

Rīgas Tehniskā universitāte
Enerģētikas institūts
Elektrisko mašīnu un aparātu katedra

ELEKTRISKIE APARĀTI

Laboratorijas un praktisko darbu metodiskie norādījumi

RTU Izdevniecība
Rīga 2019

A. Podgornovs, R. Geidarovs. Elektriskie aparāti.
Laboratorijas un praktisko darbu metodiskie norādījumi. Rīga, RTU Izdevniecība, 2019. 29 lpp.

Metodiskie norādījumi laboratorijas un praktisko darbu izpildei paredzēti RTU Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātes studentiem kursa “Elektriskie aparāti” apguvei. Metodiskos norādījumus var izmantot kā papildu materiālu padziļinātai elektrisko aparātu fizikālo procesu apguvei, to eksperimentāli iegūto parametru apstrādei un analīzei.

Mācību līdzekļi var lietot kvalifikācijas celšanas kursos elektrisko aparātu sadaļas apgūvē.

Šajā mācību līdzeklī doti laboratorijas darbu uzdevumi, paskaidrojumi, kontroljautājumi un praktisko darbu uzdevums, kas izstrādāts, izmantojot RTU Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātes materiālus.

Izdots saskaņā ar “Enhancement of the mobility and employability of Lithuanian and Latvian specialists in the field of electrical engineering and high voltage technologies (LitLatHV)” aktivitātes īstenošanu.

Sastādīja: asoc. prof. *Dr. sc. ing.* A. Podgornovs

asist. *Mg. sc. ing.* R. Geidarovs

Recenzente: asoc. prof. *Dr. sc. ing.* K. Bērziņa

Literārā redaktore: Irēna Skārda

Tehniskā redaktore: Irēna Skārda

Dizains: Baiba Puriņa

Vāka dizains: Paula Lore

Vāka attēls no shutterstock.com

© Rīgas Tehniskā universitāte, 2019
ISBN 978-9934-22-131-6 (pdf)

SATURS

Laboratorijas darbu apraksti.....	4
Laboratorijas darbu izpildes noteikumi.....	5
1. laboratorijas darbs. Strāvu vadošo daļu silšana.....	7
2. laboratorijas darbs. Trīsfāžu asinhronzinēja vadības un aizsardzības aparāti.....	12
3. laboratorijas darbs. Līdzstrāvas elektromagnēta pētīšana.....	16
4. laboratorijas darbs. Maiņstrāvas elektromagnēta pētīšana.....	18
Praktisko darbu uzdevumi	22
Elektromagnēta projektēšana	23

LABORATORIJAS DARBU APRAKSTI

Laboratorijas darbu izpildes noteikumi

Vispārīgie norādījumi

Laboratorijas darbi ir kursa “Elektriskie aparāti” sastāvdaļa, kas veicina praktisko iemaņu apguvi, iepazīstinot ar elektrisko aparātu konstrukcijām un eksperimentālās pētīšanas metodēm.

Izpildot laboratorijas darbus, galvenā vērība jāpievērš aparātos sastopamajiem fizikālajiem procesiem, regulēšanas raksturlīkņu uzņemšanai, regulēšanas metodēm un parametru novērtējumam.

Darbu apskatā dots minimāls teorētiskais skaidrojums, tādēļ nepieciešama patstāvīga sagatavošanās darbu veikšanai, izmantojot norādītos informācijas avotus, lekciju konceptus un sagatavojot atbildes uz paškontroles jautājumiem.

Pielaide darbu veikšanai

Darbu veikšanai pieļauj tikai tos studentus, kuri ievada nodarbībā instruēti par darba drošības noteikumiem un par to parakstījušies attiecīgā žurnālā.

Studentu grupu laboratorijā sadala apakšgrupās (2–4 studenti katrā). Pirms darba sākuma studenti uzrāda pasniedzējam sagatavotu protokola formulāru, atbild uz kontroljautājumiem par veicamā eksperimenta procedūru, kā arī nodod iepriekšējā darba protokolu.

Eksperimentu veikšanas kārtība

Eksperimentu var sākt tikai pēc pasniedzēja atļaujas saņemšanas. Sīkāki metodiskie norādījumi doti katrā laboratorijas darba aprakstā. Pasniedzējs var kontrolēt eksperimenta gaitu, kā arī uzdot papildjautājumus.

Ērtam mērinstrumentu rādījumu pierakstam, kā arī ķēdes bojājumu vietas konstatēšanai lietderīgi novietot uz mērinstrumentiem marķējuma apzīmējumus (pēc shēmas). Izdarīt atzīmes tieši uz mērinstrumentiem kategoriski aizliegts.

Lai nekavētu eksperimenta procesu, lietderīgi mērījumu rezultātus tabulās ierakstīt iedaļās un pēc tam aprēķināt iegūto rezultātu vērtības.

Dažādu jautājumu noskaidrošanas laikā ieteicams pētāmo iekārtu īslaicīgi atslēgt no barošanas tīkla.

Darba noslēgumā pasniedzējs pārbauda rezultātus, iesaka veikt dažus kontrolaprēķinus un apstiprina protokolu ar savu parakstu.

Laboratorijas darba noformēšanas kārtība

Zīmoga vieta 8 cm × 4 cm	1. 2. 3. 4.
-----------------------------	--

[Nr.]. laboratorijas darbs

Darba nosaukums

Darba uzdevumi: 1.
2.

...

1. Teorētiskais pamatojums (sagaidāmie rezultāti un nepieciešamās formulas).
2. Eksperimentu darba shēmas.

3. Pētāmo aparātu pasas dati.
4. Izmantoto mērinstrumentu saraksts.
5. Mērījumu rezultātu tabulas.
6. Aprēķinu piemēri un rezultātu tabulas.
7. Grafiki un diagrammas, oscilogrammas.
8. Mezglu zīmējumi.
9. Slēdzieni un secinājumi.
10. Paraksti.

Atskaites galvenā sastāvdaļa ir darba rezultātu kritisks novērtējums un secinājumi, iegūto rezultātu atbilstība teorētiski sagaidāmajiem, radušos noviržu un kļūdu cēloņu analīze un izskaidrojums, mērīšanas metožu analīze.

Protokola melnraksti jā saglabā līdz ieskaitei. Atskaites tīrraksts jā iesniedz pārbaudei nākamajā nodarbībā. Ja šī prasība netiek izpildīta, pasniedzējam ir tiesības nepielaist studentu nākamā darba izpildei.

Informācijas avoti

1. A. Baltiņš, A. Kanbergs un S. Miesniece, *Zemsprieguma elektriskie aparāti*. Rīga: Jumava, 2003 (331 lpp.), 2007 (345 lpp.).
2. Л. А. Родштейн, *Электрические аппараты*. Л.: Энергоатомиздат, 1989. 304 с.
3. А. А. Чунихин, *Электрические аппараты*. М.: Энергоатомиздат, 1988. 720 с.
4. Z. Bunžs un S. Miesniece, *Bezkontakta komutācijas aparāti*. Rīga: SIA "Drukatāva", 2008. 308 lpp.
5. Н. Ю. Сипайлова, *Вопросы проектирования электрических аппаратов*. Томск.: Издательство Томского политехнического университета, 2014. 168 с.
6. П. В. Сахаров, *Проектирование электрических аппаратов*. М.: Энергия, 1971. 558 с.
7. Firmu katalogi.
8. Internets.

1. laboratorijas darbs Strāvu vadošo daļu silšana

Darba mērķis

Noteikt viendabīgo vadītāju un spoļu strāvas un darba režīmu iespaidu uz silšanas procesu. Iepazīties ar elektrisko aparātu spoļu termisko parametru uzņemšanas galvenajām metodēm.

Darba uzdevumi

1. Eksperimentālā daļa

- 1.1. Pieslēgt spoli līdzstrāvai un uzņemt spoles ārējās virsmas virstemperatūras izmaiņas laikā $\tau = f(t)$.
- 1.2. Pieslēgt spoli līdzstrāvai pārtraukumaini cikliskā (atkārtoti īslaicīgā) režīmā un uzņemt spoles ārējās virsmas virstemperatūras izmaiņas laikā $\tau = f(t)$.
- 1.3. Uzņemt releja spoles vidējās virstemperatūras izmaiņu laikā $\tau = f(t)$, izmantojot pretestības izmaiņas metodi.
- 1.4. Uzņemt kvēlspuldzes un spoļu parametrus.
- 1.5. Iepazīties ar distanttermometra darbību.

2. Aprēķinu un grafiskā daļa

- 2.1. Uzzīmēt eksperimenta shēmas.
- 2.2. Aprēķināt spoles ārējās virsmas virstemperatūru τ_{∞} (kad tā nostabilizējusies) un noteikt to, izmantojot netiešo metodi.
- 2.3. Noteikt spoļu silšanas laika konstanti T no silšanas līknēm un salīdzināt iegūtos rezultātus.
- 2.4. Vienai līdzstrāvas spolei aprēķināt siltumatdeves koeficientu ārējam slānim.
- 2.5. Aprēķināt līdzstrāvas spolēm dzesējošās virsmas laukumu uz katru spolē izdalīto jaudas vienību σ_0 un dot slēdzienu par silšanas apstākļiem.
- 2.6. Aprēķināt spoļu pieļaujamo darba strāvu.
- 2.7. Aprēķināt spoļu pieļaujamo darba strāvu pārtraukumaini cikliskā (atkārtoti īslaicīgā) režīmā.
- 2.8. Noteikt spoles pieļaujamo ieslēgšanas laiku t_{iesl_piel} , ja tinuma izolācijai pieļaujamā temperatūra ir $+120\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- 2.9. Noteikt kvēlspuldzes ieslēgšanas strāvu un kvēldiega sasiluma temperatūru Θ_w .

