

UNIVERZA V LJUBLJANI  
Fakulteta za elektrotehniko

Andrej Jurman

RAZSIPANO MAGNETNO POLJE IN LASTNOSTI  
TRANSFORMATORJA

MAGISTRSKO DELO

Ljubljana, 2008

UNIVERZA V LJUBLJANI  
Fakulteta za elektrotehniko

Andrej Jurman

RAZSIPANO MAGNETNO POLJE IN LASTNOSTI  
TRANSFORMATORJA

MAGISTRSKO DELO

Mentor: prof. dr. Konrad Lenasi

Ljubljana, 2008

## **Zahvala**

Iskreno se zahvaljujem svojemu mentorju prof. dr. Konradu Lenasiju, ki me je vodil preko celotnega magistrskega študija in mi je v trenutkih, ko sem se znašel v temi, posvetil z lučjo, da sem lahko nadaljeval z delom. Ravno tako se zahvaljujem sodelavcema g. Borutu Prašnikarju za nasvete in produktivna razglabljanja o obravnavani problematiki ter mag. Evgeniju Paulusu, ki mi je s svojim znanjem pokazal bližnjico skozi svet mehanike, ki mi je bil do tedaj razmeroma nepoznan. Nenazadnje velja zahvala tudi staršem za brezpogojno ter vsestransko podporo in vsem prijateljem, ki sem jih zapostavljal v času študija in izdelave naloge.

## **Kazalo**

<b>1</b>	<b>Povzetek .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Abstract .....</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Uvod.....</b>	<b>3</b>
<b>4</b>	<b>Elektromagnetna polja in lastnosti transformatorja.....</b>	<b>5</b>
4.1	Direktna metoda za izračun razsipanega magnetnega polja.....	9
4.2	Izračun kratkostične napetosti .....	11
4.3	Izračun dodatnih izgub v navitju .....	12
4.4	Izračun kratkostičnih obremenitev .....	16
4.4.1	<i>Izračun kratkostičnih tokov .....</i>	<i>17</i>
4.4.2	<i>Izračun toplotne obremenitve .....</i>	<i>19</i>
4.4.3	<i>Izračun sil in mehanskih obremenitev .....</i>	<i>19</i>
4.4.4	<i>Določitev kriterijev za ustreznost .....</i>	<i>26</i>
<b>5</b>	<b>Opis in uporaba programa.....</b>	<b>29</b>
5.1	Osnovno okno.....	29
5.2	Okno Rezultati.....	33
5.3	Okno nastavitve .....	36
<b>6</b>	<b>Analiza in ovrednotenje rezultatov .....</b>	<b>37</b>
6.1	Analiza rezultatov izračuna kratkostične napetosti in izgub .....	37
6.2	Analiza rezultatov izračuna dinamičnih obremenitev .....	42
<b>7</b>	<b>Sklepne ugotovitve .....</b>	<b>45</b>
<b>8</b>	<b>Viri.....</b>	<b>46</b>

## Seznam uporabljenih simbolov

$a$  ... radialna dimenzija žice [m]

$A$  ... celotni presek bakra [m<sup>2</sup>]

$a_{1t}$  ... radialna dimenzija navitja [m]

$b$  ... aksialna dimenzija žice [m]

$\bar{B}$  ... vektor gostote magnetnega pretoka [T]

$b_{nav}$  ... višina navitja [m]

$B_x$  ... komponenta gostote magnetnega pretoka v smeri x [T]

$B_y$  ... komponenta gostote magnetnega pretoka v smeri y [T]

$B_x[i,j]$  ... komponenta gostote magnetnega pretoka v smeri x v točki mreže i,j [T]

$B_y[i,j]$  ... komponenta gostote magnetnega pretoka v smeri y v točki mreže i,j [T]

$c$  ... specifična toplota [J/kg/K]

$D$  ... srednji premer navitja [m]

$dx$  ... širina celice mreže [m]

$dy$  ... višina celice mreže [m]

$\bar{E}$  ... vektor električne poljske jakosti [V/m]

$f$  ... frekvenca [1/s]

$\bar{f}$  ... vektor gostote sile [N/m<sup>3</sup>]

$f_p$  ... polnilni faktor navitja

$f_{aks}$  ... porazdeljena aksialna sila [N/m]

$f_{rad}$  ... porazdeljena radialna sila [N/m]

$F_{aksmax}$  ... maksimalna kumulativna aksialna sila vzdolž navitja [N]

$g$  ... gostota toka [A/m<sup>2</sup>]

$\bar{g}$  ... vektor gostote konduktivnega toka [A/m<sup>2</sup>]

$g_{ud}$  ... gostota udarnega toka kratkega stika [A/m<sup>2</sup>]

$\bar{H}$  ... vektor magnetne poljske jakosti [A/m]

$\bar{I}$  ... vektor konduktivnega toka [A]

$I_n$  ... nazivni tok transformatorja [A]

$I_{ks}$  ... efektivna vrednost trajnega toka kratkega stika [A]

$I_{ud}$  ... maksimalna vrednost udarnega toka kratkega stika [A]

$j_{ks}$  ... gostota toka kratkega stika [A/m<sup>2</sup>]

$k_{\text{daks}}$  ... faktor dodatnih aksialnih izgub  
 $k_{\text{drad}}$  ... faktor dodatnih radialnih izgub  
 $k\sqrt{2}$  ... udarni faktor kratkega stika  
 $L_a$  ... razmik med podporami pri izračunu aksialne natezne napetosti [m]  
 $L_r$  ... razmik med podporami pri izračunu radialne natezne napetosti [m]  
 $L_s$  ... razsipana induktivnost [H]  
 $m$  ... masa [kg]  
 $m_{\text{Cu}}$  ... masa bakrene žice [kg]  
 $N$  ... število ovojev navitja  
 $N_d$  ... število distančnikov  
 $N_{\text{pl}}$  ... število podprtih letvic  
 $P$  ... izgube [W]  
 $P_{\text{aks}}$  ... dodatne izgube v navitju zaradi aksialne komponente magnetnega polja [W]  
 $P_{\text{distmax}}$  ... maksimalen tlak na distančnike [N/m<sup>2</sup>]  
 $P_{\text{dod}}$  ... dodatne izgube [W]  
 $P_k$  ... izgube kratkega stika [W]  
 $P_{\text{ohm}}$  ... ohmske izgube [W]  
 $P_{\text{rad}}$  ... dodatne izgube v navitju zaradi radialne komponente magnetnega polja [W]  
 $r$  ... polmer [m]  
 $R$  ... ohmska upornost [ $\Omega$ ]  
 $r_n$  ... notranji polmer navitja [m]  
 $r_z$  ... zunanji polmer navitja [m]  
 $\vec{S}$  ... Poyntingov vektor [VA/m<sup>2</sup>]  
 $S_0$  ... kratkostična moč mreže [VA]  
 $S_n$  ... nazivna navidezna moč transformatorja [VA]  
 $\check{S}_d$  ... širina distančnikov [m]  
 $\check{S}_l$  ... širina letvic [m]  
 $T_0$  ... začetna absolutna temperatura navitja [°C]  
 $T_1$  ... končna absolutna temperatura navitja [°C]  
 $u_i$  ... inducirana napetost [V]  
 $u_k$  ... procentualna kratkostična napetost [%]  
 $u_m$  ... procentualna impedanca omrežja [%]

$u_r$  ... procentualni ohmski padec napetosti [%]  
 $u_x$  ... procentualna razsipana napetost [%]  
 $U_n$  ... nazivna napetost transformatorja [V]  
 $V$  ... volumen [ $m^3$ ]  
 $\bar{V}$  ... vektorski magnetni potencial [Vs/m]  
 $W_s$  ... energija razsipanega magnetnega polja [J]  
 $X_s$  ... razsipana reaktanca [ $\Omega$ ]  
 $\alpha$  ... kot napetosti v trenutku pojava kratkega stika [rad]  
 $\delta$  ... udorna globina [m]  
 $\Delta T$  ... sprememba temperature [K]  
 $\Delta t$  ... časovni interval [s]  
 $\Delta x$  ... diferenčni premik v smeri x [m]  
 $\Delta y$  ... diferenčni premik v smeri y [m]  
 $\varphi$  ... fazni kot rezultančne impedance transformatorja in omrežja [rad]  
 $\Phi$  ... magnetni pretok  
 $\mu$  ... relativna permeabilnost  
 $\mu_0$  ... permeabilnost praznega prostora [Vs/A/m]  
 $\rho$  ... specifična upornost [ $\Omega m$ ]  
 $\sigma$  ... natezna napetost [ $N/m^2$ ]  
 $\sigma_{Cu}$  ... specifična električna prevodnost bakra [S/m]  
 $\sigma_{rad}$  ... radialna upogibna natezna napetost [ $N/m^2$ ]  
 $\sigma_{aks}$  ... aksialna upogibna natezna napetost [ $N/m^2$ ]  
 $\omega$  ... krožna frekvenca [1/s]

# 1 Povzetek

Delo celovito obravnava izračun razsipanega magnetnega polja in od njega odvisnih lastnosti transformatorja. Polje je izračunano po direktni metodi. Iz znane magnetne energije v prostoru, ki ga določa kotel transformatorja, sledi njegova reaktanca, t.i. razsipana napetost, ki predstavlja induktivni del kratkostične napetosti. Nadalje opisujemo izraze in način izračuna dodatnih izgub zaradi vrtničnih tokov v vodnikih navitja. Pretežni del naloge zaobjema obravnavo izračuna dinamičnih mehanskih obremenitev navitij in njihovega vpetja pri tripolnem kratkem stiku. Pri tem so upoštevane smernice dokazovanja ustreznosti konstrukcije, nakazane v standardu IEC 60076-5. Na osnovi teoretične obravnave je izdelan računalniški program, ki omogoča izračun opisanih parametrov in lastnosti. Program je prilagojen učinkoviti uporabi s strani proizvajalca transformatorjev oz. projektanta. Opravljena je primerjava izračunanih vrednosti z merjenimi in z rezultati obstoječih programov ter izračunov. Z njo je potrjena verodostojnost rezultatov.

*Ključne besede:* Transformator, razsipano magnetno polje, kratkostična napetost, dodatne izgube, izračun sil v kratkem stiku.



## **2 Abstract**

The thesis deals with stray flux calculation and quantitative and qualitative determination of most of the transformer characteristics based on it. The magnetic field is calculated by direct method. From determined magnetic field energy in transformer tank, inductive part of short circuit impedance can be calculated. Methods and equations for calculation of additional losses in windings are presented. The main focus is on calculation of mechanical stress on windings and their clamping structure during three phase short circuit. Guidelines for theoretical evaluation of the ability to withstand the dynamic effect of short circuit follow the IEC 60076-5 standard. The theory is implemented into the computer program which can be used for transformer design by transformer manufacturer. Comparison between program calculated results, measured values and existing calculations is made to verify the reliability of the results.

*Key words:* Stray flux, short circuit impedance, additional losses, dynamic effect of short circuit.

### 3 Uvod

Fizikalno matematični principi delovanja transformatorja so znani že več kot stoletje in tudi od fizične izdelave prvega transformatorja je minilo približno toliko časa. Od takrat do danes se je veliko spremenilo, vendar predvsem na področju konstrukcijskih rešitev ter materialov, ki omogočajo vse nižje izgube, boljšo izolacijsko trdnost in posledično zmanjševanje volumna in mase transformatorja na enoto prenesene moči. Fizikalni princip prenosa energije, ki temelji na lastnostih časovno spreminjajočega elektromagnetnega polja opisanega z Maxwellovim sistemom enačb (1), pa je poznan že od časov Nikole Tesle. Za poglobljeno razumevanje delovanja transformatorja in izboljševanje njegove konstrukcije je poznavanje tega polja bistvenega pomena.

Skozi zgodovino so se v sodelovanju med fiziko, tehniko ter matematiko razvile številne metode za določitev polj. Morda največji skok v razvoju predstavlja ena od mlajših vej matematike, t.j. numerična matematika, ki je skupaj z razvojem računalništva ponudila celo vrsto metod. Te so za razliko od analitičnega reševanja, omogočile določitev polj v bistveno bolj kompleksnih geometrijah. S tem so se odprla vrata za boljši vpogled v delovanje elektromagnetnih naprav, tudi transformatorjev. Trenutno je zaradi svoje univerzalnosti in hitrosti najbolj uveljavljena metoda končnih elementov.

Praktično vsi današnji proizvajalci transformatorjev pri svojem delu uporabljajo različne programske pakete, ki temeljijo na metodi končnih elementov. Uporabljajo jih predvsem za izboljševanje konstrukcije in optimiranje svojih izdelkov. Programi sami se iz leta v leto izboljšujejo, ravnotako se z neustavljivim razvojem računalništva povečujejo njihove zmožnosti. Pri tem imamo v mislih predvsem prehod iz dvodimenzionalnega izračuna, kjer je bilo potrebno modele bolj ali manj poenostavljati ter predpostavljati njihovo simetrijo, na tridimenzionalni izračun, kjer je dejansko možno modelirati napravo, tako kot je.

