

1725213

1725213

**OVOJNI KRATKI STIK PRI
TRIFAZNEM TRANSFORMATORJU**

Ing. Anton Ogorelec



Ljubljana, julija 1956

dopolnjeno aprila 1957

D 262674

|| 262674



0 33/1976

V s e b i n a

stran

Uvod	1
Impedance trifaznega transformatorja	4
Določitev nadomestnih vezij, tokov in nspetosti za primer ovojnega stika v transformatorjih raz- nih vezav	14
Izračuni reaktanc pozitivnega in sefaznega zape- redja	52
Meritve reaktanc na preskusnem transformatorju	86
Pregled sprememb razmer pri ovojnem kratkem stiku v primeru, da predpostavke našete v drugem poglavju niso izpolnjene	105
Uporabljena literatura	

Kratki stik med ovoji navitja nastopa izmed težjih okvar pri transformatorjih najpogosteje.

Vzrok stika med ovoji je običajno preobremenjenost izolacije. Preobremenjenost izolacije, ki ima za posledico zrušitev izolacijske sposobnosti navitja, je lahko električna (atmosferske in druge prenapetosti), dinamična (pri zunajnih kratkih stikih) ali pa termična. Lahko pa so vzroki tudi drugi n.pr. napaka v materialu, konstrukciji ali pa v izvedbi.

Ker se nastopom okvar ne moremo izogniti, je potrebno, da so vsaj posledice okvare čim manjše. Posledice kratkega stika so namreč zelo različne. V kolikor zaščita takoj po nastopu okvare loči transformator od vira napajanja, je posledica kratkega stika med ovoji pogosto le nekaj ožganih ovojev. V kolikor pa ostane transformator, v katerem je nastopil ovojni stik, še dalje napajan, se ovojni stik pogosto razširi na celotno navitje ene faze. To pa ima za posledico uničenje navitja ene ali pa celo vseh treh faz, lahko pa pride tudi do razdejanja celega transformatorja.

Za pravilno izvedbo zaščite je vsekakor potrebno dobro poznati razmere, ki pri ovojnem stiku nastopijo. Pri projektu kakršnekoli zaščite električnih strojev moramo namreč poleg dobrega poznavanja lastnosti samega zaščitenege stroja v normalnem obratovanju poznati tudi razmere, ki nastopijo v primeru okvare v samem zaščitnem stroju. Le na ta način namreč lahko določimo najustreznejšo zaščito.

Zanimivo je, da so zelo skrbno raziskane pri električnih strojih le razmere pri normalnem obratovanju, dosti slabše pa so obdelane razmere pri nenormalnih pogonskih prilikah, skoraj popolnoma neraziskane pa so razmere, ki nastopajo v primeru okvare v samem električnem stroju.

Ker je avtor kot projektant zaščitnih naprav čutil to vrzel,

si je zadal nalogo, da v okviru tega dela vsaj delno osvetli tudi to področje. V delu samem se bomo omejili predvsem na proučevanje tokov in napetosti, ki spremljajo nastop ovojne- ga stika v transformatorju. Termičnih in dinamičnih posledic ovojnih stikov ne bomo obravnavali. Mejne obremenitve navit- ja, tako termične kot mehanske, ki jih navitje še vzdrži, so namreč v literaturi pogosto obravnavane.

Vsak ovojni stik ima kot vsaka druga okvara dosti močno indi- vidualnih potez. Na razmere pri ovojnem stiku upliva namreč vrsta raznih činiteljev. To pa ima za posledico veliko števi- lo možnih variant. Kljub temu bomo skušali z obravnavo posa- meznih važnejših činiteljev podati dovolj jasen vpogled v raz- mere pri ovojnem stiku.

Delo je razdeljeno na 5 delov:

V prvem delu je obdelana zveza med lastnimi in medsebojnimi impedancami posameznih navitij trifaznega transformatorja na eni strani ter med impedancami simetričnih zaporedij na dru- gi strani.

V drugem delu so obravnavana nadomestna vezja, s pomočjo njih pa so določeni toki in napetosti, ki nastopijo pri stiku med ovoji trifaznega transformatorja. Pri tej obravnavi so uporab- ljene nekatere predpostavke. Najvažnejša predpostavka je, da je transformator ograjen simetrično z ozirom na vse tri faze. Ker upliva na razmere pri ovojnem kratkem stiku bistveno tu- di vezava transformatorja, so obdelana nadomestna vezja za vse važnejše vezave transformatorjev.

Za določitev vrednosti tokov in napetosti pri ovojnem kratkem stiku je potrebno poznati vrsto raznih impedanc. Zato so v tretjem delu podani izračuni važnejših, za določitev tokov pri ovojnem stiku potrebnih reaktanc.

V četrtem delu so podani rezultati meritev na posebnem, v ta

namen izdelanem transformatorju. V tem delu je dalje tudi izvedena primerjava izmerjenih in izračunanih rezultatov. Ob koncu je podanih še nekaj zaključnih misli in ugotovitev o dobljenih rezultatih in o v delu uporabljenih poenostavitvah in predpostavkah.

IMPEDANCE TRIFAZNEGA TRANSFORMATORJA

Predno pristopimo k obravnavanju nadomestnih vezij za ovojni stik v transformatorju si oglejmo impedance, ki jih bomo rabili v poznejših izvajanjih.

Če hočemo podati z nadomestno vezavo nesimetrični trifazni transformator s primarnim in sekundarnim navitjem na vsakem stebri, torej skupno 6 navitij, potrebujemo po znanem pravilu $(n^2 + n) : 2 = (6^2 + 6) : 2 = 21$ impedanc, in sicer potrebujemo 6 lastnih in 15 medsebojnih impedanc. Število teh impedanc se zniža na 13 v primeru, če predpostavimo, da je transformator grajen simetrično z ozirom na srednji steber. Taka predpostavka je običajno dopustna, saj nastopajo nesimetrije med stranskima stebroma običajno le zaradi nenatančnosti pri izdelavi oziroma zaradi razlik v uporabljenem materialu. Seveda pa so zaradi tega nastopajoče nesimetrije običajno zanemarljive.

Če je transformator grajen simetrično z ozirom na vse 3 stebre (n.pr. tempeljska izvedba trifaznega transformatorja), se število potrebnih impedanc zniža na 6. Seveda pri običajnih transformatorjih ni izpolnjen ta pogoj. Ker pa prinaša taka poenostavitev dosti lažjo obravnavo vseh problemov, običajno zane- marimo nesimetrije med stebri in obravnavamo trifazni transformator kot da je grajen simetrično z ozirom na vse tri stebre. V kolikor pa je potrebno upoštevati nesimetrijo, običajno naknadno korigiramo rezultate z upoštevanjem napak, ki smo jih s tako poenostavitvijo povzročili.

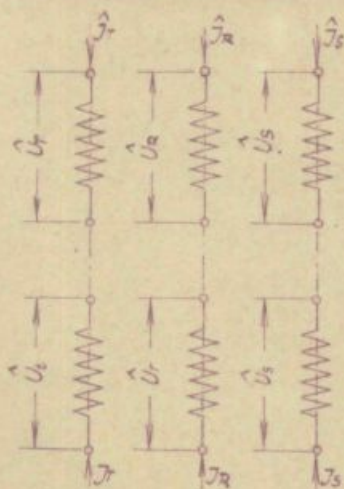
Izračuni okvar in nesimetrij v trifaznih sistemih se sedaj v glavnem izvajajo z uporabo simetričnih komponent. V ta namen se navajajo za transformatorje običajno le 3 impedance, ki so potrebne za izračun kratkih stikov izven transformatorja. Te so: impedanca praznega teka in impedanca kratkega stika pozitivnega zaporedja ter impedanca praznega teka sofaznega zapo-

redja.

Za točno določitev razmer pri simetrično grajenem transformatorju pa kot že omenjeno potrebujemo 6 različnih impedanc n. pr. za pozitivno zaporedje 3, za sofazno zaporedje pa prav tako 3. Ker so razlike med impedancami praznega teka visokonapetostnega in impedancami praznega teka niskonapetostnega navitja pozitivnega kot tudi sofaznega zaporedja običajno majhne, se navaja zato namesto obeh vrednosti le njuna srednja vrednost. Prav tako ni pri običajnih izvedbah transformatorjev večjih razlik med impedanco kratkega stika pozitivnega in med impedanco kratkega stika sofaznega zaporedja. Če upoštevamo te predpostavke, zadoščajo za nadomestno vezavo simetrično grajenega transformatorja le 3 impedance.

Kot je pri izračunih kratkih stikih običajno, bomo v nadaljnjih izvajanjih predpostavili, da je rektanca praznega teka pozitivnega zaporedja transformatorja razmeroma zelo visoka in da jo zato v primeru z drugimi impedancami lahko zanemarimo.

Ker bomo obravnavali nadomestna vezja z uporabo simetričnih komponent, si oglejmo zvezo med lastnimi in medsebojnimi impedancami posameznih navitij na eni strani ter med impedancami vseh treh simetričnih zaporedij na drugi strani.



Slika 1

Pri trifaznem transformatorju s primarnim in sekundarnim navitjem na vsakem stebru imamo 6 različnih tokokrogov (sl.1). Zvezo med napetostmi U na posameznih navitjih in toki J v njih dobimo v naslednji enačbi:

$$\begin{pmatrix} U_R \\ U_S \\ U_T \\ U_r \\ U_s \\ U_t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{RR} & -Z_{RS} & -Z_{RT} & -Z_{Rr} & Z_{Rs} & Z_{Rt} \\ -Z_{SR} & Z_{SS} & -Z_{ST} & Z_{Sr} & -Z_{Ss} & Z_{St} \\ -Z_{TR} & -Z_{TS} & Z_{TT} & Z_{Tr} & Z_{Ts} & -Z_{Tt} \\ Z_{rR} & -Z_{rs} & -Z_{rt} & Z_{rr} & Z_{rs} & Z_{rt} \\ -Z_{sR} & Z_{ss} & -Z_{st} & Z_{sr} & -Z_{ss} & Z_{st} \\ -Z_{tR} & -Z_{ts} & Z_{tt} & Z_{tr} & Z_{ts} & -Z_{tt} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} J_R \\ J_S \\ J_T \\ J_r \\ J_s \\ J_t \end{pmatrix} \quad (1)$$

S simboli Z_{nn} oz. Z_{m_n} so v gornji enačbi označene lastne oz. medsebojne impedance med posameznimi navitji. Ker velja, da je $Z_{m_n} = Z_{n_m}$, je kvadratična matrika impedanc simetrična.

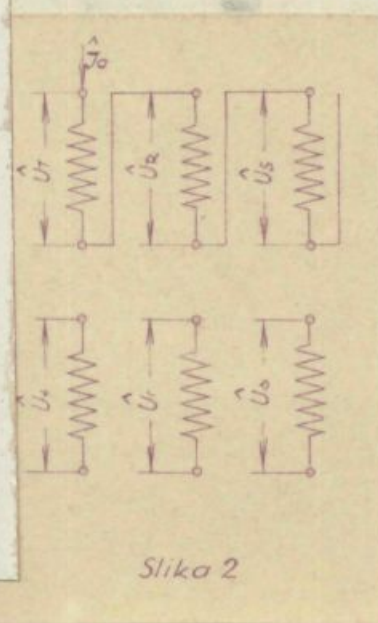
Kot temeljni kazalec bomo kot običajno uporabljali tok oz. napetost faze R. Zaradi prednosti, ki jo nudi uporaba temeljnega kazalca za tok oz. napetost na navitju srednjega stebra, bomo v nadaljnjih izvajanjih vzeli, da pripada srednji steber fazi R, stranska stebra pa fazama S in T.

Določitev impedanc sofaznega zaporedja

V poznejših izvajanjih bomo potrebovali 3 zaporedja sofaznih impedanc: zaporedje sofaznih impedanc praznega teka visokonapetostne strani, zaporedje sofaznih impedanc praznega teka niskonapetostne strani navitja in zaporedje prečnih impedanc med niskonapetostnim in visokonapetostnim navitjem.

Vsako od teh zaporedij impedanc sestavljajo komponente vseh treh zaporedij, le pri popolnoma simetrično grajenem transformatorju sestavljajo vsako zaporedje impedanc komponente le enega zaporedja.

Najprej določimo zaporedje sofaznih impedanc praznega teka visokonapetostne strani!



Vsa tri visokonapetostna navitja vežimo v serijo in jih enofazno vzbujamo s tokom J_0 , niskonapetostna navitja pa naj bo pri tem odprta (sl.2)! Iz enačbe (1) dobimo vrednosti napetosti na vseh treh visokonapetostnih navitjih.

$$\begin{pmatrix} U_R \\ U_S \\ U_T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{RR} & -Z_{R1} & -Z_{RT} \\ -Z_{SR} & Z_{SS} & -Z_{ST} \\ -Z_{TR} & -Z_{TS} & Z_{TT} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} J_0 \\ J_0 \\ J_0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Če pomnožimo enačbo (2) s transformacijsko matriko T^X /19/, dobimo matriko simetričnih napetosti:

$$\frac{1}{3} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{vmatrix} \begin{vmatrix} U_R \\ U_S \\ U_T \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} U_{R0} \\ U_{R1} \\ U_{R2} \end{vmatrix} = \frac{1}{3} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{vmatrix} \begin{vmatrix} Z_{RR} & -Z_{RS} & -Z_{RT} \\ -Z_{SR} & Z_{SS} & -Z_{ST} \\ -Z_{TR} & -Z_{TS} & Z_{TT} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} J_0 \\ J_1 \\ J_2 \end{vmatrix} \quad (3)$$

$$= \frac{1}{3} \begin{vmatrix} Z_{RR} - Z_{SR} - Z_{TR} & -Z_{RS} + Z_{SS} & -Z_{TS} & -Z_{RT} & -Z_{ST} + Z_{TT} \\ Z_{RR} - aZ_{SR} - a^2Z_{TR} & -Z_{RS} + aZ_{SS} & -a^2Z_{TS} & -Z_{RT} & -aZ_{ST} + a^2Z_{TT} \\ Z_{RR} - a^2Z_{SR} - aZ_{TR} & -Z_{RS} + a^2Z_{SS} & -aZ_{TS} & -Z_{RT} & -a^2Z_{ST} + aZ_{TT} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} J_0 \\ J_0 \\ J_0 \end{vmatrix}$$

Če iz zgornje enačbe poiščemo vrednosti posameznih zaporedij napetosti ter jih delimo s tokom J_0 , dobimo sofazno (Z_{00V}), pozitivno (Z_{01V}) in negativno komponento (Z_{02V}) zaporedja sofaznih impedanc praznega teka visokonapetostne strani navitja:

$$Z_{00V} = \frac{U_{R0}}{J_0} = \frac{1}{3} (Z_{RR} + Z_{SS} + Z_{TT} - 2Z_{RS} - 2Z_{RT} - 2Z_{ST}) \quad (4a)$$

$$Z_{01V} = \frac{U_{R1}}{J_0} = \frac{1}{3} (Z_{RR} + aZ_{SS} + a^2Z_{TT} - Z_{RS} - aZ_{RS} - Z_{RT} - a^2Z_{ST} - aZ_{ST} - a^2Z_{RT}) =$$

$$= \frac{1}{3} (Z_{RR} + aZ_{SS} + a^2Z_{TT} + a^2Z_{RS} + aZ_{RT} + Z_{ST}) \quad (4b)$$

$$Z_{02V} = \frac{U_{R2}}{J_0} = \frac{1}{3} (Z_{RR} + a^2Z_{SS} + aZ_{TT} + Z_{ST} + aZ_{RS} + a^2Z_{RT}) \quad (4c)$$

Če je transformator grajen popolnoma simetrično, so si vse medsebojne kot tudi vse lastne impedance med seboj enake:

$$Z_{RR} = Z_{SS} = Z_{TT} \text{ oz. } Z_{RS} = Z_{RT} = Z_{ST}.$$

V tem primeru dobimo kot že omenjeno le sofazno komponento sofazne impedance Z_{00V} . Njeno vrednost dobimo iz enačbe (4a):

$$Z_{00V} = Z_{RR} - 2Z_{RS} \quad (5)$$

Če je transformator grajen simetrično le napram srednjem stebri, sta si med seboj enaki lastni impedanci navitij na obeh zunanjih stebrih kot tudi medsebojni impedanci med navitjema na zunanjih stebrih in navitju na srednjem stebri: $Z_{SS} = Z_{TT}$ oz. $Z_{RS} = Z_{RT}$. Prav tako sta si v tem primeru tudi enaki napetosti U_s in U_T . Za ta primer dobi enačba (4) naslednjo obliko:

$$Z_{oov} = \frac{1}{3} (Z_{RR} + 2Z_{SS} - 4Z_{RS} - 2Z_{ST}) \quad (6a)$$

$$Z_{o1v} = Z_{o2v} = \frac{1}{3} (Z_{RR} - Z_{SS} - Z_{RS} + Z_{ST}) \quad (6b)$$

Če delimo vrednosti faznih napetosti U_R in U_s , dobljenih iz enačbe (2), s tokom J_0 , dobimo v primeru, da je transformator grajen simetrično napram srednjem stebri, naslednji impedanci:

$$Z_{oR} = \frac{U_R}{J_0} = Z_{RR} - Z_{RS} - Z_{RT} = Z_{RR} - 2Z_{RS} \quad (7a)$$

$$Z_{oS} = \frac{U_s}{J_0} = Z_{SS} - Z_{RS} - Z_{ST} \quad (7b)$$

Vrednosti komponent Z_{oov} , Z_{o1v} in Z_{o2v} lahko torej tudi izrazimo z uporabo enačb (7) in to v odvisnosti od napetosti U_R in U_s ter toka J_0 :

$$Z_{oov} = \frac{U_R + 2U_s}{3J_0} = \frac{Z_{oR} + 2Z_{oS}}{3} \quad (8)$$

$$Z_{o1v} = Z_{o2v} = \frac{U_R - U_s}{3J_0} = \frac{Z_{oR} - Z_{oS}}{3} \quad (9)$$

Gornji enačbi omogočata iz izmerjenih vrednosti določiti vrednost vseh treh komponent sofazne impedance.

Zaporedje sofaznih prečnih impedanc med visokonapetostnim in niskonapetostnim navitjem dobimo na sledeči način:

Napetosti v niskonapetostnem delu navitja U_r , U_s , in U_t , ki jih inducirajo toki $J_r = J_s = J_t = J_0$ visokonapetostnega navitja pod pogojem, da je tok v niskonapetostnem navitju enak nič ($J_r = J_s = J_t = 0$), dobimo z uporabo enačbe (1):

$$\begin{pmatrix} U_r \\ U_s \\ U_t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{rR}; -Z_{rS}; -Z_{rT} \\ -Z_{sR}; Z_{sS}; -Z_{sT} \\ -Z_{tR}; -Z_{tS}; Z_{tT} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} J_0 \\ J_0 \\ J_0 \end{pmatrix} \quad (10)$$

Če gornjo enačbo pomnožimo s transformacijsko matriko T^x , dobimo matriko simetričnih napetosti. Če iz te enačbe poiščemo vrednosti posameznih zaporedij napetosti ter jih delimo s tokom J_0 , dobimo sofazne, pozitivne in negativne komponente zaporedja prečnih impedanc med visokonapetostnim in niskonapetostnim navitjem.

Pri popolnoma simetrično grajenem transformatorju dobimo le sofazno komponento prečne impedance:

$$Z_{oop} = Z_{rR} - 2Z_{rS} \quad (11)$$

Če je transformator grajen simetrično le napram srednjem stebri, pa dobimo naslednje komponente:

$$Z_{oop} = \frac{1}{3} (Z_{rR} + 2Z_{sS} - 4Z_{rS} - 2Z_{sT}) \quad (12a)$$

$$Z_{o1p} = Z_{o2p} = \frac{1}{3} (Z_{rR} - Z_{sS} - Z_{rS} + Z_{sT}) \quad (12b)$$

Kot v prejšnjem primeru lahko tudi tu izrazimo komponente prečne impedance z napetostmi U_r , U_s in tokom J_0 oz. z impedancami Z_{pr} , Z_{ps} :

$$Z_{oop} = \frac{U_r + 2U_s}{3J_0} = \frac{Z_{pr} + 2Z_{ps}}{3} \quad (12c)$$

$$Z_{o1p} = Z_{o2p} = \frac{U_r - U_s}{3J_0} = \frac{Z_{pr} - Z_{ps}}{3} \quad (12d)$$

Za določitev komponent sofaznih impedanc praznega teka niskonapetostnega navitja je potrebno napajati le niskonapetostno navitje, v enačbo (1) je treba torej ustaviti za J_k , J_s in J_r vrednost nič, za toke niskonapetostnem navitju pa $J_1 = J_2 = J_3 = J_0$.

Ker je določitev teh komponent slična izračunom komponent zaporedja sofazne impedance praznega teka za niskonapetostno navitje, bomo navedli tu le rezultate:

V primeru, da je transformator grajen popolnoma simetrično, dobimo kot v prejšnjih primerih le sofazno komponento impedance sofaznega zaporedja:

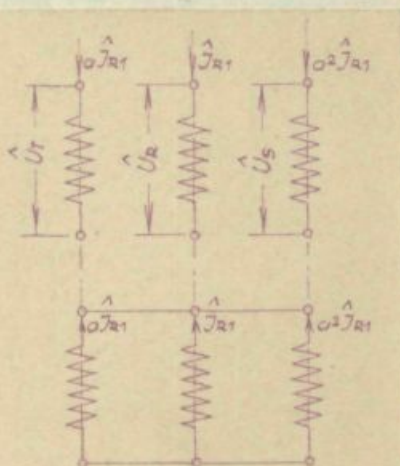
$$Z_{00n} = Z_{rr} - 2 Z_{rs} \quad (13)$$

Pri simetriji obeh stranskih stebrov napram srednjemu steburu dobimo sledečo zvezo med komponentami impedanc zaporedij in med lastnimi oz. medsebojnimi impedancami:

$$Z_{00n} = \frac{1}{3} (Z_{rr} + 2Z_{ss} - 4Z_{rs} - 2Z_{st}) \quad (14)$$

$$Z_{01n} = Z_{02n} = \frac{1}{3} (Z_{rr} - Z_{ss} - Z_{rs} + Z_{st}) \quad (15)$$

Določitev impedanc kratkega stika pozitivnega zaporedja



Slika 3

Kot je že omenjeno bomo obravnavali le impedanco kratkega stika pozitivnega zaporedja, impedanco praznega teka pa bomo zanemarili. V tem primeru se ves tok primarne strani transformira na sekundarno stran. Če reduciramo vse impedance (reducirane vrednosti impedanc so označene s črtico) in toke niskonapetostne strani na visokonapetostno stran in če napajamo transformator s tokovi pozitivnega zaporedja in to z visokonapetostne strani (sl.3)

dobi enačba (1) naslednjo obliko:

$$\begin{pmatrix} U_R \\ U_S \\ U_T \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{RR} & -Z_{RS} & -Z_{RT} & -Z'_{Rr} & Z_{Rb} & Z_{Rt} \\ -Z_{SR} & Z_{SS} & -Z_{ST} & Z'_{Sr} & -Z_{Sb} & Z_{St} \\ -Z_{TR} & -Z_{TS} & Z_{TT} & Z'_{Tr} & Z_{Tb} & -Z'_{Tt} \\ Z_{rR} & -Z_{rS} & -Z_{rT} & -Z'_{rr} & Z_{rs} & Z_{rt} \\ -Z_{sR} & Z_{sS} & -Z_{sT} & Z'_{sr} & -Z_{sb} & Z_{st} \\ -Z_{tR} & -Z_{tS} & Z_{tT} & Z'_{tr} & Z_{tb} & -Z_{tt} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} J_{R1} \\ a^2 J_{R1} \\ a J_{R1} \\ J_{R1} \\ a^2 J_{R1} \\ a J_{R1} \end{pmatrix} \quad (16)$$

Gornjo enačbo lahko pišemo tudi v naslednji obliki:

$$\begin{pmatrix} U_R \\ U_S \\ U_T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{RR} - Z'_{Rr} & -Z_{RS} + Z'_{Rr} & -Z_{RT} + Z'_{Rt} \\ -Z_{SR} + Z'_{Sr} & Z_{SS} - Z'_{Ss} & -Z_{ST} + Z'_{St} \\ -Z_{TR} + Z'_{Tr} & -Z_{TS} + Z'_{Ts} & Z_{TT} - Z'_{Tt} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} J_{R1} \\ a^2 J_{R1} \\ a J_{R1} \end{pmatrix} \quad (16a)$$

Da dobimo matriko simetričnih napetosti, pomnožimo gornjo enačbo s transformacijsko matriko T^x , pri čemer dobimo:

$$\begin{pmatrix} U_{R0} \\ U_{R1} \\ U_{R2} \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} Z_{RR} - Z'_{Rr} - Z_{SR} + Z'_{Sr} - Z_{TR} + Z'_{Tr} \\ Z_{RR} - Z'_{Rr} - a Z_{SR} + a Z'_{Sr} - a^2 Z_{TR} + a^2 Z'_{Tr} \\ Z_{RR} - Z'_{Rr} - a^2 Z_{SR} + a^2 Z'_{Sr} - a Z_{TR} + a Z'_{Tr} \end{pmatrix} \quad (17)$$

$$\begin{pmatrix} -Z_{RS} + Z'_{Rr} + Z_{SS} - Z'_{Ss} - Z_{TS} - Z'_{Ts} & -Z_{RT} + Z'_{Rt} - Z_{ST} + Z'_{St} + Z_{TT} - Z'_{Tt} \\ -Z_{RS} + Z'_{Rr} + a Z_{SS} - a Z'_{Ss} - a^2 Z_{TS} - a^2 Z'_{Ts} & -Z_{RT} + Z'_{Rt} - a Z_{ST} + a Z'_{St} + a^2 Z_{TT} - a^2 Z'_{Tt} \\ -Z_{RS} + Z'_{Rr} + a^2 Z_{SS} - a^2 Z'_{Ss} - a Z_{TS} - a Z'_{Ts} & -Z_{RT} + Z'_{Rt} - a^2 Z_{ST} + a^2 Z'_{St} + a Z_{TT} - a Z'_{Tt} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} J_{R1} \\ a^2 J_{R1} \\ a J_{R1} \end{pmatrix}$$

Če iz gornje enačbe poiščemo vrednosti posameznih zaporednih napetosti ter te napetosti delimo s tokom, dobimo naslednje pozitivne, negativne in sofazne komponente zaporedja pozitivnih impedanc kratkega stika:

$$Z_{10} = \frac{1}{3} [(Z_{RR} - Z'_{Rr}) + a(Z_{SS} - Z'_{Ss}) + a^2(Z_{TT} - Z'_{Tt}) - (Z_{RS} - Z'_{Rr}) - (Z_{RT} - Z'_{Rt}) - a(Z_{RS} - Z'_{Rr}) - a(Z_{ST} - Z'_{St}) - a^2(Z_{RT} - Z'_{Rt}) - a^2(Z_{ST} - Z'_{St})] \quad (18a)$$

$$Z_{11} = \frac{1}{3} [(Z_{RR} - Z'_{Rr}) + (Z_{SS} - Z'_{Ss}) + (Z_{TT} - Z'_{Tt}) + (Z_{RS} - Z'_{Rr}) + (Z_{RT} - Z'_{Rt}) + (Z_{ST} - Z'_{St})] \quad (18b)$$

$$Z_{12} = \frac{1}{3} [(Z_{RR} - Z'_{Rr}) + a^2(Z_{SS} - Z'_{Ss}) + a(Z_{TT} - Z'_{Tt}) - 2a(Z_{RS} - Z'_{Rr}) - 2a^2(Z_{RT} - Z'_{Rt}) - 2(Z_{ST} - Z'_{St})] \quad (18c)$$

Če je transformator grajen popolnoma simetrično, so vse lastne pa tudi vse medsebojne impedance med seboj enake. V tem primeru dobimo le pozitivno komponento, ki je:

$$Z_{11} = Z_{RR} - Z'_{Rr} + Z_{SS} - Z'_{Ss} \quad (19)$$

Če sta stranska stebra grajena z ozirom na srednji steber simetrično, so si med seboj enake naslednje impedance: $Z_{SS} = Z_{TT}$; $Z_{LS} = Z_{LT}$; $Z'_{Ll} = Z'_{Ll}$; $Z'_{Ss} = Z'_{Tt}$;

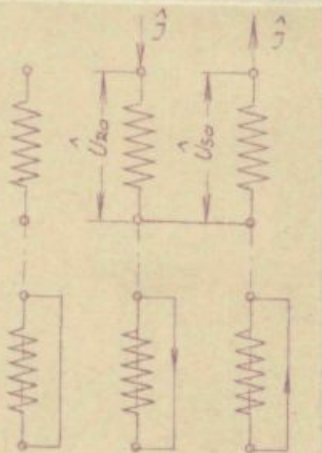
Enačbe (18) dobe v tem primeru naslednjo obliko:

$$Z_{10} = \frac{1}{3} [(Z_{RR} - Z'_{Rr}) - (Z_{SS} - Z'_{Ss}) + (Z_{ST} - Z'_{St}) - (Z_{RS} - Z'_{Rs})] \quad (20a)$$

$$Z_{11} = \frac{1}{3} [(Z_{RR} - Z'_{Rr}) + 2(Z_{SS} - Z'_{Ss}) + 2(Z_{RS} - Z'_{Rs}) + (Z_{ST} - Z'_{St})] \quad (20b)$$

$$Z_{12} = \frac{1}{3} [(Z_{RR} - Z'_{Rr}) - (Z_{SS} - Z'_{Ss}) + 2(Z_{RS} - Z'_{Rs}) - 2(Z_{ST} - Z'_{St})] \quad (20c)$$

Ker je izvedba trifaznih meritev impedanc kratkega stika običajno težje izvedljiva od enofaznih meritev, bomo poiskali kako dobiti vrednost potrebnih impedanc iz enofaznih meritev na transformatorju.



Slika 4

Pri kratko vezanem niskonapetostnem navitju vzbujajmo visokonapetosti navitji faz R in S (sl.4)! Če delimo napetosti \hat{U}_{Ra} in \hat{U}_{Sa} s tokom \hat{J} , dobimo naslednji impedanci:

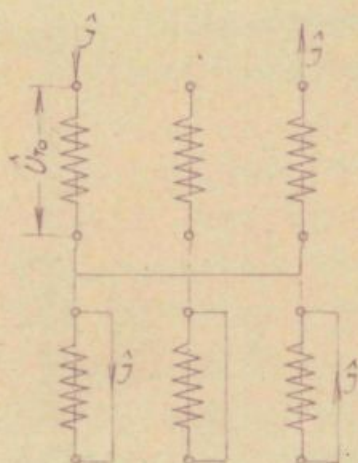
$$Z_R = \frac{U_{Ra}}{J} = (Z_{RR} - Z'_{Rr}) + (Z_{LS} - Z'_{Ls}) \quad (21a)$$

$$Z_S = \frac{U_{Sa}}{J} = (Z_{RS} - Z'_{Rs}) + (Z_{SS} - Z'_{Ss}) \quad (21b)$$

Nato prav tako kot v prejšnjem primeru kratko vežimo niskonapetostno navitje, vzbujajmo pa transformator preko visokonapetostnega navitja na stranskih stebrih (sl.5).

Če za vzbujanje potrebno napetost \hat{U}_{r0} delimo s tokom \hat{J} , dobimo impedanco:

$$\begin{aligned} Z_T &= \frac{\hat{U}_{r0}}{\hat{J}} = (Z_{rT} - Z'_{rt}) + (Z_{sT} - Z'_{st}) = & (21c) \\ &= (Z_{ss} - Z'_{s_s}) + (Z_{sT} - Z'_{st}) \end{aligned}$$



Slika 5

Iz enačb (21) dobimo zvezo med napetostmi \hat{U}_{R0} , \hat{U}_{S0} , \hat{U}_{T0} , tokom \hat{J} in komponentami impedanc Z_{10} , Z_{11} , Z_{12} :

$$Z_{10} = \frac{\hat{U}_{R0} + \hat{U}_{T0} - 2\hat{U}_{S0}}{3\hat{J}} = \frac{Z_R + Z_T - 2Z_S}{3} \quad (22a)$$

$$Z_{11} = \frac{\hat{U}_{R0} + \hat{U}_{S0} - \hat{U}_{T0}}{3\hat{J}} = \frac{Z_R + Z_S + Z_T}{3} \quad (22b)$$

$$Z_{12} = \frac{\hat{U}_{R0} + \hat{U}_{S0} - 2\hat{U}_{T0}}{3\hat{J}} = \frac{Z_R + Z_S - 2Z_T}{3} \quad (22c)$$

DOLOČITEV NADOMESTNIH VEZIJ, TOKOV IN NAPETOSTI ZA PRIMER OVOJNEGA STIKA V TRANSFORMATORJIH RAZNIH VEZAV

Dočim se, vsaj kot je avtorja znano, uporablja teorija simetričnih komponent pretežno za izračun tokov oz. napetosti pri nesimetrijah, katerih vzroki so izven samega trifaznega stroja (n.pr. zunanji kratki stiki), bomo v tem poglavju razširili uporabo simetričnih komponent na izračun tokov oz. napetosti, ki nastopajo pri okvarah v samem trifaznem stroju. V tem poglavju bomo namreč z uporabo teorije simetričnih komponent določili nadomestna vezja za posamezna simetrična zaporedja, iz teh pa bomo poiskali vrednosti tokov in napetosti, ki se pojavijo pri ovojnem stiku.

Na razmere pri ovojnem kratkem stiku v trifaznem transformatorju upliva predvsem to, kolik del navitja je kratko vezan in kje se kratko vezano navitje na stebri nahaja. Seveda pa vpliva na velikost tokov tudi sama izvedba transformatorja kot tudi njegova vezava.

Ker je disertacija namenjena predvsem osvetlitvi problema ovojnega stika pri večjih transformatorjih, so obravnavane le vezave navitij v zvezdo oz. v trikot, ne pa tudi zik-zak vezava, ki se uporablja le pri manjših enotah.

Zaradi občutnega vpliva ozemljitve zvezdišča transformatorja na razmere pri ovojnem stiku kot tudi zaradi vse pogostejših čvrstih ozemljitev zvezdišč transformatorjev, bomo pregledali tudi razmere pri ovojnih stikih v transformatorjih z ozemljenim zvezdiščem.

Kot pri izračunih kratkih stikov v omrežjih igra tudi pri ovojnem stiku pri transformatorju omrežje važno vlogo in to predvsem impedanca pozitivnega in negativnega zaporedja, v kolikor pa je zvezdišče transformatorja ozemljeno, pa tudi impedanca sofazne-

ga zaporedja omrežja.

Da bi ohranili osnovno sliko razmer pri ovojnem kratkem stiku čimbolj pregledno, bomo predpostavili:

1. da je omrežje, na katero je priključen transformator, neskončno močno in da zaradi tega ostanejo zvezane napetosti na sponkah transformatorja tudi po nastopu okvare nespremenjene,
2. da je transformator sekundarno neobremenjen,
3. da je prehodna upornost na mestu ovojnega kratkega stika zanemarljiva.

Glede samega transformatorja pa bomo predpostavili:

4. da je grajen simetrično z ozirom na vse tri faze,
5. da je impedanca praznega teka pozitivnega zaporedja v primeru z ostalimi impedancami tako visoka, da jo lahko zanemarimo,
6. da sta omski upornosti primarnega in sekundarnega navitja transformatorja, obe izraženi z ozirom na impedanco nazivnega bremena odgovarjajoče strani transformatorja, enako veliki ter da so tudi upornosti posameznih ovojev med seboj enake,
7. da so velikosti vseh upornosti neodvisne od tokov oz. od napetosti, da torej lahko uporabimo zakon superpozicije.

Transformator z ovojnim stikom bomo pri obravnavi zato lahko nadomestili z nadomestnim simetričnim tokokrogom. Ker je impedanca takega tokokroga neodvisna od razporeditve faz, sta si impedanci pozitivnega in negativnega zaporedja med seboj enaki.

Pri pregledu bomo posebno skrbno določili vrednosti, na podlagi katerih lahko odkrijemo ovojni stik v transformatorju že od zunaj. To so predvsem tokovi, ki pritekajo v primeru okvare v sam transformator. V kolikor je zvezdišče transformatorja neozemljeno, bomo določili tudi napetost med zvezdiščem

transformatorja in med zvezdiščem zunanjega sistema. Glede zvezdišča zunanjega sistema bomo predpostavili, da je vedno v težišču napetostnega trikotnika, ki ga tvorijo zvezane napetosti na sponkah transformatorja. Poleg tega bomo tudi v vseh primerih določili velikost toka v kratko sklenjenem delu navitja.

Da lahko določimo te vrednosti je potrebno, da poznamo razporeditev tokov v navitjih ter vrsto raznih impedanc. Velikosti teh so odvisne od izvedbe transformatorja kot tudi od tega kolik del navitja je kratko vezan in kje se kratkovezano navitje na stebru nahaja. Induktivne komponente potrebnih impedanc bomo določili, kot je že omenjeno v naslednjih dveh poglavjih.

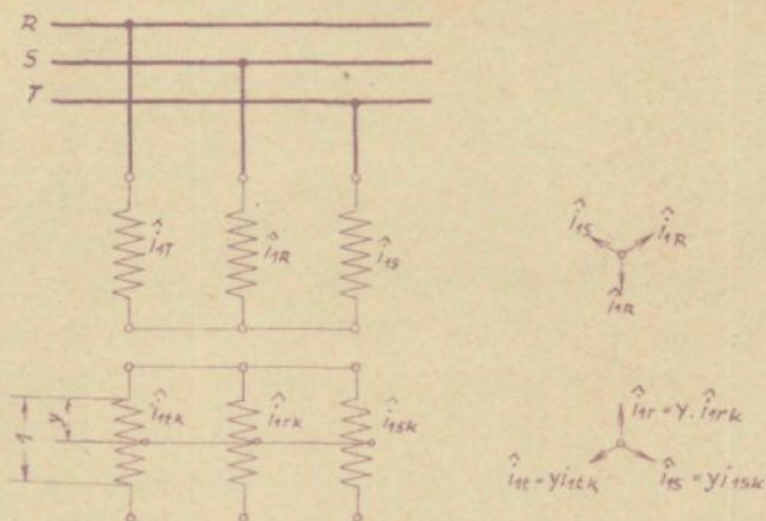
Vse toke in napetosti bomo izražali z ozirom na nazivni tok oz. na nazivno napetost ustrezne strani transformatorja. Prav tako bomo izrazili tudi vse impedance z ozirom na impedanco nazivnega bremena odgovarjajoče strani transformatorja.

Kot temeljni kazalec bomo uporabljali tok oz. napetost faze R, kot referenčne kazalce pa odgovarjajoče simetrične komponente tega temeljnega kazalca. Predpostavili bomo, da se ovojni stik nahaja na navitju faze R. V prvem delu smo vzeli, da se nahaja navitje faze R na srednjem stebru. Da ohranimo isti način risanja, bomo ta način še nadalje obdržali.

V slikah so risane razmere za primer, da je vezanega na kratko 50 % navitja faze R.

A. Transformator se napaja z visokonapetostne strani, ovojni stik se nahaja na sekundarnem, nizkonapetostnem navitju

Ker sta razporeditev tokov in velikost impedanc pozitivnega in negativnega zaporedja neodvisni od obravnavanih vezav transformatorja, ju bomo obravnavali skupno za vse vezave:



Slika 6

Če vežemo y -ti del sekundarnega navitja vseh treh faz na kratko (sl.6) in če transformator napajamo s primarne strani s toki pozitivnega zaporedja \hat{i}_{1R} , \hat{i}_{1S} , \hat{i}_{1T} , izraženimi z ozirom na nazivni tok primarne strani, dobimo v kratkovezanem delu sekundarnega navitja toke \hat{i}_{2R} , \hat{i}_{2S} , \hat{i}_{2T} , izražene z ozirom na nazivni

tok sekundarne strani, ki so $(1:y)$ -krat večje od tokov v primarnem navitju.

Da dobimo v nadomestni vezavi enako velike toke na primarni in na sekundarni strani, bomo toke v kratkovezanem delu sekundarnega navitja reducirali v razmerju števila kratkovezanih ovojev napram celotnem številu ovojev sekundarne strani. Reducirane vrednosti tokov so:

$$\hat{i}_{1T} = y \hat{i}_{1Tk} = -\hat{i}_{1R} \quad (1a)$$

$$\hat{i}_{1S} = y \hat{i}_{1Sk} = -\hat{i}_{1S} \quad (1b)$$

$$\hat{i}_{1R} = y \hat{i}_{1Rk} = -\hat{i}_{1T} \quad (1c)$$

Če delimo relativne fazne napetosti primarne strani z relativnimi toki primarne strani iste faze, dobimo relativno vrednost impedance pozitivnega zaporedja kratkega stika y -tega dela niskonapetostnega navitja. To impedanco bomo označevali z črko z_{1A} .