Teorētiskais pamatojums

Spoles ārējās virsmas nostabilizējušos virstemperatūru praksē ar pietiekamu precizitāti var aprēķināt pēc Ņūtona formulas:

$$\tau_{\infty} = \frac{P}{k_T S}, \text{ } ^{\circ}\text{C}, \quad (1.1.)$$

kur τ_{∞} – nostabilizējusies virstemperatūra, $^{\circ}\text{C}$;

$P = I^2 R$ – jaudas zudumi spolē, W;

k_T – siltumatdeves koeficients, $\text{W}/(\text{m}^2\text{ }^{\circ}\text{C})$;

S – spoles sānu virsmas laukums, m^2 .

Šeit pieņemts, ka siltumatdeve notiek tikai caur spoles sānu virsmu. Aprēķina precizitāti pēc Ņūtona formulas nosaka pareiza siltumatdeves koeficienta izvēle, to iespaido spoles temperatūra, konstrukcija, izolācijas materiāli utt.

Piemēram, siltumatdeves koeficienta k_T vērtības dabīgās konvekcijas apstākļos gaisā:

- jebkurai lakotai virsmai $12\text{--}16\text{ W}/(\text{m}^2\text{ }^{\circ}\text{C})$;
- tinumiem ar papīra izolāciju $10,0\text{--}12,5\text{ W}/(\text{m}^2\text{ }^{\circ}\text{C})$;
- tērauda plāksņu paketei $10,0\text{--}12,5\text{ W}/(\text{m}^2\text{ }^{\circ}\text{C})$.

Siltumatdeves koeficienta aprēķinam lieto arī empīriskas formulas.

Vadītāja raksturojums	Formula
Nokrāsots apaļš vadītājs, novietots horizontāli mierīgā gaisā	$k_T = 10k_1(1 + k_2 \cdot 10^{-2}\tau)$
Apaļa caurule ar diametru d , pa kuru plūst ūdens ar ātrumu w	$k_T = 1710w^{0,8}d^{0,2}(22 - \tau)^{0,4}$
Cilindriska spole, kuras sānu virsmas laukums ir robežās $10^{-4} \text{ m}^2 < S < 10^{-2} \text{ m}^2$	$k_T = \frac{2,1(1 + 0,005\tau)}{\sqrt[3]{S}}$
Cilindriska spole, kuras sānu virsmas laukums ir robežās $10^{-2} \text{ m}^2 < S < 0,5 \text{ m}^2$	$k_T = \frac{3,6(1 + 0,005\tau)}{\sqrt[5]{S}}$

kur τ – vadītāja virstemperatūra, °C;
 Θ – vadītāja temperatūra, °C;
 Θ_0 – apkārtējas vides temperatūra, °C;
 k_1 – koeficients, kas atkarīgs no vada diametra.

Tā kā silšanas process notiek eksponenciāli, proti:

$$\tau = \tau_\infty \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right), \quad (1.2.)$$

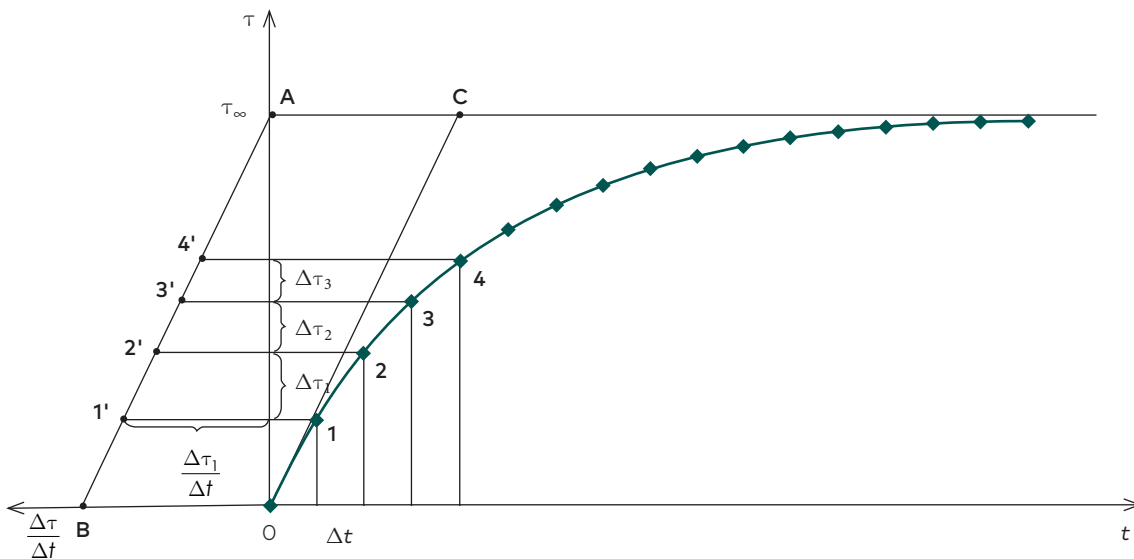
kur τ_∞ – nostabilizējusies virstemperatūra, °C;

$T = \frac{cG}{k_T S}$ – silšanas konstante, kas skaitliski ir vienāda ar vadītāja siltumietilpības attiecību pret tā spēju atdot siltumu;

c – vadītāja materiāla īpatnējā siltumietilpība, J/(kg °C);

G – vadītāja masa, kg,

tad nostabilizējušos virstemperatūru parasti nosaka, izmantojot netiešo metodi. Eksperimentāli uzņemto līknes daļu sadala posmos ar vienādu Δt un velk ordinātas (1.1. att.).



1.1. att. Nostabilizējušās virstemperatūras noteikšana, izmantojot netiešo metodi.

Tad katram Δt nosaka atbilstošo virstemperatūras pieaugumu $\Delta\tau$ un atliek grafika kreisajā pusē $\tau = f(\Delta\tau / \Delta t)$ brīvi izvēlētā mērogā. Tā kā visos posmos Δt ir vienādi, tad nogriežņi $\Delta\tau / \Delta t$ ir proporcionāli virstemperatūras pieaugumam $\Delta\tau$. Savienojot

iegūtos punktus 1', 2', 3', ... ar taisni, iegūstam krustpunktu A ar ordinātu asi, kas atbilst nostabilizējušās virstemperatūras τ_∞ vērtībai, jo stabilā režīmā $\Delta\tau / \Delta t = 0$ un taisnes krustpunkts B ar abscisu asi dod vērtību proporcionālu τ_∞ / T .

Silšanas laika konstanti T no raksturlīknes $\Theta = f(t)$ nosaka kā laiku, kad $\tau = 0,63\tau_\infty$, jo, kad $t = T$:

$$\tau = \tau_\infty(1 - e^{-1}) = 0,63\tau_\infty. \quad (1.3.)$$

Grafiski T var atrast, velkot līknes $\tau = f(t)$ taisnajā daļā pieskari līdz tā krusto taisni $\tau_\infty = \text{const}$, tad nogrieznis $AC = T$.

Tā kā spoles izolācijas klase nosaka tās pieļaujamo virstemperatūru, tad Ņūtona formulu var izmantot pieļaujamās strāvas vērtības aprēķinam:

$$I_{\text{piel}} = \sqrt{\frac{\tau_{\text{piel}} k_T S}{R}}, \quad (1.4.)$$

kur R – spoles tinuma pretestība, Ω ;

τ_{piel} – pieļaujama virstemperatūra, $^{\circ}\text{C}$;

k_T – siltumatdeves koeficients;

S – sāna virsmas laukums, m^2

Pārtraukumaini cikliskā režīmā tās pašas pieļaujamās virstemperatūras gadījumā pieļaujamo strāvu var palielināt n reizes. Tā kā parasti

$$t_d + t_p < T, \quad (1.5.)$$

$$\text{tad } (P_{\text{piel}})_{\text{partr_cikl}} = n(P_{\text{piel}})_\infty \text{ un } n \approx \frac{t_d + t_p}{t_d},$$

kur t_d – spoles darba laiks, s;

t_p – pauzes laiks, s;

n – spoles pārslodzes koeficients pārtraukumaini cikliskā režīmā;

$(P_{\text{piel}})_{\text{partr_cikl}}$ – pieļaujama jauda S2 režīmam, W;

$(P_{\text{piel}})_\infty$ – pieļaujama jauda S1 režīmam, W.

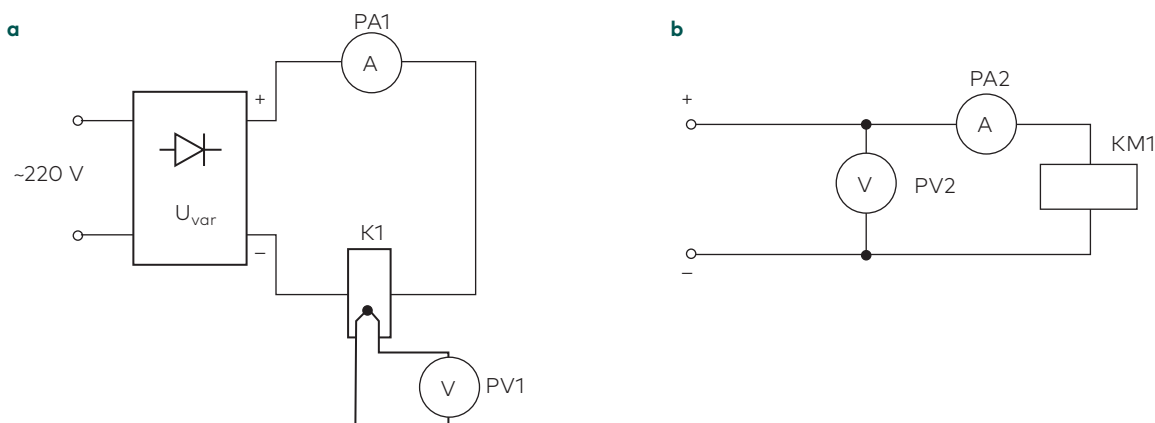
Līdzīgi var noteikt pārslodzes koeficientu p īslaicīgam režīmam:

$$p = \frac{1}{\sqrt{1 - e^{-\frac{t_d}{T}}}}, \quad (1.6.)$$

kas lietojams jebkurai T vērtībai. Redzams, ka p palielinās, pieaugot T vērtībai.

Metodiskie norādījumi

Eksperimenta principiālā darba shēma parādīta 1.2. attēlā.