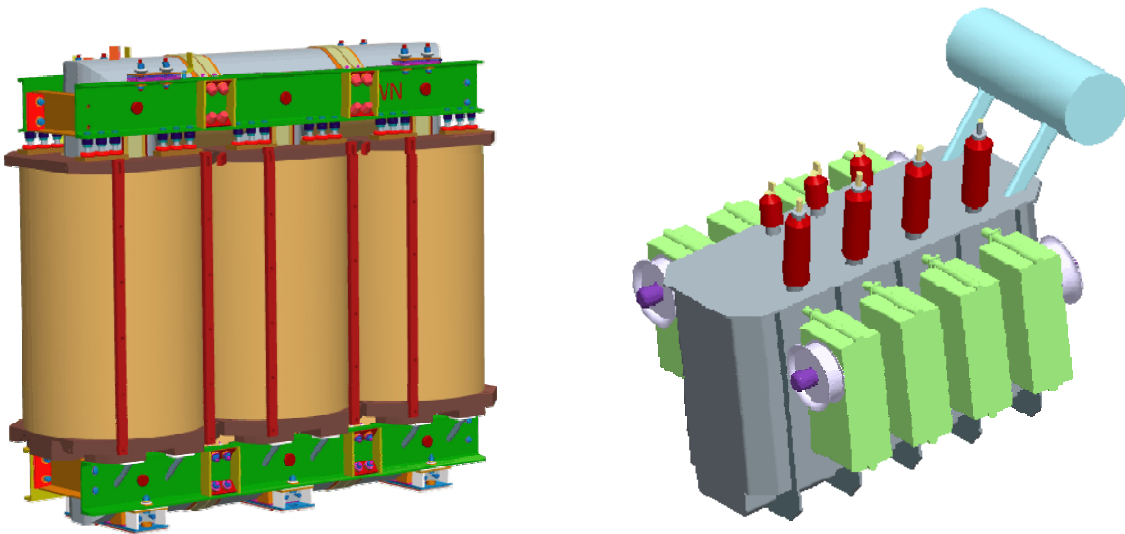
Pomanjkljivost omenjenih programov je, da so relativno zahtevni za uporabo in da modeliranje naprave ter izračun rezultatov zahteva veliko časa. Zato so bolj primerni za razvojno delo in manj za izračun transformatorjev, kjer je pomembnejša možnost enostavnega in razmeroma hitrega izračuna polja ter lastnosti transformatorja, ki jih pogojuje. Veliko lastnosti oz. parametrov, ki so odvisni od magnetnega polja, je namreč garantiranih oz. določenih s standardom. Največkrat so tudi vsebovane v tehničnem delu pogodbe med

kupcem in proizvajalcem transformatorja. Projektant zato za učinkovito izvajanje svojega dela potrebuje računalniška orodja, prilagojena opisanim zahtevam ter tehnologiji lastne tovarne. Cilj pričujoče naloge je izdelava računalniškega programa, ki celovito obravnava lastnosti transformatorja povezane z magnetnim poljem, kot so kratkostična napetost, izgube v navitjih in dinamična stabilnost ob kratkih stikih. Pri nekajletnem opravljanju projektantskega dela v tovarni transformatorjev, smo namreč spoznali potrebo po takšnem programu, saj obstoječi programi obravnavajo probleme ločeno in so medsebojno nepovezani, kar otežuje in upočasnjuje delo. Metode za izračun magnetnega polja in ostalih veličin, ki smo jih uporabili, so poznane. Potrebno jih je bilo poglobljeno spoznati in razumeti ter jih na novo implementirati preko sodobnega programskega okolja v celovit program, prilagojen vsakodnevni projektantskemu delu. Delo posega tudi na področje strojništva, predvsem v poglavju izračuna dinamičnih obremenitev v kratkem stiku.

Program je narejen z namenom, da bi omogočil enostavnejše in učinkovitejše delo projektantov, povečal njihovo razumevanje obravnavane problematike in s tem vodil v izboljšavo konstrukcije transformatorjev. Predstavlja dobro osnovo za nadaljnjo proučevanje dodatnih izgub v transformatorju, bodisi s paketom za tridimenzionalne elektromagnetne izračune na osnovi končnih elementov, bodisi s statistično obdelavo večjega števila transformatorjev. Nenazadnje lahko koristi tudi pri dokazovanju ustreznosti konstrukcije pred kupcu transformatorja, ki vse pogosteje zahtevajo natančen vpogled v dokumentacijo in izračun na t.i. »design review«-ju.

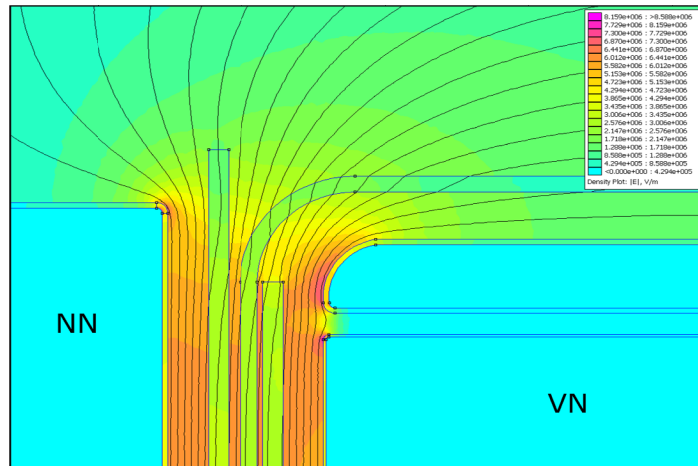
## 4 Elektromagnetna polja in lastnosti transformatorja

Poenostavljeno lahko rečemo, da je klasični oljni transformator jedrnega tipa fizično zgrajen iz t.i. aktivnega dela, t.j. magnetnega jedra ter primarnega in sekundarnega navitja. Aktivni del je zaprt v transformatorski kotel, ki zadržuje tekoči dielektrik – transformatorsko olje, ki ima vlogo izolacijskega in hladilnega sredstva. Poleg tega je na kotel nameščen hladilni aparat ter ostala oprema kot so skožniki, konzervator, sušilci zraka, komandna omarica, termična slika ipd.



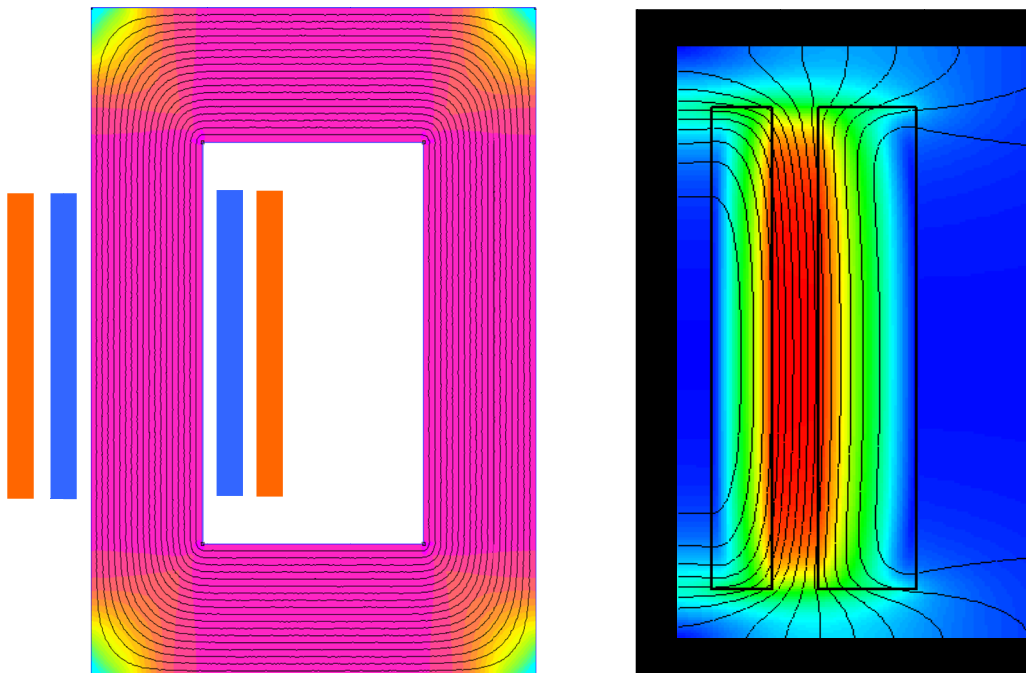
Slika 1: Aktivni del in kotel transformatorja.

Različni deli transformatorja so med obratovanjem naprave na različnih električnih potencialih. Nekateri so ozemljeni, drugi so na napetosti pripadajočega omrežja, skozi navitja teče bremenski tok. Vse to v povezavi z geometrijo in lastnostmi materialov, torej kapacitivnostmi in induktivnostmi, povzroča elektromagnetna polja v transformatorju. Čeprav gre dejansko za eno in isto polje, opazovano z vidika mirujočega oz. enakomerno gibajočega koordinatnega sistema, kar prikazujejo Lorenzove transformacije (2), razdelimo obravnavo polj na električno in magnetno polje. Električno polje obravnavamo predvsem pri dimenzioniranju izolacije, torej pri določevanju razdalj, oblik in količine izolacije za zagotovitev zadostne dielektrične trdnosti. S pomočjo poznane energije električnega polja je možno določiti tudi kapacitivnosti med posameznimi deli transformatorja, torej med navitji, med navitji in ozemljenimi deli ipd.



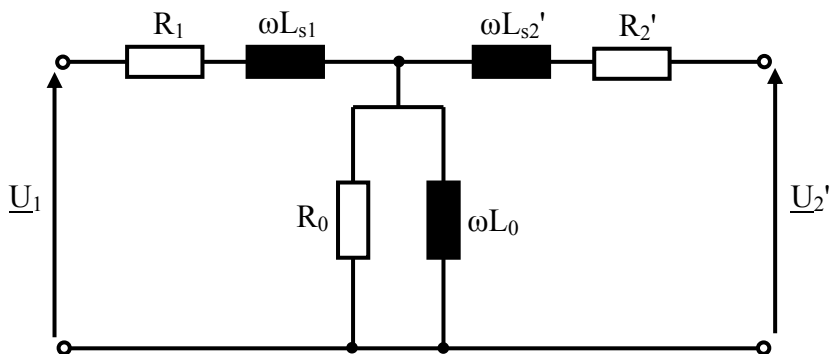
Slika 2: Slika električnega polja med nizko in visokonapetostnim navitjem.

Ko govorimo o magnetnem polju v transformatorju, se lahko sklicujemo na t.i. glavno magnetno polje v transformatorskem jedru ali na t.i. razsipano magnetno polje v prostoru transformatorskega okna. Glavno magnetno polje v pretežni meri zagotavlja s strani Faraday-evega zakona (1) zahtevan magnetni pretok zaradi inducirane napetosti v navitjih, razsipano magnetno polje pa je posledica bremenskega toka skozi navitja. Razsipano magnetno polje s svojim vplivom na lastnosti transformatorja je tudi osrednji predmet naše obravnave.



Slika 3: Glavno magnetno polje v magnetnem jedru (levo) in razsipano magnetno polje v transformatorskem oknu (desno).

Pripadajoče induktivnosti so prikazane v električnem modelu transformatorja, ki ga ponuja znano T nadomestno vezje transformatorja (Slika 4), s katerim lahko analiziramo padce napetosti pri ustreznih pretokih moči. Pomen in vloga elementov vezja so znani in jih na tem mestu ne bomo podrobneje opisovali.

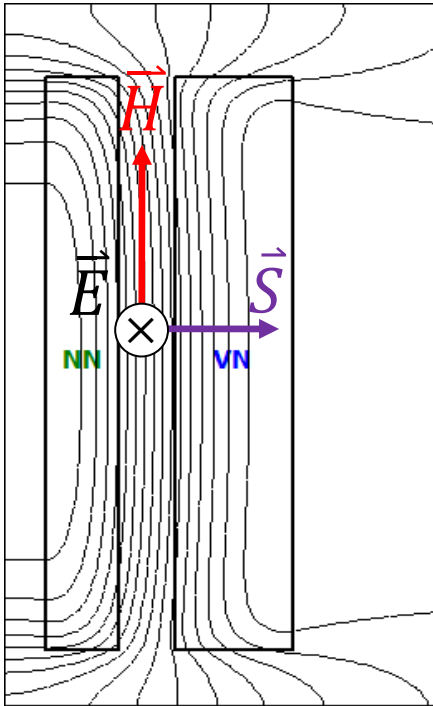


Slika 4: Električni model dvonavitnega transformatorja (T-nadomestno vezje).

Razsipano magnetno polje je mnogokrat obravnavano kot izgubljeno magnetno polje, saj po definiciji predstavlja tisti del magnetnega fluksa, ki magnetno ne povezuje obeh navitij in tako povzroča padec napetosti na transformatorju. Dejstvo je, da je zaradi fizične ločenosti primarnega in sekundarnega navitja, ki ga pogojujeta po eni strani tehnologija izdelave in po drugi zahtevana izolacijska razdalja, razsipano magnetno polje neizogibno. S strani prenosa energije med navitjema pa je nujno potrebno. Če namreč pogledamo na dogajanje v transformatorju z vidika Poyntingovega teorema (1), vidimo da je ravno razsipano polje v glavnem izolacijskem kanalu med primarnim in sekundarnim navitjem tisto, ki skupaj z induciranim električnim poljem zaradi časovno se spreminjajočega fluksa v magnetnem jedru, omogoča prenos moči med navitjema. Vektorski produkt električne in magnetne poljske jakosti podan z izrazom

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (4.1)$$

namreč kaže od primarnega proti sekundarnemu navitju (Slika 5).



Slika 5: Poyntingov teorem in elektromagnetni prenos energije.

