

СПРАВОЧНИК ПО ЕЛЕКТРОТЕХНИКА

СЕРИЯ КРАТКИ СПРАВОЧНИЦИ



Съдържание	
Електрически и магнитни величини и измерителните им единици	6
Често срещани величини в електротехниката и измерителните им единици	14
Представки към измерителните единици	16
Електрическо поле	17
Елементарни частици и техният заряд	17
Електрическо поле и характеристиките му	17
Електродвижещо напрежение	25
Електрически капацитет на уединено тяло	27
Енергия на електрическото поле	31
Електрически ток	32
Електрически вериги за постоянен ток	39
Общи определения	39
Закони на електрическите вериги за постоянен ток	40
Закон на Ом	40
Закони на Кирхоф	41
Работа и мощност на електрическия ток	42
Свързване на резистори	43
Свързване на източници на е.д.н.	45
Преобразуване на съединение трилъчева звезда в триъгълник и обратно	47
Приложение на I и II закон на Кирхоф за решаване на сложни електрически вериги	49
Магнитно поле	51
Магнитна индукция	51
Магнитен поток	52
Закон на електромагнитната индукция	55
Намагнитеност на веществата. Интензитет на магнитното поле ..	57
Магнитни свойства на веществата	61
Магнитни вериги	63
Енергия на магнитното поле	65
Електромагнитни сили	66
Еднофазни вериги за синусоиден ток	69
Променливи е.д.н., напрежения и токове	69
Изобразяване на синусоидни величини	71
Ефективна и средна стойност	73
Получаване на е.д.н. със синусоидна форма	75
Елементи във веригите за променлив ток	76
Електрическа верига от последователно свързани резистор, bobина и кондензатор	78

Електрическа верига от паралелно свързани резистор, бобина и кондензатор	80
Мощности във веригите за променлив ток	82
Закони на веригите за променлив ток в символична форма	84
Бобина с феромагнитна сърцевина	85
Трифазни вериги	88
Получаване на трифазна система е.д.п.	88
Трифазна верига, свързана в звезда	89
Свързване триъгълник в трифазната верига	91
Мощности в трифазните вериги	92
Електрически измервания	94
Измерване на ток	94
Измерване на напрежение	96
Измерване на съпротивления	98
Измерване на мощност във вериги за постоянен ток и еднофазни вериги за променлив ток	102
Измерване на активна мощност в трифазни вериги	104
Измерване на енергия във веригите за променлив ток	106
Трансформатори	109

Машини за постоянен ток	117
Устройство и принцип на действие на машините за постоянен ток	117
Генератори за постоянен ток	119
Двигатели за постоянен ток	122
Регулиране честотата на въртене на двигателите за постоянен ток	124
Асинхронни машини	128
Устройство и принцип на действие на асинхронния двигател	128
Въртящ момент на асинхронния двигател	133
Пускане на трифазните асинхронни двигатели	136
Регулиране честотата на въртене и характеристики на асинхронния двигател	138
Еднофазен асинхронен двигател	140
Синхронни машини	143
Принцип на действие и устройство	143
Синхронен генератор	145
Въртящ момент на синхронната машина	147
Паралелна работа на синхронната машина	148
Синхронен двигател	149

Електрически и магнитни величини

Величина		
име	означение	определение
Електрически ток (големината на електрически ток)	I	Основна в SI
Плътност на електрически ток	J, δ	$J = \Delta I / \Delta S, J = dI/dS$
Количество електричество (електрически заряд)	Q	$\Delta Q = I \Delta t, dQ = Idt$
Обемна плътност на електрически заряд	ρ	$\rho = \Delta Q / \Delta V, \rho = dQ/dV$
Повърхнинна плътност на електрически заряд	σ	$\sigma = \Delta Q / \Delta S, \sigma = dQ/dS$
Електрическа константа	ϵ_0	$C = \epsilon S/d$
Диелектрическа проницаемост	ϵ_r	$\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$
Относителна диелектрическа проницаемост	ϵ_r	$E = F/Q$
Интензитет на електрическо поле	E	$P = D - \epsilon_0 E$
Електрическа поляризация (на диелектрик)	P	$D = \epsilon E$
Електрическа индукция	D	

и измерителните им единици

име	Единица		изразяване чрез основните или чрез други единици на SI
	международно	българско	
ампер	A	A	
ампер на квадратен метър	A/m ²	A/m ²	
кулон	C	Кл	A.s
кулон на кубичен метър	C/m ³	Кл/м ³	A.s.m ⁻³
кулон на квадратен метър	C/m ²	Кл/м ²	A.s.m ⁻²
фарад на метър	F/m	Ф/м	A ² .s ⁴ .m ⁻³ .kg ⁻¹
фарад на метър безразмерна	F/m	Ф/м	A ² .s ⁴ .m ⁻³ .kg ⁻¹
волт на метър	V/m	В/м	m.kg.s ⁻³ .A ⁻¹
кулон на квадратен метър	C/m ²	Кл/м ²	
кулон на квадратен метър	C/m ²	Кл/м ²	

Електрически и магнитни величини

Величина		
име	означение	определение
Електрическо напрежение	U	$U = A/Q$
Електрически потенциал	V_E, φ	
Потенциална разлика	U, V_E, φ	
Електродвижещо напрежение	E	
Електрически капацитет	C	$Q = CU$
Електрически диполен момент	$P, (P_e)$	$P = Qd$
Електрическо съпротивление (при постоянен ток)	R	$R = U/I$
Специфично електрическо съпротивление	ρ	$\rho = RS/l$
Електрическа проводимост	G	$G = 1/R$
Специфична електрическа проводимост	γ, σ	$\gamma = 1/\rho$
Магнитна индукция, плътност на магнитен поток	B	$\Delta F = BI \Delta l \sin \alpha$
Магнитен поток	Φ	$\Phi = B.S$

и измерителните им единици

име	Единица		изразяване чрез основните или чрез други единици на SI
	международно	българско	
волт	V	В	m ² .kg.s ⁻³ .A ⁻¹
волт	V	В	m ² .kg.s ⁻³ .A ⁻¹
волт	V	В	
волт	V	В	
фарад	F	Ф	A ² .s ⁴ .m ⁻² .kg ⁻¹
кулон. метър	C.m	Кл.м	m.s.A
ом	Ω	Ом	m ² .kg.s ⁻³ .A ⁻² , V/A
ом. метър	Ω.m	Ом.м	m ³ .kg.s ⁻³ .A ⁻¹
сименс	S	См	Ω ⁻¹ ; A ² .s ³ .kg ⁻¹ .m ⁻²
сименс на метър	S/m	См/м	A ² .s ³ .kg ⁻¹ .m ⁻³
тесла	T	Т	Wb/m ² ; kg.s ⁻² .A ⁻¹
вебер	Wb	Вб	V.s; m ² .kg.s ⁻² .A ⁻¹

Електрически и магнитни величини

име	Величина	
	означение	определение
Магнитодвижещо напрежение	F_M	$F_M = NI$
Магнитно напрежение	U_M	
Интензитет на магнитно поле	H	$H = NI/l$
Магнитна константа	μ_0	
Магнитна проницаемост	μ	$\mu = B/H$
Относителна магнитна проницаемост	μ_r	$\mu_r = \mu/\mu_0$
Магнитен момент на електрически ток	m	$m = IS$
Намагнитеност	M	$M = \sum m/V$
Индуктивност	L	$L = \Phi/I$
Взаимна индуктивност	M	
Магнитно съпротивление	R_M	$R_M = U_M/\Phi$
Магнитна проводимост	Λ	$\Lambda = 1/R_M$
Електромагнитна енергия	Q, Q_e, W	
Мощност на постоянен електрически ток	P	$P = UI$

и измерителните им единици

име	Единица		изразяване чрез основните или чрез други единици на SI
	международно	българско	
ампер	A	A	
ампер	A	A	
ампер на метър	A/m	A/m	
хенри на метър	H/m	H/m	$m \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
хенри на метър	H/m	H/m	
безразмерна			
ампер квадратен метър	$A \cdot m^2$	$A \cdot m^2$	
ампер на метър	A/m	A/m	
хенри	H	H	$Wb/A, m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
хенри	H	H	
ампер на вебер	A/Wb	A/Wb	$A^2 \cdot s^2 \cdot kg^{-1} \cdot m^{-2}$
вебер на ампер	Wb/A	Wb/A	$kg \cdot m^2 \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
джаул	J	Дж	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
ват	W	Вт	$V \cdot A = J/s = m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$

Електрически и магнитни величини

име	Величина	
	означение	определение
Мощност на променлив електрически ток		
— активна	P	$P = UI \cos \varphi$
— реактивна	Q	$Q = UI \sin \varphi$
— пълна	S	$S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2}$
Електрично съпротивление при променлив ток		
— активно	R	
— реактивно	X	
— индуктивно	X_L	$X_L = \omega L$
— капацитивно	X_C	$X_C = 1/\omega C$
— пълно	z	$z = \sqrt{R^2 + X^2}$
Електрическа проводимост при променлив ток		
— активна	G	$G = 1/R$
— реактивна	B	
— индуктивна	B_L	$B_L = 1/\omega L$
— капацитивна	B_C	$B_C = \omega C$
— пълна	y	$y = \sqrt{G^2 + B^2}$

и измерителните им единици

име	Единица		изразяване чрез основните или чрез други единици на SI
	международно	българско	
ват	W	Вт	
волт.ампер реактивни	var	вар	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
волт.ампер	V.A	В.А	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
ом	Ω	Ом	
ом	Ω	Ом	
ом	Ω	Ом	
ом	Ω	Ом	
ом	Ω	Ом	
сименс	S	См	
сименс	S	См	
сименс	S	См	
сименс	S	См	
сименс	S	См	

Често срещани величини в електротехниката

име	Величина	
	означение	определение
Дължина	l, b, d, h, r, δ, s	Основна в SI
Маса	m	Основна в SI
Време, интервал от време	t	Основна в SI
Термодинамична температура	T, Θ	Основна в SI
Лице на повърхнината	S, A	$S = l^2$
Обем	V, v	$V = l^3$
Скорост	v, c	$v = \Delta S/\Delta t, v = ds/dt$
Ускорение	a	$a = \Delta v/\Delta t, a = dv/dt$
Период	T	
Честота на периодичен процес	f	$f = 1/T$
Ъглова честота	ω	$\omega = 2\pi f$
Сила	F	$F = ma$
Момент на сила (въртящ момент)	M	$M = Fd$
Работа	W, A	$W = Fl \cos \alpha, W = Fl$
Енергия	W, E	
Мощност	P, N	$P = \Delta W/\Delta t, P = dW/dt$

и измерителните им единици

име	Единица		изразяване чрез основните или чрез други единици на SI
	международно	българско	
метър	m	м	
килограм	kg	кг	
секунда	s	с	
келвин	K	К	
квадратен метър	m^2	m^2	
кубически метър	m^3	m^3	
метър в секунда	m/s	м/с	
метър в секунда на квадрат	m/s^2	m/c^2	
секунда	s	с	
херц	Hz	Хц	s^{-1}
секунда на минус първа	s^{-1}	c^{-1}	
нютон	N	Н	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
нютон.метър	N.m	Н.м	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
джаул	J	Дж	$N \cdot m; W \cdot s; m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
джаул	J	Дж	
ват	W	Вт	$J/s = kg \cdot m^2 \cdot s^{-3}$

Представки към измерителните единици

Наименование	Означения		Отношение към основната единица
	международно	българско	
ато	a	a	10^{-18}
фемто	f	ф	10^{-15}
пико	p	пк	10^{-12}
нано	n	н	10^{-9}
микро	μ	мк	10^{-6}
мили	m	м	10^{-3}
санти	c	с	10^{-2}
деци	d	дц	10^{-1}
дека	da	да	10
хекто	h	хк	10^2
кило	k	к	10^3
мега	M	М	10^6
гига	G	Г	10^9
тера	T	Т	10^{12}
пета	P	П	10^{15}
екса	E	Е	10^{18}

Електрическо поле

Елементарни частици и техният заряд

Част от елементарните частици, от които са изградени веществата, притежават електрически заряд. Те имат *елементарен електрически заряд* $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ С.

Най-важните частици с елементарен заряд са: *електронът* – с маса $m = 9,107 \cdot 10^{-31}$ kg и заряд $-e$, *позитронът* – със същата маса и заряд $+e$, *протонът* – с маса 1849 пъти по-голяма от тази на електрона и заряд $+e$, *антипротонът* – с маса като на протона и заряд $-e$. Елементарните частици с електрически заряд са заобиколени с тяхното електромагнитно поле. То се открива чрез някои явления – сили на взаимодействия, индуциране на електродвижещо напрежение.

Електрическо поле и характеристиките му

Около неподвижни спрямо наблюдателя заредени тела се открива само електрическата страна на единното електромагнитно поле.

За наличието на електрическо поле се съди по силата, която действа върху неподвижно електрически заредено тяло, внесено в полето. Силата на взаимодействие F между две точковидни заредени тела с за-

ряди Q_1 и Q_2 , които са на разстояние r едно от друго и разположени във вакуум (празно пространство), се определя от закона на Кулон:

$$F = \frac{Q_1 Q_2}{\epsilon_0 4\pi r^2}$$

Величината ϵ_0 – *електрическа константа* (електрическа проницаемост на вакуум).

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} \text{ F/m} \approx 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$$

Ако същите тела се намират в еднородна, изотропна и изолираща среда, опитът показва, че силата на взаимодействие F^0 намалява спрямо тази, когато телата са били във вакуум

$$F^0 = \frac{Q_1 Q_2}{\epsilon 4\pi r^2}$$

Величината ϵ – *диелектрическа проницаемост на веществото*. Тя е основна характеристика на диелектриците. Много често се работи с *относителната диелектрична проницаемост на веществата* ϵ_r ,

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$

Едноименно заредените тела се отблъскват, а разноименно заредените се привличат.

Електрическото поле се изследва с пробно тяло с такива размери и заряд, че внесено в изследваното поле не го изменя.

Интензитет на електрическото поле

Величина, която характеризира електрическото поле по отношение силото му взаимодействие.

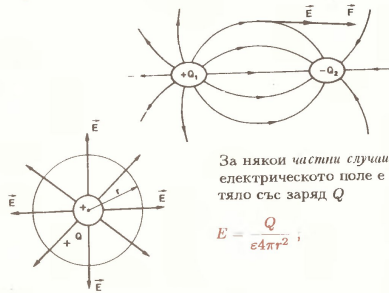
$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q_0} = \frac{V}{m}$$

F е силата, която действа върху пробното тяло, Q_0 – зарядът на пробното тяло.