Ohmsko komponento te impedance sestavljata ohmska upornost celotnega navitja primarne strani in ohmska upornost kratkovezanega dela sekundarnega navitja. Z upoštevanjem v začetku poglavja navedenih predpostavk dobimo ohmsko upornost primarnega navitja kot polovično vrednost upornosti celotnega navitja ($r_c : 2$), upornost kratkovezanega navitja pa je y -krat manjša. Če reduciramo upornost kratkovezanega dela sekundarnega navitja na celotno sekundarno navitje in dobljeni vrednosti prištejemo ohmsko upornost navitja primarne strani, dobimo iskano vrednost ohmske komponente impedance z_{1A} :

$$r_{1A} = \frac{r_c}{2} + \left(y \frac{r_c}{2} \right) (1:y)^2 = \frac{r_c}{2} (y + 1) \frac{1}{y} \quad (2)$$

Induktivno komponento impedance z_{1A} , to je reaktanco med primarnim navitjem in med kratkovezanim delom sekundarnega navitja bomo označili z x_{1A} .

Reaktanco x_{1A} lahko tudi izrazimo z reaktanco med primarnim in celotnim sekundarnim navitjem x_{1c} (reaktanca kratkega stika pozitivnega zaporedja transformatorja), dalje z reaktanco med primarnim navitjem in preostalim, $(1-y)$ -tim delom sekundarnega navitja $x_{1\alpha}$ ter z reaktanco med preostalim, $(1-y)$ -tim delom sekundarnega navitja in kratkovezanim, y -tim delom sekundarnega navitja, reducirano na število ovojev celotne sekundarne strani.

Vrednost reaktance med $(1-y)$ -tim in med y -tim delom sekundarnega navitja označimo z x_{1yH} , Njena reducirana vrednost, označimo jo z x_{1yHr} , je torej:

$$X_{1yHr} = \frac{X_{1yH}}{(1-y)^2} \quad (3)$$

je to string?

Zvezo med vsemi štirimi reaktancami dobimo v znani enačbi /6/:

$$X_{1c} = y X_{1A} + (1-y) X_{\alpha} - y(1-y) X_{1yhr} \quad (4)$$

Če iz gornje enačbe poiščemo iskano vrednost x_{1A} , dobimo:

$$X_{1A} = \frac{X_{1c}}{y} - \frac{1-y}{y} X_{\alpha} + (1-y) X_{1yhr} \quad (5)$$

Vrednost reaktance x_{1A} določimo za primer, da je gornja polovica sekundarnega navitja vezana na kratko ($y=0,5$)! V tem primeru je reaktanca x_{1A} enaka reaktanci x_{α} . Enačba(5) dobi v tem primeru naslednjo obliko:

$$X_{1A} = \frac{X_{1c}}{0,5} - \frac{1-0,5}{0,5} X_{1A} + (1-0,5) X_{1yhr} \quad (6a)$$

Vrednost reaktance x_{1A} je torej:

$$X_{1A} = X_{1c} + 0,25 X_{1yhr} \quad (6b)$$

V primeru, da je del kratkovezanega navitja sorazmerno majhen, se vrednost reaktance x_{α} približuje vrednosti reaktance x_{1c} , vrednost reaktance x_{1A} se pa zato približuje vrednosti:

$$\lim_{y \rightarrow 0} X_{1A} = X_{1c} + X_{1yhr} \quad (7)$$

Od vseh štirih uporabljenih reaktanc je reaktanca kratkega stika pozitivnega zaporedja x_{1c} pri transformatorjih poznana. Vrednost reaktance x_{1yhr} bomo izračunali v naslednjem poglavju. Ker nas zanimajo razmere, če je vezano na kratko le nekaj ovojev, pri čemer lahko uporabimo enačbo (7), v kateri ni reaktance x_{α} te reaktance v tretjem delu ne bomo računsko določili. Na preskusnem transformatorju sta bili izmerjeni reaktanci x_{1yhr} in x_{1A} .

Celotna impedanca pozitivnega zaporedja kratkega stika z_{1A} je:

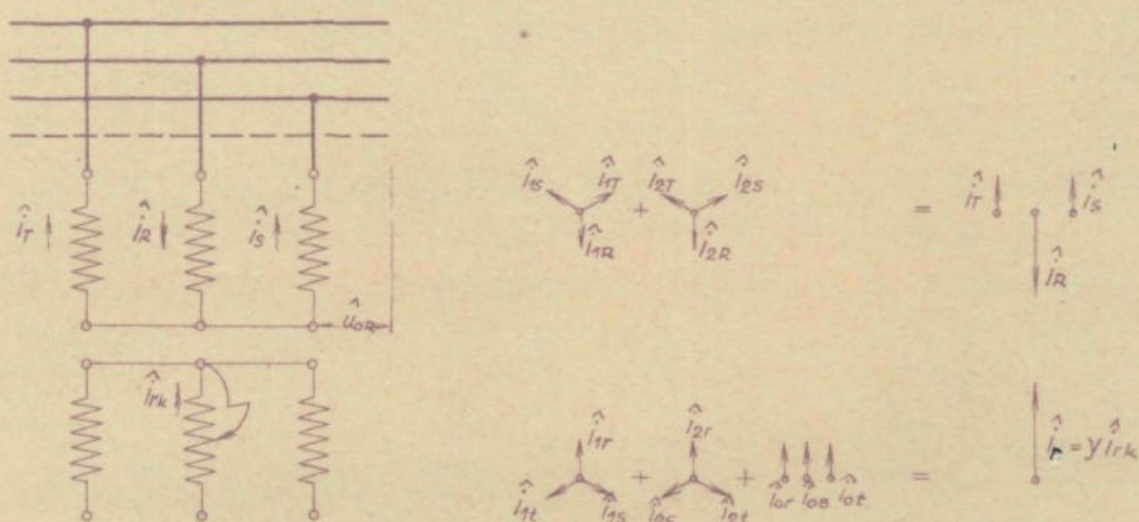
$$\hat{z}_{1A} = \frac{y+1}{y} \frac{r_c}{2} + j \left[\frac{X_{1c}}{y} - \frac{1-y}{y} X_{\alpha} + (1-y) X_{1yhr} \right] \quad (8a)$$

V primeru, da je vezanega na kratko sorazmerno malo navitja, da je torej y sorazmerno majhen, dobi gornja enačba naslednjo obliko:

$$\hat{Z}_{1A} \approx \frac{r_c}{2y} + j(X_{1c} + X_{1ynr}) \quad (8b)$$

1. Transformator je na primarni in na sekundarni strani vezan v zvezdo, zvezdišči nista ozemljeni

Če nastopi na sekundarni strani faze R ovojni stik, dobimo na sekundarni strani tok le v kratkovezanem delu navitja. Na pri-



slika 7a

marni strani pa dobimo tokove v vseh treh navitjih. Toka v navitju faze S in navitju faze T sta enaka. Tok v navitju faze R \hat{i}_r je enak po iznosu vsoti tokov \hat{i}_s in \hat{i}_t , a je nasprotna usmerjen.

Če fazne tokove primarne strani razstavimo na njih simetrične komponente, dobimo le pozitivno ($\hat{i}_{1r}, \hat{i}_{1s}, \hat{i}_{1t}$) in negativno ($\hat{i}_{2r}, \hat{i}_{2s}, \hat{i}_{2t}$) zaporedje tokov, pri čemer sta si obe zaporedji tokov po iznosu enaki. Iz pogoja, da mora biti fazni tok vsake izmed treh faz enak vsoti ustreznih faznih simetričnih komponent, dobimo sledečo zvezo med faznimi toki in njihovimi komponentami zaporedij:

$$\hat{i}_R = \hat{i}_{1R} + \hat{i}_{2R} = 2\hat{i}_{1R} \quad (9a)$$

$$\hat{i}_S = \hat{i}_{1S} + \hat{i}_{2S} = a^2\hat{i}_{1R} + a\hat{i}_{1R} = -\hat{i}_{1R} \quad (9b)$$

$$\hat{i}_T = \hat{i}_{1T} - \hat{i}_{2T} = a\hat{i}_{1R} + a^2\hat{i}_{1R} = -\hat{i}_{1R} \quad (9c)$$

Kot že omenjeno, dobimo na sekundarni strani navitja le tok \hat{i}_{rk} v kratkovezanem delu navitja faze R. V nadomestni vezavi je potrebno ta tok reducirati v razmerju števila kratkovezanih ovojev napram celotnem številu ovojev sekundarne strani. Reducirani tok, označimo ga z \hat{i}_r , je torej:

$$\hat{i}_r = y \hat{i}_{rk} \quad (10)$$

Če tok \hat{i}_r razstavimo na simetrične komponente, dobimo komponente pozitivnega, negativnega in sofaznega zaporedja, ki pa so si po iznosu med seboj enake. Med faznimi tokovi in komponentami posameznih zaporedij obstojajo sledeča razmerja:

$$\hat{i}_r = \hat{i}_{1r} + \hat{i}_{2r} + \hat{i}_{0r} = 3\hat{i}_{1r} \quad (11a)$$

$$\hat{i}_s = \hat{i}_{1s} + \hat{i}_{2s} + \hat{i}_{0s} = a^2\hat{i}_{1r} + a\hat{i}_{1r} + \hat{i}_{1r} = 0 \quad (11b)$$

$$\hat{i}_t = \hat{i}_{1t} + \hat{i}_{2t} + \hat{i}_{0t} = a\hat{i}_{1r} + a^2\hat{i}_{1r} + \hat{i}_{1r} = 0 \quad (11c)$$

Ker magnetilni tok transformatorja ne upoštevamo, je pozitivno zaporedje kot tudi negativno zaporedje tokov primarne strani po iznosu enako pozitivnem oziroma negativnem zaporedju reduciranih tokov sekundarne strani.

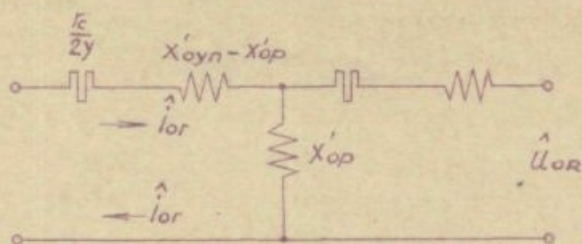
Tok v kratkovezanem delu navitja je torej z upoštevanjem enačb (10) in (11):

$$\hat{i}_{rk} = \frac{1}{y} \hat{i}_r = \frac{1}{y} 3 \hat{i}_{1r} \quad (12)$$

Če pa ustavimo mesto vrednosti simetričnih komponent vrednosti faznih tokov, dobimo:

$$\hat{i}_{rk} = -\frac{1}{y} \hat{i}_{1R} = -\frac{3}{2y} \hat{i}_R = \frac{3}{y} \hat{i}_s \quad (12a)$$

Za določitev vrednosti tokov je potrebno poznati impedanco vseh treh zaporedij. Impedanco pozitivnega in njej enako impedanco negativnega zaporedja smo obravnavali na začetku poglavja. Impedanco sofaznega zaporedja pa predstavlja v tem primeru sofazna impedanca praznega teka kratkosklenjenega dela niskonapetostnega navitja, ki jo označimo z \hat{z}_{oyn} . V izra-



slika 7b

čunu kot tudi v nadomestni vezavi potrebujemo njeno reducirano vrednost. To dobimo, če pomnožimo impedanco \hat{z}_{oyn} z redukcijskim faktorjem $(1:y)^2$.

Ohmska komponenta impedance \hat{z}_{oyn} je y -krat manjša od ohmske upornosti celotnega sekundarnega navitja. Če to upornost pomnožimo z redukcijskim faktorjem, dobimo reducirano vrednost ohmske upornosti impedance sofaznega zaporedja:

$$r'_{oA1} = y \cdot \frac{r_c}{2} \cdot \frac{1}{y^2} = \frac{r_c}{2y} \quad (13a)$$

Induktivno komponento impedance \hat{z}_{oyn} bomo označili z x_{oyn} . Če to reaktanco delimo z y^2 , dobimo reducirano vrednost reaktance x_{oyn} , ki jo bomo označevali z x'_{oyn} :

$$x'_{oyn} = \frac{x_{oyn}}{y^2} \quad (13b)$$

Vrednost te reaktance je izračunana v naslednjem poglavju, poleg tega pa je bila tudi izmerjena na preskusnem transformatorju.

Reducirana vrednost celotne impedance sofaznega zaporedja je:

$$\hat{z}'_{oyn} = \frac{\hat{z}_{oyn}}{y^2} = \frac{1}{y^2} \left(y \frac{r_c}{2} + j x_{oyn} \right) = \frac{r_c}{2y} + j x'_{oyn} \quad (13c)$$

Če poznamo upornosti, ki povzročajo padce napetosti posameznih zaporedij, lahko določimo tudi toke, ki nastopajo pri ovojnem stiku.

Ker vemo, da je na delu niskonapetostnega navitja, ki je kratkovezan, napetost nič, moremo iz tega zaključiti, da so padci napetosti, ki jih povzročajo komponente tokov vseh treh zaporedij faze R na impedancah svojega zaporedja, ravno enaki pritisnjeni fazni napetosti \hat{u}_R :

$$\hat{u}_R = \hat{i}_{1R} \cdot \hat{z}_{1A} + \hat{i}_{2R} \cdot \hat{z}_{1A} + (-\hat{i}_{0R}) \hat{z}'_{0YN} \quad (14a)$$

Ker so komponente tokov vseh treh zaporedij faze R med seboj enake, dobi pri nazivni napetosti ($\hat{u}_R = 1$) gornja enačba naslednjo obliko:

$$\hat{i} = \hat{i}_{1R} (2 \hat{z}_{1A} + \hat{z}'_{0YN}) = \hat{i}_{1R} \left[2 \left(\frac{r_c}{2} \frac{y+1}{y} + j x_{1A} \right) + \left(\frac{r_c}{2y} + j x'_{0YN} \right) \right] = \hat{i}_{1R} \hat{z}_{A1} \quad (14b)$$

pri čemer smo označili z \hat{z}_{A1} vsoto impedanc vseh treh zaporedij.

V primeru, da je y majhen, dobimo vrednost impedance \hat{z}_{A1} :

$$\hat{z}_{A1} \approx \frac{3r_c}{2y} + j(2x_{1c} + 2x_{1YNR} + x'_{0YN}) \quad (15)$$

Iz enačbe (14b) in z upoštevanjem enačbe (9) dobimo pri nazivni pritisnjeni napetosti naslednje toke v dovodu:

$$|\hat{i}_R| = 2 |\hat{i}_{1R}| = \frac{2}{|\hat{z}_{A1}|} \quad (16a)$$

$$|\hat{i}_S| = |\hat{i}_T| = \frac{1}{|\hat{z}_{A1}|} \quad (16b)$$

Tok v kratkovezanem delu navitja pa je:

$$|\hat{i}_{rk}| = \frac{3}{y} \frac{1}{|\hat{z}_{A1}|} \quad (17)$$

Čeprav po primarnem navitju ne tečejo toki sofaznega zaporedja in zato na primarni strani ni padcev napetosti sofaznega zaporedja, dobimo vendar napetost med zvezdiščem primarne strani in zvezdiščem zunanjega sistema.

Toki sofaznega zaporedja v sekundarnem navitju namreč inducirajo sofazne napetosti v vseh treh faznih navitjih primarne strani. Velikost te napetosti dobimo, če pomnožimo tok sofaznega zaporedja s prečno impedanco sofaznega zaporedja med delom niskonapetostnega navitja, ki je kratko vezan, in med celotnim visokonapetostnim navitjem. To impedanco označimo z x_{opl} . Če uporabimo za tok sekundarne strani reducirano vrednost, moramo tudi vrednost prečne reaktance reducirati, to je pomnožiti z redukcijskim faktorjem $1:y$. Reducirano vrednost prečne reaktance označimo z x'_{op} . Pri nazivni pritisnjeni napetosti je vrednost v primarnem navitju induciranih sofaznih napetosti:

$$|\hat{U}_{OR}| = |\hat{i}_{OR}| \cdot X'_{op} = \frac{X'_{op}}{|Z_{A1}|} \quad (18)$$

2. Transformator je na primarni in na sekundarni strani vezan v zvezdo, zvezdišče je na primarni strani ozemljeno

Na sekundarni strani transformatorja dobimo kot v prejšnjem primeru tok \hat{i}_{rk} le v kratkovezanem delu navitja in zato lahko tudi tu uporabimo enačbo (10) in (11).

V primarnem navitju inducirane napetosti sofaznega zaporedja, povzročene po tokih sofaznega zaporedja sekundarne strani, požejejo sofazne toke tudi v primarnem navitju. Ti toki se nato sklepajo preko impedanc sofaznega zaporedja zunanje mreže.

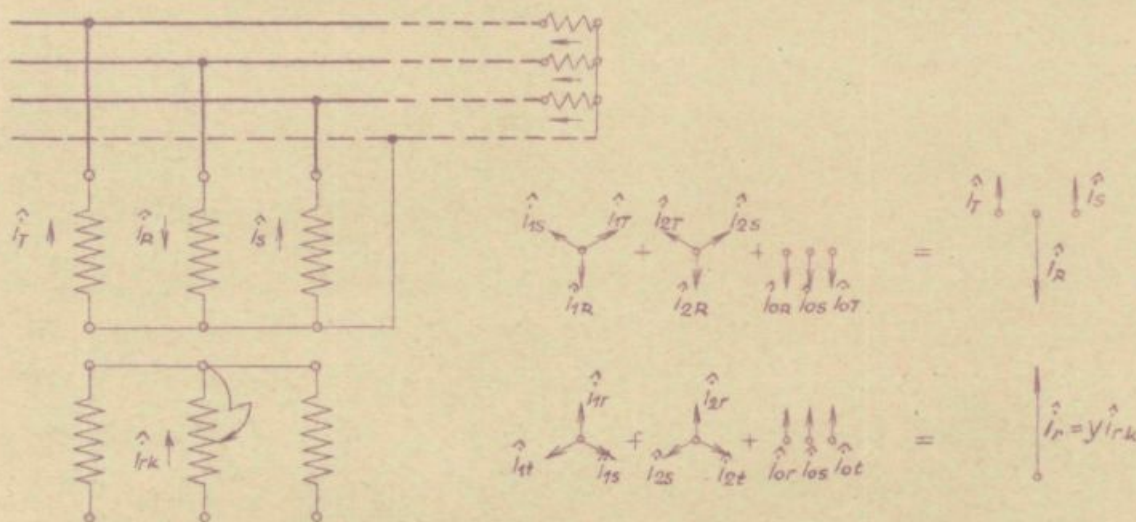
Na primarni strani transformatorja dobimo zato toke vseh treh zaporedij. Če faze tokove primarne strani razstavimo na njih simetrične komponente (sl.8), dobimo pozitivno zaporedje tokov ($\hat{i}_{1R}, \hat{i}_{1S}, \hat{i}_{1T}$) negativno zaporedje tokov ($\hat{i}_{2R}, \hat{i}_{2S}, \hat{i}_{2T}$), sofazno zaporedje tokov ($\hat{i}_{0R}, \hat{i}_{0S}, \hat{i}_{0T}$).

Pozitivno in negativno zaporedje tokov sta si po iznosu enaka, sofazno zaporedje tokov pa je od njiju po iznosu manjše. Med faznimi tokovi in njihovimi komponentami simetričnih zaporedij obstojajo naslednja razmerja:

$$\hat{i}_R = \hat{i}_{1R} + \hat{i}_{2R} + \hat{i}_{0R} = 2\hat{i}_{1R} + \hat{i}_{0R} \quad (19a)$$

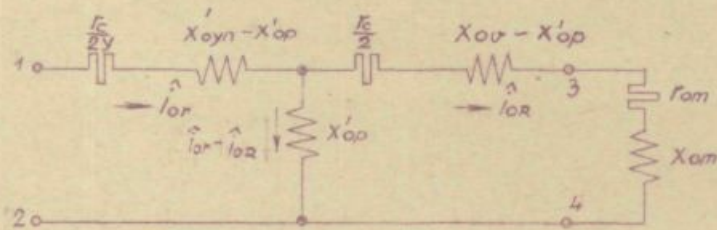
$$\hat{i}_S = \hat{i}_{1S} + \hat{i}_{2S} + \hat{i}_{0S} = a^2\hat{i}_{1R} + a\hat{i}_{1R} + \hat{i}_{0R} = -\hat{i}_{1R} + \hat{i}_{0R} \quad (19b)$$

$$\hat{i}_T = \hat{i}_{1T} + \hat{i}_{2T} + \hat{i}_{0T} = a\hat{i}_{1R} + a^2\hat{i}_{1R} + \hat{i}_{0R} = -\hat{i}_{1R} + \hat{i}_{0R} \quad (19c)$$



slika 8a

Sedaj pa določimo impedanco sofaznega zaporedja po nadomestni vezavi za to zaporedje (sl.8b). V tej vezavi označujeta sponki 1-2 priključek dela kratkovezanega sekundarnega navitja, ki je kratkovezan, sponki 3-4 pa označujeta priključka primarnega visokonapetostnega navitja, na katera je vezana nadomestna



slika 8b

impedanca sofaznega zaporedja zunanje mreže \hat{z}_{0m} , izražena z ozirom na impedanco nazivnega bremena visokonapetostne strani transformatorja.

Za določitev vrednosti upornosti sofaznega zaporedja po nadomestni vezavi potrebujemo poleg že obravnavanih impedanc le še reaktanco praznega teka sofaznega zaporedja primarne, visokonapetostne strani transformatorja, ki jo bomo označili z x_{ov} . Vrednost te reaktance je pri transformatorjih običajno znana.

Ker sta ohmski upornosti sofaznega zaporedja mreže in primarnega navitja v primeru z njunima reaktancama sorazmerno majhni, jih radi večje preglednosti v izračunu zanemarimo.

S to poenostavitvijo dobimo vrednost nadomestne impedance sofaznega zaporedja (sl.8b):

$$\hat{z}_{oA2} = \frac{r_c}{2y} + j \left[(x'_{oyn} - x'_{op}) + \frac{1}{\frac{1}{x'_{op}} + \frac{1}{(x_{ov} - x'_{op}) + x_{om}}} \right] = \frac{r_c}{2y} + j \left(x'_{oyn} - \frac{x'_{op}}{x_{ov} + x_{om}} \right) \quad (20)$$

Komponente tokov sofaznega zaporedja na primarni strani so manjše od komponent tokov sofaznega zaporedja sekundarne strani. Del tokov sofaznega zaporedja se, kot sledi iz nadomestne vezave, namreč sklepa preko prečne reaktance x'_{op} . Iz pogoja, da mora biti napetost na uporih x'_{op} enaka napetosti na uporih $x_{ov} - x'_{op}$ in x_{om} , dobimo naslednjo enačbo:

$$x'_{op} (\hat{i}_{or} - \hat{i}_{or}) = (x_{ov} - x'_{op} + x_{om}) \cdot \hat{i}_{or} \quad (21)$$

Iz gornje enačbe lahko določimo razmerje tokov sofaznega zaporedja, ki teko na primarni, oz. na sekundarni strani navitja. Vrednost tega razmerja, označimo ga z γ_2 , je:

$$\gamma_2 = \frac{|\hat{i}_{or}|}{|\hat{i}_{or}|} = \frac{x'_{op}}{x_{ov} + x_{om}} \quad (22)$$

Ker so velikosti komponent tokov vseh treh zaporedij faze R na sekundarni strani med seboj enake, dobimo njih vrednost pri nazivni napetosti kot recipročna vrednost vsote upornosti vseh treh zaporedij:

$$|\hat{i}_{1r}| = |\hat{i}_{2r}| = |\hat{i}_{or}| = \frac{1}{|2\hat{z}_{1r} + \hat{z}_{oA2}|} = \frac{1}{|\hat{z}_{A2}|} \quad (23)$$

Z upoštevanjem enačb (19) in (23) dobimo pri nazivni napetosti naslednje vrednosti tokov v dovodu:

$$|\hat{i}_n| = 12 \hat{i}_{1R} + \hat{i}_{0n} = 12 \hat{i}_{1R} + V_2 \hat{i}_{1n} = \frac{2 + V_2}{1Z_{A2}} \quad (24a)$$

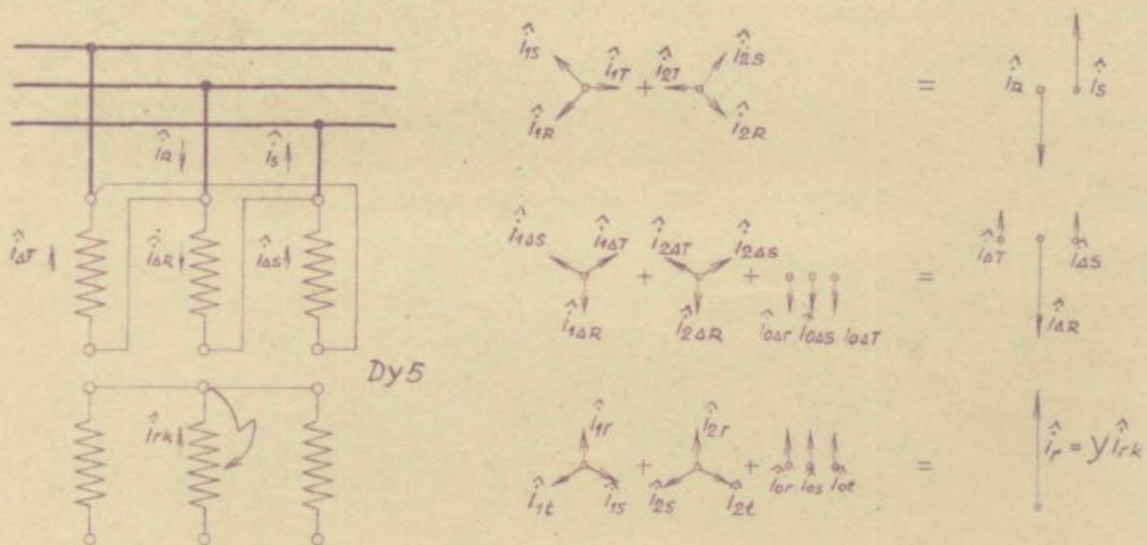
$$|\hat{i}_s| = |\hat{i}_r| = -\hat{i}_{1R} + \hat{i}_{0r} = -i_{1n}(1 - V_2) = \frac{1 - V_2}{1Z_{A2}} \quad (24b)$$

Vrednost toka v kratkovezanem delu sekundarnega navitja pa je:

$$|\hat{i}_{rk}| = \frac{1}{Y} |\hat{i}_r| = \frac{|\hat{i}_{1r} + \hat{i}_{2r} + \hat{i}_{0r}|}{Y} = \frac{3}{Y} \cdot \frac{1}{1Z_{A2}} \quad (25)$$

3. Transformator je na primarni strani vezan v trikot, na sekundarni pa v zvezdo

Pri obojnem stiku na sekundarni strani transformatorja vezave trikot - zvezda, dobimo na sekundarni strani navitja kot pri obeh že obravnavanih vezavah tok \hat{i}_{rk} le v kratkovezanem delu navitja in zato lahko tudi tu uporabimo enačbe (10) in (11).



Slika 9a

V primarnem navitju dobimo slično kot v prejšnjem primeru tokove v vseh treh faznih navitjih. Te tokove bomo izrazili z ozirom na nazivni tok primarnega navitja, ki je za $1:\sqrt{3}$ -krat manjši od nazivnega toka visokonapetostne strani transformatorja. Če tokove v navitjih primarne strani transformatorja razstavimo na

njih simetrične komponente, dobimo pozitivno ($\hat{i}_{1AR}, \hat{i}_{1AS}, \hat{i}_{1AT}$), negativno ($\hat{i}_{2AR}, \hat{i}_{2AS}, \hat{i}_{2AT}$) in sofazno ($\hat{i}_{0AR}, \hat{i}_{0AS}, \hat{i}_{0AT}$) zaporedje tokov. Komponente pozitivnega in negativnega zaporedja so si kot v prejšnjih vezavah po iznosu med seboj enake, komponente sofaznega zaporedja pa so od teh po iznosu nekoliko manjše. Med faznimi tokovi v navitjih ($\hat{i}_{AR}, \hat{i}_{AS}, \hat{i}_{AT}$) in med komponentami zaporedij dobimo naslednjo zvezo:

$$\hat{i}_{AR} = \hat{i}_{1AR} + \hat{i}_{2AR} + \hat{i}_{0AR} = 2\hat{i}_{1AR} + \hat{i}_{0AR} \quad (26a)$$

$$\hat{i}_{AS} = \hat{i}_{1AS} + \hat{i}_{2AS} + \hat{i}_{0AS} = a^2\hat{i}_{1AR} + a\hat{i}_{1AR} + \hat{i}_{0AR} = \hat{i}_{0AR} - \hat{i}_{1AR} \quad (26b)$$

$$\hat{i}_{AT} = \hat{i}_{1AT} + \hat{i}_{2AT} + \hat{i}_{0AT} = a\hat{i}_{1AR} + a^2\hat{i}_{1AR} + \hat{i}_{0AR} = \hat{i}_{0AR} - \hat{i}_{1AR} \quad (26c)$$

Sedaj pa določimo še komponente tokov simetričnih zaporedij, ki pritekajo v transformator iz omrežja! Te komponente se od komponent tokov v primarnem navitju, vezanem v trikot, razlikujejo v naslednjem:

1. Komponente tokov pozitivnega in negativnega zaporedja, ki pritekajo v transformator iz omrežja, so, kot že omenjeno, za $\sqrt{3}$ -krat večje od komponent tokov pozitivnega in negativnega zaporedja v navitju primarne strani. Da se pri izračunu in v nadomestnih vezavah izognemo različno velikim tokom, bomo izražali toke v navitjih vedno z ozirom na nazivni tok navitja, toke v dovodu pa z ozirom na nazivni tok primarne strani transformatorja.
2. Toki pozitivnega in negativnega zaporedja so v navitju drugače usmerjeni kot v dovodu. Pri prehodu iz omrežja v trikotno navitje se namreč kazalci tokov obeh zaporedij zasučejo v smislu rotacije svojega sistema za določen kot. Ker sta smeri rotacije obeh sistemov različni, se zasučeta pri prehodu tudi obe zaporedji med seboj za določen kot.
3. Dočim tokovi v trikotnem navitju lahko vsebujejo komponente sofaznega zaporedja, so tokovi v dovodih sestavljeni le iz komponent pozitivnega in negativnega zaporedja tokov.

V dovodih k transformatorju dobimo toka le v dveh fazah. Pri vezavi transformatorja Dy5 dobimo toka v fazi R in v fazi S.

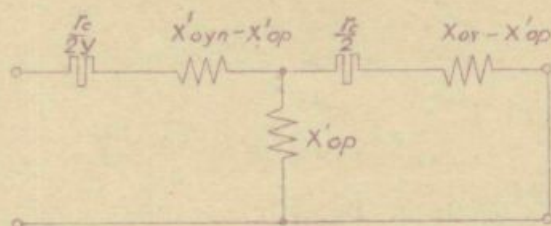
Če fazne tokove v dovodu transformatorja razstavimo, dobimo le pozitivno zaporedje (\hat{i}_{1k} , \hat{i}_{1s} , \hat{i}_{1r}) in negativno zaporedje tokov (\hat{i}_{2k} , \hat{i}_{2s} , \hat{i}_{2r}). Med faznimi toki in njih komponentami obstojajo sledeča razmerja:

$$\hat{i}_R = \hat{i}_{1R} - a^2 \hat{i}_{1R} \quad ; \quad |\hat{i}_R| = \sqrt{3} |\hat{i}_{1R}| \quad (27a)$$

$$\hat{i}_S = a^2 \hat{i}_{1R} - \hat{i}_{1R} = -\hat{i}_R \quad (27b)$$

$$\hat{i}_T = a \hat{i}_{1R} - a \hat{i}_{1R} = 0 \quad (27c)$$

V primarnem navitju inducirane napetosti sofaznega zaporedja,



slika 9b

povzročene po tokih sofaznega zaporedja sekundarne strani, poženejo toke v v trikot vezanem navitju visokonapetostne strani. Nadomestna vezava za impedanco sofaznega zaporedja je podana na sliki 9b.

Če kot v prejšnjem primeru zanemarimo ohmsko upornost primarnega navitja, dobimo vrednost nadomestne impedance sofaznega zaporedja iz enačbe (20) in to s tem, da vstavimo za reaktanco zunanje mreže vrednost nič, pri čemer dobimo:

$$\hat{z}_{0A3} = \frac{r_c}{2y} + j \left(X'_{0yn} - \frac{X'_{0p}{}^2}{X_{0v}} \right) \quad (28)$$

Velikosti posameznih komponent tokov v fazi R na sekundarni strani transformatorja dobimo pri nazivni pritiskni napetosti na enak način kot v prejšnjih primerih, namreč kot recipročno vrednost vsote impedanc pozitivnega, negativnega in sofaznega zaporedja, ki jo označimo z \hat{z}_{A3} . Vrednost te impedance je:

$$\hat{z}_{A3} = 2 \hat{z}_{1A} + \hat{z}_{0A3} \quad (29)$$

Z upoštevanjem enačb (27) dobimo pri nazivni napetosti naslednje vrednosti tokov v dovodih:

$$|\hat{i}_R| = \sqrt{3} |\hat{i}_{1R}| = \sqrt{3} \frac{1}{|\hat{Z}_{A3}|} \quad (30a)$$

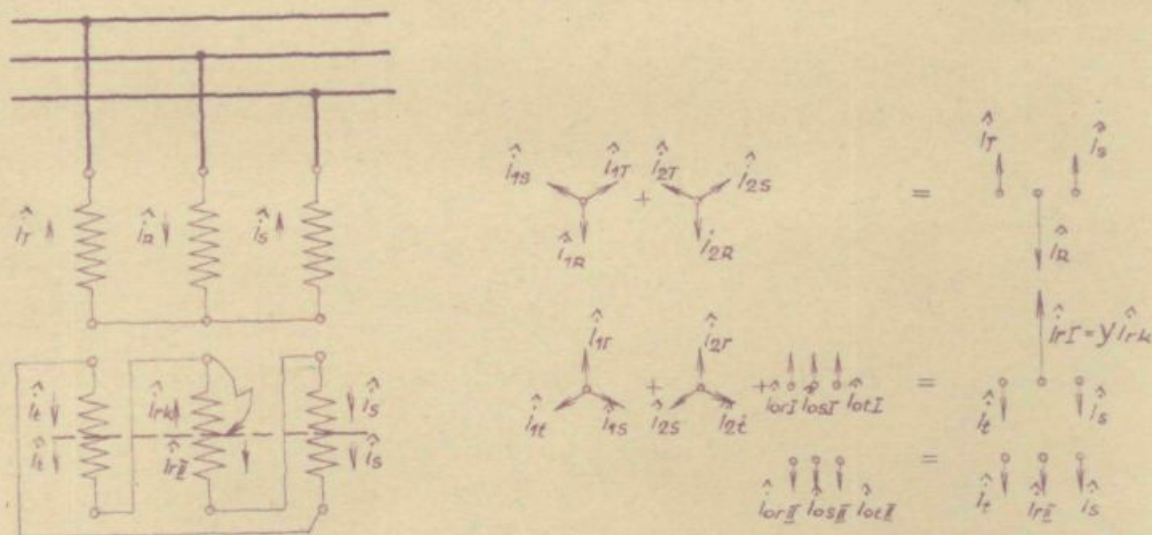
$$\hat{i}_S = -\hat{i}_R \quad (30b)$$

Tok v kratkovezanem delu navitja pa je:

$$|\hat{i}_{rk}| = \frac{|\hat{i}_R|}{y} = \frac{|\hat{i}_{1r} + \hat{i}_{2r} + \hat{i}_{0r}|}{y} = \frac{3}{y \cdot |\hat{Z}_{A3}|} \quad (30c)$$

4. Transformator je na primarni strani vezan v zvezdo, na sekundarni strani pa v trikot. Zvezdišče ni ozemljeno

Pri tej vezavi transformatorja dobimo pri ovojnem stiku na sekundarni strani v primarnem navitju le tokove pozitivnega in negativnega zaporedja in moremo zato uporabiti enačbe (9), v katerih dobimo zvezo med faznimi toki in njih komponentami.



Slika 10a

Na sekundarni strani transformatorja dobimo tokove v vseh treh navitjih, ki jih bomo izražali z ozirom na nazivni tok navitja, ki je kot že omenjeno za $1:\sqrt{3}$ -krat manjši od nazivnega toka sekundarne strani.

Sekundarno navitje kot tudi toke v njem bomo razdelili preko vseh treh faz v dva dela: na y -ti del navitja, ki je v fazi R kratko vezan, in v preostali, $(1-y)$ -ti del navitja. Da dobimo v nadomestni vezavi enake toke na primarni kot tudi na sekundarni strani, bomo kot v prejšnjih primerih vse toke in vse impedance sekundarne strani reducirali v razmerju števila kratko vezanih ovojev napram celotnem številu ovojev sekundarne strani. Toke bomo torej pomnožili z y , impedance pa delili z y^2 .

Če razstavimo reducirane fazne tokove v y -tem delu navitja na njih simetrične komponente, dobimo pozitivno zaporedje tokov $(\hat{i}_{1r}, \hat{i}_{1s}, \hat{i}_{1t})$ negativno zaporedje tokov $(\hat{i}_{2r}, \hat{i}_{2s}, \hat{i}_{2t})$ in sofazno zaporedje tokov $(\hat{i}_{0r}, \hat{i}_{0s}, \hat{i}_{0t})$. Pozitivno in negativno zaporedje tokov sta si po iznosu enaka, iznos sofaznega zaporedja pa je od njiju manjši. Zvezo med faznimi tokovi in njih komponentami dobimo v naslednjih treh enačbah:

$$\hat{i}_{rI} = \hat{i}_{1r} + \hat{i}_{2r} + \hat{i}_{0rI} = 2\hat{i}_{1r} + \hat{i}_{0rI} \quad (31a)$$

$$\hat{i}_s = \hat{i}_{1s} + \hat{i}_{2s} + \hat{i}_{0sI} = a^2\hat{i}_{1r} + a\hat{i}_{1r} + \hat{i}_{0rI} = -\hat{i}_{1r} + \hat{i}_{0rI} \quad (31b)$$

$$\hat{i}_t = \hat{i}_{1t} + \hat{i}_{2t} + \hat{i}_{0tI} = a\hat{i}_{1r} + a^2\hat{i}_{1r} + \hat{i}_{0rI} = -\hat{i}_{1r} + \hat{i}_{0rI} \quad (31c)$$

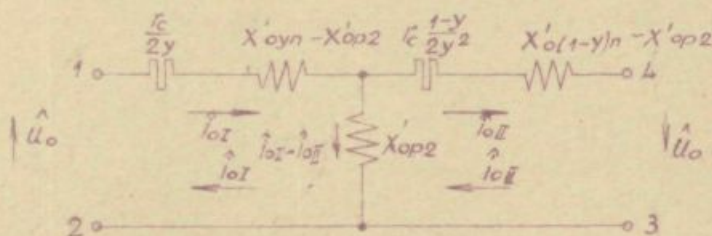
Če reducirane vrednosti faznih tokov v $(1-y)$ -tem delu navitja razstavimo na njih simetrične komponente, dobimo le sofazno zaporedje tokov:

$$\hat{i}_{rII} = \hat{i}_s = \hat{i}_t = +\hat{i}_{0rII} \quad (32)$$

Ker mora biti tok v fazi S v y -tem delu in v $(1-y)$ -tem delu navitja med seboj enak, dobimo iz enačb (31b) in (32), da je vsota tokov sofaznega zaporedja v y -tem delu in v $(1-y)$ -tem delu navitja po iznosu ravno enake pozitivnem zaporedju tokov sekundarne kot tudi primarne strani navitja:

$$-\hat{i}_s = -\hat{i}_{1r} + \hat{i}_{0rI} = -\hat{i}_{0rII} \quad ; \quad \hat{i}_{1r} = \hat{i}_{0rI} + \hat{i}_{0rII} \quad (33)$$

V nadomestni vezavi sofaznega zaporedja (sl.10b) nastopata po-



slika 10b

leg že obravnavanih upornosti še dve novi impedanci, namreč reducirana vrednost impedance praznega teka $(1-y)$ -tega navitja, označimo jo z $\hat{z}'_{o(1-y)_2}$, in reducirana vrednost prečne reaktan-

ce med kratkovezanim delom in med preostalim delom niskonapetostnega navitja. Vrednost te reaktance označimo z x'_{op2} .

Ohmska komponenta impedance $\hat{z}'_{o(1-y)_2}$ je, z upoštevanjem v začetku poglavja omenjenih predpostavk, $(1-y)$ -krat manjša od ohmske upornosti sekundarnega navitja:

$$r_{o(1-y)_2} = \frac{r_c}{2} (1-y) \quad (34a)$$

Reducirana vrednost te upornosti pa je:

$$r'_{o(1-y)_2} = \frac{r_c}{2} (1-y) \cdot \frac{1}{y^2} = \frac{r_c}{2} \frac{1-y}{y^2} \quad (34b)$$

Reaktanco praznega teka $(1-y)$ -tega dela navitja bomo označili z $x_{o(1-y)_2}$. Če to reaktanco delimo z y^2 , dobimo njeno reducirano vrednost, ki jo označimo z $x'_{o(1-y)_2}$. Ker je tudi ta vrednost močno odvisna od števila kratkovezanih ovojev, jo lahko izrazimo tudi z reaktanco, ki jo označimo z $x_{o(1-y)nr}$ in ki je vrednost reaktance $x_{o(1-y)_2}$ reducirana na celotno število ovojev sekundarne strani. Vrednost te reaktance je računsko določena v tretjem delu. Reducirano vrednost reaktance $x'_{o(1-y)_2}$, ki jo rabimo v nadomestni vezavi torej lahko izrazimo:

$$x'_{o(1-y)_2} = \frac{1}{y^2} x_{o(1-y)_2} = \frac{(1-y)^2}{y^2} x_{o(1-y)nr} \quad (35)$$

Prečno reaktanco bomo označili z x_{op2} . Če to reaktanco delimo z y^2 , dobimo njeno reducirano vrednost x'_{op2} . Reaktanco x_{op2}

lahko izrazimo s prečno reaktanco, reducirano na vrednost, ki bi jo dobili v primeru, da bi imel y -ti tudi $(1-y)$ -ti del sekundarnega navitja isto število ovojev kot celotno sekundarno navitje. To reaktanco označimo z x_{op2r} , njena vrednost je računsko določena v tretjem delu. Vrednost reducirane prečne reaktance, ki jo potrebujemo v nadomestni vezavi je:

$$x'_{op2} = \frac{1}{y^2} \cdot x_{op2} = \frac{1}{y^2} [(1-y) y \cdot x_{op2r}] = \frac{1-y}{y} \cdot x_{op2r} \quad (36)$$

Kot je iz slike 10b razvidno, se deli tok sofaznega zaporedja sekundarne strani na dva dela: na tok \hat{i}_{oI} , ki teče preko y -tega dela navitja in na tok \hat{i}_{oII} , ki teče preko preostalega, $(1-y)$ -tega dela sekundarnega navitja.