Razsipano magnetno polje ima poleg svoje koristne vloge tudi nekaj nezaželenih stranskih učinkov, ki se odražajo v lastnostih transformatorja in katerih poznavanje ter kvalitativno ovrednotenje je zelo pomembno pri dimenzioniranju transformatorja. Poleg omenjenega padca napetosti na transformatorju, ki ga imenujemo razsipana napetost, so to še t.i. dodatne izgube v navitjih in ostalih prevodnih delih ter sile na navitja in ostale konstrukcijske dele, ki pridejo do izraza predvsem pri različnih vrstah kratkih stikov, ko so vrednosti tokov lahko tudi več desetkrat višje od nazivnih. V nadaljevanju poglavja bomo podrobneje opisali vsako od omenjenih lastnosti, njeno fizikalno naravo ter metodo za njeno kvalitativno ovrednotenje.

#### 4.1 Direktna metoda za izračun razsipanega magnetnega polja

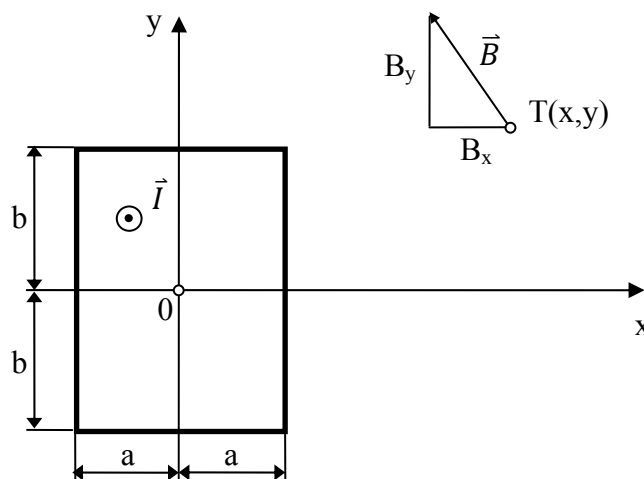
Kot je bilo omenjeno že v uvodu, je trenutno najbolj razširjena metoda za izračun polj metoda končnih elementov. Zaradi relativno enostavne geometrije in ob predpostavki o rotacijski simetriji transformatorja, smo se v našem primeru odločili za t.i. direktno metodo izračuna magnetnega polja. Metoda je enostavna, saj obravnava navitja kot preme vodnike pravokotnega prereza, feromagnetno jedro, ki obdaja transformatorsko okno, je upoštevano s pomočjo zrcaljenja. Prispevek posameznih navitij in njihovih zrcalnih slik se po vseh točkah mreže, ki se prilega transformatorskem oknu, sešteva po principu superpozicije. Vpliv magnetnega kotla ter feromagnetnih jaremskih letev je zanemarjen. Ker je bila predstavitev metode podrobneje obravnavana v našem diplomskem delu (3), naj na tem mestu podamo le enačbo za izračun radialne in aksialne komponente magnetnega polja premega vodnika pravokotnega prereza v poljubni točki T s koordinatama (x,y) povzeto po (4):

$$B_x = -\frac{\mu_0 \cdot I}{8\pi ab} \cdot \left( \frac{1}{2}(x+a) \ln \frac{(y+b)^2 + (x+a)^2}{(y-b)^2 + (x+a)^2} - \frac{1}{2}(x-a) \ln \frac{(y+b)^2 + (x-a)^2}{(y-b)^2 + (x-a)^2} \right) +$$

$$+(y+b) \left( \arctg \frac{x+a}{y+b} - \arctg \frac{x-a}{y+b} \right) - (y-b) \left( \arctg \frac{x+a}{y-b} - \arctg \frac{x-a}{y-b} \right) \quad (4.2)$$

$$B_y = +\frac{\mu_0 \cdot I}{8\pi ab} \cdot \left( \frac{1}{2}(y+b) \ln \frac{(x+a)^2 + (y+b)^2}{(x-a)^2 + (y+b)^2} - \frac{1}{2}(y-b) \ln \frac{(x+a)^2 + (y-b)^2}{(x-a)^2 + (y-b)^2} \right) +$$

$$+(x+a) \left( \arctg \frac{y+b}{x+a} - \arctg \frac{y-b}{x+a} \right) - (x-a) \left( \arctg \frac{y+b}{x-a} - \arctg \frac{y-b}{x-a} \right) \quad (4.3)$$



Slika 6: Gostota magnetnega pretoka premega vodnika pravokotnega prereza v poljubni točki.



Glede na rezultate in dognanja iz (3), smo se odločili zgolj za enkratno zrcaljenje navitij preko jarmov. Omogočen je tudi izračun brez zrcaljenja preko jarmov, torej le z zrcaljenjem preko stebra, ki ponazarja razmere v delu navitja, ki se ne nahaja pod magnetnim jarmom.

Rezultat izračuna sta torej rezultančna radialna in aksialna komponenta magnetnega polja v vseh točkah mreže transformatorskega okna. Silnice magnetnega polja predstavljajo ekvipotencialne krivulje vektorskega magnetnega potenciala, definirane kot (1):

$$\vec{B} = \text{rot}\vec{V} \quad (4.4)$$

Po komponentah in z upoštevanjem rotacijske simetrije ter postavitvijo premega vodnika vzdolž z osi ( $\vec{V} = (0,0, Vz) = (0,0, V)$ ):

$$(B_x, B_y, 0) = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \frac{d}{dx} & \frac{d}{dy} & \frac{d}{dz} \\ 0 & 0 & V \end{vmatrix} = \left( \frac{dV}{dy}, -\frac{dV}{dx}, 0 \right) \rightarrow dV = B_x \cdot dy = -B_y \cdot dx \quad (4.5)$$

Pri izračunu z komponente vektorskega magnetnega potenciala v vseh točkah mreže v transformatorskem oknu je torej potrebno ob vsakem diferenčnem premiku iz ene točke mreže v drugo vzdolž y osi, vrednosti potenciala v prvi točki prišteti produkt komponente magnetne gostote  $B_x$  in y dimenzije celice mreže. Podobno je ob premiku vzdolž x-osi potrebno odšteti produkt komponente  $B_y$  in dimenzije celice mreže v x smeri. Potencial nič je definiran v izhodišni točki mreže. Z medsebojnim povezovanjem točk z enakimi vrednostmi potenciala, dobimo sliko t.i. magnetnih silnic.

## 4.2 Izračun kratkostične napetosti

Tudi vsebina tega poglavja je bila podrobneje obravnavana v (2), zato naj le na kratko povzamemo bistvene stvari. Induktivni del kratkostične napetosti  $u_x$  izračunamo iz skupne razsiperane induktivnosti  $L_s$ , ki jo določimo iz energije magnetnega polja v transformatorskem oknu z enačbama:

$$u_x(\%) = X_s \cdot \frac{I_n}{U_n} \cdot 100 \% = \frac{(\omega L_s) \cdot I_n}{U_n} \cdot 100 \% = \frac{(2\pi f \cdot L_s) \cdot I_n^2}{S_n} \cdot 100 \% \quad (4.6)$$

$$u_x(\%) = \frac{2 \cdot \omega \cdot W_s \cdot I_n^2}{S_n \cdot I_n^2} \cdot 100 \% = \frac{4\pi f \cdot W_s}{S_n} \cdot 100 \% = \frac{4\pi f \cdot \int_V \frac{1}{2\mu} \cdot B_s^2 \cdot dV}{S_n} \cdot 100 \% \quad (4.7)$$

Potrebno je torej integrirati kvadratno vrednost gostote magnetnega pretoka po celotnem prostoru transformatorskega okna. Pri tem je, kot že omenjeno, predpostavljena rotacijska simetrija, tako da se dejansko sešteva prispevke energij posameznih obročev, v katerih je gostota magnetnega pretoka konstantna.

Ohmski del kratkostične napetosti lahko izračunamo iz poznanih kratkostičnih izgub.

$$u_r(\%) = \frac{P_k}{S_n} \cdot 100 \% \quad (4.8)$$

Celotna kratkostična napetost je geometrijska vsota ohmskega in induktivnega dela

$$u_k = \sqrt{(u_x^2 + u_r^2)} \quad (4.9)$$

Fizikalno je torej kratkostična napetost dejansko impedanca transformatorja, pretežno induktivnega značaja, ki po eni strani povzroča padec napetosti na transformatorju, po drugi strani pa omejuje višino kratkostičnih tokov. Je eden od osnovnih parametrov transformatorja, zahtevan s strani naročnika, njene minimalne vrednosti za transformatorje določene moči so podane v standardu (5). Iz zgornjih enačb je razvidno tudi, da je količina magnetne energije razsiperanega magnetnega polja v transformatorju sorazmerna s produktom njegove nazivne moči in induktivnega dela kratkostične impedance. To dejstvo lahko uporabimo pri grobi oceni pričakovanih dodatnih izgub. Le te so namreč močno odvisne od velikosti in oblike razsiperanega magnetnega polja, kar bomo opisali v naslednjem poglavju. Izračun kratkostičnih napetosti za enostavnejše geometrije je relativno točen tudi z enostavnimi analitičnimi izrazi, ki predpostavljajo določeno poenostavljeno obliko magnetnega polja. Poleg večje natančnosti rezultatov je glavna prednost izračuna na podlagi energije magnetnega polja ta, da omogoča izračun za poljubno porazdelitev navitij in delnih navitij po transformatorskem oknu. Poznani

morajo biti toki, ki po teh navitij tečejo. Njihov izračun je lahko v določenih primerih paralelnih vezav ali folijskih navitij nekoliko zahtevnejši.

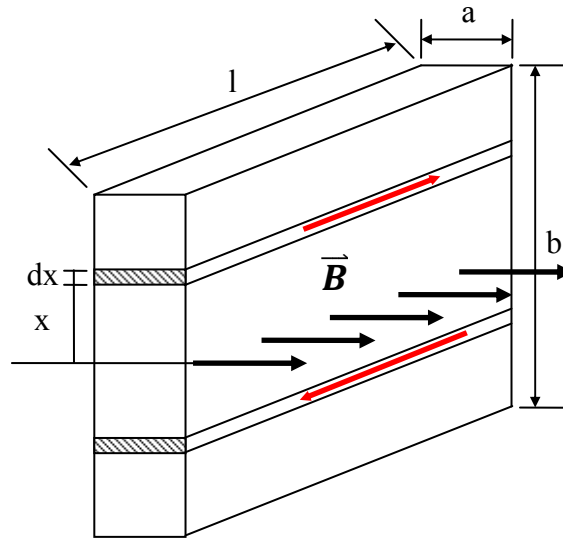
### 4.3 Izračun dodatnih izgub v navitju

Časovno spreminjajoče se magnetno polje povzroča v prevodnih materialih t.i. vrtinčne tokove, ki v njih povzročajo ohmske izgube. Ker jih želimo razlikovati od ohmskih izgub zaradi glavnega toka, ki teče po navitjih, jih imenujemo dodatne izgube. Pojavljajo se v vseh prevodnih delih, ki so izpostavljeni razsipanemu magnetnemu polju, torej v navitjih, konstrukcijskih delih kot so stebrne in jaremske letve ter kotlu transformatorja. V našem delu se bomo omejili na izračun dodatnih izgub v navitju, saj natančnejši izračun dodatnih izgub v ostalih delih zahteva bolj podrobno tridimenzionalno modeliranje transformatorja in izračun pripadajočega razsipanega magnetnega polja in vrtinčnih tokov.

Naj za začetek izpeljemo izraz za izračun dodatnih izgub v vodniku pravokotnega prereza, ki je izpostavljen zunanjemu magnetnemu polju. Predpostavimo, da vrtinčni tok, ki se inducira v vodniku, ne vpliva na zunanje magnetno polje, ki ga povzroča, iz česar sledi, da je gostota magnetnega pretoka konstantna po celotnem volumnu vodnika. Predpostavka je po naši oceni upravičena dokler se dimenzije vodnikov ne razlikujejo bistveno od vdorne globine elektromagnetnega polja. Za baker in frekvenco 50 Hz velja:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma_{Cu}}} = \frac{1}{\sqrt{\pi \mu_0}} \cdot \frac{1}{\sqrt{f \mu_r \sigma_{Cu}}} \cong 503 \cdot \frac{1}{\sqrt{50 \cdot 1 \cdot 58 \cdot 10^6}} \text{ m} = 9,3 \text{ mm} \quad (4.10)$$

Dejansko se dimenzije vodnikov v navitjih močnostnih transformatorjev gibljejo v tem velikostnem razredu.



Slika 7: Vrtinčni tokovi v vodniku pravokotnega prereza.

Doprinos izgub zaradi vrtinčnega toka v infinitesimalno ozkem traku zapišemo z izrazom

$$dP = \frac{u_i^2}{R} = \frac{\left|\frac{d\Phi}{dt}\right|^2}{R} = \frac{(\omega B \cdot 2xl)^2}{\rho \cdot \frac{2l}{a}} \cdot dx = 8\pi^2 \cdot f^2 \cdot B^2 \cdot x^2 \cdot l \cdot a \cdot \sigma \cdot dx \quad (4.11)$$

Integriramo po celem vodniku in dobimo:

$$P = 8\pi^2 \cdot f^2 \cdot B^2 \cdot la \cdot \sigma_{Cu} \cdot \int_0^{b/2} x^2 dx = 8\pi^2 \cdot f^2 \cdot B^2 \cdot l \cdot a \cdot \sigma \cdot \frac{b^3}{8 \cdot 3} \quad (4.12)$$

Z upoštevanjem izraza za volumen opazovanega dela vodnika  $V = lab$ , sledi končni izraz za izgube na enoto volumna:

$$\frac{P}{V} = 3,289 \cdot \sigma_{Cu} \cdot f^2 \cdot B^2 \cdot b^2 \quad (4.13)$$

Z upoštevanjem prevodnosti bakra 58 MS/m, se izraz poenostavi:

$$\frac{P}{V} = 190,8 \cdot 10^6 \cdot f^2 \cdot B^2 \cdot b^2 \quad (4.14)$$

Dejansko je potrebno za izračun celotnih izgub vseh treh faz zaradi radialne komponente gostote magnetnega pretoka integrirati volumsko gostoto izgub po celotnem volumnu navitja.