Интензитетът на електрическото поле е векторна величина. Посоката на вектора \vec{E} съвпада с посоката на силата, която действа върху пробно тяло с положителен заряд.

За онагледяване на електрическото поле в пространството, където то съществува, се прекарват линии, за които допирателната им във вся-

ка точка съвпада с посоката на вектора \vec{E} . На линиите се поставят стрелки, които показват посоката на вектора \vec{E} . Така получените линии се наричат *електрически силови линии*. Тяхната съвкупност образува картината на електрическото поле.

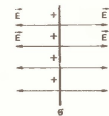


За някои случаи интензитетът на електрическото поле e — за сферично тяло със заряд Q

$$E = \frac{Q}{\epsilon 4\pi r^2}$$

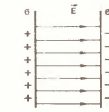
— за безкрайна равнина с равномерна повърхностна плътност на заряда σ

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon}$$



— за две успоредни равнини, заредени с електрически с противоположни знаци и с равномерна повърхностна плътност на заряда σ

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$



Когато една частица със заряд Q се пренася по някакъв път в електрическо поле, силите на полето, които действат върху нея, извършват известна работа.



За пътя от точка А до точка В извършената работа е

$$A = \sum F \cos \alpha \Delta l = Q \sum E \cos \alpha \Delta l = Q \sum \vec{E} \cdot \vec{\Delta l},$$

$$A = \int_A^B F \cos \alpha dl = Q \int_A^B E \cos \alpha dl = Q \int_A^B \vec{E} \cdot \vec{dl}.$$

Електрическо напрежение

Представява извършената работа за пренасяне на единица заряд по пътя от А до В. Характеризира електрическото поле по отношение възможностите му за извършване на работа от страна на електрическите сили:

$$U_{AB} = \sum \vec{E} \cdot \vec{\Delta l} = \sum E \cos \alpha \Delta l = \frac{A}{Q}, \text{ V},$$

$$U_{AB} = \int_A^B \vec{E} \cdot \vec{dl} = \int_A^B E \cos \alpha dl = \frac{A}{Q}, \text{ V}.$$

Електрическото напрежение на равномерно електрическо поле, когато пътят съвпада с електрическа силова линия

$$U_{AB} = E l.$$

Електрически потенциал

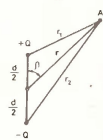
От принципа за съхранение на енергията следва, че в електростатично поле напрежението за всеки затворен контур е равно на нула. Тогава електрическото напрежение между две точки няма да зависи от това по какъв път се отива от едната точка до другата, а само от координатите на двете точки А и В. Ако едната точка се приеме за опорна, електрическото напрежение ще зависи само от координатите на другата. Получената функция се нарича *електрически потенциал* и се означава с $V_E(x, y, z)$.

При теоретични разглеждания се приема, че потенциалът на безкрайно отдалечените точки е нула, а на практика нула потенциал има земната повърхност.

Потенциал на електрическото поле на точков или на сферичен заряд

$$V_E = \frac{Q}{\epsilon 4\pi r}$$

Потенциал на електрически дипол



$$V_E = \frac{Q}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{r_2 - r_1}{r_1 r_2}$$

при $r \gg d$, когато $r_1 r_2 \approx r^2$ и $r_2 - r_1 \approx d \cos \beta$,

$$V_E = \frac{Qd \cos \beta}{4\pi\epsilon r^2} = \frac{p \cos \beta}{4\pi\epsilon r^2}$$

$p = Qd$ - електрически момент на дипола.

Електрическото напрежение между две точки А и В представлява разликата от потенциалите на двете точки:

$$U_{AB} = V_{E_A} - V_{E_B}$$

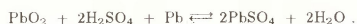
Електродвижещо напрежение

Електродвижещото напрежение е причината, която поддържа протичането на електрически ток в една електрическа верига. То се изражава от сили на неелектростатическо взаимодействие. Източниците на електродвижещо напрежение (е.д.н.) са гальваничните елементи, термоелементите, фотодиодите, машинните генератори, построени на принципа на електромагнитната индукция, и др.

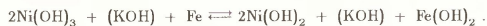
Гальванични елементи - два различни електрода, потопени в електролит. При тях електрическата енергия е резултат от протичане на химическа реакция.

Акумулатори - елементи за многократна употреба, при които може да се осъществи обратната химическа реакция. Широко приложение в практиката имат оловните (киселини) и желязо-никеловите (алкални). При оловните, когато акумулаторът е зареден, положителният електрод е оловен диоксид, отрицателният - олово, а електролитът - разтвор на сярна киселина с дестилирана вода. Химическите реакции при разре-

ждане и зареждане на акумулатора са обратими и се описват с уравнението



При желязо-никеловите, когато акумулаторът е зареден, положителният електрод е $\text{Ni}(\text{OH})_2$, отрицателният - кадмий и желязо, а електролитът - разтвор на КОН. Процесите при разреждане и зареждане протичат по уравнението



Електродвижещото напрежение E на един източник представлява разлика от потенциалите V_{E_A} и V_{E_B} на неговите изводи, ако през него не протича ток:

$$E = V_{E_A} - V_{E_B}.$$

Появление на диелектриците - ориентация на зарядите в молекулите на диелектрика под действието на външно електрическо поле. Положителните заряди се преместват в посока на вектора на интензитета на полето, а отрицателните - в обратна посока. При диелектриците с неполярни молекули (напр. водород, кислород, азот) под действието на външното електрическо поле молекулите се превръщат в електрически

диполи, а при диелектриците с полярни молекули (напр. сероводород) настъпва ориентация на молекулните диполи.

Поляризованост на диелектрика \vec{P} - електрическият момент за единица обем от диелектрика. Посоката на вектора \vec{P} съвпада с посоката на преместване на положителните заряди.

$$\vec{P} = \kappa \vec{E},$$

κ - диелектрическа възприемчивост на веществото.

Електрическа индукция

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} = \epsilon_0 \vec{E} + \kappa \vec{P} = (\epsilon_0 + \kappa) \vec{E} = \epsilon \vec{E}.$$

Следователно

$$\epsilon = \epsilon_0 + \kappa.$$

Електрически капацитет на уединено тяло. Кондензатори

Зарядът на едно уединено тяло е пропорционален на неговия потенциал:

$$Q = CV_E$$

Коефициентът на пропорционалност $C = \frac{Q}{V_E}$ се нарича **електрически капацитет** на уединеното тяло.

Капацитетът зависи от формата и размерите на тялото и от средата, в която се намира.

Капацитетът на сфера с радиус r , която се намира в среда с диелектрична проникваемост ϵ , е

$$C = 4\pi\epsilon r$$

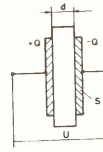
Капацитет 1 F във въздух има сфера с радиус $r = 9.10^9$ m.

Землята има капацитет $C = 705 \mu\text{F}$.

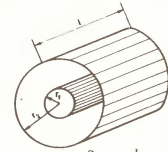
Кондензаторът представлява две проводящи тела (арматури), между които се намира диелектрик (изолатор). Върху арматурите се натрупват равни по количество, но с противоположни знаци електрически заряди.

Капацитет на кондензатора — отношението на заряда на едно от телата към приложеното върху тях напрежение $C = \frac{Q}{U}$.

Капацитет на различни видове кондензатори:



— плосък $C = \frac{\epsilon_0\epsilon_r S}{d}$, F,



— цилиндричен $C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r l}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$, F,

— сферичен (представлява две концентрични проводими сфери)

$$C = 4\pi\epsilon_0\epsilon_r \frac{r_1 r_2}{r_2 - r_1}, \text{ F} \quad (r_2 > r_1)$$

Във формулите размерите са в m и m².

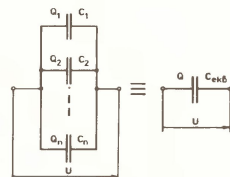
Свързване на кондензатори

Паралелно

$$Q = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n$$

$$C_{\text{екв}} = C_1 + C_2 + \dots + C_n$$

$$\frac{Q_1}{C_1} = \frac{Q_2}{C_2} = \frac{Q_3}{C_3} = \dots = \frac{Q_n}{C_n} = \frac{Q}{C_{\text{екв}}}$$

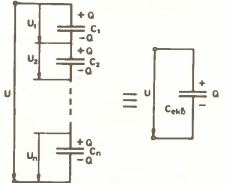


Последователно

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$$

$$\frac{1}{C_{\text{екв}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$$

$$U_1 C_1 = U_2 C_2 = \dots = U_n C_n = UC_{\text{екв}}$$



Енергия на електрическото поле

Енергията на система заредени тела е

$$W_E = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n Q_k V_{E_k}$$

където V_{E_k} е потенциалът, а Q_k — зарядът на k -тото тяло.

Енергията на един зареден кондензатор е

$$W_E = \frac{1}{2} QU = \frac{1}{2} CU^2 = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}$$

където C е капацитетът на кондензатора, Q — зарядът на една от арматурите на кондензатора, U — напрежението между арматурите на кондензатора.

Енергията на електрическото поле е разпределена в обема, в който съществува полето и има обемна плътност (енергията в единица обем):

$$W'_E = \frac{W_E}{V} = \frac{1}{2} DE = \frac{1}{2} \epsilon E^2 = \frac{1}{2} \frac{D^2}{\epsilon}$$

Електрически ток

Електрически ток се нарича движението на електрическите заряди — скаларна величина.

Големина на електрическия ток i през някаква повърхност S :

$$i = \frac{\Delta Q}{\Delta t}, \text{ A}; \quad \left(i = \frac{dQ}{dt} \right)$$

Посока на тока

— положителна — посоката, по която се преместват положителни електрически заряди.

Плътност на тока J — токът за единица повърхност, която е перпендикулярна на посоката на движение на електрическите заряди — векторна величина:

$$J = \frac{i}{S}, \text{ A/m}^2$$

Видове електрически ток: ток на електрическата проводимост, ток на електрическото пренасяне и ток на електрическата индукция.

Ток на електрическата проводимост. Обуславя се от движението на свободните електрони в твърдите тела и на йоните в разтворите на соли, основи и киселини. Под действието на електрическо поле в проводя-

щата среда се получава насочено движение на свободните електрони, при което за изотропна среда векторът на плътността на тока съвпада по посока с вектора на интензитета на електрическото поле и е пропорционален на неговата големина:

$$J = \gamma E$$

γ е специфичната електрическа проводимост на веществото.

Според стойността на специфичната си проводимост веществата са:

— проводници — γ е от 10^2 до 10^6 S/cm;

— изолатори — γ е от 10^{-18} до 10^{-10} S/cm;

— полупроводници — заемат междинно място по своята електропроводимост спрямо проводниците и изолаторите.

Връзката между плътността на тока, специфичната електропроводимост и интензитета на електрическото поле представлява закона на Ом в диференциална форма.

Често се работи със специфичното електрическо съпротивление

$$\rho = \frac{1}{\gamma}, \text{ Ohm}^2/\text{m}$$

Съпротивление на проводник с напречно сечение S и дължина l

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

R зависи от температурата. За не много широк температурен интервал температурната зависимост на съпротивлението се определя с формулата

$$R_2 = R_1 [1 + \alpha(\Theta_2 - \Theta_1)],$$

където R_1 е съпротивлението при температура Θ_1 ;
 R_2 – съпротивлението при температура Θ_2 ;
 α – температурният коефициент на съпротивлението.

Специфични съпротивления за електроизолационни материали (диелектрици):

— обемно ρ_V , Ωcm ;
 — повърхностно ρ_S , Ω .

Причина за това е, че обемните и повърхностните токове при тези материали имат съпоставими стойности.

Ако интензитетът на електрическото поле надвиши известна стойност, в диелектрика се образуват проводящи канали, той се разрушава и изгубва електроизолационните си свойства. Граничният интензитет на електрическото поле $E_{пр}$, при който настъпва пробив – пробивен интензитет (пробивна якост). Напрежението $U_{пр}$, при което настъпва пробив на диелектрика, е

$$U_{пр} = E_{пр}d,$$

където d е дебелината на диелектрика.

Специфично съпротивление, температурен коефициент и температура на токове на някои проводящи материали

Материали	Специфично електрическо съпротивление при 20°C, ρ $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$	Температурен	Температура
		коефициент $1/^\circ\text{C}$	на токове $^\circ\text{C}$
Сребро	0,0160 – 0,0162	0,0034 – 0,0036	960,5
Мед	0,0175 – 0,0182	0,0040	1083
Бронз	0,021 – 0,052	0,004	885 – 1050
Алуминия	0,0263 – 0,0297	0,00403 – 0,00429	657 – 660
Стомана	0,0103 – 0,137	0,0057 – 0,0062	1400 – 1530
Платина	0,09 – 0,105	0,00257 – 0,00398	1773
Злато	0,0220 – 0,0235	0,00365	1063
Чугун	0,4 – 0,5	0,001	—
Въглен	10	–0,005 при 15°C	—
Манганин (84% Cu, 12% Ni, 4% Mn)	0,12	0,000029 – 0,00004	910 – 960
Константан (60% Cu, 40% Ni)	0,44 – 0,52	0,000005	1200 – 1270
Нихром (66% Ni, 15% Cr, 19% Fe)	1,0 – 1,15	0,00013	1380 – 1410
Фехрал (80% Fe, 15% Cr, 5% Al)	1,2	0,00008	—

Пробивна якост, относителна диелектрична проникваемост и специфични съпротивления на някои диелектрици

Материал	$E_{пр}$, kV/cm	ϵ_r	ρ_V , Ωcm	ρ_S , Ω
Мрамор	30 – 50	7 – 8	$10^8 - 10^{11}$	—
Порцелан	150 – 200	5,5	$10^{14} - 10^{15}$	—
Съкло, обикновено	100 – 150	6 – 10	—	—
Съкло, органично	400 – 550	3	$10^{14} - 10^{16}$	—
Плексиглас	400	3,4	10^{14}	—
Дърво	23 – 56	2 – 3	$2 \cdot 10^8 - 4 \cdot 10^{11}$	—
Асфалт	100 – 300	2,1 – 4	$10^{14} - 10^{16}$	—
Каучук	150 – 250	3 – 6	$10^{13} - 10^{15}$	—
Ебонит	600 – 800	3 – 3,5	$10^{15} - 10^{16}$	—
Гетинакс	100 – 150	4 – 7	$10^{10} - 10^{12}$	10^{11}
Текстолит	10 – 75	4 – 8	$10^{10} - 10^{12}$	$10^{10} - 10^{11}$

ϵ_r е при постоянно или променливо напрежение с честота 50 – 100 Hz

Пробивна якост, относителна диелектрична проникваемост и специфични съпротивления на някои диелектрици

Материал	$E_{пр}$, kV/cm	ϵ_r	ρ_V , Ωcm	ρ_S , Ω
Хартия, напоена с масло	100 – 250	3,4 – 3,7	—	—
Електрокартон, сух	80 – 100	2,5 – 4	$10^8 - 10^{10}$	—
Полиетилен	200 – 300	2,5	$10^{16} - 10^{18}$	—
Слюда	100 – 1000	5,4	$5 \cdot 10^{11}$	—
Слюда – мусковит	820 – 1360	7	$10^{14} - 10^{15}$	—
Слюда – миканит	150 – 250	—	$10^{13} - 10^{15}$	—
Азбест	30 – 60	—	10^8	—
Парафин	200 – 250	1,0 – 2,2	10^{16}	—
Поливинилхлор	320	3,2	—	—
Полиетилен	560	2,26	$5 \cdot 10^{14}$	—
Трансформаторно масло	50 – 180	2 – 2,5	$4 \cdot 10^{14} - 5 \cdot 10^{15}$	—
Дестилирана вода	—	80	$5 \cdot 10^3$	—

ϵ_r е при постоянно или променливо напрежение с честота 50 – 100 Hz

Ток на електрическото пренасяне. Представлява пренасяне на електричество от движещи се в свободно пространство елементарни заредени частици или заредени тела. Такъв е токът в електронните и йонните лампи:

— при електронните лампи — движение в празно пространство (вакуум) на отделени от катода на лампата електрони;
 — при йонните лампи — движение на електрони и йони в условията на разреден газ.