Ker morata biti v nadomestni vezavi napetosti na sponkah 1-2 in na sponkah 3-4 med seboj enaki, dobimo vrednost te napetosti:

$$\hat{u}_o = \hat{z}'_{oyh} \cdot \hat{i}_{oI} - jx'_{op2} \cdot \hat{i}_{oII} = \hat{z}'_{o(1-y)n} \cdot \hat{i}_{oII} - jx'_{op2} \cdot \hat{i}_{oI} \quad (37)$$

Iz zgornje enačbe lahko določimo razmerje obeh tokov, katerega označimo z γ_4 in ki je:

$$\gamma_4 = \frac{|\hat{i}_{oI}|}{|\hat{i}_{oII}|} = \frac{|\hat{z}'_{o(1-y)n} + jx'_{op2}|}{|\hat{z}'_{oyh} + jx'_{op2}|} \quad (38)$$

Iz gornje enačbe in z upoštevanjem enačbe(33)dobimo vrednost toka sofaznega zaporedja v y -tem delu sekundarnega navitja:

$$|\hat{i}_{oI}| = |\hat{i}_{1r}| \frac{\gamma_4}{\gamma_4 + 1} \quad (39)$$

Vrednost celotne impedance sofaznega zaporedja dobimo, če delimo napetost \hat{u}_o z vsoto tokov \hat{i}_{oI} in \hat{i}_{oII} :

$$\hat{z}_{oA4} = \frac{\hat{u}_o}{\hat{i}_{oI} + \hat{i}_{oII}} = \frac{\hat{i}_{oI} \hat{z}'_{oyh} - \hat{i}_{oII} jx'_{op2}}{\hat{i}_{oI} + \hat{i}_{oII}} = \frac{\hat{z}'_{oyh} \cdot \hat{z}'_{o(1-y)n} + x'^2_{op2}}{\hat{z}'_{oyh} + \hat{z}'_{o(1-y)n} + 2j \cdot x'_{op2}} \quad (40)$$

Velikosti posameznih komponent tokov v fazi R v sekundarnem, kratkovezanem delu navitja dobimo pri nazivni napetosti kot recipročno vrednost vsote impedanc pozitivnega (\hat{z}_{1A}), negativnega (\hat{z}_{1a}) ter sofaznega zaporedja (\hat{z}_{0A1}). Vsoto vseh treh upornosti označimo z črko \hat{z}_{A4} .

Pri nazivni napetosti dobimo torej v dovodih naslednje toke:

$$\hat{i}_R = 2\hat{i}_{1R} = \frac{2}{\hat{z}_{A4}} \quad (41a)$$

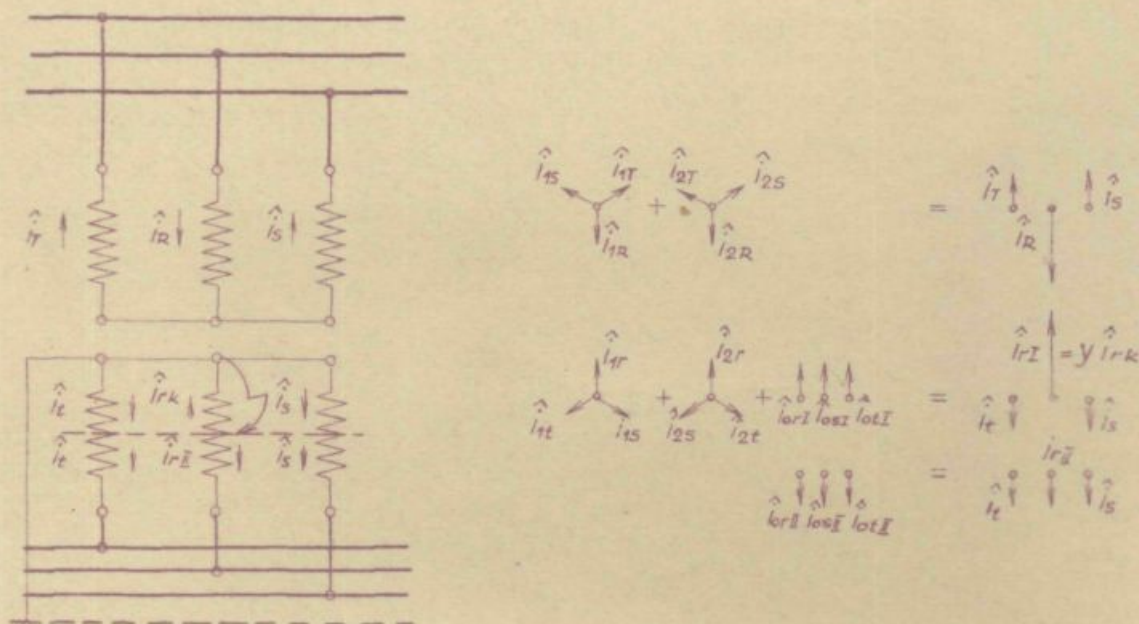
$$\hat{i}_S = \hat{i}_T = -\frac{\hat{i}_R}{2} \quad (41b)$$

V kratkovezanem delu navitja pa teče naslednji tok:

$$|\hat{i}_{kk}| = \frac{1}{\sqrt{3}} |2\hat{i}_{1r} + i_{0rI}| \approx \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{3V_4 + 2}{V_4 + 1} \cdot \frac{1}{|\hat{z}_{A4}|} \quad (42)$$

5. Transformator je med primarnim in na sekundarni strani vezan v zvezdo, zvezdišče na sekundarni strani ozemljeno

Na primarni strani transformatorja dobimo tudi v tem primeru isto razporeditev tokov kot pri prejšnji vezavi transformatorja in zato lahko tudi tu uporabimo enačbe (9), v katerih dobimo zvezo med faznimi tokovi in njih komponentami.

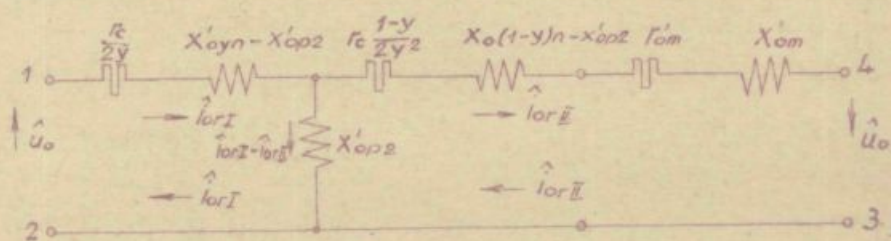


slika 11a

Na sekundarni strani transformatorja dobimo tokove v vseh treh fazah. Kot v prejšnjem primeru bomo tudi tu sekundarno navitje kot tudi toke v njem preko vseh treh faz razdelili na dva dela: na y -ti del navitja, ki je v fazi R kratkovezan, in v preostali, $(1-y)$ -ti del navitja. Ker je razporeditev tokov v navitju sekundarne strani podobna razporeditvi tokov v prej obravnavanem primeru, lahko tudi v tem primeru uporabimo enačbe (31) in (32).

Napram prej obravnavanem primeru pa nastopi razlika v tokih, ki tečejo iz sekundarne strani transformatorja v omrežje. Dočim v prejšnjem primeru ni sled ovojnega stika tekel nikak tok v omrežje na sekundarni strani transformatorja, dobimo v tem primeru v vseh treh fazah sofazne komponente toka, ki se nato preko sofaznih impedanc omrežja vračajo po ničlovodu v transformator.

Nadomestna vezava za sofazno zaporedje je podana na sliki 11b.



slika 11b

Od nadomestne vezave, ki je bila obravnavana v prejšnjem primeru, se vezava za ta primer razlikuje v tem,

da se poveča impedanca tokokroga, po katerem teče tok \hat{i}_{orI} , in sicer za impedanco nazivnega sofaznega zaporedja mreže \hat{z}'_{om} , izraženo z ozirom na impedanco nazivnega bremena sekundarne strani transformatorja. Kot impedanco praznega teka $(1-y)$ -tega dela navitja, bomo tudi impedanco mreže morali reducirati, to je deliti z y^2 . Reducirano vrednost impedance mreže bomo označili z \hat{z}'_{om} .

Impedanco sofaznega zaporedja določimo na podlagi nadomestne vezave. Njena vrednost je:

$$\hat{z}'_{0AS} = \frac{\hat{z}'_{0yn} (\hat{z}'_{0(1-y)n} + \hat{z}'_{om}) + X'_{op2}}{\hat{z}'_{0yn} + (\hat{z}'_{0(1-y)n} + \hat{z}'_{om}) + 2iX'_{op2}} \quad (43)$$

Toki sofaznega zaporedja se v niskonapetostnem navitju dele slično kot v prejšnjem primeru. Razmerje tokov, označimo ga z V_S , je:

$$V_S = \frac{|\hat{i}_{0\bar{I}}|}{|\hat{i}_{0\bar{II}}|} = \frac{(Z'_{0(1-\gamma)n} + Z'_{0n}) + jX'_{op2}}{Z'_{0yn} + X'_{op2}} \quad (44)$$

Pri nazivni napetosti na transformatorju dobimo velikosti pozitivne in negativne komponente tokov v fazi R na sekundarni strani kot recipročno vrednost vsote impedanc pozitivnega, negativnega in sofaznega zaporedja. To vsoto označimo z Z_{AS} .

Pri nazivni napetosti dobimo na primarni strani sledeča toka:

$$|\hat{i}_R| = 2|\hat{i}_{1R}| = \frac{2}{|Z_{AS}|} \quad (45a)$$

$$\hat{i}_S = \hat{i}_T = -\frac{\hat{i}_R}{2} \quad (45b)$$

V kratkovezanem delu navitja dobimo naslednjo vrednost toka:

$$|\hat{i}_{rk}| = \frac{1}{Y} |2\hat{i}_{1r} + \hat{i}_{0r\bar{I}}| \approx \frac{1}{Y} \cdot \frac{3V_S + 2}{V_S + 1} \cdot \frac{1}{|Z_{AS}|} \quad (46)$$

B. Transformator se napaja z nizkonapetostne strani, ovojni stik se nahaja na primarni, nizkonapetostni strani navitja

Da lahko uporabimo nadomestne vezave za sofazno impedanco, ki so bile obdelane v prvem delu tega poglavja z ozirom na nizkonapetostno navitje, bomo zato vzeli, da se transformator napaja z nizkonapetostne strani, pri čemer bomo obravnavali primer, da se nahaja ovojni stik na primarnem, nizkonapetostnem navitju faze R.

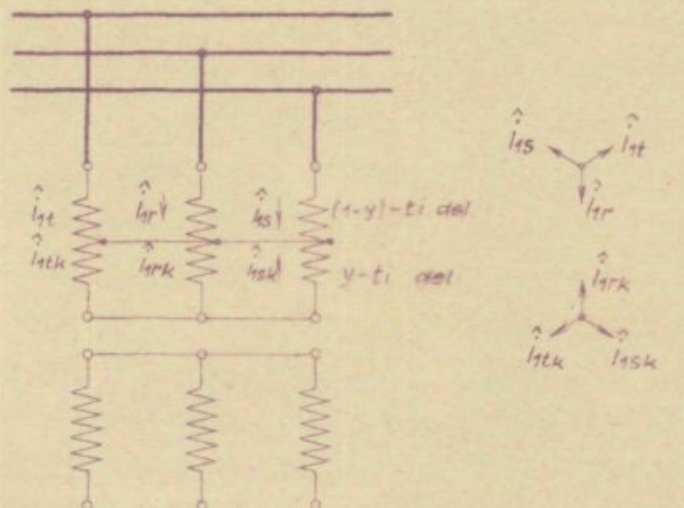
Primarno navitje kot tudi toke v njem bomo razdelili preko vseh treh faz na dva dela: na y -ti del navitja, ki je v fazi R kratkovezan, in na preostali, $(1-y)$ -ti del navitja.

Ker za izračun potrebujemo reducirane vrednosti tokov v y -tem delu navitja, bomo toke v tem delu navitja morali reducirati. Za sofazno zaporedje tokov je redukcijski faktor y , za pozitivno kot tudi za negativno zaporedje toka pa je potrebno, da reduciramo od y -tega dela navitja, ki je kratko vezan v fazi R, na $(1-y)$ -ti del navitja, redukcijski faktor je torej $y:(1-y)$.

Posledica različnih redukcijskih faktorjev za pozitivno in sofazno zaporedje je, da se z redukcijo spremeni tudi razmerje tokov sofaznega zaporedja napram tokom pozitivnega oz. negativnega zaporedja. Da pa ohranimo v risbah to razmerje pravilno, bomo risali kazalce tokov v primarnem delu navitja v nereduciranih vrednostih. Ker rišemo razmere pri 50 % ovojnem stiku ($y=0,5$), je redukcijski faktor za toke pozitivnega in negativnega zaporedja ravno 1, za toke sofaznega zaporedja pa je 0,5.

Ker sta razporeditev tokov in velikost impedanc pozitivnega oz. negativnega zaporedja neodvisni od obravnavanih vezav transformatorja, ju obravnavajmo skupno!

Če vežemo y-ti del niskonapetostnega navitja na kratko in če transformator napajamo z niskonapetostne strani s toki pozitivnega zaporedja $\hat{i}_{1r}, \hat{i}_{1s}, \hat{i}_{1t}$ (sl.12),



slika 12

dobimo v kratkovezanem delu navitja toke $\hat{i}_{1rk}, \hat{i}_{1sk}, \hat{i}_{1tk}$, ki so v razmerju $(1-y):y$ -krat večji od tokov v dovodu. Njih reducirane vrednosti, označimo jih z $\hat{i}_{1r}, \hat{i}_{1s}, \hat{i}_{1t}$, so:

$$\hat{i}_{1r} = \frac{y}{1-y} \hat{i}_{1rk} \quad (47a)$$

$$\hat{i}_{1s} = \frac{y}{1-y} \hat{i}_{1sk} \quad (47b)$$

$$\hat{i}_{1t} = \frac{y}{1-y} \hat{i}_{1tk} \quad (47c)$$

Če delimo fazno napetost primarne strani, izraženo z ozirom na nazivno napetost primarne strani transformatorja, s tokom te faze, prav tako izraženim z ozirom na nazivni tok primarne strani transformatorja, dobimo impedanco pozitivnega zaporedja kratkega stika, označimo jo z \hat{z}_{1B} , izraženo z ozirom na impedanco nazivnega bremena niskonapetostne strani transformatorja.

Ohmska komponenta te impedance je sestavljena iz ohmske upornosti $(1-y)$ -tega dela navitja in upornosti y -tega dela navitja. Z upoštevanjem v začetku poglavja navedenih predpostavk je ohmska upornost $(1-y)$ -tega dela navitja $(1-y)$ -kratna vrednost upornosti $r_c:2$. Ohmsko upornost y -tega dela navitja dobimo kot y -kratno vrednost upornosti $r_c:2$. Če vrednosti prve upornosti prištejemo reducirano vrednost druge upornosti, dobimo vrednost ohmske komponente impedance \hat{z}_{1B} :

$$r_{1B} = (1-y) \cdot \frac{r_c}{2} + y \cdot \left(\frac{1-y}{y}\right)^2 \frac{r_c}{2} = \frac{1-y}{y} \cdot \frac{r_c}{2} \quad (48)$$

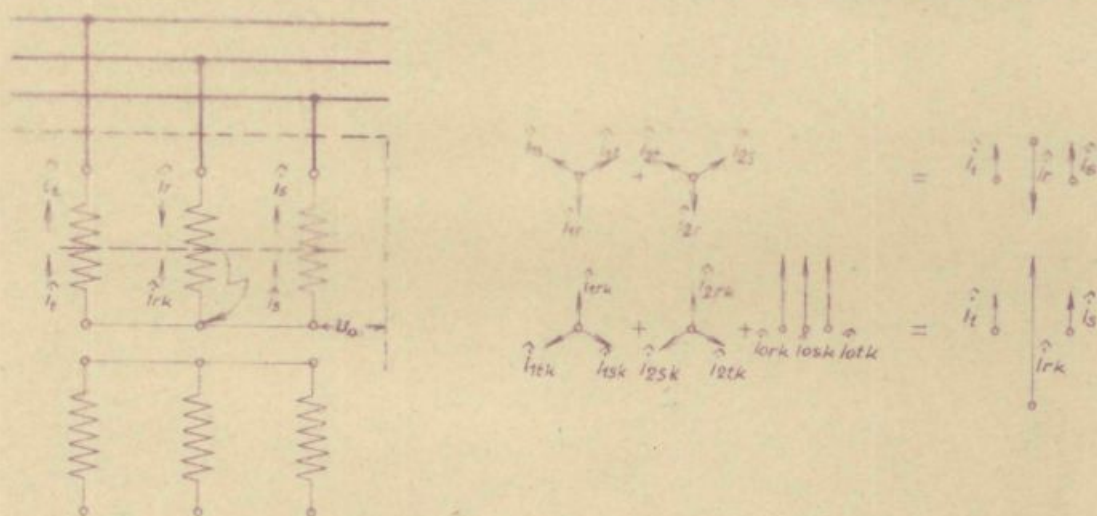
Induktivno komponento impedance z_{1b} , namreč reaktanco med $(1-y)$ -tim delom navitja in med y -tim delom navitja smo že obravnavali v prvem delu tega poglavja. Označili smo jo z znakom x_{1yn} , njeno reducirano vrednost pa smo označili z x_{1ynr} .

Nadomestna impedanca pozitivnega zaporedja je torej:

$$\hat{z}_{1b} = \frac{1-y}{y} \cdot \frac{r_c}{2} + j x_{1yn} = \frac{1-y}{y} \cdot \frac{r_c}{2} + (1-y)^2 \cdot j x_{1ynr} \quad (49)$$

1. Transformator je na primarni in na sekundarni strani vezan v zvezdo, zvezdišči nista ozemljeni

Kot že omenjeno bomo obravnavali ločeno tokove v y -tem delu navitja od tokov v $(1-y)$ -tem delu navitja.



slika 13a

V $(1-y)$ -tem delu navitja dobimo tokove v vseh treh fazah. Ker sta si toka v fazi S (\hat{i}_s) in v fazi T (\hat{i}_t), med seboj enaka, tok v fazi R (\hat{i}_r) pa je po iznosu enak vsoti tokov v fazah S in T, dobimo le komponente tokov pozitivnega in negativnega zaporedja. Zveze med faznimi tokovi in njih komponentami dobimo v naslednjih enačbah:

$$\hat{i}_r = \hat{i}_s + \hat{i}_t = 2\hat{i}_s \quad (50a)$$

$$\hat{i}_s = \hat{i}_{1s} + \hat{i}_{2s} = a^2 \hat{i}_{1r} + a \hat{i}_{1r} = -\hat{i}_{1r} \quad (50b)$$

$$\hat{i}_t = \hat{i}_{1t} + \hat{i}_{2t} = a \hat{i}_{1r} + a^2 \hat{i}_{1r} = -\hat{i}_{1r} \quad (50c)$$

V y-tem delu navitja dobimo toke \hat{i}_{rk} , \hat{i}_{sk} , \hat{i}_{tk} . Če jih razstavimo, dobimo komponente tokov pozitivnega (\hat{i}_{1rk} , \hat{i}_{1sk} , \hat{i}_{1tk}), negativnega (\hat{i}_{2rk} , \hat{i}_{2sk} , \hat{i}_{2tk}) in sofaznega zaporedja (\hat{i}_{ork} , \hat{i}_{osk} , \hat{i}_{otk}). Če fazne tokove izrazimo z njihovimi simetričnimi komponentami dobimo:

$$\hat{i}_{rk} = \hat{i}_{1rk} + \hat{i}_{2rk} + \hat{i}_{ork} \quad (51a)$$

$$\hat{i}_s = \hat{i}_{1sk} + \hat{i}_{2sk} + \hat{i}_{osk} \quad (51b)$$

$$\hat{i}_t = \hat{i}_{1tk} + \hat{i}_{2tk} + \hat{i}_{otk} \quad (51c)$$

Če komponente posameznih zaporedij tokov v y-tem delu navitja pomnožimo z že obravnavanimi reducijskimi faktorji, dobimo reducirane vrednosti komponent. Vrednosti komponent tokov faze R so:

$$\hat{i}_{1rk} = \frac{y}{1-y} \cdot \hat{i}_{1rk} \quad (52a)$$

$$\hat{i}_{2rk} = \frac{y}{1-y} \cdot \hat{i}_{2rk} \quad (52b)$$

$$\hat{i}_{ork} = y \cdot \hat{i}_{ork} \quad (52c)$$

Reducirane vrednosti komponent tokov vseh treh zaporedij faze R so si med seboj enake:

$$\hat{i}_{1rk} = \hat{i}_{2rk} = \hat{i}_{ork} \quad (53)$$

Ker mora biti vsota ampernih ovojev pozitivnega kot tudi negativnega zaporedja v y-tem in v (1-y)-tem delu navitja enaka nič, dobimo, da je pozitivno kot tudi negativno zaporedje tokov

v (1-y)-tem delu navitja po iznosu enako, a nasprotno usmerjeno kot ustrezno zaporedje reduciranih tokov v y-tem delu navitja. Za komponente tokov faze R torej velja:

$$\hat{i}_{1rI} = - \hat{i}_{1r} \quad (54a)$$

$$\hat{i}_{2rI} = - \hat{i}_{2r} \quad (54b)$$

Z upoštevanjem gornjih enačb dobimo velikost toka v kratkovezanem delu navitja:

$$\begin{aligned} \hat{i}_{rk} &= \hat{i}_{1rk} + \hat{i}_{2rk} + \hat{i}_{orrk} = \frac{1-y}{y} \hat{i}_{1rI} + \frac{1-y}{y} \hat{i}_{2rI} + \frac{1}{y} \hat{i}_{orI} = \quad (55) \\ &= \left(\frac{1-y}{y} + \frac{1-y}{y} + \frac{1}{y} \right) \hat{i}_{1r} = \frac{3-2y}{y} \hat{i}_{1r} \end{aligned}$$

Za določitev velikosti tokov je potrebno poznati velikosti impedanc vseh treh zaporedij. Vrednost reducirane impedance pozitivnega oziroma negativnega zaporedja smo določali v začetku tega dela (enačba 49). Impedanco sofaznega zaporedja za ta primer smo tudi že obravnavali. Označili smo jo z z'_{oyn} (enačba 13c).

Pri nazivni napetosti dobimo vrednosti komponent posameznih zaporedij kot recipročno vrednost impedance \hat{z}_{B1} , ki je enaka vsoti impedanc pozitivnega, negativnega in sofaznega zaporedja. Vrednost komponente toka pozitivnega zaporedja je torej:

$$|\hat{i}_{1r}| = \frac{1}{|2\hat{z}_{1B} + \hat{z}'_{oyn}|} = \frac{1}{|\hat{z}_{B1}|} \quad (56)$$

Pri nazivni napetosti dobimo naslednje toke v dovodih:

$$|\hat{i}_r| = 2|\hat{i}_{1r}| = \frac{2}{|\hat{z}_{B1}|} \quad (57a)$$

$$\hat{i}_s = \hat{i}_t = -\frac{\hat{i}_r}{2} \quad (57b)$$

Tok v kratkovezanem delu navitja pa je z upoštevanjem enačbe (55) in (56):

$$|\hat{i}_{rk}| = \frac{3-2\gamma}{\gamma} \cdot \frac{1}{|Z_{B1}|} \quad (57c)$$

V nadaljnjih izvajanjih bomo določili napetost med zvezdiščem transformatorja in med zvezdiščem zunanjega napetostnega sistema. Radi večje preglednosti bomo obravnavali ločeno napetost med zvezdiščema, ki se pojavi zaradi ohmskih padcev napetosti, od napetosti med zvezdiščema, ki nastopi zaradi induktivnih padcev napetosti.

Najprej si oglejmo napetost med zvezdiščema, ki nastopi zaradi induktivnih padcev napetosti.

Padci napetosti, ki jih povzročajo toki sofaznega zaporedja v γ -tem delu navitja, so:

$$\hat{u}_{or1} = \hat{i}_{ork} \cdot j \cdot X_{oyn} \quad (58)$$

Napetost \hat{u}_{or2} , ki jo inducirajo toki sofaznega zaporedja v $(1-\gamma)$ -tem delu navitja, dobimo, če pomnožimo tok sofaznega zaporedja s prečno reaktanco X_{op2} (enačba 36):

$$\hat{u}_{or2} = \hat{i}_{ork} \cdot j \cdot X_{op2} \quad (59)$$

Če napetosti \hat{u}_{or1} prištejemo napetost \hat{u}_{or2} , dobimo iskano napetost \hat{u}_{ori} med zvezdiščem transformatorja in zvezdiščem zunanjega sistema:

$$\hat{u}_{ori} = \hat{u}_{or1} + \hat{u}_{or2} = \hat{i}_{ork} \cdot j \cdot (X_{oyn} + X_{op2}) \quad (60a)$$

Če izrazimo tok \hat{i}_{ork} in reaktanci X_{oyn} in X_{op2} z njihovimi reduciranimi vrednostmi, dobi gornja enačba naslednjo obliko:

$$\hat{u}_{ori} = \frac{1}{\gamma} \cdot \hat{i}_{or1} \cdot j \cdot [X'_{oyn} \gamma^2 + X_{op2r} \gamma (1-\gamma)] = \hat{i}_{or1} \cdot j \cdot [X'_{oyn} \gamma + X_{op2r} (1-\gamma)] \quad (60b)$$

Pri nazivni pritisnjeni napetosti pa dobimo napetost med zvezdiščema v naslednji enačbi:

$$|\hat{u}_{ori}| = \frac{A}{|Z_{01}|} \cdot [X'_{0yn} \gamma + X_{0p2r} (1-\gamma)] \quad (60c)$$

Določitev napetosti med zvezdiščema transformatorja in zunanjega sistema zaradi ohmskih padcev napetosti bomo izvedli iz wattnih izgub, ki jih mora kriti napetost, pritisnjena na $(1-\gamma)$ -ti del navitja faze R, ter izgub, ki jih morata kriti napetosti pritisnjeni na celotno primarno navitje faze S oz. faze T.

Pri toku $\hat{i}_r = 2\hat{i}_s$ skozi zdravo navitje faze R se izgube v $(1-\gamma)$ -tem delu navitja:

$$W_{(1-\gamma)} = (2\hat{i}_s)^2 (1-\gamma) \frac{r_r}{2} \quad (61)$$

Izgube pri toku \hat{i}_s v celotnem primarnem navitju faze S pa tudi faze T so:

$$W_s = \hat{i}_s^2 \frac{r_s}{2} \quad (62)$$

Tok v kratkovezanem delu navitja faze R je v tem primeru \hat{i}_{rk} . Če vstavimo za \hat{i}_{rk} vrednost, določeno v enačbi (55), za upornost tega navitja pa vrednost $(\gamma \cdot r_c) : 2$, dobimo naslednje wattne izgube v kratkovezanem delu navitja:

$$W_\gamma = \hat{i}_{rk}^2 \cdot \gamma \cdot \frac{r_c}{2} = \left(\frac{3-2\gamma}{\gamma}\right)^2 \cdot \hat{i}_s^2 \cdot \gamma \cdot \frac{r_c}{2} = \frac{r_c}{2} \cdot \frac{(3-2\gamma)^2}{\gamma} \cdot \hat{i}_s^2 \quad (63)$$

Te izgube morajo prevzeti vsa ostala primarna navitja. Predpostavimo, da se magnetni pretok skozi kratkovezani del navitja, ki povzroča za premagovanje ohmskih upornosti kratkovezanega dela navitja potrebno napetost, sklepa vse skozi po železnem jedru transformatorja. V kolikor je ta predpostavka izpolnjena, prevzamejo kritje izgub kratkovezanega dela navitja $(1-\gamma)$ -ti del navitja faze R na eni strani ter celotno primarno navit-

je faz S in T na drugi strani in to sorazmerno ampernim ovojem teh navitij. $(1-y)$ -ti del navitja faze R prevzame od izgub v kratkovezanem delu navitja ε -ti del pri čemer je ε :

$$\varepsilon = \frac{2 \hat{i}_s (1-y)}{2 \hat{i}_s (1-y) + \hat{i}_s} = \frac{2-2y}{3-2y} \quad (64)$$

Če temu delu izgub prištejemo še izgube v $(1-y)$ -tem delu navitja, dobimo:

$$\begin{aligned} W_{rc} &= W_{(1-y)} + \varepsilon \cdot W_y = (2 \hat{i}_s)^2 \cdot (1-y) \cdot \frac{r_c}{2} + \frac{2-2y}{3-2y} \cdot \frac{(3-2y)^2}{y} \cdot \hat{i}_s^2 \cdot \frac{r_c}{2} = \\ &= 6 \cdot \frac{1-y}{y} \cdot \frac{r_c}{2} \cdot \hat{i}_s^2 \end{aligned} \quad (65)$$

Od izgub v kratkovezanem delu navitja prevzame primarno navitje faze S naslednjo vrednost:

$$W_{sk} = \frac{1}{2} (1-\varepsilon) W_y = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{3-2y} \cdot W_y \quad (66)$$

Če tej vrednosti prištejemo še izgube v samem navitju faze S, (enačba 62), dobimo:

$$W_{sc} = W_{sk} + W_s = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{3-2y} \cdot \frac{(3-2y)^2}{y} \hat{i}_s^2 \frac{r_c}{2} + \hat{i}_s^2 \frac{r_c}{2} = \frac{3}{2y} \cdot \frac{r_c}{2} \hat{i}_s^2 \quad (67)$$

Če delimo v enačbah (65) in (67) dobljene vrednosti izgub s tokom, ki teče skozi ustrezno navitje, dobimo ohmske padce napetosti, ki jih morajo kriti na posamezne faze pritisnjene napetosti:

$$\hat{U}_r = \frac{W_{rc}}{2 \hat{i}_s} = 3 \cdot \frac{1-y}{y} \cdot \frac{r_c}{2} \hat{i}_s \quad (68a)$$

$$\hat{U}_s = \hat{U}_t = \frac{W_{sc}}{\hat{i}_s} = \frac{3}{2y} \cdot \frac{r_c}{2} \hat{i}_s \quad (68b)$$

Če iz enačh (68) poiščemo sofazno zaporedje padcev napetosti, dobimo iskano premaknitev zvezdišča transformatorja napram zvezdišču sistema:

$$\hat{U}_{ow} = \frac{2\hat{U}_s + \hat{U}_r}{3} = \frac{r_c}{2} \left(\frac{1}{\gamma} - \frac{1-\gamma}{\gamma} \right) \hat{i}_s = \frac{r_c}{2} \hat{i}_s^2 \quad (69)$$

Pri nazivni pritisnjeni napetosti dobimo med zvezdiščema torej sledečo napetost:

$$|\hat{U}_{ow}| = \frac{r_c}{2} |\hat{i}_{1r}| = \frac{r_c}{2} \frac{1}{|Z_{B1}|} \quad (70)$$

Celotna napetost med zvezdiščema je torej:

$$|\hat{U}_0| = |\hat{U}_{or1} + \hat{U}_{ow}| = \left| \frac{r_c}{2} + i \left[X'_{0yn} \cdot \gamma + X_{0p2r} (1-\gamma) \right] \right| \frac{1}{|Z_{B1}|} \quad (71)$$

2. Transformator je na primarni in na sekundarni strani vezan v zvezdo, zvezdišče je na sekundarni strani ozemljeno

Na primarni strani je razporeditev tokov v navitjih ista kot v prejšnjem primeru in zato lahko tudi tu uporabimo enačbe 50-55.

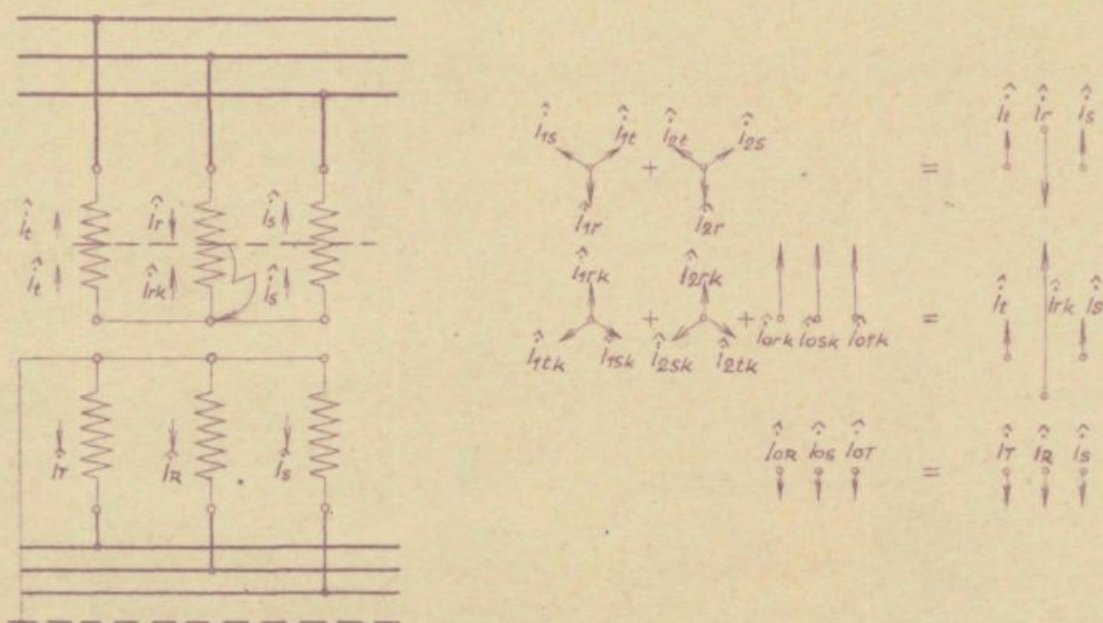
Na sekundarni strani dobimo v vseh treh fazah le toke sofaznega zaporedja (\hat{i}_{or} , \hat{i}_{os} , \hat{i}_{ot}), ki se sklepajo preko impedanc sofaznega zaporedja zunanje mreže in se po ničlovodu vračajo v transformator.

Impedance vseh treh zaporedij, katere rabimo za določitev tokov, smo že obravnavali. Impedanco pozitivnega oz. negativnega zaporedja \hat{z}_{1B} dobimo v enačbi (49). Nadomestna vezava za impedanco sofaznega zaporedja je narisana na sl.8b, njena vrednost pa je določena v enačbi (20).

Pri nazivni napetosti dobimo vrednosti komponent tokov posameznih zaporedij v primarnem navitju kot recipročno vrednost vsote impedanc pozitivnega, negativnega in sofaznega zaporedja:

$$|\hat{i}_{1r}| = \frac{1}{|2\hat{z}_{1B} + \hat{z}_{0A2}|} = \frac{1}{|Z_{B2}|} \quad (72)$$

Z upoštevanjem zgoraj navedenih enačb dobimo pri nazivni na-



Slika 14

petosti sledeče toke v dovodih:

$$|\hat{i}_r| = 2|\hat{i}_H| = \frac{2}{|Z_{B2}|} \quad (73a)$$

$$\hat{i}_s = \hat{i}_t = -\hat{i}_r : 2 \quad (73b)$$

Tok v kratkovezanem delu navitja pa je:

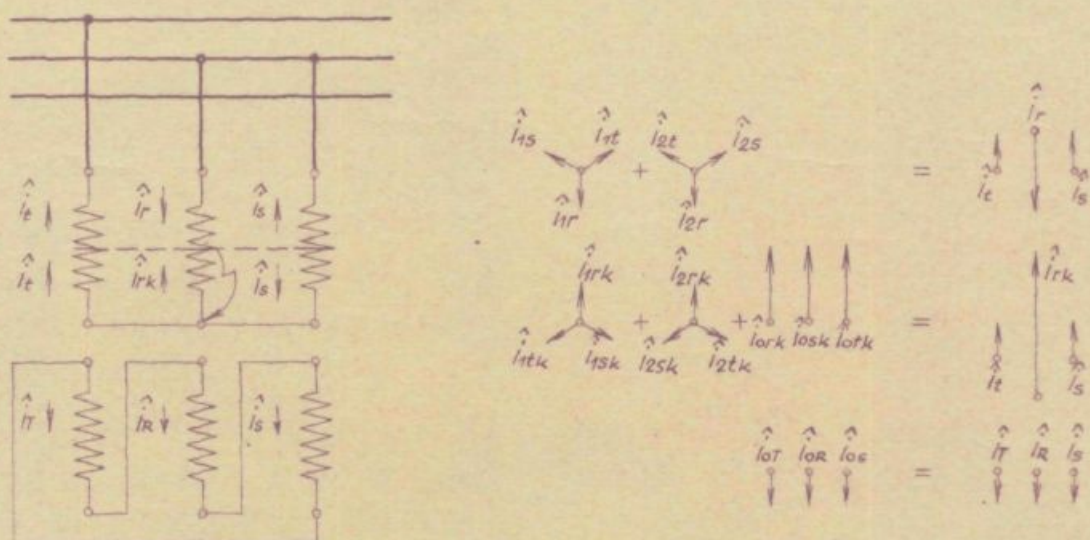
$$|\hat{i}_{rk}| = \frac{3-2\gamma}{\gamma} \cdot \frac{1}{|Z_{B2}|} \quad (73c)$$

Razmerje med reduciranimi vrednostmi komponent sofaznega zaporedja na primarni strani in med komponentami tokov sofaznega zaporedja na sekundarni strani smo označili z V_2 (enačba 22). Vrednost tokov na sekundarni strani navitja dobimo pri pritisknji nazivni napetosti v naslednji enačbi:

$$|\hat{i}_{or}| = V_2 |\hat{i}_{or}| = \frac{X'_{op}}{X_{ov} + X_{on}} \frac{1}{|Z_{B2}|} \quad (74)$$

3. Transformator je na primarni strani vezan v zvezdo, na sekundarni pa v trikot. Zvezdišče ni ozemljeno.

Razporeditev tokov v navitjih je pri tej vezavi enaka kot v



slika 15

prejšnjem primeru.

Če vstavimo za impedanco sofaznega zaporedja mreže vrednost nič, lahko uporabimo vse, v prejšnjem poglavju uporabljene enačbe tudi za ta primer.

4. Transformator je na primarni strani vezan v trikot, na sekundarni strani pa v zvezdo. Zvezdišče ni ozemljeno

Kot pri prejšnjih vezavah bomo obravnavali tudi tu ločeno tokove v y-tem delu navitja od tokov v (l-y)-tem delu navitja.