1.2. att. Eksperimenta darba shēmas: spoles sasiluma virstemperatūras noteikšana ar termopāri (a), spoles sasiluma virstemperatūras noteikšana ar pretestības izmaiņu (b).

Temperatūras mērīšanai izmanto termopārus. To graduēšanas raksturlīknes pievienotas mērīparatūrai.

Ilgstošā režīmā pārbaudāmām spolēm nodrošina nemainīgas jaudas vai nemainīga pievadīta sprieguma režīmus.

Siltumatdeves koeficientu spoles ārējam slānim k_{T2} un iekšējam k_{T1} nosaka, izmantojot Ņūtona formulu:

$$k_{T1} = \frac{P_1}{2\pi r_1 l \tau_1}, \quad (1.7)$$

$$k_{T2} = \frac{P_2}{2\pi r_2 l \tau_2}, \quad (1.8)$$

kur P_1 un P_2 – jauda, ko spole izdala attiecīgi caur iekšējo un ārējo slāni, W;

r_1 – iekšējais spoles rādiuss, m;

r_2 – ārējais spoles rādiuss, m;

τ_1 – iekšējā slāņa virstemperatūra, °C;

τ_2 – ārējā slāņa virstemperatūra, °C;

l – spoles garums, m.

Ja pieņem, ka spolei no galiem siltums neizdalās, tad

$$P_1 = P \frac{r_0^2 - r_1^2}{r_2^2 - r_1^2}, \quad (1.9)$$

$$P_2 = P \frac{r_2^2 - r_0^2}{r_2^2 - r_1^2}, \quad (1.10)$$

kur P – jauda, ko spole patērē silšanai, W;

r_0 – rādiuss spoles slānim ar maksimālo temperatūru.

Aptuveni var pieņemt, ka $r_0 \approx r_1 + \frac{1}{3}(r_2 - r_1)$.

Lai aptuveni pārbaudītu, vai spole nepārkarsīs, kā dzesēšanu raksturojošu lielumu izmanto $\sigma_0 = S/P$. Praksē noskaidrots, ka spoles temperatūra nepārsniedza pieļaujamo, ja σ_0 pieņem šādas vērtības:

- $\sigma_0 = 0,0008 \text{ m}^2/\text{W}$, ja $l/d < 1$;
- $\sigma_0 = 0,001 \text{ m}^2/\text{W}$, ja $l/d = 1$;
- $\sigma_0 = 0,0012 \text{ m}^2/\text{W}$, ja $l/d > 1$,

kur $d = 2r_2$

Mērījumu rezultāti un tabulas

Kvēlspuldzes dati:

$R_a = \Omega$ – auksta kvēldiega pretestība

$I = \text{A}$

$U = \text{V}$

$R_k = \Omega$ – karsta kvēldiega pretestība

$I_{\text{iesl}} = \text{A}$ – kvēlspuldzes ieslēgšanas strāva

$\Theta_W = \text{°C}$ – volframa kvēldiega virstemperatūra

$R = R_0(1 + k_T \Theta) \rightarrow \Theta$

$k_{T_{Cu}} = 0,004 \text{ °C}^{-1}$ – spolei

$k_{T_W} = 0,0045 \text{ °C}^{-1}$ – volframa stieplei

Pētāmo spoļu dati:

t, min	I(PA1)			U(PV1) Nr			Θ , °C	ΔT °C	I(PA3)			U(PV1) Nr			Θ °C	ΔT °C	I(PA2)			U(PV2)			R Ω	Θ °C	ΔT °C	
	ied.	C	A	ied.	C	V			ied.	C	A	ied.	C	V			ied.	C	A	ied.	C	V				

Paškontroles jautājumi

1. Kā notiek siltuma atdeve apkārtējā vidē?
2. Kas nosaka spoles pieļaujamo virstemperatūru?
3. Kāpēc spoles forma ietekmē silšanu?
4. Kurā vietā un kāpēc spolei ir maksimālā temperatūra?
5. Ko izsaka silšanas laika konstante?
6. Kādas priekšrocības ir spolei, kas strādā pārtraukumaini cikliskā režīmā?
7. Kā spoles silšanas procesu iespaido tinuma blīvums (tīšanas tehnoloģija)?
8. Kā mainās spoles patērētā jauda ilgstošā režīmā?
9. Kāds ir termopāra darbības princips?
10. Kā nosaka vadītāju virstemperatūru, izmantojot pretestības izmaiņas metodi?

Literatūra

[1] § 1.1.

[2] § 2.2., 2.3., 2.4., 2.7.

2. laboratorijas darbs Trīsfāžu asinhronizēta vadības un aizsardzības aparāti

Darba mērķis

Iepazīties ar asinhronizēta aizsardzības ierīču konstrukciju, darbības principiem un parametriem, regulēšanas iespējām un raksturlielņu uzņemšanu.

Darba uzdevumi

1. Eksperimentālā daļa

- 1.1. Iepazīties ar doto elektrodzinēju aizsardzības ierīču konstrukciju un laboratorijas iekārtām to pārbaudei.
- 1.2. Noteikt magnētiskā palaidēja nostrādes un atgriezes parametrus, atgriezes koeficientu, uzzīmēt palaidēja releja raksturlielni.
- 1.3. Uzņemt termoreleja laikstrāvas raksturlielni

$$t_{\text{no}} = f\left(\frac{I}{I_N}\right) \text{ dotajam regulatora stāvoklim.}$$

- 1.4. Pieslēgt trīsfāžu asinhronizēta ar magnētiskā palaidēja palīdzību.
- 1.5. Izmērīt nullsecības sprieguma vērtību fāzes pazušanas gadījumā un saslēgt atbilstošās aizsardzības shēmu.
- 1.6. Pieslēgt trīsfāžu asinhronizēta ar laidenās jeb "mīkstās" palaides iekārtu (*softstarter*).

2. Aprēķinu un grafiskā daļa

- 2.1. Uzzīmēt eksperimenta shēmas.
- 2.2. Uzrakstīt pētīto elektrodzinēju aizsardzības ierīču tehniskos datus un to darbības principu aprakstu.
- 2.3. Uzzīmēt eksperimentāli iegūtās un aprēķinātās elektrodzinēju aizsardzības ierīču aizsardzības raksturlielnes, salīdzināt tās ar tipveida raksturlielņiem.
- 2.4. Sniegt pētīto elektrodzinēju aizsardzības ierīču tehniski ekonomisko rādītāju analīzi.
- 2.5. Pēc pasniedzēja norādījuma veikt aizsardzības ierīču izvēli konkrētam elektrodzinējam.

Teorētiskais pamatojums

Mūsdienu elektrodzinējiem ir augsti drošuma rādītāji, tomēr ir situācijas, kas var rasties elektropiedziņas ekspluatācijas gaitā, kad reālās slodzes atšķiras no aprēķinātajām. Tādā gadījumā var rasties dažādi avārijas režīmi.

Lai novērstu elektrodzinēju bojājumus avārijas režīmos, izmanto atbilstošās aizsardzības ierīces, kas nodrošina elektrodzinēja automātisku atslēgšanu no barošanas avota, ja elektrodzinēja vai barošanas ķēdes kontrolējamais parametrs pārsniedz uzdoto robežvērtību. Praksē visbiežāk notiek elektrodzinēja izolācijas bojājumi, tinumiem pārkarstot, ko var izsaukt šādi avārijas režīmi:

- pārslodze vai darbināmā mehānisma iesprūšana;
- asinhronizēta darbība divfāžu režīmā (vienas fāzes pazušana);
- darbība pie nesimetriska sprieguma;
- ilgstoša dzinēja palaide;
- darbība pie pazemināta sprieguma;
- bieža dzinēja ieslēgšana;
- pasliktināta dzesēšana.

Šajos režīmos (izņemot pēdējo) elektrodzinēja tinumos pieaug strāva, kas izsauc strāvu vadošo daļu un tām pieguļošās izolācijas pārkaršanu.

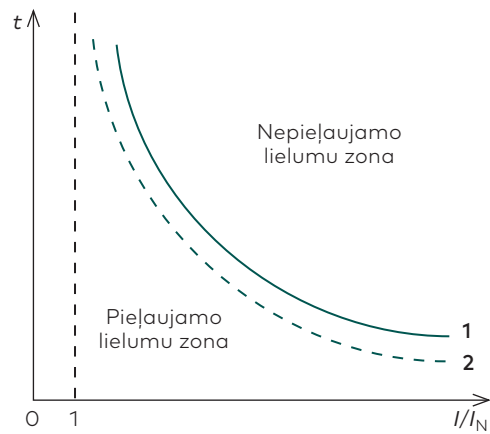
Pārslodzes strāvu iedarbības laiks jāierobežo saskaņā ar aizsardzības raksturlielumiem (2.1. att.).

Aplūkojot dotās raksturlielumus, var formulēt vienu no galvenajām prasībām aizsardzībai pret pārslodzi, ko izsauc strāvas palielināšanās: aizsardzībai jānostrādā atkarībā no pārslodzes I/I_N lieluma (I_N – elektrodzinēja nominālā strāva). Tas izslēdz iespēju aizsardzībai nostrādāt īslaicīga strāvas pieauguma gadījumā, kas rodas, piemēram, dzinēju palaižot. Aizsardzība drīkst nostrādāt, tikai sasniedzot nepieļaujamo lielumu zonu, t. i., pārsniedzot pieļaujamo strāvas lielumu un tās darbības laiku. Vēlamajai elektrodzinēju aizsardzības ierīču aizsardzības raksturlielumiem jāatrodas zem aizsargājama elektrodzinēja silšanas raksturlieluma 1, bet pēc iespējas tuvu tai (2.1. att.). Dzinēja aizsardzība pret pārslodzi būs efektīva tikai tad, ja elektrodzinēju aizsardzības ierīces tieši modelē dzinēja reakciju uz pārslodzi, t. i., raksturlielumi 1 un 2 ir analogas.