Ток на електрическата индукция. Представлява насочено раз местване на положителните и отрицателните заряди на молекулите на диелектрика под действието на външно електрическо поле. Съществува само при промяна на външното електрическо поле.

Електрически вериги за постоянен ток

Общи определения

Електрическа верига – съвкупност от устройства, които осигуряват път за електрическия ток. На практика в електрическата верига се включват генераторите на електрическа енергия (устройства, в които се получава електрическа енергия от друг вид енергия – механична, топлинна, светлинна, химическа и др.), консуматорите (устройства, в които електрическата енергия се преобразува в друг вид енергия – механична, топлинна, светлинна, химическа и др.) и свързващите ги съоръжения (съединителни проводници, измервателни уреди и апарати за управление и защита).

Възлова точка в електрическата верига – точка, в която се съединяват най-малко три нейни участъка.

Клон на електрическата верига – част от електрическата верига, която свързва две възлови точки.

Основна задача при изчисленията на електрическите вериги е да се определят токовете във всички клонове на веригата, когато са дадени конфигурацията на веригата, действащите във веригата е.д.н. и съпротивленията на отделните клонове, наречени параметри на елементите на електрическата верига.

Зако̀ни на електрическите вериги за постоянен ток

Закон на Ом

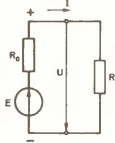
Дава връзката между електрическия ток, напрежението (или е.д.н., или напрежението и е.д.н.) и съпротивлението. Той се разглежда за три случая:

1. За част от електрическа верига със съпротивление R
 Токът I е право пропорционален на напрежението U и обратно пропорционален на съпротивлението R :



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

Понякога се използва обратната величина на електрическото съпротивление - електрическата проводимост:



$$G = \frac{1}{R}$$

2. За затворена електрическа верига
 Токът е равен на отношението на е.д.н. на източника E и общото съпротивление на веригата $R_0 + R$:

$$I = \frac{E}{R_0 + R}; \quad E = R_0 I + R I = R_0 I + U$$

Напрежението U на изводите на източника на е.д.н. е

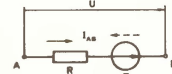
$$U = E - R_0 I$$

където E е е.д.н. на източника E , а $R_0 I$ - вътрешният пад на напрежение в собственото съпротивление на източника.

3. За част от електрическа верига със съпротивление R и включен източник на е.д.н. E

$$I_{AB} = \frac{U_{AB} \pm E}{R}$$

Знакът е (+), когато е.д.н. има посока от A към B , а (-) - в обратния случай (означава се с прекъснатата линия).

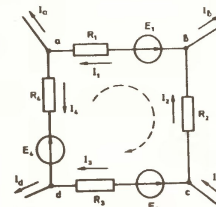
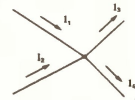


Зако̀ни на Кирхоф

Първи закон на Кирхоф

Алгебричната сума на токовете в една възлова точка е равна на нула: $\sum I = 0$

$$I_1 + I_2 - I_3 - I_4 = 0$$



Втори закон на Кирхоф

Алгебричната сума на електродвижещите напрежения в един затворен контур от електрическа верига е равна на алгебричната сума от напрежителните падове в клоновете на контура:

$$\sum E = \sum RI$$

$$E_1 - E_3 + E_4 = -R_1 I_1 - R_2 I_2 + R_3 I_3 - R_4 I_4$$

Работа и мощност на електрическия ток

Когато напрежението върху един консуматор е U и за време t е пренесен електрически заряд $Q = It$, в консуматора е извършена работа

$$A = UQ = UIt$$

Мощността на консуматора, т.е. работата, извършена за единица време, е

$$P = \frac{A}{t} = UI$$

Ако консуматорът е резистор със съпротивление R и напрежение $U = RI$, за време t в резистора се отделя топлина Q_T :

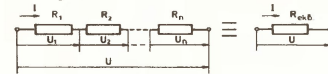
$$Q_T = A = UIt = RI^2 t = \frac{U^2}{R} t = GI^2 t \quad \text{закон на Джоул-Ленц}$$

Често електрическата енергия се измерва с единицата киловатчас (kW.h).

$$1 \text{ kW.h} = 3\,600\,000 \text{ J}$$

Свързване на резистори

Последователно свързване

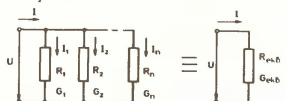


$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n = R_1 I + R_2 I + \dots + R_n I$$

$$R_{екв} = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

$$\frac{U_1}{R_1} = \frac{U_2}{R_2} = \frac{U_3}{R_3} = \dots = \frac{U_n}{R_n} = \frac{U}{R_{екв}}$$

Паралелно свързване



$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \dots + \frac{U}{R_n} = G_1 U + G_2 U + \dots + G_n U$$

$$G_{екв} = G_1 + G_2 + \dots + G_n$$

$$\frac{1}{R_{екв}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

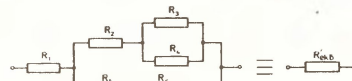
$$R_1 I_1 = R_2 I_2 = \dots = R_n I_n = R_{екв} I$$

При два паралелно свързани резистора

$$R_{екв} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}; \quad \frac{I_1}{I} = \frac{R_{екв}}{R_1}$$

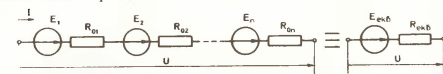
Смесено свързване - за да се намери еквивалентно съпротивление на цялата верига отделните паралелни и последователни участъци се заменят с техните еквивалентни съпротивления.



$$R_{екв} = R_1 + \frac{\left(R_2 + \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} \right) (R_5 + R_6)}{R_2 + \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} + R_5 + R_6}$$

Свързване на източници на е.д.н.

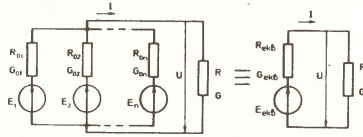
Последователно свързване



$$E_{\text{екв}} = E_1 + E_2 + \dots + E_n = \sum E_i;$$

$$R_0 \text{ екв} = R_{01} + R_{02} + \dots + R_{0n} = \sum R_{0i}.$$

Паралелно свързване



$$G_{0 \text{ екв}} = G_{01} + G_{02} + \dots + G_{0n} = \sum G_{0i};$$

$$\frac{1}{R_{0 \text{ екв}}} = \frac{1}{R_{01}} + \frac{1}{R_{02}} + \dots + \frac{1}{R_{0n}} = \sum \frac{1}{R_{0i}};$$

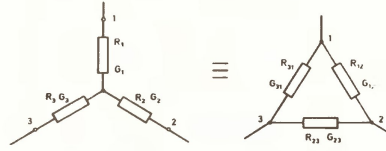
$$E_{\text{екв}} = \frac{G_{01}E_1 + G_{02}E_2 + \dots + G_{0n}E_n}{\sum G_{0i}} = \frac{\sum G_{0i}E_i}{\sum G_{0i}};$$

$$U = \frac{G_{01}E_1 + G_{02}E_2 + \dots + G_{0n}E_n}{G_{01} + G_{02} + \dots + G_{0n} + G} = \frac{\sum G_{0i}E_i}{\sum G_{0i} + G}.$$

-46-

На практика паралелното свързване на източници на е.д.н. има смисъл когато е.д.н. на отделните източници са еднакви и източниците имат еднакви вътрешни съпротивления. Тогава токът във външната верига – общият ток, се разпределя равномерно между отделните източници и между тях не протичат изравнителни токове, т.е. няма излишни загуби на енергия.

Преобразуване на съединение трилъчева звезда в триъгълник и обратно



Двете съединения са еквивалентни, ако между техните съпротивления или проводимости съществуват следните зависимости:

-47-

Параметрите на звездата, изразени чрез тези на триъгълника

$$R_1 = \frac{R_{12}R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}, \quad R_2 = \frac{R_{23}R_{12}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}, \quad R_3 = \frac{R_{31}R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}};$$

$$G_1 = G_{12} + G_{31} + \frac{G_{12}G_{31}}{G_{23}}, \quad G_2 = G_{23} + G_{12} + \frac{G_{23}G_{12}}{G_{31}},$$

$$G_3 = G_{31} + G_{23} + \frac{G_{31}G_{23}}{G_{12}}.$$

Параметрите на триъгълника, изразени чрез тези на звездата

$$R_{12} = R_1 + R_2 + \frac{R_1R_2}{R_3}, \quad R_{23} = R_2 + R_3 + \frac{R_2R_3}{R_1},$$

$$R_{31} = R_3 + R_1 + \frac{R_3R_1}{R_2};$$

$$G_{12} = \frac{G_1G_2}{G_1 + G_2 + G_3}, \quad G_{23} = \frac{G_2G_3}{G_1 + G_2 + G_3}, \quad G_{31} = \frac{G_3G_1}{G_1 + G_2 + G_3}.$$

-48-

Приложение на I и II закон на Кирхоф за решаване на сложни електрически вериги

Сложна електрическа верига е тази, която не може да се сведе до последователно и паралелно свързване на резистори и последователно свързване на източници на е.д.н.

В най-общия случай в електрическата верига има r клона и q възлови точки. Трябва да се определят r неизвестни тока, когато са знаят съпротивленията на отделните клонове и електродвижещите напрежения на източниците.

За решаване на тази задача са необходими r независими уравнения. Те може да се напишат като се приложат I и II закон на Кирхоф. По I закон може да се напишат $q - 1$ независими уравнения, а по II – $r - q + 1$ независими уравнения, така че задачата е еднозначно решима.

За да се съставят уравненията по I и II закон на Кирхоф, първоначално се избира произволна положителна посока на токовете в отделните клонове. Това дава възможност да се прилагат законите на Кирхоф за съответните възлови точки и независими контури. За прилагане на II закон на Кирхоф се избира положителна посока за обхождане на всеки контур. В уравнението по II закон е.д.н., чиято посока съвпада с посоката на обхождане на контура, се вземат със знак (+), а е.д.н., които са с обратна посока – със знак (-). Същото важи и за напрежителните

4 Справочник по електротехника -49-

падове: тези, при които посоката на тока съвпада с посоката на обхождане на контура, са със знак (+), а при обратна посока на тока – със знак (-).

След решаване на задачата токовете, които имат положителни стойности, съвпадат по посока с предварително избраната, а токовете с отрицателна стойност имат действителна посока, която е обратна на предварително избраната.

-50-

Магнитно поле

Магнитна индукция

В пространството около всеки ток съществува магнитно поле. То се открива по редица явления:

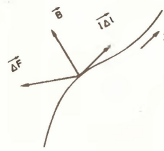
- магнитната стрелка заема определено положение;
- върху проводник с електрически ток, но със сумарен заряд нула действа механична сила;
- в движещ се проводник в магнитното поле се индуцира електродвижещо напрежение.

Магнитна индукция – основна величина, която характеризира магнитното поле. В дадена точка на полето тя е вектор, с големина, равна на силата, която действа на елемента на линеен ток, равен на единица и разположен в магнитното поле така, че силата да е максимална:

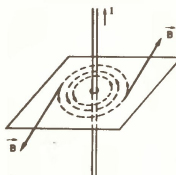
$$B = \frac{\Delta F}{I \Delta l}; \quad B = \frac{dF}{Idl}$$

Векторът \vec{B} е разположен перпендикулярно на равнината, в която лежат векторът на линейния ток елемент $I \vec{\Delta l}$ и силата $\Delta \vec{F}$, като векторите $I \vec{\Delta l}$, \vec{B} и $\Delta \vec{F}$ образуват дясноориентирана правоъгълна координатна система.

-51-



Картината на магнитното поле се получава, като в пространството, където то съществува, се прекарват линии, във всяка точка на които векторът на магнитната индукция е допирателен – *индукционни* или *магнитни* линии. На тях се поставят стрелки, които показват посоката на вектора на магнитната индукция. *Посоката на магнитните линии се определя по правилото на свитите пръсти на дясната ръка или правилото на тирбушона.* Ако постоителното движение на тирбушона е по посока на тока, въртенето на тирбушона определя посоката на магнитните линии. Картината на магнитното поле на безкрайно дълъг проводник, по който протича ток I .



Магнитен поток

Магнитен поток – потокът на вектора на магнитната индукция през една повърхнина.

Когато векторът на магнитната индукция е перпендикулярен на повърхнината, магнитният поток е

$$\Phi = BS$$

Когато векторът на магнитната индукция сключва ъгъл β с нормалата към повърхнината, магнитният поток е

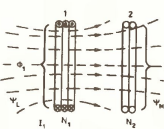
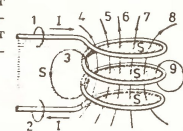
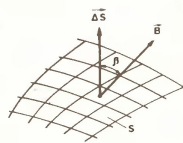
$$\Phi = BS \cos \beta$$

Пълнен магнитен поток (потокоосцепление).

