K. N e r e t n i e k s,
Latvijas Valsts Universitātes st. docents.

E L E K T R O M A Š Ī N A S
I

K o n s p e k t s.

Lasīts Latvijas Valsts
Universitātes Mechanikas
fak-tē

Rīgā,1941.
Latvijas Valsts Universitātes izdevniecība.

TRANSFORMATORS.

Transformators ir mašīna (aparāts), kas izmanto vienas vadu sistēmas radīto periodiski mainošos magentisko plūsmu kā energijas pārvadu uz otru olektrības vadu sistēmu. Tā kā ap katru vadu, pa kuŗu tek strāva, rodas magnetiskais lauks, tad ikkuri divi vadi no kuriem katrs atrodas otrā laukā veido transformatoru. Ņemot vērā, ka elektriskās energijas pārvads šinī gadījumā ir magnetiskā plūsma, jārada apstākļi, lai vadi savstarpēji būtu pēc iespējas labāk magnetiski saistīti, t.i. vadi ir tā jānovieto, lai viena vada plūsma pēc iespējas pilnīgāk apņemtu otru vadu. Bez tam lielākas plūsmas sasniegšanai, tās ceļam jābūt ar iespējami mazāku magnetisku pretestību, t.i. vēlamās magnetiskās plūsmas ceļš jāizveido no attiecīga materiāla. Kā jau zinām, stipru koncentrētu lauku var radīt ar solenoidu. Novietojot divas solenoidā-veidā vadu sistēmas koaksiāli vienu otrā, var panākt samērā labu sistēmu magnetisku sajūgšanu. Plūsma, kas atkarīga no strāvas lieluma un vijumu skaita vēl stipri palielināsies, ja solenoidā ievietosim magnetisku serdi un vēl vairāk, ja serdes galus ārpus solenoida magnetiski sajūgsim.

Zīm. 1.

Ja caur solenoidiem tecēs mainīgā magnetiskā plūsma, katrā solenoida vijumā inducēsies spriegums, kuŗa lielums saskaņā ar indukcijas likumu līdzinās.

$$e = -\frac{d\varnothing}{dt} \cdot 10^{-8}\ v/ \qquad \text{kur}$$

$\varnothing^{M/}$ - plūsmas lielums

$t^{s/}$ - laiks

$e^{v/}$ - elektrodzinējspēks

W_1 - pirmā solenoida vijumu skaits

W_2 - otrā solenoida vijumu skaits.

Ja caur vijumu W_x plūsma laikā dt mainas par $\varnothing_x$, tad visos solenoida vijumos inducētais spriegums līdzināsies atsevišķos vijumos inducēto spriegumu sumai.

$$e_1 = -\frac{d\sum_{o}^{W_1} \cdot \varnothing_x}{dt} \cdot 10^{-8}\ v/ \ ; \ e_2 = -\frac{d\sum_{o}^{W_2} \cdot \varnothing_x}{dt} \cdot 10^{-8}\ v/$$

Pieņemot pirmā tuvinājumā, ka plūsmas lielums $\varnothing_x$ ir vienāds visos vijumos, kā pirmam tā arī otram solenoidam

$$e_1 = -W_1 \cdot \frac{d\varnothing}{dt} \cdot 10^{-8}\ v/ \quad ; \quad e_2 = -W_2 \cdot \frac{d\varnothing}{dt} \cdot 10^{-8}\ v/$$

Attiecību

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{W_1}{W_2} = u \text{ sauc par elektrodzinējspēka}$$

pārnesuma skaitli. Kā redzams Eds attiecība līdzinas vijumu attiecībai.

Ja pirmo tinumu pieslēgtu elektrības maiņstrāvas avotam, pirmā solenoidā plūstošā strāva rada magnetisku maiņlauku. Plūsma cauri solenoidiem attiecīgi strāvas frekvencei mainīs savu lielumu un virzienu. Līdz ar to abos solenoidos inducēsies Eds. Pirmā tinuma Eds darbojas pretim pieslēgu spriegumam un kopā ar sprieguma kritumu vadu pretestības dēļ rada līdzsvarotu spriegumu sistēmu. Otrā tinumā inducētais spriegums brīvi izmantojams kā sekundārs elektrības avots. Abus tinumus saista tikai magnetiskā plūsma, kura mainoties enerģiju pārnes no viena tinuma uz otru. Tā kā Eds abos tinumos proporcionāli tinumu vijumiem, tad ar tādu tinumu sistēmu-transformatoru var tīkla spriegumu pēc patikas pacelt vai pazemināt. Frekvence paliek tā pati kas pirmavotam, kas skaidri izriet no Eds radīšanas procesa. Transformators pēc šāda parauga ir mašīna ar mechāniski nekustīgām daļām, kādēļ dažreiz to pat uzskata par aparātu.

Vispārējā gadījumā magnetiskā plūsma mainās periodiski pēc kaut kāda likuma vai līknes. Praktiski lietojamā līkne ir sinusoida, kā izdevīgākā. Katru citu līkni var sadalīt pamatsinusoidā un augstākās harmoniskās (sinusoidas) ar frekvenci n.f., ja f ir pamatfrekvence. Stipras strāvas tīklos gandrīz visur Eiropā tagad pielieto f = 50 Hz.

Apskatot magnetisku plūsmu, kas mainās pēc sinusa likuma, var vajadzības gadījumā ar superponēšanas metodi atrast atrisinājumu arī katrai citai plūsmas periodiskai funkcijai.

Pieņemts $\varnothing = \varnothing_m . \sin(\omega t + \psi)$ kur

$\varnothing_m$ - maksimālā plūsma

t - laiks

ω - magnetiskā lauka leņķa ātrums $\omega = 2\pi f$

ψ - fāzes nobīdne laikā t = 0

Gadījumā, kad f = 0 arī $\omega=0$ un plūsma ir pastāvīga (līdzstrāvas lauks). Eds tādā gadījumā

$$e = -\frac{d\varnothing}{dt} = 0$$

Kad $\omega \neq 0$ un plūsma $\varnothing$ saistīta ar visiem w vijumiem

$$e = -w\frac{d\varnothing}{dt}.10^{-8} = -w\frac{d\varnothing_m \sin(\omega t+\psi)}{dt} = -w.\varnothing_m.\omega.\cos(\omega t+\psi).10^{-8} =$$

$$= w.\omega.\varnothing_m.\sin(\omega t+\psi-90^\circ).10^{-8} = w.\omega.\varnothing_m.\sin/(\omega t+\psi)-\frac{\pi}{2}/.10^{-8}V =$$

$$= E_m.\sin(\omega t+\psi-\frac{\pi}{2})\ V/$$

Maksimālais Eds $E_m = w.\omega.\varnothing_m.10^{-8}V/$

Pēc sinusa likuma mainīga lieluma vidējais lielums līdzinas

$$E_{vid} = \frac{2}{\pi}.E_m = \frac{2\omega}{\pi}.w.\varnothing_m.10^{-8} = \frac{4\pi f}{\pi}.w.\varnothing_m.10^{-8} = 4.f.w.\varnothing_m.10^{-8}V$$

Effektīvais spriegums jeb vidējais kvadratiskais lielums līdzinas

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{\omega}{\sqrt{2}}.w.\varnothing_m.10^{-8} = \frac{2\pi f}{2}.w.\varnothing_m.10^{-8} = 4,44.f.w.\varnothing_m.10^{-8}V$$

Attiecība $\frac{E}{E_{vid}}$ =1,11 = k_f ir sinus līknes formas reizulis (Formfaktor). Lauku līknēm asākām par sinusoidu k_f ir lielāks, bet plakanākām mazāks. Ja līknei taisnstūra forma tad k_f=1

Zīm.2.

bet, ja tai ir trīsstūra forma, tad k_f = 1,155

Zīm.3.

Īstenībā plūsmas daļa, kas saistīta ar pirmo tinumu nebūs saistīta ar otro tinumu. Tāpat ne visi viena tinuma vijumi būs vienādi saistīti ar magnetisko plūsmu. Plūsmu tā tad var sadalīt divās daļās

1) galveno, kuŗa saistīta ar visiem pirmā un otrā tinuma vijumiem un
2) izkliedes plūsmu, kuŗa saistīta tikai ar vienu no abiem tinumiem vai pat tikai to daļu.

Normālos gadījumos derīga tikai galvenā plūsma, jo tā galvenā energijas pārneseja. Neskatoties uz to, ka galvenai plūsmai rada mazas pretestības ceļu caur ferromagnetisku materiālu, tomēr viena plūsmas daļa noslēdzas gaisā.

Apzīmējot ar u_1 un u_2 magnetiski saistīto tinumu pieslēgu spriegumu "i_1 " i_2 attiecīgo tinumu strāvas

"r_1 " r_2 aktīvās pretestības

"L_1 " L_2 pašindukcijas reizuļus

"L_{12}" L_{21}savstarpējās ind.reizuļus

var sastādīt sekošus vienādojumus

$$u = i_1r_1 + \frac{d}{dt}(L_1.i_1)+ \frac{d}{dt}(L_{12}.i_2)$$

$$0 = u_2+i_2r_2+ \frac{d}{dt}(L_2.i_2)+ \frac{d}{dt}(L_{21}.i_1)$$

Savstarpējās indukcijas reizuļi $L_{12} = L_{21}$, jo savstarpējā ietekme ir vienāda. Tas kļūst skaidrs, ja apskata plūsmas, kas iet caur vienu un otru tinumu.

Ja $i_2 = 0$ $\quad \phi_{10} = L_1 i_1$

Ja $i_1 = 0$ $\quad \phi_{20} = L_2 i_2$

kad $i_2 \neq 0$

$$\phi_1=\phi_{10}+\phi_{12}=L_1i_1+L_{12}.i_2 = (L_1-L_{12})i_1+L_{12}(i_1+i_2)$$

$$\phi_2 = \phi_{20}+\phi_{21}=L_2i_2+L_{21}.i_1=(L_2-L_{21})i_2+L_{21}(i_1+i_2)$$

Plūsmas ϕ_{12} un ϕ_{21} ir tās, kas saistītas ar abiem tinumiem un tām jābūt vienādām, jo faktiski pastāv tikai viena kopēja plūsma - energijas pārneseja.

Tā tad $\emptyset_{12} = \emptyset_{21}$ un līdz ar to arī

$$L_{12}(i_1+i_2) = L_{21}(i_1+i_2) \text{ jeb } L_{12} = L_{21}$$

Apskatot tālāk sinusveida strāvas un spriegumus var izdarīt šādas matemātiskas operācijas, ņemot palīgā maiņstrāvas teorijas simbolisko metodi.

$$u_1 = \sqrt{2}\,\bar{U}_1.e^{j\omega t} \qquad i_1 = \sqrt{2}.\bar{J}_1.e^{j\omega t}$$

$$u_2 = \sqrt{2}\,\bar{U}_2.e^{j\omega t} \qquad i_2 = \sqrt{2}.\bar{J}_2.e^{j\omega t}$$

$$\frac{d}{dt}(L_1.i_1) = \sqrt{2}.j.\omega.L_1.\bar{J}_1.e^{j.\omega.t}$$

$$\frac{d}{dt}(L_2.i_2) = \sqrt{2}.j.\omega.L_2.\bar{J}_2.e^{j.\omega.t}$$

$$\frac{d}{dt}(L_{12}.i_2) = \sqrt{2}.j.\omega.L_{12}.\bar{J}_2.e^{j.\omega.t}$$

$$\frac{d}{dt}(L_{12}.i_1) = \sqrt{2}.j.\omega.L_{12}.\bar{J}_1.e^{j.\omega.t}$$

$$u_1 = \sqrt{2}.\bar{U}_1.e^{j.\omega.t} = \sqrt{2}.\bar{J}_1.e^{j.\omega.t}.r_1 + \sqrt{2}\,j.\omega.L_1\bar{J}_1.e^{j.\omega.t} +$$

$$+\sqrt{2}.j.\omega.L_{12}.\bar{J}_2.e^{j.\omega.t} \quad \text{jeb}$$

$$\bar{U}_1 = \bar{J}_1(r_1+j.\omega.L_1)+\bar{J}_2.j.\omega.L_{12} = \bar{J}_1.\bar{z}_{1p}+\bar{J}_2.\bar{z}_{12}$$

tāpat

$$-\bar{U}_2 = \bar{J}_2.\bar{z}_{2p}+\bar{J}_1.\bar{z}_{12}$$

z_{1p} - primārā tinuma pašindukcijas impedance

$$j\omega L_1 = x_{1p}$$

z_{12} - savstarpējā impedance.

