността на феромагнитните материали в магнитното поле на земята, поради което тук ще бъде разгледан основно този вариант.

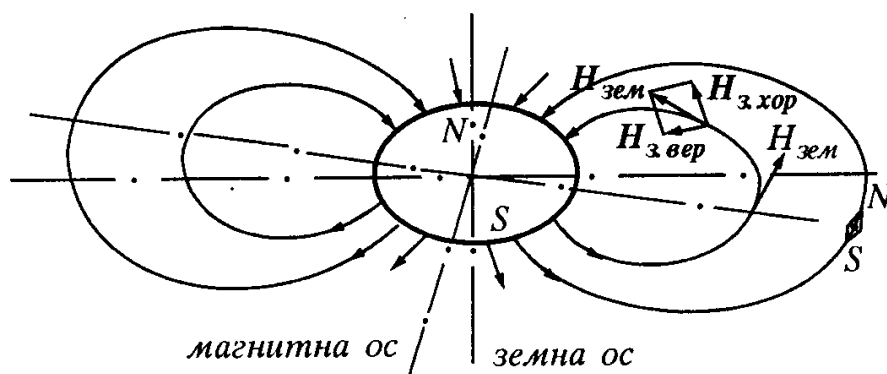
За първи път магнитното поле на кораба се споменава през 1774 г., когато капитан Кук установява значителна грешка в показанията на магнитния компас. През ХХ-ти век беше разработено и все още се използва и разработва неконтактно морско оръжие, за задействането на което също се използва магнитното поле на кораба.

#### **25.5. Магнитно поле на Земята**

Земята представлява огромен постоянен магнит с незначителни вариации. Магнитните ѝ полюси се намират близо до географските, но са противоположни. До северния географски полюс се намира южният магнитен, и обратно - до южния географски полюс се намира северният магнитен. Това откритие е исторически резултат от използването на магнитния компас.



Както се вижда от фиг. 25.4, стрелката на магнитния компас ще сочи северния географски полюс.



Фиг. 25.4

При изучаване на магнитното поле на Земята се използват магнитният интензитет и магнитната индукция. Обикновено те се разлагат на хоризонтална,  $H_{з хор}$  и вертикална,  $H_{з вер}$  съставки в относителна координатна система, ориентирана по повърхността на земята в обследвания район. Прието е  $H_{з вер}$  да бъде с положителен знак в северното полукълбо на Земята и с отрицателен знак - в южното. Както се вижда от фиг. 25.4, вертикалната проекция е максимална на полюсите, където  $H_{з вер}$  е приблизително 52 А/м, а там  $H_{з хор} = 0$ . На екватора  $H_{з хор}$  е около 32 А/м, а  $H_{з вер} = 0$ . Разбира се, това са ориентировъчни оценки, тъй като в магнитното поле на Земята съществуват значителни аномалии (неравномерности) и магнитни вариации, свързвани и със слънчевите магнитни изригвания.

Магнитното поле на Земята се изследва непрекъснато от множество специално построени обсерватории по цялото земно кълбо. Такава обсерватория има и у нас край Панагюрище. За целта се провеждат и множества морски експедиции със специално произведени и обзаведени кораби. За моряците особен обект на изследване са морските аномалии на магнитното поле на Земята, например магнитната аномалия в Бургаския залив.

## 25.6. Основни характеристики на магнитното поле на кораба

Магнитното поле на кораба се изследва и описва в случаите, когато трябва да се определи девиацията на корабния магнитен компас или да се формулира степента на защита на кораба от подводно оръжие с магнитен канал на търсене, следене и унищожаване.

В най-общ план магнитното поле на кораба се описва със системата уравнения на Дж. Максвел за стационарни, статични или квазистационарни магнитни полета. Когато се изследва полето в обема на кораба, решението на системата уравнения се свежда до решение на уравнението на Пуасон, а когато се изследва полето извън източника - до решение на уравнението на Лаплас.

Посочените и множество други теоретични методи на изследване на магнитното поле на кораба са достатъчно сложни и излизат извън рамките и целите на настоящия учебник. Затова тук магнитното поле на кораба ще бъде представено по възможно най-опростения начин - описателния. При това ще бъде разгледан главно кораб, построен с обикновени феромагнитни материали, което е най-често срещаният случай в практиката.