Когато един токов контур се състои от известен брой навивки обхващаният от контура магнитен поток представлява сумата от магнитните потоци, обхващани от отделните навивки. Ако всички навивки обхващат един и същ магнитен поток Φ , пълният магнитен поток е

$$\psi = N\Phi$$

където N е броят на навивките.



Магнитен поток на самоиндукция – създава се от тока в самия контур.

Пълният магнитен поток на самоиндукция е пропорционален на тока I , който го поражда:

$$\psi_L = LI$$

Коефициентът на пропорционалност се нарича *индуктивност на контура*. Той зависи от големината, формата и средата, в която се намира контурът. За *неферромагнитни* среди е *постоянна* величина.

Магнитен поток на *взаимна индукция* – обхваща даден контур, но е създаден от тока в друг контур. Пропорционален е на тока, който го създава:

$$\psi_M = MI$$

Коефициентът на пропорционалност M се нарича *взаимна индуктивност между контурите*. Той зависи от големината, формата и разположението на контурите и от средата, в която са разположени. За *неферромагнитни* среди M е *постоянна* величина.

Закон за електромагнитната индукция

Явлението електромагнитна индукция е открито от Фарадей в 1831 г. То се състои в индуцирането на е.д.н. в проводници, които се движат в магнитно поле, или когато се изменя магнитният поток, обхващан от един контур.

Закон на електромагнитната индукция – индуцираното е.д.н. е равно на взетата с обратен знак скорост на изменение на магнитния поток:

$$e = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}; \quad e = -\frac{d\Phi}{dt}$$

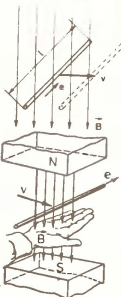
Отрицателният знак изразява *принципа на Ленц за електромагнитната инерция* – индуцираното е.д.н. се стреми да прекара ток, насочен по такъв начин, че да се противопостави на изменението на магнитния поток.

Когато магнитният поток е на самоиндукция, индуцираното е.д.н. се нарича на самоиндукция и при $L = \text{const}$ е

$$e_L = -\frac{\Delta\psi_L}{\Delta t} = -\frac{\Delta(LI)}{\Delta t} = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}; \quad e_L = -L\frac{di}{dt}$$

Когато магнитният поток е на взаимна индукция, индуцираното е.д.н. се нарича на взаимна индукция и при $M = \text{const}$ е

$$e_M = -\frac{\Delta\psi_M}{\Delta t} = -\frac{\Delta(MI)}{\Delta t} = -M\frac{\Delta I}{\Delta t}; \quad e_M = -M\frac{di}{dt}$$



Много често в електрическите машини праволинейен проводник пресича магнитни линии под прав ъгъл със скорост v . Големината на индуцираното е.д.н. е

$$e = Blv$$

Посоката на индуцираното е.д.н. се определя по *правилото на отворената длан на дясната ръка*: ако отворената длан на дясната ръка е ориентирана така, че магнитните линии да се забиват в нея, а палецът да сочи посоката на движението, отворените пръсти показват посоката на индуцираното е.д.н.

Намагнитеност на веществата. Интензитет на магнитното поле

Магнитен момент m на кръгов ток – векторна величина:

$$\vec{m} = SI$$

Векторът \vec{m} е перпендикулярен на повърхнината, заградена от токовия контур. Посоката му се определя по *правилото на тирбушона*.

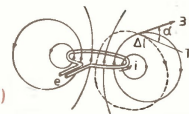
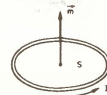
Намагнитеност на веществото – сумата от магнитните моменти на елементарните токове за единица обем:

$$\vec{M} = \sum \frac{\vec{m}}{V}$$

Опитно е установено, че за вакуум циркулацията (сумирането по затворен контур) на вектора на магнитната индукция е пропорционален на тока, който обхваща контура на сумиране:

$$\sum B \cos \alpha \Delta l = \sum \vec{B} \Delta l = \mu_0 I; \quad \oint \vec{B} dl = \mu_0 I$$

μ_0 е магнитната константа; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \approx 1,257 \cdot 10^{-6}$ Н/м.



Ако същият контур се намира в материална среда, трябва да се отчете и сумата на вътрешноатомните токове i' , обхващани от контура на сумиране:

$$\sum \vec{B} \Delta l = \mu_0 i + \mu_0 i', \quad \sum \vec{B} \Delta l = \mu_0 i + \mu_0 i', \quad \left(\oint \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 i + \mu_0 i' \right)$$

Сумата на вътрешноатомните токове се изразява с намагнитеността на веществото:

$$i' = \sum M \Delta l \quad (i' = \oint \vec{M} d\vec{l})$$

или

$$\sum \vec{B} \Delta l = \mu_0 i + \mu_0 \sum \vec{M} \Delta l,$$

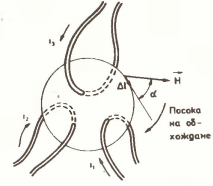
$$\sum \left(\frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M} \right) \Delta l = i$$

или

$$\sum \vec{H} \Delta l = i \quad \left(\oint \vec{H} d\vec{l} = i \right)$$

Интензитет на магнитното поле $\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$.

Въвеждането на величината интензитет на магнитното поле има това предимство, че сумирането на вектора \vec{H} по всеки затворен контур се определя само от макроскопически токове, т.е. токове, протичащи в проводящи контури, които обхващат контура на сумиране. Знакът на токовете се определя по правилото на тирбушона.



$$\sum \vec{H} \Delta l = i_1 - i_2 + i_3$$

Изразяване на магнитната индукция чрез интензитета на магнитното поле

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M})$$

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad \text{— за вакуум}$$

За изотропна среда векторите \vec{B} и \vec{H} съвпадат по посока — линиите на вектора \vec{B} са линии на вектора \vec{H} .

Ако контурът на сумиране е магнитна линия и по цялата ѝ дължина, векторът \vec{H} има една и съща стойност:

$$Hl = \sum i, \quad \text{или} \quad Hl = Ni,$$

когато бобината е с N навивки.

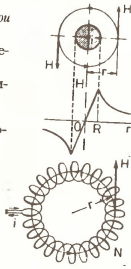
Определяне интензитета на магнитното поле в някои частни случаи

1. Магнитното поле на безкрайно дълъг праволинейен проводник

— за точки извън напречното сечение на проводника $H = \frac{i}{2\pi r}$;

— за точки, намиращи се във вътрешността на проводника $H = \frac{i}{2\pi R^2} r$.

2. За тороидална бобина с N навивки $H = \frac{Ni}{2\pi r}$.



Магнитни свойства на веществата

За изотропна среда векторите B , H и M съвпадат по посока и между тях съществуват връзките

$$B = \mu H \quad \text{и} \quad M = \chi H.$$

Тогав $B = \mu_0(H + M) = \mu_0(1 + \chi)H = \mu H$, откъдето $\mu = \mu_0(1 + \chi)$. Величината χ се нарича магнитна възприемливост на веществото, а величината μ — магнитна проникваемост.

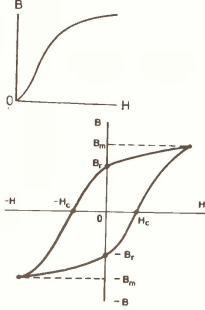
Относителната магнитна проникваемост на веществото е

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = 1 + \chi.$$

Според стойностите на μ и χ веществата се делят на три групи:

- диамагнитни, за които $\mu < \mu_0$ и $\chi < 0$ и μ и χ са константи;
- парамагнитни, за които $\mu > \mu_0$ и $\chi > 0$ и μ и χ са константи;
- феромагнитни, за които $\mu \gg \mu_0$ и μ зависи от интензитета на полето и от предишното магнитно състояние.

Ако феромагнитният материал е напълно размагнитен, намагнитването става по кривата на първоначалното намагнитване.



След неколккратно пренамагнитване до едни и същи стойности от B_m до $-B_m$ намагнитването става по една симетрична затворена линия, наречена хистерезисен цикъл.

Индукцията B_r при $H = 0$ се нарича остатъчна индукция, а интензитетът на полето H_c , при което се получава намагнитване нула, т.е. $B = 0$ — коефициент на хистерезисен интензитет.

Според вида на хистерезисната си крива феромагнитните материали се делят на — магнитотвърди — с широк хистерезисен цикъл, големи стойности на B_r и H_c ;

— магнитомекки — с тесен хистерезисен цикъл, малки стойности на B_r и H_c .

От магнитотвърдите материали, които са специалните високолегирани стомани и някои ферити, се изработват постоянни магнити.

Магнитомекките материали се използват при работа при променливи магнитни полета. Магнитомекки материали са листовата електротехническа стомана (силициева стомана), сплавите пермалой (сплави на основата на желязото и никела), някои ферити и др.

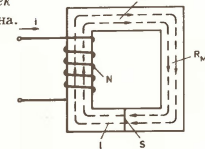
Магнитни вериги

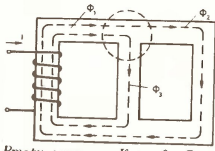
Устройствата, които създават път на магнитните линии, се наричат магнитни вериги. В електротехническите съоръжения те се изработват от феромагнитен материал, като при една част от тях магнитните линии се затварят по целия си път през феромагнитен материал, а при други има и въздушни междини.

Законите на магнитните вериги, т.е. връзките между магнитните потоци, възбуждащото поле и параметрите на самата верига, по външен вид имат същата структура както законите на електрическите вериги и затова имат същите имена.

Закон на Ом. Магнитният поток Φ е пропорционален на намагнитващата сила Ni и обратнопропорционален на магнитното съпротивление R_M

$$\Phi = \frac{Ni}{R_M}, \quad R_M = \frac{l}{\mu S}$$





Първи закон на Кирхоф. За една възлова точка на магнитна верига сумата от магнитните потоци е равна на нула:

$$\sum \Phi = 0 \quad (\text{за конкретната фигура } \Phi_1 = \Phi_2 + \Phi_3).$$

Втори закон на Кирхоф. Сумата от магнитните напрежителни падове $NI = \Phi R_M$ за един затворен контур от сложна магнитна верига е равна на сумата на магнитодвижещите напрежения Ni , които действат в този контур:

$$\sum NI = \sum \Phi R_M = \sum Ni.$$

Последователно свързване на участъци от магнитни вериги. Еквивалентното магнитно съпротивление е

$$R_{M_{\text{екв}}} = R_{M1} + R_{M2} + \dots + R_{Mn} = \sum R_M.$$

Паралелно свързване на участъци от магнитни вериги. Еквивалентното магнитно съпротивление е

$$\frac{1}{R_{M_{\text{екв}}}} = \frac{1}{R_{M1}} + \frac{1}{R_{M2}} + \dots + \frac{1}{R_{Mn}} = \sum \frac{1}{R_M}$$

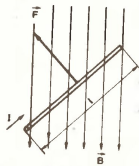
Изчислението на магнитните вериги става по същия начин както електрическите, но когато в магнитните вериги има феромагнитен материал трябва да се държи сметка за нелинейното намагнитване на материала.

Енергия на магнитното поле

- на един уединен токов контур $W_M = \frac{1}{2} Li^2$,
 - на два токови контура $W_M = \frac{1}{2} L_1 i_1^2 + \frac{1}{2} L_2 i_2^2 + M i_1 i_2$,
 - на система от токови контури $W_M = \frac{1}{2} L_1 i_1^2 + \frac{1}{2} L_2 i_2^2 + \dots + \frac{1}{2} L_n i_n^2 + M_{12} i_1 i_2 + M_{13} i_1 i_3 + \dots + M_{kp} i_k i_p + \dots$
- Обемна плътност на енергията на магнитното поле

$$W'_M = \frac{W_M}{V} = \frac{BH}{2} = \frac{1}{2} \mu H^2 = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu}$$

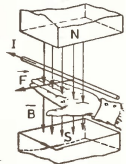
Електромагнитни сили



Върху праволинеен проводник с ток I , който се намира във външно магнитно поле, действа сила

$$F = BI l \sin \alpha.$$

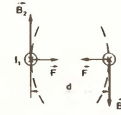
α е ъгълът между векторите \vec{B} и \vec{l} (на фигурата $\alpha = \frac{\pi}{2}$).



Посоката на силата се определя по правилото на отворената длан на лявата ръка - когато отворената длан на лявата ръка се разположи така, че магнитните линии се забиват в нея и посоката на отворените пръсти съвпада с посоката на тока, посоката на палеца определя посоката на механичната сила на взаимодействие.

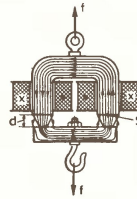
Силата на взаимодействие между два успоредни проводника с дължина l е

$$F = \mu \frac{I_1 I_2 l}{2\pi d}$$



Подъемни сили на електромагнит

$$F = BHS = \frac{B^2}{\mu_0} S$$



Ако частица със заряд Q се движи със скорост v в магнитно поле, върху нея действа сила

$$\vec{F} = Q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad \text{при положителен заряд}$$

$$\vec{F} = Q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad \text{при отрицателен заряд.}$$

Ако в пространството, където се движи частицата със заряд, съществува и електрическо поле, резултантната сила е

$$\vec{F} = Q\vec{E} + Q(\vec{v} \times \vec{B})$$

Еднофазни вериги за синусоиден ток

Променливи е.д.н., напрежения и токове

Величини, чийто стойности се изменят с течение на времето, се наричат променливи. Стойността им в даден момент от времето се нарича моментна и за е.д.н., напрежението и тока се означава

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

Променливите величини са периодични, когато стойностите им се повтарят през равни интервали от време:

$$e = F(t) = F(t + kT);$$

$$u = F(t) = F(t + kT);$$

$$i = F(t) = F(t + kT)$$

k може да бъде всяко цяло число, а най-малкият интервал от време T , след който започват да се повтарят стойностите на величините, е техният период.

Честота - реципрочна величина на периода

$$f = \frac{1}{T}, \quad \text{Hz}.$$

За енергийни цели се използват променливи е.д.н., напрежения и токове с честота 50 Hz и синусоидна форма:

$$\begin{aligned} e &= E_m \sin(\omega t + \psi_e); \\ u &= U_m \sin(\omega t + \psi_u); \\ i &= I_m \sin(\omega t + \psi_i). \end{aligned}$$

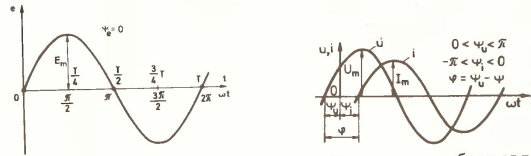
където E_m , U_m и I_m са амплитуди, $\omega = 2\pi f$ е ъгловата честота, а ψ_e , ψ_u и ψ_i са началните фази, които определят стойностите на трептенията при $t = 0$.