Ievērojot, ka transformatorā ar dzelzs serdi, zudumi dzelzī palielina leņķi starp magnetizējošiem ampervijumiem un Eds par $\angle\alpha$ ($\psi = \alpha + 90^\circ$), savstarpējā impedance dabū arī vēl aktīvu komponenti

$$r_{12} = r_{21}, \text{ kādēļ}$$

$$z_{12} = r_{12}+jx_{12} = r_{12}+j\omega L_{12}$$

$$\left.\begin{aligned} \bar{U}_1\bar{z}_{12} &= \bar{J}_1\bar{z}_{1p}.\bar{z}_{12}+\bar{J}_2.\bar{z}_{12}^2 \\ 0 &= \bar{J}_1\bar{z}_{12}.\bar{z}_{1p}+\bar{J}_2\bar{z}_{2p}\bar{z}_{1p}+\bar{U}_2.\bar{z}_{1p} \end{aligned}\right\} \quad \begin{aligned} \bar{U}_1 &= -\bar{U}_2\frac{\bar{z}_{1p}}{\bar{z}_{12}} - \frac{\bar{z}_{1p}.\bar{z}_{2p}-\bar{z}_{12}^2}{\bar{z}_{12}}.\bar{J}_2 \\ \bar{J}_1 &= -\bar{U}_2.\frac{1}{\bar{z}_{12}} - \frac{\bar{z}_{2p}}{\bar{z}_{12}}.\bar{J}_2 \end{aligned}$$

Dabūtie ir četrpola vienādojumi:

$$\bar{U}_1 = A\bar{U}_2 + B.\bar{J}_2 \qquad A = -\frac{\bar{z}_{1p}}{\bar{z}_{12}} \qquad B = -\frac{\bar{z}_{1p}.\bar{z}_{2p}-\bar{z}_{12}}{\bar{z}_{12}}$$

$$\bar{J}_1 = C\bar{U}_2 + D.\bar{J}_2 \qquad C = -\frac{1}{\bar{z}_{12}} \qquad D = -\frac{\bar{z}_{2p}}{\bar{z}_{12}}$$

Zīm. 4. Zīm. 5.

Kā redzams, pārejot uz četrpola ekvivalentu šēmu, U_2 un J_2 virzieni mainās, kādēļ vienādojumos, kas izriet no ekvivalentās šēmas, U_2 un J_2 zīmes jāapmaina uz pretējām.

Analizējot četrpola vienādojumus gūstam dažus vērtīgus aizrādījumus par transformatora darbību.

1) Pieņemot $J_2 = 0$, t.i. transformatora dīkgaitu

$$U_{10} = \bar{A}\bar{U}_2$$

$$A = \frac{\bar{U}_{10}}{\bar{U}_2} \quad \text{- sprieguma attiecība dīkgaitā}$$

$$J_{10} = \bar{C}\bar{U}_2 = \bar{C}\,\frac{\bar{U}_{10}}{A} = \frac{1}{\bar{z}_{12}}.\frac{\bar{z}_{12}}{\bar{z}_{1p}}.\bar{U}_{10} = \frac{1}{\bar{z}_{1p}}.\bar{U}_{12} = \bar{J}_{10}.\bar{U}_{10} = \frac{\bar{C}}{\bar{A}}.\bar{U}_{10}$$

$$\frac{\bar{C}}{\bar{A}} = \frac{J_{10}}{\bar{U}_{10}} = J_{10} \quad \text{- transformatora vadamība dīkgaitā.}$$

2) Pieņemot $\bar{J}_{1k} = \bar{D}\bar{J}_2$

$$\bar{D} = \frac{J_{1k}}{J_2} \quad \text{- strāvu attiecība īsslēgumā}$$

$$\bar{U}_{1k} = \bar{B}.\bar{J}_2 = \frac{\bar{B}}{\bar{D}}.\bar{J}_{1k} = \bar{z}_{1k}.\bar{J}_{1k} = \frac{\bar{z}_{1p}.\bar{z}_{2p}-\bar{z}_{12}}{.\bar{z}_{2p}}.\bar{J}_{1k}$$

$$\frac{\bar{B}}{\bar{D}} = \bar{z}_{1k}$$ - transformatora šķietamā pretestība īsslēgumā.

No minētā izriet, ka:

$$\bar{U}_1 = \bar{U}_{10} = \bar{U}_{1k}$$

$$\bar{J}_1 = \bar{J}_{10} + \bar{J}_{1k}$$

Var secināt, ka katrs transformatora darbības punkts uzskatāms kā divu transformatoru darbības punktu superpozicija: dīkgaitas un īsslēguma ar noteiktu darbības strāvu.

No četrpolu teorijas zināms, ka

$$\bar{A}\bar{D} - \bar{B}\bar{C} = 1$$

Ja spriegumu pievada otram tinumam, tad

$$\bar{U}_2 = \bar{J}_2\bar{z}_{2p} + \bar{J}_1\bar{z}_{21}$$ no kurienes kā iepriekš

$$0 = \bar{J}_1\bar{z}_{1p} + \bar{J}_2\bar{z}_{12} + U_1$$

$$\bar{U}_2 = -\frac{\bar{z}_{2p}}{\bar{z}_{12}}.\bar{U}_1 - \frac{\bar{z}_{1p}.\bar{z}_{2p}-\bar{z}_{12}^{2}}{\bar{z}_{12}}.\bar{J}_1$$

$$\bar{J}_2 = -\frac{1}{\bar{z}_{12}}.\bar{U}_1 - \frac{\bar{z}_{1p}}{\bar{z}_{12}}.\bar{J}_1$$

$$\bar{U}_2 = \bar{A}'.\bar{U}_1 + \bar{B}'J_1 = U_{20}+U_{2k}$$ Salīdzinot atrod, ka

$$\bar{J}_2 = \bar{C}\bar{U}_1 + \bar{D}\bar{J}_1 = J_{20} + J_{2k}$$

$$\bar{A}^1 = (-)\frac{\bar{z}_{2p}}{\bar{z}_{12}} = \bar{D}\ ; \quad \bar{B}^1 = (-)\frac{\bar{z}_{1p}.\bar{z}_{2p}-\bar{z}_{12}^{2}}{\bar{z}_{12}} = \bar{B}$$

$$\bar{C}^1 = (-)\frac{1}{\bar{z}_{12}} = \bar{C}\ ; \quad \bar{D}^1 = -\frac{\bar{z}_{1p}}{\bar{z}_{12}} = \bar{A}$$

Tā tad var secināt, ka:

1) $\bar{A} = \frac{U_{10}}{\bar{U}_2} = \frac{J_{2k}}{J_1} = \bar{D}^1$ t.i.spriegumu attiecība dīkgaitā barojot pirmo tinumu, līdzinās īsslēguma strāvu attiecībai barojot otro tinumu.

2) $\bar{A}^1 = \frac{U_{20}}{\bar{U}_1} = \frac{J_{1k}}{J_2} = \bar{D}$ t.i.spriegumu attiecība dīkgaitā barojot otro tinumu līdzinās īsslēguma strāvu attiecībai barojot pirmo tinumu.

3) $\bar{A}.\bar{D} = \bar{A}^1.\bar{D}^1 = \frac{\bar{z}_{1p}.\bar{z}_{2p}}{\bar{z}^2_{12}}$ t.i.spriegumu attiecību dīkgaitā reizinājums ar īsslēgumu strāvu attiecību ir vienāds, kā barojot pirmo tā arī barojot otro tinumu.

$$\frac{\bar{C}}{\bar{A}^1} = y_{20}$$ = transformatora vadamība dīkgaitā barojot otro tinumu.

OG-50

1941/aprīlis

$\frac{\bar{B}^1}{\bar{D}^1} = z_{2k}$ = transformatora šķietamā pretestība īsslēgumā barojot otro tinumu.

4) $\frac{\bar{C}.\bar{B}}{\bar{A}.\bar{D}} = y_{10}\cdot z_{2k} = y_{20}\cdot z_{2k} = \frac{\bar{C}^1 . \bar{D}^1}{\bar{A}^1.\bar{B}^1}$ t.i. vadamības dīkgaitas reizinājums ar šķietamo pretestību īsslēgumā nav atkarīgs no tā, vai barots tiek pirmais vai otrais tinums.

Parastos spēka transformatoros spriegumu attiecība dīkgaitā

$$\frac{U_{10}}{U_2} = \frac{W_1}{W_2} = u \; ; \quad \text{faktiski} \quad \frac{U_{10}}{U_2} > \frac{W_1}{W_2} ,$$

jo daļa plūsmas, ko rada pirmais tinums neiet caur otru tinumu. Ja nav zudumu, tad pirmā tinuma uzņemtai jaudai jālīdzinās otrā tinuma atdotai jaudai.

$$N = U_1 . J_1 = U_2 . J_2 = \frac{U_1}{u} . J_2 \quad \text{no kurienes} \quad \frac{J_1}{J_2} = \frac{1}{u}$$

Lielākas pārskatamības dēļ būtu ērti, ja $W_1 = W_2$, jo tad varētu tieši salīdzināt attiecīgos lielumus bez lieko reizuļu lietošanas. Tādēļ aprēķinos un diagramās bieži lieto uz pirmtinumu vai otrtinumu attiecinātus lielumus, t.i. lielumus, kādi transformatoram būtu, ja tā tinumiem būtu vienāds vijumu skaits.

Attiecinot otrtinuma lielumus uz pirmtinumu, dabū

$$U_2' = U_1 = u . U_2 \quad ; \quad J_2' = J_1 = \frac{J_2}{u}$$

Tā kā $\frac{U}{J} = z$, tad $z' = \frac{U'}{J'} = \frac{u . U}{\frac{J}{u}} = u^2 . \frac{U}{J} = u^2 . z$

$$\frac{J}{U} = y \; , \quad \text{tad} \quad y' = \frac{J'}{U'} = \frac{y}{z^2}$$

Ņemot sacīto vērā, agrāk atrastie transformatora vienādojumi izskatīsies šādi:

$$\bar{U}_1 = \bar{J}_1 . \bar{z}_{1p} + \bar{J}_2 . \bar{z}_{12} = \bar{J}_1 . \bar{z}_{1p} + u . J_2' . \bar{z}_{12}$$

$$-u . \bar{U}_2 = u . \bar{J}_2 . \bar{z}_{2p} + u . \bar{J}_1 . \bar{z}_{12} = -\bar{U}_2' = u^2 J_2' . \bar{z}_{2p} + u . \bar{J}_1 . \bar{z}_{12} =$$

$$= \bar{J}_2' . \bar{z}_{2p}' + u . \bar{J}_1 . \bar{z}_{12}$$

pārveidojot dabū:

$$\bar{U}_1 = \bar{J}_1 (\bar{z}_{1p} - u . \bar{z}_{12}) + (\bar{J}_1 + \bar{J}_2') . u . \bar{z}_{12}$$

$$-\bar{U}_2 = \bar{J}_2' (\bar{z}_{2p} - u . \bar{z}_{12}) + (\bar{J}_1 + J_2') . u . \bar{z}_{12}$$

Kā redzams, te ir darīšana ar divām strāvas ķēdēm

Zīm. 6. Zīm. 7.

Zīm. 8.

Apvienojot abas ķēdes un mainot strāvas J_2' un sprieguma U_2' virzienu, dabū transformatora ekvivalentu schēmu pēc Tveida četrpola.

Ja $z_{1p} = z'_{2p}$, ekvivalentā schēma ir simetriska.

Parastos spēka transformatoros $z_1 \approx z_2'$, ar ko schēmu lielākā daļā gadījumos var uzskatīt par simetrisku. Strāva $\bar{J}_1 - \bar{J}_2' = \bar{J}_0$ ir tā, kas rada magnetisku plūsmu, kuŗa saista abus tinumus; to sauc par magnetizēšanas strāvu $u.\bar{z}_{12} = \bar{z}_0$ sauc par magnetizēšanas strāvas ķēdes pretestību.