За целта е необходимо да припомним някои основни свойства, характеристики и поведение на феромагнитните материали, от които е построен кораба:

Тъй като за построяване на корабния корпус най-често се използва корабостроителна стомана, а и поради екраниращото действие на корпуса по отношение на останалите вложени материали, ще се спрем основно на феромагнитните свойства и поведение на меките феромагнитни материали.

Корабостроителната стомана има значително тясна хистерезисна крива на пренамагнитване. Все пак тя е значително по-широка от хистерезисната крива на специалната електротехническа ламарина или други подобни. Така че остатъчната магнитна индукция и коерцитивната сила на корабостроителната стомана са значителни, а това е достатъчен белег за значителна стойност на остатъчната намагнитеност на основния корабостроителен материал.

Всеки лист корабостроителна ламарина се намагнитва перманентно (устойчиво) още в процеса на производството в стоманодобивното предприятие и придобива свойствата на постоянен магнит, тъй като производството се осъществява в магнитно поле, различно от 0 - магнитното поле на Земята.

**Перманентното намагнитване** на материалите зависи от интензитета на магнитното поле на Земята в мястото на производство и се променя в процеса на производството на кораба. То зависи нееднозначно и от множество производствени и експлоатационни фактори, съпровождащи неотлъчно производството и експлоатацията на кораба. Такива са: свойствата на феромагнитния материал, мястото и ориентацията на кораба по време на построяване, начинът на разкрояване и подреждане на листовите ламарина, технологията на производство, механичните напрежения на материала и промяната им по време на плаване и т.н. Най-често перманентното намагнитване на кораба се формира окончателно по време на ходовите изпитания, за които почти винаги се избира бурно време: най-малко 5-6 бала вълнение и сила на вятъра.

Феромагнитните материали притежават и **променливо (неустойчиво, индуктивно) намагнитване**. То е резултат на неустойчивата промяна (преориентиране) на магнитните моменти на домените под въздействието на маг-

нитното поле на Земята и динамичните изменения на механичните напрежения в материала при движението на кораба. Зависи също от крена и диферента, скоростта на клатене, вида и режима на работа на електрообзавеждането на кораба и т.н. Посоката на индуктивното намагнитване на кораба следва приблизително посоката на магнитното поле на Земята - фиг. 25.5a (ако се вземе линията на един земен меридиан от полюса до екватора, то интензитетът на земното магнитно поле спрямо кораб, намиращ се на тази линия, ще бъде насочен, както е показано на фигурата). Индуктивното намагнитване на кораба се променя непрекъснато по време на плаването и зависи от:

- величината и посоката на вектора на напрегнатостта на магнитното поле на Земята в мястото на плаване на кораба;

- положението на кораба по отношение на вектора на напрегнатостта на магнитното поле на Земята (курсът на плаване, крена и диферента);

- магнитните свойства на материалите за построяване на корпуса и останалите елементи на кораба;

- обемът и формата на корабния корпус (водоизместването и съотношението на главните размери).