Стойностите на трептенията във всеки друг момент от времето се определят от техните фази $(\omega t + \psi_e)$, $(\omega t + \psi_u)$ и $(\omega t + \psi_i)$. Фазова разлика – разликата на фазите на две величини. Напр. фазовата разлика между u и i :

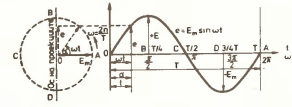
$$\varphi = \omega t + \psi_u - (\omega t + \psi_i) = \psi_u - \psi_i.$$

Изобразяване на синусоидни величини

Графично изобразяване в декартова координатна система. По абсцисната ос се нанася времето t или фазовият ъгъл ωt .



Векторно. Използва се въртящ се вектор, който в даден мащаб има дължина, равна на амплитудата на изобразяваната величина, и се върти с ъглова скорост ω , равна на ъгловата честота на синусоидната функция.



Проекцията на вектора върху вертикалната ос определя моментната стойност на функцията. Векторното изобразяване на синусоидните функции се използва широко при сумирането на синусоидни функции с една и съща честота, тъй като на това действие с функциите съответства геометрично събиране на векторите, които ги изобразяват.

Почесто векторите се остават неподвижни, като единият от тях се взема за изходен (изобразяваната от него величина е изходната), а векторите, които изобразяват останалите величини се ориентират спрямо изходния в зависимост от фазовите разлики между величините.



Символично. Използват се комплексни числа, като с j се означава $\sqrt{-1}$. Синусоидната функция $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$ се изобразява с комплексно число $I_m e^{j(\omega t + \psi_i)} = I_m e^{j\psi_i} e^{j\omega t} = I_m \cos(\omega t + \psi_i) + j I_m \sin(\omega t + \psi_i)$. Изобразяваната синусоидна функция е имагинерната част на комплексното число.

Комплексното число $I_m = I_m e^{j\psi_i}$ се нарича комплексна амплитуда и определя максималната стойност и началната фаза на изобразяваната функция.

Ефективна и средна стойност

Ефективната стойност на една периодична функция, например $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$, представлява средната ѝ квадратична стойност за един период:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \sum i^2 \Delta t} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum I_m^2 \sin^2(\omega t + \psi_i) \Delta t};$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2(\omega t + \psi_i) dt}.$$

Ефективната стойност на протекания периодичен ток е такава стойност на постоянния ток, който за същото време отделя същото количество топлина както и променливия.

При синусоидни величини връзката между ефективната и максималната стойност е

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}, \quad U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}, \quad E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}.$$

Средна стойност на синусоидна функция е средната стойност на положителната полуълна:

$$E_{cp} = \frac{1}{T} \sum E_m \sin \omega t \Delta t = \frac{2}{\pi} E_m;$$

$$E_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^{\frac{\pi}{\omega}} E_m \sin \omega t dt = \frac{2}{\pi} E_m.$$

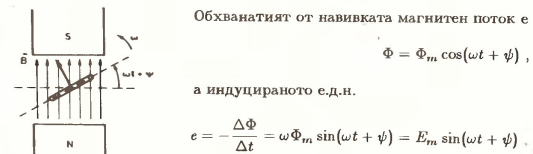
Коефициент на формата

$$k_f = \frac{E}{E_{cp}}.$$

При синусоидни величини $k_f = 1,11$.

Получаване на е.д.н. със синусоидна форма

Получава се когато една навивка се върти с постоянна ъглова скорост ω в равномерно магнитно поле на постоянен магнит.



Обхващаният от навивката магнитен поток е $\Phi = \Phi_m \cos(\omega t + \psi)$, а индуцираното е.д.н. $e = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \omega\Phi_m \sin(\omega t + \psi) = E_m \sin(\omega t + \psi)$. Индуцираното е.д.н. изостава по фаза от магнитния поток на ъгъл $\frac{\pi}{2}$ и съответно на векторната диаграма векторът E_m , който изобразява това е.д.н., е изместен на ъгъл $\frac{\pi}{2}$ в отрицателна посока спрямо вектора на магнитния поток Φ_m .

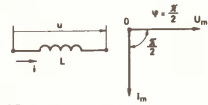
Елементи във веригите за променлив ток

Резистивни. Характеризират се със съпротивление R , което при променлив ток се нарича активно. Когато през резистивен елемент протича ток $i = I_m \sin \omega t$ върху него се получава напрежение $u = RI_m \sin \omega t = U_m \sin \omega t$, т.е. напрежението и токът съвпадат по фаза и между максималните им стойности съществува връзката $U_m = RI_m$.

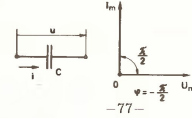


Индуктивни. Често индуктивните бобини се приемат за идеални елементи, т.е. пренебрегва се съпротивлението на проводника, от който са навити. Тогава те се характеризират с индуктивното съпротивление $X_L = \omega L$. Когато през индуктивен елемент протича ток $i = I_m \sin \omega t$, върху елемента се получава напрежение $u = -\omega LI_m \cos \omega t = U_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$. Напрежението изпреварва по фаза тока с ъгъл $\frac{\pi}{2}$ (или токът изостава от напрежението по фаза с ъгъл $\frac{\pi}{2}$) и между максималните им стойности съществува връзката $U_{Lm} = \omega LI_m = X_L I_m$.

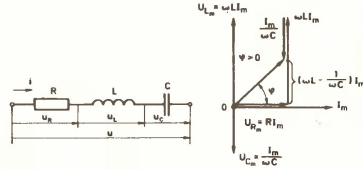
47



Капацитивни. Характеризират се с капацитивното съпротивление $X_C = \frac{1}{\omega C}$. Когато през капацитивен елемент протича ток $i = I_m \sin \omega t$, върху елемента се получава напрежение $u = \frac{I_m}{\omega C} \cos \omega t = U_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$. Напрежението изостава по фаза от тока с ъгъл $\frac{\pi}{2}$ (или токът изпреварва по фаза напрежението с ъгъл $\frac{\pi}{2}$) и между максималните им стойности съществува връзката $U_{Cm} = \frac{I_m}{\omega C} = X_C I_m$.



Електрическа верига от последователно свързани резистор, бобина и кондензатор



$u = u_R + u_L + u_C$

При синусовидно напрежение върху веригата

$u = U_m \sin \omega t, \quad i = I_m \sin(\omega t - \varphi)$

където $I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}}$

$\varphi = \arctg \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}$
 $z = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2} = \sqrt{R^2 + X^2}$ — пълно съпротивление;

$X = \omega L - \frac{1}{\omega C}$ — реактивно съпротивление.

Напреженията върху отделните елементи на веригата са

$u_R = Ri = RI_m \sin(\omega t - \varphi) = U_{Rm} \sin(\omega t - \varphi)$

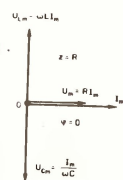
$u_L = L \frac{di}{dt} = \omega LI_m \cos(\omega t - \varphi) = U_{Lm} \sin(\omega t - \varphi + \frac{\pi}{2})$

$u_C = \frac{1}{C} \int i dt = -\frac{I_m}{\omega C} \cos(\omega t - \varphi) = U_{Cm} \sin(\omega t - \varphi - \frac{\pi}{2})$

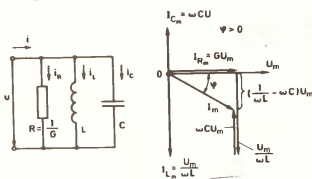
Когато $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ и $\varphi = 0$, електрическата верига е в резонанс.

Векторна диаграма при резонанс
 Резонансна честота на веригата

$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$



Електрическа верига от паралелно свързани резистор, бобина и кондензатор



При тази верига се работи с проводимостите:

активна $G = \frac{1}{R}$;

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

капацитивна $B_C = \omega C$;

реактивна $B = B_L + B_C$;

пълна $y = \sqrt{G^2 + (\frac{1}{\omega L} - \omega C)^2} = \sqrt{G^2 + B^2}$

При синусовидно напрежение $u = U_m \sin \omega t$, токовете са

$i_R = Gu = GU_m \sin \omega t$;

$i_L = \frac{1}{L} \int i dt = -\frac{U_m}{\omega L} \cos \omega t = I_{Lm} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$;

$i_C = \frac{dQ}{dt} = \frac{d(Cu)}{dt} = \omega CU_m \cos \omega t = I_{Cm} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$;

$i = U_m \sqrt{G^2 + (\frac{1}{\omega L} - \omega C)^2} \sin(\omega t - \varphi) = I_m \sin(\omega t - \varphi)$

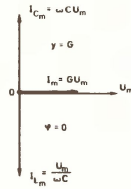
като фазовата разлика е

$\varphi = \arctg \frac{\frac{1}{\omega L} - \omega C}{G}$

При $\frac{1}{\omega L} = \omega C$, т.е. когато $\varphi = 0$, веригата е в резонанс. Резонансната честота е

$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

Векторна диаграма при резонанс



Мощности във веригите за променлив ток

Когато в една електрическа верига действа напрежение u и протича ток i за елементарно време Δt се пренася заряд ΔQ и се извършва елементарна работа

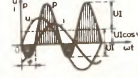
$$\Delta A = u \Delta Q = ui \Delta t; \quad dA = udQ = uiddt.$$

Скоростта на извършване на работата във веригите за променлив ток се нарича *момента мощност*:

$$p = \frac{dA}{dt} = ui.$$

При синусоидни напрежения и ток моментната мощност с течение на времето се изменя по закона

$$p = ui = U_m \sin \omega t I_m \sin(\omega t - \varphi) = UI [\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi)].$$



Средната стойност на моментната мощност или работата за единица време се нарича *активна мощност*:

$$P = UI \cos \varphi, \text{ W.}$$

$\cos \varphi$ - коефициент или *фактор на мощността*.

Определя как влияе фазовата разлика върху извършваната работа в електрическата верига при едни и същи ефективни стойности на напрежението и тока.

Във веригите за променлив ток се въвеждат и *реактивна мощност* $Q = UI \sin \varphi$, var.

пълна или обща мощност $S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2}$, VA.

Законали на веригите за променлив ток в символична форма

Закон на Ом

$$\dot{i} = \frac{\dot{U}}{Z} = Y \dot{U},$$

където \dot{U} и \dot{i} са комплексите на напрежението и тока (дадени с ефективните стойности);

$Z = R + jX$ - комплексът на пълното съпротивление;

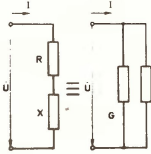
$Y = G - jB$ - комплексът на пълната проводимост.

Условие за еквивалентност на веригите за променлив ток

$$Z = \frac{1}{Y}.$$

Първи закон на Кирхоф

$$\sum \dot{I} = 0.$$

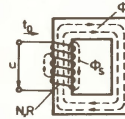


Втори закон на Кирхоф

$$\sum zI - \sum E = 0$$

Бобина с феромагнитна сърцевина

Бобини с голяма индуктивност се получават като намотката им се поставя върху магнитопровод от феромагнитен материал (най-често листов електротехническа стомана).



Магнитните линии, които намират път през феромагнитния материал, образуват *основния магнитен поток* Φ_0 , на който съответства *пълен основен магнитен поток* $\psi_0 = N\Phi_0$. Магнитните линии, които се затварят през въздуха, определят *магнитния поток на разсейване* Φ_S . Освен магнитния поток на разсейване за бобината се отчитат

загубите на мощност в стоманения магнитопровод

$$P_{ст} = P_x + P_{вт.} = \eta f B_m^n V + \xi f^2 B_m^2 V.$$

Коефициентите η и n , които определят загубите от хистерезис, зависят от материала, а коефициентът ξ , даващ загубите от вихрови токове - от материала, формата и размерите на магнитопровода.

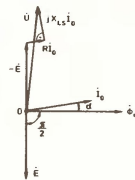
- *съпротивлението R на проводника, от който е направена бобината.*

Вследствие загубите от вихрови токове и хистерезис магнитният поток изостава на ъгъл α от намагнитващия ток \dot{I}_0 .

Напрежението \dot{U} , приложено към бобината, се уравнива от индукцираното е.н. \dot{E} , от основния магнитен поток Φ_0 , от напрежителния пад $R\dot{I}_0$ в активното съпротивление на бобината и от напрежителния пад $jX_S \dot{I}_0$, уравниваещ индукцираното е.н. от магнитния поток на разсейване Φ_S :

$$\dot{U} = -\dot{E} + R\dot{I}_0 + jX_S \dot{I}_0.$$

Векторна диаграма на бобината с феромагнитна сърцевина.



Трифазни вериги

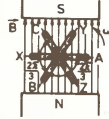
Получаване на трифазна система е.д.н.

Трифазната електрическа верига представлява три електрически вериги, в които действат електродвижещи напрежения с една и съща честота. Електродвижещите напрежения, действащи във веригите, образуват трифазна система е.д.н., а противчащите токове – трифазна система токове. Системите е.д.н., напрежения и токове са симетрични и несиметрични. Системата е симетрична, когато всички величини имат еднакви амплитуди и са изместени по фаза една спрямо друга на един и същ ъгъл (120° или $\frac{2\pi}{3}$).

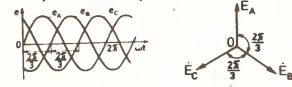
Симетрична трифазна система е.д.н. се получава, когато три еднакви навивки $A-X$, $B-Y$ и $C-Z$, плоскостите на които са изместени в пространството на ъгъл 120° ($\frac{2\pi}{3}$) се въртят с постоянна ъглова скорост ω в равномерно магнитно поле на постоянен магнит.

Индуцираните е.д.н. са

$$\begin{aligned} e_A &= E_m \sin \omega t; \\ e_B &= E_m \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right); \\ e_C &= E_m \sin \left(\omega t - 2 \frac{2\pi}{3} \right) = E_m \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right). \end{aligned}$$



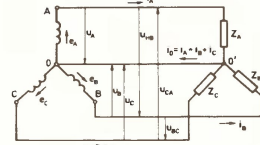
Графично и векторно изобразяване на трите е.д.н.