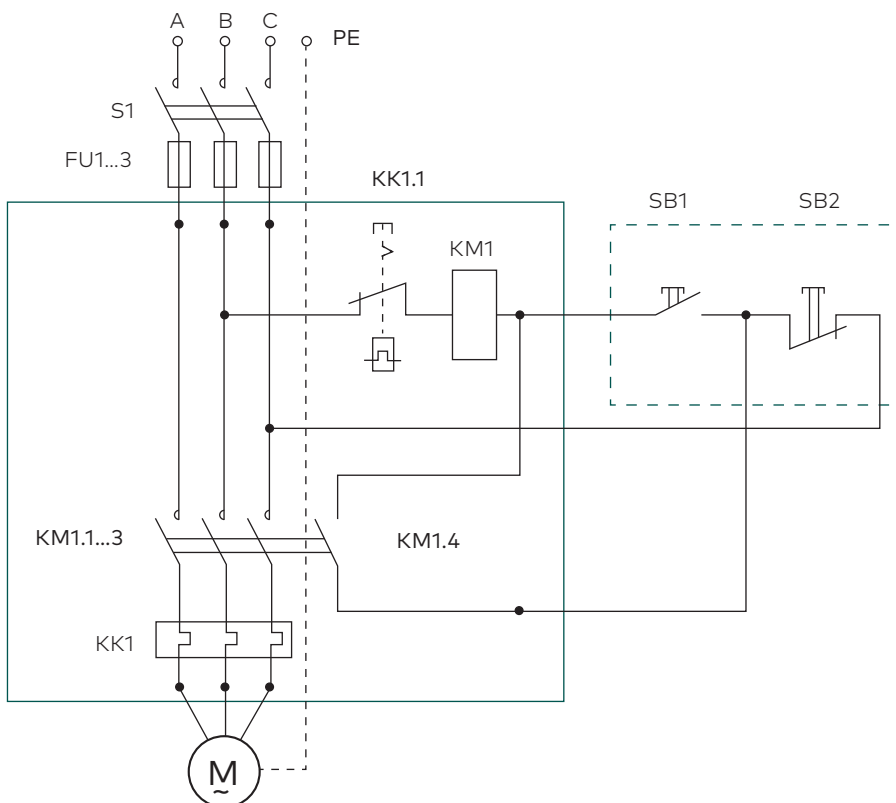
Dzinēju aizsardzībai pret isslēgumu izmanto kustošos drošinātājus vai aizsargslēdžus (automātslēdžus). Neskatoties uz lielo elektrodzinēju aizsardzības ierīču daudzveidību, ideāla aizsardzības varianta pagaidām nav. Visām elektrodzinēju aizsardzības ierīcēm ir pretrunas starp izmaksām, ekspluatācijas drošību un parametriem. Izvēloties elektrodzinēju aizsardzības ierīces, jāsniedz tehniski ekonomisks pamatojums.

Pētāmo elektrodzinēju aizsardzības ierīču pasu kopijas un konstrukciju apraksti atrodas elektrisko aparātu laboratorijā.

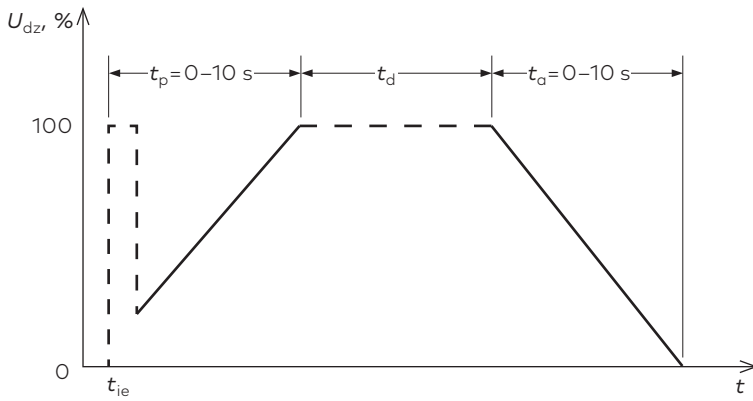
Asinhronizēta pieslēgšana ar magnētisko palaidēju – tas ir visbiežāk izmantotais pieslēgšanas paņēmiens (2.2. att.).



2.1. att. Aizsardzības laikstrāvas raksturlielumi: 1 – elektrodzinēja silšanas raksturlielums, 2 – vēlamā elektrodzinēja aizsardzības ierīču raksturlielums.



2.2. att. Magnētiskā palaidēja shēma: S1 – jaudas slēdzis, FU1...3 – drošinātāji, KM1 – kontaktors, KK1 – termorelejs, SB1, SB2 – vadības pogas.



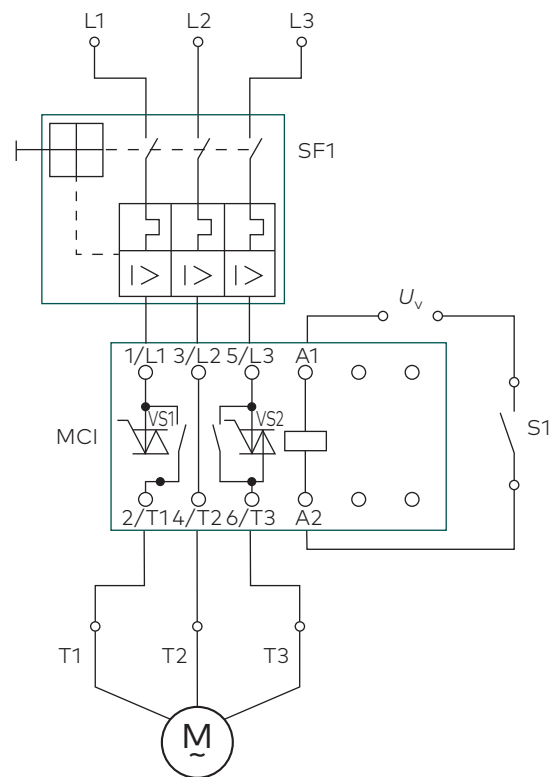
2.3. att. Softstarter jeb laidenās palaišanas iekārtas darbības diagramma: U_{dz} – asinhronizējam pieslēgtais spriegums, t_p – palaišanas laiks, t_d – darba laiks, t_a – aptures laiks, t_{ie} – iekustināšanas laiks (~0,2 s) t. s. kicstarera režīmā.

Magnētiskais palaidējs, kura galvenā sastāvdaļa ir trīspolīgs vai četrpolīgs maiņstrāvas kontaktors, paredzēts mazas un vidējas jaudas elektrodzinēju distancvadībai un aizsardzībai pret pārslodzi, īsslēguma un barošanas sprieguma pazemināšanos.

Magnētiskie palaidēji var būt nereversīvi un reversīvi. Pēdējie nodrošina dzinēja palaidi, apstāšanos un rotācijas virziena maiņu (reversēšanu).

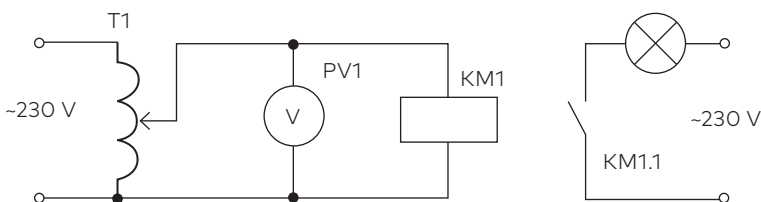
Lai mazinātu triecienu, strauju paātrinājumu un palēninājumu nevēlamo efektu, liftu, celtņu, konveijeru u. c. iekārtu darbībā (to elektropiedziņā) izmantoto asinhronizēju vadībai lieto laidenās (“mīkstās”) palaišanas un aptures aparātus, angļiski – *softstarter*. To darbības sprieguma laika diagramma parādīta 2.3. attēlā, bet slēguma shēma – 2.4. attēlā.

Vēlamo palaišanas un aptures režīmu nodrošina, iestatot t_p un t_a vērtību. Lai iekustinātu lielāku masu, var izmantot t. s. kicstarera režīmu, palaišanas sākumā asinhronizējam īslaicīgi pieslēdzot nominālo spriegumu (2.3. att. ar raustīto līniju parādīto t_{ie}). Faktisko laiku t_p un t_a nosaka, izmērot atbilstoši signālpuldziņu mirgošanas laiku (palaišanai LED1, apturei LED2).



2.4. att. Softstarter jeb laidenās palaišanas iekārtas pieslēgšanas shēma: SF1 – manuālais automātslēdzis barošanas ķēdē, MC1 – *softstarter*, S1 – vadības slēdzis, M – asinhronizējs, U_v – vadības spriegums ($U_{vmax} = 400$ V).

Mērījumu rezultāti un tabulas



2.5. att. Kontaktora pārbaudes shēma.

Magnētiskā palaidēja mērījumi:

U_{no}, V	U_{at}, V

U_{no} – kontaktora nostrādes spriegums, U_{at} – kontaktora atgriezes spriegums.

Termoreleja mērījumi:

$I_N =$ A

I/I_N	I, A	ied.	t_1, s	t_2, s	t_3, s	$t_{vid.}, s$

Softstarter jeb laidenās palaides iekārtas t_p un t_a mērījumi:

Process	Iestatījums	Mērījumi	Vidējā vērtība	Novirze, %
t_p, s				
t_a, s				

Paškontroles jautājumi

1. Kādi cēloņi izsauc elektrodzinēja bīstamu pārkaršanu?
2. Kādas ierīces izmanto elektrodzinēju aizsardzībai pret īsslēguma strāvām?
3. Kādas prasības tiek izvirzītas elektrodzinēju aizsardzības ierīcēm?
4. Izskaidrot termoreleja darbības principu.
5. Kādi noteikumi jāievēro, izvēloties un regulējot termorelejus elektrodzinēju aizsardzībai?
6. Izskaidrot fāžu sprieguma simetrijas kontroles releja darbības principu.
7. Kādas ierīces izmanto iebūvētai dzinēju termiskai aizsardzībai?
8. Kādi trūkumi ir termoreleju izmantošanai elektrodzinēju aizsardzības ierīču shēmās?
9. Ar ko atšķiras maiņstrāvas kontaktori no līdzstrāvas kontaktoriem?
10. Kāpēc palaides strāva maiņstrāvas elektromagnēta spolē ir daudzkārt lielāka par tās darba strāvu?
11. Kāpēc maiņstrāvas elektromagnētos lieto īsi slēgtos vijumus?
12. Ar ko atšķiras magnētiskais palaidējs no maiņstrāvas kontaktora?
13. Kā pareizi izvēlēties magnētisko palaidēju asinhronā dzinēja vadībai un aizsardzībai?