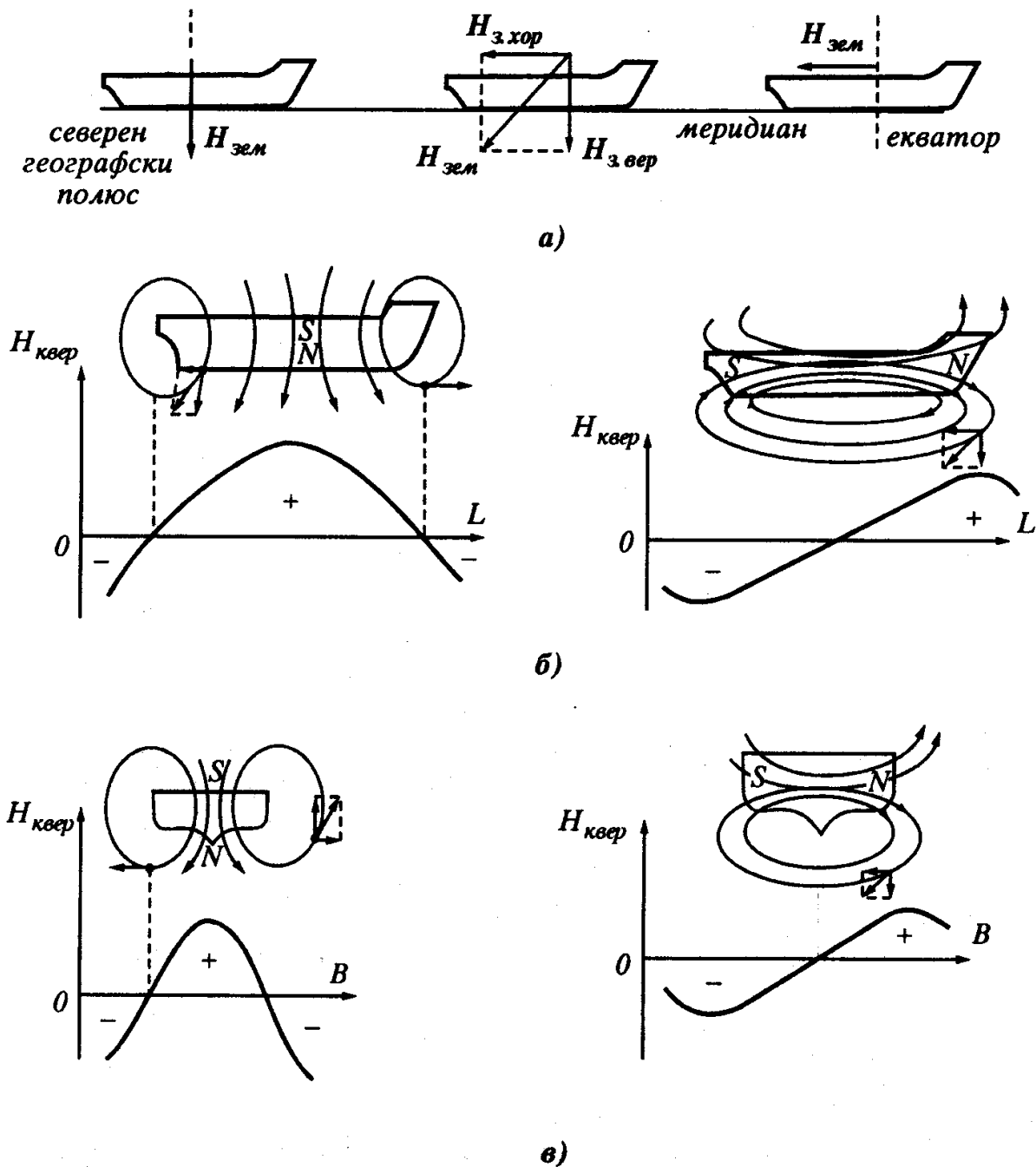
Производството и монтажът на всички елементи, както и построяването на кораба, представлява в магнитно отношение сумиране на постоянни и променливи магнитни полета на съставните елементи. В резултат след построяването на кораба се получава резултантно перманентно и резултантно променливо магнитно поле на кораба. Тези полета се обединяват в резултантното магнитно поле на кораба. *Източници на магнитното поле на кораб със стоманен корпус са резултантната перманентна и променлива намагнитеност* на кораба.

Редица експериментални и теоретични изследвания сочат, че основният източник на корабното магнитно поле е намагнитеността на корпуса на кораба. Това е лесно обяснимо по две причини: на първо място, масата и обемът на корпуса са многократно по-големи от останалите корабни елементи; на второ място, не е без значение и екраниращото действие на корпуса.

По принцип перманентната (постоянната) намагнитеност е прието да се счита за неизменна по време на експлоатацията на кораба, докато променливата намагнитеност по време на експлоатацията се променя непрекъснато.

След завършване на постройката на кораба се оформя изключително сложно в магнитно отношение тяло. Все пак, в направление на надлъжната ос и постоянната, и променливата намагнитеност са най-големи, тъй като в надлъжното направление тялото се намагнитва най-лесно. До това заключение се достига както при анализ на експериментални резултати, така

и при теоретичен анализ на коефициента на формата на корабния корпус и кораба като цяло. Във вертикално направление корпусът се намагнитва по-трудно и намагнитеностите в това направление са по-малки по величина. В напречно направление корабът се намагнитва най-трудно.