Atskaitot no pašindukcijas sprieguma krituma $J_1.z_{1p}$ savstarpējās indukcijas radīto sprieguma kritumu $J_1.z_{12}.u$ dabū sprieguma kritumu, kuŗu rada magnetiskās plūsmas izkliede. (Visur ieskaitīta arī vēl tinuma pretestība r).

Apzīmējot izkliedes reaktanci ar x, izkliedes un aktīvas pretestības lielums

$$\bar{z}_1 = r_1 + j.x_1 = \bar{z}_{1p} - u.\bar{z}_{12} \quad \text{un}$$

$$\bar{z}_2' = r_2' + j.x_2' = \bar{z}_{2p} - u.\bar{z}_{12}$$

ar to ekvivalentā ķēde pārvēršas šādi:

Zīm. 9.

Lietojot transformatora ekvivalento ķēdi, var analizēt transformatora darbību. Analīzi izdevīgi dažos gadījumos izdarīt analītiski, citos grafiski. Grafiskās metodes lietojot vienmēr attiecina visus lielumus uz pirmtinumu, t.i. visiem tinumiem pieņemts itkā vienāds vijumu skaits.

Transformatora analīzi visvieglāk sākt ar divu raksturīgu darbības stāvokļu apskati: dīkgaitas un īsslēguma.

Dīkgaitā otrtinuma strāva $J_2 = 0$ un $\bar{U}_{10} = \bar{A}.\bar{U}_2$ kā jau bija noskaidrots, otrtinumā inducētais spriegums nosebojās par 90^0 pret radošo plūsmu $\emptyset$. Plūsmu savukārt rada strāva, kuŗa 90^0 nosebota pret strāvu dzenošo spriegumu.

$$\emptyset = L.i \qquad u = \frac{d}{dt}L.i$$ ja nav pretestības un savstarpējas indukcijas.

$$d(L.i) = u.dt = U_m.\sin\omega t.dt + C = d\emptyset$$

C = 0, jo kad nav sprieguma, nav arī plūsmas, jo netek strāva.

$$\emptyset = \int U_m \sin\omega t.dt = -\frac{1}{\omega}.U_m \cos\omega t = \frac{1}{\omega}.U_m \sin(\omega t - 90^0) =$$

$$= \emptyset_m \sin(\omega t - 90^0)$$

Attēlojot šādu sajūgto lielumu sakarību, ņemot pie tam vērā, ka visi viņi ir sinusoidalas funkcijas, pieņemts par vektoru pozitīvu griešanas virzienu - pulksteņa rādītāja pretējus virzienus.

Zīm. 10.

Tālāk abos tinumos inducētie Eds

$$e = -\frac{d\varnothing}{dt} = -\frac{d\varnothing_m \sin(\omega t-90^\circ)}{dt} =$$

$$= \omega \varnothing_m \sin(\omega t-90^\circ-90^\circ) = \omega \frac{1}{\omega} . U_m \sin(\omega t-180^\circ) =$$

$$= -U_m \sin \omega t = E_m \sin \omega t$$

Otrtinumā un pirmtinumā inducētie spriegumi vienādi un pretēji tīkla pieslēga spriegumam.

Pirmtinumā tādēļ (bezpretestības tinumu un bezzudumu magnetisko serdi pieņemot) tīkla spriegumu līdzsvaro Eds.

Dīkgaitas strāvu apzīmē ar J_o

Stiprās strāvas transformatori gandrīz bez izņēmuma izbūvēti ar dzelzs serdi. Dzelzī rodas pārmagnetizēšanas zudumi, (histerezes, virpuļstrāvas). Tādēļ J_o bez tiešas magnetisko lauku radošas tīras induktīvas strāvas vēl ir aktīvas strāvas komponente. Virpuļstrāvas gadījumā tas ir pilnīgi skaidrs.

Zīm.11.

$$J_o = \bar{J}_i + \bar{J}_f$$

Lai pārliecinātos, kā arī histereze rada aktīvas strāvas komponenti, apskatīsim histerezes līkni.

Zīm.12.

Sadalot magnetizēšanas strāvu J_o pirmā harmonikā J_{o1} un aukstākās harmonikās J_{ox} dabon, ka

$$J_o = \sqrt{J_{o1}^2 + \sum J_{ox}^2}$$

Pirmās harmonikas strāvu var sadalīt divās pamatharmonikās+ vienu fāzē ar $\varnothing$ un vienu par 90° aizsteidzošos priekšā. Pirmā daļa itkā rada plūsmu $\varnothing$ un tādēļ ir induktīva komponente J_i , bet otra aktīva komponente histerezes zudumu segšanai J_h- fāzē ar spriegumu. Tā tad

$$J_o = \sqrt{J_i^2 + J_h^2 + \sum J_{ox}^2} = \sqrt{J_{oi} + J_h^2}$$

J_1 un J_{ox} ir reaktīvas strāvas, kādēļ tās apvieno vienā = $=J_{oi}$

Kā no apskatītā redzams, tad dīkgaitas strāvas sadalīšana magentizējošā t.i. induktīvā un nemagnetizējošā - aktīvā nav pareiza, jo visa strāva piedalas magnetizēšanā, tomēr aprēķinu kārtošanai tāda dalīšana ir ļoti ērta.

Apvienojot J_h un J_f vienā strāvā, jo tās ir fāzē dabūn dīkgaitas strāvas aktīvas pretestības komponenti

$$J_{oa} = J_h + J_f$$

ar ko tad dīkgaitas strāva

$$J_o = \sqrt{J_{oa}^2 + J_{oi}^2}$$

Ejot vēl vienu soli tālāk, jāapskata tinuma pretestības ietekme uz strāvas lielumu un stāvokli attiecībā uz pieslēgu spriegumu.

Zīm.13.

Kā no ekvivalentas šēmas redzams, tad tinuma pretestība $\bar{z}_1 = r_1 + jx$, samazinā strāvas lielumu, vair arī, ja par pamatu liek inducēto Eds, pieslēgu spriegums jāpalielina par sprieguma kritumu pirmtinumā =

$$J_1 . \bar{z}_1 = J_1(r_1 + jx_1)$$

Zīm.14.

$$U_1 = \bar{J}_o \bar{z}_1 + \bar{E} \text{ (pēc ekv.šemas)}$$

$$U_1 = \bar{J}_o \bar{z}_1 + \bar{J}_o \bar{z}_o = \bar{J}_o(\bar{z}_1 + \bar{z}_o)$$

$$\bar{E} = \bar{J}_o . \bar{z}_o = \bar{U}_2$$

No diagramas redzams, ka

$$J_{oa} = J_o \cos \varphi_o = E . g_o$$

$$J_{oi} = J_o \sin \varphi_o = E . b_o$$

Zudumi dzelzī $N_{Fe} = E . J_{oa} = E^2 . g_o$

$$\bar{J}_o = \bar{J}_{10} = \bar{E}(g_o - jb_o) = \bar{E} . \bar{y}_o = E . \frac{1}{\bar{z}_o}$$

Kā agrāk atrasts $J_{10} = \bar{U}_{10} . \frac{\bar{C}}{\bar{A}} = \bar{U}_{10} . y_{10}$

$$\bar{U}_{10} = \bar{E} + \bar{J}_{10} . \bar{z}_1 = \bar{E} + \bar{E} . \bar{y}_o . \bar{z}_1 = \bar{E}(1 + \bar{y}_o . \bar{z}_1) =$$

$$= \bar{U}_{10} = \bar{U}_2(1 + \bar{y}_o . \bar{z}_o) = \bar{A} . \bar{U}_2$$

$$\bar{A} = 1 + \bar{y}_o . \bar{z}_1 = A . e^{-j\gamma}$$

$\gamma_1 = \varphi_o - \psi_o$ ir parasti samērā mazs leņķis.

A ļoti tuvs vienībai, jo vadamība parasti maza (ja nav liels piesātinājums) un tāpat pretestība maza.

Kad zudumi dzelzī $N_{Fe} = 0$, $U_2 = E$ ir jāgriež pulksteņa rādītāja virzienā un tādēļ arguments $= -\gamma$, ir negatīvs. Ja zudumi dzelzī un izkliedes reaktance x_1 lieli, arguments var pārsviesties uz pozitīvo pusi.

$$J_o = \bar{E}.\bar{y}_o = \bar{E}.\bar{y}_{10}.A = \bar{U}_{10}.\bar{y}_{10} = \bar{J}_{10} \quad \text{no kurienes}$$

$$\bar{y}_o = \bar{y}_{10}.\bar{A} = \underbrace{y_o.e^{-j\varphi_o}}_{} = y_{10}.e^{-j\varphi}.A.e^{-j\gamma} = \underbrace{A.y_{10}e^{-j(\varphi_o+\gamma_1)}}_{}$$

kas sakrīt ar diagramā nolasīto vērtību

$$\gamma_o = \varphi_o + \gamma_1$$

Ņemot vērā, ka dīkgaitas strāva pirmtinumā rada zudumus

$$J_o^2.r_1 = J_{10}^2.r_1$$

kopējie transformatoru zudumi dīkgaitā būs

$$N_o = E^2.g_o + J_{10}^2.r_1 = U_{10}^2.g_{10} = U_{10}.J_{10}.\cos\varphi_o$$

Pieslēdzot transformatoru tīklam iespējams izmērīt

N_o, U_{10}, J_{10} no kurienes viegli atrast

$$\cos\varphi_o = \frac{N_o}{U_{10}.J_{10}} \quad ; \quad g_{10} = \frac{N_o}{U_{10}^2}$$

$$y_{10} = \frac{g_{10}}{\cos\varphi_o} \neq \frac{y_o}{\bar{A}} \cong y_o \quad \text{ja piesātinājums mazs.}$$

Zīm.15.

Izdarot mēģinājumus jāpiegriež vērība mērinstrumentu izvēlei un pārbaudes slēgumam, lai viegli būtu ievērot vajadzīgās mērīšanas rezultātu korektūras. Dīkgaitas zudumu lielākā daļa normāli ir zudumi dzelzī, kādēļ dīkgaitas zudumus bieži sauc arī par zudumiem dzelzī.

$$\frac{\bar{U}_{10}}{J_{10}} = \bar{z}_{10} = \bar{z}_1 + z_o = \bar{z}_{1p} - u.\bar{z}_{12} + u.\bar{z}_{12} = z_{1p}$$

$$\frac{U_{10}}{J_{10}(\cos\varphi_o - j\sin\varphi_o)} = \frac{U_{10}}{J_{10}}(\cos\varphi_o + j\sin\varphi_o) =$$

$$= z_{10}(\cos\varphi_o + j\sin\varphi_o) = r_1 + jx_{1p}$$

Kā otru raksturīgu darbības momentu jāapskata īsslēgums.

Zīm. 16.

Ekvivalenta šēma ļauj izdarīt dažus secinājumus.

Zīm. 17.

$$\bar{J}_{1k} = \bar{J}_2 + \bar{J}_{ok} =$$

$$= \bar{J}_2 + \frac{\bar{J}_2 . \bar{z}_2}{\bar{z}_o} = \bar{J}_2 (1 + \frac{\bar{z}_2}{\bar{z}_o}) = \bar{J}_2 (1 + \bar{z}_2 . \bar{y}_o) = \bar{D} . \bar{J}_2$$

$$\bar{D} = 1 + \bar{z}_2 . \bar{y}_o = D . e^{-jx}$$

$$\bar{E} = \bar{J}_{ok} . \bar{z}_o = \bar{J}_2 . \bar{z}_2$$

$$\bar{U}_{1k} = \bar{J}_{1k} . \bar{z}_1 + \bar{E} = \bar{J}_{1k} . \bar{z}_1 + \bar{J}_2 \bar{z}_2 = \bar{J}_{1k} (\bar{z}_1 + \frac{\bar{z}_2}{\bar{z}}) = \bar{J}_{1k} . \bar{z}_{1k} =$$

$$= \bar{B} . J_2 = \frac{\bar{B}}{\bar{D}} . \bar{J}_{1k} = (\frac{\bar{z}_{1p} . \bar{z}_{2p} - \bar{z}_{12}^2}{\bar{z}_{12}} : \frac{\bar{z}_{2p}}{\bar{z}_{12}}) . \bar{J}_{1k} =$$

$$= \frac{\bar{z}_{1p} . \bar{z}_{2p} - \bar{z}_{12}^2}{\bar{z}_{2p}} . \bar{J}_{1k}$$

$$\bar{z}_{1k} = \frac{\bar{z}_{1p} . \bar{z}_{2p} - \bar{z}_{12}^2}{\bar{z}_{2p}} = r_{1k} + jx_{1k}$$ (katram u, jo tas rezultātu neiespaido)

Īsslēgumā transformatora zudumi sastādas šādi:

$$N_k = J_{1k}^2 . r_{1k} = J_1^2 . r_1 + J_2^2 . r_2 + J_{ok}^2 . r_o$$

Zīm. 18.