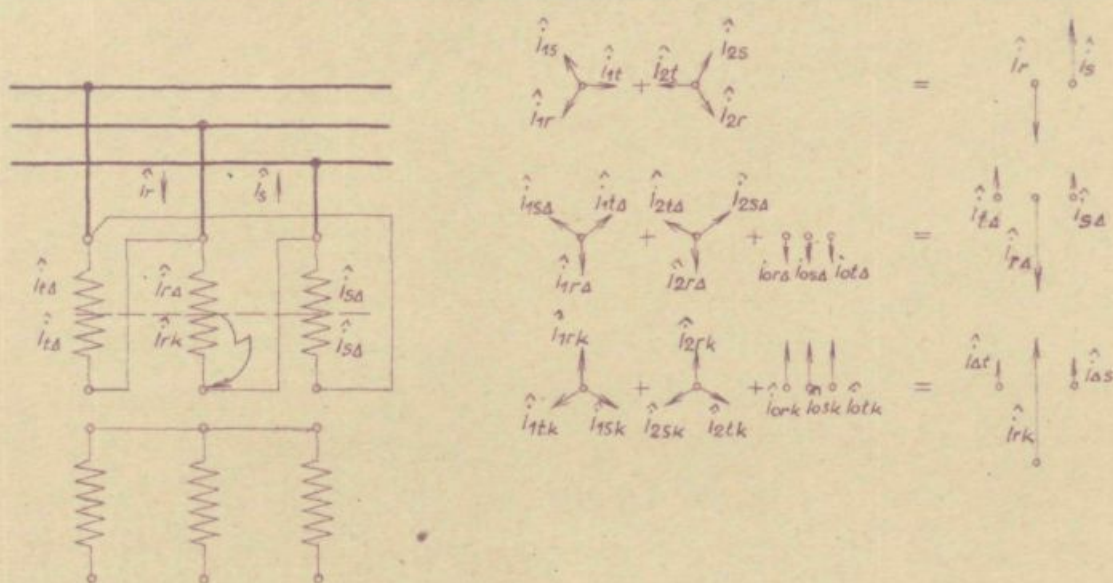
V y-tem delu navitja dobimo tokove \hat{i}_{rk} , \hat{i}_{sk} , \hat{i}_{tk} . Pri razstavitvi tokov na njih simetrične komponente, dobimo komponente pozitivnega (\hat{i}_{1rk} , \hat{i}_{1sk} , \hat{i}_{1tk}), negativnega (\hat{i}_{2rk} , \hat{i}_{2sk} , \hat{i}_{2tk}) in sofaznega zaporedja (\hat{i}_{or} , \hat{i}_{os} , \hat{i}_{ot}). Med faznimi tokovi in njih komponentami obstojajo sledeča razmerja:

$$\hat{i}_{rk} = \hat{i}_{1rk} + \hat{i}_{2rk} + \hat{i}_{or} = 2\hat{i}_{1rk} + \hat{i}_{or} \quad (75a)$$

$$\hat{i}_{s0} = \hat{i}_{1sk} + \hat{i}_{2sk} + \hat{i}_{0sk} = \alpha^2 \hat{i}_{1rk} + \alpha \hat{i}_{1rk} + \hat{i}_{0rk} = -\hat{i}_{1rk} + \hat{i}_{0rk} \quad (75b)$$

$$\hat{i}_{t0} = \hat{i}_{1tk} + \hat{i}_{2tk} + \hat{i}_{0tk} = \alpha \hat{i}_{1rk} + \alpha^2 \hat{i}_{1rk} + \hat{i}_{0rk} = -\hat{i}_{1rk} + \hat{i}_{0rk} \quad (75c)$$

Če komponente tokov posameznih zaporedij pomnožimo z ustrež-



Slika 16

nimi redukcijskimi faktorji, dobimo:

$$\hat{i}_{1r0} = \frac{y}{1-y} \cdot \hat{i}_{1rk} \quad (76a)$$

$$\hat{i}_{2r0} = \frac{y}{1-y} \cdot \hat{i}_{2rk} \quad (76b)$$

$$\hat{i}_{0r0} = y \cdot \hat{i}_{0rk} \quad (76c)$$

V $(1-y)$ -tem delu navitja dobimo tokove \hat{i}_{r0} , \hat{i}_{s0} , \hat{i}_{t0} . Tudi te razstavimo na njih simetrične komponente pozitivnega (\hat{i}_{1r0} , \hat{i}_{1s0} , \hat{i}_{1t0}), negativnega (\hat{i}_{2r0} , \hat{i}_{2s0} , \hat{i}_{2t0}) in sofaznega zaporedja. Med faznimi tokovi in njihovimi komponentami obstojajo sledeča razmerja:

$$\hat{i}_{r0} = \hat{i}_{1r0} + \hat{i}_{2r0} + \hat{i}_{0r0} = 2\hat{i}_{1r0} + \hat{i}_{0r0} \quad (77a)$$

$$\hat{i}_{s0} = \hat{i}_{1s0} + \hat{i}_{2s0} + \hat{i}_{0s0} = \alpha^2 i_{1rs} + \alpha i_{1rs} + i_{0rs} = -i_{1rs} + i_{0rs} \quad (77b)$$

$$\hat{i}_{t0} = \hat{i}_{1t0} + \hat{i}_{2t0} + \hat{i}_{0t0} = \alpha i_{1rs} + \alpha^2 i_{1rs} + i_{0rs} = -i_{1rs} + i_{0rs} \quad (77c)$$

Ker mora biti tok \hat{i}_{s0} v navitju faze S v y-tem delu navitja in v (1-y)-tem delu navitja enak, dobimo iz enačb (75b) in (77b), da je vsota reduciranih vrednosti tokov sofaznega zaporedja v y-tem delu in v (1-y)-tem delu po iznosu ravno enaka pozitivnem zaporedju tokov v (1-y)-tem delu navitja:

$$\hat{i}_{1rs} = \gamma (\hat{i}_{0rk} + \hat{i}_{0rs}) \quad (78)$$

Impedanca za pozitivno oz. negativno zaporedje \hat{z}_{1s} je določena v enačbi (49). Nadomestna vezava za impedanco sofaznega zaporedja \hat{z}_{0rk} je podana na risbi 10b, njena vrednost pa določena v enačbi (40). Pri nazivni napetosti dobimo vrednosti reduciranih komponent tokov pozitivnega oz. negativnega zaporedja kot recipročno vrednost vsote impedanc pozitivnega, negativnega in sofaznega zaporedja. To vsoto označimo s \hat{z}_{B4} .

Z upoštevanjem enačb (77) in (27) dobimo pri nazivni napetosti naslednje toke v dovodih:

$$|\hat{i}_r| = \sqrt{3} |\hat{i}_{1r}| = \sqrt{3} \frac{1}{|\hat{z}_{B4}|} \quad (79)$$

Razmerje tokov sofaznega zaporedja v y-tem delu navitja (\hat{i}_{0rk}) in tokov sofaznega zaporedja v (1-y)-tem delu navitja (\hat{i}_{0rs}) označeno s v_4 , določa že obravnavana enačba (38). Z upoštevanjem te enačbe in enačb (75) dobimo v kratkovezanem delu navitja naslednji tok:

$$\begin{aligned} |\hat{i}_{rk}| &= 12 \hat{i}_{1rk} - \hat{i}_{0rk} = 12 \cdot \frac{1-y}{\gamma} \hat{i}_{1rs} + \frac{1}{\gamma} \hat{i}_{0rs} = 12 \cdot \frac{1-y}{\gamma} \hat{i}_{1rs} + \frac{1}{\gamma} \frac{v_4}{v_4+1} \hat{i}_{1rs} \\ &= \frac{2 + 3v_4 - 2\gamma - 2v_4\gamma}{\gamma(v_4+1)} \frac{1}{|\hat{z}_{B4}|} \end{aligned} \quad (80)$$

5. Transformator je na primarni in na sekundarni strani vezan v zvezdo, zvezdišče je na primarni strani ozemljeno

Razporeditev tokov je v tem primeru podobna kot pri prej obravnavani vezavi.

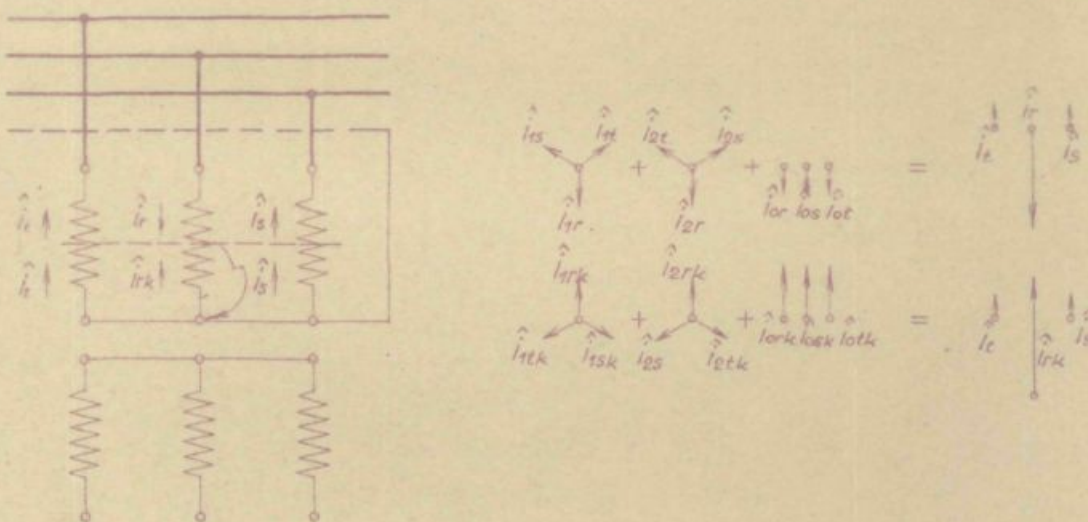
Če toke $\hat{i}_r, \hat{i}_s, \hat{i}_t$ v dovodu razstavimo, dobimo pozitivno zaporedje $(\hat{i}_{1r}, \hat{i}_{1s}, \hat{i}_{1t})$, negativno $(\hat{i}_{2r}, \hat{i}_{2s}, \hat{i}_{2t})$ in sofazno zaporedje $(\hat{i}_{0r}, \hat{i}_{0s}, \hat{i}_{0t})$. Med faznimi tokovi in komponentami njihovih zaporedij dobimo zvezo v naslednjih enačbah:

$$\hat{i}_r = \hat{i}_{1r} + \hat{i}_{2r} + \hat{i}_{0r} = 2\hat{i}_{1r} + \hat{i}_{0r} \quad (81a)$$

$$\hat{i}_s = \hat{i}_{1s} + \hat{i}_{2s} + \hat{i}_{0s} = a^2\hat{i}_{1r} + a\hat{i}_{1r} + \hat{i}_{0r} = -\hat{i}_{1r} + \hat{i}_{0r} \quad (81b)$$

$$\hat{i}_t = \hat{i}_{1t} + \hat{i}_{2t} + \hat{i}_{0t} = a\hat{i}_{1r} + a^2\hat{i}_{1r} + \hat{i}_{0r} = -\hat{i}_{1r} + \hat{i}_{0r} \quad (81c)$$

Zvezo med toki v y-tem delu navitja $\hat{i}_{rk}, \hat{i}_s, \hat{i}_t$ in med njihovimi simetričnimi komponentami dobimo v enačbah (51) do (55).



slika 17

Impedance vseh treh zaporedij, ki jih rabimo za izračun tokov, smo že obravnavali. Impedanco pozitivnega zaporedja \hat{z}_{4B} dobimo v enačbi (49). Nadomestna vezava za impedanco sofaznega zapo-

redja \hat{z}_{OAS} je podana v sliki 11b. Njeno vrednost pa dobimo v enačbi (43).

Ker je vrednost reduciranih komponent tokov pozitivnega in negativnega zaporedja pri nazivni napetosti enaka recipročni vrednosti vsote impedanc pozitivnega, negativnega in sofaznega zaporedja \hat{z}_{OAS} , dobimo pri nazivni napetosti sledeče toke v dovodih:

$$|\hat{i}_r| = |2\hat{i}_{tr} - \hat{i}_{or}| = \left[2 + \frac{1}{(V_S + 1)Y} \right] \frac{1}{|2\hat{z}_{18} + \hat{z}_{OAS}|} = \left[2 + \frac{1}{(V_S + 1)Y} \right] \frac{1}{|\hat{z}_{B5}|} \quad (82a)$$

$$|\hat{i}_s| = |\hat{i}_t| = |\hat{i}_{tr} - \hat{i}_{or}| = \left[1 - \frac{1}{(V_S + 1)Y} \right] \frac{1}{|\hat{z}_{B5}|} \quad (82b)$$

Tok v kratkovezanem delu navitja pa je:

$$|\hat{i}_{rh}| = \frac{2 + 3V_S - 2Y - 2V_S Y}{Y(V_S + 1)} \cdot \frac{1}{|\hat{z}_{B5}|} \quad (83)$$

IZRAČUNI REAKTANC POZITIVNEGA IN SOFAZNEGA ZAPOREDJA

Kot sledi iz drugega poglavja potrebujemo za določitev tokov in napetosti pri ovojnem stiku večje število reaktanc, ki jih je pri gotovem transformatorju precej težko izmeriti.

Vrednosti teh reaktanc so kot že omenjeno odvisne od izvedbe transformatorja, od tega kje se kratkovezani del navitja v transformatorju nahaja, in od tega kolika je višina kratkovezanega dela navitja, nekoliko pa je vrednost reaktanc odvisna tudi od debeline navitij.

Vrednosti vseh potrebnih reaktanc bomo določili zato za različne višine kratkovezanega navitja kot tudi za različna mesta, kjer naj se kratkovezano navitje nahaja. V izračunih ne bomo upoštevali debeline navitij, predpostavili bomo namreč, da so navitja tenka in da polja v navitjih ni potrebno upoštevati, poenostavitev, ki precej olajša izračun a ne povzroča prevelike napake.

Izračun reaktanc bomo izvedli za primer, da ima vsako navitje le po en ovoj, vrednosti dobljenih reaktanc so torej reaktance, reducirane na en ovoj.

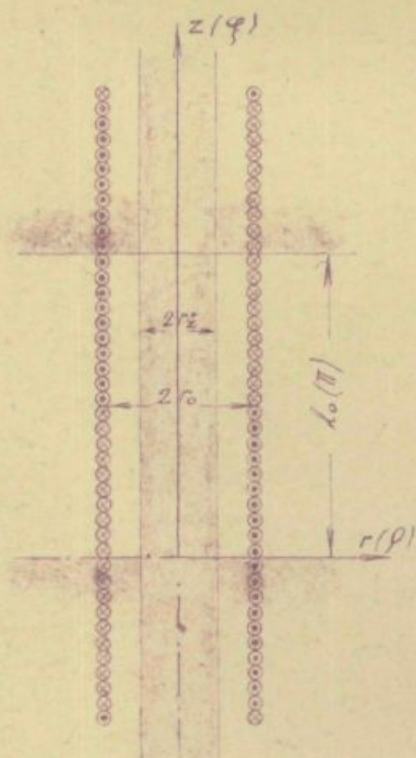
V naslednjih izvajanjih bomo določili reaktanco kratkega stika pozitivnega zaporedja in reaktanco praznega teka ter prečno reaktanco sofaznega zaporedja, reaktance iz katerih lahko določimo po enačbah prejšnjega poglavja toke in napetosti pri ovojnem stiku v transformatorju poljubne vezave.

Izračun reaktanc kratkega stika pozitivnega zaporedja

Izračun reaktance kratkega stika pri transformatorjih je v avtorju poznani literaturi izveden izključno z dvodimenzionalno obravnavo, v glavnem po Kappu in Rogowskem. Taka poenostavitev ne prinaša večjih napak pri transformatorjih, pri katerih iščemo reaktanco kratkega stika med celotnim primarnim in celotnim sekundarnim navitjem, ki sta si sorazmerno blizu.

Pri določitvi reaktance pozitivnega zaporedja pri kratkih stikih med ovoji, med celotnim napajanim navitjem in med sorazmerno malim kratkovezanim delom navitja povzroča poenostavitev z dvodimenzionalno obravnavo občutno večje netočnosti. Zato bomo izvedli izračun reaktanc kratkega stika pozitivnega zaporedja trodimenzionalno.

Problem si bomo poenostavili tako, da bo matematično rešljiv. Obravnavali bomo zato primer, da imamo na valju s polmerom r_0 navito sorazmerno tanko navitje. Dolžino celotnega navitja označimo z l_0 , navitje pa naj sega na obeh straneh do železne plošče z neskončno permeabilnostjo.



Slika 18

Najprej obravnavajmo primer, da je gornjih 50 % navitja napajanih s tokom v eni smeri, spodnjih 50 % navitja pa s tokom v obratni smeri (sl.18). Ker imamo na obeh straneh navitja železo, se tokovna obloga na valju ob železu zrcali. Vsled tega dobimo med ploščama enako magnetno polje kot v primeru, da imamo neskončno dolg valj s tokovno oblogo enakega iznosa vzdolž vsega valja, smer toka pa se vzdolž osi spreminja na vsakih l_0 metrov dolžine.

Če v valj s tokovno oblogo namestimo še železni valj s polmerom r_z , katerega permeabilnost naj bo tudi neskončno velika, dobimo razmere, ki so precej slične dejanskemu stanju, so pa tudi matematično rešljive. Za ta primer bomo določili vrednost magnetnega polja v prostoru, iz nje pa izračunali magnetno energijo. Iz dobljene magnetne energije in danega vzbujanja bomo določili iskano reaktanco kratkega stika.

Določimo najprej magnetno polje, ki ga ustvarja tokovna obloga z amplitudo A_1 , ki se v smeri osi valja spreminja po sinusu in to, če v sredini ni železnega jedra!

Magnetno polje neskončno dolgega valja s polmerom r_0 s tokovno oblogo, katere velikost se v smeri osi spreminja po sinusu, določimo v prostoru, kjer ni toka, s pogojem, da je Laplace magnetnega potenciala φ enak nič. V valjnih koordinatah ψ, r, z dobi ta pogoj sledečo obliko:

$$\Delta \varphi = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \psi^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

Ker se tokovna obloga po obodu valja ne spreminja, je tudi odvod magnetnega potenciala po ψ -ju enak nič. Ker se enako kot tokovna obloga spreminja tudi potencial φ v smeri z -koordinata po sinusnem zakonu, je drugi odvod potenciala φ po z -ju enak negativni vrednosti potenciala φ . V tem primeru dobi gornja enačba naslednjo obliko:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial r} - \varphi = 0 \quad (2)$$

Ker se vrednost potenciala φ spreminja v smeri z -osi po sinusu, bomo vzeli mesto koordinate z koordinato ξ , katere vrednost naj bo:

$$\xi = z \cdot \frac{\pi}{l_0} \quad (3)$$

Mesto koordinate r pa vzemimo koordinato ρ , ki naj bo:

$$\rho = r \cdot \frac{\pi}{l_0} \quad (4)$$

Če razrešimo diferencialno enačbo (2), dobimo v koordinatah ξ, ρ vrednost magnetnega potenciala v samem valju:

$$\varphi_I = k_1 \cdot J_0(j\rho) \cdot \sin \xi + k'_1 \cdot K_0(j\rho) \cdot \sin \xi \quad (5a)$$

pri čemer sta k_1 in k'_1 konstanti, $J_0(j\rho)$ je modificirana Besselova funkcija prvega reda, $K_0(j\rho)$ pa je modificirana Besselova funkcija drugega reda.

Iz robnega pogoja, da naj ima potencial φ_I v sredini valja ($\rho = 0$) končno vrednost, dobimo, da je vrednost konstante k'_1 enaka nič. *Malo več napisati o J_0 in K_0 , da pomenljivo pokaže $k'_1 = 0$.*

Slično dobimo vrednost magnetnega potenciala v prostoru izven valja v naslednji enačbi: *povedati pomenj*

$$\varphi_{II} = k_2 \cdot K_0(j\rho) \cdot \sin \xi + k'_2 \cdot J_0(j\rho) \cdot \sin \xi \quad (5b)$$

pri čemer sta k_2 in k'_2 konstanti.

Iz robnega pogoja, da naj se vrednost magnetnega potenciala z večanjem ρ -ja v neskončnost približuje vrednosti nič, dobimo, da je vrednost konstante k'_2 enaka nič.

Komponento magnetne poljske jakosti v smeri ξ koordinate, ki jo označimo z H_ξ , dobimo kot negativno vrednost odvoda magnetnega potenciala po ξ -ju. Za prostor v valju dobimo:

$$H_{\xi I} = - \frac{\partial \varphi_I}{\partial \xi} = - k_1 \cdot J_0(j\rho) \cdot \cos \xi \quad (6a)$$

Za prostor izven valja pa dobimo naslednjo komponento magnetne poljske jakosti v smeri ξ osi:

$$H_{\xi II} = - \frac{\partial \varphi_{II}}{\partial \xi} = - k_2 \cdot K_0(j\rho) \cdot \cos \xi \quad (6b)$$

Komponento magnetne poljske jakosti v smeri ρ -ja, označimo jo

z H , dobimo kot negativno vrednost odvoda magnetnega potenciala, določenega z enačbo (5), po φ -ju. Za prostor v valju dobimo:

$$H_{\varphi I} = - \frac{\delta \varphi_I}{\delta \varphi} = - k_1 J'_0(i\varphi) \cdot \sin \xi \quad (7a)$$

pri čemer je $J'_0(i\varphi)$ odvod Besselove funkcije prvega reda po φ -ju.

V prostoru izven valja s tokovno oblogo pa dobimo:

$$H_{\varphi II} = - \frac{\delta \varphi_{II}}{\delta \varphi} = - k_2 K'_0(i\varphi) \cdot \sin \xi \quad (7b)$$

pri čemer je $K'_0(i\varphi)$ odvod Besselove funkcije drugega reda po φ -ju. K'_0 ima za vse vrednosti φ -ja negativno vrednost.

Vrednosti koeficientov k_1 in k_2 dobimo iz dveh pogojev, namreč:

da se komponenta magnetne poljske jakosti v smeri φ -ja pri prehodu skozi valj, na katerem se nahaja tokovna obloga, ne spremeni. Če vstavimo v enačbi (7a) in (7b) za vrednost φ_0 , si morata biti vrednosti obeh enačb enaki:

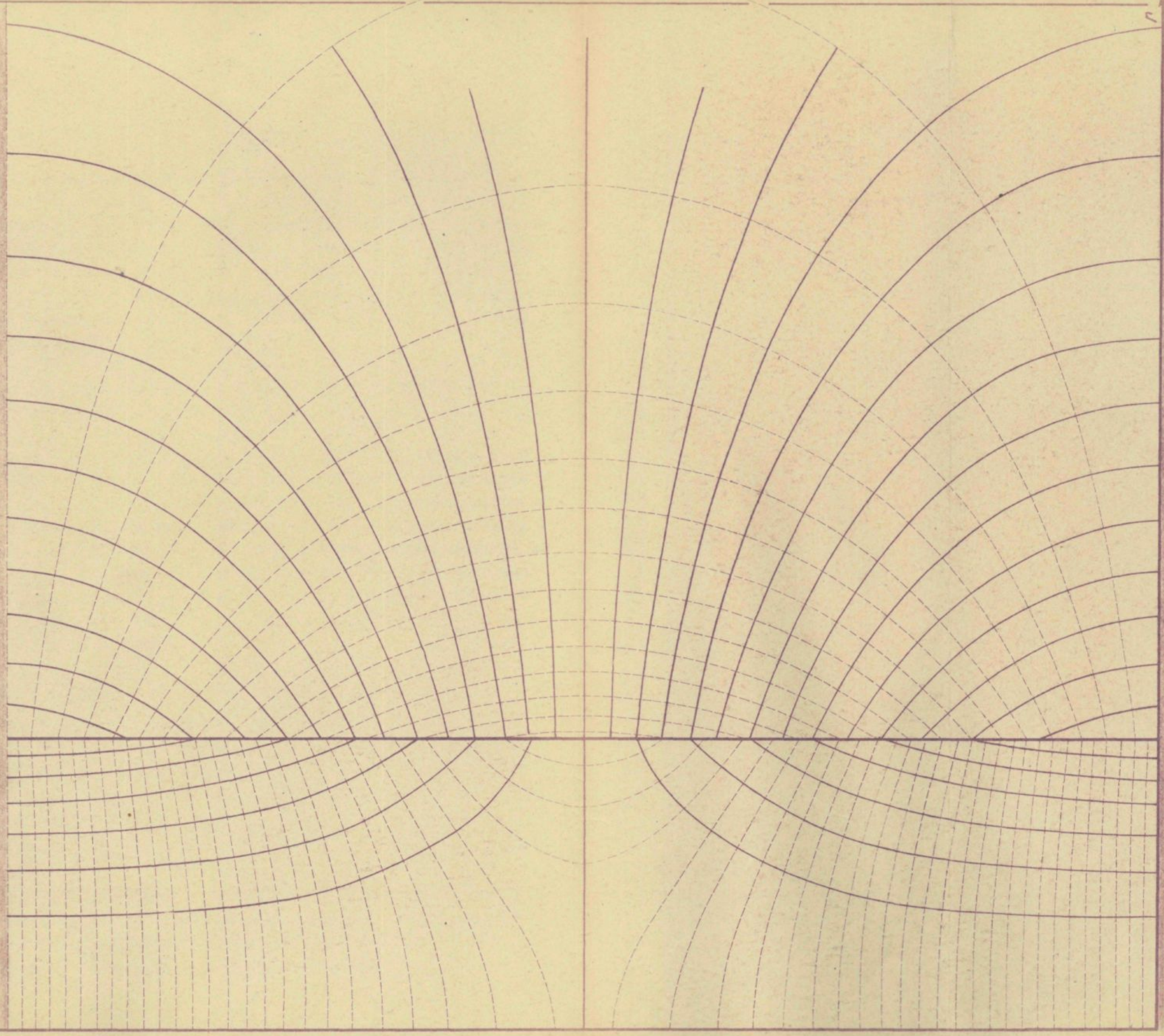
$$H_{\varphi I0} = -k_1 J'_0(i\varphi_0) \sin \xi = H_{\varphi II0} = -k_2 K'_0(i\varphi_0) \sin \xi = H_{\varphi 0} \quad (8)$$

da mora biti razlika komponent magnetnih poljskih jakosti v smeri ξ -ja na zunanji in na notranji strani valja s tokovno oblogo enaka vrednosti tokovne obloge na tem mestu. Če vzamemo, da je vrednost tokovne obloge $A_{1\xi} = A_1 \cos \xi$, dobi gornji pogoj sledečo matematično obliko:

$$H_{\varphi I0} - H_{\varphi II0} = -k_2 K_0(i\varphi_0) \cos \xi + k_1 J_0(i\varphi_0) \cos \xi = A_{1\xi} = A_1 \cos \xi \quad (9)$$

Iz enačb (8) in (9) dobimo vrednosti koeficientov k_1 in k_2 :

$$k_1 = - \frac{K'_0(i\varphi_0)}{K_0(i\varphi_0) J'_0(i\varphi_0)} \cdot A_1 \quad (10)$$



$$k_2 = - \frac{J'(i\varphi_0)}{K_0(i\varphi_0)J'(i\varphi_0) - K_0'(i\varphi_0)J(i\varphi_0)} A_1 \quad (11)$$

S tem je celotno magnetno polje v prostoru določeno. V primeru, da je razmerje med višino navitja l_0 in polmerom valja r_0 enako 3,93, dobimo, da je φ_0 , določen po enašbi (4), enak 0,8. Za ta primer je magnetno polje na podlagi gornjih enašb izračunano in podano na sliki 19. Da ne bi bila slika polja v notranjosti valja prenatrpana, so silnice kot tudi krivulje istega potenciala risane v valju enkrat redkeje kot v prostoru izven valja.

Sedaj pa vstavimo v valj s tokovno oblogo še železni valj s polmerom r_2 oz. φ_2 !

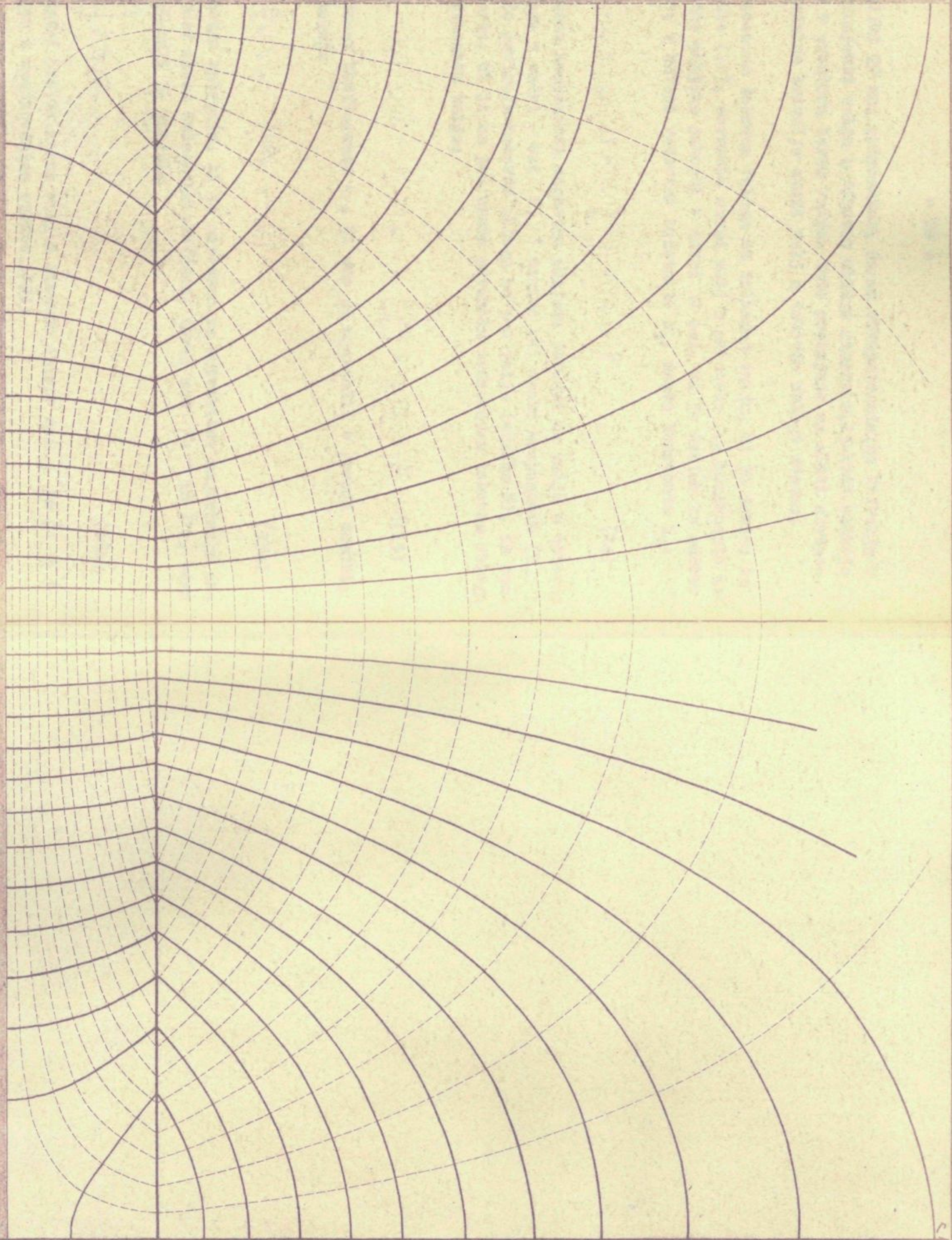
Na površini železnega valja se pri tem pojavi tokovna obloga. Če predpostavimo, da je permeabilnost železa neskončno velika, dobimo vrednost nadomestne tokovne obloge z nastavkom, da mora biti komponenta magnetne poljske jakosti na železnem valju v smeri ξ koordinate ($H_{\xi i}$), ki jo povzroča tokovna obloga na valju s polmerom φ_0 , določena po enašbi (6a), po velikosti enaka, a nasprotno usmerjena kot komponenta magnetne poljske jakosti v smeri ξ osi ($H_{\xi z}$), ki jo povzroča nadomestna tokovna obloga na železnem valju. Vrednost $H_{\xi z}$ dobimo z uporabo enašbe (6b), če vanjo vstavimo mesto konstante k_2 konstanto k_3 . Če gornji pogoj matematično izrazimo, dobimo:

$$H_{\xi z} = -k_1 J_0(i\varphi_2) \cos \xi = -H_{\xi z} = k_3 K_0(i\varphi_2) \cos \xi \quad (12)$$

Če konstanto k_3 izračunamo iz gornje enašbe, dobimo:

$$k_3 = -k_1 \frac{J_0(i\varphi_2)}{K_0(i\varphi_2)} \quad (13)$$

Magnetno polje dobimo v tem primeru s superpozicijo polj, ki ju povzročata obe tokovni oblogi. Za primer, da je polmer valja s tokovno oblogo $\varphi_0 = 0,78$, polmer železnega valja pa $\varphi_2 = 0,4$, dobimo polje, ki je podano na sliki 20.



Slika 20

K sliki 20 naj pripomnimo, da so ekvipotencialne krivulje v notranjosti valja s tokovno oblogo risane 2,13-krat redkeje kot v prostoru izven valja. Zato prehajajo na sliki ekvipotencialne krivulje skozi valj s tokovno oblogo zvezno.

Nadomestna tokovna obloga na železnem valju, ki jo dobimo iz enačbe (12), povzroča skozi valj s polmerom ρ_0 , komponento magnetne poljske jakosti v smeri ρ osi, ki jo dobimo iz enačbe (7b), v katero vstavimo konstanto k_3 , mesto konstante k_1 :

$$H_{\rho z_0} = k_3 K'_0(i\rho_0) \sin \xi = k_1 \frac{J_0(i\rho_1)}{K_0(i\rho_1)} K'_0(i\rho_0) \sin \xi \quad (14)$$

Celotno komponento magnetne poljske jakosti na valju s tokovno oblogo v smeri ρ osi ($H_{\rho c_0}$) dobimo kot vsoto komponente (H_{ρ_0}), ki jo povzroča tokovna obloga na tem valju (enačba 8), in komponente, ki jo na tem mestu povzroča nadomestna tokovna obloga na železnem valju:

$$H_{\rho c_0} = H_{\rho_0} + H_{\rho z_0} = - \left[k_1 J'_0(i\rho_0) - k_1 \frac{J_0(i\rho_1)}{K_0(i\rho_1)} K'_0(i\rho_0) \right] \sin \xi = - \frac{k_1}{\rho_0} A_1 \sin \xi \quad (15)$$

Vrednost koeficienta k_1 , ki smo ga uporabili v gornji enačbi, je torej:

$$k_1 = \frac{\rho_0}{A_1} k_1 \left[J'_0(i\rho_0) - \frac{J_0(i\rho_1)}{K_0(i\rho_1)} K'_0(i\rho_0) \right] \quad (15a)$$

Magnetno energijo, ki je potrebna za ustvaritev magnetnega polja med obema železnima ploščama, torej med $\xi = 0$ in $\xi = \pi$, bomo izračunali po enačbi:

$$W_1 = \int_{\xi=0}^{\xi=\pi} \frac{1}{2} \Phi_{\xi} dJ_1 \quad (16a)$$

Magnetni pretok skozi valj s tokovno oblogo med ξ in $(\pi - \xi)$ dobimo z upoštevanjem enačbe (15):

$$\Phi_{\xi} = \mu_0 \cdot 2\pi r_0 \int_{\xi}^{\pi-\xi} (-H_{\rho c_0}) d\xi = \mu_0 2\pi r_0 k_1 A_1 \frac{2}{\rho_0} \cos \xi \quad (17)$$

Ker smo v gornji enačbi izrazili tok J_1 z vrednostjo tokovne obloge A_1 , bomo v enačbo (16a) vstavili za dJ sledečo vrednost:

$$dJ_1 = A_1 \cos \xi \cdot d\xi \quad (18)$$

Če vstavimo v enačbah (17) in (18) določene vrednosti v enačbo (16a), dobi ta naslednjo obliko:

$$W_1 = \int_{\xi=0}^{\xi=\pi} \frac{1}{2} (\mu_0 \cdot 2\pi r_0 k_1 A_1 \frac{2}{\phi_0} \cos \xi) (A_1 \cos \xi) d\xi = \mu_0 2\pi r_0 \frac{k_1}{\phi_0} A_1^2 \frac{\pi}{4} = \mu_0 \pi l_0 k_1 A_1^2 \frac{1}{2} \quad (16b)$$

Do sedaj smo obravnavali primer, da je tokovna obloga razporejena po sinusiu. Dejansko pa je tokovna obloga pravokotne oblike. Zato je potrebno, da celotno tokovno oblogo razstavimo po Fourierju. Vrednost amplitude n -tega harmonskega vala dobimo po znani enačbi:

$$A_n = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{1}{n} A_0 \quad (19a)$$

Vrednost tokovne obloge A_0 lahko izrazimo tudi s tokom J , saj mora biti produkt $A_0 \cdot (\pi \cdot 2)$ enak celotnemu toku J . Vrednosti posameznih amplitud lahko torej tudi pišemo na sledeč način:

$$A_n = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{1}{n} \cdot \frac{2}{\pi} J = \frac{8}{n\pi^2} J \quad (19b)$$

Vrednost magnetne energije polvala n -te harmonske komponente tokovne obloge je sorazmerna kvadratu njene amplitude. Pri določitvi velikosti te energije pa moramo upoštevati, da bi bila vrednost magnetne energije n -tega polvala pri isti magnetni pro-vođnosti, kot velja za osnovni val n^2 -krat manjša, kot bi jo pri istem polmeru navitja r_0 povzročila tokovna obloga osnovnega va-la z enako veliko amplitudo. En polval n -te harmonske komponente vsebuje namreč pri enaki amplitudi zaradi zmanjšanja dolžine va-la n -krat manjši tok kot polval osnovne komponente.

Ker je v celotni dolžini navitja n polvalov, je zato celotna e-

energije enaka n -kratni energiji enega polvala. Celotna magnetna energija n -te tokovne obloge je torej pri isti magnetni prevodnosti sorazmerna $(A_n^2 : n^2) \cdot n = A_n^2 : n$.

Za n -ti harmonski val se spremeni tudi vrednost koeficienta K_n . Ker odgovarja dolžini navitja l_0 in polmeru r_0 navitja po enačbi (4) za osnovni val polmer ρ_0 , dobimo za n -ti harmonski val zaradi zmanjšanja dolžine vala (l_0/n) pri istem polmeru navitja ustrezni polmer $\rho_{0n} = n\rho_0$. Če vstavimo v izraz v oklepaju enačbe (15) mesto ρ_0 vrednost $\rho_{0n} = n\rho_0$, dobimo naslednjo vrednost koeficienta K_n za n -ti harmonski val:

$$K_n = \frac{\rho_0}{A_n} [k_1 J_0'(in\rho_0) - k_1 \frac{J_0(in\rho_0)}{K_0(in\rho_0)} K_2'(in\rho_0)] \quad (20)$$

Z upoštevanjem gornjih izvajanj in enačb (16b) in (20) dobimo magnetno energijo n -te komponente tokovne obloge:

$$W_n = \mu_0 \pi l_0 K_n \frac{A_n^2}{n^2} \frac{1}{2} \quad (21a)$$

Če vstavimo v gornjo enačbo za A_n izraz, dobljen v enačbi (19b), dobimo:

$$W_n = \mu_0 \pi l_0 K_n \frac{1}{n} \left(\frac{8}{n\pi^2} \right)^2 J^2 \frac{1}{2} = \mu_0 \frac{32}{n^3 \pi^3} l_0 K_n J^2 \quad (21b)$$

Vrednost celotne magnetne energije je enaka vsoti magnetnih energij harmonskih komponent tokovne obloge, njeno vrednost pa dobimo z upoštevanjem enačb (16b), (19b) in (21b):

$$W = W_1 + W_3 + W_n + \dots = \mu_0 \frac{32}{\pi^3} l_0 J^2 \left[\frac{K_1}{1} + \frac{K_3}{3^3} + \dots \frac{K_n}{n^3} + \dots \right] \quad (22)$$

Iz dobljene magnetne energije W in toka J dobimo po znani enačbi induktivnost:

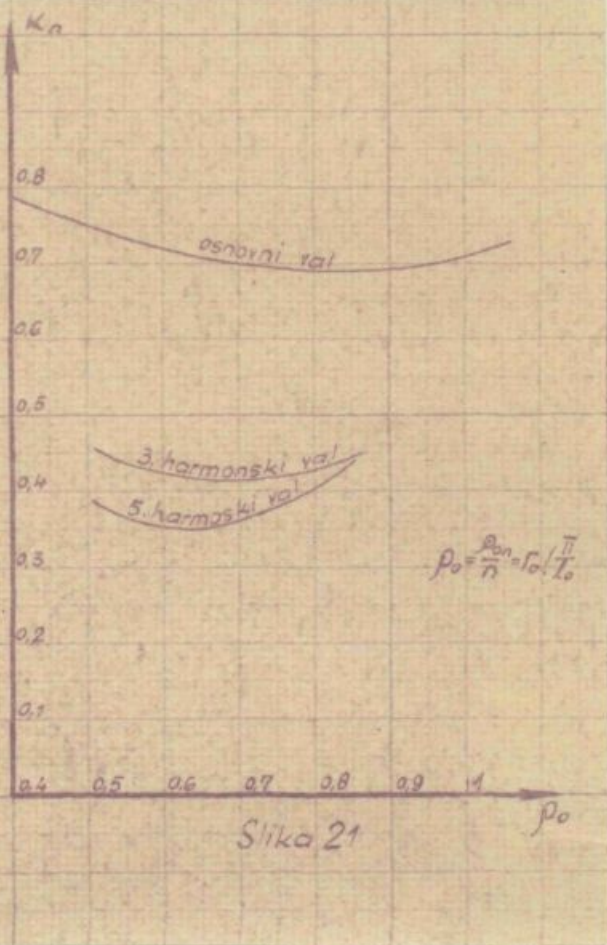
$$L = \frac{2W}{J^2} \quad (23)$$

Če pomnožimo dobljeno induktivnost z ω , dobimo iskano reak-

tanco:

$$x = \omega L = \omega \frac{2W}{j^2} = (2\pi 50) \frac{2}{j^2} (0,4\pi 10^{-6}) \frac{32}{\pi^2} l_0^2 \left[\frac{\kappa_1}{1} + \dots \frac{\kappa_5}{5^2} + \dots \right] = 816 \cdot 10^{-6} l_0 \left[\frac{\kappa_1}{1} + \dots \frac{\kappa_5}{5^2} + \dots \right] \Omega \quad (24)$$

Vrednost koeficientov κ_n je določena za osnovni, tretji in peti harmonski val tokovne obloge, in sicer za primer, da je $l_0 = 0,4$ m, $r_2 = 0,051$ m, torej je po enašbi (4) $\varphi_2 = 0,4$, in je podana v odvisnosti od φ_0 oz. od r_0 , to je od polmera navitja, v diagramu na sliki 21. V kolikor ni v sredini valja s tokovno oblogo železnega jedra, vrednost koeficienta κ_n , ki je soraz-



Slika 21

meren magnetni prevodnosti, raste s premerom navitja. Valed tega je vrednost koeficienta večja za višje harmonske komponente. Če pa je v sredini valja s tokovno oblogo železno jedro, z večanjem polmera navitja raste tudi oddaljenost navitja od železa. Zato v tem primeru z oddaljenostjo navitja od železa v začetku vrednost koeficienta pada, če pa prekoračimo neko vrednost polmera r_0 , pa prične vrednost koeficienta κ_n rasti.