Фиг. 25.5

## 25.7. Представяне на корабното магнитно поле

За по-лесно описване, корабното магнитно поле се представя като сума от полетата на три намагнитености в направленията на трите главни оси на корабния корпус:

- намагнитеностите по надлъжната ос;
- намагнитеностите по вертикалната ос;
- намагнитеностите по хоризонталната ос.

Намагнитеността на корабния корпус, в което и да е главно направление, създава обемно магнитно поле - поле с проекции по трите главни координатни оси на кораба. За определяне и компенсиране на девиацията на корабния магнитен компас е необходимо да се определят всички проекции от всички намагнитености и, най-вече, по надлъжната ос. За осигуряване на защитата на корабите от морските оръжия най-често се използват само вертикалните проекции, тъй като оръжието се ориентира много лесно по вертикалната ос. Поради това и поради ограничеността на настоящото изложение, на фиг. 25.56 и 25.5в са представени само вертикалните проекции от различните намагнитености по главните оси на кораба. Освен това се предполага, че намагнитеностите по всяка главна ос са симетрични, което е практически изключено. Независимо от допускането, че магнитното поле на всяка намагнитеност е симетрично, след сумиране на полетата на трите намагнитености се вижда, че резултантното магнитно поле е винаги асиметрично.

За анализ на корабното магнитно поле са разработени редица теоретични и експериментално-аналитични методи.

Целта на настоящото изложение е опростено да бъдат представени някои методи за качествен анализ на магнитното поле на кораба, даващи ориентация в процесите на експлоатация на корабните компенсиращи устройства. Една от практическите задачи представлява определянето/отделянето на магнитното поле на кораба от индуктивната намагнитеност, както и описването му. *Полето на индуктивната намагнитеност* зависи от величината на вектора на интензитета на магнитното поле на земята в района на плаване на кораба, както и от ъгъла, който сключва кораба с него. Казано по друг начин, то зависи от района на плаване, от курса на плаване, от крена и диферента на кораба, както и от бордовата и килева качка на кораба. Всички изброени параметри търпят непрекъснато изменение във функция от времето. Именно тези изменения правят невъзможно намирането на точно и еднозначно решение на вече формулираните, както и на много други задачи.

Независимо от това, задача от първостепенна важност е оценката на вертикалната съставка на магнитното поле в мястото, където се намира корабът, тъй като взривателите на магнитните мини се задействат именно от вертикалната съставка.

Нека разгледаме няколко практически възможни случая:

**1. Корабът се намира в някой от магнитните полюси** на земното кълбо. Не е задължително това да са северният и южният магнитни полюси. Възможно е да се намира в силно изразена магнитна аномалия. Във всички тези случаи земното магнитно поле има само вертикална проекция на напрегнатостта. Хоризонталната му проекция е равна на нула. В този случай индуктивното намагнитване на кораба ще бъде само във вертикално направление. Например на южния магнитен полюс (северен географски) палубата ще бъде  $S$ , а кила -  $N$  полюс (фиг. 25.5а).

**2. Корабът се намира на магнитния екватор** и се движи на курс  $N$  - фиг. 25.5б. Тогава ще имаме случай на чисто надлъжно индуктивно намагнитване в показаната посока. В случая, както напречното, така и вертикалното индуктивно намагнитване ще отсъстват. В случай че корабът обърне курса на плаване на  $S$ , показаните на фиг. 25.5б полюси ще си разменят местата. В случай че корабът се движи на курс  $W$ , ще остане само напречно индуктивно намагнитване - фиг. 25.5в. Ако корабът се движи на курс  $E$ , показаните на фиг. 25.5в магнитни полюси ще си разменят местата. Ако плаването е на междинни курсове, ще има едновременно както надлъжно, така и напречно индуктивно намагнитване на кораба.