Literatūra

[1] § 4.2., 4.3.1., 7.5., 7.5.1., 8.6., 9.1., 9.2

3. laboratorijas darbs

Līdzstrāvas elektromagnēta pētīšana

Darba mērķis

Iepazīties ar līdzstrāvas kontaktora darbības principu un to raksturojošiem parametriem.

Darba uzdevumi

1. Uzzīmēt līdzstrāvas kontaktora skici un iezīmēt tajā magnētiskās plūsmas ceļus.
2. Uzņemt līdzstrāvas kontaktora vilces spēku F pie dažādām darba gaisa spraugām δ un trīs spriegumiem: U_N , $0,8U_N$, $0,5U_N$.
3. Attēlot grafiski līdzstrāvas kontaktora vilces raksturlīkni $F = f(\delta)$.
4. Izmērīt magnētisko indukciju darba gaisa spraugā un uzzīmēt $B_\delta = f(U)$, $B_\delta = f(\delta)$.
5. Aprēķināt vilces raksturlīkni nominālam režīmam un salīdzināt ar eksperimentāli iegūto.
6. Uzzīmēt līdzstrāvas kontaktora ekvivalento aizvietošanas shēmu.
7. Aprēķināt līdzstrāvas kontaktora MDS un tā radīto magnētisko plūsmu, ja magnēt-vads ir nepiesātināts. Salīdzināt aprēķināto MDS ar spoles MDS (Iw).

Teorētiskais pamatojums

Vilces spēku var aprēķināt, izmantojot vienkāršo Maksvela formulu:

$$F = \frac{B_\delta^2 S}{2\mu_0}, \text{ N}, \quad (3.1.)$$

kur $S = \frac{\pi d^2}{4}$ – elektromagnēta pola šķērsriezuma laukums, m^2 ,

d – pola diametrs, m ,

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – gaisa magnētiskā caurlaidība, H/m ;

Elektromagnēta MDS aprēķina, neņemot vērā magnētiskā potenciāla kritumu tēraudā (ja serde ir nepiesātināta). Aprēķinā pieņem, ka izkliedes koeficients

$$\sigma = \frac{\Phi}{\Phi_\delta} \approx \sim 1,2, \quad (3.2.)$$

kur $\Phi = \Phi_\delta + \Phi_\sigma$ spoles radītā magnētiskā plūsma Wb ,

Φ_δ – magnētiskā plūsma darba gaisa spraugā, Wb ,

Φ_σ – izkliedes plūsma, Wb .

Vispirms aprēķina magnētisko plūsmu darba gaisa spraugā: $\Phi_\delta = B_\delta S$, tad pilno plūsmu $\Phi = \sigma \Phi_\delta$. Ja, piemēram, ir dots U veida elektromagnēts, kam ir divas darba gaisa spraugas, tad vispirms aprēķina vienas gaisa spraugas magnētisko vadāmību:

$$\Lambda_\delta = \mu_0 \frac{S}{\delta}, \text{ H}, \quad (3.3.)$$

un pēc tam summāro

$$\Lambda_\Sigma = \frac{\Lambda_\delta}{2}, \text{ H}. \quad (3.4.)$$

Elektromagnēta spoles radīto MDS aprēķina, izmantojot Oma likumu magnētiskai ķēdei:

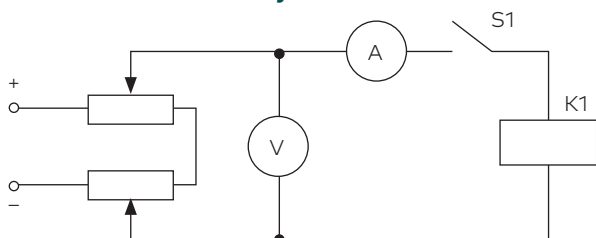
$$(Iw)_{\text{apr}} = \frac{\Phi}{\Lambda_\Sigma}, \text{ A}. \quad (3.5.)$$

Salīdzinot reālo spoles MDS ar aprēķināto, nosaka aprēķinā izdarīto pieņēmumu radīto kļūdu:

$$\gamma_{\%} = \frac{(Iw)_{sp} - (Iw)_{apr}}{(Iw)_{sp}} \cdot 100, \% \quad (3.6.)$$

kur $(Iw)_{sp} = I_N w$ un w - elektromagnēta spoles vijumu skaits.

Metodiskie norādījumi



3.1. att. Eksperimenta shēma.

Elektromagnēta vilces spēka mērīšanai izmanto laboratorijas dinamometru. Gaisa spraugu δ fiksē ar nemagnētiska materiāla plāksnītēm.

Magnētisko indukciju mēra ar teslametru 5 vietās uz elektromagnēta pola virsmas (virzoties pa tā diametru no ārmas uz iekšmalu). Vilces spēka aprēķinā izmanto magnētiskās indukcijas vidējo vērtību darba gaisa spraugai δ .

Elektromagnēta skicē jāparāda magnētiskās darba plūsmas Φ_{δ} un izkliedes plūsmu Φ_{σ} ceļi.

Mērījumu rezultāti un tabula

Δ , mm	F		B	
	kg	N	mT	T
$U_N =$ V ; $I =$ A				
$0,8U_N =$ V ; $I =$ A				
$0,5U_N =$ V ; $I =$ A				

Paškontroles jautājumi

1. Kā sauc elektromagnēta magnētvida kustīgo elementu un pārējās magnētvida sastāvdaļas?
2. No kā ir atkarīgs elektromagnēta vilces spēks?
3. Kas jāmaina elektromagnēta konstrukcijā, lai palielinātu tā vilces spēku?
4. Kas ir elektromagnēta parazitiskā gaisa sprauga?
5. Kas ir izkliedes plūsma?
6. Kādi ir magnētiskās ķēdes pamatlikumi?

4. laboratorijas darbs

Maiņstrāvas elektromagnēta pētīšana

Darba mērķis

Iepazīties ar maiņstrāvas elektromagnēta darbības principu un to raksturojošiem parametriem

Darba uzdevumi

1. Uzņemt spoles strāvas atkarību no elektromagnēta gaisa spraugas $I = f(\delta)$, ja $U = \text{const}$ (U_N ; $0,8U_N$; $0,5U_N$).
2. Aprēķināt elektromagnēta darba un palaides strāvu.
3. Uzņemt vilces spēka atkarību no gaisa spraugas $F = f(\delta)$.
4. Aprēķināt elektromagnēta vilces spēku dažādām gaisa spraugām un salīdzināt ar eksperimentā iegūto (pie U_N).
5. Noteikt L , X_L un $\cos\phi$ atkarību no gaisa spraugas, ja $U = \text{const}$.
6. Pārrēķināt elektromagnēta spoli citam spriegumam.

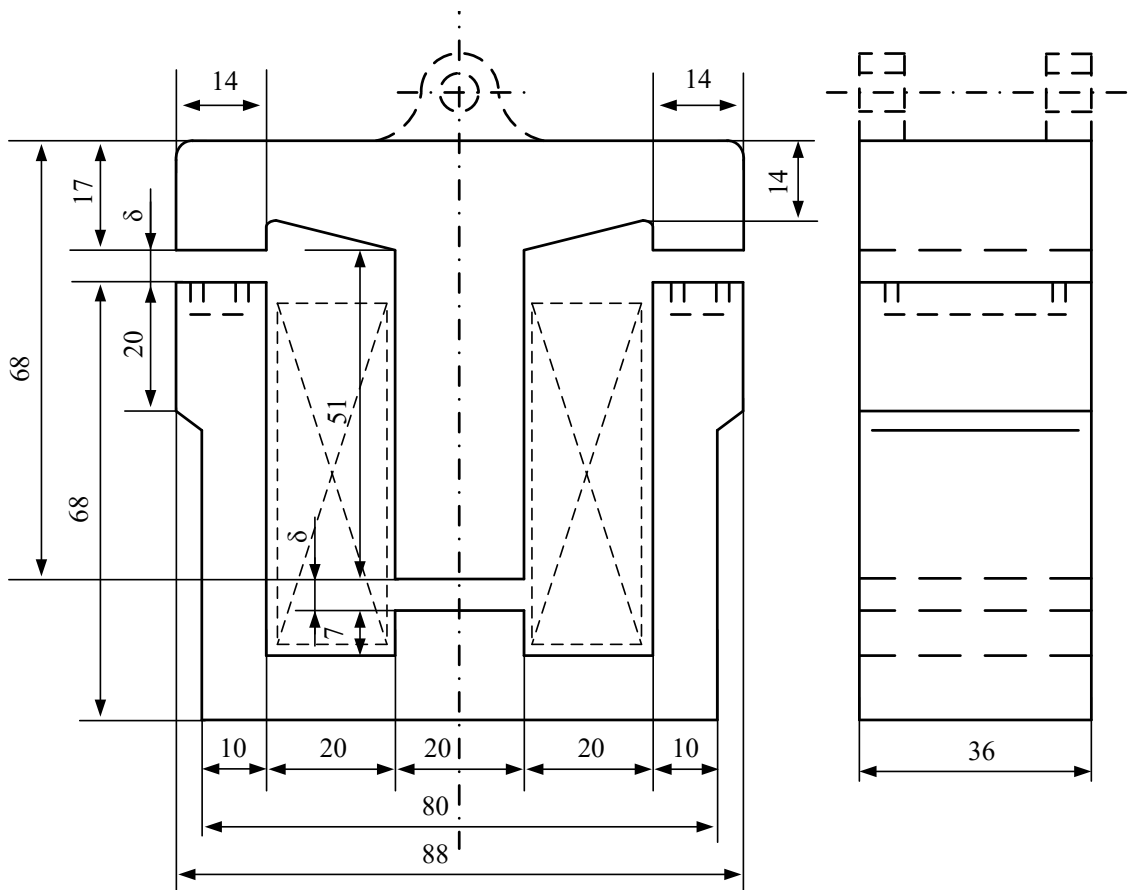
Teorētiskais pamatojums

Strāvu maiņstrāvas elektromagnēta spole aprēķina, izmantojot Oma likumu:

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X^2}}, \text{ A,} \quad (4.1.)$$

kur spoles induktīvā pretestība $X = \omega L = \omega w^2 \Lambda_\Sigma$,
bet Λ_Σ – darba gaisa spraugu magnētiskā vadāmība.