Lielumi r_{1k}, z_{1k} cos φ_{1k} atrodami izmantojot īsslēguma mēģinājuma mērīšanas datus.

$$\cos \varphi_{1k} = \frac{N_k}{U_{1k} . J_{1k}} ; \qquad z_{1k} = \frac{U_{1k}}{J_{1k}} ;$$

$$r_{1k} = z_{1k} . \cos \varphi_{1k} = \frac{N_k}{J_{1k}^2} ;$$

Spēka transformatoros dīkgaitas sastāvdaļa $J_{10}^2 . r_1$ parasti ir niecīga salīdzinot ar zudumiem dzelzī $E^2 . g_o$, kādēļ zudumus N_o parasti attiecina tikai uz zudumiem dzelzī.

Īsslēgumā zudumu sastāvdaļa $J_{ok}^2 . r_o$ salīdzinot ar zudumiem abos tinumos ir pa lielākai daļai neievērojama, kādēļ zudumus N_k bieži apzīmē par zudumiem tinumos jeb **zudumiem** vaļā.

Ņemot bez tam vēl vērā, ka parasti, sprieguma kritums $J_o.\bar{z}_o$, dīkgaitā ļoti mazs, kā arī sprieguma kritums normālas slodzes gadījumā $J_1 z_1$ samērā niecīgs, transformatora **ekvivalentu** diagramu var vienkāršot.

Zīm.19.

Pieņem, ka z_o pieslēgts tieši spailēm un līdz ar to J_o ir konst. z_1 un z_2 saslēgti virknē, un $\bar{z}^1_{1k} = \bar{z}_1 + \bar{z}_2$;

$$\bar{J}_1 = \bar{J}_2' \text{ un } J_1 = J_2'$$

Tādā gadījumā E paliek konstants un diagrama dīkgaitai un īsslēgumam pārvēršas un vienkāršojas.

Zīm.20. Zīm.21.

$U_1 = -E$

$$J_{1k} = J_1 = -J_2'(J_o \approx 0)$$

$$\bar{z}_k = r_k + jx_k = r_1 + r_2^1 + j(x_1 + x_2^1)$$

Ļoti bieži vēl, kad transformators netiek aprēķināts, bet dati iegūti tikai ar īsslēguma un dīkgaitas pārbaudēm, pieņem, ka $x_1 : x_2 = r_1 : r_2$ ar ko tad arī $r_1 : r_2 = z_1 : z_2$ un īsslēguma sprieguma trīsstūris pārvēršas šādi:

$$\bar{U} = \bar{J}_1 . \bar{z}_k = \bar{J}[(r_1 + r_2) + j(x_1 + x_2)]$$

Tāds īsslēguma trīsstūris, kā vēlāk būs redzams, atļauj ļoti pārskatāmi attēlot spriegumu maiņu atkarībā no slodzes. Precizitāte atkarīga no atmesto cienādojuma locekļu relatīvā lieluma.

Zīm.22.

Bez ψ_o dažreiz vēlams noteikt kaut aptuveni arī ψ_o

Zīm.23.

$$U_1^2 = U_1^2 \sin^2\psi_o + (E\cos\psi_o + J_o r_1)^2$$

$$U_1^2(1 - \sin^2\psi_o) = E^2\cos^2\psi_o + 2E.J_o.r_1.\cos\psi_o + J_o^2 r_1^2$$

$$\cos\psi_o = -\frac{J_o.r_1}{E} \pm \sqrt{\frac{J_o^2.r_1^2}{E^2} - \frac{J_o^2.r_1^2 - U_1^2(1 - \sin^2\psi_o)}{E^2}} =$$

$$\cos\psi_o = \frac{-J_o.r_1 \pm U_1\sqrt{1 - \sin^2\psi_o}}{E} \quad (\text{ jālieto ir zīme + })$$

Transformatoru slogojot var apskatīt trīs gadījumus:

1) bezinduktīva slodze $\varphi_2 = 0$

2) induktīva slodze $\varphi_2 > 0$

3) kapacitatīva " $\varphi_2 < 0$

Zīm.24.

Lai palielinātu pārskatamību visu uzbūvi var izpildīt tikai ar otrtinuma apgrieztiem lielumiem. Tādā gadījumā diagrammas uzbūve ir nepārtraukta trīsstūŗu virkne.

Zīm.25.

Otrtinuma pieslēgu spriegums nobīdīts par $\angle\ \gamma_2$ pret Eds sprieguma krituma tinuma reaktīvās un aktīvās pretestības dēļ. Otrtinuma strāvas radīto pretampervijumu dēļ, pirmtinums no tīkla uzņem attiecīgu papildstrāvu - J_2', kuŗa kopā ar magnetizēšanas strāvu J_0 ir pilnā pirmtinuma uzņemta strāva

$$\bar{J}_1 = \bar{J}_0 + \bar{J}_2'$$

Pirmtinuma strāva nosebojas pret tīkla spriegumu par

$$\varphi_1 = \gamma_1 + \gamma_2 + \lambda$$

Gadījumi ar $\varphi_2 > 0$ un $\varphi_2 < 0$ attēloti saīsinātā veidā.

Zīm.26. Zīm.27.

$$\varphi_1 = \varphi_2 + \gamma_1 + \gamma_2 + \lambda \quad \text{pie kam leņķis } \angle\ \varphi$$

pozitīvs strāvas nosebošanās gadījumā.

Pieņemot arī šinī gadījumā, ka $-E = U_1$, t.i. Γ veida ekvivalenta šēmu

$$J_1 = J_2' \quad \text{un}$$

$$\bar{U}_1 = \bar{U}_2' + \bar{J}_1\bar{z}_1 + \bar{J}_2\bar{z}_2' = \bar{U}_2^1 + \bar{J}_1(\bar{z}_1 + \bar{z}_2) = \bar{U}_2' + \bar{J}_1 . \bar{z}_k$$

Bieži vēlams zināt, kā mainās sekundārais spriegums, t.i. otrtinuma spriegums atkarībā no slodzes, pie kam interesē ne tik daudz sprieguma kritums, t.i. $\bar{U}_{20}' - \bar{U}_2'$, bet absolūta sprieguma izmaiņa, t.i. algebraiskā starpība $U_{20}' - U_2'$.

Var pieņemt, ka dīkgaitā $U_{20}' = U_{10} = U_1$, kādēļ jāatrod starpība

$$U_1 - U_2'$$

Zīm.28.

$$r_1 + r_2' = r_k \qquad x_1 + x_2' = x_k$$

$$AB = J_2' . x_k . \cos\varphi_2 - J_2' . r_k . \sin\varphi_2 = E_x . \cos\varphi_2 - E_r . \sin\varphi_2$$

$$BC = \qquad = E_r . \cos\varphi_2 + E_x . \sin\varphi_2$$

$$U'_{20} = OA = \sqrt{\overline{OB}^2+\overline{AB}^2} = OB.\sqrt{1+\left(\frac{AB}{OB}\right)^2} = OB.\sqrt{1+\beta^2} = OB(1+\beta^2)^{\frac{1}{2}} =$$

$$= OB(1+ \frac{1}{2}\beta^2 - \frac{1}{2.4}\beta^4 + \frac{1.3}{2.4.6}\beta^6 - \dots) =$$

$$\cong OB(1+ \frac{1}{2}\beta^2)$$

Augstākās pakāpes β^4 u.t.t. var atmest, jo β ir mazs lielums, apm.0,02÷0,05, jo AB $\cong$ (0,02÷0,05)OB

$$U'_{20}=CA=OB+0,5OB \frac{AB^2}{OB^2} = OC+CB+05 \frac{AB^2}{OB} = U'_2+CB+0,5 \frac{AB^2}{OB}$$

$$\frac{U'_{20}-U'_2}{U'_{20}}.100 = \varepsilon\% =\left(\frac{CB}{OA} + \frac{1}{2}. \frac{AB^2}{OA.OB} \right).100 \cong \left(\frac{CB}{OA} + \frac{1}{2}. \frac{AB^2}{OA^2}\right).100=$$

$$= \varepsilon\% = / \frac{E_r\cos\varphi_2 +E_x\sin\varphi_2}{U'_{20}} + \frac{1}{2}\left(\frac{E_r\sin\varphi_2+E_x\cos\varphi_2}{U'_{20}}\right)^2 /100 =$$

$$= \varepsilon\% = (\varepsilon_r\cos\varphi_2+\varepsilon_x\sin\varphi_2)+0,005(\varepsilon_r\sin\varphi_2+\varepsilon_x\cos\varphi_2)^2 \%$$

$$\varepsilon_r = \frac{E_r}{U'_{20}}.100\% \quad ; \quad \varepsilon_x = \frac{E_x}{U'_{20}}.100\%$$

Ja slodze bezinduktīva ($\cos\varphi_2 = 1$ un $\sin\varphi_2 = 0$)

$$\varepsilon\% = \varepsilon_r + 0,005\, \varepsilon_x^2$$

Ja slodze kapacitatīva ($\cos\varphi_2=0$, $\sin\varphi_2 = -1$)

$$\varepsilon\% = - \varepsilon_x + 0,005\, \varepsilon_r^2$$

Kā viegli pārliecināties, $\varepsilon\%$ būs maksimums, kad $\varphi_2= \varphi_k$, jo tad $J_2.\bar{z}_k$ virziens sakrīt ar $\bar{U}'_2$ un $U_{20} = U_1$ virzienu.

Trīsstūris ACD tieši proporcionāls strāvai, bet citādi atkarīgs tikai no konstantiem lielumiem - transformatora techniskiem datiem. Šo trīsstūra īpašību var izmantot spriegumu un pirmtinuma strāvas $\cos\varphi_1$, aptuveni noteikšanai.

Zīm.29.

Uzzīmējot diagrammu ar sprieguma krituma trīsstūru pilnai slodzei, viegli var atrast sprieguma kritumu katrai citai slodzei, sadalot $J'_2.z_k$ pilnai slodzei attiecīgas apskatamas slodzes daļas, piem. pusslodzei uz pusi.

Ērtāk un lietošanai parocīgāk, ja diagrammu apgriež otrādi un kā izejpunktu izvēlas sprieguma U'_{20} gala punktu A. Tā kā parasti spriegums U'_{20} ir konstants (tīkls), tad izvēloties

U_{20} mērogam 100 vienības, visus pārējos spriegumus var nolasīt tieši % no tīkla sprieguma vai dīkgaitas sprieguma.

Neskatoties uz šķietamo vienkāršību, transformatora darbība īstenībā atkarīga no daudziem blakus apstākļiem. Tikai pilnīgi pareiza magnētiskās plūsmas sadalīšana ļauj precīzi noteikt transformatora īpašības. Tomēr plūsmas sadalījums atkarīgs no tik daudziem apstākļiem gan konstrukcijas, slēguma un slodzes, kā precīzu plūsmas aprēķinu tik pat kā neiespējami uzstādīt. Lai pārredzētu principiālas varbūtības, jāapskata daži gadījumi.

Zīm.30.

Dīkgaitā tikai daļa magnetisko līniju, kaut arī lielākā, iet cauri dzelzs serdei un līdz ar to saistīta ar abiem tinumiem pilnīgi. Daļa iet pa daļai caur gaisu, kaut arī saistīta ar visiem pirm- un otrtinuma vijumiem kā piem. $\emptyset_g'$;

Zīm.31.

Daļa magnetisko līniju, kas iet caur gaisu, saistīta tikai ar otrtinuma kādu daļu, kā $\emptyset_g''$. Beidzot dažas līnijas aptver tikai magnetizējoša pirmtinumu vai tā daļu - $\emptyset_g'''$.