Ustrezen izraz za dodatne izgube zaradi radialne komponente magnetnega polja se glasi:

$$P = 3 \cdot f_p \cdot 190,8 \cdot 10^6 \cdot f^2 \cdot b^2 \cdot \int_0^{\text{bnav}} \int_{r_n}^{r_z} 2\pi \cdot r(x) \cdot B_x^2(x, y) \cdot dx dy \quad (4.15)$$

$$P = 3,596 \cdot f_p \cdot 10^9 \cdot f^2 \cdot b^2 \cdot \int_0^{\text{bnav}} \int_{r_n}^{r_z} r(x) \cdot B_x^2(x, y) \cdot dx dy \quad (4.16)$$

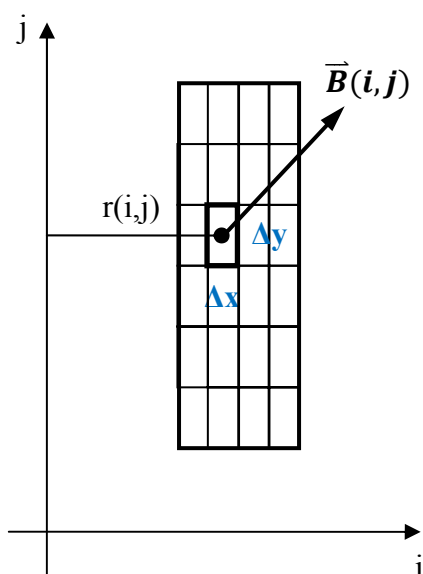
pri čemer je  $f_p$  polnilni faktor navitja, torej razmerje med presekom čistega bakra v navitju in presekom celotnega navitja. Za izračun doprinosa k dodatnim izgubam zaradi aksialne komponente polja, je potrebno namesto komponente polja  $B_x$  vstaviti komponento  $B_y$  ter namesto aksialne radialno dimenzijo bakrenega vodnika.

V diskretni obliki dobimo izraza:

$$P_{rad} = 3,596 \cdot 10^{-6} \cdot f^2 \cdot b^2 \cdot \sum_i \sum_j r(i,j) \cdot B_x^2(i,j) \cdot \Delta x \Delta y \quad (4.17)$$

$$P_{aks} = 3,596 \cdot f_p \cdot 10^{-6} \cdot f^2 \cdot a^2 \cdot \sum_i \sum_j r(i,j) \cdot B_y^2(i,j) \cdot \Delta x \Delta y \quad (4.18)$$

pri čemer so dimenzija žice, radij  $r$  ter dimenziji diskretne delitve  $\Delta x$  in  $\Delta y$  v [mm]. Polnilni faktor je pri izračunu radialnih izgub namenoma izpuščen, saj je dejansko v večini primerov delež izolacije v radialni smeri v navitju bistveno manjši od tistega v aksialni smeri. Slednji ima tako prevladujoč vpliv na zniževanje polnilnega faktorja pod vrednost ena. V primeru širokih aksialnih kanalov se je potrebno tega zavedati in za točnejši izračun radialnih izgub navitje predstaviti z dvema delnima navitjema.



Slika 8: K izrazu za numerični izračun dodatnih izgub v navitju.

Poleg dodatnih izgub program izračuna tudi glavne ohmske izgube po izrazu:

$$P_{ohm} = m_{Cu} \cdot g^2 \cdot 2,36 = 3 \cdot 8,92 \cdot \pi/2 \cdot 2 \cdot D \cdot S_i \cdot N_i \cdot 10^{-6} \cdot g^2 \cdot 2,36 \quad (4.19)$$

Oba izraza, tako za ohmske kot tudi za dodatne izgube veljata pri standardni temperaturi bakra  $75^\circ\text{C}$ .

Razmerje med dodatnimi izgubami in glavnimi ohmskimi izgubami imenujemo faktor dodatnih izgub, ki je merilo za delež dodatnih izgub v skupni bilanci izgub:

$$k_{\text{drad}} = 1 + \frac{P_{\text{rad}}}{P_{\text{ohm}}} \quad (4.20)$$

$$k_{\text{daks}} = 1 + \frac{P_{\text{aks}}}{P_{\text{ohm}}} \quad (4.21)$$

Glavni ukrep za zmanjševanje dodatnih izgub v navitjih transformatorja je drobljenje vodnikov na večje število paralelno povezanih manjših vodnikov. Vendar je mehanska trdnost drobnejših vodnikov manjša, zato so manj odporni na sile, ki se pojavljajo pri kratkih stikih. Izračun tovrstnih mehanskih obremenitev med drugim obravnava naslednje poglavje.

#### 4.4 Izračun kratkostičnih obremenitev

V tem poglavju se podajamo na področje, kjer so tesno povezani pojmi in poglavja elektrotehnike in strojništva, natančneje trdnostnih izračunov. Električni del zajema izračun kratkostičnih tokovnih obremenitev in v povezavi z znanim magnetnim poljem pripadajočih sil. Le-te predstavljajo obremenitve na mehansko strukturo navitij transformatorja, kjer se srečamo s pojmi natezne napetosti, upogiba, stabilnostnih kriterijev ipd.

Pri izvedbi izračuna in določitvi kriterijev za ustreznost konstrukcije smo se oprli na standard IEC 60076-5, ki celovito obravnava to problematiko. Po standardu mora biti transformator dimenzioniran tako, da skupaj z vso pripadajočo opremo brez poškodb vzdrži termične in mehanske obremenitve pri vseh vrstah kratkih stikov. Omejili smo se na izračun razmer pri tripolnih kratkih stikih, ki predstavljajo v večini primerov najhujši slučaj. Obravnavali bomo s standardom definirano skupino transformatorjev z oznako II, ki vključuje transformatorje moči od 2,5 MVA do 100 MVA. Ker kratkostične tokove omejuje predvsem kratkostična napetost transformatorja in v manjši meri tudi impedanca omrežja, izražena s kratkostično močjo, so v standardu podane tudi minimalne vrednosti za določene nazivne moči oz. napetosti. Standard določa dva načina dokazovanja ustreznosti konstrukcije z vidika odpornosti na kratke stike. Prvi je s pomočjo izvedbe kratkostičnega preizkusa, ki je pogostokrat drag in težko izvedljiv, drugi pa z izračunom obremenitev ter na njih osnovanim dokazovanjem ustreznosti konstrukcije in izdelave transformatorja. Slednja se dokazuje bodisi s primerjavo računskih vrednosti opazovanega transformatorja z računskimi vrednostmi dinamično preizkušene transformatorja podobnega tipa, bodisi s primerjavo računskih vrednosti z dokumentiranimi pravili za določanje ustreznosti, določenimi s strani proizvajalca. Proizvajalec mora imeti določene maksimalne dovoljene vrednosti obremenitev, pri katerih konstrukcija ne utrpí nikakršnih posledic ter kritične vrednosti, pri katerih pride do trajnih deformacij. Te vrednosti mora pridobiti bodisi z meritvami na modelih, bodisi s preteklimi opravljenimi kratkostičnimi preizkusi. Računske vrednosti obremenitev po standardu ne smejo presegati vrednosti maksimalnih dovoljenih oz. dopustnih. Istočasno ne smejo presegati 80 % kritičnih vrednosti. Ustreznost določenih vrednosti proizvajalec dodatno potrjuje z dokazi o brezhibnem večletnem delovanju transformatorjev, konstruiranih na osnovi teh kriterijev.

Standard podaja tudi orientacijske vrednosti za maksimalne dovoljene vrednosti obremenitev, ki služijo kot kriteriji ustreznosti. Slednje smo uporabili tudi mi.

#### 4.4.1 Izračun kratkostičnih tokov

Časovni potek kratkostičnega toka zapišemo z izrazom iz katerega sta razvidni enosmerna in izmenična komponenta (6):

$$i(t) = \frac{100}{u_k + u_m} \cdot I_n \cdot \sqrt{2} \cdot \left[ \sin(\alpha - \varphi) \cdot e^{-\frac{R}{L}t} + \sin(\omega t + \alpha - \varphi) \right] \quad (4.22)$$

Fazni kot rezultančne impedance transformatorja in omrežja  $\varphi$ , je zaradi prevladujoče induktivne narave omrežja in transformatorja v večini primerov približno enak:

$$\varphi = \arctan \frac{\omega L}{R} \cong \frac{\pi}{2} \quad (4.23)$$

Efektivna vrednost trajnega toka kratkega stika, ki ga predstavlja izmenična komponenta je torej enaka:

$$I_{ks} = \frac{100}{u_k + u_m} \cdot I_n \quad (4.24)$$

pri čemer je relativna impedanca omrežja določena s kratkostično močjo omrežja ter nazivno močjo transformatorja:

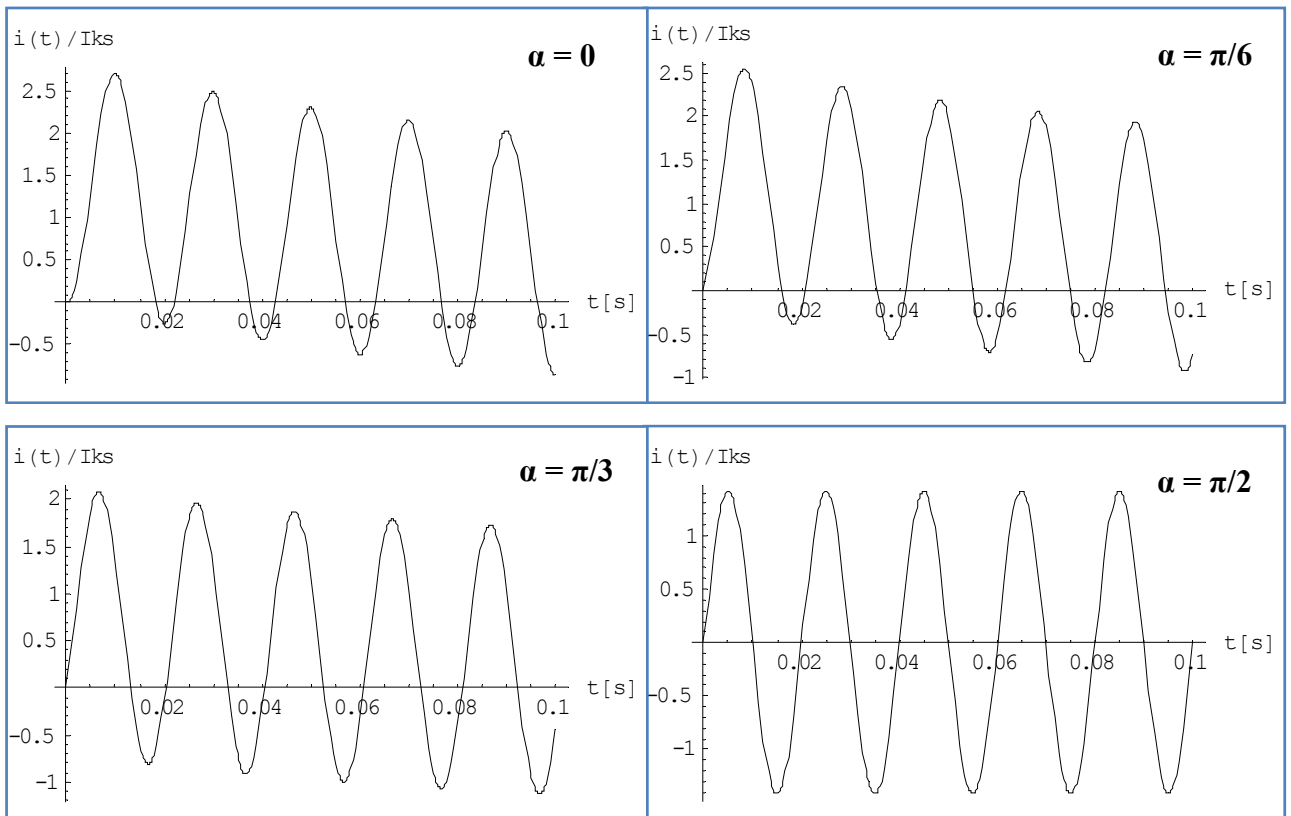
$$u_m = \frac{S_n}{S_0} \cdot 100\% \quad (4.25)$$

Če pogledamo časovne poteke toka za različne kote, vidimo, da je vrednost udarnega toka kratkega stika največja v primeru, ko se kratek stik pojavi v trenutku  $\alpha=0$ , torej ob prehodu napetosti skozi ničlo. Takrat ima tok največjo vrednost, govorimo o t.i. vrednosti udarnega toka kratkega stika:

$$I_{ud} = \frac{100}{u_k + u_m} \cdot I_n \cdot \sqrt{2} \cdot k \quad (4.26)$$

Maksimalna vrednost toka se pojavi po ca. 10 ms, kar je ravno  $1/(2f)$  (6). Razmerje med maksimalno in efektivno vrednostjo trajnega toka kratkega stika, t.i. udarni faktor  $k \times \sqrt{2}$  je močno odvisen od razmerja  $X/R$ , torej od razmerja med prevladujočo skupno induktivno ter skupno ohmsko komponento omrežja in transformatorja.