Kā 4.1 attēlā redzams, elektromagnētā ir trīs darba gaisa spraugas: vidējā, caur kuru plūst visa spole radītā magnētiskā plūsma Φ , un divas malējās – caur katru plūst $\Phi/2$.



4.1. att. Maiņstrāvas elektromagnēta ЭДО 7101У3 skice.

Vidējās spraugas magnētiskā vadāmība

$$\Lambda_1 = \mu_0 \frac{S_1}{\delta}, \text{ H}, \quad (4.2.)$$

kur S_1 – vidējā pola šķērsgriezuma laukums, m^2 .

Malējās gaisa spraugas magnētiskā vadāmība

$$\Lambda_2 = \mu_0 \frac{S_2}{\delta}, \text{ H}, \quad (4.3.)$$

kur S_2 – malējā pola šķērsgriezuma laukums, m^2 .

Ekvivalentā aizvietošanas shēmā (bez tērauda pretestībām) 4.2. attēlā redzams, ka vidējās serdes vadāmība Λ_1 slēgta virknē ar divām malējām vadāmībām Λ_2 , kas slēgtas paralēli.

Tā kā $S_2 = \frac{S_1}{2}$, tad summārā magnētiskā vadāmība

$$\Lambda_{\Sigma} = \frac{\Lambda_1 \cdot 2\Lambda_2}{\Lambda_1 + 2\Lambda_2} = \frac{\mu_0}{\delta} \cdot \frac{S_1 \cdot 2S_2}{S_1 + 2S_2} = \frac{\mu_0}{\delta} \cdot \frac{S_1^2}{2S_1} = \mu_0 \frac{S_1}{2\delta}. \quad (4.4.)$$

Elektromagnēta vilces spēku aprēķina, izmantojot Maksvela formulu:

$$F = \frac{B^2 S}{2\mu_0} = \frac{\Phi^2}{2\mu_0 S}, \quad (4.5.)$$

kur spoles radītā magnētiskā plūsma:

$$\Phi = \frac{E}{4,44 fw} = \frac{\sqrt{U^2 - (IR)^2}}{4,44 fw}, \quad (4.6.)$$

no kurienes:

$$\Phi = \frac{U^2 - (IR)^2}{39,4\mu_0 f^2 w^2 S}, \quad (4.7.)$$

kur S – pola šķērsgriezuma laukums, kas nosaka summāro magnētisko vadāmību, t. i., $S = S_1 / 2$.

Pārreķinot elektromagnēta spoli citam spriegumam, tā vilces spēks nedrīkst mainīties. Tāpēc jānodrošina, lai $\Phi_1 = \Phi_2$, $(Iw)_1 = (Iw)_2$ pie δ_{\min} un strāvas blīvums spoles tinumā $j_1 = j_2$. No šiem noteikumiem seko, ka

$$\frac{U_1}{w_1} = \frac{U_2}{w_2} \text{ un } w_2 = w_1 \frac{U_2}{U_1}; I_2 = \frac{(Iw)_1}{w_2}.$$

Tā kā $j_1 = \frac{I_1}{q_1}$, kur $q_1 = \frac{\pi d_1^2}{4}$ – „vecās” spoles

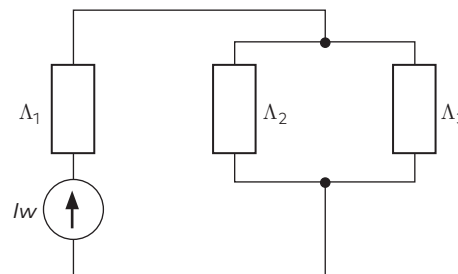
vada šķērsgriezuma laukums, tad

$$q_2 = \frac{I_2}{j_1} \text{ un } d_2 = \sqrt{\frac{4q_2}{\pi}}.$$

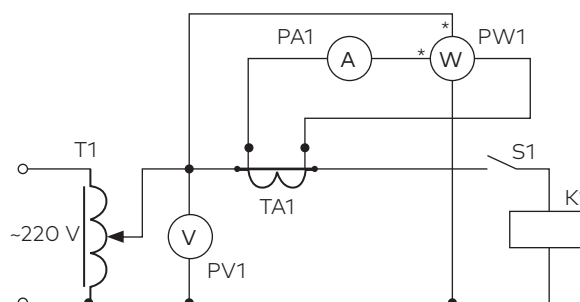
Metodiskie norādījumi

Tā kā maiņstrāvas elektromagnēta palaides strāva ir apmēram desmit reizes lielāka par darba strāvu, tad ampērmetru un vatmetra strāvas spoli ķēdē ieslēdz caur strāvmaini TA1 (4.3. att.). Darba gaisa spraugu fiksē ar nemagnētiska materiāla plāksnītēm, un vilces spēku mēra ar laboratorijas dinamometru.

Mērījumu rezultātus apkopo sniegtajā tabulā, aprēķinātām raksturlielņēm $F = f(\delta)$, $L = f(\delta)$,



4.2. att. Maiņstrāvas elektromagnēta vienkāršota aizvietošanas shēma.



4.3. att. Eksperimenta shēma.

$X = f(\delta)$, $\cos\varphi = f(\delta)$ atskaitē dot vienu aprēķina piemēru, bet pārējos rezultātus apkopo tabulā un attēlo grafiski.

Mērījumu rezultāti un tabulas

$U_N =$			V			$I_N =$			A		
$I (PA1)$			$P (PW1)$			F			δ		
i.	C	A	i.	C	W	kg	N		mm		
$0,8U_N =$			V			$0,8I_N =$			A		
$0,5U_N =$			V			$0,5I_N =$			A		

Aprēķinu rezultāti:

$U_N =$		V		$I_N =$		A			
Δ, mm		$F_{\text{aprr}}, \text{N}$		L, H		X, Ω		$\cos\varphi$	
$0,8U_N =$		V		$0,8I_N =$		A			
$0,5U_N =$		V		$0,5I_N =$		A			

Paškontroles jautājumi

1. Kāpēc maiņstrāvas elektromagnētā magnētiskā plūsma $\Phi = \text{const}$?
2. Kāpēc maiņstrāvas elektromagnēta spoles strāva ir atkarīga no darba gaisa spraugas lieluma?
3. Kas notiks, ja maiņstrāvas elektromagnēta spoli bez magnētvasda pieslēgs nominālam spriegumam?
4. No kā ir atkarīgs maiņstrāvas elektromagnēta vilces spēks?
5. No kā ir atkarīga maiņstrāvas elektromagnēta spoles pretestība?

PRAKTISKO DARBU UZDEVUMS

Elektromagnēta projektēšana

Šis praktiskais darbs veidots, balstoties uz literatūras avotu [5].

Darba uzdevums

Veikt maiņstrāvas vai līdzstrāvas elektromagnēta projektēšanu pēc dotajiem izejas datiem, izmantojot projektēšanas aprakstā dotās aprēķinu formulas u. c. informāciju.

Elektromagnēta projektēšanas metodika

Šī metodika iekļauj trīs elektromagnēta (EM) projektēšanas etapus:

- 1) *iepriekšējais aprēķins*, iekļaujot tajā vienkāršotu savstarpējo sakarību izmantošanu, kas ņem vērā pirmajā tuvinājumā magnētvasda, spoles, šķēsgriezuma izmēru, kā arī tinuma vijuma skaita noteikšanu;
- 2) *EM konstrukcijas izstrāde*, ņemot vērā iepriekšējā aprēķina rezultātus, lietojot projektēšanas un fiziskajā modelēšanas pieredzē balstītus konstruktīvos koeficientus un parametrus;
- 3) *EM projekta aprēķins*, kas nosaka galīgo precizējumu parametriem, ģeometriskajiem izmēriem, tinuma datiem, kā arī temperatūras un enerģētisko parametru atbilstību pastāvošajām normām.

Jābūt iestatītai kritiskajai gaisa spraugai atkarībā no enkura pārvietošanās, pie kuras elektromagnētā nākas attīstīt lielāko darbaspēju, lai pārvarētu pretdarbojošo spēku. Kritiskajai spraugai atbilst *kritiskais elektromagnētiskais spēks*, kam, lai nodrošinātu uzticamu darbību, jābūt nedaudz augstākam nekā šai gaisa spraugai atbilstošajam pretdarbības spēkam F_{pr} :

$$F_{em} = k_r F_{pr}, \quad (P.1.)$$

kur $k_r = 1,2-1,5$ – rezerves koeficients, piemērojams pašiem nelabvēlīgākajiem ekspluatācijas nosacījumiem (sprieguma pazemināšanās pie uzsilušas spoles).

Kritiskā spēka un kritiskās gaisa spraugas vērtības ir izejas pamatdati EM aprēķinā. Turklāt jāzina EM darba režīms (nepārtraukts, īslaicīgs), strāvas veids, spriegums, frekvence utt.

Elektromagnēta konstruktīvās formas izvēle var tikt īstenota, balstoties uz prototipu vai pēc optimālā ģeometriskā rādītāja (konstruktīvā faktora) G :

- līdzstrāvas elektromagnētā

$$G = \frac{\sqrt{F_{em}}}{\delta_{nepiev}}; \quad (P.2.)$$

- maiņstrāvas elektromagnētā

$$G = \frac{\sqrt{2F_{em}}}{\delta_{nepiev}}, \quad (P.3.)$$

kur δ_{nepiev} – gaisa sprauga, mm,

F_{em} – elektromagnētiskais pievilkšanas spēks, N.