Spriegums, kuŗu inducē $\emptyset_{Fe}$ ir perpendikulārs plūsmas virzienam un nosebojas par 90^o. Pati plūsma zudumu dzelzs serdē dēļ nosebojas pret magnetizējošo (dīkgaitas) strāvu par leņķi α.

Plūsmas $\emptyset_g$, kuŗu ceļš pa daļai iet caur gaisu ir fāzē, ar magnetizējošo strāvu J_o. Pirmtinumā šīs plūsmas inducē attiecīgu spriegumu E_{1g}, kas atbilst visu plūsmu sumai.

$$\emptyset_{1g} = \emptyset_g' + \emptyset_g'' + \emptyset_g'''$$

Otrtinums pilnīgi saistīts tikai ar plūsmu $\emptyset_g'''$ un pa daļai ar plūsmu $\emptyset_g''$, kādēļ otrtinumā inducētais spriegums E_{2g}' atbilst plūsmai

$$\emptyset_{2g} = x\emptyset_g'' + \emptyset_g'$$

Tā kā spriegumi E_1 un E_2' sastādas no dažāda lieluma komponentēm, tad viņi nav vienādi un nav arī fāzē. Starpība $\bar{E}_1 - \bar{E}_2 = \bar{E}_g$ saucas par izkliedes elektrodzinējspēku dīkgaitā, kamēr

$$\emptyset_{1g} - \emptyset_{2g} = \emptyset_g \quad \text{ir izkliedes plūsma}$$

Pieņemts, ka visas plūsmas un Eds ir sinusoidalas. Gadījumā, ja īstenībā plūsmai un spriegumam ir cita forma - tie jāsadala harmoniskās un tās attiecīgi jāsaskaita. Jāsaka, ka vispār vēlama sinusoidāla elektrisko un magnetisko lielumu mainforma, jo tad zudumi un citas nevēlamas blakus parādības ir vismazāk. Piem., ja magnetiska plūsma nav sinusoidala bet

$$\emptyset = \emptyset_1 \cos(\omega t+\psi_1)+\emptyset_3\cos(3\omega t+\psi_3)+\emptyset_5\cos(5\omega t + \psi_5) + \dots$$

tad Eds $e = - \frac{d\emptyset'}{dt} = \omega\emptyset_1 \sin(\omega t + \psi_1)+3\omega\emptyset_3\sin(3\omega t + \psi_3) + \dots$

Kā redzams, tad Eds jau vairāk sakropļots par plūsmu. Rodas sarežģījumi, kā pirmtīklā sakropļotās strāvas dēļ, tā arī otrtīklā kropļotā sprieguma dēļ.

Kad transformators tiek slogots, rodas vēl jauni faktori kas ietekmē transformatora plūsmas sadalījumu. Kopējā plūsma $\emptyset$ šinī gadījumā atkarīga no rezultējošiem ampervijumiem.

Zīm. 32.

Pirmtinuma strāva $\bar{J}_1 = \bar{J}_o - \bar{J}_2^1$ un

tās ampervijumi

$$\bar{J}_1 w_1 = \bar{J}_o w_1 - \bar{J}_2 w_2$$

Otrtinuma ampervijumi ir $J_2 w_2$.

Apskatot visu šo ampervijumu radītās plūsmas vispirms var apskatīt ampervijumus $J_2 w_2$ un $-J_2 w_2$. Šie ampervijumi virzīti viens pret otru un tādēļ kopsumā nevar radīt magnetiskas līnijas, kas būtu saistītas ar visiem pirm- un otrtinuma vijumiem ($\Sigma Jw = 0$). Var būt tikai tādas līnijas, kas saistītas ar daļu no viena vai otra tinuma vai abu tinumu daļu. Magnetisko līniju kopsuma ir slodzes izkliedes plūsma

$$\emptyset_s' = \emptyset_{1s}' + \emptyset_{2s}'$$

Šīs plūsmas inducē Eds attiecīgos tinumos, pie kam neitrālā josla 0-0 var atrasties starp tinumiem, bet var arī atrasties kādā no tinumiem, kā tas piemēram parādīts zīmējumā. Tādā gadījumā $\emptyset_{1s}'$ inducēs pirmtinumā E_{1s} un otrtinumā spriegumu E_{2s}'. Plūsma $\emptyset_{2s}$ inducēs otrtinumā spriegumu E_{2s}''. Ņemot vērā, ka $\emptyset_{1s}'$ un $-\emptyset_{2s}'$ ir fāzē, jo tās atrodas fāzē ar attiecīgiem ampervijumiem $-J_2 w_2$, rezultējošais slodzes izkliedes spriegums

$$E_{2s} = E_{2s}'' - E_{2s}'$$

Gadījumā, kad līnija 0-0 atrodas starp tinumiem $E_{2s}' = 0$. Slodzes izkliedes plūsmas inducēta spriegumu diagramas būve ļoti vienkārša.

Zīm.33.

Ņemot tagad vēl vērā dīkgaitas diagramu plūsmai ar superponēšanu dabon slodzes diagramu.

Zīm.34.

$$E_g = E_{1g} - E'_{2g}$$

$$E_{2s} = -J_2 x_2 \text{ t.i. otrtinuma izkliede}$$

$$\bar{E}_{1s} = \bar{E}_{1s-1} + \bar{E}_g =$$

$$= J_1.\bar{x}_1 = (\bar{J}_o - \bar{J}_2 . \frac{w_2}{w_1}).\bar{x}_1 \text{ t.i. pirmtin. izkliede}$$

$\bar{E}_{1s}$ ir perpend. pret $\bar{J}_1$

$$\bar{U}_1 = \bar{J}_1.r_1 - \bar{E}_2 - \bar{E}_{1s-1} - \bar{E}_g = \bar{J}_1 r_1 - \bar{E}_2 - \bar{E}_{1s} = \bar{J}_1 r_1 + \bar{J}_1 x_1 - \bar{E}_2 = \bar{J}_1 \bar{z}_1 - \bar{E}_2 \;;$$

$$\bar{U}_2 = \bar{E}_2 + \bar{E}_{2s} - \bar{J}_2 \bar{z}_2 = \bar{E}_2 - \bar{J}_2 x_2 - \bar{J}_2 r_2 = \bar{E}_2 - \bar{J}_2 \bar{z}_2 \;;$$

Atvietojot $\bar{E}'_2 = \bar{E}_1$ ar strāvas - pretestības reizinājumu $-\bar{E}'_2 = -\bar{E}_1 = \bar{J}_o.\bar{z}_o$, jo inducētais spriegums atkarīgs no magnetiskās strāvas, dabon, ka

$$\bar{U}_1 = \bar{J}_1.\bar{z}_1 + \bar{J}_o.\bar{z}_o$$

$$\bar{U}_2 = -\bar{J}_o.\bar{z}_o - \bar{J}'_2.\bar{z}_2 = \bar{J}'_2.\bar{z}' \quad \text{kur } z = \text{ārējai pretestībai.}$$

$$-\bar{J}_o.\bar{z}_o + (\bar{J}_1 - \bar{J}_o).\bar{z}'_2 + (\bar{J}_1 - \bar{J}_o)\bar{z}' = -\bar{J}_o.\bar{z}_o - \bar{J}_o(\bar{z}'_2 + \bar{z}') + \bar{J}_1(\bar{z}'_2 - \bar{z}')$$

$$\bar{J}_o = \bar{J}_1 . \frac{(\bar{z}'_2 + \bar{z}')}{\bar{z}'_2 + \bar{z}' + \bar{z}_o} = \bar{J}_1 . \frac{(\bar{z}_2 + \bar{z}).u^2}{(\bar{z}_2 + \bar{z}).u^2 + \bar{z}_o}$$

$$\bar{U}_1 = \bar{J}_1.\bar{z}_1 + \bar{J}_o.\bar{z}_o = \bar{J}_1 / \bar{z}_1 + \frac{\bar{z}_o(\bar{z}_2 + \bar{z}).u^2}{(\bar{z}_2 + \bar{z}).u^2 + \bar{z}_o} / = \bar{J}_1.z_x$$

Kā redzams, tad nonākam atkal pie ekvivalentās šēmas, jo sprieguma un strāvas sakarību var izteikt ar vienkāršas ķēdes pretestību. Ķēdes pretestība atkarīga vienīgi no transformatora raksturīgiem datiem un otrķēdes ārējās-mainīgās pretestības.

Vienkāršības dēļ transformatora pārnesums pieņemts

$$u = \frac{w_1}{w_2}$$

Ja U_1 ir konstants lielums - liela tīkla spriegums, tad atrastais vienādojums ļauj viegli atrast strāvu pirmtinumā atkarībā no ārējās otrtinuma slodzes.

Ja transformators strādā dīkgaitā - dīkgaitas strāva līdzinās

$$\bar{J}_{10} = \frac{\bar{U}_1}{\bar{z}_x} = \frac{\bar{U}_1}{\bar{z}_1 + \bar{z}_o} = \frac{\bar{U}_1}{\bar{z}_o} = \frac{\bar{U}_{10}}{\bar{z}_{10}} = \frac{\bar{A}.\bar{U}_{10}}{\bar{z}_o} \;;$$

$\bar{A}$ ir četrpola vienādojuma reizulis, kas simetriskā transformatora gadījumā ($\bar{z}_{1k} = \bar{z}_{2k}$ un $\bar{z}_{10} = \bar{z}_{20}$)

$$\bar{A} = \frac{\bar{z}_{10}}{\bar{z}_{10}-\bar{z}_{1k}} = \bar{D} \text{ pie kam } \bar{B} = \bar{A}.\bar{z}_{1k} \text{ un } \bar{C} = \frac{\bar{A}}{\bar{z}_{10}}$$

Ja nav simetrijas, tad $\bar{A} \neq \bar{D}$

$$\bar{A} = \frac{\bar{z}_{10}}{\bar{z}_{20}-\bar{z}_{2k}} = \frac{\bar{z}_{10}.\bar{z}_{2k}}{\bar{z}_{1k}(\bar{z}_{10}-\bar{z}_{1k})}$$

$$\bar{D} = \bar{A}\frac{\bar{z}_{2k}}{\bar{z}_{1k}} ; \quad \bar{B} = \bar{A}.\bar{z}_{2k} ; \quad \text{un } \bar{C} = \frac{A}{\bar{z}_{10}} ;$$

z_{2k} un z_{20} ir īsslēguma un dīkgaitas pretestības mērojot tās ja otrtinums pieslēgts barojošam tīklam. Transformatora īsslēguma gadījumā $z = 0$ un

$$J_{1k} = \frac{\bar{U}_1}{\bar{z}_1 + \frac{\bar{z}_o.\bar{z}_2.u^2}{\bar{z}_o.\bar{z}_2.u^2}} = \frac{\bar{U}_{10}}{\bar{z}_{1k}} = \frac{\bar{U}_{10}}{\bar{z}_1 + \frac{\bar{z}_o.\bar{z}_2'}{\bar{z}_o.\bar{z}_2'}} = \frac{\bar{U}_{10}(\bar{z}_o+\bar{z}_2')}{\bar{z}_o.\bar{z}_1+\bar{z}_o.\bar{z}_2'+\bar{z}_1.\bar{z}_2'} ;$$

Ja kādam transformatoram zināmi tā raksturīgie dati , t.i. r_1; x_1; $r_=$; x_2; r_o un x_o tad, pamatā liekot ekvivalentu šēmu, viegli attēlot transformatora darbību grafiski. Tāda grafika ļauj viegli pārredzēt mainīgo lielumu savstarpējo sakarību un tādēļ atļauj izdarīt dažus secinājumus attiecībā uz transformatora raksturīgo lielumu ietekmi uz transformatora darbību. Pielietojot maiņstrāvas teorijas likumus var uzzīmēt attiecīgu grafiku katram ekvivalentas šēmas slodzes gadījumam.

Pieņemta vispirms vienkāršotā šēma: (1.variants).

Zīm.35.

Ķēde sastāv no diviem paraleliem zariem, no kuriem viens ar konstantu pretestību z_c un otrs ar vienu konstantu pretestību $\bar{z}_1+\bar{z}_2$ saslēgtu virknē ar mainīgo pretestību z

Zīm.36.