За симетрична система величини е в сила равенството

$$e_A + e_B + e_C = 0$$

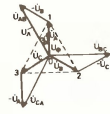
Трифазна верига, свързана в звезда



Фазовите токове (токовете във фазите на генератора или консуматора) са равни на линейните токове в (линейните проводници): $I_\phi = I_n$, но фазовите напрежения u_A , u_B и u_C се различават от линейните u_{AB} , u_{BC} и u_{CA} . Между двата вида напрежения съществуват връзките:

$$\begin{aligned} u_{AB} &= u_A - u_B; \\ u_{BC} &= u_B - u_C; \\ u_{CA} &= u_C - u_A. \end{aligned}$$

Векторна диаграма на фазовите и линейните напрежения



$$U_n = 2U_\phi \cos 30^\circ = \sqrt{3}U_\phi.$$

Токът в линейния проводник, свързващ неутралната точка на генератора O с неутралната точка на консуматора O' , е

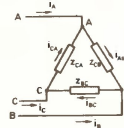
$$i_0 = i_A + i_B + i_C.$$

Когато товарът е симетричен, т.е. $Z_A = Z_B = Z_C$, фазовите токове образуват симетрична трифазна система и токт

$$i_0 = 0.$$

Отделните еднофазни консуматори се свързват в звезда, като всеки консуматор получава два проводника от трифазната система: линейният, който на мястото на консуматора се нарича фаза, и нулевият, към който се свързват и всички метални нетоководещи части на консуматорите. Затова предпазител се поставя само във фазовия проводник.

Свързване триъгълник в трифазната верига



$$U_\phi = U_n,$$

$$\begin{aligned} i_A &= i_{AB} - i_{CA}, \\ i_B &= i_{BC} - i_{AB}, \\ i_C &= i_{CA} - i_{BC}. \end{aligned}$$

В България в триъгълник се свързват само трифазни консуматори, които най-често са симетрични, т.е. $Z_{AB} = Z_{BC} = Z_{CA}$. Тогава фазовите и линейните токове представляват симетрични трифазни системи. Векторна диаграма на токовете



$$I_n = \sqrt{3}I_\phi.$$

Мощности в трифазните вериги

Активната мощност на трифазната верига P представлява сумата от активните мощности на отделните фази:

$$P = P_A + P_B + P_C = U_{A\phi} I_{A\phi} \cos \varphi_A + U_{B\phi} I_{B\phi} \cos \varphi_B + U_{C\phi} I_{C\phi} \cos \varphi_C.$$

При симетрична система на напреженията и симетричен товар когато $U_{A\phi} = U_{B\phi} = U_{C\phi} = U_\phi$, $I_{A\phi} = I_{B\phi} = I_{C\phi} = I_\phi$ и $\cos \varphi_A = \cos \varphi_B = \cos \varphi_C = \cos \varphi$, мощността на трифазната верига е утроената мощност на една от фазите:

$$P = 3P_A = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi.$$

Често при симетричен товар мощността се изразява чрез линейните величини

$$P = \sqrt{3}U_n I_n \cos \varphi,$$

където φ е фазовата разлика между фазовото напрежение и фазовия ток.

Реактивна мощност на симетрична трифазна верига

$$Q = \sqrt{3}U_n I_n \sin \varphi.$$

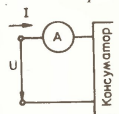
Правилна мощност на симетрична трифазна система

$$S = \sqrt{3}U_n I_n.$$

Електрически измервания

Измерване на ток

Непосредствено ток се измерва с амперметър, който се свързва последователно във веригата.



При вериги за постоянен ток се внимава за полярността на измервателния уред.

Ако скалата на амперметъра не е директна, а има Θ_n брой скални деления, определя се константата на уреда:

$$K_A = \frac{I_n}{\Theta_n}, \text{ A/ск. дел.}$$

I_n е номиналният ток на амперметъра.

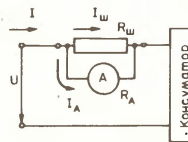
Измерваният ток се изчислява чрез отчетените показания на амперметъра Θ и константата му

$$I = K_A \Theta.$$

При постоянен ток обхватът на амперметрите се разширява с резистор, който се свързва паралелно на амперметъра и се нарича шунт.

Ако обхватът на амперметъра трябва да се разшири m пъти,

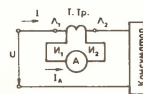
$$R_{ш} = \frac{R_A}{m-1}$$



При променлив ток обхватът на амперметрите се разширява посредством токов измервателен трансформатор.

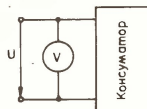
Амперметърът измерва токът I_A , а токът в линията I се определя чрез измерения I_A и коефициента на трансформация на токовия трансформатор $K_T = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_2}{N_1}$:

$$I = K_T I_A.$$



Измерване на напрежение

Непосредствено напрежение се измерва с волтметър, който се свързва към точките, между които трябва да се измери напрежението.



При вериги за постоянен ток се следи полярността на измервателния уред.

Ако скалата на волтметъра не е директна, а има Θ_n брой скални деления, определя се константата на волтметъра:

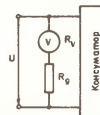
$$K_V = \frac{U_n}{\Theta_n}, \text{ V/ск. дел.}$$

U_n е номиналният обхват на волтметъра.

При постоянни напрежения и при променливи напрежения до 1000 V обхватът на волтметрите се разширява с допълнителен резистор, който се свързва последователно на волтметъра.

Ако обхватът на волтметъра се разширява n пъти,

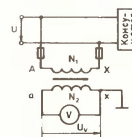
$$R_g = (n-1)R_V.$$



При променливи напрежения, по-високи от 1000 V обхватът на волтметрите се разширява с напрежителен измервателен трансформатор.

Волтметърът измерва напрежението U_V , а напрежението в линията се определя чрез измереното U_V и коефициента на трансформация на напрежителния трансформатор $K_V = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$:

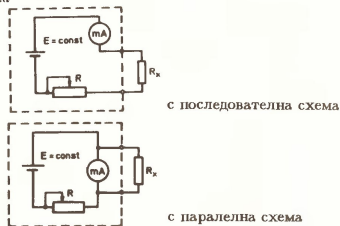
$$U = K_V U_V.$$



Измерване на съпротивления

С омметри. Измерването е непосредствено и скалата на уреда е градуирана направо в единици за съпротивление. Омметрите представляват измервателен механизъм от магнетоелектрическата система с вграден източник на постоянно напрежение. Затова токът в измервателния механизъм зависи от измерваното съпротивление.

Омметър с една bobина

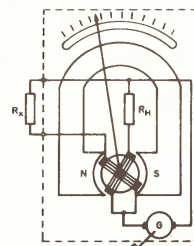


с последователна схема

с паралелна схема

Омметър с две bobини - догомер

Предимство на догомерите - промени на захранващото напрежение не оказват влияние на показанието на уреда, докато при омметрите с една bobина това напрежение трябва да остава с неизменна стойност с течение на времето. За отстраняване на грешката, дължаща се на промяна на напрежението, преди измерване показанията на омметрите се коригират с резистора R.



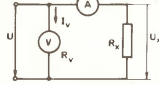
Омметрите с последователна схема са подходящи за измерване на средни и големи съпротивления (над 1 Ω), а омметрите с паралелна схема – за малки съпротивления.

С догомерите се измерват съпротивления с най-различни стойности. Когато източникът за постоянно напрежение е индуктор и дава напрежения до няколко киловолта, уредът се използва за измерване на много големи съпротивления и проверка на изолацията на кабели и електрически машини.

С амперметър и волтметър. Предимства на методи са: използване на най-широко разпространени уреди и възможност за поставяне на изследвания обект в работни условия. Измерваното съпротивление се определя от закона на Ом:

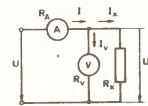
$$R_x = \frac{U_x}{I_x}$$

Две схеми на свързване на уредите и измервания обект
схема V – A



-100-

схема A – V



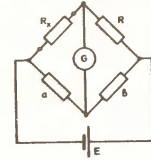
Не може да се измерят едновременно напрежението U_x и токът I_x . За да се определя съпротивлението R_x с по-малка грешка направо чрез показанията на волтметъра и амперметъра без да се търсят действителните стойности на U_x и I_x ,

схема V – A се използва при $R_x > \sqrt{R_A R_V}$, а схема A – V – при $R_x < \sqrt{R_A R_V}$.

С уитстонов мост. Той представлява четири резистора, свързани с четириъгълник.

В единия диагонал на четириъгълника се свързва магнитоелектрически галванометър, а към другия – източник на постоянно напрежение. Когато мостът е в равновесие (през галванометъра не протича ток), в сила е равенството

$$R_x = \frac{a}{b} R,$$



-101-

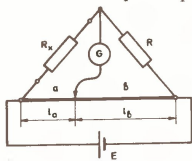
което дава възможност по три известни съпротивления да се определи едно неизвестно.

Според изпълнението на резисторите на моста уитстоновите мостове са:

— магазинни – резисторите, a и b и R са образцови магазинни резистори; — линейни – резисторите a и b представляват участъци от калибриран съпротивителен проводник, а резисторът R е образцово съпротивление с няколко стойности.

При линейните мостове неизвестното съпротивление се определя по формулата

$$R_x = \frac{l_a}{l_b} R.$$



Измерване на мощност във вериги за постоянен ток и еднофазни вериги за променлив ток

С амперметър и волтметър. Този метод се използва при постояннотокови вериги и еднофазни вериги за променлив ток, когато консуматорът представлява чисто активно съпротивление. Както при измерване на съпротивление с амперметър и волтметър има възможности за свързване на уредите в схема V – A и схема A – V.

-102-

Измерваната мощност се изчислява от показанията на уредите по формулата

$$P = UI.$$

Схемата V – A е подходяща за измерване мощността на консуматори с голямо съпротивление, а схемата A – V – с малко съпротивление.

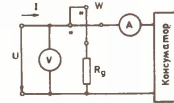
С ватметър.

Ватметрите имат две вериги – токова и напрежителна. За токовата се дава номиналният ток I_n , а за напрежителната – номиналното напрежение U_n . Ватметрите се конструират така, че когато през токовата верига протича номиналният ток, а към напрежителната верига е приложено номинално напрежение, подвижната част се отклонява до края на скалата. Затова константата на ватметъра е

$$K_W = \frac{U_n I_n}{\Theta_n}, \text{ W/ск. дел.}$$

Ватметрите работят при постоянен и при променлив ток и във веригите за променлив ток измерват активната мощност $P = UI \cos \varphi$.

Понеже отклонението на подвижната част на ватметъра зависи от по-



-103-

соката на токовете в неговите вериги, за да се получи правилно отклонение, единият от изводите на двете вериги се маркира с подходящ знак. Тези изводи се наричат генераторни.

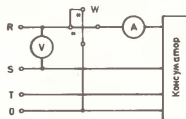
При променлив ток най-често градуировката на скалата е направена при $\cos \varphi = 1$. За да не се превишават номиналните стойности на величините за напрежителната и токовата верига при измерванията, поставят се и контролни уреди – амперметър и волтметър.

Обхватът на токовата верига на ватметъра се разширява както обхваща на един амперметър, а на напрежителната – както на волтметър.

Измерване на активна мощност в трифазни вериги

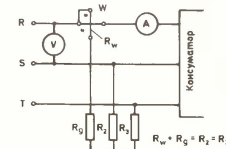
При симетричен товар

Измерва се мощността на една от фазите, като при достъпна неутрална точка на консуматора ватметърът се свързва към една от фазите.



-104-

Когато тази точка е недостъпна, се създава изкуствена нулева точка



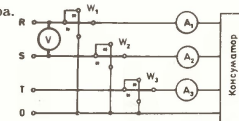
$$P = 3K_W \Theta,$$

където Θ е показанието на ватметъра.

При несиметричен товар

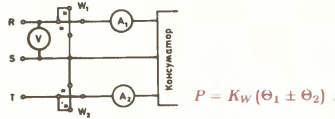
При четирипроводна захранваща линия измерването става с три ватметъра,

$$P = K_W (\Theta_1 + \Theta_2 + \Theta_3)$$



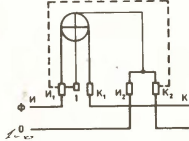
-105-

а при трифазовна — с два ватметра (схема на Арон)



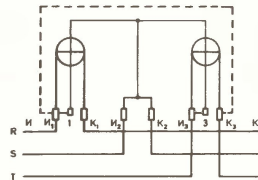
Знакът е (+) когато при правилно свързване на ватметрите и двата ватметра дават положителни показания, а (-), когато единият от ватметрите се отклонява наляво. За да се отчете показанието му, разменят се изводите на една от веригите му и полученото показание се взема със знак (-).

Измерване на енергия във веригите за променлив ток



Измерването става с индукционни електромери. При еднофазни вериги свързването на електромера е както това на ватметра.

когато захранващата линия е трифазовна — двуелементни електромери.



ни консуматори и вторичният ток $I_2 = 0$. В този режим работата на трансформатора не се отличава от бобината с феромагнитна сърцевина. Индуцираните е.д.н. от основния магнитен поток са

$$E_1 = 4,44 f N_1 \Phi_{0m}$$

$$E_2 = 4,44 f N_2 \Phi_{0m}$$

При празен ход се определя коефициентът на трансформация

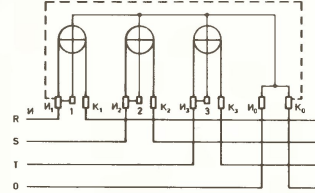
$$K = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Понеже токът на празен ход I_{10} е много малък в сравнение с първичния номинален ток I_{1n} , приема се $\dot{U}_1 \approx \dot{E}_1$ и коефициентът на трансформация опитно се определя чрез измерване на първичното и вторичното напрежения при празен ход

$$K = \frac{U_1}{U_2}$$

Консумираната мощност от трансформатора при празен ход P_{10} отива за

При трифазни консуматори

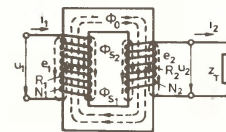


когато захранващата линия е четирифазовна се използват триелементни електромери,

Трансформатори

Трансформаторите са статични електромагнитни устройства, чието действие се основава на явленията електромагнитна индукция. Те преобразуват променливотоковата електрическа енергия с едно напрежение в променливотокова електрическа енергия с друго напрежение, но при неизменна честота.

Трансформаторът представлява затворен магнитопровод от листовъ електротехническа стомана, върху който са разположени две (в някои случаи и повече) намотки. Едната намотка, която се нарича първична, се свързва към източник на променливо напрежение, а към другата, наречена вторична, се свързват консуматорите.



$$X_{S1} = \omega L_{S1} \quad X_{S2} = \omega L_{S2}$$

$$L_{S1} = \frac{\Psi_{S1}}{I_1} \quad L_{S2} = \frac{\Psi_{S2}}{I_2}$$

Празен ход на трансформатора. Към вторичната намотка няма включение

покриване на загубите от вихрови токове и хистерезис в стоманения магнитопровод.