Katrai ekonomiski projektētai elektromagnēta konstruktīvajai formai, ņemot vērā ekonomiskumu un masu, atbilst noteiktas G vērtības (P.1. tab.).

Elektromagnētu magnētvasdu izgatavošanai tiek izmantoti tēraudi ar zemu oglekļa saturu (līdzstrāvas gadījumā) un tēraudi ar silīcija piejaukumu (maiņstrāvas gadījumā).

Magnētiskās indukcijas izvēles rekomendācijas:

- pievilkta enkura gadījumā vietā, kur ir maksimālā plūsma, indukcijai jābūt vienādai ar indukciju magnetizācijas līknes noliekuma daļā. Elektrotehniskajiem tēraudiem 1212, 1411, 1511, 1521 u. c., šis lielums $B_{max} = 1,0-1,2$ T;
- nepievilkta enkura gadījumā indukcija tiek izvēlēta pēc rekomendācijām atkarībā no konstruktīvās formas un ģeometriskā rādītāja. Maksimālā indukcija serdē nepievilkta enkura gadījumā spēka elektromagnētiem $B_{max} = 0,8-1,2$ T, augstas jutī-

bas elektromagnētiem (relejiem) $B_{\max} = 0,4-0,7$ T;

- indukcijas lielums darba gaisa spraugā spēka elektromagnētiem tiek izvēlēts robežās no 0,6 T līdz 1 T. Maiņstrāvas gadījumā aprēķins tiek veikts pēc indukcijas amplitūdas vērtības.

P.1. tabula

Dažādas konstruktīvās formas elektromagnētu ģeometrisko rādītāju vērtības

Elektromagnēta konstruktīvā forma	G	
	$N^{0,5}/m$	$kg^{0,5}/cm$
Cilindrisk ar ievilkamu taisni ejošu enkuru:		
1) sastāv no spoles un serdes enkura;	< 63	< 0,2
2) ar nenoslēgtu magnētisko ķēdi (bez "pēdas") un saīsinātu konisku enkuru;	63–316 380–1600	0,2–1,0 1,2–5,0
3) enkurs ar konisku galu, leņķis 60°;	1260–5100	4–16
4) enkurs ar konisku galu, leņķis 90°;	5100–30 000	16–93
5) enkurs ar plakanu galu		
Sadalīts presētos skārdos ar taisni ejošu pievilkamu T, E veida enkuru un maiņstrāvas bruņu serde	316–25 000	1–80
Cilindrisk ar ārēju pievilkamu diskveida enkuru	30 000–90 000	2,7–270,0
Vienspoles ar vienu serdi un ārēju pievilkamu enkuru	630–63 000	1,9–190,0

Izspiešanas koeficientu $\sigma_{izsp} = \Phi_{\delta} / \Phi_{gal}$ (kur Φ_{δ} , Φ_{gal} – magnētiskā plūsma gaisa spraugā un uz elektromagnēta pola gala virsmas) var noteikt, ja ir zināmi detaļu ģeometriskie izmēri, kas veido darba gaisa spraugu. Iepriekšējā aprēķinā izspiešanas koeficients tiek orientējoši pieņemts – $\sigma_{izsp} = 1,0-1,8$.

Izkliedes koeficientu σ_{izkl} katrai magnētiskās ķēdes daļai (ķēdes daļas maksimālās vai vidējās plūsmas attiecība pret plūsmu gaisa spraugā) var noteikt, ja ir zināms magnētiskā vadītspēja gaisa spraugām un izkliedes plūsmu ceļiem. Iepriekšējos aprēķinos izkliedes koeficients tiek pieņemts orientējoši, ņemot vērā turpmāk aprakstītos apsvērumus: pie pievilkta enkura izkliedes plūsma ir maza, tāpēc izkliedes koeficients ir tuvs 1; pie nepievilkta enkura izkliedes koeficients ir atkarīgs no darba gaisa spraugas lieluma un no izkliedes plūsmu magnētiskās vadītspējas; tas mainās robežās no 1,1 līdz 4,0 un vairāk.

Aprēķina spēks pieņemts vienāds ar EM kritisko spēku vienas gaisa spraugas gadījumā. Ja kritiskā gaisa sprauga vienāda ar sākotnējo, aprēķins jāveic nepievilkta stāvoklim. Ja kritiskā gaisa sprauga atbilst kontaktu saskares brīdim, tad aprēķins tiek veikts pievilkta stāvoklim. **Šajā darbā tiks lietots pirmais no šiem variantiem.**

Līdzstrāvas elektromagnētiem izmanto izteiksmes:

$$F_{em} = \frac{\Phi_{gal.nepiev}^2}{2\mu_0 S_{gal}} = \frac{B_{gal.nepiev}^2 S_{gal}}{2\mu_0} = 39,8 \cdot 10^4 B_{gal.nepiev}^2 S_{gal}, \text{ N}; \quad (\text{P.4.})$$

$$S_{gal} = \frac{F_{em}}{39,8 \cdot 10^4 B_{gal.nepiev}^2}, \text{ m}^2; \quad (\text{P.5.})$$

kur $B_{gal.nepiev} = B_{\delta.nepiev} / \sigma_{izsp}$ – indukcijas vērtība serdes galā nepievilkta enkura gadījumā, T;

vienfāzes maiņstrāvas elektromagnētiem:

$$S_{gal} = \frac{F_{em}}{19,9 \cdot 10^4 B_{gal.max.nepiev}^2}, \text{ m}^2; \quad (\text{P.6.})$$

Serdes, kurai nav pola uzgaļa, diametrs:

$$d = \sqrt{\frac{4S_{\text{gal}}}{\pi}}, \text{ m.} \quad (\text{P.7.})$$

Taisnstūrainas serdes izmērs:

$$a = \frac{S_{\text{gal}}}{k_{\text{aizp}} \frac{b}{a}}, \text{ m.} \quad (\text{P.8.})$$

kur $b/a = 1-2$.

Pēc īsslēgtā vijuma izvietojanas noteikumiem, malu attiecība $b/a = 0,8-0,9$.

Aizpildījuma koeficients tērauda paketei, ņemot vērā tērauda lokšņu izolācijas kārtas, loksniem, kuru biezums ir 0,35 mm un 0,50 mm, attiecīgi ir $k_{\text{aizp}} = 0,90$ un $k_{\text{aizp}} = 0,95$.

Spoles izmēri ir atkarīgi no magnetizējošā spēka lieluma, kas nepieciešams elektromagnēta nostrādei.

Pilnais nostrādes MDS līdzstrāvas gadījumā:

$$F = (\text{no } 1,2 \text{ līdz } 1,6) F_{\delta} = (\text{no } 1,2 \text{ līdz } 1,6) \frac{B_{\delta, \text{nepiev}}^2 \delta}{\mu_0}, \text{ N.} \quad (\text{P.9.})$$

Līdzstrāvas tinuma šķērsgriezums:

$$S_{\text{tin}} = l_{\text{tin}} h_{\text{tin}} = \frac{k_{\text{max}} F}{k_{\text{min}} k_i j k_w}, \text{ mm.} \quad (\text{P.10.})$$

Pilnais nostrādes MDS maiņstrāvas gadījumā:

$$F = \frac{B_{\text{gal.max.nepiev}} \delta_{\text{nepiev}}}{\mu_0} + \frac{B_{\text{gal.max.nepiev}} \sigma \delta_{\text{piev}}}{\mu_0}, \text{ N;} \quad (\text{P.11.})$$

kur $B_{\text{gal.max.nepiev}} = B_{\delta, \text{max.nepiev}} / \sigma_{\text{izsp}}$ – indukcijas vērtība serdes galā nepievilkta enkura gadījumā, T; δ_{nepiev} , δ_{piev} – gaisa sprauga nepievilkta un pievilkta enkura gadījumā, m; σ – koeficients, kas ņem vērā kontakta gājienu un papildgājienu.

Maiņstrāvas tinuma šķērsgriezums:

$$S_{\text{tin}} = l_{\text{tin}} h_{\text{tin}} = \frac{k_{\text{max}} F}{k_{\text{min}} k_I k_i j k_{\text{aiz}}}. \quad (\text{P.12.})$$

kur visbiežāk sastopamajos gadījumos koeficients $k_{\text{max}} = U_{\text{max}} / U_N = 1,05$, koeficients $k_{\text{min}} = U_{\text{min}} / U_N = 0,6-0,9$.

Strāvas pārslodzes koeficients ņem vērā režīmu (īslaicīgs, atkārtoti īslaicīgs). Ilgstošam režīmam pārslodzes koeficients $k_I = 1$. Strāvas koeficients $k_i = F / F_{\text{piev}} = 4-15$ (šeit F_{piev} – MDS pievilkta enkura gadījumā).

Ilglaicīgā darba režīmā parasti strāvas blīvums $j = 2-4 \text{ A/mm}^2$.

Tinuma aizpildījuma koeficients ir atkarīgs no formas koeficienta, tinuma nevienmērīguma koeficienta un vada izolācijas koeficienta $k_w = k_{\varphi} k_{\text{nev}} k_{\text{iz}}$, kur vada izolācijas koeficients $k_{\text{iz}} = d^2 / d_{\text{iz}}^2$ (d , d_{iz} – neizolēta un izolēta vada diametrs).

Vada formas koeficients $k_{\varphi} = 1$ (taisnstūrveida vads) vai $k_{\varphi} = 0,785$ (apaļš vads).

Tinuma nevienmērīguma koeficients $k_{\text{nev}} = 1$ (taisnstūrveida vads) vai $k_{\text{nev}} = 0,8-0,9$ (apaļš vads, mazs diametrs), vai $k_{\text{nev}} = 0,90-0,95$ (apaļš vads, diametrs $> 0,3 \text{ mm}$).