Izvēloties pretestības mērogu m_1 Ω/mm atliek abscisu virzienā induktīvas pretestības x_1 un x_2, pieskaitot tām klāt aktīvo pretestību r_1+r_2 - ordinātu virzienā. Tādā veidā dabūtai vektoru sumai $\bar{z}_1+\bar{z}_2$ pieskaita klāt mainīgo pretestību z. Ja otrtinuma slodzes leņķis = φ_2 ; tad, z mainoties pēc lieluma atradīsies uz taisnes, kas iet caur $\bar{z}_1+\bar{z}_2$ vektora galu un ar ordinātu asi veido leņķi φ_2 . Induktīvas slodzes gadījumā φ_2 atliekam pulksteņa rādītāja griešanās virzienā. Lai varētu pieskaitīt paralelo zara vadamību, atrastā pretestību suma jāpārvērš vadamībā.

To izdara ar inversijas palīdzību, izvēloties attiecīgu vadamības mērogu m_2 s/mm.

Vadamības vektora gals slīd pa aploci, kas iet caur pretestības vektoru sākuma punktu un kuŗa caurmērs perpendikulārs pretestības z virzienam.

$$\bar{z}_1 + \bar{z}_2 = m_1 . \bar{O}A = \bar{r}_k$$

Gadījumam z = 0 ķēdes pretestība ir z_k un tās vadamība

$$\bar{y}_k = \frac{1}{\bar{z}_k} ;$$

$\bar{O}K = \frac{y_k}{m_2}$ un ar to viegli atrast arī inversijas aploces centru O_1.

$$\bar{O}O_1 = \frac{y_o}{m_2} = \frac{1}{z_o . m_2} ;$$

O_1K tādā gadījumā līdzināsies vadamības sumai y_{1k} īsslēgumā, bet OO_1 vadamībai dīkgaitā y_{10}.

Katrs cits vektors ar sākumu O_1 un galu uz aploces starp O un K līdzināsies vadamībai pie zināmas slodzes starp dīkgaitu un īsslēgumu. Tā pretestībai $z = m_1 . \bar{A}B$ atbilst kopējā vadamība O_1C.

Pieņemot, ka U_1 = const. vadamības zināmā mērogā $U_1 . m_2$ A/mm = m_3 uzskatāmas arī par strāvas vektoriem.

Leņķis starp ordināti un strāvas vektoru ir pirmtinuma strāvas leņķis φ_1. Līdz ar to

$$CD . m_3 = J_1 . \cos \varphi_1$$

ir mērogā $U_1 . m_3 = m_4$ mēraukla uzņemtai aktīvai jaudai N_1, kamēr

$$\bar{O}_1 D . m_4 = U_1 J_1 \sin \varphi_1 \quad \text{ir reaktīva jauda.}$$

Pielīdzinot OK = const. = U_1 var atrast U_2 kā

$$\bar{C}K . \frac{U_1}{\bar{O}K} = \bar{C}K . m_5 (\text{ tikai pēc lieluma }).$$

Apskatot OBA redzam, ka $\bar{O}B = \Sigma \bar{z}$

$$\bar{A}B = \bar{z}$$

$$\bar{O}A = \bar{z}_1 + \bar{z}$$

Pareizinot visus ar strāvu J = OP dabū ka

$$OB = U_1 = J . \Sigma z$$

$$AB = U_2 = Jz \text{ un}$$

$$CA = \text{sprieg. kritumam} = J(z_1 + z_2)$$

Ņemot vērā, ka OBA un OCK ir līdzīgi, jo tiem COA ir kopējs un

$$OB:OA = J\Sigma z:J(z_1+z_2) \text{ kā arī}$$

$$OK:OC = \frac{U_1}{z_1+z_2} : \frac{U_1}{\Sigma z} = \frac{1}{z_1+z_2} : \frac{1}{\Sigma z} = \Sigma z : \bar{z}_1+\bar{z}_2$$

Jāsecina ka

$$OK:OB = CK:AB \text{ jeb}$$

$$CK = \frac{OK}{OB} \cdot AB = \frac{m_5 U_1}{U_1} \cdot U_2 = m_5 \cdot U_2$$

kur m_5 atrodams kā

$$m_5 = \frac{U_1}{OK} \text{ v/mm}$$

Tālāk $EF = O_1O \dfrac{\cos\varphi_o}{\cos\varphi_2} = \dfrac{J_o\cos\varphi_o}{m_3\cos\varphi_2} = \dfrac{U_1J_o\cos\varphi_o}{U_1m_3\cos\varphi_2} = \dfrac{N_{Fe}}{m_6} = EF$

$N_{Fe} = m_6 \cdot \bar{E}\bar{F}$ (dīkgaitas zudumi=aktīvā jauda)

$N_2+N_{Cu} = m_6 \cdot CF$

$N_{Cu} = m_6 \cdot GF$

$N_2 = m_6 \cdot CG \qquad m_6 = U_1 \cdot \cos\varphi_2 \cdot m_3$

$$AB:HA = \frac{r}{\cos\varphi_2} : \frac{r_1+r_2}{\cos\varphi_2} = r:r_1+r_2 = CG:GF$$

Tā kā strāva cauri abām pretestībām ir tā pati, tad jauda sadalās proporcionālā pretestībai.

$$CG:GF = J^2r:J^2(r_1+r_2) = N_2:N_{cu}$$

Transformatora lietderības reizulis

$$\eta = \frac{N_2}{N_1} = \frac{CG}{CE}$$

$$CG = CS \frac{1}{\cos(90-\gamma)} = CM.\sin\beta \cdot \frac{1}{\cos(90-\gamma)} =$$

$$= CM \sin\beta \frac{1}{\sin\gamma}$$

$$CE = \frac{CD}{\cos\varphi_2} = CM\sin\lambda \cdot \frac{1}{\cos\varphi_2}$$

$$\frac{CG}{CE} = \frac{CM\sin\beta \cdot \cos\varphi_2}{CM\sin\lambda \cdot \sin\gamma} = \frac{\sin\beta \cdot \cos\varphi_2}{\sin(180-\lambda) \cdot \sin\gamma} =$$

$$= \frac{NP}{NM} \cdot \frac{\cos \varphi_2}{\sin \gamma} = NP. \frac{\cos \varphi_2}{NM.\sin \gamma} = NP\ const.$$

Pielīdzinot $\frac{NM.\sin \gamma}{\cos \varphi_2} = 100$ NP dabū tieši procentos.

Lai nevajadzētu aprēķināt sin γ un pārējos lielumus, tad aprēķina η kādam strāvas lielumam

$$\eta\% = \frac{CG}{CE}.100$$

un novelkot līniju paraleli NM horizontālā attālumā $\eta\%$, šķērsojumā punktā P dabū horizontālu lietderības reizuļa mērogu līniju. Nomērot no šķērsojuma punkta N līdz L 100 garuma vienību dabū visām pārējām slodzēm viegli nolasamo lietderības reizuļa skalu.

Pa lielākai daļai pārbaudi izdara jau gataviem transformatoriem, kādēļ izmērīti tiek

1) dīkgaitas strāva un jauda J_o un N_{Fe}

2) īsslēguma spriegums un jauda U_{1k} un N_{cu}

pieņemot, ka dīkgaitas strāva nav saistīta ar kautcik ievērojamiem zudumiem vados, un ka īsslēguma spriegums tik zems, ka indukcijas niecīgums nerada vērā ņemamus zudumus dzelzī.

Tādā gadījumā diagramas būvē ir vienkārša U_1 virzienu izvēles vertikalu $J_o = O_1O$ atliek mērogā m_3 A/mm zem leņķa

$$\varphi_o = \text{arc cos}\ \frac{N_{Fe}}{J_o U_{10}}$$

J_k = OK atliek mērogā m_3 zem leņķa

$$\varphi'_k = \text{arc cos}\ \frac{N_{cm}}{J.U_{1k}}$$

Pie kam J ir normāla transformatora strāva, bet

$$J_k = J.\frac{U_1}{U_{1k}}$$

pieņemot proporcionalitāti starp U_k un J_k. J_o galu apzīmē ar O un novelk aploces caurmēra līniju zem φ_2 pret horizontāli. Induktīvas otrtinuma slodzes gadījumam - pulksteņrādītāja kustības virzienā. Izdalot OK divās daļās un no vidus punkta novelkot statenisku līniju līdz šķērsojumam ar caurmēra līniju atrodam aploces centru. Tālāk būvē visas vajadzīgās palīglīnijas, kā jau apskatīts.

J_k pēc ekvivalentas šēmas būtības būtu bijis jāatliek kā O_1K, bet ņemot vērā, ka dīkgaitas strāvas lielums īsslēguma pārbaudē praktiski neievērojami niecīgs, pareizāki pieņemt, ka īsslēguma strāva nesatur magnetizēšanas strāvas komponenti.

OG-50
1941/aprīlī.

Transformators.

VEF transformators 72025 - 2475, trīs fāzu ar eļļas dzesēšanu.

50 kVA, 15000 ± 4%/400-231 V C_3 1,92/72,2 A

U_k = 4,3% ±10% 50 Hz

N_{Fe} = 425 w ± 10% N_{Cu} = 1350 w ±15% t_o = 18°C

	Dīkgaita			Īsslēgums t_o = 18°C		
	Mērrīka			Mērrīka		
	iedaļas λ	reizulis C	nolase	iedaļas λ	reizulis C	nolase
	80	15	1200 w	35	30	1050 w
	- 52	15	-780 "	1,4	45	63 "
N			420 w			1113 w
J_u			5,05A			73 A
J_v			5,20"			72,2 "
J_w			5,00"			73,3 "
J vidēji			5,45A			72,8 A
U_1			400 v			16,3 v
$\cos\varphi$	0,112		0,112	0,541		0,618
r	4,77Ω		4,775Ω	0,0701	$\left(\frac{309,5}{234,5+t_o}\right)$	0,086Ω
x	42,30"		42,3 "	0,109		0,109 "
z	42,6 "		42,6 "	0,130		0,139 "

$$\cos 1 = \frac{N}{U.J.\sqrt{3}} \qquad z = \frac{U_1}{J_1\sqrt{3}} = \frac{U_2'}{J_2'\sqrt{3}}$$

$$r = z\cos\varphi = \frac{N}{3.J_1^2} = \frac{N}{3.J_2'^2} \qquad x = \sqrt{z^2 - r^2}$$

$$U_k\% = \frac{U_k}{U}.100 = \frac{16,3.100}{400} = 4,08\%$$

$$\varphi_r\% = \frac{J_1.r_k\sqrt{3}}{U_1}.100 = \frac{72,2.0,0701\sqrt{3}}{400.0,01} = 2,19\%$$

$$u = \frac{U_1}{U_2} = \frac{15000}{400} = 37,5 \qquad u^2 = 37,5^2 = 1407$$

$$r_{75} = r_{18}\frac{309,5}{234,5+t_o} = 0,071\frac{309}{234,5+18} = 0,086\Omega$$

OG-50
1941/aprīlī.

$$U^{\%}_{k\,75} = U^{\%}_{k\,18^o}\ \frac{z_{75^o}}{z_{18^o}} = 4{,}08 \cdot \frac{0{,}139}{0{,}130} = 4{,}36\%$$

$$\varepsilon^{\%}_{r\,75^o} = \varepsilon^{\%}_{r\,18^o}\ \frac{r_{75^o}}{r_{18^o}} = 2{,}19 \cdot \frac{0{,}086}{0{,}070} = 2{,}69\%$$

$$N_{k\,75^o} = N_{k\,18^o}\ \frac{r_{k\,75^o}}{r_{k\,18^o}} = 1113 \cdot \frac{0{,}086}{0{,}070} = \underline{1365\ w}$$

<u>Transformatora diagrama.</u>

Zīm.37.