**3. Корабът се намира между полюсите и екватора** и се движи в произволен курс на плаване. В най общ случай корабът ще има индуктивно намагнитване и по трите си главни оси. Все пак, могат да се определят магнитните полета на индуктивните намагнитености в надлъжно и напречно направление, като се измери полето на едно и също място на всички основни курсове:  $N$ ,  $S$  и  $E$ ,  $W$ . За съжаление, промяната на географската (магнитната) ширина променя съотношението и величините на индуктивните намагнитеностите по главните оси на кораба.

Както се вижда от направеното изложение, определянето на индуктивните намагнитености, дори само в някои ограничени условия, изисква значителен разход на материални средства и значителен ресурс от време и специалисти.

По-удобно е и постоянната намагнитеност да бъде представена в трите главни за кораба направления. Приема се, че тя не се променя при смяна на курса и магнитната зона на плаване, но твърде често на практика не е така. Особено при плаване в щормови условия, учебни и бойни стрелби, потапяне и изплаване на подводните лодки, при взривове на борда постоянната намагнитеност се изменя и приема временно (до ново подобно произшествие) ново устойчиво/перманентно състояние. Ако корабът смени магнитната си зона на плаване, трябва да се очаква промяна и в постоянната намагнитеност.

## 25.8. Измерване на магнитното поле на кораба

Определянето на корабното магнитно поле по теоретичен път се оказва доста сложна задача, а и резултатите от решението са не винаги задоволителни. Затова практически полето се измерва със специално разработена за целта измервателна апаратура. При разработването ѝ се използват принципно различни физически ефекти: ядреният магнитен резонанс, явлението взаимна електромагнитна индукция и, най-често, поведението на някои феромагнитни материали в слабо магнитно поле. На базата на поведението на магнитните усилватели в постоянно магнитно поле, през 1937 г. д-р Фьорстер разработва най-често използваните магнитометри за измерване на магнитното поле на кораба. Те имат две разновидности - преносим и стационарен вариант. Ако се използва стационарният вариант на разполагане на датчиците, са възможни и се строят два типа полигони: за неподвижни и за подвижни кораби. В първият случай магнитното поле се измерва с множество (хиляди) датчици, стационарно установени на дъното на специален полигон. Във втория случай корабът преминава с постоянна скорост над значително по-малко количество датчици, показанията на които се сканират периодично и така се получават множество (хиляди) данни, записвани в памет. Датчиците могат да бъдат еднокомпонентни и трикомпонентни. Разработени са методи от математическата физика, които позволяват да се определят източниците на полето във всички направления по измерени данни само от вертикалната проекция (например). Тази възможност опростява значително изискванията към метода на измерването и към магнитоизмервателната апаратура.

Доскоро основните параметри на магнитното поле на кораба се определяха с използването на графоаналитични методи. Понастоящем всички системи за измерване са свързани в единна автоматизирана система за получаване и компютърна обработка на данните от измерването на магнитното поле на кораба. По този начин значително е увеличено количеството на добиваната информация, повишена е точността на решаване на задачите и, най-важното, съкратено е времето за обработка на данните.

Например като най-груб начин за определяне на полето на индуктивната намагнитеност се използва разликата в данните от измерването на противоположни курсове. Така могат да се определят и полетата от постоянните напречно и надлъжно намагнитвания. По-сериозен проблем представлява разделянето на полето на вертикалните постоянна и индуктивна намагнитеност, тъй като обикновено измерванията стават в един и същи район - в една и съща магнитна зона.