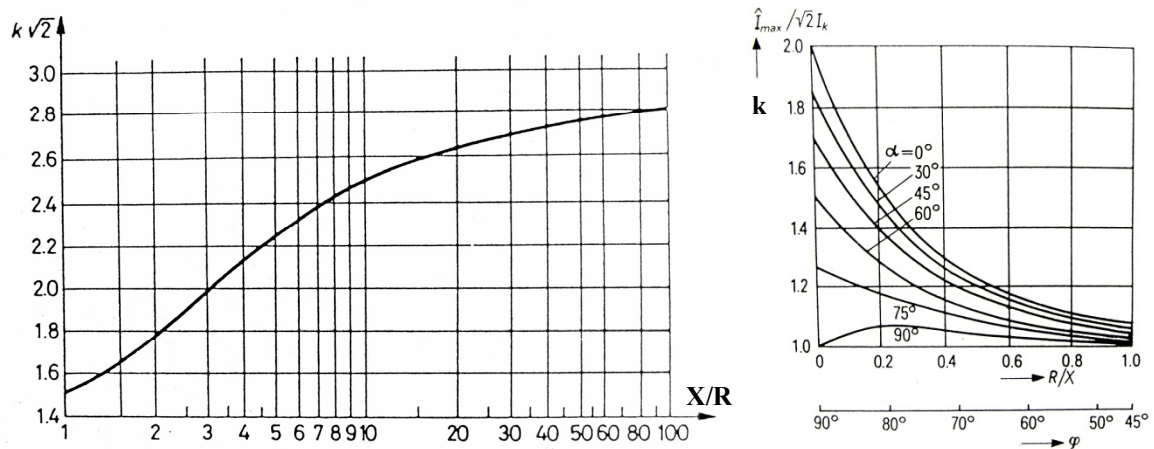




Slika 9 Časovni poteki kratkostičnega toka za različne kote  $\alpha$  ( $X/R=30$ ).

Enosmerna komponenta izzveni po približno 10 periodah, kar časovno pomeni po 0,2 s.

Standard določa, da če ni zahtevano drugače, za transformatorje kategorije II, torej do moči 100 MVA, velja vrednost za  $k \times \sqrt{2}$ , ki je enaka 2,55. Za transformatorje nad to močjo pa vrednost 2,69.



Slika 10 Odvisnost udarnega faktorja in toka od razmerja  $X/R$  in kote  $\alpha$  (6).

#### 4.4.2 Izračun toplotne obremenitve

Kot smo spoznali v prejšnjem poglavju, lahko vrednosti trajnega kratkostičnega toka večkrat presega vrednosti nazivnega toka. Ker so izgube v transformatorju povezane s kvadratno vrednostjo toka, slednje narastejo še toliko bolj. To pomeni močno segrevanje obremenjenih delov, predvsem navitij. Poznan je izraz za izračun temperature bakrenih navitij v odvisnosti od časa trajanja kratkega stika  $t$  (7).

$$T_1 = T_0 + 2 \cdot \frac{T_0 + 235}{\frac{106000}{j_{ks}^2 \cdot t} - 1} \quad (4.27)$$

Čas trajanja je navadno od 2 do 5 s, ko deluje zaščita in transformator izklopi iz omrežja. Izraz lahko uporabimo tudi za izračun nadtemperatur za daljši čas trajanja kratkega stika, vendar ne več kot 10 s, saj temelji na predpostavki, da se celotna energija izgub pretvori v segrevanje navitij, odvajanje toplote je zanemarjeno:

$$P \cdot \Delta t = m_{Cu} \cdot c \cdot \Delta T \quad (4.28)$$

Za bakrena navitja je s standardom dovoljena najvišja temperatura 250°C. Standard podaja podobno enačbo in dovoljeno temperaturo tudi za aluminijasta navitja, ki so redkeje v uporabi.

Pri času trajanja kratkega stika 2 s navadno ni težav s termičnimi obremenitvami navitij, pri daljših časih pa lahko temperatura preseže dovoljeno. Praktično edini ukrep za zniževanje temperature, je zniževanje nazivne tokovne gostote v navitjih.

#### 4.4.3 Izračun sil in mehanskih obremenitev

Iz osnov elektrotehnike je znano fizikalno dejstvo, da na enoto dolžine tokovodnika v magnetnem polju deluje sila, določena z vektorskim produktom med tokom in gostoto magnetnega pretoka:

$$\vec{F} = \vec{I} \times \vec{B} \text{ [N/m]} \quad (4.29)$$

Splošneje lahko definiramo volumsko gostoto sile, ki deluje na tokovno gostoto v prostoru:

$$\vec{f} = \vec{g} \times \vec{B} \text{ [N/m}^3 \text{]} \quad (4.30)$$

Z integriranjem te sile po delih prostora dobimo rezultančno silo, ki deluje na ta del. V našem primeru zaradi rotacijske simetrije polja dejansko integriramo produkt tokovne gostote in gostote magnetnega pretoka po površini. Kot rezultat dobimo silo na enoto dolžine.

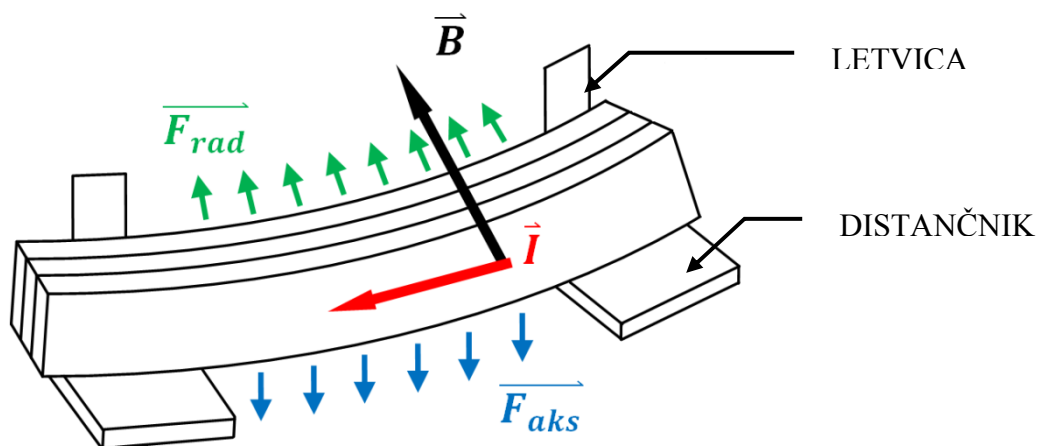
Zaradi hitrosti današnjih računalnikov in enostavnosti smo se odločili za tak način izračuna sil, čeprav se kot alternativa pojavlja izračun t.i. Maxwellove sile, ko komponente sile na del prostora določa integral po poljubni sklenjeni krivulji okrog tega dela:

$$F_x = \frac{1}{2\mu_0} \oint (B_x^2 + B_y^2) \quad (4.31)$$

$$F_y = \frac{1}{2\mu_0} \oint (B_y^2 + B_x^2) \quad (4.32)$$

Ker je gostota magnetnega pretoka odvisna od toka, je velikost sile kvadratno odvisna od njega, zato podobno kot izgube tudi dinamične obremenitve v kratkem stiku močno presegajo nazivne. Za izračun maksimalnih dinamičnih obremenitev je pomembna maksimalna vrednost toka kratkega stika, torej že omenjena vrednost udarnega toka.

Oglejmo si snop vodnikov svitkastega navitja v magnetnem polju ter pripadajoče sile.

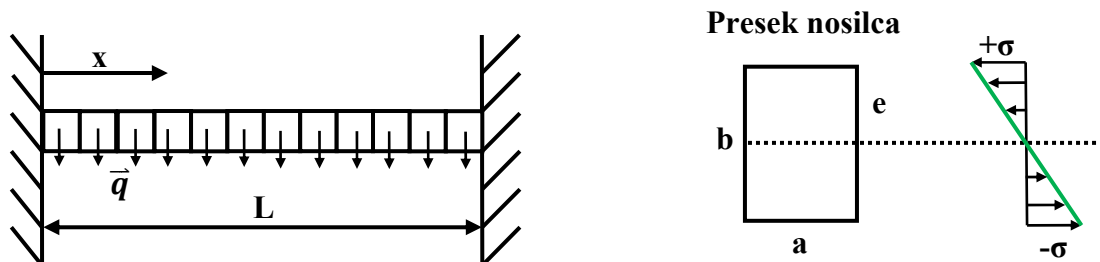


Slika 11: Mehanske obremenitve na svitek navitja.

Rezultančno silo lahko razstavimo na radialno in aksialno komponento. Pojavljata se upogibna momenta v radialni smeri med podpornima letvicama ter v aksialni smeri med distančnikoma. Upogibni moment se po zakonih mehanike odraža kot natezna napetost v vodniku.

Postavlja se vprašanje kako smiselno izračunati ustrezne upogibne momente in pripadajoče natezne napetosti. Vodnik med dvema oporama v ta namen modeliramo kot nosilec pravokotnega prereza (Slika 11, Slika 12).

Ker je odsek vodnika povezan z sosednjimi deli, ga modeliramo kot nosilec togo vpet med dve steni.



Slika 12: Nosilec pravokotnega preseka, togo vpet med dve steni.

Iz mehanike je znano, da je maksimalni moment v osrednjem delu takega nosilca enak (8):

$$M_{\max} = \frac{qL^2}{12} \quad (4.33)$$

Odpornostni moment za nosilec pravokotnega preseka:

$$W = \frac{I}{e} = \frac{ab^3}{12} \cdot \frac{1}{e} = \frac{ab^3}{12} \cdot \frac{2}{b} = \frac{ab^2}{6} \quad (4.34)$$

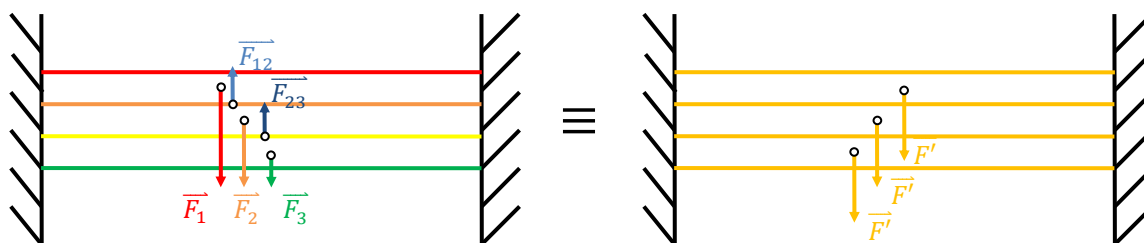
Sledi maksimalna natezna napetost:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W} = \frac{qL^2}{12} \cdot \frac{6}{ab^2} = \frac{qL^2}{ab^2} \cdot \frac{1}{2} \quad (4.35)$$

Pri določevanju aksialne natezne napetosti – to je napetosti zaradi aksialnih sil, ki jih povzroča radialna komponenta magnetnega polja, direktno uporabimo izpeljani izraz, saj celotna sila magnetnega polja deluje na en vodnik. Celotno silo izračunamo s poenostavitvijo, da se celoten vodnik nahaja v največji radialni komponenti polja znotraj njega. V primeru transponiranega kabla ali dvohodnega vijáčnega navitja, kjer sta aksialno drug ob drugem dva vodnika, lahko ob predpostavki, da so aksialne sile na oba približno enake, uporabimo isti izraz. Ob tem je poleg predpostavke, da se radialno polje od enega do drugega vodnika bistveno ne spremeni, predpostavljeno tudi, da med sosednjima vodnikoma praktično ni trenja. Obe predpostavki držita le približno, vendar se ob njuni uporabi nahajamo na varni strani, torej so izračunane vrednosti obremenitev višje od dejanskih.

Nekoliko bolj zapletena je določitev radialnih nateznih napetosti, torej upogibnih napetosti zaradi radialne sile, ki jo povzroča aksialna komponenta polja. Pri tipični sliki magnetnega polja namreč opazimo, da je aksialna komponenta magnetnega polja najvišja ob glavnem izolacijskem kanalu med primarnim in sekundarnim navitjem in nato proti robovom navitij

pada proti nič. S stališča sil to pomeni, da na vodnike, ki se nahajajo ob kanalu, deluje bistveno višja sila, kot na tiste na drugi strani navitja. Vendar so uprti ob svojega soseda, ki je manj obremenjen. Zaradi tega dejstva ne moremo določiti radialne natezne napetosti kar z obremenitvijo posameznega vodnika z maksimalno radialno silo. V tem primeru bi dobili nerealno visoke vrednosti natezne napetosti. Ravno tako ni upravičeno, da bi rezultančno radialno silo preko celotnega svitka implicirali na nosilec z debelino celotnega svitka. Na ta način bi dobili prenizke radialne obremenitve, saj bi dejansko upoštevali, da so posamezni vodniki togo povezani in je trenje med njimi neskončno. To približno velja le za večkratne vodnike povezane z epoksidno smolo. Da razrešimo to težavo, si podrobneje oglejmo tipično situacijo v svitku. Zaradi enostavnosti obravnavamo le tri radialno postavljene vodnike in dognanja nato posplošimo.