Mērogs:

$$m_{1z} = 0{,}001\ \Omega/mm$$

$$r_k = 0{,}086 : 0{,}001 = 86\ mm$$

$$x_k = \frac{0{,}109}{0{,}001} = 109\ mm \qquad z_k = \frac{0{,}139}{0{,}001} = 139\ mm$$

Mērogs:

$$m_{1y} = 0{,}05\ s/mm$$

$$y_k = \frac{1}{0{,}139 \cdot 0{,}05} = 144\ mm \qquad b_k = \frac{x_k}{z_k^2} = -\frac{0{,}109}{0{,}139^2 \cdot 0{,}05} = \frac{5{,}65}{0{,}05} = 113\ mm$$

pieņemot $r_k = 0$ $z_k = x_k$ un tādā gadījumā:

$$y_k = \frac{1}{x_k} = \frac{1}{0{,}109 \cdot 0{,}05} = 184\ m/m$$ - vadamības apļa caurmērs.

$$y_o = \frac{1}{42{,}6 \cdot 0{,}05} = 0{,}47\ mm \qquad b_o = \frac{x_o}{z_o^2} = \frac{42{,}3}{42{,}6^2 \cdot 0{,}05}\ \frac{0{,}0232}{0{,}05} =$$

$$= 0{,}465\ m/m$$

Mērogs:

$$m_{1J} = \frac{5{,}42}{0{,}470} = 11{,}5\ A/mm$$

$$g_o = \frac{r_o}{z_o^2} = \frac{4{,}77}{42{,}6^2 \cdot 0{,}05} = 0{,}0525\ mm$$

Zīm.38.

Pieņemam:

$$z_1 = z_2 = 0{,}5\ z_k = 0{,}5 \cdot 0{,}139 = 0{,}0695\ \Omega$$

Mērogs:

$$m_{1z} = 0{,}0005\ \Omega/mm$$

$r_2 = 0{,}043 : 0{,}0005 = 86$ mm/ ; $x_2 = \frac{0{,}0545}{0{,}0005} = 109$ mm/

$$z_2 = \frac{0{,}0695}{0{,}0005} = 139 \text{ m/m } (1390 \text{ m/m})$$

Mērogs:

$$m_{1y} = 0{,}1 \text{ s/mm}$$

$$y_2 = \frac{1}{0{,}0695.0{,}1} = 144 \text{ mm } (1440 \text{ mm })$$

$$y_o = \frac{1}{42{,}6.0{,}1} = 0{,}235 \text{ mm } (2{,}35 \text{ mm})$$

$$g_o = \frac{0{,}00263}{0{,}1} = 0{,}0263 \text{ mm}(0{,}263 \text{ mm})$$

$$b_o = \frac{r_o}{z_o^2} = \frac{42{,}3}{42{,}6^2.0{,}1} = 0{,}232 \text{ mm } (2{,}32\text{mm})$$

Mērogs: $m_{rz} = \frac{42{,}6}{183} = 0{,}233\ \Omega/\text{mm } (0{,}0233 \text{ mm})$

$$r_1 = \frac{0{,}043}{0{,}233} = 0{,}185 \text{ mm } (1{,}85 \text{ mm})$$

$$x_1 = \frac{0{,}0545}{0{,}233} = 0{,}234 \text{ mm } (2{,}34 \text{ mm })$$

Mērogs:

$$m_{2J} = 5{,}42 : \sqrt{(0{,}234+0{,}232)^2+0{,}0263^2} = 11{,}5 \text{ A/mm}$$

Zīm.39.,40.

Transformators.

Ekvivalenta ķēde II.

Teoretiski pieturoties tieši pēc šēmas un pieņemot z_o = const. diagramu var uzbūvēt šādi: zinot J_o un J_{kn_1} var uzbūvēt darbības diagramu. Zinēmā strāvas mērogā m_J a/mm no punkta O velkam taisnes $J_o : m_J$ un $J_{kn_1} : m_J$ garumā ņemot vērā ∠ kus φ_o un φ_k pret spriegumu U_1, kuŗa virzienu pieņemam vertikālu uz augšu. Savienojam J_o un J_{kn} vektoru gala punktus O''' un k ar taisni. Taisnes viduspunktā velkam statenisku taisni uz kuŗas jāatrodas strāvas diagramas apļa centram. Lai atrastu apļa horizontālā caurmēra kādu punktu no pola O izejot atliekam kaut kādā mērogā z_1

un z_o ievērojot ∡-ķus. Savienojot $\bar{z}_1+\bar{z}_o$ kopējās pretestības gala punktu ar polu O, krustojumā ar veritikāli caur J_o gala punktu atrodam meklējamā horizontālā caurmēra vienu punktu O_1. Horizontāles O_1O_c un stateniskos pret $\bar{J}_o-\bar{J}_k$ taisnes krustošanās punkts ir apļa centrs O_c.

Ņemot vērā samērā pret slodzi mazās dīkgaitas strāvas J_o un mazās iekšējās pretestības z_1 un z_2 ar praksei pietiekošu pareizību varam lietot I veida ekvivalentas ķēdes. Piemēram 50 kVA transformatora apļa caurmērs sasniedz 1800 mm/ kamēr J_o = 5 mm/. Līdz ar to darbības joslā J_2^1 pie $\cos\varphi_2=1$ ir gandrīz paralela ar U_1 t.i. uzskatāma gandrīz par pieskari strāvas diagramas aplim.
Ja $\cos\varphi_2 \neq 1$ tad leņķis starp U_1 un J_2 gandrīz līdzīgs ∡-φ_2. Praktiski būtu labāk J_{kn_1} atlikt no O_1 gala

Zīm.41.

Transformators.

Apskatīsim kāda ietekme ir dažiem raksturīgiem lielumiem.

1.gadījums $U_1 = 231$ $\bar{z}_o = 5+j.40$ $\bar{z}_k = 0,1+j4$

$$\bar{J}_o = \frac{\bar{U}_1}{\bar{z}_o} = \frac{231}{5+j.40} = \frac{231(5-j.40)}{25+1600} = 0,71-j.5,7 = 5,75\ A/\measuredangle{-83^o}$$

$$J_k = \frac{\bar{U}_1}{\bar{z}_k} = \frac{231}{0,1+j.4} = \frac{231(0,1-j.4)}{0,01+16} = 2,31-j.57,8 = 57,9\ A/\measuredangle{-87^o40'}$$

seko diagramma II

Zīm.42.

$N_{Fe} = J_o^2 r_o = 5,75^2.5,0 = 167w$

$N_{Cu} = J_n^2 r_k = 45,0^2.0,1 = 203w$

Pieņemot par normālu strāvu $J_n = 45$ A/ kas apmēram atbilst maksimālai atdotai jaudai

$N_{zud} = J_n^2 r_k + J_o^2 r_o = 203+167 = 370$ w/

$N_{max} = J_{n\ max} U_1 = 29,7.231 = 6860$ w/ (no diagramas).

$$\eta = \frac{6860-370}{6860} = 0,946$$

OG-50
1941/aprīlī.

Redzam, ka strādājot ar maksimālo jaudu, lietderības reizulis vēl ļoti labs. Pat īsslēguma zudumi tikai nedaudz pieaug, jo strāvas lielumu ierobežo liela izkliede

$$N_k = J_{2k}^2 r_k + J_o^2 r_o = 63{,}6^2.0{,}1+167 = 403+167 = 570\ w/$$

$$J_{1k} = J_o + J_{2k} = 2{,}31-j.57{,}8+0{,}71-j.5{,}7 = 3{,}02-j.63{,}5 = 63{,}6 \angle -87^o20'$$

Transformators tā tad uzskatāms par īsslēguma drošu.

Kā ir ar sprieguma kritumu?

Pieņemot maximālās jaudas darba stāvokli par normālu (atdotās jaudas maximums)

$$J_{1\,norm} = 45{,}3A/ = 29{,}7-j.34{,}3 = 45{,}3\ a/\angle -49^o10'$$

$$J_{2\,n} = J_{1\,n} - J_o = 29{,}7-j.34{,}3-0{,}71+j.5{,}7 = 29-j.28{,}6\ a/$$

$$U_k^{\%} = \frac{J_{1n}.z_k}{U_1}.100 = \frac{45{,}3.3{,}63}{231}.100 = 71{,}3\%$$

$$z_k = \frac{U_1}{J_{k1}} = \frac{231}{63{,}6} = 3{,}63\,\Omega = \frac{231}{3{,}02-j63{,}5} = 0{,}173+j3{,}62$$

$$\varepsilon_r = \frac{J_{1n} r_k}{U_1}.100 = \frac{45{,}3.0{,}173}{231}.100 = 3{,}39\%$$

$$\varepsilon^{\%} \approx \varepsilon_r + 0{,}005\,\varepsilon_x^2 = 3{,}39 + 0{,}005\,(U_k^{\%2} - e_r^{\%2}) =$$

$$= 3{,}39 + 0{,}005(71{,}3^2 - 3{,}39^2) = 28{,}89\%$$

Šinī gadījumā būtu bijis jāņem vērā lielais nobīdnes leņķis. Redzam, ka īsslēguma drošība iegūta uz sprieguma krituma rēķina. Tāda veida transformatori normālajos apstākļos neder, jo kvēlspuldzes un motori labi un racionāli darbojas tikai pie konstanta sprieguma.

Arī $\cos\varphi$ ir slikts - lielās induktīvās pretestības dēļ. Tas savukārt nelietderīgi noslogo pievadus. Samazinot tikai izkliedi līdz spēka transformatoru parastajai robežai ($U_k \approx 5{,}5\%$) ar to pašu tinumu pretestību normālo darba jaudu varētu palielināt uz 1500 w/ pie $\cos\varphi = 1$ jeb 15 kVA kā parasti mēdz apzīmēt maiņstrāvas mašīnu jaudu. Apskatot kritiski darba diagramu var redzēt kādu ietekmi atstāj raksturīgo lielumu maiņa.

Ja samazinam 1) r_k - samazinājas 1) zudumi 2) sprieguma kritums 3) $\cos\varphi$; palielinājas 1) mac. jauda.

2) " - " - " -: x_k - samazinājas 1) izkliede 2) sprieguma kritums; palielinājas 1) $\cos\varphi$ 2) mac jauda 3) īsslēguma strāva.

03-80
1941/aprīlī.

3) cos φ; palielinājas

r_o - samazinājas 1) dīkgaitas zudumi 2) cos φ;
palielinājas 1) max jauda

4) " - " - " -:

x_o - samazinājas 1) izkliede;
palielinājas 1) cos φ.

Transformatora serde (Magnetiskā ķēde).
Būvei lieto speciālo transformatoru skārdu, lai zudumi būtu pēc iespējas mazāki.

Zudumi sastādas no histerēzes un virpuļstrāvu patērētās energijas serdi pārmagnetižējot $N_{Fe} = N_h + N_f$

Lietojamo skārdu parasti raksturo ar zudumiem noteiktos darba apstākļos

$$f = 50 \text{ Hz}; \; B_{max} = 10000 \text{ G} \; (f = 50 \text{ Hz}; \; B_{max} = 15000 \text{ G})$$

$$N_h = \lambda \cdot \frac{f}{100} \cdot \frac{B_{max}}{10000} + \beta \frac{f}{100} \left(\frac{B_{max}}{10000} \right)^2 \text{ w/kg}$$

Starp 10000-160000 G var lietot vienkāršotu formulu

$$N_h = \varepsilon_h \frac{f}{100} \left(\frac{B_{max}}{10000} \right)^2 \text{ w/kg}$$

λ, β un ε_h - materiāla raksturskaitļi.

Zīm.43.

Pa lielākai daļai piemaisījumi skārda magnetiskās īpašības pasliktinā. Izņēmums ir Si, kas magnetiskās īpašības uzlabo, pārvēršot C - grafitā un izspiežot no tērauda skābekli. Si piemaisījums palielina īpatnējo pretestību, samazinot ar to virpuļstrāvas zudumus. μ līdz indukcijai 10000 G palielinājās ar Si satura pieaugumu. Štancējot, velmējot, griežot, dauzot - magnetiskās īpašības tiek pasliktinātas - histerēzes zudumi pieaug. Novērst var ar termisko apstrādi. Sasildīt līdz 800°C un lēni pēc noteikta režima atdzesēt. Praktiski var pieņemt ka N_h pieaug par $\frac{350}{b}$ %

kur b mm = štancēta vai sagriesta skārda platums. Arī slīpēšana zudumus palielina, kaut gan mazāk nekā štancēšana (≈50%). Velmēšanas virzienā μ lielāks (15%-25%) un zudumi N_h - mazāki (8-15%) nekā šķērsvirzienā.