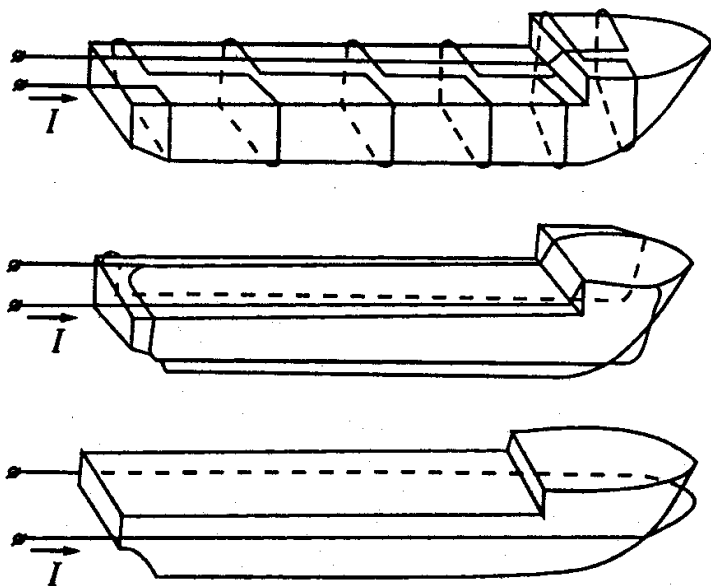
Напоследък магнитното поле на кораба се следи и измерва непрекъснато с корабна магнитоизмервателна апаратура и датчик, монтиран на мач-

тата на кораба. За целта се използва и специален софтуер на фирмите-работчици.

### 25.9. Формиране на магнитното поле на кораба

Формирането на магнитното поле на кораба представлява създаване на такава постоянна намагнитеност на кораба в трите главни направления, че корабът да удовлетворява изискванията за защитата му от бойното оръжие с магнитен канал, както и да предизвиква минимална девиация на корабния магнитен компас.

Доскоро се считаше, че за това е достатъчно да се „размагнити“ кораба с помощта на временно положени около корпуса намотки и пропускане на краткотрайни мощни токови импулси постоянен ток в необходимата посока. В зависимост от целите, намотките се полагат по един от показаните на фиг. 25.6 начини или като трите вида намотки се положат наведнъж. Тези временно положени намотки се захранват от мощни акумулаторни батерии или от мощни импулсни генератори за постоянен ток със сила на



Фиг. 25.6

тока от порядъка на хиляди ампера. Затова намотките се изработват от гъвкави кабели с голямо напречно сечение. За съжаление, резултатите от такава обработка са твърде далече от изискванията за защитата на корабите: получената намагнитеност е неравномерна и недостатъчно стабилна (устойчива).

За подобряване на равномерността и устойчивостта на получаваната намагнитеност е по-добре да се използва обобщеният метод на електромагнитна обработка (намагнитване

не по идеалната крива), което изисква едновременно захранване на поне две от трите намотки по специална програма - програмата за електромагнитна обработка по безхистерезисната крива на намагнитване.

Устойчивостта на постоянната намагнитеност на кораба е особен проблем, особено ако се стремим да „размагнитим“ кораба. Основна причина за този факт е недостатъчната магнитна енергия на вътрешното магнитно поле. Поради това дори и слабото магнитно поле на земята променя посто-



ялната намагнитеност на кораба, особено при наличието на способстващи допълнителни фактори, които съществуват непрекъснато в процеса на експлоатация на кораба.

Най-устойчиво е „възстановеното“ магнитно поле на кораба. То се получава след принудително намагнитване на кораба по идеалната крива на намагнитване в естественото магнитно поле на Земята. За целта корабът се третира с променливо затихващо магнитно поле, най-често в надлъжно направление. Променливото магнитно поле трябва да удовлетворява следните три изисквания:

- началната амплитуда да бъде достатъчна, за да промагнити напълно всеки домен от структурата на кораба;

- декриментът на затихване на поредицата импулси да бъде по-малък от 1,36;

- честотата на тока да бъде по-ниска от 1Hz; най-често продължителността на всеки импулс е от 10 до 30 s.

Такава обработка се провежда като се компенсира напълно хоризонталната съставна на земното магнитно поле, а вертикалната остава каквато си е. Много е важно останалото магнитно поле на земята да е равномерно в обема на корабния корпус. В противен случай корабът се намагнитва неравномерно. Неравномерно е намагнитването във всички случаи на изпълнение на представените по-горе изисквания.