Čeprav smo pri izračunu uporabili nekatere poenostavitve, primerjava izmerjenih in po enašbi (24) določenih reaktanc pokaže, da

dobimo še dokaj točne rezultate.

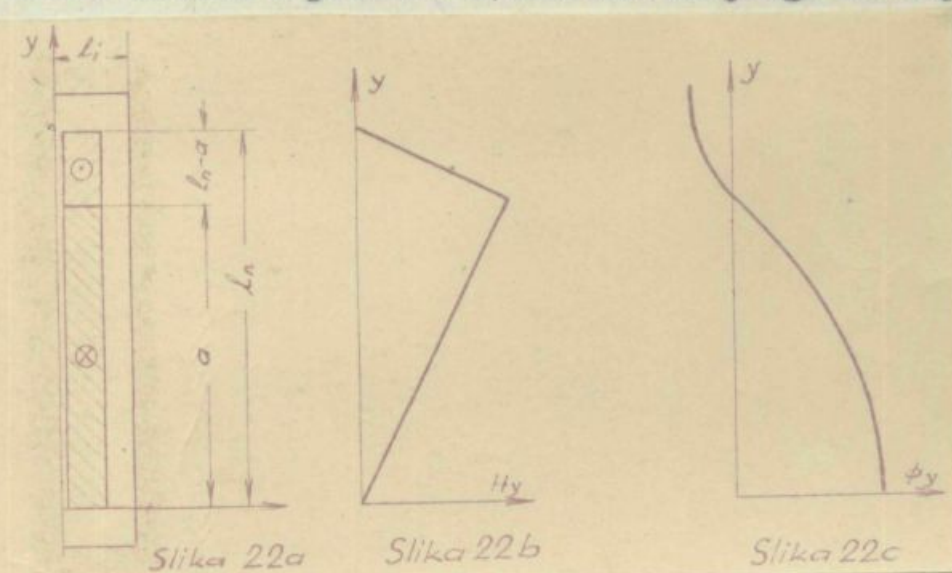
Preglejmo še enkrat vse, v izračunu porabljene poenostavitve: Predpostavili smo, da je prostor nad in pod navitjem zaključen z železno ploščo neskončne permeabilnosti. Dejansko pa zapira prostor nad in pod navitjem le delno jarn, in sicer pri sred-

njem stebru bolj, pri obeh stranskih pa manj. Vseled te predpostavke so v enašbi (24) določene vrednosti reaktanc nekoliko večje od dejanskih. Dalje smo zanemarili pri izračunu vpliv ostalih stebrov na celotno konfiguracijo polja. Vseled te predpostavke pa bo po enašbi (24) izračunana vrednost reaktance nekoliko manjša od dejanske. Poleg tega smo vzeli, da sega navitje prav do jarma, čeprav je navitje vedno krajše od dolžine stebrov. Vzeli smo tudi, da je steber okroglega prereza, čeprav je običajno stopničastega prereza. Končno smo tudi predpostavili, da je tokovna obloga sorazmerno tanka in da zato ni potrebno upoštevati magnetnega polja v navitju samem.

V doseđanjih izvajanjih smo določili vrednost reaktance pozitivnega zaporedja za primer, da sta obe navitji enako dolgi. Sedaj pa preglejmo za koliko se spremeni vrednost dobljene reaktance, če se spremeni razmerje obeh dolžin navitja!

Ta dodaten pregled bomo izvedli v poenostavljeni obliki, namreč dvodimenzionalno, slično kot se običajno računa reaktanca kratkega stika po Rogowskem.

Vzemimo kot v prej obravnavanem primeru, da sta obe navitji reducirani na po en ovoj in da sta napajani z istimi ampurnimi ovojji, v reducirani sliki torej z istim tokom J , pri čemer pa sta si smeri obeh tokov nasprotni. Dalje vzemimo, da se porabi celotna magnetna napetost za premagovanje magnetne upornosti v zraku, in sicer na dolžini l_i in da je dolžina te poti sorazmerno kratka v primeru z dolžino obojnega navitja l_n (sl.22a).



Dolžino spodnjega dela navitja označimo z a , dolžino gornjega dela navitja pa označimo z $(l_n - a)$.

Slika 22a

Slika 22b

Slika 22c

V tem poenostavljenem primeru dobimo vrednost magnetne napetosti v zraku in to v oddaljenosti y in v območju od $y=0$ do $y=a$:

$$U_m = \frac{y}{a} \cdot J \quad (25)$$

Če to napetost delimo z dolžino l_i , dobimo vrednost magnetne poljske jakosti v zraku:

$$H_y = \frac{U_m}{l_i} = \frac{y}{a} \cdot \frac{J}{l_i} \quad (26)$$

Vsled te poljske jakosti izstopajo magnetne silnice iz stebra v zrak. Magnetni pretok skozi navitje v višini y (Φ_y) dobimo, če od maksimalnega magnetnega pretoka na začetku stebra ($\Phi_{\text{maks},1}$) odštejemo magnetni pretok, ki se sklene po zraku. Če naj bo obseg navitja $2\pi r$, dobimo torej vrednost magnetnega pretoka v višini y :

$$\Phi_{y,1} = \Phi_{\text{maks},1} - 2\pi r \mu_0 \int_0^y H_y dy = \Phi_{\text{maks},1} - 2\pi r \mu_0 \cdot \frac{J}{l_i} \cdot \frac{y^2}{2a} \quad (27a)$$

Iz pogoja, da naj bo vrednost magnetnega pretoka $\Phi_{\text{maks},1}$ enaka celotnem magnetnem pretoku, ki se od $y=0$ do $y=a$ sklepa po zraku, dobimo, da je vrednost magnetnega pretoka $\Phi_{y,1}$ v višini $y=a$ enaka nič. Maksimalna vrednost magnetnega pretoka je torej:

$$\Phi_{\text{maks},1} = 2\pi r \mu_0 \cdot \frac{J}{l_i} \cdot \frac{a}{2} \quad (28)$$

Če vstavimo dobljeno vrednost za $\Phi_{\text{maks},1}$ v enačbo (27a), dobimo:

$$\Phi_{y,1} = 2\pi r \mu_0 \cdot \frac{J}{l_i} \cdot \frac{a}{2} - 2\pi r \mu_0 \cdot \frac{J}{l_i} \cdot \frac{y^2}{2a} = 2\pi r \mu_0 \cdot \frac{J}{l_i} \left(\frac{a}{2} - \frac{y^2}{2a} \right) \quad (27b)$$

Gornja enačba velja kot omenjeno le za področje od $y=0$ do $y=a$. Če pa vstavimo v gornjo enačbo mesto a vrednost $(l_n - a)$ za y pa $(l_n - y)$, toku J pa spremenimo predznak, dobimo vrednost magnetnega pretoka skozi navitje v področju $y=a$ do $y=l_n$:

$$\Phi_{y,2} = -2\pi r \mu_0 \cdot \frac{J}{l_i} \left[\frac{l_n - a}{2} - \frac{(l_n - y)^2}{2(l_n - a)} \right] \quad (29)$$

Potek magnetne poljske jakosti vzdolž navitja je podan na sl. 22b. Potek vrednosti magnetnega pretoka pri raznih višinah y pa je podan na sl. 22c.

Pri napajanju navitja je napetost reducirana na en ovoj, sorazmerna srednji vrednosti magnetnega pretoka vzdolž navitja. Če ohmsko upornost zanemarimo, dobimo pri izmeničnem napajanju sledečo napetost, reducirano na en ovoj spodnjega navitja:

$$u_1 = \omega \cdot \Phi_{\text{red}} = \omega \int_0^a \phi_{\text{m}} \frac{dy}{a} = \omega \cdot 2\pi r \cdot \mu_0 \cdot \frac{J}{l_i} \cdot \frac{a}{3} \quad (30a)$$

Za gornje navitje pa dobimo sledečo napetost:

$$u_2 = \omega \cdot 2\pi r \mu_0 \frac{J}{l_i} \frac{l_n - a}{3} \quad (30b)$$

Če delimo vsoto obeh napetosti dobljenih v enačbah (30a) in (30b) z J , dobimo vrednost reaktance kratkega stika, ki je:

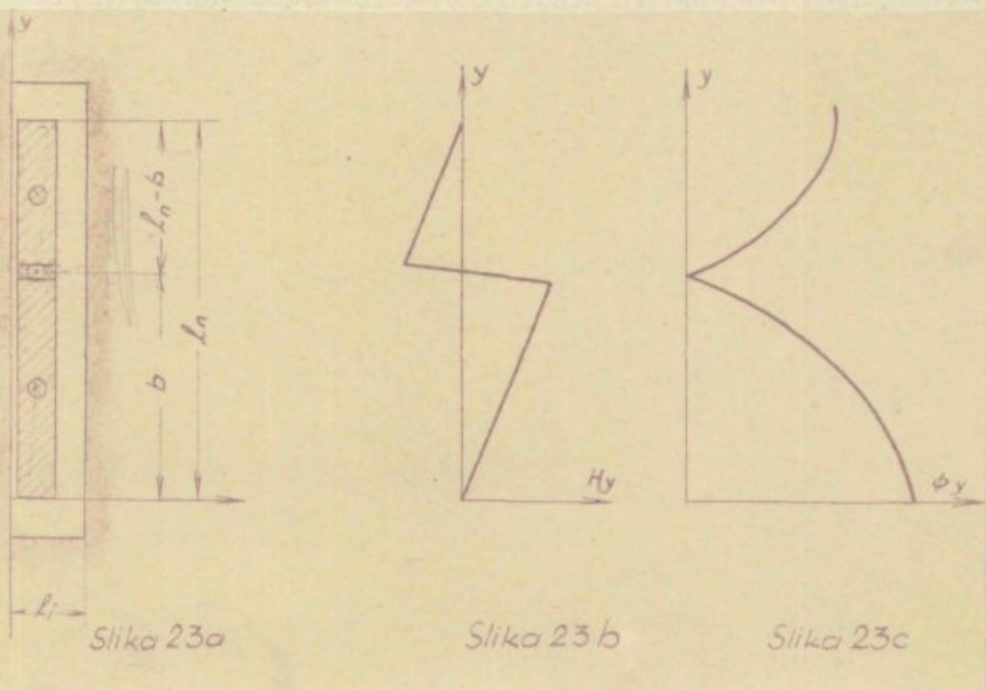
$$X = \frac{u_1 + u_2}{J} = \omega \cdot 2\pi r \mu_0 \frac{1}{3l_i} \cdot l_n \quad (31a)$$

Iz gornje enačbe sledi, da vrednost reaktance kratkega stika ni odvisna od razmerja dolžin obeh delov navitij! Ker pa predpostavke v izračunu ne ustrezajo popolnoma dejanskemu stanju, so meritve pokazale nekoliko drugačen rezultat, da namreč vpliva na velikost reaktance nekoliko tudi vrednost razmerja $a : (l_n - a)$.

Sedaj pa z istimi predpostavkami določimo vrednost reaktance kratkega stika za primer, če je višina prvega dela navitja a zanemarljiva v primeru z višino drugega dela navitja, ki je v tem primeru skoraj enaka dolžini l_n !

Dočim smo v prejšnjem primeru določili vrednost reaktanc za primer, da je prvo navitje izpod drugega navitja, bomo sedaj

poiskali vrednosti reaktanc za primer, da se navitje dolžine



a nahaja med drugim navitjem in to v višini $y=b$ (sl.23). Vrednost magnetne poljske jakosti H v območju od $y=0$ do $y=b$ dobimo na sličen način kot v prejšnjem primeru:

$$H_y = U_m : l_i = \frac{y}{l_n} \frac{J}{l_i} \quad (32)$$

Pri obsegu navitja ($2\pi r$) je vrednost magnetnega pretoka skozi steber v višini y :

$$\Phi_{y,1} = \Phi_{maks,1} - 2\pi r \mu_0 \int_0^y H_y dy = \Phi_{maks,1} - 2\pi r \mu_0 \frac{J}{l_i} \frac{y^2}{2l_n} \quad (33a)$$

Vrednost magnetnega pretoka $\Phi_{maks,1}$ dobimo iz pogoja, da naj bo v višini $y=b$ enak nič. Iz tega pogoja dobimo:

$$\Phi_{maks,1} = 2\pi r \mu_0 \frac{b^2}{2l_n} \frac{J}{l_i} \quad (34)$$

Če vrednost za $\Phi_{maks,1}$ vstavimo v enačbo (33a), dobimo:

$$\Phi_{y,1} = 2\pi r \mu_0 \frac{J}{l_i} \left(\frac{b^2}{2l_n} - \frac{y^2}{2l_n} \right) \quad (33b)$$

Če v gornjo enačbo vstavimo mesto višine b višino $(l_n - b)$ in mesto y vrednost $(l_n - y)$, dobimo vrednost ustreznega magnetnega pretoka v območju med $y=a$ in $y=l_n$ v naslednji enačbi:

$$\Phi_{y2} = 2\pi r \mu_0 \frac{J}{l_n} [(l_n - b)^2 - (l_n - y)^2] \quad (34)$$

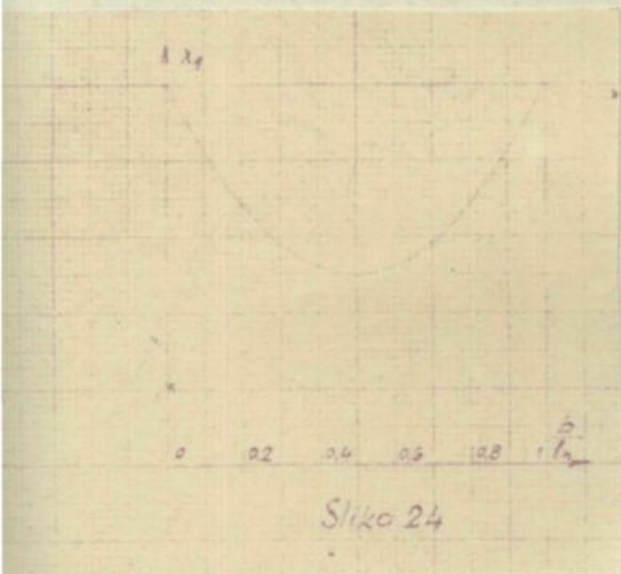
Če naj bo kot že omenjeno vrednost višine navitja a zanemarljiva v primeri z višino l_n , dobimo, da je napetost na navitju dolžine a zanemarljiva. Celotno napajanje mora torej prevzeti drugo navitje. Za napajanje tega navitja je potrebna napetost, ki je, reducirana na en ovoj, sorazmerna srednji vrednosti magnetnega pretoka Φ , vzdolž navitja:

$$\hat{U} = j\omega \Phi_{red} = j\omega \int_0^b \Phi_{y1} \frac{dy}{a} + j\omega \int_b^{l_n} \Phi_{y2} \frac{dy}{l_n - b} = j\omega 2\pi r \mu_0 \frac{J}{l_n} \frac{2b^2 - 2bl_n + l_n^2}{3l_n} \quad (35)$$

Vrednost reaktance kratkega stika, reducirana na en ovoj, je torej:

$$jX = \frac{\hat{U}}{J} = j\omega 2\pi r \mu_0 \frac{1}{l_n} \cdot \frac{2b^2 - 2bl_n + l_n^2}{3l_n} \quad (36)$$

Vrednost reaktance, dobljene po enačbi (36) je v odvisnosti od razmerja $b:l_n$ podana na sl.24. Kot sledi iz enačbe (36) je vrednost reaktance v primeru, da se nahaja navitje višine a v sredini drugega navitja, še enkrat manjša kot v primeru, če je to navitje izpod ali pa iznad drugega navitja.



Izračun reaktanc praznega teka sofaznega zaporedja

Kot dosti ostalih trodimenzionalnih magnetnih polj je tudi določitev magnetnega polja, ki se ustvari pri sofaznem napajanju trifaznega transformatorja, matematično rešljiva le, če uporabimo razne poenostavitve. V literaturi je sicer objavljenih več načinov izračuna reaktanc praznega teka sofaznega zaporedja, vendar so vsi avtorju poznani izračuni izvedeni le za primer, da napajamo celotno navitje. Pri ovojnem stiku pa moramo poznati tudi kolika je vrednost sofazne reaktance v primeru, če napajamo le sorazmerno kratek del navitja. Za ta namen je najbolj pripravna metoda izračuna impedance sofaznega zaporedja po Ollendorfu, opisana v članku "Studien über das Jochfeld von Transformatoren"/2/.

Ollendorf obravnava problem dvodimenzionalno, in sicer nadomesti železno jedro trifaznega transformatorja z valjem eliptičnega prereza, ki naj ima isto dolžino kot jarm transformatorja, označimo jo z l_n , in isto višino kot železno jedro transformatorja, ki jo označimo z l_v . Višina jedra je torej enaka dolžini daljše glavne osi elipse, dolžino krajše glavne osi, to je širino nadomestnega eliptičnega valja, pa Ollendorf določi s pogojem, da naj ima pravokotni prerez transformatorja enak obseg kot ga ima elipsa.

Poenostavljena slika železnega jedra se od dejanskega jedra precej razlikuje. Prerez železnega jedra je drugačen (elipsa - pravokotnik), v nadomestnem jedru dalje ni nikakih oken. Ollendorf v omenjenem članku obravnava točneje le dvodimenzionalni, poenostavljen primer, torej primer kot če bi bila širina transformatorja zanemarljiva v primeru z njegovo dolžino. Dejansko pa magnetne silnice izstopajo tudi iz prednje in zadnje ploskve, kar seveda vpliva bistveno na celotno konfiguracijo polja. Ollendorf uporabi le za to poenostavitev korekcijski faktor, ki ga določi na precej poenostavljen način.

V nadaljnjih izvajanjih in izračunih bomo uporabili iste poenostavitve kot Ollendorf in bomo obravnavali vse le dvodimenzionalno, določitev celotnega korekcijskega faktorja, ki naj upošteva napake zaradi uporabljenih poenostavitev, pa bomo pustili meritvam.

Za določitev magnetnega polja, ki ga ustvarja tokovna obloga na eliptičnem železnem valju, uporabi Ollendorf konformno transformacijo.

Analitično funkcijo $z = (x + jy)$ v x - y ravnini konformno transformirajmo v analitično funkcijo $w = (u + jv)$ v u - v ravnini, pri čemer naj bo:

$$w = \frac{1}{g} \operatorname{arc} \sin z \quad (37a)$$

To enačbo lahko pišemo tudi v sledeči obliki:

$$z = x + jy = g \sin w = g \sin(u + jv) = g(\sin u \cdot \cosh v + j \cos u \cdot \sinh v) \quad (37b)$$

pri čemer je g razdalja gorišča elipse od koordinatnega izhodišča.

Iz gornje enačbe dobimo zvezo med x in y na eni strani in u oz. v na drugi strani:

$$x = g \cdot \sin u \cdot \cosh v \quad (38a)$$

$$y = g \cdot \cos u \cdot \sinh v \quad (38b)$$

Če vstavimo za v neko konstantno vrednost v_0 , dobimo iz enačbe (37) v xy ravnini elipso:

$$\left(\frac{x}{g \cdot \cosh v_0}\right)^2 + \left(\frac{y}{g \cdot \sinh v_0}\right)^2 = \left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 = 1 \quad (39)$$

pri čemer sta a oz. b polovični dolžini glavnih osi elipse.

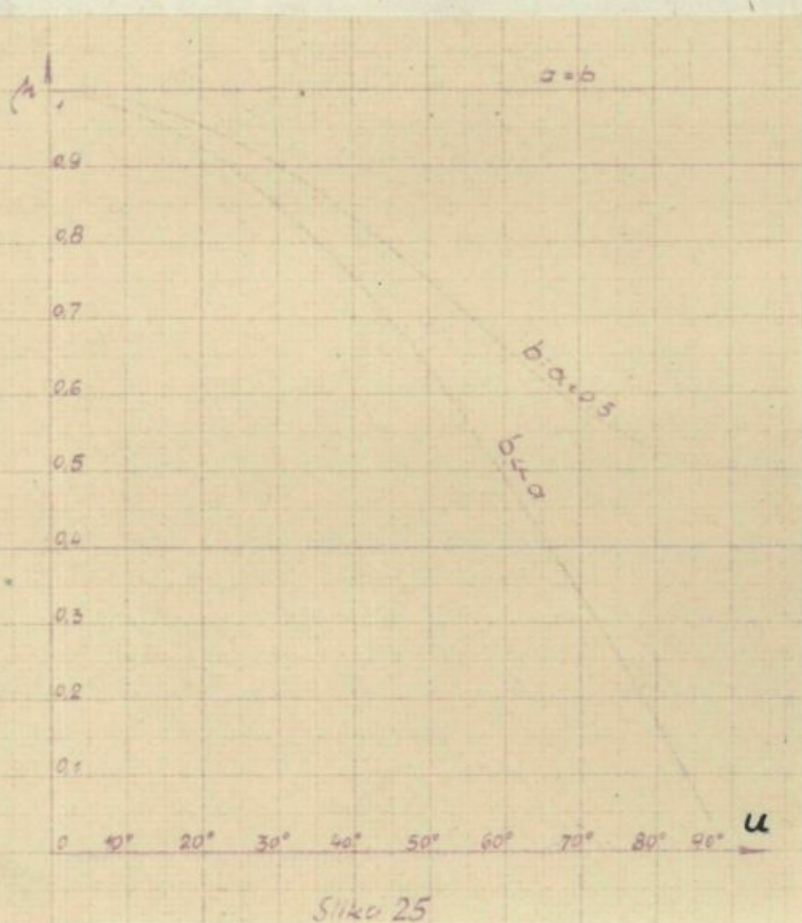
Če pa vstavimo v enačbo (37) za u neko stalno vrednost u_0 , dobimo v x - y ravnini hiperbolo:

$$\left(\frac{x}{g \sin u_0}\right)^2 - \left(\frac{y}{g \cos u_0}\right)^2 = 1 \quad (40)$$

Pri tej konformni transformaciji odgovarja ortogonalni mreži v u - v ravnini mreža konfokalnih elips in hiperbol v x - y ravnini. Če elipse v x - y ravnini torej konformno transformiramo v u - v ravnino, dobimo premo, ki poteka vzporedno s koordinatno osjo v . Diferencial elipse $d(z)$ preide po transformaciji v diferencial $d(w) = d(u)$, pri čemer se mu spremeni smer in dolžina. Sprememba dolžine, označimo jo z μ , je:

$$\mu = \left|\frac{dz}{dw}\right| = g |\cos w| = g |\cos(u + jv)| = |a \cos u + j b \sin u| = \sqrt{a^2 \cos^2 u + b^2 \sin^2 u} \quad (41)$$

Vrednost μ -ja je v odvisnosti od u -ja vrisana v diagram na sl.25, in sicer za primer, da sta obe glavni osi elipse med



Slika 25

seboj enaki ($a=b$), za primer, da je razmerje dolžine krajše glavne osi in dolžine daljše osi elipse enako $b:a=0,5$, in končno za primer, če je vrednost krajše glavne osi v primeru z dolžino daljše glavne osi elipse zanemarljiva ($a \gg b$). V zadnjem primeru poteka vrednost μ -ja v odvisnosti od u -ja po sinusoidi:

$$\mu = a \cos u \quad (42)$$

Vzemimo, da se nahaja na površini eliptičnega valja tokovna obloga a_z . Vrednost ustrezne tokovne obloge a_w po transformirani krivulji dobimo z nastavkom, da naj bo diferencial toka dJ enak produktu diferenciala elipse $d(z)$ in vrednosti tokovne obloge na tem mestu (a_z), istočasno pa mora biti tudi enak ustreznemu produktu diferenciala konformno transformirane krivulje $d(w)$ in iskane tokovne obloge a_w na tem mestu, torej:

$$dJ = a_z dz = a_w dw = a_w du \quad (43)$$

Iz enačbe (42) in (43) dobimo vrednost tokovne obloge a_w :

$$a_w = a_z \frac{dz}{dw} = a_z \mu \quad (44)$$

V primeru, da je vrednost tokovne obloge po površini elipse enaka, poteka torej tokovna obloga a_w v odvisnosti od u -ja enako kot poteka μ v odvisnosti od u -ja (sl.25).

Če primerjamo magnetno polje, ki ga ustvarja tokovna obloga na elipsi, z magnetnim poljem, ki ga v u - v ravnini ustvarja tokovna obloga a_w na premii, ki naj predstavlja transformirano krivuljo elipse v u - v ravnini in ki jo v nadaljnjih izvajanjih imenujemo tokovna prema, ugotovimo, da so krivulje, ki predstavljajo magnetne silnice, in krivulje istega magnetnega potenciala v obeh primerih med seboj konjugirane in da je vrednost celotne magnetne energije kot tudi vrednost integrala tokovne obloge po krivulji v obeh primerih enaka. Zato je dovolj, da določimo le magnetno polje, ki ga ustvarja tokovna obloga a_w na tokovni premii, določitev, ki je matematično rešljiva.

Tokovno oblogo a_w je potrebno razstaviti po Fourierju in določiti vrednost posameznih harmonskih komponent te tokovne obloge. Ker je vrednost magnetnega potenciala linearno odvisna od tokovne obloge, lahko uporabimo zakon o superpoziciji, vsled česar je celotna magnetna energija enaka vsoti magnetnih energij posameznih komponent tokovnih oblog.

Določimo magnetno polje, ki ga ustvarja tokovna obloga s amplitudo A_1 , ki je rasporejena po tokovni premici po sinusu!

Vrednost magnetnega potenciala φ v ravnini iznad tokovne preme določimo s nastavkom, da je Laplace magnetnega potenciala φ enak nič:

$$\Delta\varphi = \frac{\partial^2\varphi}{\partial u^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial v^2} = 0 \quad (45)$$

Ker se potencial φ spreminja po u -ju enako kot tokovna obloga po sinusnem zakonu, je vrednost drugega odveda φ -ja po u -ju enaka negativni vrednosti potenciala φ na tem mestu. Gornje enačbe lahko zato tudi pišemo v naslednji obliki:

$$\frac{\partial^2\varphi}{\partial v^2} - \varphi = 0 \quad (46)$$

Rešitev te diferencialne enačbe druge stopnje je:

$$\varphi = k_1 \cdot \sin u \cdot e^{-v} + k_2 \cdot \sin u \cdot e^v \quad (47)$$

iz pogoja, da naj ima potencial v neskončnosti ($v = \infty$) vrednost nič, dobimo, da je vrednost konstante k_2 enaka nič.

Komponento magnetne poljske jakosti v smeri u -ja, označimo je s H_u , dobimo kot negativno vrednost odveda magnetnega potenciala φ po u -ju:

$$H_u = -\frac{\partial\varphi}{\partial u} = -k_1 \cdot \cos u \cdot e^{-v} \quad (48)$$

Obravnavajmo najprej primer, da se tokovna obloga nahaja neposredno na železnem jedru! V tem primeru je vrednost magnetne poljske jakosti na tokovni premi enaka vrednosti tokovne obloge na tem mestu:

$$H_{u_0} = -k_1 \cdot \cos u \cdot e^{-v_0} = a_w = A_1 \cdot \cos u \quad (49)$$

Vrednost koeficienta k_1 je torej:

$$k_1 = -A_1 e^{v_0} \quad (50)$$

Če odvajamo vrednost magnetnega potenciala φ po v -ju, dobimo negativno vrednost komponente magnetne jakosti v smeri v -ja:

$$H_v = k_1 \cdot \sin e^{-v} = -A_1 \cdot e^{v_0 - v} \cdot \sin u \quad (51)$$

Sedaj pa vzemimo, da je železni eliptični valj nekoliko manjši od eliptičnega valja, na katerem se nahaja tokovna obloga. V u - v ravnini naj torej sega železo le do preme, ki jo imenujemo prema železa. Celotno polje, ki pri tem nastane lahko razstavimo na dve polji, na polje, ki ga ustvarja tokovna obloga na tokovni premi, in na polje, ki ga ustvarja tokovna obloga na površini železa, to je na premi železa.

Prvo polje se v tem primeru ustvarja na obeh straneh tokovne preme in sta si vrednosti magnetne poljske jakosti v smeri u -ja na notranji in na zunanji strani tokovne preme po iznosu enaki, sta pa nasprotno usmerjeni. Ker mora biti njuna razlika enaka tokovni oblogi na tem mestu, pade vrednost magnetne poljske jakosti H_{u_0} in s tem tudi vrednost magnetne jakosti v smeri v -ja na tokovni premi na polovično vrednost kot jo ima v primeru, če se nahaja tokovna obloga neposredno na železu:

$$H_{rot} = \frac{H_{r0}}{2} = -\frac{A_1}{2} \cdot e^{v_0 - v_0} \cdot \sin u = -\frac{A_1}{2} \cdot \sin u \quad (52)$$

Na površini železnega valja oz. na premi železa se pa pojavi pri tem tokovna obloga, ki jo označimo s a_{z_1} . Ta tokovna obloga povzroči komponento magnetne poljske jakosti v smeri u -ja, ki je po iznosu enaka, a nasprotno usmerjena kot komponenta magnetne poljske jakosti, ki jo povzroča tokovna obloga na tokovni premi, na površini železa. Vrednost amplitude A_{z_1} tokovne obloge a_{z_1} je torej:

$$A_{z1} = \frac{A_1}{2} \cdot e^{v_1 - v_0} \quad (53)$$

Tokovna obloga a_{z1} povzroči na tokovni premi naslednjo komponento magnetne poljske jakosti H_{vz0} v smeri v osi:

$$H_{vz0} = -A_{z1} \cdot \sin u \cdot e^{v_1 - v_0} = -\frac{A_1}{2} \cdot \sin u \cdot e^{2(v_1 - v_0)} \quad (54)$$

Vrednost celotne magnetne poljske jakosti v smeri v osi, označimo jo H_{vco} , na tokovni premi je enaka vsoti magnetne poljske jakosti H_{vz0} in magnetne poljske jakosti H_{vol} , določene v enačbi (52):

$$H_{vco} = H_{vol} + H_{vz0} = -\frac{A_1}{2} \sin u - \frac{A_1}{2} \sin u \cdot e^{2(v_1 - v_0)} = -\frac{A_1}{2} \sin u [1 + e^{2(v_1 - v_0)}] \quad (55)$$

Vrednost magnetnega pretoka med točkama u in $(\pi - u)$ na tokovni premi in v celotni dolžini eliptičnega valja l_j je:

$$\Phi_u = \mu_0 l_j \int_u^{\pi-u} (-H_{vco}) du = \mu_0 l_j A_1 \cos u [1 + e^{2(v_1 - v_0)}] \quad (56)$$

Tokovno oblogo a_w lahko tudi z upoštevanjem enačbe (43) izrazimo s tokom dJ :

$$a_w = A_1 \cos u = \frac{dJ}{du} \quad (57)$$

Celotna magnetna energija, ki se porabi za ustvaritev magnetnega polja, povzročena po sinusni tokovni oblogi amplitude A_1 , od $u = -\pi$ do $u = \pi$ je:

$$W_1 = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{2} \Phi_u dJ \quad (58a)$$

Če vstavimo v gornjo enačbo vrednosti, določeni v enačbah (56) in (57), dobimo:

$$W_1 = \frac{1}{2} \mu_0 l_j A_1 [1 + e^{2(v_1 - v_0)}] A_1 \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \cos^2 u du = \frac{\pi}{4} \mu_0 l_j A_1^2 [1 + e^{2(v_1 - v_0)}] \quad (58b)$$

Pri določitvi magnetnih energij, ustvarjenih po višjih harmonskih komponentah tokovne obloge moramo upoštevati naslednje:

Amplituda n -tega vala tokovne obloge A_n povzroča v enem valu n^2 -krat manjšo magnetno energijo, kot bi jo povzročila enako velika amplituda osnovnega vala. En val n -te harmonske komponente namreč vsebuje pri enaki amplitudi radi zmanjšanja dolžine vala n -krat manjši tok. Ker pa je magnetna energija sorazmerna kvadratu toka, dobimo kvadratično odvisnost. V celoti je treba upoštevati n valov, torej je celotna magnetna energija n -te harmonske komponente le n -krat manjša kot bi jo imel osnovni val iste amplitude. Poleg tega moramo tudi upoštevati spremembo člena, ki upošteva oddaljenost navitja od železa. Ker je dolžina enega vala n -te harmonske n -krat manjša od osnovnega vala, je vrednost člena torej enaka:

$$\left[1 + e^{\frac{2(v_i - v_0)}{n}} \right] \quad (59)$$

Magnetna energija n -tega harmonskega vala je torej:

$$W_n = \frac{\pi}{4n} \mu_0 l_i A_n^2 \left[1 + e^{\frac{2(v_i - v_0)}{n}} \right] \quad (58c)$$

Celotna magnetna energija tokovne obloge pa je:

$$W = \frac{\pi}{4} \mu_0 l_i \left[A_1^2 \left(1 + e^{2(v_i - v_0)} \right) + \frac{1}{3} A_3^2 \left(1 + e^{\frac{2}{3}(v_i - v_0)} \right) + \dots + \frac{1}{n} A_n^2 \left(1 + e^{\frac{2}{n}(v_i - v_0)} \right) + \dots \right] \quad (60a)$$

Mesto amplitud A_n lahko vstavimo tudi sledeč izraz:

$$A_n^2 = \frac{n}{4} J^2 \xi_n \quad (61)$$

Če v enačbi (60a) izrazimo amplitude A_n z izrazom, dobljenim v enačbi (61), dobi enačba (60a) naslednjo obliko:

$$W = \frac{\pi}{4} \mu_0 l_i \frac{J^2}{4} \left[\xi_1 \left(1 + e^{2(v_i - v_0)} \right) + \xi_3 \left(1 + e^{\frac{2}{3}(v_i - v_0)} \right) + \dots + \xi_n \left(1 + e^{\frac{2}{n}(v_i - v_0)} \right) + \dots \right] = \frac{\pi}{4} \mu_0 l_i \frac{J^2}{2} \xi \quad (60b)$$

pri čemer je $\xi = \frac{1}{2} \left[\xi_1 \left(1 + e^{2(v_i - v_0)} \right) + \xi_3 \left(1 + e^{\frac{2}{3}(v_i - v_0)} \right) + \dots + \xi_n \left(1 + e^{\frac{2}{n}(v_i - v_0)} \right) + \dots \right]$

Iz gornje enačbe pa lahko določimo po znani enačbi vrednost induktivnosti celotnega navitja :

$$L_i = \frac{2w}{j^2} = \frac{\pi}{4} \cdot \mu_0 \cdot l_i \cdot \xi \quad (62a)$$

Da dobimo resnične vrednosti moramo dobljeno induktivnost še pomnožiti s korekcijskim faktorjem k , s katerim bomo upoštevali vse uporabljene poenostavitve.

Vrednost reaktance praznega teka, reducirana na en ovoj, dobimo kot produkt kotne hitrosti, korekcijskega faktorja k in induktivnosti enega stebra, ki je kot znano trikrat manjša od induktivnosti celotnega jedra:

$$X_0 = \frac{1}{3} \cdot k \cdot \omega \cdot L_i = \frac{\pi^2}{6} k \mu_0 f \cdot l_i \cdot \xi = k_c \cdot \xi \quad (62b)$$

pri čemer je $k_c = \frac{\pi^2}{6} \cdot k \mu_0 f l_i$

Sedaj pa določimo še vrednost amplitud A_n , faktorjev ξ_n in ξ_n

Vzemimo, da je dolžina navitja l_n in da navitje sega od $x = -\frac{1}{2} \alpha l_n$ do $x = \frac{\alpha}{2} l_n$, torej v u - v ravnini od $u = -\arcsin \frac{\alpha l_n}{2a}$ do $u = \arcsin \frac{\alpha l_n}{2a}$, pri čemer je $2a$ dolžina glavne osi elipse. Ollendorf si izračun amplitud poenostavi s tem, da vzame potek tokovne obloge a_w od $u = -\arcsin \frac{\alpha l_n}{2a}$ do $u = \arcsin \frac{\alpha l_n}{2a}$ po kosinusu. Ta poenostavitev ne povzroča večje napake, izračun pa precej poenostavi.

Vzemimo kot primer, da se nahaja tokovna obloga na elipsi z razmerjem dolžine obeh glavnih osi $b : a = 0,5$, napajano pa naj bo $2/3$ celotne višine elipse, torej od $u = -42^\circ$ do $u = 42^\circ$. Vrednost μ -ja je v primeru, da je tokovna obloga po obodu elipse enako velika, za kot napajanja $2 \times 42^\circ$ in $b : a = 0,5$, določena po sliki 25,0,83. Vrednost μ -ja pa je v primeru, da poteka tokovna obloga po tokovni premi po kosinusu le 0,75. Torej v tem poenostavljenem primeru tokovna obloga po obodu eli-

pse stalna, ampak je na obeh koncih napajanege dela navitja 1,105-krat večja kot v sredini navitja.

Vrednost amplitude n -tega vala tokovne obloge dobimo po znani enašbi:

$$A_n = \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/2} a_w \cos(nu) du \quad (63a)$$

Če v enašbo (44) vstavimo za μ vrednost, določeno v enašbi (42), za a_z pa $J : (\alpha \cdot l_n)$, dobimo:

$$a_w = a_z \mu = \frac{J}{\alpha l_n} a \cos u \quad (64)$$

Če napajamo površino elipse od kota $u = -u_n$ do kota $u = u_n$, dobimo z upoštevanjem enašbe (64) naslednje vrednosti amplitud:

$$A_n = \frac{4}{\pi} \int_0^{u_n} a_w \cos(nu) du = \frac{4}{\pi} \int_0^{u_n} a_z \mu \cos(nu) du = \frac{4}{\pi} \frac{a}{\alpha l_n} \int_0^{u_n} \cos u \cdot \cos(nu) du \quad (63b)$$

Z upoštevanjem enašbe (61) in (63b) dobimo vrednost faktorja ξ_n :

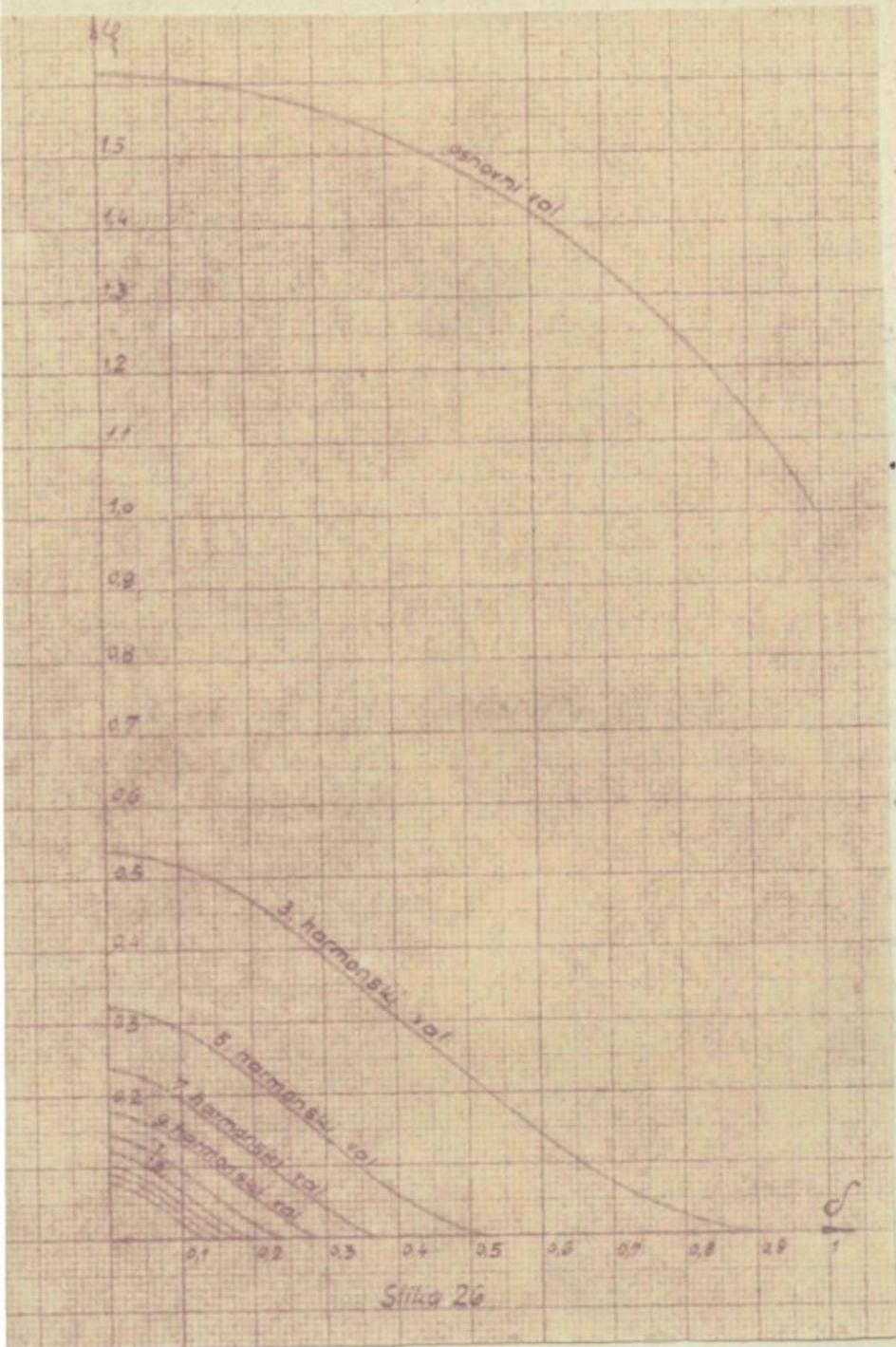
$$\xi_n = \frac{4 A_n^2}{J^2} = \frac{4}{n^2} \left(\frac{4}{\pi} \frac{a}{\alpha l_n} \right)^2 \int_0^{u_n} \cos u \cos(nu) du = \frac{1}{n^2} \left(\frac{8a}{\pi \alpha l_n} \right)^2 \left(\frac{\sin(n-1)u_n}{2(n-1)} + \frac{\sin(n+1)u_n}{2(n+1)} \right)^2 \quad (65a)$$

Vrednost faktorja ξ_n za osnovni val pa je:

$$\xi_1 = \left(\frac{4}{\pi} \frac{2a}{\alpha l_n} \right)^2 \left[\frac{u_n}{2} + \frac{1}{4} \sin(2u_n) \right]^2 \quad (65b)$$

Vrednosti koeficientov za harmonske komponente od 1. do 19. vala so v odvisnosti od kvocienta med dolžino napajanege dela navitja ($\alpha \cdot l_n$) in med celotno višino nadomestne elipse ($2a$), ki ga označimo z δ , podane v diagramu na sliki 26.