Slika 13 Obravnava radialnih sil na snop vodnikov v svitku.

Ker velja razmerje med silami:

$$F_1 > F_2 > F_3 \quad (4.36)$$

lahko za uravnotežen sistem zapišemo rezultančne sile na posamezni vodnik:

$$F_{1rez} = F_1 - F_{12} \quad (4.37)$$

$$F_{2rez} = F_2 + F_{12} - F_{23} \quad (4.38)$$

$$F_{3rez} = F_3 + F_{23} \quad (4.39)$$

Ker so vsi vodniki iz enakega materiala ter zaradi opisanega razmerja sil in prenosa obremenitve velja, da so upogibi vseh treh vodnikov enaki, kar pomeni, da so tudi vse tri rezultančne sile med seboj enake in enake sili  $F'$ . Iz zgornjega sistema enačb je možno relativno enostavno pokazati, da je rezultančna sila ravno enaka srednji vrednosti obremenitvenih sil:

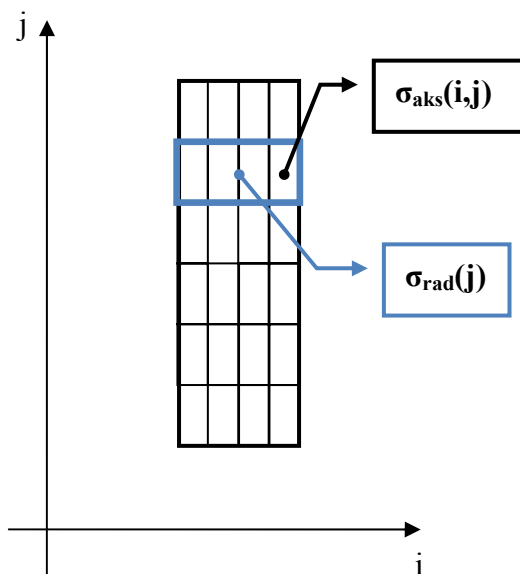
$$F_{1rez} = F_{2rez} = F_{3rez} = F' = \frac{1}{3}(F_1 + F_2 + F_3) \quad (4.40)$$

Oz. v splošnem za n vodnikov v svitku:

$$F' = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n F_n \quad (4.41)$$

Pri zgornjem izvajanju je ponovno zanemarjeno trenje med posameznimi vodniki, kar predstavlja določeno rezervo pri izračunu obremenitev. Dodatno rezervo predstavlja tudi neupoštevanje ukrivljenosti svitka, ki pri manjših dolžinah oz. kotih, značilnih za navitja transformatorja, pomeni le do nekaj odstotkov nižje natezne napetosti.

Na osnovi vsega povedanega lahko zapišemo končne enačbe za izračun radialnih in aksialnih natezних napetosti. Zaradi nedefiniranega položaja vodnikov in izolacije v navitju, enačbe temeljijo na predpostavki, da je magnetno polje znotraj vodnika konstantno. S tem ko poiščemo vrednosti najvišjih obremenitev po celotnem navitju, tako določimo vrednost natezne napetosti, ki na mestu dejanskega položaja vodnika zagotovo ni presežena.



Slika 14: K izrazom za izračun upogibnih natezних napetosti.

Znotraj vsake vertikalne delitve navitja določimo radialno upogibno natezno napetost ( $\sigma_{rad}(j)$ ):

$$\sigma_{rad}(j) = \frac{f_{rad} \cdot L_r^2}{2 \cdot a^2 \cdot b} = \frac{(\sum_i g_{ud} \cdot B_y(i,j) \cdot \Delta x) \cdot a \cdot b}{2 \cdot a_{1t}} \cdot \frac{L_r^2}{a^2 \cdot b} = \frac{(\sum_i g_{ud} \cdot B_y(i,j) \cdot \Delta x) \cdot L_r^2}{2 \cdot a_{1t} \cdot a} \quad (4.42)$$

pri čemer je razdalja med roboma podprtih letvic enaka:

$$L_r = \frac{\pi \cdot D}{N_{pl}} - \check{S}_l \quad (4.43)$$

Upogibne natezne napetosti v radialni smeri se po zgornji enačbi računajo le za navitja, pri katerih radialna sila deluje navznoter. Za navitja, kjer radialna sila deluje navzven je prevladujoča t.i. »hoop« natezna trdnost, ki jo bomo podrobneje opisali v naslednjem podglavju. Zato naj na tem mestu podamo le enačbo za izračun:

$$\sigma_{\text{rad}}(j) = \frac{f_{\text{rad}} \cdot D}{2 \cdot a_{1t} \cdot b} = \frac{(\sum_i g_{\text{ud}} \cdot B_y(i,j) \cdot \Delta x) \cdot b \cdot D}{2 \cdot a_{1t} \cdot b} = \frac{(\sum_i g_{\text{ud}} \cdot B_y(i,j) \cdot \Delta x) \cdot D}{2 \cdot a_{1t}} \quad (4.44)$$

Aksialno natezno napetost v poljubni točki navitja izračunamo z izrazom:

$$\sigma_{\text{aks}}(i,j) = \frac{f_{\text{aks}} \cdot L_a^2}{2 \cdot a \cdot b^2} = \frac{g_{\text{ud}} \cdot B_x(i,j) \cdot a \cdot b}{2} \cdot \frac{L_a^2}{a \cdot b^2} = \frac{g_{\text{ud}} \cdot B_x(i,j) \cdot L_a^2}{2 \cdot b} \quad (4.45)$$

Razdaljo med roboma distančnikov, ki je odvisna od radialnega položaja mesta določa izraz:

$$L_a = \frac{\pi \cdot D}{N_d} - \check{S}_d \quad (4.46)$$

Pri plastnih navitjih, kjer se vodniki v aksialni smeri nahajajo drug zraven drugega, je  $L_a$  enak nič in zato aksialna upogibna napetost ni prisotna.

Skupno natezno napetost v poljubni točki navitja dobimo z aritmetično vsoto radialne in aksialne upogibne natezne napetosti. Pri upogibu se namreč prečne obremenitve na nosilec (vodnik) pojavijo kot vzdolžne natezne oz. kompresijske napetosti (Slika 12), torej delujejo v isto smer tako za aksialno kot radialno komponento upogibnih sil. Zato torej aritmetično in ne geometrijsko seštevanje:

$$\sigma(i,j) = \sigma_{\text{rad}}(j) + \sigma_{\text{aks}}(i,j) \quad (4.47)$$

Aksialna komponenta sil je pri klasični konstrukciji prisotna predvsem v območju ob zgornjem in spodnjem robu navitij. Njen kumulativni učinek stiska celotno navitje in pri raznih oblikah nesimetrij obremenjuje vpetje navitij, torej montažne plošče, stebrne in jarmske letve ter same jarme magnetnega kroga. Slika 15 prikazuje tipičen potek aksialne sile (modra krivulja) in skupne aksialne sile (rdeča krivulja) za notranje in zunanje navitje.

Aksialno silo na poljubni višini navitja dobimo s seštevkom aksialnih komponent po širini navitja:

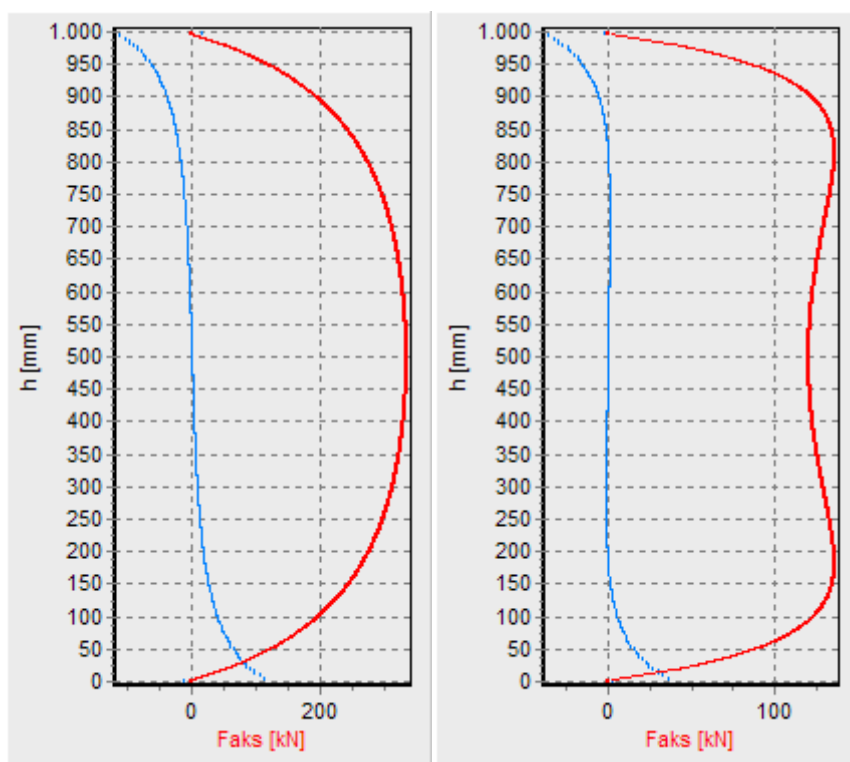
$$F_{\text{aks}}(j') = (\sum_i g_{\text{ud}} \cdot B_x \cdot \Delta x) \cdot \Delta y \cdot \pi \cdot D \quad (4.48)$$

Z vzdolžnim integriranjem oz. seštevanjem prispevkov dobimo skupno aksialno obremenitev na določeni višini navitja, ki jo ponazarja rdeča krivulja na Slika 15.

$$F_{\text{aks}}(j) = (\sum_{j'=1}^j F_{\text{aks}}(j')) \quad (4.49)$$

Maksimalna vrednost te sile  $F_{aksmax}$  je pomembna tako za oceno nevarnosti zvrčanja vodnikov (t.i. »tilting«), kot tudi za izračun tlaka na distančnike med svitki navitja, ki ga enostavno izračunamo kot:

$$P_{distmax} = \frac{F_{aksmax}}{N_d \cdot \check{s}_{ld} \cdot a_{1t}} \quad (4.50)$$



Slika 15: Tipične aksialne obremenitve po višini navitja notranjega in zunanjega navitja.

Vsota aksialne sile vzdolž celotne višine navitja, ki se odraža kot razlika med vrednostjo rezultančne aksialne sile v skrajnih točkah navitja, predstavlja silo, ki v kratkem stiku deluje na vpetje navitij. V idealno simetričnih razmerah, ko sta magnetni osi obeh navitij popolnoma poravnani, navitji pa sta postavljeni točno v sredino transformatorskega okna (primer na Slika 15) je ta sila enaka nič. Že nekaj milimetrsko odstopanja magnetnih osi zaradi proizvodnih toleranc lahko vodijo v nezanemarljive aksialne sile, ki jih je potrebno upoštevati pri določanju debelin montažnih plošč in ostalega vpetja na magnetni krog.

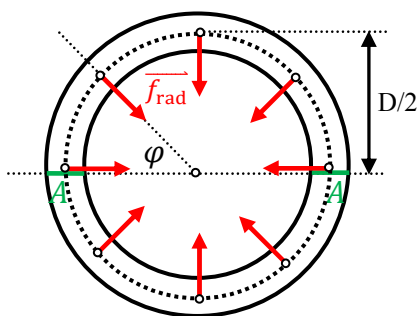


#### 4.4.4 Določitev kriterijev za ustreznost

V prejšnjem podpoglavju smo opisali metode za izračun mehanskih obremenitev na dele navitja in njegovega vpetja v kratkem stiku. Vendar samo kvantitativno poznavanje obremenitev ni dovolj. Določiti je potrebno tudi kriterije, ki določajo ali so izračunane obremenitve še dopustne, oz. ali jih bo transformator preživel brez usodnih posledic. Že v uvodnem delu tega poglavja smo omenili, da standard za tovrstno določanje ustreznosti konstrukcije transformatorja ponuja dve možnosti. Prva možnost je primerjava računskih vrednosti obravnavanega transformatorja z računskimi vrednostmi podobnega transformatorja, ki je uspešno preстал preizkus kratkega stika. Ker so tovrstni preizkusi dragi in za proizvajalca tvegani, se izvajajo bolj poredko in marsikdaj niso izvedeni. Zato standard dopušča, da se računane vrednosti lahko primerjajo tudi s pravili oz. maksimalnimi dovoljenimi vrednostmi, ki jih določa in utemeljuje proizvajalec transformatorjev, na osnovi svojih izkušenj in predhodno opravljenih kratkostičnih preizkusih ter meritvah na modelih. Standard tudi podaja orientacijske vrednosti obremenitev, ki so lahko tudi presežene, če proizvajalec dokaže, da so še dopustne. Kriterije za ustreznost oz. dovoljene vrednosti obremenitev v našem programu bomo oblikovali ravno po teh orientacijskih vrednostih. Do sedaj smo govorili le o t.i. trdnostnih izračunih, ko izračunamo natezno napetost pri upogibu. Kot bomo videli v nadaljevanju, to vrednost primerjamo z dopustno vrednostjo. Ekvivalentno bi lahko postavili tudi kriterij, ki bi določal še dopusten upogibek. Poleg trdnostnih kriterijev pa so zelo pomembni tudi t.i. stabilnostni kriteriji. Po izkušnjah se namreč redkokdaj zgodi, da bi vodniki popolnoma izgubili svojo trdnost. Pogosteje pride do t.i. vbočitve (ang. »buckling«) navitja, ki je posledica izgube stabilnosti. Do te pride pri bistveno nižjih vrednostih nateznih napetosti. Za uvedbo stabilnostnega kriterija se moramo spoznati s pojmom »hoop« napetosti. Radialna obremenitev, ki deluje na obroč, se namreč odraža kot vzdolžna natezna ali kompresijska natezna napetost v njem. Če obroč v neki točki prerežemo in pogledamo kakšen tlak deluje na prerez, lahko zapišemo:

$$\sigma = \frac{\int_0^\pi f_{\text{rad}} \cdot \sin\varphi \cdot D/2 \cdot d\varphi}{2 \cdot A} = \frac{2 \cdot f_r \cdot D/2}{2 \cdot A} = \frac{f_r \cdot D}{2 \cdot A} \quad (51)$$

Gre torej za projekcijo porazdeljene radialne sile na premer obroča. To enačbo uporabimo tudi za izračun nateznih napetosti zaradi radialnih sil na navitja, kjer ta sila deluje navzven, torej natezno in ne kompresijsko.