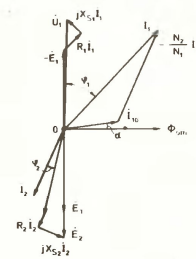
Работа на трансформатора при товар. Към вторичната намотка на трансформатора са включени консуматори и през нея протича ток \dot{I}_2 . Това води до увеличаване на първичния ток:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{10} + \left(-\frac{N_2}{N_1} \dot{I}_2 \right)$$

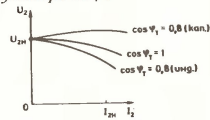
П закон на Кирхов, приложен за първичната и вторичната страна на трансформатора

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_1 + R_1 \dot{I}_1 + j \dot{X}_S$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - R_2 \dot{I}_2 - j \dot{X}_{S2} I_2$$

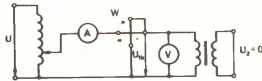


Външни характеристики на трансформатора за три стойности на фактора на мощността на консуматора $\cos \varphi_2$.



Опит на късо съединение. Вторичната страна на трансформатора се дава на късо, а към първичната намотка се подава напрежение, при което се получава номинален първичен ток.

Това напрежение се нарича напрежение при опит на късо съединение и се дава като параметър на трансформатора, изразено в % спрямо номиналното първично напрежение:



$$\epsilon_k = \frac{U_{к.с.}}{U_{1н}} \cdot 100 \%$$

Измерената мощност при опит на късо съединение представлява загубите в съпротивлението на първичната и вторичната намотка на трансформатора при номинални токове:

$$P_{1,2} = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2$$

При късо съединение и при токове, близки до номиналните, е в сила отношението

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{1}{K} = \frac{N_2}{N_1}$$

Коефициент на полезно действие на трансформатора

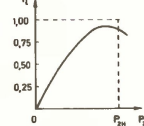
$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2$ е полезната мощност, която получават консуматорите, а $P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1$ - мощността, която трансформаторът взема от мрежата за променлив ток

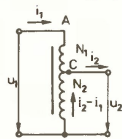
Определяне на коефициента на полезно действие чрез данните от опитите на празен ход и късо съединение:

$$\eta = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_2 I_2 \cos \varphi_2 + P_{10} + P_{Cu} \left(\frac{I_2}{I_{2н}}\right)^2}$$

Зависимост на к.п.д. на трансформатора от полезната мощност P_2 .



Автотрансформатори.

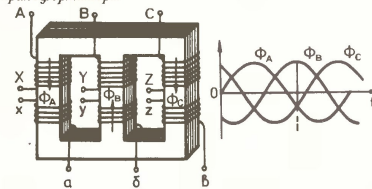


едното ядро се затвлява през другите две, тъй като трите магнитни потока образуват симетрична трифазна система. Изводите на намотките за трите фази се означават по следния начин: на намотките за високо напрежение - началата с A, B, C, а краищата с X, Y, Z; на намотките за ниско напрежение - началата с a, b, c, а краищата с x, y, z.

Имат само една намотка - намотката за по-високото напрежение. Понижното напрежение се извежда от единия край на намотката и някаква нейна междинна точка, така че да е изпълнено съотношението

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1 + N_2}{N_2} = K$$

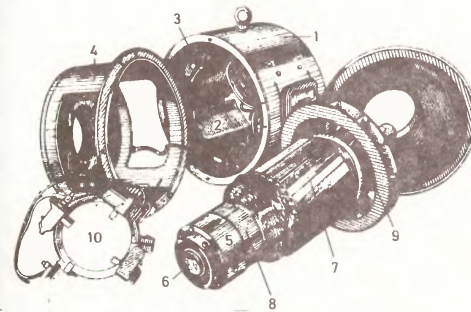
Трифазни трансформатори.



Имат магнитопровод с три ядра, върху които са поставени намотките за трите фази. В даден момент от времето магнитният поток на

Машини за постоянен ток

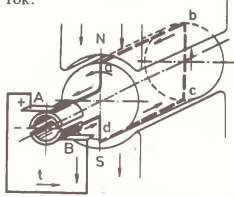
Устройство и принцип на действие на машините за постоянен ток



Устройство на машина за постоянен ток

Стоманеният цилиндър 1 е статорът (индукторът) с главни полюси 2 и допълнителни полюси 3. Цилиндърът 7 от листов електротехническа стомана е роторът (котвата), в каналите на който е положена котвената намотка, изведена на колектора 8. Фланците 4 са закрепени към статора и държат лагерите 5, в които се върти валът на котвата 6. Четките се поставят в четкодържателя 10, който се закрепва към един от фланците. Вентилаторът 9 служи за охлаждане.

По същество машините за постоянен ток са променливотокови машини, но посредством колектора във външната верига протича постоянен ток.



При въртенето на навивката a, b, c, d, в нея се индуцира променливо е.д.н., но чрез колекторните полуцилиндри към четката А винаги контактува проводник от навивката с положително е.д.н. и токът във външната верига протича в една посока.

Електродвижещо напрежение на котвата. Когато котвата се върти, в нея се индуцира е.д.н.

$$E = C_e \Phi \Omega$$

C_e е конструктивна константа;

Φ – магнитният поток на основните полюси,
 n – честотата на въртене.

В двигателен режим е.д.н. на котвата се противопоставя на подаденото външно напрежение и се нарича *противоелектродвижещо напрежение*.

Електромагнитен въртящ момент. Той се създава от взаимодействието на котвения ток I_k с магнитното поле на индуктора и е

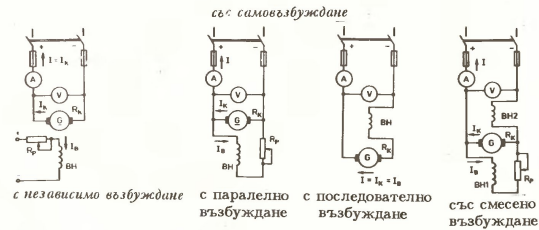
$$M = C_m \Phi I_k$$

C_m е конструктивна константа.

Когато машината за постоянен ток работи като генератор, електромагнитният въртящ момент е съпротивителен, а когато работи като двигател – двигателен, който осигурява въртенето на ротора.

Генератори за постоянен ток

Според начина на свързване на възбудителната намотка, която създава магнитния поток на основните полюси, генераторите за постоянен ток са



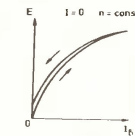
с независимо възбуждане

с паралелно възбуждане

с последователно възбуждане

със смесено възбуждане

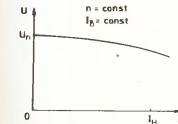
Характеристика на празен ход



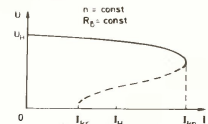
Тя е зависимостта на е.д.н. на генератора от възбудителния ток при липса на ток във външната верига и при постоянна честота на въртене. При $I_a = 0$ е.д.н. има известна стойност, което се дължи на остатъчната индукция. Характеристиката на празен ход се сменя при увеличаване и намаляване на възбудителния ток и практически представлява кривата на намагнитване на стоманата на машината. Напрежението на генератора при товара е

$$U = E - R_k I_k$$

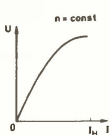
Зависимост на напрежението от тока във външната верига (външна характеристика на генератора)



за генератор с независимо възбуждане



за генератор с паралелно възбуждане

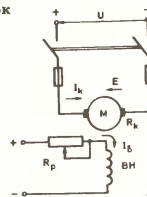


за генератор с последователно възбуждане

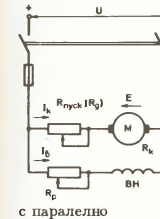


за генератор със смесено възбуждане

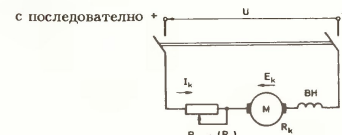
Двигатели за постоянен ток с независимо възбуждане



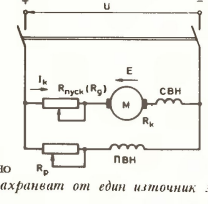
Котвената и възбудителната намотка се захранват от два независими източника



с паралелно



с последователно



със смесено

Котвената и възбудителната намотка се захранват от един източник за постоянен ток.

В *двигателен режим* приложеното напрежение към веригата на котвата U се уравнишава от едн. на котвата E и напрежителния пад в съпротивлението във веригата на котвата $(R_k + R_d)I_k$ или $(R_k + R_{пук})I_k$

$$U = E + (R_k + R_d)I_k$$

За *ограничаване на пусковия ток* двигателите с независимо възбуждане най-често се пускат при намалено напрежение, тъй като те се захравват от два самостоятелни източника, към които няма включени други консуматори, а другите видове двигатели – посредством пусков реостат $R_{пук}$.

Регулиране честотата на въртене на двигателите за постоянен ток
Честота на въртене на двигателите за постоянен ток

$$n = \frac{U - (R_k + R_d)I_k}{C_e \Phi}$$

n може да се изменя:

1. Чрез изменение на съпротивлението на реостата R_d , включен във веригата на котвата.

2. Чрез изменение на магнитния поток Φ , за което служи реостатът R_p .
3. Чрез изменение на напрежението, подадено към котвената намотка на двигателя. Може да се прилага само при двигатели с независимо възбуждане. Двете вериги на двигателя – котвената и на възбудителната намотка се захравват от два независими източника, към които няма включени други консуматори. Получава се *система генератор-двигател за регулиране честотата на въртене на двигателите за постоянен ток* (Ленардова група).

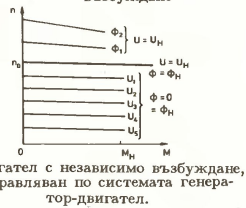
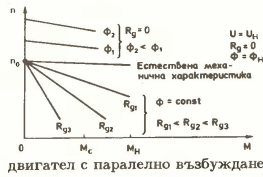
Най-добре регулационните възможности на двигателите за постоянен ток се виждат от механичните им характеристики, които представляват зависимостта на честотата на въртене n от въртящия момент на вала на двигателя M : $n = f(M)$.

Уравнение на механичната характеристика

важи за двигатели с паралелно и с независимо възбуждане, за които магнитният поток не зависи от въртящия момент и котвения ток.

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R_k + R_d}{C_e C_m \Phi^2} M$$

Механични характеристики на различни видове двигатели за постоянен ток



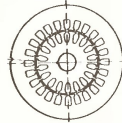
Скорост на идеалния празен ход – честотата на въртене $n_0 = \frac{U}{C_e \Phi}$ при $M = 0$.

Естествена механична характеристика – механичната характеристика при $U = U_N$, $\Phi = \Phi_N$ и $R_g = 0$.

Асинхронни машини

Асинхронните машини са електрически машини, които преобразуват механичната енергия в електрическа – асинхронен генератор, или електрическата енергия в механична – асинхронен двигател – посредством въртящо се магнитно поле. Предвид своята проста конструкция, лесна експлоатация и голяма сигурност през време на работа са най-разпространените двигатели.

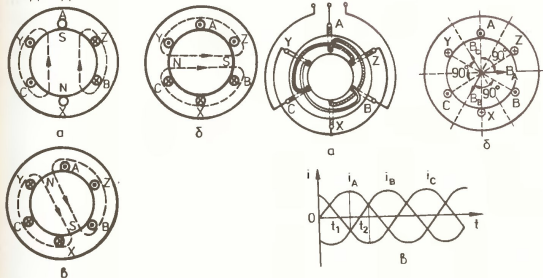
Устройство и принцип на действие на асинхронния двигател



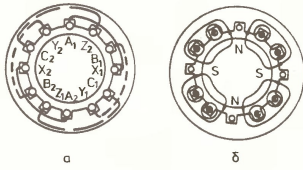
Магнитопроводът на асинхронния двигател представлява два коаксиални цилиндъра от листов електротехническа стомана, в които са оформени канали за полагане на намотките на двигателя. Външният цилиндър е неподвижната част на машината – *статорът*, а вътрешният – *роторът*.

Въртящото се магнитно поле се създава от три намотки, през които протича симетрична трифазна система токове. Намотките се полагат в каналите на статора.

Създаване на въртящо се магнитно поле с една двойка полюси



с две двойки полюси

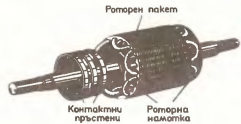


Честота на въртене на въртящо се магнитно поле – синхронна

$$n_{\omega} = \frac{60f}{p} \cdot \frac{tr}{\min}$$

където f е честотата на променливите токове, създаващи полето, Hz, p – броят на двойките полюси на магнитното поле.

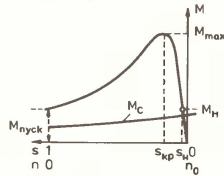
с навит ротор – в каналите на ротора се поставя трифазна намотка както в каналите на статора, свързва се в звезда и се извежда на три изолирани един до друг пръстена.



Въртящото се магнитно поле индуцира токове в проводниците на роторната намотка. Те взаимодействат с него и създават въртящ момент, който се стреми да завърти ротора по посоката на въртене на полето, така че да няма индуциране на токове. Тогава и роторът би се въртел със синхронната честота. Но това е невъзможно, защото винаги върху вала на двигателя действа известен съпротивителен въртящ момент. Затова роторът се върти с честота, която е по-малка от тази на въртящото се магнитно поле и осигурява пораждаето на електромагнитен въртящ момент, равен на съпротивителния.

Асинхронната машина работи като двигател, когато роторът ѝ се върти с по-малка честота от тази на въртящото се магнитно поле.

ка, ψ_2 – фазовата разлика между тези токове и индуцираното е.д.н. в роторните проводници. Понеже индуцираните е.д.н. и токовете в ротора, както и фазовата разлика ψ_2 зависят от хлъзгането (честотата на въртене), то и въртящият момент зависи от хлъзгането.



Зависимост на въртящия момент на асинхронния двигател M и на съпротивителния момент M_c от честотата на въртене.

Установен режим на работа на двигателя се получава, когато $M = M_c$. Двигателят работи устойчиво за стойности на хлъзгането от 0 до $s_{кр}$. Коэффициент на претоваряемост

$$\chi = \frac{M_{\max}}{M_n}$$

Статор на асинхронен двигател



Според конструкцията на ротора асинхронните двигатели са:



с кафезен ротор – в каналите на ротора се поставят пръчки от проводящ материал, дадени накъсо от пръстени от същия материал

Относителна честота на въртене – честотата, с която магнитните линии пресичат проводниците на ротора:

$$n_2 = n_1 - n$$

където n е честотата на въртене на ротора.