Kot primer je dalje izveden tudi izračun celotnega izraza ξ po enašbi (60), in sicer z upoštevanjem enašb (65). Izračun je iz-

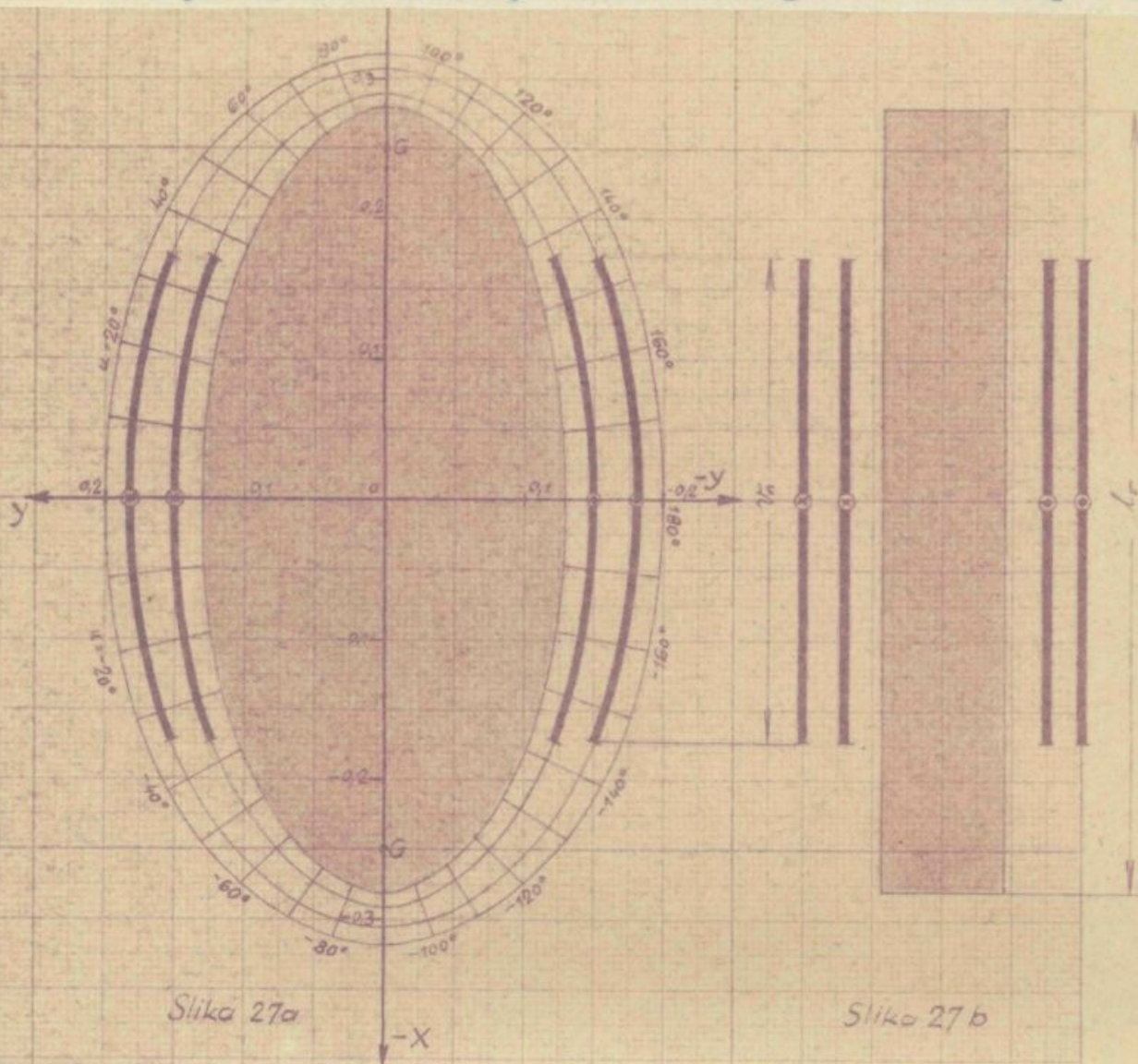


delan za transformator, na katerem so se vršile meritve. Pri tem transformatorju je razmerje med širino stebra in višino transformatorja $0,088:0,56=0,157$. Če naj ima ekvivalentna elipsa isti obseg kot pravokotnik transformatorja, dobimo, da je razmerje med dolžinama obeh glavnih osi elipse enako $0,473$, dolžina krajše glavne osi je torej: $0,473 \times 0,56 = 0,265$ m. Razdalja gorišča G nadomestne elipse od koordinatnega izhodišča pa je, dobljena po znani enačbi iz obeh glavnih osi, $0,2465$ m. Notranje navitje naj se nahaja na konfokalni e-

lipsi, katere krajša glavna os naj bo 4 cm daljša, torej $2b_1 = 0,265 + 0,04 = 0,305$ m. Vrednost daljše glavne osi pa je $0,58$ m.

Zunanje navitje naj se prav tako nahaja na konfokalni elipsi, njena krajša glavna os pa naj bo za 10 cm daljša od ustrezne osi elipse, ki nadomešča železno jedro. Vrednosti obeh osi sta torej: $2a_2 = 0,615$, $2b_2 = 0,365$ m.

Ker je vrednost razmerja dolžin obeh glavnih osi elipse enaka

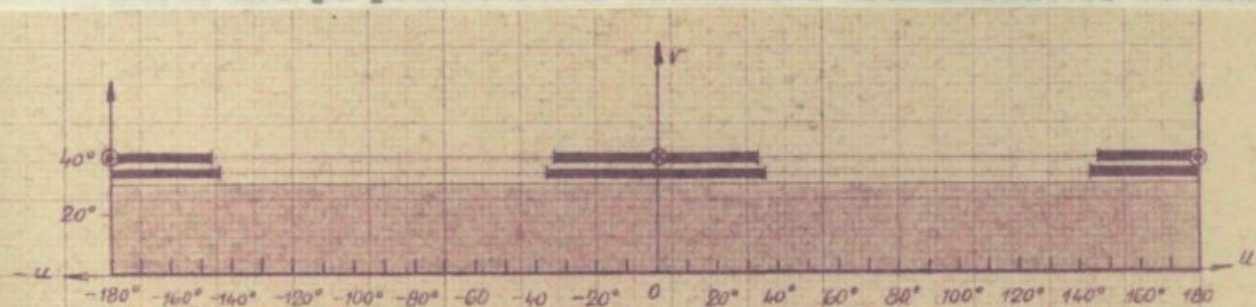


Slika 27a

Slika 27b

hiperboličnem tangensu koordinate v , dobimo za elipso, ki nadomešča železno jedro, vrednost $v_z = 30^\circ$, za elipso, na kateri je nameščeno notranje navitje, dobimo $v_1 = 33,5^\circ$, za elipso pa, na kateri je zunanje navitje, pa je $v_2 = 39,1^\circ$.

Na sliki 27b je vrisan prerez skozi dejanski transformator, na sliki 27a pa prerez skozi nadomestni transformator. Na sliki



Slika 27c

27c pa je podan nadomestni transformator, konformno transformiran v u-v ravnini.

Vrednosti celotnega koeficienta ξ so izračunane in podane na sliki 28a za gornji primer, in sicer za notranje kot tudi za zunanje navitje, in to v odvisnosti od δ (kvocijent med dolžino napajanega dela navitja $\alpha \cdot l_n$ in višino nadomestne elipse $2a$, na kateri naj se navitje nahaja). Vzemimo, da je dolžina celotnega notranjega navitja enaka dolžini zunanjega navitja in da je $0,348$ ml. Če vzbujamo celotno navitje, dobimo za ta primer vrednost izraza δ za notranje navitje $\delta_1 = 0,604$, za zunanje navitje pa $\delta_2 = 0,569$. Radi lažje primerjave z izmerjenimi vrednostmi je na sliki 28b podana vrednost koeficienta v odvisnosti od α , ki je razmerje med višino napajanega dela navitja in višino celotnega navitja.

Za nadaljnje obravnavanje je potrebno, da bi izrazili vrednost ξ -ja v odvisnosti od α oz. od δ z enačbo, ki je enostavnejša od izraza za ξ po enačbi (60). Če vzamemo med ξ in δ sledečo odvisnost:

$$\xi = a_1 - b \cdot \ln \delta = a_2 - b \cdot \ln \alpha \quad (66)$$

dobimo pri pravilno izbranih koeficientih a in b krivulje, ki so v diagramih na slikah 28 izvlečene črtopično in, ki se skladajo s po prejšnji enačbi določenimi krivuljami v točkah za $\alpha = 1$ in $\delta = 0,05$.

Vrednosti koeficienta ξ so v gornjih diagramih podane le za primer, da se nahaja sredina vzbujenega navitja na sredini stebra. Sedaj pa preglejmo za koliko se vrednost koeficienta spremeni, če premaknemo sredino vzbujalnega navitja za $\delta \cdot \alpha$ navzdol ali navzgor!

Vrednost reaktance praznega teka, z njo pa tudi vrednost magnetne prevodnosti je, kot sledi iz enačbe (62), sorazmerna ξ -ju

ki je odvisen od dolžine napajanelega dela navitja. Njegova recipročna vrednost je torej sorazmerna magnetni upornosti, ki naj bo:

$$R_m = k_m \cdot \frac{1}{\xi} \quad (67)$$

pri čemer je k_m koeficient

To magnetno upornost lahko razdelimo na magnetno upornost, katero morajo premagati magnetne silnice na poti iznad sredine navitja in na magnetno upornost, ki jo morajo premagati silnice na poti izpod sredine navitja. Če se nahaja navitje na sredini stebra, sta si upornosti med seboj enaki. Če pa prestavimo sredino navitja iz sredine stebra za $(\gamma \cdot d)$ navzgor, pa postaneta obe magnetni upornosti med seboj različni. Izračun si poenostavimo s tem, da vzamemo, da so polovične elipse iznad kot tudi izpod sredine navitja podobne nadomestnim polovičnim elipsam, ki nadomeščajo železno jedro oz. na katerih se nahaja tokovna obloga, v primeru, če je napajan del navitja na sredini stebra. V tem primeru namreč lahko določimo vrednosti ξ -ja v odvisnosti od δ po diagramu na sliki 28 oz. po enačbi (66).

Magnetna upornost dela iznad sredine navitja je z upoštevanjem tega, da se spremeni razmerje med delom napajanelega dela navitja in dolžino glavne osi elipse za $(1 - \gamma)$ -krat, določena z enačbo (66) in (67), enaka:

$$R_{m1} = \frac{k_m}{2} \cdot \frac{1}{\xi} = \frac{k_m}{2} \frac{1}{a_1 - b \cdot \ln\left(\frac{\delta}{1-\gamma}\right)} \quad (68a)$$

Magnetna upornost dela izpod sredine navitja pa je enako dobljena z upoštevanjem enačb (66) in (67), pri čemer moramo upoštevati, da se spremeni razmerje med delom napajanelega dela navitja in dolžino glavne osi elipse za $(1 + \gamma)$:

$$R_{m2} = \frac{k_m}{2} \cdot \frac{1}{a_1 - b \cdot \ln\left(\frac{\delta}{1+\gamma}\right)} \quad (68b)$$

Vsota obeh magnetnih upornosti je torej:

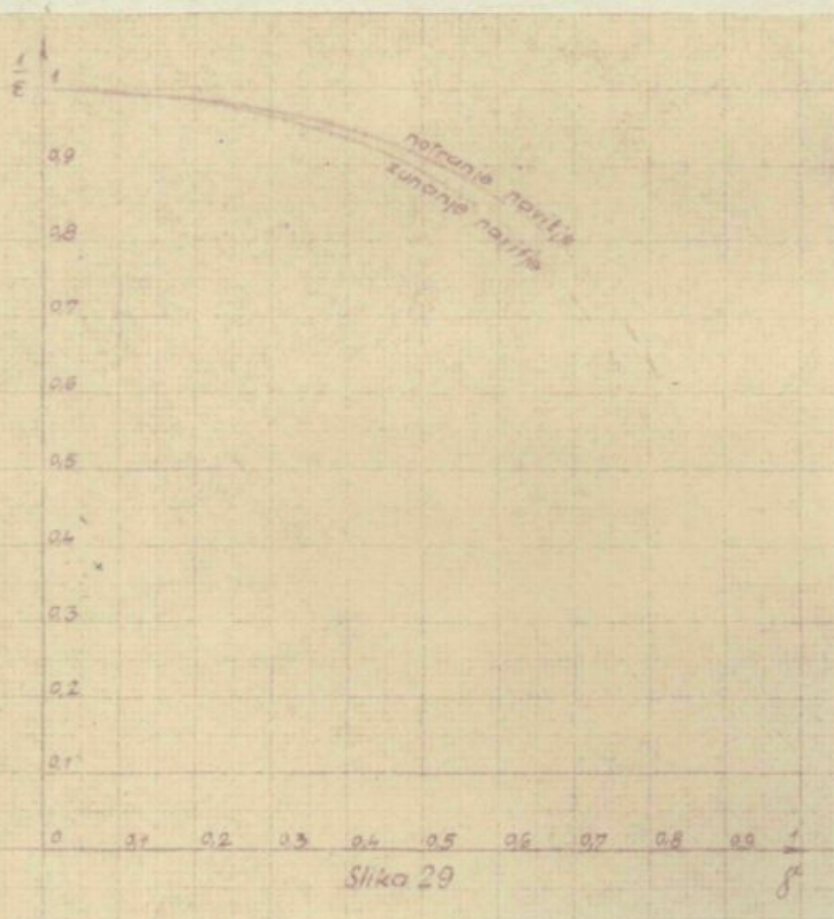
$$R_{mi} = R_{m1} + R_{m2} = \frac{K_m}{2} \left(\frac{1}{a_1 - b \ln \frac{\delta}{1-\gamma}} + \frac{1}{a_1 - b \ln \frac{\delta}{1+\gamma}} \right) \quad (69)$$

Če delimo dobljeno vrednost z magnetno upornost (enačba 69) z vrednostjo magnetne upornosti pri napajanju navitja, ki se nahaja na sredini stebra, dobimo razmerje ϵ , ki je:

$$\epsilon = \frac{R_{mi}}{R_w} = \left(\frac{1}{a_1 - b \ln \frac{\delta}{1-\gamma}} + \frac{1}{a_1 - b \ln \frac{\delta}{1+\gamma}} \right) : \left(\frac{2}{a_1 - b \ln \delta} \right) \quad (70)$$

Recipročna vrednost gornjega izraza pove, za koliko se pri premaknitvi sredina napajanega dela navitja iz sredine stebra zmanjša reaktanca praznega teka. Ker je gornja enačba nekoliko nepregledna, je izračunana iz nje vrednost $(1:\epsilon)$ za notranje in za zunanje navitje preje obravnavanega transformatorja, in sicer za primer, da je napajanega le 5 % celotnega navitja. Odvisnost te vrednosti od γ je podana na sliki 29. Iz krivulj

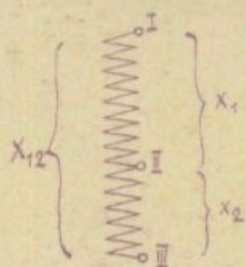
lahko ugotovimo, da je reaktanca praznega teka sofaznega zaporedja v glavnem neodvisna od ekscentričnosti sredine napajanega dela navitja napram sredini stebra.



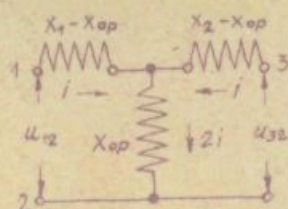
Izračun prečne reaktance sofaznega zaporedja

Vrednosti prečne reaktance sofaznega zaporedja bomo določili slično kot v prejšnjem poglavju za dva primera. Najprej bomo določili za primer, da je navitje ene strani razdeljeno na dva dela, na gornji in na spodnji del (sl.30). Pri tem bomo iskali prečno reaktanco med obema deloma navitja. Nato pa bomo določili vrednost prečne reaktance med celotnim navitjem ene strani in enim ovojem na tem navitju, pri čem nas bo zanimala vrednost prečne reaktance v odvisnosti od lege tega ovoja.

Obravnavajmo najprej prvi primer! Če poznamo vrednosti reak-



Slika 30a



Slika 30b

tance praznega teka gornjega dela navitja, označimo jo z x_1 , reaktance spodnjega dela x_2 ter vrednost reaktance praznega teka celotnega navitja x_{12} , vse reducirane na vrednost pri enem ovoju, lahko iz teh treh vrednosti reaktanc določimo

tudi iskano prečno reaktanco, ki jo označimo z x_{op} , in sicer na sledeč način:

Vzemimo, da napajamo gornji del in spodnji del navitja z enakimi ampernimi ovoji. V nadomestni vezavi na sliki 30b, da torej teče skozi sponko 1 in sponko 3 enak tok i . Pri tem dobimo na sponkah I in III na sliki 30a, v primeru, da ima gornje in spodnje navitje le po en ovoj, napetost, ki je enaka vsoti napetosti \hat{u}_{12} in napetosti \hat{u}_{32} , torej:

$$\hat{u}_{1,III} = \hat{u}_{12} + \hat{u}_{32} = \hat{i}_1 j(x_1 - x_{op}) + \hat{i}_1 j(x_2 - x_{op}) + 4 \hat{i}_1 j x_{op} = \hat{i}_1 j(x_1 + x_2 + 2x_{op}) \quad (71)$$

Če to napetost delimo s tokom \hat{i} , dobimo vrednost reaktance celot-

nega navitja, reducirano na dva ovoja. Če to vrednost reduciramo na en ovoj, če jo torej delimo s 4, dobimo vrednost, ki mora biti enaka reaktanci x_{12} :

$$\frac{\hat{U}_{1, \bar{m}}}{4\bar{r}} = j \frac{x_1 + x_2}{4} + \frac{jx_{op}}{2} = jx_{12} \quad (72a)$$

Iz gornje enačbe pa lahko poiščemo vrednost iskane prečne reaktance x_{op} :

$$x_{op} = 2x_{12} - \frac{x_1 + x_2}{2} \quad (72b)$$

Vrednosti reaktanc x_{12} , x_1 in x_2 bomo izrazili z vrednostmi po enačbi (62b) in (66). Poleg tega pa moramo upoštevati še faktor ξ , ki upošteva ekscentričnost navitja.

Višina gornjega navitja naj bo αl_n , korekcijski faktor, izračunan po enačbi (70) pa naj ima vrednost ξ_1 , višina spodnjega dela navitja naj bo $(1 - \alpha)l_n$, temu pa naj ustreza korekcijski faktor ξ_2 . Vrednosti vseh treh reaktanc so:

$$x_{12} = k_c a_2 \quad (73a)$$

$$x_1 = k_c (a_2 - b \ln \alpha) \frac{1}{\xi_1} \quad (73b)$$

$$x_2 = k_c [a_2 - b \ln(1 - \alpha)] \frac{1}{\xi_2} \quad (73c)$$

Če vstavimo dobljene vrednosti v enačbo (72b), dobimo:

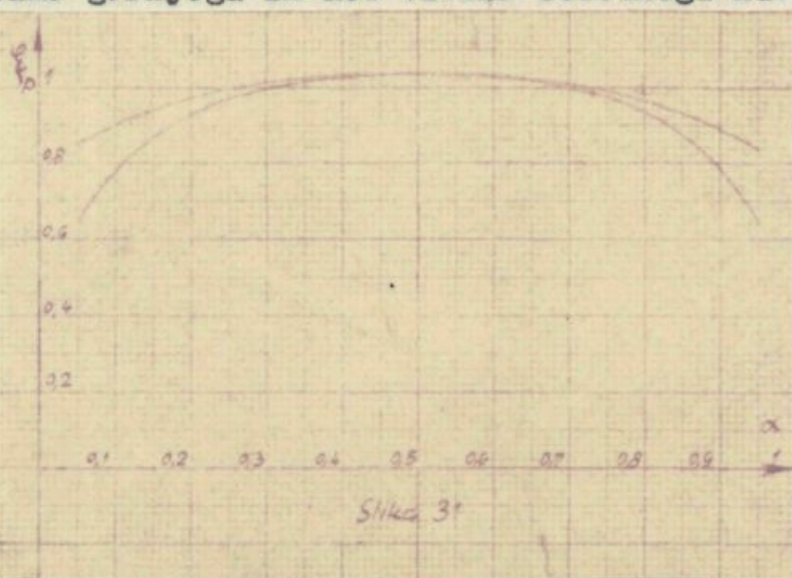
$$x_{op} = 2x_{12} - \frac{x_1 + x_2}{2} = k_c \left[2a_2 - \frac{a_2}{2\xi_1} - \frac{a_2}{2\xi_2} + \frac{b \ln \alpha}{2\xi_1} + \frac{b \ln(1 - \alpha)}{2\xi_2} \right] = k_c \xi_p \quad (74)$$

Če zanemarimo vrednost korekcijskih faktorjev, dobimo:

$$x_{op} \approx k_c \left\{ a_2 + \frac{b}{2} \ln[(1 - \alpha)\alpha] \right\} \quad (74a)$$

V ilustracijo tega je podana vrednost koeficienta ξ_p , izračunanega po enačbi (74), in sicer za notranje navitje že obravna-

nega transformatorja in to v odvisnosti od razmerja α med višino gornjega in med višino celotnega navitja (gornja krivulja



na sliki 31). Če zanemarimo korekcijski faktorja, dobimo vrednost faktorja ξ_k , ki je podan v odvisnosti od α na isti sliki (spodnja krivulja).

Sedaj pa določimo še vrednost prečne reaktance med celotnim navitjem ene strani in enim ovojem, ki se nahaja neposredno na navitju v oddaljenosti x od sredine navitja.

Vrednost prečne reaktance, reducirane na en ovoj, dobimo, če magnetni pretok skozi ovoj, pomnožen z ω delimo z vzbujalnimi amperskimi ovoji napajanelega dela navitja:

$$X_{op} = \omega \frac{\Phi_k}{A_{ov}} \quad (75)$$

Za določitev prečne reaktance potrebujemo v tem primeru torej le vrednosti magnetnega pretoka vzdolž navitja in pa velikost vzbujalnega toka.

Če zanemarimo višje harmonske komponente tokovne obloge, je vrednost magnetnega pretoka za sinusno tokovno oblogo v odvisnosti od u -ja že določena v enačbi (56). Če vrednost u -ja izrazimo po enačbi (38a) z x -om in če pomnožimo magnetni pretok še s korekcijskim faktorjem k , dobimo:

$$\Phi_k = k \mu_0 l_i \cos u A_i [1 + e^{2(\nu_i - \nu_0)}] = k \mu_0 l_i A_i \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2} [1 + e^{2(\nu_i - \nu_0)}] \quad (76)$$

Vrednost ϕ -ja v odvisnosti od x poteka torej po elipsi.

Če izrazimo v gornji enačbi vrednost amplitude tokovne obloge A_1 s tokom J po enačbi (63) in če to ustavimo v enačbo (75), dobimo:

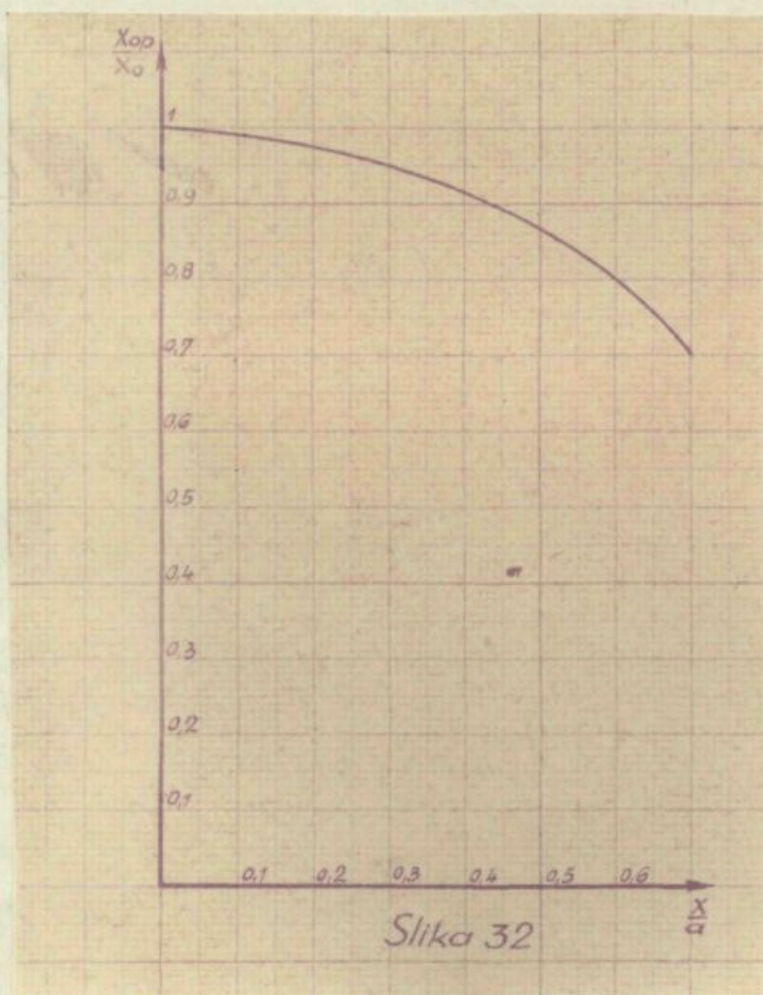
$$X_{op} = \omega \cdot \frac{\Phi_k}{3} = \omega \frac{k}{6} \cdot \mu_0 l_i \sqrt{\xi} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2} [1 + e^{2(v_1 - v_0)}] \quad (77)$$

Razmerje med prečno reaktanco in reaktanco praznega teka celotnega navitja določeno po enačbi (62) torej dobimo:

$$\frac{X_{op}}{X_0} = \frac{k \cdot \mu_0 \cdot l_i \cdot 2\pi f \sqrt{\xi} \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2} [1 + e^{2(v_1 - v_0)}]}{k \cdot \mu_0 \cdot l_i \cdot \pi^2 f \xi} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\sqrt{\xi}}{\xi} \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2} [1 + e^{2(v_1 - v_0)}] \quad (78)$$

Vrednost tega razmerja je izračunana za notranje navitje transformatorja in je podana v odvisnosti od x v diagramu na sl.32. V tem primeru namreč dobi enačba (78) sledečo obliko:

$$\frac{X_{op}}{X_0} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\sqrt{\xi}}{\xi} [1 + e^{2(v_1 - v_0)}] \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\sqrt{1,42}}{1,46} \cdot 1,93 \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2} \approx \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2} \quad (78a)$$



MERITVE REAKTANC NA PRESKUSNEM TRANSFORMATORJU

Za kontrolo računsko dobljenih rezultatov so bile izvršene meritve reaktanc sofaznega in pozitivnega zaporedja, katerih rezultate bomo pregledali v tem delu. Ob koncu tega poglavja pa bomo z uporabo izvajanj v drugem poglavju določili toke, ki jih lahko pri ovojnem stiku v transformatorju pričakujemo.

Vse meritve so bile izvedene z vektorskim merilcem proizvodnje AEG, ki kot znano omogoča na eni strani sorazmerno visoko točnost meritev in to pri sorazmerno mali porabi, na drugi strani pa omogoča tudi določitev kotov med merjenimi veličinami.

Opis transformatorja, na katerem so se vršile meritve

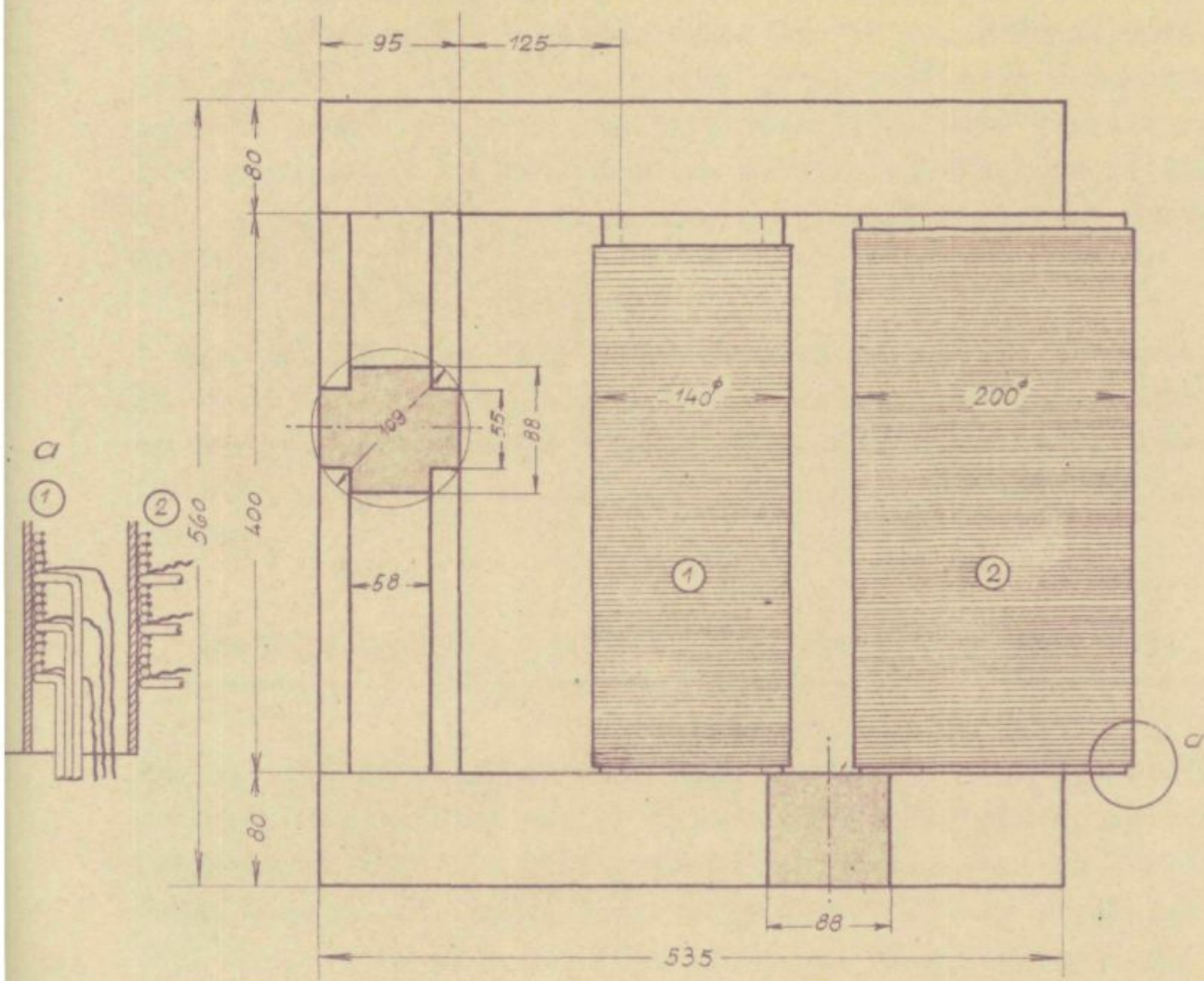
Vse meritve so bile izvedene na trifaznem transformatorju (sl. 33), ki je bil izdelan posebej v ta namen.

Železno jedro transformatorja je običajnih razmerij, in sicer je razmerje med širino okna in premerom stebra 1,02, razmerje med višino in premerom stebra pa je 3,67. Prerez stebra je $71,4 \text{ cm}^2$, železni prerez stebra pa je 65 cm^2 . Enak prerez ima tudi jarem.

Bakreni prerez polno navitega primarnega oz. sekundarnega navitja bi bil pri polnilnem faktorju $0,25 \text{ } 2775 \text{ mm}^2$.

Radī lažje izvedbe meritev na transformatorju sta na vsakem steburu nameščeni po dve enoplastni navitji s prerezom 705 mm^2 (notranje navitje) oz. s prerezom 740 mm^2 (zunanje navitje).

Notranje navitje ima srednji premer 140 mm, navito pa je z bakreno žico premera 3 mm, dvakrat ovito z bombažem. Celotno na-



- ① Notranje glavno navitje: baker 3° 100 ovojev z odcepi na 5, 10, 20, 25, 35, 40, 50, 55, 65, 70, 80, 85, 95 ov.
notranje merilno navitje: baker $0,3^{\circ}$ isto
- ② Zunananje glavno navitje: baker 3° 105 ovojev z odcepi na 5, 10, 20, 25, 35, 40, 50, 55, 65, 70, 80, 85, 95, 100 ov.
zunanje merilno navitje: baker $0,8^{\circ}$ isto

Slika 33. Dimenzijska skica transformatorja, na katerem so se vršile meritve.

vitje ima 100 ovojev in ima odcepe na vsakih 5 oz. 10 ovojev. Med samimi ovoji tega navitja je nameščeno merilno navitje, izvedeno z lakirano bakreno žico premera 0,8 mm. Kot napajalno ima tudi merilno navitje odcepe na vsakih 5 oz. 10 ovojev. Dolžina navitja na izolirnem valju je 330 mm. Zunanje navitje ima srednji premer 200 mm, navito je pa prav tako kot notranje navitje z žico premera 3 mm in z odcepi. Celotno število ovojev tega navitja je 105, dolžina navitja na valju pa je 350 mm. Kot pri notranjem je tudi tu med ovoji navito posebno merilno navitje.

V dimenzijski skici (slika 33) je prvi steber risan brez navitja, na drugem, srednjem stebri se nahaja le notranje navitje, na tretjem stebri pa je vrisano tudi zunanje navitje. V detajlu a (prerez skozi navitje) je razvidna namestitev merilnega navitja.

Meritve reaktanc kratkega stika pozitivnega zaporedja

Ker bi bila direktna meritev reaktanc pozitivnega zaporedja s trifaznim napajanjem zaradi objektivnih težav precej netočna (napetostna krivulja sinhronskega generatorja, ki bi lahko napajal preskušani transformator, je namreč precej popačena) in tudi drugače dosti težje izvedljiva, so bile vse vrednosti reaktanc določene iz enofaznih meritev na že v prvem delu obravnavan način (sliki 4,5, enačba 22).

Reaktance kratkega stika so bile določene na dva načina, in sicer indirektno iz induciranih napetosti v praznem teku in direktno s kratkimi stiki.

Določitev reaktanc kratkega stika iz induciranih napetosti v praznem teku

Vzemimo na transformatorju dve navitji, navitje 1 in navitje 2, med katerima hočemo določiti reaktance kratkega stika. Napajamo najprej navitje 1 in izmerimo v prvem in drugem navitju inducirano napetost. Prvo napetost označimo z E_{11} , drugo napetost pa z E_{12} . Nato napajamo z enakimi toki kot pri prvi meritvi samo navitje 2 in zopet izmerimo napetosti inducirane v prvem navitju (E_{21}) in napetosti, inducirane v drugem navitju (E_{22}).

Kot je pri izračunu kratkih stikov običajno, predpostavimo, da je magnetilni tok zanemarljiv. Dalje predpostavimo, da je permeabilnost železa neodvisna od magnetne poljske jakosti, da torej lahko uporabimo zakon o superpoziciji.

Če napajamo navitje 1 z enakim tokom kot pri prvi meritvi, navitje 2 pa vežemo na kratko, mora biti, če ohmsko upornost navitja zanemarimo, celotna, v navitju 2 inducirana napetost enaka nič. Zato se pojavi v navitju 2 kratkostični tok, ki mora v navitju 2 inducirati napetost, enako napetosti E_{12} . Amperni ovoj v kratkovezanem navitju se torej manjši od ampernih ovojev v kratkovezanem navitju v razmerju $E_{12} : E_{22}$. Tok v kratkovezanem navitju inducira v napajanem navitju napetost.