Slika 16: »Hoop« kompresijska napetost na obroč.

Na osnovni poznane vrednosti »hoop« kompresijske natezne napetosti, je določen stabilnostni kriterij, torej največje dopustne vrednosti, pri kateri pride do povečane verjetnosti pojava vbočitve. V literaturi (7), (9) so podani različni izrazi za izračun t.i. proste vbočitve, kjer se obroč obravnava kot nepodprt, torej kot dolgo s stiskanjem obremenjeno palico in t.i. prisilno vbočitev, kjer so upoštevane radialne podpore – kratka s stiskanjem obremenjena palica. Vsi izrazi temeljijo na vrednostih elastičnega modula bakra ter dimenzij vodnika in navitja. V primeru proste vbočitve so kritične vrednosti zelo nizke, izraz v primeru prisilne vbočitve pa je močno odvisen od tipa vodnikov. Poleg tega v njem nastopajo faktorji, ki jih mora proizvajalec sam določiti. Zato smo se odločili, da bomo za dopustno izbrali vrednost podano v standardu. Enako smo po standardu določili tudi ostale dopustne vrednosti obremenitev vodnikov, distančnikov in ostalih struktur. V spodnji tabeli podajamo računane obremenitve in glede na standard IEC 60076-5 priporočene kriterije za dopustne vrednosti le-teh. Kot smo že omenili tekom poglavja, ločimo dva tipa obremenitve in sicer primer, ko radialna sila deluje navznoter (stiska navitje) in primer, ko radialna sila deluje navzven (nateguje navitje).

RADIALNA SILA NAVZNOTER - STISKANJE		RADIALNA SILA NAVZVEN - NATEG	
Računana obremenitev	Dopustna vrednost	Računana obremenitev	Dopustna vrednost
Kompresijska »hoop« napetost	<b>0,35 <math>R_{p0,2}</math></b>	/	/
Radialna upogibna natezna napetost	<b>0,9 <math>R_{p0,2}</math></b>	Radialna »hoop« natezna napetost	<b>0,9 <math>R_{p0,2}</math></b>
Aksialna upogibna natezna napetost	<b>0,9 <math>R_{p0,2}</math></b>	Aksialna upogibna natezna napetost	<b>0,9 <math>R_{p0,2}</math></b>
Skupna natezna napetost	<b>0,9 <math>R_{p0,2}</math></b>	Skupna natezna napetost	<b>0,9 <math>R_{p0,2}</math></b>
Maksimalna aksialna sila	<b>0,8 <math>F_{\text{tilt}}</math></b>	Maksimalna aksialna sila	<b>0,8 <math>F_{\text{tilt}}</math></b>
Tlak na distančnike	<b>80 MPa pap 120 MPa lak</b>	Tlak na distančnike	<b>80 MPa pap 120 MPa lak</b>
Aksialna sila na plošče	/	Aksialna sila na plošče	/

Tabela 1: Računane obremenitve in pripadajoče dovoljene vrednosti.

Pri vseh kriterijih, ki se nanašajo na napetost v vodnikih, se pojavlja vrednost  $R_{p0,2}$ . To je vrednost za trdoto žice, ki je garantirana s strani proizvajalca žice in pomeni vrednost natezne napetosti, ko material vstopi v plastično področje deformacije. Po definiciji je namreč to vrednost obremenitve, pri kateri se ko le-ta popusti, dolžina trajno poveča za 0,2%.

Oznaka  $F_{\text{tilt}}$  v tabeli se nanaša na kritično vrednost aksialne sile pri kateri pride do zvrčanja vodnikov. V literaturi (7), (9) je moč najti izraze za te vrednosti, ki so odvisni od dimenzij ter tipa vodnika in navitja ter nekaterih empirično določenih koeficientov.

Dopustni tlak na distančnike se razlikuje glede na to, ali je uporabljen vodnik izoliran s papirno ali lak izolacijo.

Poznana vrednost aksialne sile, ki deluje na montažne plošče in ostalo vpetje navitij ter na magnetni krog, je moč uporabiti za njihovo ustrezno dimenzioniranje, kar presega okvirje te naloge.

V standardu so podani tudi nekateri drugi kriteriji, kot so sile na izvode navitij, zaščitne obroče, izolacijo in magnetni krog, ki jih nismo zajeli v našo obravnavo. Dodali pa smo kriterij za skupno natezno napetost v vodniku t.i. »sigmo skrajnih svitkov«, ki ga v standardu ni, a je po našem mnenju pomemben.

## 5 Opis in uporaba programa

V tem poglavju želimo opisati delovanje, izgled in navodila za uporabo programa za magnetne izračune, teoretično opisane v predhodnih poglavjih. Poimenovali smo ga Magneto. Izdelan je v programskem okolju Borland Delphi, ki temelji na programskem jeziku Turbo Pascal. Predstavljen bo opis vnosnih polj ter način vnosa podatkov ter nastavitev.

### 5.1 Osnovno okno

Osnovno okno se pojavi ob zagonu programa (Magneto.exe). Namenjeno je predvsem vnosu podatkov, njihovem spreminjanju ter pregledovanju. Poleg tega so na njem predstavljeni tudi najpomembnejši rezultati izračuna, ki seznanijo projektanta z ustreznostjo konstrukcije transformatorja. Težili smo k temu, da je količina vnosnih podatkov najmanjša možna, ki še omogoča izračun zelenih veličin.

The screenshot shows the 'Magneto' software window with the following sections:

- Podatki transformatorja**
  - Karakteristična številka: 1234
  - Tip transformatorja: RT 20000-110
  - Nazivna (referenčna) moč [MVA]: 20
  - Premer stebra D<sub>s</sub> [mm]: 544
  - Višina stebra b<sub>s</sub> [mm]: 1674
- Podatki navitij**
  - Oznaka navitja: NN
  - Tok +/- [A]: -502
  - Število ovojjev: 92
  - Širina a<sub>1t</sub> [mm]: 27,5
  - Višina b<sub>e</sub> [mm]: 1358
  - D.sr.premer [mm]: 1291
  - R.do sp.jarma [mm]: 139,5
- Podatki vodnikov**
  - Prerez ovoja [mm<sup>2</sup>]: 279,4
  - Višina žice [mm]: 6
  - Širina žice [mm]: 1,8
- Podatki za izračun sil**
  - Število podprtih letvic: 18
  - Število dist.: 18
  - Širina dist. [mm]: 40
  - R<sub>p0,2</sub> [N/mm<sup>2</sup>]: 130
- Izračun**
  - Magnetnega polja in:
    - Stresane napetosti U<sub>x</sub>
    - Izgub Izgube P<sub>v</sub> [kW]: 0
    - Sil Moč mreže [MVA]: 10000
- Osnovni rezultati** (empty box)
- Diagram**: A schematic diagram of a transformer core with labels NN, NN1, VN, and RN.
- Buttons**: Dodaj, Posodobi, Odstrani, Izračun, Rezultati podrobno, Izhod.

Slika 17: Okno za vnos podatkov in predstavitev osnovnih rezultatov izračuna.

Naj na kratko opišemo posamezno vnosno polje:

#### *Podatki transformatorja*

1. **Karakteristična številka:** Proizvajalčeva številka, ki označuje določeno konstrukcijo transformatorja.
2. **Tip transformatorja:** Oznaka tipa transformatorja glede na moč, napetost, tip regulacije ipd.
3. **Nazivna (referenčna) moč:** Moč, pri kateri se izračuna vrednost kratkostične napetosti. Lahko je različna ali enaka nazivni moči transformatorja. Tej moči naj ustrezajo vrednosti vnesenih tokov navitij in delnih navitij.
4. **Premer stebra  $D_s$  [mm]:** Premer kroga, očrtanega magnetnemu jedru transformatorja.
5. **Višina stebra  $b_s$  [mm]:** Višina stebra magnetnega jedra transformatorja. Dejansko je to razdalja med spodnjim robom zgornjega jarma ter zgornjim robom spodnjega jarma.

#### *Izračun*

1. **Stresane napetosti  $U_x$ :** To polje označimo, če želimo izračun razsipane napetosti.
2. **Izgub:** To polje označimo, če želimo izračun ohmskih in dodatnih izgub v navitju transformatorja.
3. **Izgube  $P_v$ :** Pričakovane preostale dodatne izgube poleg dodatnih izgub v navitju. Torej izgube v prevodnih konstrukcijskih delih in kotlu, po katerih se zaključuje razsipano magnetno polje.
4. **Sil:** To polje označimo, če želimo izračun dinamičnih obremenitev v kratkem stiku.
5. **Moč mreže [MVA]:** Kratkostična moč mreže na katero je priključen transformator. Lahko je podana s strani naročnika transformatorja, ali s standardno vrednostjo.

#### *Podatki navitij*

1. **Oznaka navitja:** Vnesemo poljubno oznako za identifikacijo navitja ali delnega navitja. Ko je navitje enkrat vneseno (s pritiskom gumba Dodaj), na tem mestu izbiramo, podatki katerega navitja so prikazani v okvirčkih znotraj okvira Podatki navitij. Med navitji lahko izbiramo tudi direktno s klikom miške na navitje, prikazano na sliki transformatorskega okna.

2. **Tok +/- [A]:** Vpišemo tok, ki teče v navitju in pri vrednosti katerega so izračunani magnetno polje, izgube ter sile. Pomembna je določitev smeri toka, ki je določena s predznakom. Amperni ovoji navitij s tokom enakega predznaka se podpirajo. Smer toka je razvidna tudi na sliki transformatorskega okna. Oznaka navitij s pozitivno smerjo je na sliki napisana z modro barvo, z negativno smerjo z zeleno barvo, oznaka navitij po katerih tok ne teče pa je napisana s črno barvo.
3. **Število ovojev:** Število ovojev navitja ali delnega navitja.
4. **Širina a1t [mm]:** Radialna dimenzija navitja ali delnega navitja.
5. **Višina be [mm]:** Električna višina navitja ali delnega navitja.
6. **D. sr. premer [mm]:** Dvojni srednji premer navitja ali delnega navitja.
7. **R. do sp. jarma [mm]:** Razdalja med spodnjim robom navitja in spodnjim jarmom magnetnega kroga transformatorja.

*Podatki vodnikov*

1. **Prerez ovoja [mm<sup>2</sup>]:** Prerez enega ovoja navitja ali delnega navitja.
2. **Višina žice [mm]:** Aksialna dimenzija žice osnovnega vodnika navitja.
3. **Širina žice [mm]:** Radialna dimenzija žice osnovnega vodnika navitja.

*Podatki za izračun sil*

1. **Število podprtih letvic:** Število letvic, ki so podprte v radialni smeri.
2. **Število distančnikov:** Število radialnih distančnikov po obodu navitja. Pri plastnih navitjih, kjer radialnih distančnikov ni, je potrebno vstaviti vrednost 0.
3. **Širina dist. [mm]:** Širina enega radialnega distančnika.
4. **Rp0,2 [N/mm<sup>2</sup>]:** R<sub>p0,2</sub> vrednost natezne napetosti bakra, uporabljenega za vodnike navitja ali delnega navitja.

Poleg gumba *Dodaj* se nahajata gumba *Posodobi*, s katerim potrdimo morebitno kasnejšo spremembo podatka za določeno navitje ter *Odstrani*, s katerim odstranimo že vneseno navitje. Potrebno je poudariti, da se vsaka sprememba podatka navitja ne upošteva takoj po njenem vnosu v vnosno polje, ampak šele po pritisku gumba *Posodobi*. Da sprememba še ni bila potrjena, nas opozarja zvezdica (\*) ob gumbu *Posodobi*.

S pritiskom na gumb *Izračun* poženemo izračun. Med samim potekom izračuna vidimo indikator napredka, napis na gumbu *Izračun* se spremeni v *Prekini*. S pritiskom nanj prekinemo potek izračuna. V tem primeru se rezultati ne izračunajo.

V okvirčku *Osnovni rezultati* se po končanem izračunu izpišejo osnovni rezultati, ki so odvisni od izbranega izračuna in sicer ob izračunu razsipane napetosti:

- Vrednost induktivnega dela kratkostične napetosti  $u_x$ .