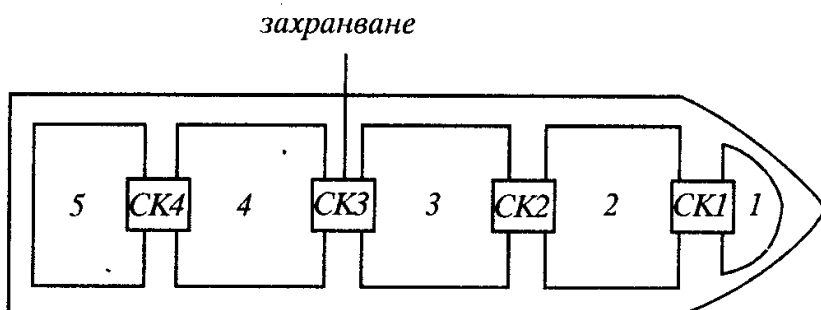
За подобряване на стабилността на корабното постоянно намагнитване е целесъобразно преди да се реализира „размагнитването“ на кораба намагнитеността му да се „преобърне“. Преобръщането на корабното магнитно поле представлява дълбоко равномерно намагнитване в посока, противоположна на естественото намагнитване.

Независимо от взетите всички мерки, стабилността на магнитното поле на размагнитен кораб е крайно недостатъчна и след първото последващо плаване постоянната намагнитеност се променя. Посоката на намагнитване зависи от допълнителните условия на експлоатация на кораба. Поради това е за предпочитане магнитното поле на кораба да се компенсира. От друга страна, както и да формираме постоянната намагнитеност, променливата си остава. Само този факт означава, че защитата на кораба по магнитно поле не може да бъде гарантирана. Няма гаранции за поддържането на магнитното поле на кораба в определени граници и със зададени предварително характеристики и особености. Особено силно е влиянието на индуктивното намагнитване при големите и най-скъпи кораби.

## 25.10. Компенсиране на магнитното поле на кораба

Компенсирането на магнитното поле на кораба се осъществява с мощта на намотки, монтирани постоянно в корабния корпус и захранвани с постоянен ток. Обикновено се използват секционирани намотки за компенсиране на постоянната и променливата намагнитености в трите основни направления на кораба. Трите вида намотки се разполагат по конкретен проект в показаните на фиг. 25.6 направления. Захранването на всяка от видовете намотки може да бъде от общ постояннотоков източник. По такъв начин може да се компенсира индуктивното намагнитване както при промяната на курса на следване, така и от крена и диферента на кораба.

Хоризонтално разположената намотка (фиг. 25.7) компенсира вертикалната намагнитеност, която се променя с промяна на магнитната зона/величината на вертикалната съставна на земното магнитно поле.



Фиг. 25.7

Намотката, компенсираща надлъжното индуктивно намагнитване, се нарича шпангоутна, тъй като секциите на намотката се разполагат по шпангоутите и създават магнитно поле по надлъжната ос на кораба.

Намотката, компенсираща напречното индуктивно намагнитване, се нарича батоксова. Шпангоутните и батоксовите намотки се наричат още курсови намотки.

В първите варианти на реализация на автоматизирани корабни компенсационни устройства токът на курсовите намотки се управлява в зависимост от курса на кораба, обикновено по  $\sin/\cos$  закон. В тези реализации не може да бъдат компенсирани измененията на намагнитеността с изменение на крена и диферента. Освен това, всички секции са включени последователно и ефективността на всяка секция се регулира с промяна на броя на действащите навивки, без да се променя общата дължина на намотъчния проводник. За целта се извършват превключвания на ефективно работещите навивки в съединителните кутии (СК).

В последно време всяка секция се захранва от отделен източник на постоянен ток с електронен стабилизатор на тока за всяка секция. Този вариант позволява значително по-точно компенсиране на магнитното поле, независимо от особеностите му. От друга страна, могат да се внасят непрекъснато корекции чрез промяна на амплитудата на тока, както и промяна на закона за управление на тока.

Задаването на закона за управление на тока бе значително улеснено с развитието на микропроцесорните системи за управление. Точността на компенсиране на магнитното поле се управлява от магнитоизмервателна система, включваща датчик, измерващ непрекъснато магнитното поле на земята в присъствието на кораба. Обикновено датчикът е трикомпонентен и се монтира във възможно най-отдалечената част от корпуса, но е свързан неподвижно с кораба - най-често на най-високата площадка на мачтата.