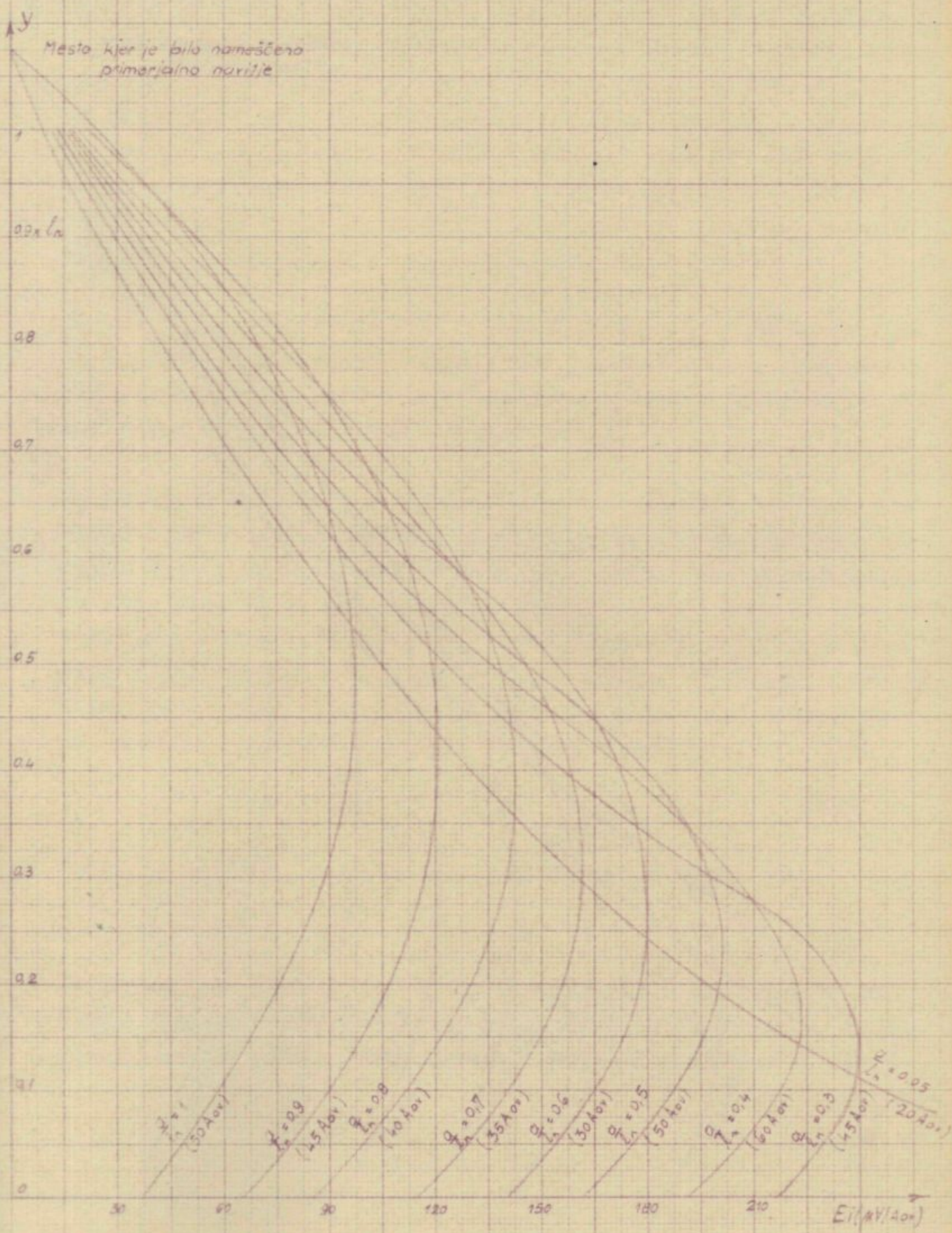
$$E_k = E_{21} \cdot E_{12} : E_{22} \quad (1a)$$

Vrednost celotne, v navitju 1 inducirane napetosti je:

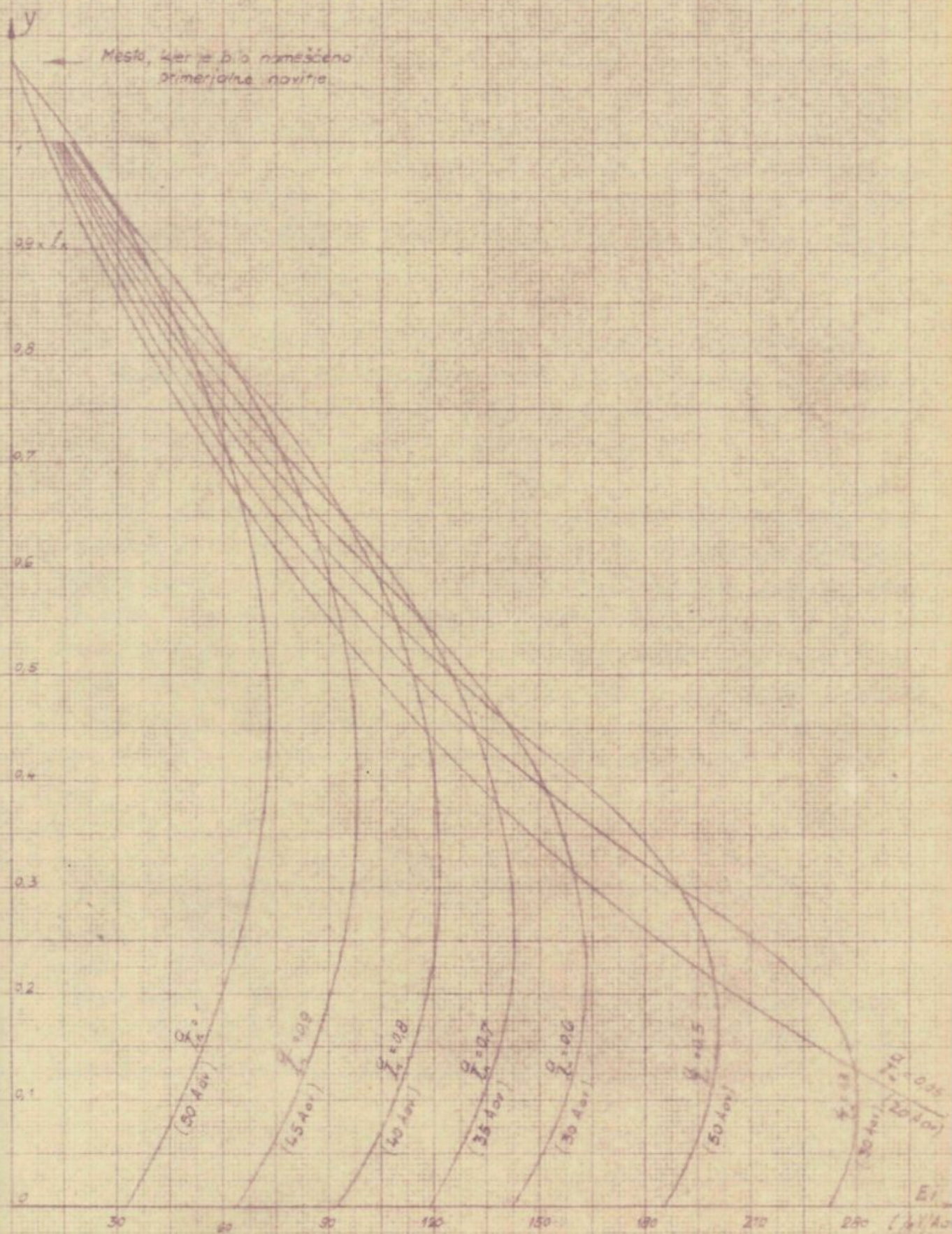
$$E = E_{11} - E_{21} \frac{E_{12}}{E_{22}} = E_{11} - E_{21} + (E_{22} - E_{12}) \frac{E_{21}}{E_{22}} \quad (1b)$$

Če napetost E delimo s tokom v navitju 1, dobimo iskano reaktanco. Ker je vrednost kvocienta $E_{21} : E_{22}$ zelo blizu 1, lahko gornjo enačbo pišemo tudi v poenostavljeni obliki:

$$E = E_{11} - E_{21} + E_{22} - E_{12} \quad (1c)$$



Slika 3- - Potek induciranih napetosti vzdolž stranskega stebra pri vzburjenju na prazno.



Slika 35. - Potek induciranih napetosti vzdolž srednjega stebra pri vzbujanju na prazno.

Določitev reaktance kratkega stika iz induciranih napetosti v praznem teku

Vzemimo na transformatorju dve zavijki, navitje 1 in navitje 2, med katerima hočemo določiti reaktanco kratkega stika. Napajamo najprej navitje 1 in izmerimo v prvem in drugem navitju inducirano napetost. Prvo napetost označimo z E_{11} , drugo napetost pa z E_{12} . Nato napajamo z enakimi toki kot pri prvi meritvi samo navitje 2 in zopet izmerimo napetosti inducirane v prvem navitju (E_{21}) in napetosti, inducirane v drugem navitju (E_{22}).

Kot je pri izračunu kratkih stikov običajno, predpostavimo, da je magnetilni tok zanemarljiv. Dalje predpostavimo, da je permeabilnost železa neodvisna od magnetne poljske jakosti, da torej lahko uporabimo zakon o superpoziciji.

Če napajamo navitje 1 z enakim tokom kot pri prvi meritvi, navitje 2 pa vezemo na kratko, mora biti, če ohmsko upornost navitja zanemarimo, celotna, v navitju 2 inducirana napetost enaka nič. Zato se pojavi v navitju 2 kratkostični tok, ki mora v navitju 2 inducirati napetost, enako napetosti E_{12} . Amperni ovojji v kratkovezanem navitju so torej manjši od ampernih ovojev v napajanem delu navitja v razmerju $E_{12} : E_{22}$. Tok v kratkovezanem navitju inducira v napajanem navitju napetost.

$$E_K = E_{21} \frac{E_{12}}{E_{22}} \quad (1a)$$

Vrednost celotne, v navitju 1 inducirane napetosti je:

$$E = E_{11} - E_{21} \frac{E_{12}}{E_{22}} = (E_{11} - E_{21}) + (E_{22} - E_{12}) \frac{E_{21}}{E_{22}} \quad (1b)$$

Če napetost E delimo s tokom v navitju 1, dobimo iskano reaktanco. Ker je vrednost kvocienta $E_{21} : E_{22}$ zelo blizu 1, lahko gornjo enačbo pišemo tudi v poenostavljeni obliki:

$$E \approx (E_{11} - E_{21}) + (E_{22} - E_{12}) \quad (1c)$$



Radi boljšega vpogleda v potek magnetnega pretoka vzdolž navitja so bile izmerjene inducirane napetosti v posameznih delih navitja in to za razna razmerja $a : l_n$, pri čemer je a dolžina vzbujanega navitja, l_n pa dolžina celotnega navitja. Te vrednosti so podane grafično v odvisnosti od višine y , in sicer za notranje navitje na zunanjem stebru na sl.34, za notranje navitje na srednjem stebru pa na sliki 35. Ker so procentualne razlike induciranih napetosti med posameznimi mesti navitja sorazmerno zelo nizke, so bile zato merjene razlike med induciranimi napetostmi na posameznih delih navitja in med inducirano napetostjo v primerjalnem navitju. To navitje je nameščeno iznad celotnega navitja. Vrednosti razlik induciranih napetosti za razna razmerja od $a : l_n = 0,05$ do $a : l_n = 1$.

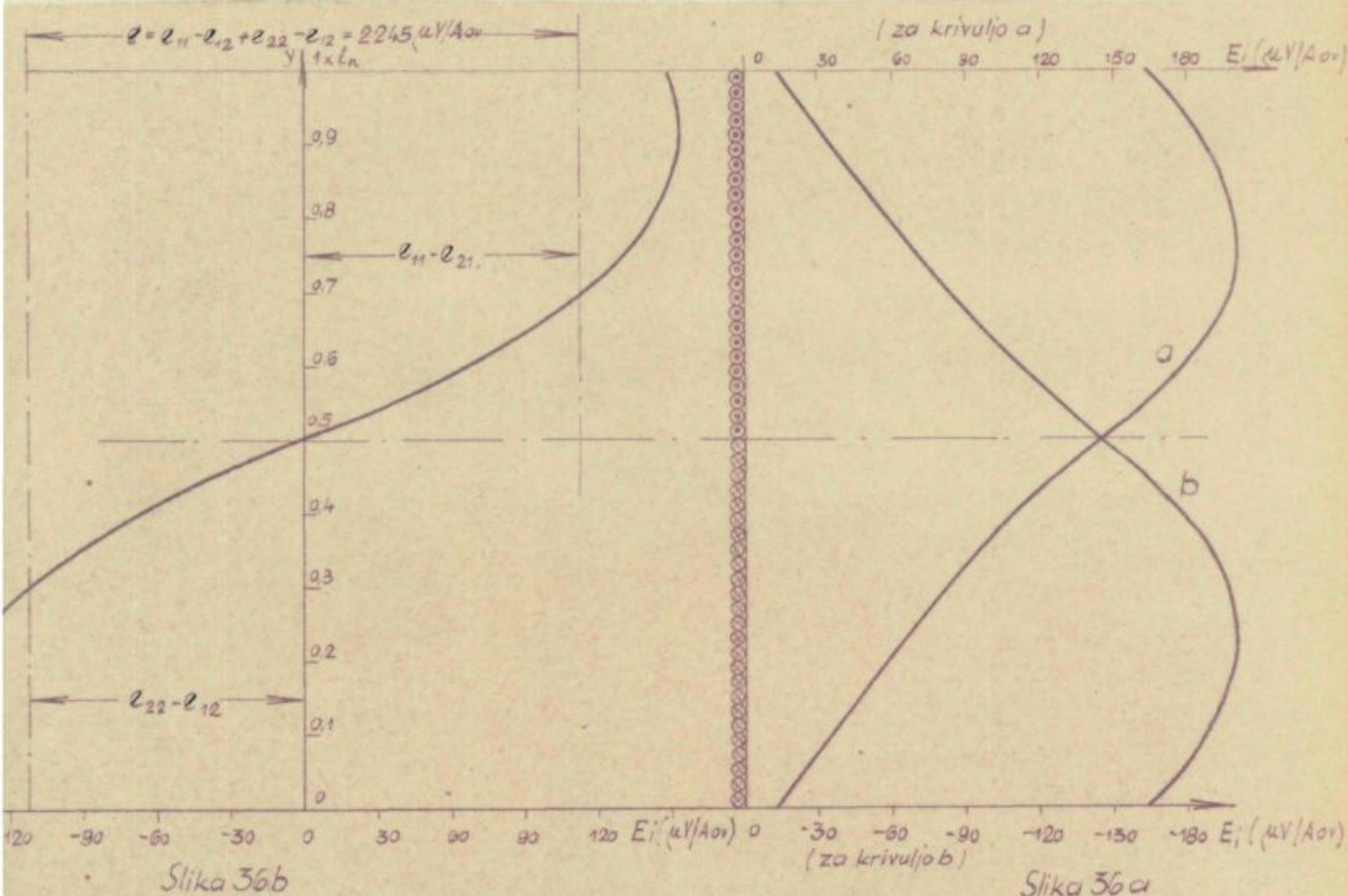
Radi boljše primerjave krivulj med seboj so vrednosti vseh napetosti reducirane na en ovoj in na napajanje pri enem ampurnem ovoju. Nad vsako krivuljo pa je vpisana velikost ampurnih ovojev, pri katerih je bila meritev izvedena.

Velikost celotne, v primerjalnem navitju inducirane napetosti, reducirana na vrednost pri vzbujanju z enim ampurnim ovojem je bila od 9.400 do 12.700 za zunanji steber oz. 14.000 do 16.750 μ V/A ov. Pri vzbujanju celotnega navitja se je sklenilo preko zraka ca 0,55 % (zunanji steber) oz. 0,27 % (notranji steber) vseh magnetnih gostotnic. Pri vzbujanju 5 % celotnega navitja pa se je preko zraka sklenilo 3,14 % (zunanji steber) oz. 2,15% (srednji steber) vseh gostotnic.

V ilustracijo gornjih izvajanj sta vrisani iz diagramov na sl. 34 krivulji napetosti za primer, da se ločeno napaja gornjih 50 % navitja in spodnjih 50 % navitja (slika 36a), oz. da se napaja ločeno gornjih 95 % navitja in spodnjih 5 % navitja (sl. 37a).

Pri istočasnem napajanju obeh delov navitja, pri čemer naj bodo vzbujalni ampurni ovoji v obeh delih navitja enaki, toki pa naj imajo med seboj nasprotno smer, dobimo vzdolž navitja inducirane

napetosti tako, da v sliki 36a oz. 37a odštejemo od napetosti

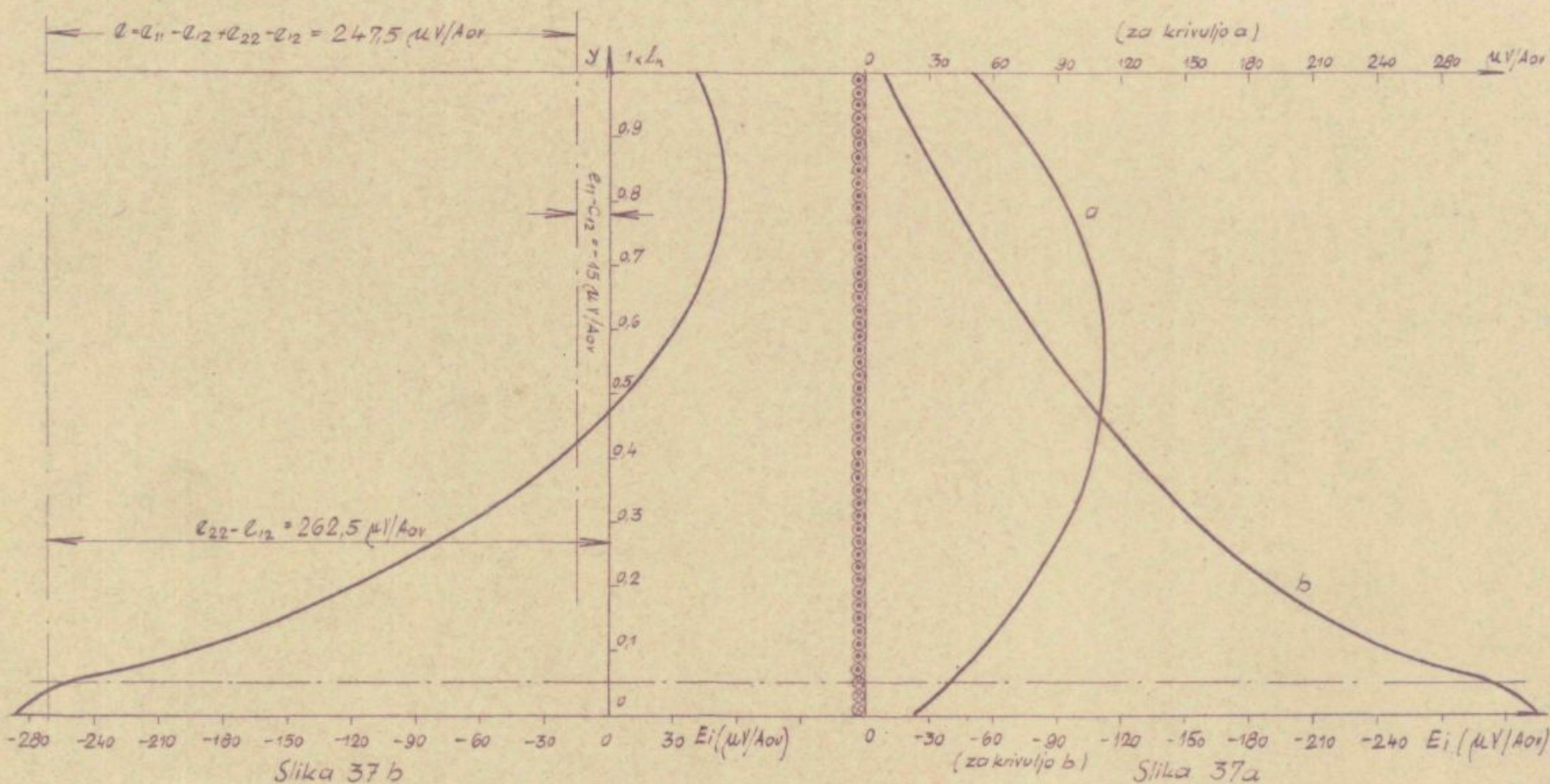


po krivulji a napetosti po krivulji b, pri čemer dobimo krivuljo, podano na sliki 36b oz. 37b.

Premaknimo abscisno os v sliki 36b oz. 37 b navzdol za napetost $e_{22} - e_{12}$, tako da je celotna v spodnjem delu inducirana napetost enaka nič! Ta abscisa je v slikah izvlečena črtkano. Vrednosti napetosti iznad te abscise so že napetosti vzdolž navitja v primeru, če napajamo gornji del navitja, spodnji del navitja pa je vezan na kratko. Pri tem smo sicer napravili manjšo napako, nismo namreč upoštevali, da se krivulja napetosti, katere inducira kratkostični tok, dejansko ne premakne v celoti navzdol za vrednost $e_{22} - e_{12}$. Vrednosti teh napetosti se namreč le zmanjšajo v razmerju $e_{12} : e_{22}$. Vendar je iznos te napake v obeh obravnavanih primerih zanemarljiv.

Iz enačbe (1b) dobimo vrednosti napetosti e , reducirane na en

ovoj v prvem primeru 224,5 μ V/A ov, v drugem primeru pa

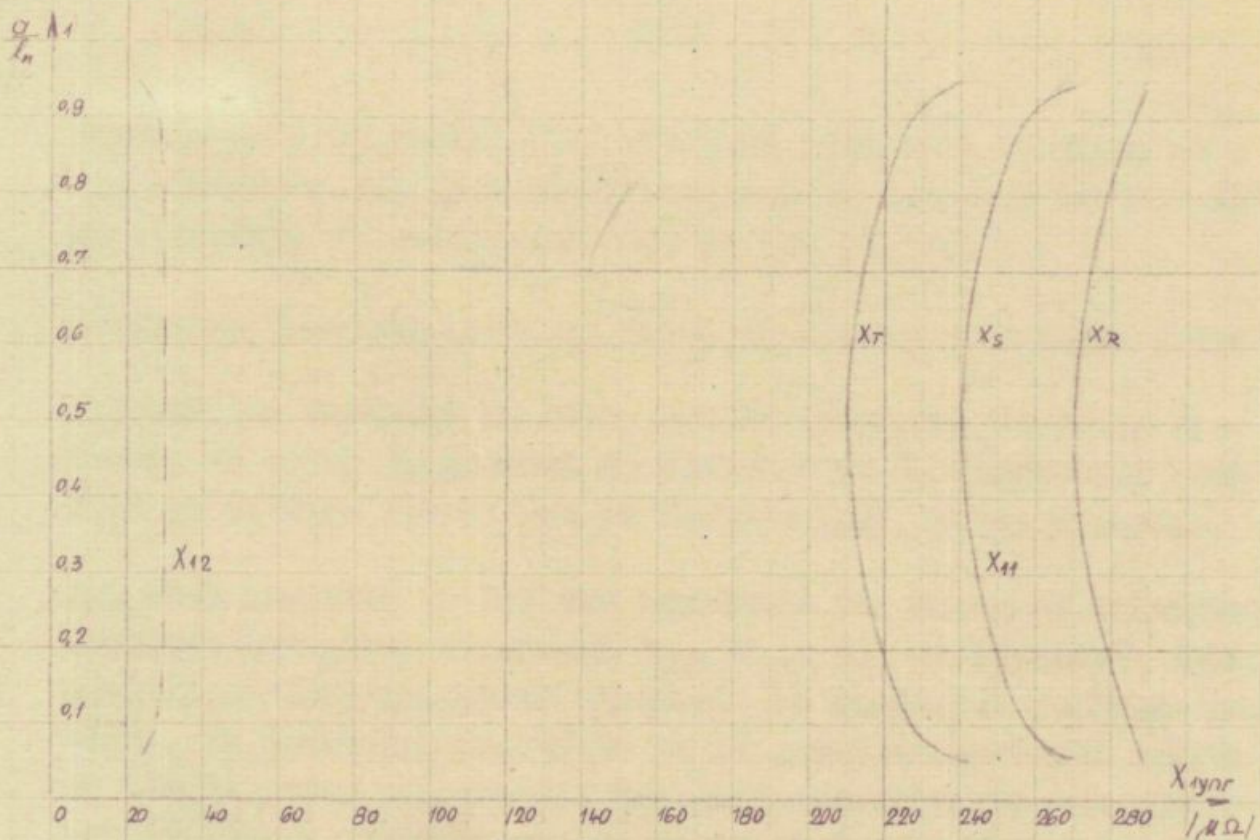


je vrednost napetosti 247,5 μ V/A ov. Vrednosti teh napetosti sta po iznosu tudi enaki reaktancama kratkega stika, reducirana na en ovoj in izraženima v $\mu\Omega$.

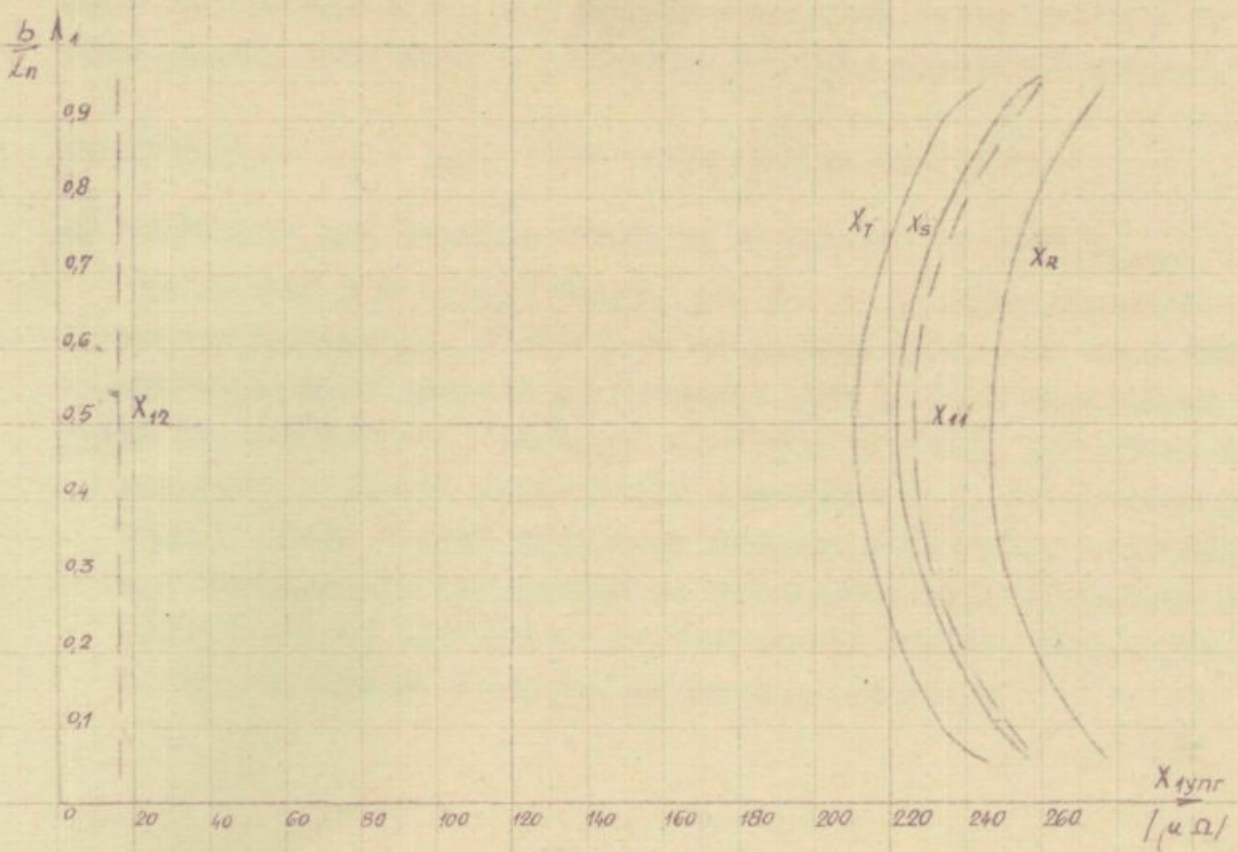
Sedaj pa izračunajmo vrednosti obeh reaktanc po v tretjem delu dobljeni enašbi (24)! Vzemimo, da je dolžina navitja enaka dolžini stebra, torej $l_0 = 0,4$ m. Ker je polmer notranjega navitja $r_0 = 0,07$ m, polmer zunanjšega navitja pa $r_0 = 0,1$ m, dobimo iz enašbe (4) v tretjem poglavju vrednosti $\rho_0 = 0,55$, oz. $\rho_0 = 0,785$. Tena polmeroma odgovarjajočo vrednost ustreznih faktorjev dobimo v diagramu na sliki 21. Vrednost reaktance notranjega navitja je torej po enašbi (24):

$$X_{12} = 816 \cdot 10^{-6} L_0 \left(k_1 + \frac{k^3}{3^3} + \frac{k^5}{5^3} + \dots \right) = 816 \cdot 10^{-6} \cdot 0,4 \left(0,732 + \frac{0,48}{27} + \frac{0,36}{125} + \dots \right) = 245 \cdot 10^{-6} \Omega \quad (2a)$$

Za zunanje navitje pa dobimo:



Slika 38



Slika 39

$$X_{12} = 815 \cdot 10^{-6} \cdot 0,4 \left[0,685 + \frac{0,42}{27} + \frac{0,39}{125} + \dots \right] = 229 \cdot 10^{-6} \Omega \quad (2b)$$

Izmerjeni in po enašbi (24) dobljeni rezultati se torej precej skladaje, saj je razlika reaktanc za notranje navitje le en odstotek, za zunanje navitje pa dva odstotka!

Določitev reaktanc kratkega stika iz meritev v kratkem stiku

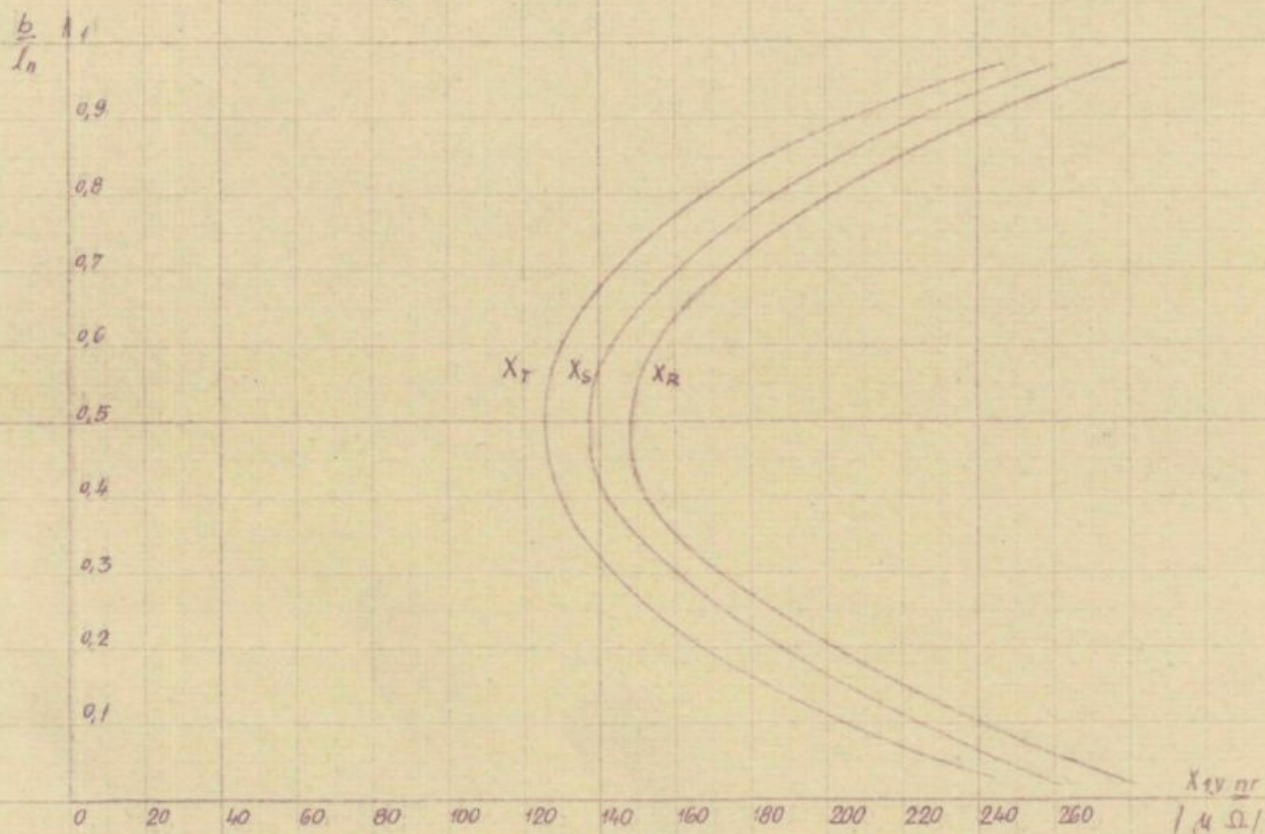
Vse meritve reaktanc so bile, kot že omenjeno, izvedene enofazno, in sicer po vezavah na slikah 4 in 5, komponente reaktanc pa so bile izračunane po enašbah (22) prvega poglavja.

Pri vseh meritvah je bil tok napajanja 5A. Neste za določitev reaktanc potrebnih napetosti U_{Ra} , U_{Sa} , U_{Ta} na napajanih delih navitij so bile izmerjene napetosti na ustreznem merilnem navitju. Te izmerjene napetosti so od gornjih napetosti manjše za ohmski padec napetosti v napajanem navitju. Iz teh vrednosti napetosti, iz toka napajanja in iz faznih kotov, ki so jih oklepale napetosti s tokom napajanja, so bile določene reaktance X_R , X_S , X_T . Te vrednosti reaktanc, reducirane na en ovoj, bomo označevali s x_R , x_S , x_T . Te reaktance torej dobimo, če delimo gornje reaktance s kvadratom števila napajanih ovojev.

Izmerjene so bile naslednje kratkostične reaktance:

- a) reaktance pri kratkem stiku na notranjem navitju x_{1ynr} (po enašbi 3 v drugem delu), pri čemer je bilo napajano notranje navitje. V sliki 38 so podane vrednosti vseh treh reaktanc v odvisnosti od razmerja med dolžino napajanege dela in med dolžino celotnega navitja. Krivulja pozitivne komponente reaktance pozitivnega zaporedja x_{11} , izračunana po enašbi (22b) skoraj popolnoma sovpaše s krivuljo reaktance x_S . Vrednost te komponente se sorazmerno malo spreminja v odvisnosti od števila na kratkovezanih ovojev. Najmanjša je, če je vezanih 50 % ovojev na kratko. Če pa je

kratkovezanih 5 % ali pa 95 % ovojev, naraste za 10,5 %.



Slika 40

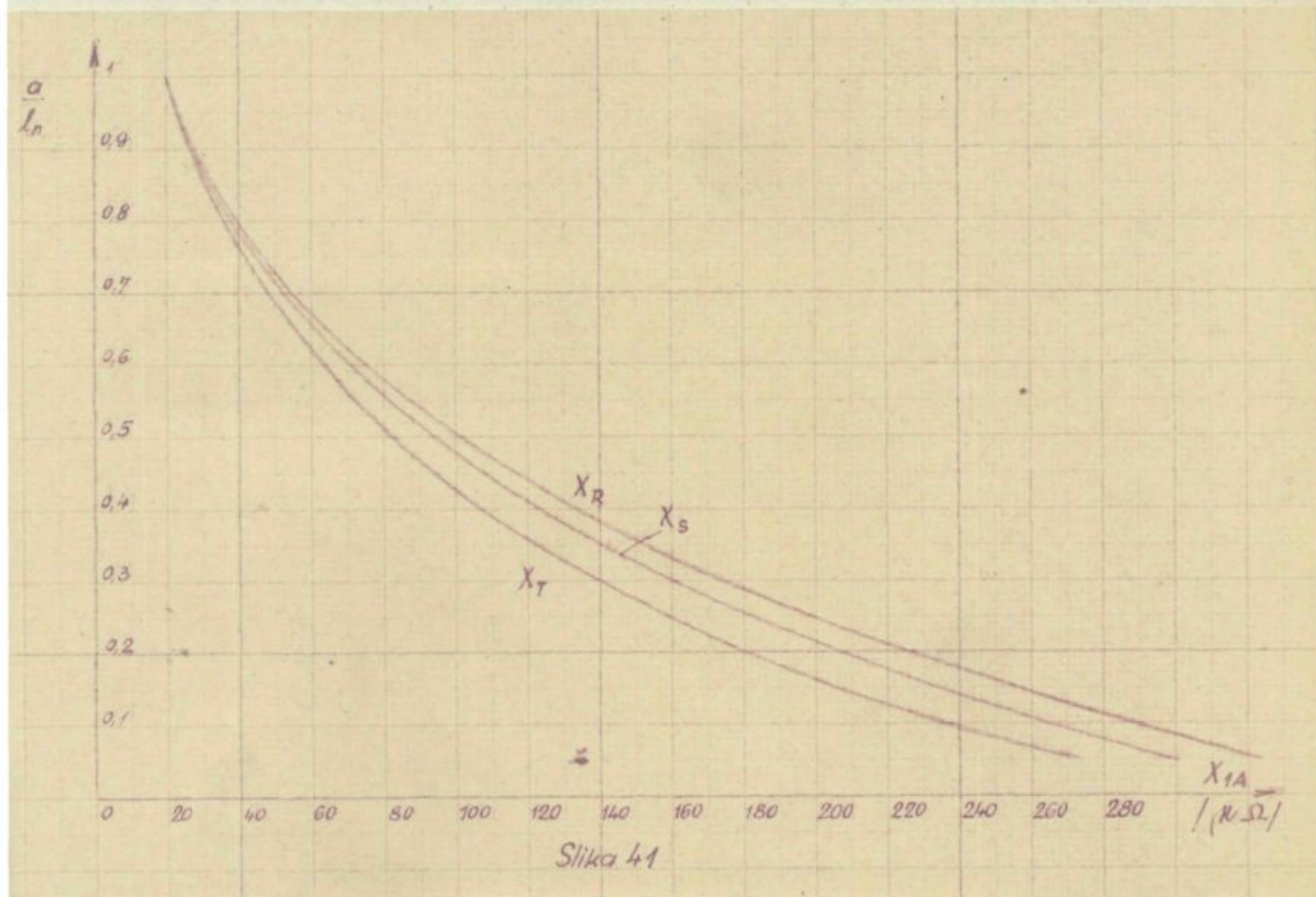
Vrednost sofazne komponente reaktance pozitivnega zaporedja x_{10} je skoraj zanemarljiva. Vrednost negativne komponente reaktance kratkega stika pozitivnega zaporedja x_{12} , določena po enačbi (22c), pa znaša ca 14 % vrednosti pozitivne komponente.

- b) reaktance pri kratkem stiku na zunanjem navitju, pri čemer je bil napajan preostali del zunanjega navitja. V sliki 39 so podane vrednosti reaktanc x_{1ynr} in to za razne vrednosti razmerij $a : l_n$. Vrednost pozitivne komponente reaktance kratkega stika se v odvisnosti od razmerja $a : l_n$ spreminja nekoliko bolj, in sicer v območju od $a : l_n = 0,05$ do $a : l_n = 0,95$ za ca 15 %. Sofazna komponenta je tudi v tem primeru skoraj zanemarljiva, vrednost negativne komponente x_{12} pa je ca 7 % vrednosti pozitivne komponente reaktance kratkega stika pozitivnega zaporedja.

Na sliki 40 so podane krivulje reaktanc v odvisnosti od razmerja med višino b , kjer se kratkovezano navitje na stebru nahaja, in med celotno dolžino navitja l_n . Kratkovezanega je pri tem bilo stalno 5 % celotnega navitja. Razmerje $b : l_n$ vpliva precej na velikost reaktanc, saj so v primeru, da je stik ob koncu navitja reaktance še enkrat večje kot v primeru, če se stik nahaja v sredini navitja.

Če primerjamo potek reaktanc v odvisnosti od razmerja $b : l_n$ na sliki 40, ki je bil izmerjen, z računsko določenim rezultatom (enačba 36, sl.24), lahko ugotovimo, da se tudi v tem primeru izračunan potek krivulje precej sklada z izmerjenimi vrednostmi.

- c) reaktance pri kratkem stiku na zunanjem navitju, pri čemer je bilo napajano notranje navitje. Na sliki 41 so vrisane krivu-



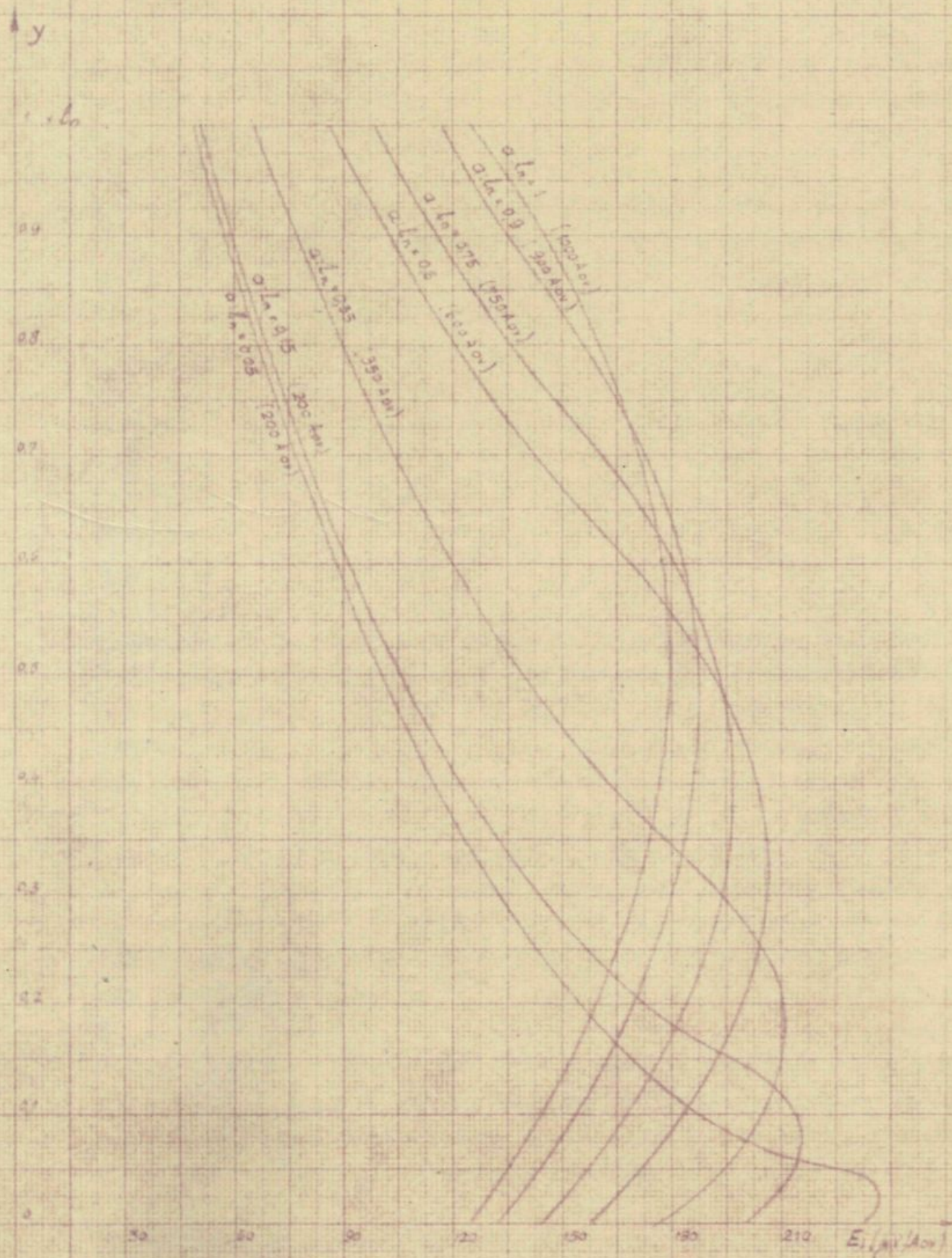
lje reaktanc x_{1A} (enačba 5 v drugem delu) in to v odvisnosti od

razmerja $a : l_n$, to je razmerja med dolžino napajane in med dolžino celotnega navitja. Vrednosti reaktanc prehajajo od vrednosti reaktance kratkega stika med celotnim zunanjim in celotnim notranjim navitjem pri 100 % ovojnem stiku do vrednosti, ki je enaka vsoti reaktance x_{1ynr} (slika 38) in reaktance x_{1c} , in to pri minimalnem številu kratkovezanih ovojev, kar se sklada tudi z enačbo (6b), dobljeno v drugem poglavju.