	Si %	C %	kz k/mm²	$\frac{\Delta l}{l}$ %	λ	β	σ_h	σ_f	σ Fe Δ=0,5mm f=50Hz
Dinamo-skārds	1	0,08	3000	18	0,9	3,5	4,5	20	3,5
Transf. skārds	4	0,06	5500	3	0,4	2,5	3	5	1,8
Transf. spec.	4,5	0,05	6000	2,5	-	-	2,2	3	1,3

Normālus spēka transformatorus projektējot, jārēķinājas, ar skārda zudumu pieaugumu no 5÷15% atkarībā no apstrādes. Darbā zudumi ar laiku var pieaugt - skārds novecojas. Labam skārdam zudumu pieaugums 1-2%, sliktam līdz 10%. Labai seržu izveidošanai nepieciešams, lai skārds būtu līdzens. Tikai tad var sasniegt labu pildfaktoru, labas šuves ar mazu izkliedi un klusu darbu, bez pārmērīgas - dārgi maksājošas, serdes saspiešanas.

Si saturs skārdu padara cietāku un trauslāku, kādēļ skārdi ar lielu Si saturu griežami un štancējami ar speciāla tērauda rīkiem.

Virpuļstrāvas zudumi dzelzs serdēs N_f

$$N_f = \sigma_f \left(\Delta \frac{f}{100} \cdot \frac{B}{10000}\right)^2 \text{ w/kg}$$

Δ mm - skārda biezums (lieto 1,0 ; 0,75; 0,5 un 0,35 mm)

σ_f = konst. $\frac{1}{\rho}$ materiāla raksturskaitlis atkarīgs no īpatn. pretestības.

	Δ mm	ρ	σ_f	σ_h	σ Fe
Armco	0,5	0,70	1,8	2,6	1,1
ЕЭН	0,5	0,60	2,2	3,0	1,3
Cap& Kl	0,35	0,75	1,6	2,4	0,9

OG-50
1941/aprīlī.

Noteiktam skārda biezumam un noteiktai frekvencei (=0,5 mm ; f = 50 Hz)

$$N_{Fe} = \varepsilon_{Fe}\left(\frac{B}{10000}\right)^n \text{ w/kg kur } n = 2 \div 2{,}4$$

Lai zudumi būtu iespējami mazāki un materiālu izlietošana pilnīgāka, labākais serdes izgatavošanas veids būtu šāds:

1) neizolēta skārda sagriešana velmēšanas virzienā,
2) radušos asumu noslīpēšana vai atspiešana,
3) skārda atkvēlināšana un iztaisnošana,
4) skārda pārklāšana ar abpusēju izolācijas kārtu,
5) skārda pakas laba sastādīšana un saspiešana ar iespējami mazām starpām skārda sadurvietās un iespējami maza skaita, bet labi izolētu caurejošām saspiedējbultām.

Skārda izolācijai lieto vairākus paņēmienus.

1) Oksids, divās kārtās, kas skārda biezumu palielina par 0,01 - 0,02 mm,
2) papīrs, vienā kārtā - skārda biezumu palielina par 0,03 - 0,05 mm,
3) laka, vienā vai divās kārtās biezumu palielina par 0,15 - 0,03 mm.

Effektīvais dzelzs šķērsgriezums, līdz ar izolācijas kārtas biezumu samazinājas. Jāņem vēl vērā, ka bez izolācijas effektīvu šķērsgriezumu samazina vēl arī gaisa starpas. Jo nelīdzenāks skārds, jo lielākas būs arī gaisa starpas. Normāli gludam skārdam gaisa starpas ir apm.0,015÷0,03 mm lielas. Līdz ar to serdes efektīvais šķērsgriezums 0,5 mm biezam skārdam svārstas starp 0,88 ÷ 0,93 no izmērīta šķērsgriezuma. Skārda īpašības parasti tiek raksturotas ar līknēm

1) $B = F(H)$
2) $\mu = F(H)$
3) $N_{Fe} = F(B)$; $F(\Delta)$; $F(f)$

Līknes parasti saņem no izgatavotājas - rūpnīcas, kas parasti gan garantē tikai atsevišķus punktus. Piemēram:

1) zudums pie f = 50 Hz ; B = 10000G ; un B = 15000 G
2) Indukciju pie H = 25 Aw/cm un H = 100 Aw/cm (vai H = 50 Aw/cm, H = 300 Aw/cm).

Ir uzstādītas normas: Savienībā ЈОСТ . ОСТ
Vācijā: DIN -VDE
kas sīkāk definē nepieciešamas īpašības, garantējamas vērtības un tolerances elektrotechnikas skārdiem. Līknes:

Magnetiskas ķēdes likums.

Līdzīgi elektriskās ķēdes oma likumam, arī magnētiskai ķēdei plūsmas lielums atkarīgs no magnetodzinējspēka Mds un ķēdes pretestības.

$$\emptyset = \frac{V}{R} = \frac{i.w}{\frac{l}{0{,}4\pi\,\mu.F}} = \frac{0{,}4\pi i.w}{l}.\mu.F = H.\mu.F = BF$$

$$i.w = \frac{1}{0{,}4\,\pi}.H.l \cong 0{,}8\,Hl$$

Zīm.44.

Likums matemātiskā vispārējā veidā

$$V_o = \int_{\emptyset} H_l.dl = 0{,}4\pi \sum_o i = 0{,}4\pi\, i.w$$

Noslēgtas ķēdes magnetodzinējspēks V_o līdzinas darbam, kuru padara magnetiskā lauka H_l spēki dzenot magnetiskas masas vienību pa ķēdes apzīmēto ceļu līdz konturs noslēdzas. Mds savukārt līdzinas $0{,}4\pi$ reizinājumam ar kontūrām caurplūstošo strāvu algebraisko sumai.

H - mēri Oerstedos (Θ) (Magn.gradients)

i - amperos (A) $1\ \Theta = 0{,}8\ Aw/cm = \frac{Aw/cm}{0{,}4\pi} = \frac{Gb}{cm}$

l - centimetros (cm)

F - (cm^2)

V - gilbertos (Gb) $1\ Gb = 0{,}8\ Aw = \frac{Aw}{0{,}4\pi} = \Theta\ cm$

$\int_o H_l.dl$ konstanta H_l gadījumā pārvēršas par

$$H_l \int_o dl = H_l.l$$

Tā tad magnetiskās ķēdes dalam ar pastāvīgo vai par konstantu pieņemamu magnetisku lauku, vai magnetisko indukciju

$\int_o H_l.dl$ varam atvietot ar

$$\sum_1^n (H_x.l_x) = H_1 l_1 + H_2 l_2 + \ldots\ldots + H_n l_n$$

$$B = \mu.H \qquad H = \frac{B}{\mu} \qquad i.w = 0{,}8\,\frac{B}{\mu}.l$$

Gaisam un lielākai daļai vielu μ praktiski 1, kādēļ

$$i.w = 0{,}8.B.1$$

Dzelzij, tās kausējumiem un dažām magnetiskām vielām (Ni,Co) μ ir mainīgs lielums, kas atkarīgs no magnetizējošā lauka stipruma.

Praksē tādēļ lieto šim t.s. ferromagnetiskajām vielām līknes, kas ļauj katrai attiecīgai vielai noteikt Aw skaitu uz 1 cm vēlamai magnetiskai indukcijai B.

/ līknes /

Mašīnas vai aparāta magnetisko ķēdi vienmēr būs iespējams sadalīt tādos posmos, kuŗos B $\cong$ konst. lielumam, tādā gadījumā varam noteikt katram posmam vajadzīgo Aw vai Gb skaitu. Saskaitot atrastos magnetiskās ķēdes posmus Aw vai Gb kopā, dabūjam nepieciešamo Mds visai ķēdei.

$$i.w = 0{,}8\sum_1^n (H_x.l_x) \text{ Aw}/$$

$$V_o = \sum_1^n (H_x.l_x)\text{Gb}/ = 1{,}256.i.w$$

B izvēle atsevišķām magnetiskās ķēdes daļām, minimāliem zudumiem N_{Fe}

Zīm. 45.

Dzelzs svars G = konstants = G_1+G_2

$$G_1 = l_1F_1\gamma \qquad G_2 = l_2F_2\gamma$$

$$N_{Fe} = \zeta_{Fe}/(\frac{B_1}{10000})^2 G_1+(\frac{B_2^2}{10000})G_2/ =$$

$$= \frac{\zeta_{Fe}\cdot\gamma}{10^8}/B_1^2l_1F_1+B_2^2l_2F_2/ = \frac{\zeta_{Fe}\cdot\gamma}{10^8}(B_1^2\frac{\emptyset_1}{B_1}l_1+B_2^2\frac{\emptyset_1}{B_2}l_2) =$$

$$= \frac{\zeta_{Fe}\cdot\gamma\cdot\emptyset_1}{10^8}(B_1l_1+B_2l_2) = K(B_1l_1+B_2l_2) = N_{Fe}$$

$$\emptyset_1 = \emptyset_2 = \text{const.}$$

$$B_1F_1 = \emptyset_1$$

$$B_2F_2 = \emptyset_2 = \emptyset_1$$

$$\frac{\gamma\emptyset_1l_1}{B_1} + \frac{\gamma\emptyset_1l_2}{B_2} = G$$

$$\frac{l_1}{B_1}+\frac{l_2}{B_2} = \frac{G}{\emptyset_1} \quad \text{t.i.}$$

$$\frac{l_1}{B_1} = \frac{l_2}{B_2} = C$$

Apzīmējot ar K un C konstantus lielumus kas nav atkarīgi no B_1 un B_2 attiecības, dabonam divus vienādojumus, kuŗus apvienojot var atrast noteikumu minimāliem zudumiem dzelzī.

Atvasinam jaunu vienādojumu

$$F = K(B_1l_1+B_2l_2)+\lambda(\frac{l_1}{B_1} + \frac{l_2}{B_2} - C)$$

OG-50
1941/aprīlī.

un pielīdzinam tā daļējos atvasinātos nullei.

$$\frac{\partial F}{\partial B_1} = K.l_1 - \frac{\lambda l_1}{B_1^2} = 0 = K - \frac{\lambda}{B_1^2}$$

$$\frac{\partial F}{\partial B_2} = K.l_2 - \frac{\lambda l_2}{B_2^2} = 0 = K - \frac{\lambda}{B_2^2}$$

Abi atvasinātie vienādojumi kopā dod atrisinājumu

$$B_1 = B_2$$

Rezultāts neatkarīgs no garumiem vai citiem ķēdes lielumiem. Parasti gan transformatoros ķēdes beztinuma daļai (serdēm bez tinuma un jūgiem) izvēlas mazliet mazāku indukciju. Ar to panāk mazāku vijumu garumu un līdz ar to arī mazākus izdevumus tinumiem, kā arī mazākus zudumus tinumos.

Ņemot vērā, ka maksimuma vietā zudumu līkne ļoti lēzena, indukcijas (B) samazināšana jūgā nav saistīta ar jūtamiem zudumu pieaugumiem. Līdz ar Bj samazināšanu samazinās arī magnetizējošā strāva, kā tas no turpmākā redzams. Bj samazinājums parasti turas robežās starp 0,8-0,9 Bs.

Transformatoru serdes sadala divos pamata tipos:

1) seržu tipā
2) apvalka tipā.

Transformatora serde (magnetiskā ķēdē).
Transformatora magnetizējošās strāvas aprēķins.

$$J_o = \sqrt{J_{o\,a}^2 + J_{o\,i}^2} \; ; \quad J_{o\,a} = \frac{N_o}{E_1} \approx \frac{N_o}{U_1} = \frac{\sum N_{Fe} \cdot G_{Fe}}{U_1}$$

kur N_{Fe} = dzelzs zudumu jauda vienai svara vienībai (w/kg)
G_{Fe} attiecīgas aktīvas dzelzs svars (kg)

Jāņem vērā, ka bez zudumiem serdē var būt vēl citi nevēlami zudumi. piem. mechaniskai uzbūvei vajadzīgos dzelzs materiālos (bultās, apvalkā, jūgā u.t.t.).

$J_{o\,i}$ aprēķins izdarāms izejot no magnetiskās ķēdes datiem

$$i.w = 0{,}8 \sum_1^n H_x . l_x \text{ un } i.w = 0{,}8 \sum_1^n \frac{B_x}{\mu_x} . l_x$$

$$i = \frac{0{,}8 \sum_1^n \frac{B_x}{\mu_x} . l_x}{w} \; ;$$