Хлъзгане

$$s = \frac{n_2}{n_1} = \frac{n_1 - n}{n_1}$$

Честота на въртене на ротора

$$n = n_1(1 - s) = \frac{60f}{p}(1 - s)$$

Въртящ момент на асинхронния двигател

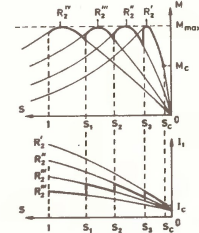
$$M = C_M \Phi I_2 \cos \psi_2$$

където C_M е константа, определена от конструктивните параметри на двигателя, Φ – магнитният поток, I_2 – токовете на роторната намотка,

където M_{\max} е максималният въртящ момент, а M_n – номиналният въртящ момент.

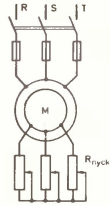
Въртящият момент на асинхронния двигател е пропорционален на квадрата на запазващото напрежение, $M \propto U^2$. Затова асинхронните двигатели не е желателно да работят при намалено напрежение, понеже рязко спада коэффициентът на претоваряемост.

При двигателите с навит ротор посредством пръстените, на които е изведена роторната намотка, към нея може да се свързват външни резистори. Това дава възможност за регулиране на токовете в роторната намотка, а оттам и на въртящия момент.



Пускане на трифазните асинхронни двигатели

Пускане на двигатели с навит ротор. Към роторната намотка се свързват външни резистори.



При подходящ подбор на пусковите резистори и моментите на тяхното изключване през време на пускането може да се задържи голям въртящият момент на двигателя и да се ограничат пусковите токове (пълните линии на по-горната фигура).

Пускане на двигатели с нависо съединен (кафезен) ротор — директно — може да става, ако е изпълнено условието

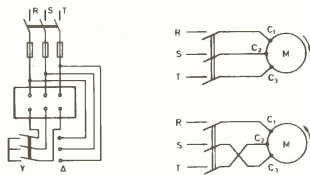
$$\frac{I_{\text{пуск}}}{I_N} \leq \frac{3}{4} + \frac{P_{MP}}{P_N}$$

P_{MP} е мощността, за която е оразмерена захранващата мрежа.

- с ограничаване на пусковите токове;
- а) с активни съпротивления (пускови реостати), свързани последователно със статорните намотки;

При пускане "звезда-триъгълник" пусковите токове и пусковият въртящ момент намаляват три пъти.

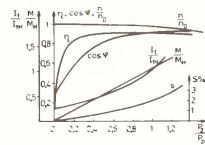
Реверсирание на асинхронния двигател (смяна на посоката на въртене) — разменят се местата на две от фазите.



Регулиране честотата на въртене и характеристики на асинхронния двигател

Честотата на въртене на асинхронния двигател се регулира чрез:
— честотата f на захранващото напрежение, което се осъществява с тиристорни преобразуватели на честотата;
— броя на двойките полюси p в статора се поставят няколко трифазни

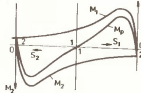
$$\frac{I_1}{I_{1N}} = f_4 \left(\frac{P_2}{P_{2N}} \right), \quad \frac{n}{n_0} = f_5 \left(\frac{P_2}{P_{2N}} \right) \quad \text{и} \quad s = f_6 \left(\frac{P_2}{P_{2N}} \right)$$



При малки наповофазния асинхронния двигател работи при ниски стойности на η и $\cos \varphi$.

Еднофазен асинхронен двигател

Еднофазната намотка създава пулсиращо магнитно поле. То се разглежда като подучено от две въртящи се магнитни поля, които се въртят в противоположни посоки с една и съща честота на въртене.



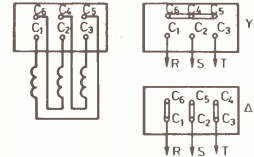
Всяко от тях поражда въртящ момент, но когато роторът е неподвижен — резултатният въртящ момент $M_p = 0$, т.е. еднофазният асинхронен двигател не развива пусков въртящ момент.

б) с индуктивни съпротивления (реактори), свързани последователно на статорните намотки;

в) с автотрансформатор, който осигурява понижено напрежение в момента на пускането.

— пускане "звезда-триъгълник" — може да се приложи към двигатели с линейно номинално напрежение.

Разположение върху клемното табло на изводите на намотките на двигателя и свързване, за да се получи дадено съединение на намотките.



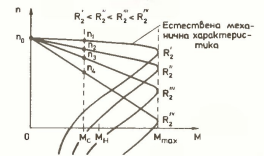
Пускането "звезда-триъгълник" при малки мощности със специални прекъсвачи с три положения — изключено, звезда и триъгълник.

Пускане "звезда-триъгълник" при големи мощности — със специална пускова апаратура.

намотки или сложна намотка, която посредством превключване създава въртящо се магнитно поле с различен брой двойки полюси, докато роторът е винаги кафезен;

— хлъзгането s , което се прилага при двигателите с навит ротор — към роторната намотка се включват външни резистори, както при пускането на двигателя.

От механичните характеристики на двигателя се виждат свойствата на този начин на регулиране честотата на въртене: честотата на идеалния празен ход n_0 не се изменя и диапазонът на регулиране зависи не само от стойността на регулиращото съпротивление, а и от съпротивителния момент M_c на вала на двигателя.

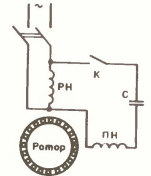


Работни характеристики на асинхронния двигател

$$\eta = f_1 \left(\frac{P_2}{P_{2N}} \right), \quad \cos \varphi = f_2 \left(\frac{P_2}{P_{2N}} \right), \quad \frac{M}{M_N} = f_3 \left(\frac{P_2}{P_{2N}} \right)$$

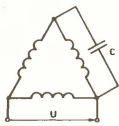
Пускане на еднофазен асинхронен двигател — в каналите на статора се полага пускова намотка (ПН) и последователно с нея се свързва кондензатор.

Между токовете на работната намотка (РН) и пусковата (ПН) има фазова разлика, близо до 90° , и двата тока създават въртящо се магнитно поле, което увлича след себе си ротора и осъществява пускането на двигателя. Най-често след като двигателят развие определена скорост пусковата намотка се изключва с центробежния контакт К.



Двухфазен асинхронен двигател — ако пусковата намотка и кондензаторът С са оразмерени за продължителен режим на работа и те се оставят включени.

Използване на трифазен асинхронен двигател за работи към еднофазна мрежа.

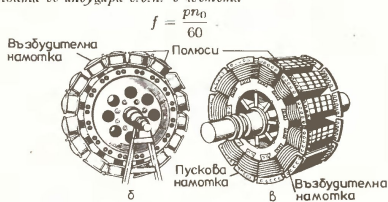


По този начин може да се свързват към еднофазна мрежа за 220 V трифазни двигатели, които при напрежение 3×220 V работят в триъгълник или при напрежение 3×380 V – в звезда. *Капацитетът на кондензатора C се изчислява по формулата*

$$C = \frac{5500 I_{лн}}{U}, \mu F,$$

където $I_{лн}$ е номиналният линейен ток, когато двигателят работи като трифазен. Двигателят развива от 75 до 100% от мощността на трифазния двигател.

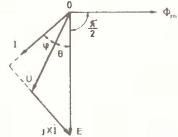
индуктор на хидрогенератор с осем двойки полюси (б)
индуктор на синхронен двигател (в)
Постоянният ток за възбудителните намотки се получава от генератор за постоянен ток, който се монтира на вала на синхронната машина. Когато роторът е възбуден и се върти с честота на въртене n_0 в намотките на котвата се индуцира е.д.н. с честота



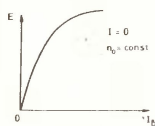
Ако към котвените намотки има свързани консуматори, протичащата през нея трифазна система променливи токове създава въртящо се магнитно поле, което се върти с честота

$$n_{\omega} = \frac{60f}{p}$$

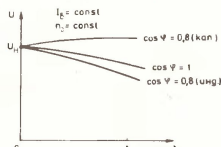
Опростена векторна диаграма за синхронния генератор при индуктивен характер на товара.



Характеристики на синхронния генератор при самостоятелна работа



характеристика на празен ход



външни характеристики

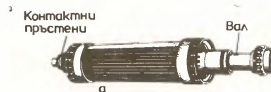
Синхронни машини

Принцип на действие и устройство

При малки мощности (до 100 kVA) статорът е електромагнит, възбуден с постоянен ток, и е индукторът на машината, а трифазната намотка се полага в канали в ротора, който представлява цилиндър, събран от листове електротехническа стомана, и е котвата на генератора.

При по-големи мощности статорът е котвата, а роторът – индукторът. Статорът е изпълнен както на асинхронната машина, като в каналите му има поставени толкова трифазни намотки, колкото е броят на двойките полюси на индуктора.

Видове индуктори
индуктор на турбогенератор с една двойка полюси в неявилополюсен вид (а)



Следователно, роторът, неговото въртящо се магнитно поле и въртящото се магнитно поле на котвените токове имат една и съща скорост – машината е синхронна.

Ефективна стойност на индуцираното е.д.н. в котвата

$$E = 4,44 f N k_n \Phi_m,$$

където N е броят на навивките на една фаза, k_n – коефициент, който отчита изместването по фаза на е.д.н., индуцирани в отделните навивки на намотката, тъй като те са разположени в няколко съседни канала, $k_n < 1$.

Синхронен генератор

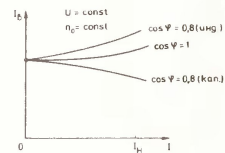
Синхронните генератори може да работят по два различни начина:
— *самостоятелно*, когато един синхронен генератор захранва мрежа, в която няма включени други синхронни машини,
— *паралелно*, когато към една мрежа за променлив ток работят няколко синхронни генератора.

При синхронните генератори конструктивно се увеличава индуктивното съпротивление X на котвената намотка (за ограничаване на токовете на късото съединение), а активното ѝ съпротивление е възможно малко

$$U = E - jXI$$

10 Справочник по електротехника -145-

регулиращи характеристики



Въртящ момент на синхронната машина

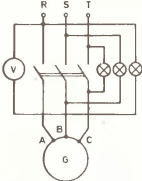
От взаимодействието на котвените токове с въртящо се магнитно поле на индуктора се създава въртящ момент:

$$M = \frac{3EU}{X\omega} \sin \Theta = M_{max} \sin \Theta$$

където ω е ъгловата скорост на ротора, Θ – фазовата разлика между напрежението и е.д.н. – възгъят, на който са изместени осите на въртящото се магнитно поле на индуктора и въртящото се магнитно поле на котвените токове.

Паралелна работа на синхронната машина

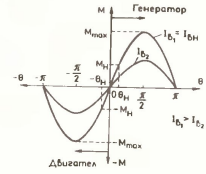
Най-често синхронните генератори работят в паралел към обща енергийна система. За да не протичат големи токове при включването на нов генератор, то става при изпълнение на условиято: е.д.н. на генератора да уравновесява напрежението на мрежата. Последното е изпълнено ако: $f_T = f_{MP}$, $E_T = U_{MP}$, е.д.н. и напрежението на мрежата са в противофаза, фазите на генератора и мрежата са с еднаква последователност.



Изпълнението на горните условия се установява със синхроскопи. Включването на генератора става, когато лампите не светят или светват и изгасват през големи интервали от време.

Напрежението на генератора се осъществява, като се увеличава мощността на първичния двигател (напр. парна или водна турбина), което води до увеличаване на ъгъла Θ .

Зона на устойчива работа на синхронната машина – ъглова характеристика на въртящия момент на синхронната машина. Ако на вала на машината се приложи съпротивителен момент, тя започва да работи като синхронен двигател. Синхронната машина може да работи като:

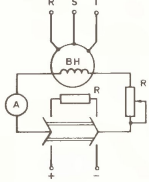


- генератор за стойности на ъгъла Θ от 0 до $+\frac{\pi}{2}$,
 - двигател за стойности на ъгъла Θ от 0 до $-\frac{\pi}{2}$,
- но номиналният режим е при стойности на ъгъла Θ около $25 - 30^\circ$.

Синхронен двигател

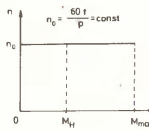
Синхронният двигател не развива пусков въртящ момент, което следва от принципа на работа на синхронната машина – магнитното поле на ротора и на котвените токове трябва да се въртят с една и съща скорост.

Използва се асинхронно пускане на синхронен двигател – в полюсните крайници се поставя наексосъединена намотка (вж. индуктор на синхронен двигател).



В процеса на пускане възбудителната намотка се затваря към външен резистор R и когато достигне установената асинхронна скорост в подходящ момент се свързва към източника на постоянен ток.

Ограничаването на статорните токове става с реактори или автотрансформатор, както при пускането на асинхронните двигатели.

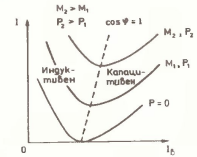


Механична характеристика на синхронния двигател.

В сравнение с асинхронния двигател измененията на напрежението на захранващата мрежа оказват по-слабо влияние върху въртящия момент, тъй като той е пропорционален на напрежението.

Посредством възбудителния ток може да се регулира магнитното поле на индуктора, т.е. да се регулират реактивните токове, които синхронният двигател взема от захранващата мрежа.

При определена стойност на възбудителния ток синхронният двигател не се нуждае от реактивни токове и котвеният ток има минимална стойност при дадена мощност.



Синхронният двигател в това състояние работи с фактор на мощността единица ($\cos \varphi = 1$).

При по-малки стойности на възбудителния ток от посочената двигателят получава реактивни намагнитващи токове и представлява индуктивен товар за мрежата. При по-големи стойности на възбудителния ток двигателят взема от мрежата реактивни размагнитващи токове и представлява капацитивен товар. Важно предимство на синхронния двигател е, че чрез възбудителния ток може да се регулира $\cos \varphi$.

Справочник по електротехника

Съставител доц. инж. Илия Тонев Илиев
Рецензент инж. Атаманска Миленикова

Националност българска

Първо издание

Изд. № 17085

ISBN 954-03-0005-3

Научен редактор к.т.н. инж. Силвия Райкова
Художник Мария Димитрова

Технически редактор Иван Георгиев

Дадена за набор 23.I.1992 г. Подписана за печат м. януари 1992 г.

Излязла от печат м. май 1992 г. Формат 60×90/32 Печ. коли 9,50,

Изд. коли 4,75, Тираж 10 000+45

Издателство "Техника" – държавна фирма, пл. Славейков 1, София
Набор в ППЗ "Електронен набор" при ТУ – София
Печат в ДФ "Полипринт", Враца