Iz v slikah 38 do 41 podanih diagramov lahko ugotovimo še naslednje: v vseh diagramih je odreaktanc x_R , x_S , x_T reaktanca x_T najnižja. Vrednost reaktance po enačbi (2lc) v prvem delu ($x_{ST} - x'_{St}$) je namreč vsled slabe magnetne povezave med navitji na obeh zunanjih stebrih sorazmerno nizka.

Vrednost reaktance x_S je od reaktance x_T višja za toliko, kolikor je vrednost reaktance ($x_{RS} - x'_{Rs}$) višja od vrednosti reaktance ($x_{ST} - x'_{St}$). Reaktanca x_R pa je od reaktance x_S višja za toliko, kolikor je višja reaktanca kratkega stika med napajanim in kratkovezanim delom navitja na srednjem stebri od reaktance kratkega stika navitja na zunanjem stebri ($x_{SS} - x'_{Ss}$). V več primerih je razlika med reaktancama x_R in x_S enaka razliki med reaktancama x_S in x_T . V tem primeru je vrednost reaktance x_S tudi enaka vrednosti pozitivne komponente reaktance kratkega stika pozitivnega zaporedja x_{11} . Negativna komponenta reaktance pa je v tem primeru enaka razliki med reaktancama x_R in x_S , sofazna komponenta pa je nič.

Če primerjamo vrednosti reaktanc pri kratkem stiku na notranjem in pri kratkem stiku na zunanjem navitju (sliki 38 in 39), lahko ugotovimo, da sta vrednosti reaktanc x_T v glavnem enaki za obe navitji. Večja razlika pa je med reaktancami x_R in x_S . Reaktance kratkega stika pozitivnega zaporedja notranjega navitja x_{11} so od ustreznih reaktanc zunanjega navitja večje za 4 do 10 %.



Slika 42

Potek induciranih napetosti zaradi stranskega stroma pri sklanjanju vzbujačnega transformatorja na prazno.

Meritve reaktanc sofaznega zaporedja

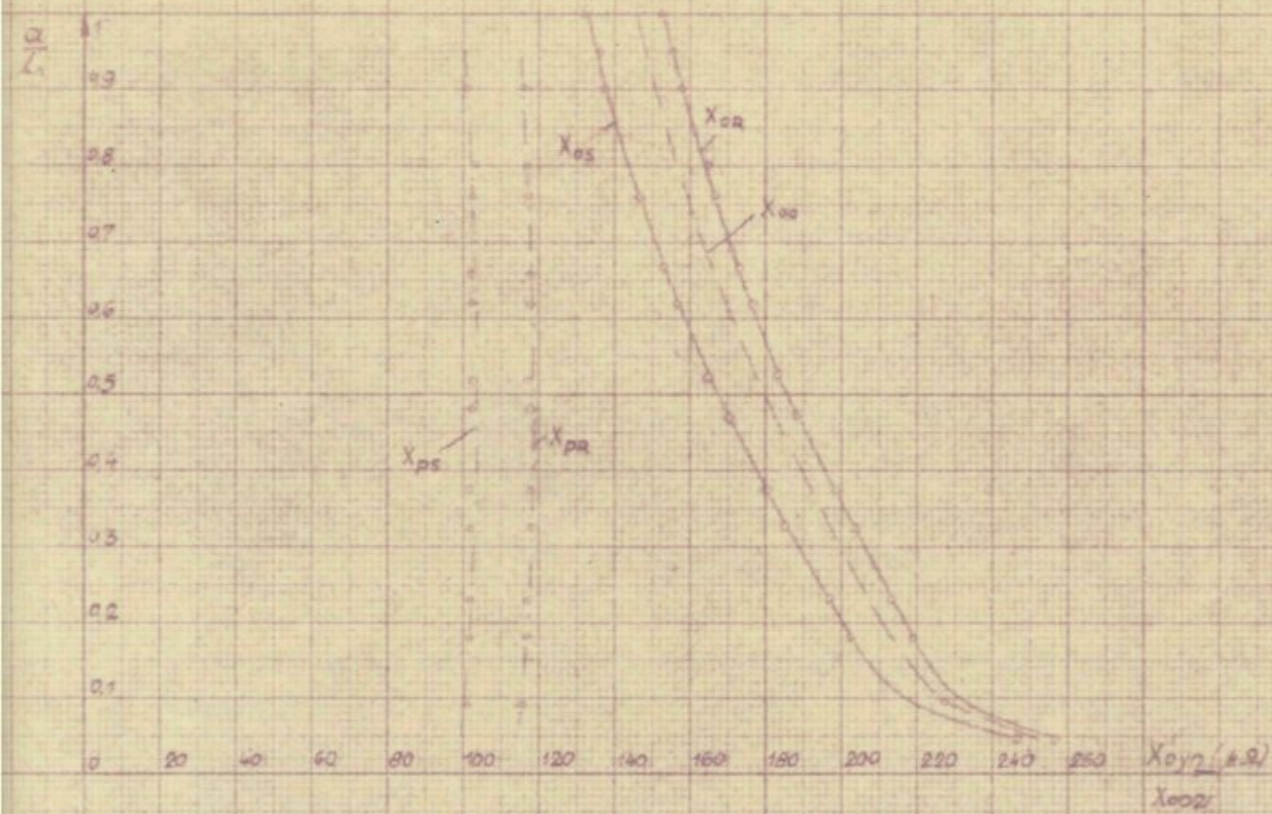
Sofazne reaktance merimo lahko na dva načina, namreč da vežemo navitja vseh treh faz po sliki 2 v serijo ali pa da vežemo navitja vseh treh faz paralelno.

Ker pri paralelni vezavi vseh treh navitij neenaka prehodna upornost spojev lahko pri sorazmeroma malih reaktancah rezultate meritev precej popači, so bile meritve izvedene s serijsko vezavo vseh treh faznih navitij. Pri tej vezavi so bile izmerjene napetosti, označene na sliki 2 z U_R , U_S , U_r , U_s . Ker so bile te napetosti izmerjene na merilnem navitju, dobimo, če delimo te vrednosti s tokom J že vrednosti ustreznih reaktanc X_{OR} , X_{OS} , X_{pr} , X_{ps} (enačbe 7 in 12 v prvem delu). Če vrednosti teh reaktanc delimo s številom kratkovezanih ovojev, dobimo reducirane vrednosti reaktanc, ki jih bomo označevali z x_{OR} , x_{OS} , x_{pr} , x_{ps} .

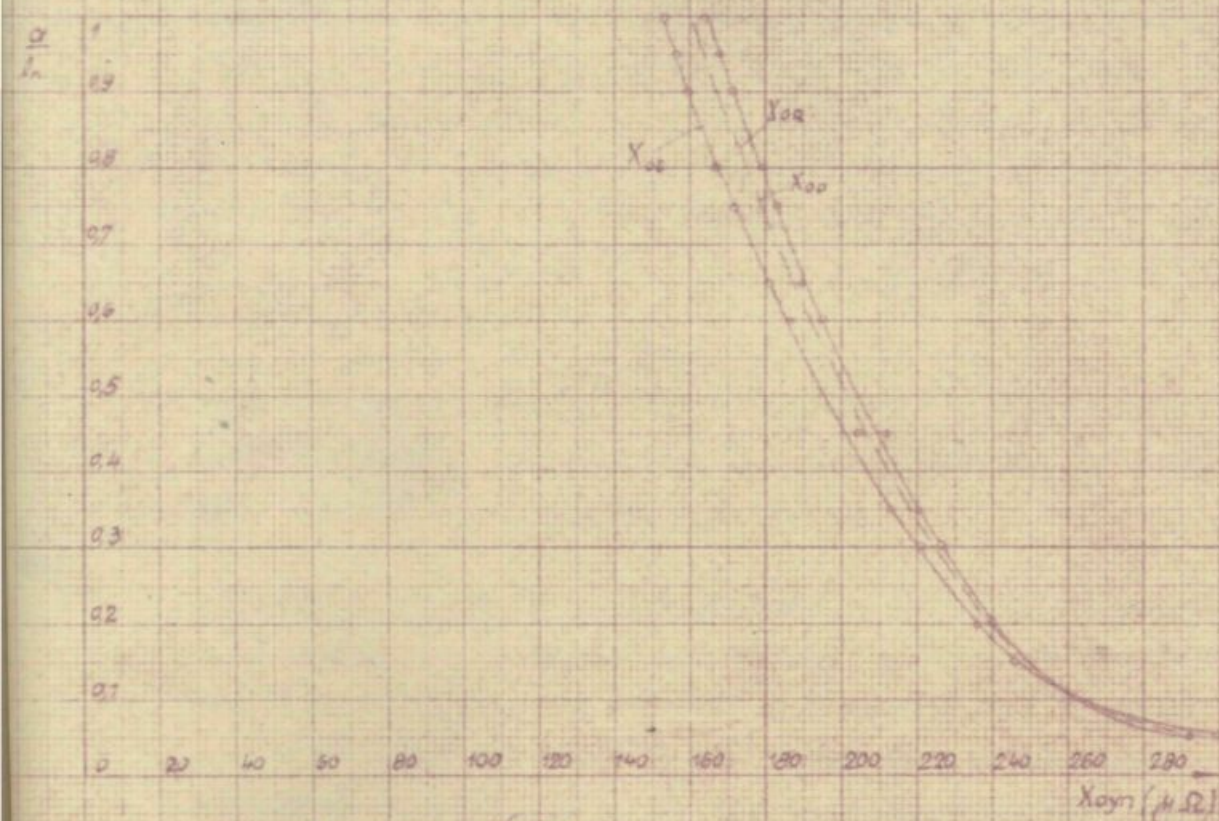
Slično kot pri reaktancah pozitivnega zaporedja so bile tudi v tem primeru posnete inducirane napetosti v posameznih delih navitja in to za različna razmerja med napajanim delom in med celotno višino navitja $a : l_n$. V sliki 42 so podane vrednosti teh napetosti, reducirane na en ovoj in na vzbujanje z enim ampernim ovojem. Te vrednosti napetosti so bile izmerjene na notranjem navitju zunanjšega stebra, in sicer pri 200 do 1000 ampernih ovojev. Točna vrednost vzbujalnih ampernih ovojev pa je vpisana v sliki 42 nad krivuljami, ki ponazarjajo potek induciranih napetosti vzdolž stebra, in to pri različnih dolžinah vzbujalnega navitja.

Iz izmerjenih napetosti določene vrednosti reaktanc praznega teka so v odvisnosti od razmerja med dolžino napajanege dela navitja a in med celotno dolžino navitja l_n podane za notranje navitje na sliki 43, za zunanje navitje pa na sliki 44.

Če poiščemo vrednost reaktance praznega teka po enačbi (62b) v



Slika 44



Slika 43

katero vstavimo za dolžino transformatorja $l_1 = 0,535$ m, za vrednost faktorja ξ pa iz diagrama na sliki 28b vrednost 1,45 oz. 1,37, dobimo:

$$X_1 = \frac{\pi^2}{6} k \mu_0 f l_1 \xi = \frac{\pi^2}{6} \cdot k (0,4\pi \cdot 10^{-6}) \cdot 50 \cdot 0,535 \cdot 1,45 = k 80,1 \cdot 10^{-6} \Omega \quad (3a)$$

$$X_2 = \frac{\pi^2}{6} \cdot k (0,4\pi \cdot 10^{-6}) \cdot 50 \cdot 0,535 \cdot 1,37 = k 75,6 \cdot 10^{-6} \Omega \quad (3b)$$

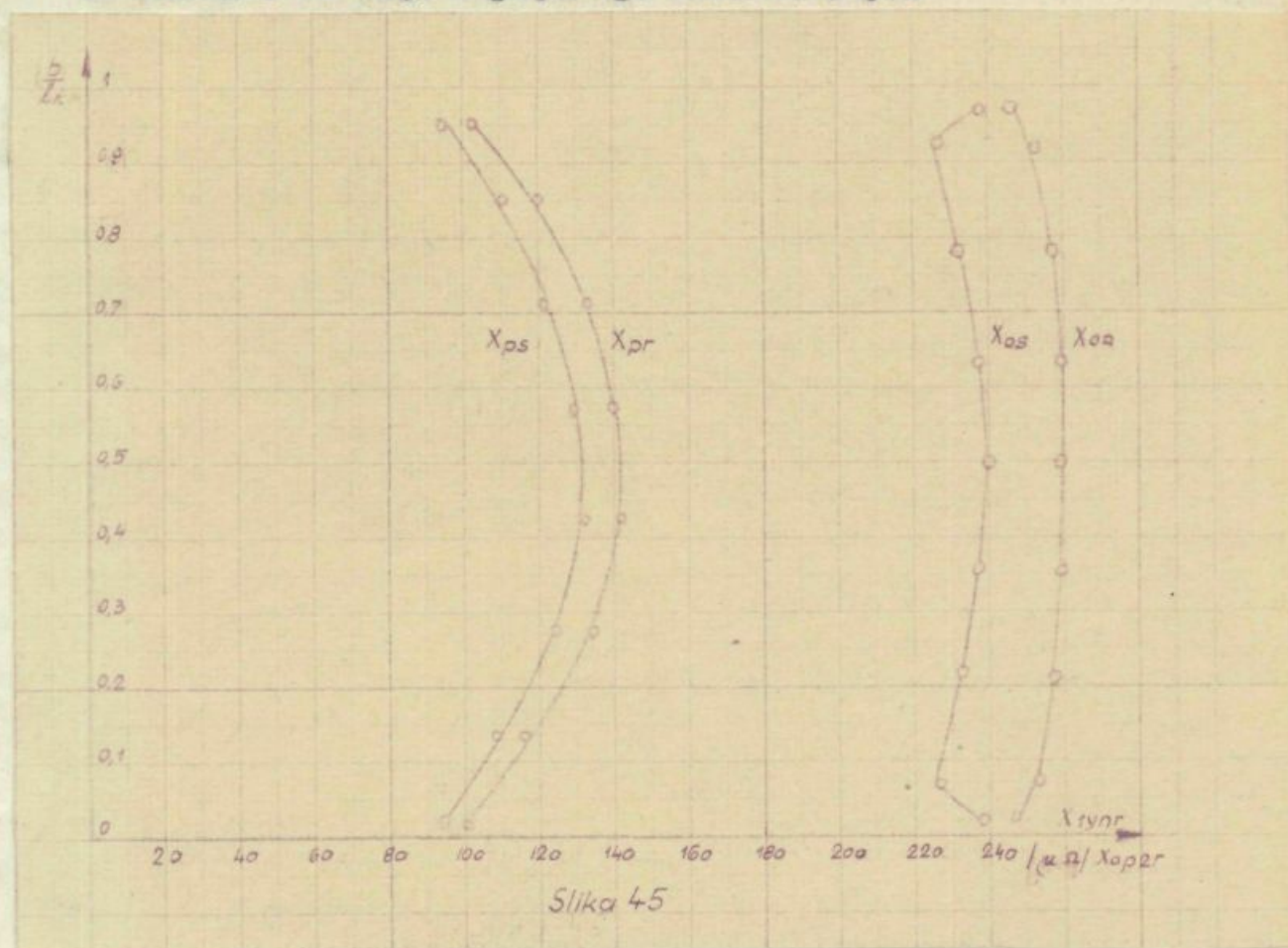
Ker je vrednost izmerjene reaktance za notranje navitje $160 \mu\Omega$, za zunanje navitje pa $146 \mu\Omega$, dobimo, da je vrednost korekcijskega faktorja pri vzbujanju celotnega navitja za notranje navitje $k = 1,99$, za zunanje navitje pa $k = 1,93$.

Če primerjamo potek vrednostineaktance v odvisnosti od dolžine vzbujanega navitja (sl. 43 in 44), z izračunanimi vrednostmi, podanimi v diagramih na sliki 28b, moremo ugotoviti, da potekajo krivulje slično. Pri tem pa moramo dodatno še upoštevati, da so računane vrednosti določene za primer, da je sredina navitja tudi v sredini stebra, meritve pa so se vršile pri raznih dolžinah vzbujanega navitja, pri čemer se je vzbujani del navitja manjšal od zgoraj navzdol tako, da je sredina navitja premaknjena iz sredine stebra pri vseh vzbujanjih, razen pri vzbujanju celotnega navitja. Vsled tega bi morali za primerjavo izračunanih in izmerjenih vrednosti pomnožiti vrednosti reaktanc na sliki 43 in 44 še s korekcijskim faktorjem, ki bi upošteval tudi to. S tem bi dosegli še večjo skladnost izmerjenih in izračunanih vrednosti.

Na sliki 44 je podana tudi odvisnost prečne reaktance x_{op2r} v odvisnosti od razmerja $a : l_n$. Reaktanco x_{op2r} smo potrebovali v enačbi 36 v drugem poglavju.

Vrednosti reaktanc praznega teka po sofaznega zaporedja so v odvisnosti od razmerja med višino b , kjer se kratkovezано navitje nahaja, in med celotno višino navitja l_0 podane za zunanje navitje na sliki 45. Kot smo že pri izračunu ugotovili (diagram na sliki 31), je vrednost te reaktance sorazmerno ma-

lo odvisna od lege napajanega dela navitja.



Če bi bila višina napajanega navitja zanemarljiva v primeru z dolžino ostalega navitja, bi potekala vrednost prečne reaktance med napajanim delom in med preostalim delom tega navitja po krivulji, ki predstavlja potek inducirane napetosti vzdolž stebra, in to pri vzbujanju celotnega navitja.

Vrednosti prečnih reaktanc so bile izmerjene za primer, da je 5 % navitja vzbujanega. Vrednosti teh reaktanc so v odvisnosti od razmerja $b : l_n$ podane na sliki 45.

• Določitev vsote reaktanc pozitivnega, negativnega in
sofaznega zaporedja

Iz izmerjenih vrednosti reaktanc sofaznega zaporedja (diagrami na slikah 43 in 44) sledi, da so tako pozitivne kot tudi negativne komponente teh reaktanc sorazmerno majhne v primeri s sofazno komponento. Ker smo za reaktance pozitivnega zaporedja slično ugotovili, da so sofazne in negativne komponente teh reaktanc sorazmerno majhne v primeri s pozitivno komponento, lahko iz tega zaključimo, da ne napravimo prevelike napake, če vzamemo, da je transformator grajen simetrično z ozirom na vse tri stebre. V tem primeru si namreč račun precej poenostavimo in lahko uporabimo vse enačbe, ki smo jih določili v drugem delu. Zato bomo uporabili vse, v drugem delu uporabljene poenostavitve in predpostavke, pri čemer bomo vstavili za sofazno reaktanco njeno, iz meritev določeno sofazno komponento, za pozitivno reaktanco pa iz meritev določeno vrednost njene pozitivne komponente.

Kot sledi iz izvajanj v drugem poglavju, je vrednost tokov, ki nastopajo pri ovojnem kratkem stiku, predvsem odvisna od vsote ustreznih impedanc pozitivnega, negativnega in sofaznega zaporedja.

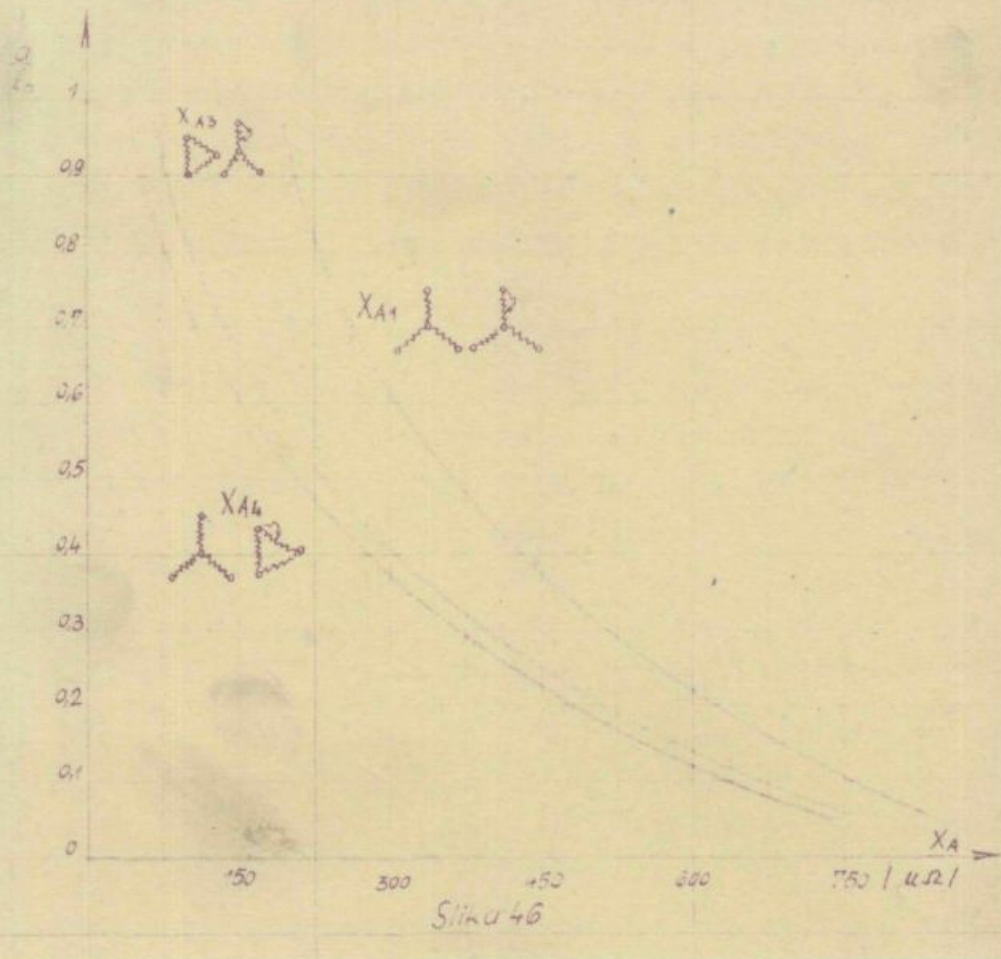
Vrednosti ohmskih komponent teh impedanc so odvisne le od veze transformatorja, od velikosti dela kratkovezanega navitja in od ohmske upornosti celotnega navitja in jih zato določimo lahko iz teh podatkov z uporabo enačb, ki so bile obdelane v drugem delu.

Za določitev induktivnih komponent ustreznih reaktanc po enačbah, obravnavanih v drugem delu, pa je potrebno poznati še vrednosti reduciranih reaktanc, ki pa so odvisne, kot že omenjeno od večjega števila činiteljev. Zato bomo določili vsote ustreznih reaktanc le za transformator, na katerem so bile izmerjene

vse potrebne reaktance, in to v odvisnosti od velikosti kratkovezanega dela navitja.

Na sliki 46 so podane vsote ustreznih reaktanc za primer, da je ovojni stik nastopil na sekundarni strani transformatorja, in to za tri različne vezave transformatorja. Za primer, da je

transformator na primarni in na sekundarni strani vezan v zvezdo, označimo vsoto vseh treh ustreznih reaktanc z x_{A1} , njeno vrednost pa dobimo iz enašbe (14b), kot vsoto reaktance x_{0yn} (sl. 43) in dvojne vrednosti reaktance x_{1A} (diagram na sliki 41). Vrednost vsote reaktanc je pri tej vezavi transformatorja največja.

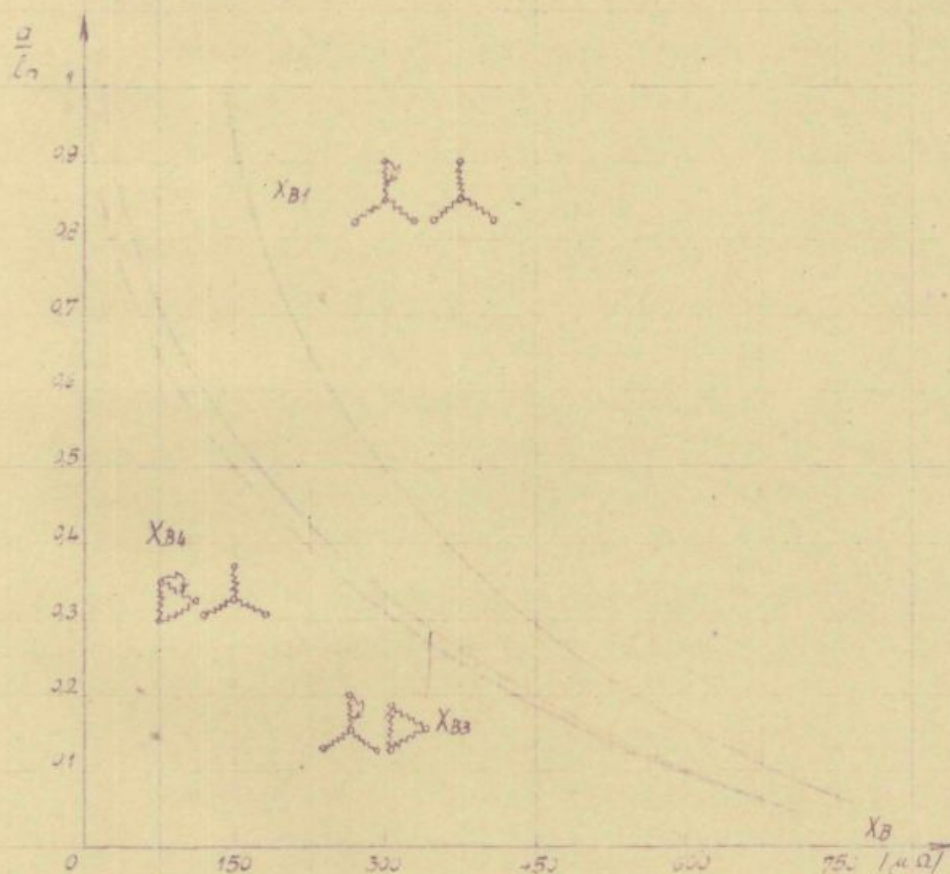


matorja največja.

Če je transformator vezan na primarni strani v trikot, na sekundarni strani pa v zvezdo, označimo vsoto ustreznih reaktanc z x_{A3} , njeno vrednost pa lahko določimo iz enašbe (29), kjer je podana vrednost vsote impedanc z_{A3} . V primeru, da je kratkovezано celotno navitje ene faze, dobimo minimalno vrednost reaktance x_{A3} , ki je enaka v tem primeru vsoti reaktanc kratkega stika pozitivnega, negativnega in sofaznega zaporedja. Ker

so si vrednosti vseh treh reaktanc kratkega stika med seboj precej enake, je v tem primeru reaktanca x_{A3} skoraj enaka trikratni vrednosti reaktance kratkega stika pozitivnega zaporedja, ki smo jo označili z x_{1c} .

Če je transformator na primarni strani vezan v zvezdo, na sekundarni pa v trikot, smo označili vsote ustreznih impedanc z z_{A4} , vsoto induktivnih komponent pa označimo z x_{A4} . Če je kratkovezано celotno navitje ene faze, dobimo, da teko v tem primeru le tokovi pozitivnega in negativnega zaporedja, valed če sar je v tem ekstremnem primeru reaktanca x_{A4} enaka dvakratni vrednosti reaktance kratkega stika pozitivnega zaporedja x_{1c} .



Slika 47

Na sliki 47 so podane v odvisnosti od razmerja med višino kratkovezanega dela navitja in med višino celotnega navitja vrednosti vsote ustreznih reaktanc za primer, da je ovojni stik nastopil na primarni strani transformatorja.

Če je transformator na primarni in na sekundarni strani vezan v zvezdo,

smo označili vsote ustreznih impedanc z x_{B1} , njeno induktivno komponento pa označimo z x_{B1} . V ekstremnem primeru, če je celot-

no navitje ene faze vezano na kratko, dobimo le tokove sofaznega zaporedja in je v tem primeru zato reaktanca x_{B1} enaka reaktanci praznega teka sofaznega zaporedja, ki je pri transformatorjih običajno podana.

V primeru, da je transformator vezan v zvezdo le na primarni strani, na sekundarni strani pa je vezan v trikot, bomo označili vsoto ustreznih reaktanc z x_{B3} . Če zopet poiščemo ekstremen primer, da je vezano celotno navitje ene faze na kratko, dobimo tudi v tem primeru le toke sofaznega zaporedja, vrednost reaktance x_{B3} pa je enaka zato reaktanci kratkega stika sofaznega zaporedja.

Kot tretja je na sliki 47 podana vrednost vsote reaktanc vseh treh zaporedij x_{B4} v odvisnosti od razmerja $a:l_n$ za primer, da je transformator vezan na primarni strani v trikot, na sekundarni strani pa v zvezdo. Vrednost te reaktance se z večanjem kratkovezanega dela navitja približuje vrednosti nič, ki jo doseže, če je celotno navitje ene faze vezano na kratko. V tem primeru v transformatorju namreč ne dobimo nikakršnih tokov.

Če primerjamo krivulje na slikah 46 in 47, ki predstavljajo vrednosti reaktanc v odvisnosti od razmerja $a:l_n$, lahko ugotovimo, da so vrednosti reaktanc močno odvisne od vezave transformatorja pri večjih vrednostih razmerja $a:l_n$. Če pa je vezan na kratko sorazmerno majhen del navitja, je vpliv vezave transformatorja na velikost reaktance občutno manjši.

Sedaj pa določimo še ohmsko komponento vsote impedanc, in sicer za primer, ko je ta največja, namreč če se ovojni stik nahaja na sekundarni strani transformatorja, vezanega na obeh straneh v zvezdo!

Kot že omenjeno bi bil pri polnilnem faktorju 0,25 celoten presek bakra 2775 mm². Če naj bo srednja dolžina ovoja 0,523 m, dobimo, da je upornost celotnega navitja na enem stebri $r_0 = 3,3 \mu\Omega$.

Vrednost ohmske komponente impedanca z_{A1} dobimo iz enašbe (14b), za manjša razmerja $a:l_n$ pa lahko uporabimo tudi enašbo (15), ki dobi v tem primeru naslednjo vrednost:

$$r_{A1} = \frac{3}{2} \frac{3,3}{\gamma} = 4,95 : (a:l_n) \mu\Omega \quad (4)$$

Iz te enašbe lahko ugotovimo, da je pri impedanci z_{A1} potrebno upoštevati njeno ohmsko komponento le pri manjših vrednostih razmerja $a:l_n$, saj je v primeru, da je kratkovezanega 5 % navitja, impedanca večja od njene induktivne komponente le za ca 6 %, v primeru pa, da je kratkovezanega le 1 % navitja pa znaša ca 10 %.

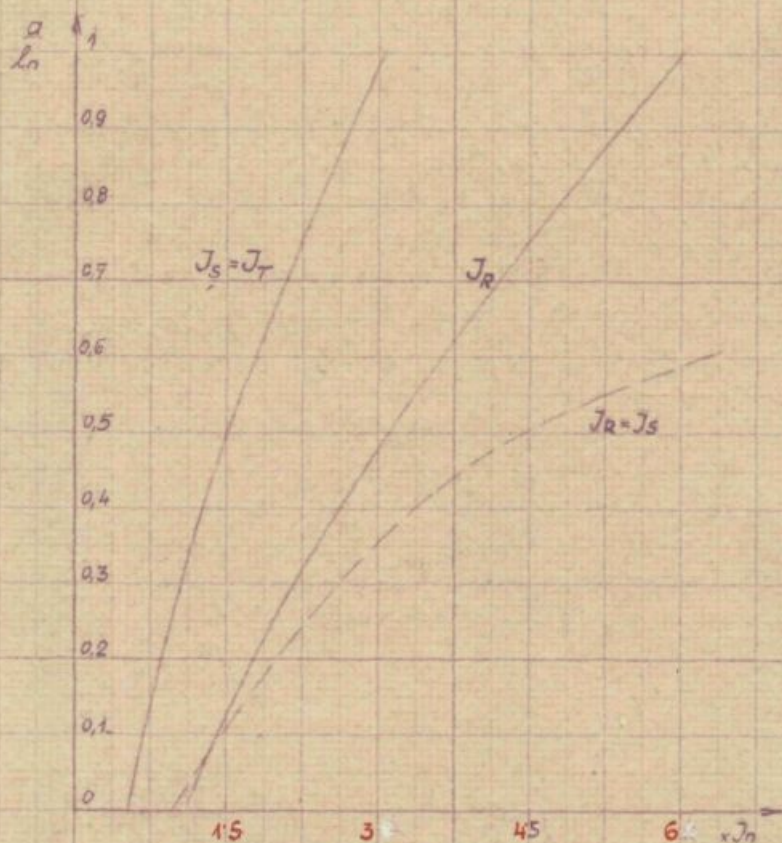
Določitev tokov, ki pritekajo iz omrežja v transformator z ovojnim stikom

Iz vrednosti impedanc, določenih v prejšnjih odstavkih, lahko določimo vrednosti tokov, ki pritekajo v primeru ovojnega stika v transformator iz omrežja in to pri pritisnjeni nazivni napetosti.

Če hočemo te toke zaradi večje preglednosti izraziti z ozirom na nazivni tok transformatorja, moramo poiskati za transformator, na katerem se se vršile meritve, nazivno impedanco, ki bi jo imel, če bi bil polno navit. Ker je prerez železa v stebru 71,4 cm², dobimo pri gostoti v železu 12 Wb/m² inducirano napetost na ovoj 1,9 V. Na strani 86 smo ugotovili, da bi bil prerez (bakreni) primarnega in sekundarnega navitja pri polno navitem transformatorju 2775 mm². Pri gostoti toka 2,28 A/mm² bi bil torej tok 3165 A. Impedanca nazivnega bremena, reducirana na en ovoj, je torej 1,3 V : 3165 A = 600 $\mu\Omega$.

V diagramu na sliki 48 so podane vrednosti tokov, ki pritekajo pri ovojnem stiku v transformator iz curežja in to v odvisnosti od velikosti kratkovezanega dela navitja. Polno izvlečeni krivulji veljata za primer, da je ovojni stik nastopil na sekundarni strani transformatorja, ki je vezan na primarni in na sekundarni strani v zvezdo.

Vrednosti tokov so določene po enašbi (16) v drugem poglavju in to z upoštevanjem vrednosti reaktance x_{A1} , podane v diagramu na sliki 46 in ohmske upornosti, določene po enašbi (13a).



Slika 48

Črtkano izvlečena krivulja podaja vrednost toka, ki priteka v primeru ovojne stika na sekundarni strani transformatorja, vezanega na primarni strani v trikot, na sekundarni pa v zvezdo. Vrednost tokov je določena po enašbi (39) drugega poglavja, pri čemer je vrednost reaktance x_{A3} vzeta iz diagrama na sliki 46.

PREGLED SPREMEMB RAZMER PRI OVOJNEM KRATKEM STIKU
V PRIMERU, DA PREDPOSTAVKE NAŠTETE V DRUGEM POGlavJU NISO
IZPOLNJENE

Predpostavke, naštete na strani 15 seveda običajno niso vse izpolnjene. Vsled tega so razmere pri dejanskem ovojnem kratkem stiku nekoliko drugačne od obravnavanih idealnih razmer. V tem poglavju bomo pregledali, kolikšne spremembe razmer lahko pričakujemo.

V dosedanjih izvajanjih smo predpostavili, da so velikosti vseh upornosti neodvisne od velikosti toka oz. od napetosti, predpostavka, ki omogoča uporabo zakona o superpoziciji. V glavnem se vse obravnavane impedance precej neodvisne od vpliva železa, pri katerem je drugače posebno izrazita odvisnost velikosti magnetne upornosti od vzbujevalnega toka. Magnetni pretok namreč v primeru kratkega stika pozitivnega zaporedja, kot tudi v primeru praznega teka sofaznega zaporedja, poteka večji del poti po karku. Vsled tega niso bile opažene pri meritvah na preskusnem transformatorju večje odvisnosti merjenih impedanc od vzbujevalnega toka.

Razmere pa se nekoliko spremenijo, če pride do nasičenja železa. Pri ovojnem kratkem stiku sta predvsem važni dve možnosti, kjer pride lahko do magnetnega nasičenja v železu in to predvsem v transformatorjih vezave zvezda brez terciarnega navitja:

Trifazni transformatorji se nahajajo običajno v pločevinskih kotlih. Pri ovojnem kratkem stiku se pojavi magnetna napetost med delom transformatorja iznad mesta ovojnega stika in med delom transformatorja izpod mesta ovojnega stika. Pri tem se del magnetnega pretoka sklone tudi preko pločevine kotla. Ker je kotel sorazmerno tenak, nastopi kmalu magnetna nasičenost v njegovi pločevini, posledica tega pa je, da je pri trifaznih transformatorjih v železnem kotlu impedanca praznega teka sofaznega zaporedja tudi odvisna od velikosti vzbujevalnega toka.

Pri ovojnem kratkem stiku pa lahko pride tudi do magnetnega nasičenja samega jedra transformatorja. Kot sledi iz prejšnjih izvajanj, se pri ovojnem kratkem stiku zniža napetost na preostalem delu navitja, na katerem je nastopil kratki stik med ovoji, občutno pa se lahko poveča napetost na navitjih ostalih dveh faz. V ekstremnem primeru, ko je celotno navitje ene faze kratkovezano, je na navitji ostalih dveh faz pritisnjena kar za V₃-krat večja napetost od nazivne. Pri takšni napetosti pa pogosto še pride do nasičenja v železu. Posledica tega pa je razmeroma visok magnetilni tok.

Bistveno na razmerje pri ovojnem kratkem stiku vpliva lahko tudi prehodna upornost na mestu kratkega stika, kot tudi povešane temperature oz. povečanje upornosti kratkovezanega dela navitja. Vrednost prehodne upornosti je težko določiti in tudi težko izmeriti. Poskusi, ki so bili v ta namen napravljeni, so pokazali, da je prehodna upornost predvsem odvisna od napetosti oz. od toka, ki teče skozi kratkostižno mesto, dalje da je odvisna od površine vodnikov na stičnem mestu, od pritiska med njima in tudi od časa trajanja.

Positivna in negativna impedanca omrežja vplivata na razmere pri ovojnem kratkem stiku le v primeru, da priteka iz omrežja v poškodovani transformator razmeroma visok tok.

Nesimetrija med vsemi tremi fazami je, vsaj kot sledi iz izvršenih meritev na preskusnem transformatorju, razmeroma majhna in ne more imeti bistvenih posledic na razmere pri ovojnem kratkem stiku.

UPORABLJENA LITERATURA

- 1./ M. VIDMAR, Die Transformatoren. Zal. Springer, Berlin 1925
- 2./ OLLENDORFF, Studien über das Jochfeld von Transformatoren. Wissenschaftliche Veröffentlichungen aus dem Siemens - Konzern, 1928
- 3./ G. STEIN, Potentialtheoretische Untersuchungen über Magnetfelder in Transformatoren und über ihre Streuinduktivitäten. Zeitschrift f. angew. Math. u. Mech. 1929.
- 4./ F. STARR, Equivalent Circuit. AIEE Trans., 1932
- 5./ Wagner-EVANS, Symmetrical Components. Zal. McGraw - Hill, New York, 1933
- 6./ H. STEPHENS, Transformer Reactance and Losses with Non-uniform Windings. Electrical Engineering, 1934
- 7./ Garin-PALUEV, Transformer Circuit Impedance Calculations. AIEE Trans., 1936
- 8./ M. VIDMAR, Transformatorenkurzschlüsse. Zal. Vieweg & Sohn, Braunschweig, 1939
- 9./ M. KAUFMANN, The protective Gear Handbook, London 1946
- 10./ W. GROVER, Inductance Calculations. Zal. D. van Nostrand Comp. New York, 1946
- 11./ L. PERSCHL, Der elektrische Schutz grosser Wasserkraftzentralen. E. und M., 66. Jahrgang, Wien 1949
- 12./ E. CLARKE, Circuit Analysis of A.C. Power Systems, I/II. Zal. Wiley, New York 1950
- 13./ Siemens Generatorschutz, Erlangen 1950
- 14./ A. MAUDUIT, Installations électriques. Zal. Dunod, Paris 1950
- 15./ M. WALTER, Relaisbuch. Zal. Franck's Verlagshandlung, Stuttgart 1950
- 16./ C. LACKEY, The Protection of electrical Power Systems, Hebburn 1950
- 17./ C. LACKEY, Fault Calculations. Zal. Oliver et Boyd, Edinburgh 1951

- 18./ L. BLUME, Transformer Engineering. Zal. Willey, New York 1951
- 19./ Le PAGE, General Network Analysis. Zal. Mc. Graw - Hill, New York 1951
- 20./ M. PROMBERGER, Použití matic a tenzorů v theoretické elektrotechnice. Zal. Státní nakladatelství technické literatury, Praha 1955
- 21./ W. BUTOW, Relais und Schutzschaltungen in elektrischen Hochspannungsanlagen. Zal. Braun, Karlsruhe 1954
- 22./ H. NEUGEBAUER, Selektivschutz. Zal. Springer, Berlin 1955.



184 / H. WILSON, Transformer Engineering, Ed. Wiley, New York 1951
 185 / H. WILSON, General Network Analysis, Ed. McGraw-Hill, New York 1951
 186 / H. WILSON, Teoretická elektroenergetika a teoretická elektroenergetika II - technika, Ed. Státní nakladatelství technické literatury, Praha 1955
 187 / W. WOTZ, Leitungen und Schaltanlagen in elektrischen Hochspannungsanlagen, Ed. Vieweg, Braunschweig 1954
 188 / H. WUNDERLICH, Selektivschutz, Ed. Springer, Berlin 1955



07. IV. 1975

COBISS 3042300

NARODNA IN UNIVERZITETNA
KNJIŽNICA



00000437902