Racionāli izprojektētiem elektromagnētiem tinuma malu attiecība $l_{\text{tin}} / h_{\text{tin}} = 3-8$ (līdzstrāvas elektromagnētos) atkarībā no konstrukcijas un $l_{\text{tin}} / h_{\text{tin}} = 2-4$ (maiņstrāvas elektromagnētos) atkarībā no spēka un gājiena.

Esošo elektromagnētu konstrukciju analīze parāda, ka līdzstrāvas elektromagnētiem var pieņemt šādas $l_{\text{tin}} / h_{\text{tin}}$ vērtības:

- ar ārēju šūpojošos enkuru
 - maziem elektromagnētiem: 6–7;
 - lieliem elektromagnētiem: 4–5;

- ar ārēju taisni pārvietojošos enkuru
 - maziem elektromagnētiem: 7–8;
 - lieliem elektromagnētiem: 5–6;
- ar ievēljamu enkuru
 - īsa gājiena elektromagnētiem: 3–5;
 - gara gājiena elektromagnētiem: 6–8.

Mainstrāvas elektromagnētiem var pieņemt šādas $l_{\text{tin}} / h_{\text{tin}}$ vērtības:

- pie salīdzinoši neliela gājiena un liela spēka: 2,0–2,5;
- pie salīdzinoši liela gājiena un maza spēka: 3–4.

Zinot $l_{\text{tin}} / h_{\text{tin}}$ vērtību, var noteikt tinuma izmērus:

- tinuma biezums

$$h_{\text{tin}} = \sqrt{\frac{S_{\text{tin}}}{l_{\text{tin}} / h_{\text{tin}}}}, \text{ m}; \quad (\text{P.13.})$$

- tinuma garums

$$l_{\text{tin}} = \frac{S_{\text{tin}}}{h_{\text{tin}}}, \text{ m}. \quad (\text{P.14.})$$

Pēc elektromagnēta galveno izmēru noteikšanas tiek izstrādāta tā skice [5].

Izejas dati un praktisko darbu varianti

Parametra apzīmējums	Parametrs	Mērvienība	Nr.	Variants					
				1	2	3	4	5	6
Strāvas veids: līdzstrāva (DC) vai maiņstrāva (AC)			2	2	DC	DC	DC	DC	DC
F_{pr}	Gaisa spraugas pretestības spēks	N	3	60	120	300	610	900	1000
k_r	Rezerves koeficients	-	4	1,20	1,20	1,20	1,21	1,22	1,25
$B_{\delta, nepiev}$	Magnētiskā indukcija gaisa spraugā (DC)	T	5	0,60	0,65	0,67	0,67	0,69	0,70
$B_{\delta, max. nepiev}$	Maksimālā indukcija gaisa spraugā (AC)	T	6	-	-	-	-	-	-
U_N	EM nominālais spriegums	V	7	12,00	12,00	12,00	12,00	13,75	13,75
U_{min}	EM minimālais spriegums	V	8	9,00	8,30	10,40	9,90	11,65	11,85
U_{max}	EM maksimālais spriegums	V	9	12,60	12,60	12,84	12,60	14,44	14,44
k_l	Strāvas pārslodzes koeficients	-	10	1	1	1	1	1	1
k_j	Strāvas koeficients	-	11	12,24	13,23	13,13	12,43	9,53	7,96
k_{nev}	Nevienmērīguma koeficients	-	12	0,85	0,87	0,86	0,97	0,96	0,98
k_{aizp}	Aizpildījuma koeficients tērauda paketei, ņemot vērā tērauda lokšņu izolācijas kārtas	-	13	0,90	0,95	0,90	0,90	0,95	0,90
j	Strāvas blīvums	A/cm ²	14	3,38	3,77	2,74	2,64	3,27	2,60
σ	Koeficients, kas ņem vērā kontakta gājienu un papildgājienu	-	15	0,0178	0,0172	0,0141	0,0181	0,0155	0,0140
σ_{izkl}	Izkliedes koeficients	-	16	1,37	1,26	1,19	1,16	1,13	1,12
σ_{izsp}	Izspiešanās koeficients	-	17	1	1	1	1	1	1
Serdes forma: cilindriska (cil.) vai taisnstūrveida (tais.)			18	cil.	cil.	cil.	cil.	cil.	cil.
b/a	Taisnstūrveida serdes malu attiecība	-	19	-	-	-	-	-	-
l_{tin}/h_{tin}	Tinuma malu attiecība	-	20	5,73	6,20	4,06	7,34	3,94	6,12
δ	Darba gaisa sprauga	m	21	0,0111	0,0101	0,0101	0,0113	0,0111	0,0108
δ_{piev}	Gaisa sprauga pievilktā enkura gadījumā	m	22	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004
δ_{nepiev}	Gaisa sprauga nepievilktā enkura gadījumā	m	23	0,0111	0,0101	0,0101	0,0113	0,0111	0,0108
d_{vad}	Neizolēta vada diametrs	m	24	0,640	0,640	0,800	1,120	1,740	1,810
$d_{vad, izol}$	Izolēta vada diametrs	m	25	0,700	0,700	0,865	1,200	1,825	1,905

P.2. tabulas turpinājums

Nr.	Variants											
1	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
2	DC	DC	DC	DC	DC	DC	DC	DC	DC	AC	AC	AC
3	1350	1550	1900	2200	3000	3700	9500	12 000	20 000	0,6	2,5	3,0
4	1,26	1,26	1,28	1,29	1,32	1,32	1,35	1,40	1,50	1,21	1,22	1,22
5	0,720	0,730	0,735	0,800	0,840	0,900	0,920	0,945	0,963	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,62	0,65	0,65
7	14,5	14,5	24,0	24,0	24,0	52,0	52,0	110,0	220,0	36,0	36,0	36,0
8	12,2	12,4	17,2	17,8	21,1	40,0	46,0	94,0	184,6	29,4	27,0	31,1
9	14,935	15,950	25,200	25,200	25,200	58,240	56,420	120,120	231,000	63,000	37,800	37,800
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
11	9,29	11,96	4,39	6,86	10,43	8,12	6,47	5,80	10,28	6,35	7,02	14,16
12	0,83	0,85	0,99	0,98	0,85	0,95	0,81	0,87	0,84	0,85	0,80	0,86
13	0,95	0,90	0,95	0,90	0,95	0,95	0,90	0,90	0,95	0,95	0,90	0,95
14	2,93	3,56	2,43	2,99	2,02	2,87	2,24	2,51	2,22	2,43	3,06	2,55
15	0,02128	0,01785	0,01430	0,01404	0,01508	0,01495	0,01664	0,01950	0,01612	6,3	6,5	6,9
16	1,11	1,09	0,90	1,38	1,40	1,19	1,12	1,05	1,03	1,80	1,48	1,43
17	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1,34	1,25	1,34
18	cil.	cil.	cil.	tais.	tais.	tais.	tais.	tais.	tais.	cil.	cil.	cil.
19	-	-	-	0,6	0,8	0,6	0,6	0,6	0,9	-	-	-
20	7,08	3,01	4,52	3,04	4,00	4,85	3,23	7,44	4,21	3,64	3,50	3,31
21	0,0112	0,0105	0,011	0,0102	0,0101	0,01	0,0113	0,0115	0,0109	0,005	0,0051	0,0052
22	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004
23	0,0112	0,0105	0,011	0,0117	0,0116	0,0115	0,0128	0,013	0,0124	0,005	0,0051	0,0052
24	1,880	1,950	1,950	1,950	2,100	2,100	2,100	2,260	2,440	0,670	0,690	0,740
25	1,975	2,045	2,045	2,045	2,200	2,200	2,200	2,360	2,540	0,730	0,750	0,805

P.2. tabulas turpinājums

Nr.	Variants											
	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
2	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC
3	14	30	40	50	150	900	1100	2000	2300	3500	2000	2800
4	1,23	1,24	1,25	1,28	1,30	1,33	1,33	1,33	1,40	1,45	1,47	1,49
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	0,65	0,66	0,695	0,71	0,72	0,75	0,75	0,78	0,81	0,83	0,85	0,86
7	50	50	50	230	230	230	230	230	230	230	230	230
8	40,4	42,5	35,1	171,2	174,3	190,3	177,7	199	208,9	174,2	175,9	167,6
9	54,5	52,5	52,5	236,9	241,5	243,8	248,4	241,5	241,5	241,5	246,1	241,5
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
11	5,86	8,90	9,25	6,71	8,38	6,90	14,79	10,64	5,89	11,36	8,35	5,81
12	1,00	0,94	0,95	0,99	0,97	0,89	0,98	0,91	0,96	0,85	0,81	0,81
13	0,90	0,90	0,95	0,90	0,90	0,95	0,90	0,95	0,95	0,90	0,90	0,90
14	2,69	3,25	3,82	2,60	3,97	3,04	3,82	2,82	2,22	2,40	2,04	3,85
15	6,3	6,6	6,8	6,2	6,2	6,8	6,1	6,6	6,1	6,7	6,6	6,6
16	1,21	1,16	1,15	1,11	1,11	1,09	1,16	1,16	1,04	1,07	1,03	1,04
17	1,51	1,49	1,48	1,75	1,08	1,63	1,09	1,16	1,71	1,17	1,57	1,55
18	cil.	cil.	cil.	cil.	cil.	tais.	tais.	tais.	tais.	tais.	tais.	tais.
19	-	-	-	-	-	0,7	0,7	0,7	0,9	0,6	0,6	0,6
20	3,75	2,96	2,41	2,80	2,53	3,79	3,78	3,02	2,23	2,59	3,46	3,35
21	0,0053	0,0054	0,0055	0,0056	0,0060	0,0080	0,0080	0,0100	0,0100	0,0100	0,0100	0,0150
22	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004
23	0,0053	0,0054	0,0055	0,0056	0,0060	0,0080	0,0080	0,0100	0,0100	0,0100	0,0100	0,0150
24	0,800	0,860	0,930	1,000	1,160	1,300	1,680	1,880	2,260	2,260	2,440	2,440
25	0,865	0,925	0,995	1,080	1,240	1,385	1,765	1,975	2,360	2,360	2,540	2,540