Особен проблем представлява компенсирането на магнитното поле на кораби маломанитно изпълнение - тралчици с пластмасови или други не-проводящи електрически корпуси. При тях основното магнитно поле е резултат от работата на електрообзавеждането и постоянната и променлива намагнитеност на обзавеждането.

Изключителна, характерна особеност на магнитното поле на такива кораби е полето на работещите електрически променливотокови и постояннотокови машини, а също така и на работещите главни и спомагателни двигатели с вътрешно горене. Докато някои елементи и детайли от споменатите двигатели могат да се изпълнят и се изработват от маломанитни материали, най-натоварените механически детайли задължително се изработват от стомана, която обикновено е магнитно твърд материал. Електрическите машини задължително се изработват от феромагнитен материал.

Особен проблем и обект на изследване представляват маломанитните материали. В редица случаи те се превръщат във феромагнитни. Например такива случаи могат да бъдат свързани с претоварването или прегряването на главните двигатели.

От тези няколко елементарни примера следва важният извод, че магнитното поле на кораба може да се компенсира достатъчно точно, само ако се следи (измерва) непрекъснато и в зависимост от резултатите се управляват компенсационните токове в секциите и намотките за компенсиране. Такъв подход позволява да се компенсират измененията на магнитното поле при бордово и килево клатене, както и да се компенсират нискочестотните магнитни полета на работещите механизми.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ангелов, Н., Г. Рашков, Е. Павликянов, С. Тодорова. Основи на електротехниката и електрониката. Русе, 1988, 1993 (второ изд.).
2. Василев, Г. Основи на корабната автоматика. С., ВИ, 1983.
3. Динов, В. Електрически машини. С., Техника, 1977.
4. Доврамаджиев, Ат. Основи на електротехниката и електрическите измервания. Варна, ВВМУ „Н. Й. Вапцаров“, 1996.
5. Ермолин, Н. П. Электрические машины. Л., Энергия, 1975.
6. Йорданов, М. Основи на електрозадвижването. С., Техника, 1978.
7. Костенко, М. П., Л. М. Пиотровский. Электрические машины, т. I, т. II. Л., Энергия, 1965.
8. Личев, А. Электрически апарати. С., Техника, 1995.
9. Масларов, Г. Автоматизирани корабни електроцентрали. Варна, ВВМУ „Н. Й. Вапцаров“, 1997.
10. Фейнман Р., Р. Лейтон, М. Сэндс. Фейнмановские лекции по физике. М., Мир, 1966.
11. Хоровиц, П., У. Хил. Искусство схемотехники, т. I, М., Мир, 1983.
12. Цанев, А. Корабни електрически системи. С., ВИ, 1993.
13. Цветков, Д., Д. Цанов, П. Павлов, П. Ралчева. Основи на електротехниката и електрониката. С., Техника, 1989.
14. Цветков, Д. Обща електротехника. С., Техника, 1982.
15. Чакъров, Ст. Корабни електроенергетични системи. Варна, ВМЕИ, 1978.
16. Янков, Я. Автоматизация на корабните енергетични уредби. Част II. С., ВИ, 1991.
17. Bolton, W. Electrical and electronic measuring and testing. Longman, 1992.
18. Frazer, C., J. Milne. Integrated electrical and electronic engineering for mechanical engineers. McGraw-Hill, 1994.
19. Jackson, L. Instrumentation and control systems. Thomas Reed Publication Limited, 1992.
20. Lander, C. W. Power electronics. McGraw-Hill, 1993.
21. Wildi, T. Electrical Machines. Drives and Power Systems, Prentice Hall, 2002.

**НИКОЛАЙ АНГЕЛОВ, БОХОС АПРАХАМЯН, АТАНАС ДОВРАМАДЖИЕВ,  
ЛЮБОМИР ДЪНКОВ, МАРИН НЕДЕВ, СТАМЕН ЧАКЪРОВ**

**ЕЛЕКТРОТЕХНИКА**

Първо издание

Редактор: *Росица Добрева*

Техническо оформление: *Магнолия Долапчиева*

Компютърна обработка: *Алис Торосян*

Подготвено за печат в Издателския център на ВВМУ „Н. Й. Вапцаров“

Офсетов печат: Централна военно-картографска база, гр. Троян

2006 г.