Ob izračunu izgub, poleg tega še:

- Vrednost ohmskega dela kratkostične napetosti  $u_r$ .
- Vrednost kratkostične napetosti  $u_k$ .
- Vrednost ohmskih, dodatnih in celotnih izgub. Vrednost dodatnih izgub predstavlja izračunano vrednost dodatnih izgub v navitjih transformatorja. V oklepaju je pripadajoč faktor dodatnih izgub  $(1+P_{\text{dod}}/P_{\text{ohm}})$ . Vrednost celotnih izgub je vsota vrednosti ohmskih izgub, dodatnih izgub ter vnesene vrednosti izgub v ostalih prevodnih delih ( $P_v$ ). V oklepaju je pripadajoč faktor celotnih dodatnih izgub  $(1+(P_{\text{dod}}+P_v)/P_{\text{ohm}})$ .

Pri izračunu sil poleg zgoraj naštetega še:

- Vrednost udarnega faktorja, t.j. razmerja med najvišjo trenutno vrednostjo in efektivno vrednostjo trajnega toka kratkega stika.
- Opozorilo o ustreznosti ali neustreznosti konstrukcije z vidika dinamične obremenitve.
- Absolutna vrednost temperature, do katere se segreje navitje pod vplivom trajnega toka kratkega stika v času trajanju le-tega, določenem v nastavitvah.

V okvirčku *Osnovni rezultati* so torej prikazane vse najpomembnejše informacije, ki jih projektant potrebuje pri dimenzioniranju transformatorja (izdelavi ponudbe ali izračuna). Za podrobnejši pregled rezultatov, torej izgub in dinamičnih obremenitev po posameznih navitjih ter izris nekaterih veličin, je potrebno pritisniti gumb *Rezultati podrobno*, ki odpre novo okno s podrobnejšimi rezultati.

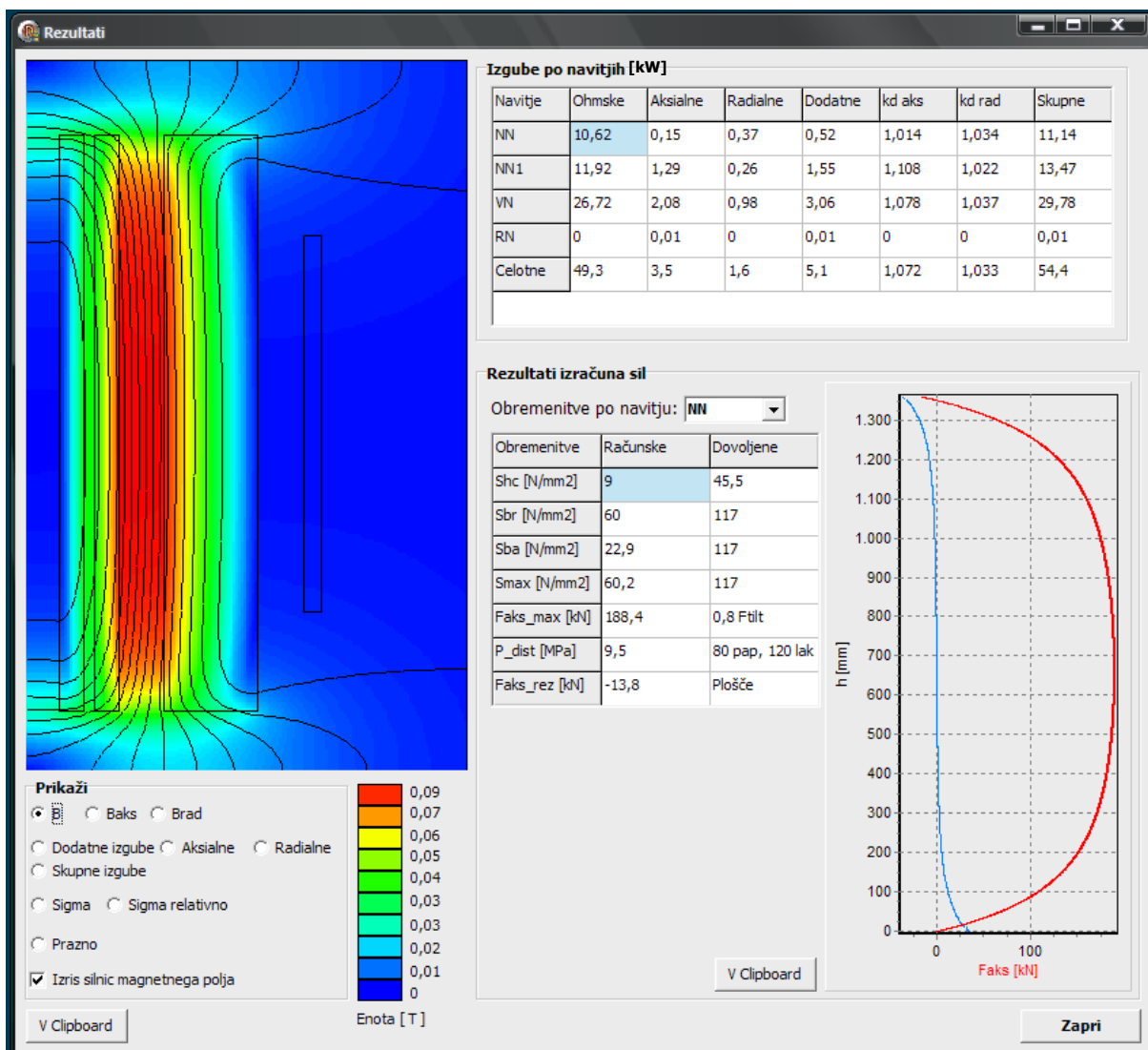
## 5.2 Okno Rezultati

Na levem delu okna je prikazana slika navitij in v barvni skali tudi vrednosti izračunanih veličin. V okvirčku *Prikaži* je moč izbrati med prikazom:

- Velikosti magnetnega polja  $B$ , njegove aksialne  $B_{aks}$  ali radialne  $B_{rad}$  komponente.
- Dodatnih izgub v navitjih, izgub zaradi aksialne komponente ali izgub zaradi radialne komponente magnetnega polja.
- Skupnih izgub, torej vsote ohmskih izgub in dodatnih izgub v navitjih. V tem primeru je torej pokazana gostota izgub, ki sovпада z lokalno proizvedeno toplotno energijo, ki jo je potrebno odvesti iz navitij. Iz te slike je možno oceniti možna mesta najtoplejših točk v navitju.
- Absolutne natezne napetosti v vodnikih navitij ( $\Sigma$ ) ali njene relativne vrednosti glede na vrednost  $R_{p0,2}$ . V slednjem primeru rdeča barva pomeni preseganje vrednosti  $R_{p0,2}$  in s tem maksimalne dovoljene obremenitve, ki je  $0,9 \times R_{p0,2}$ .
- Pri izboru možnosti *Prazno* se izrišejo zgolj navitja, s prvimi tremi znaki njihove oznake.
- Možno je vklopiti ali izklopiti prikaz silnic magnetnega polja.

V primeru, da določen tip izračuna ni bil izveden, je izbira prikaza pripadajoče veličine, onemogočena. Pod sliko je tudi legenda, ki prikazuje vrednost veličine, ki ji pripada določena barva, pod njo pa je napisana tudi fizikalna enota.





Slika 18: Okno podrobnejših rezultatov izračuna.

Na desni strani okna se v okvirju *Izgube po navitjih* nahaja tabela, v kateri so prikazane izgube po posameznih navitjih in sicer od navitij z manjšim do tistih z večjim premerom. V stolpcih so zapisane po vrsti: ohmske izgube, izgube zaradi aksialnega magnetnega polja, izgube zaradi radialne magnetnega polja, skupne dodatne izgube v navitju, vse v kW, faktor dodatnih izgub zaradi aksialnega magnetnega polja ( $1+P_{aks}/P_{ohm}$ ), faktor dodatnih izgub zaradi radialnega magnetnega polja ( $1+P_{rad}/P_{ohm}$ ) ter skupne izgube v navitju v kW. V spodnji vrstici tabele izgub je podana celotna vsota omenjenih vrednosti po vseh navitjih.

V okvirju *Rezultati izračuna sil* je možno v izbirnem oknu izbrati navitje, za katerega se nato v spodnji tabeli pokažejo izračunane dinamične obremenitve. Po vrsti od prve navzdol so prikazane (S pomeni  $\sigma$ , oznake izhajajo iz oznak v standardu IEC 60076-5):

- Shc: kompresijska »hoop« natezna napetost zaradi radialne sile za navitja, na katere deluje radialna sila navznoter.
- Sht: natezna »hoop« natezna napetost zaradi radialne sile za navitja, na katere deluje radialna sila navzven.
- Sbr: največja natezna napetost zaradi upogiba vodnikov med oporami (podprtimi letvicami) v radialni smeri.
- Sba: največja natezna napetost zaradi upogiba vodnikov med oporami (distančniki) v aksialni smeri.
- Smax: največja vrednost vsote aksialne in radialne natezne napetosti zaradi upogiba vodnikov mod oporami. Ker se na zunanjih navitjih največja vrednost natezne napetosti navadno pojavi na skrajnih svitkih, je v uporabi tudi izraz »sigma skrajnih svitkov«.
- Faks\_max: največja vrednost kumulativne aksialne sile, katere potek vzdolž navitja je prikazan z rdečo krivuljo na diagramu desno od tabele. Njena prevelika vrednost lahko vodi v zvrčanje vodnikov (t.i. »tilting«).
- Pdist: Tlak na distančnike, ki je izračunan iz Faks\_max ter ustrezne površine distančnikov.
- Faks\_rez: rezultančna aksialna sila, t.j. integral aksialne sile (modra krivulja) vzdolž celega navitja. Predstavlja silo, s katero navitje deluje na svoje vpetje (montažne plošče).

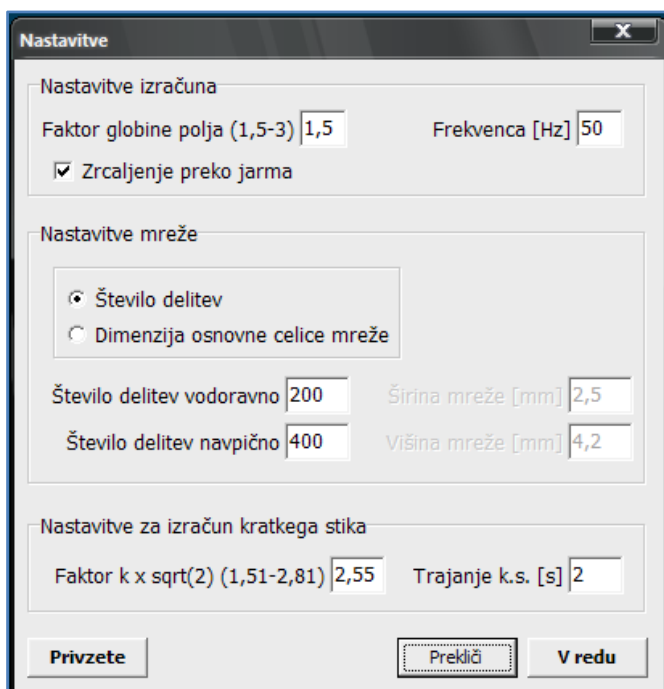
V drugem stolpcu tabele so poleg izračunanih vrednosti tudi dopustne vrednosti, torej maksimalne dovoljene vrednosti, ki po priporočilih standarda ne smejo biti presežene, če proizvajalec nima dokazov, da njegova konstrukcija to brez posledic prenese.

Desno od tabele je diagram, ki prikazuje aksialno silo vzdolž navitja (modra krivulja, za katero merilo na x-osi ne velja) ter kumulativno aksialno silo (rdeča krivulja), ki predstavlja obremenitev vodnikov ter izolacije (papirne ali lak izolacije žice in distančnikov).

Ob vsaki sliki oz. grafu se nahaja gumb *V Clipboard* s pritiskom katerega skopiramo prikazano sliko v pomnilnik in jo nato lahko prilepimo v dokument znotraj ustreznega programa (Word, Paint ipd.).

### 5.3 Okno nastavitve

V meniju osnovnega okna se poleg menija *Datoteka*, od koder je moč shranjevati podatke o transformatorju (shranjujejo se tako podatki transformatorja kot tudi nastavitve izračuna) in nalagati že shranjene, nahaja tudi meni *Nastavitve*, ki odpre okno z nastavitvami, kjer lahko določamo osnovne parametre izračuna.



Slika 19 Okno z nastavitvami izračuna.

V okvirju *Nastavitve izračuna* lahko določimo faktor globine, ki določa kako globoko (stran od stebra magnetnega kroga) se računa magnetno polje. Globina prostora je določena s produktom tega faktorja in zunanjim premerom najbolj zunanjega navitja. Pod vnosnim oknom izberemo tudi možnost izračuna z ali brez zrcaljenja navitij preko jarmov magnetnega kroga. Vstavimo lahko tudi podatek o frekvenci napetosti omrežja.

V okvirju *Nastavitve mreže* se nastavlja dimenzijo osnovne mreže v točkah katere se računajo vrednosti gostote magnetnega pretoka. S tem je določena tudi natančnost izračuna. Možno je izbirati med določitvijo števila delitev (točk) mreže, ali določitvijo velikosti osnovne celice mreže.

V okvirju *Nastavitve za izračuna kratkega stika* poleg časa trajanja kratkega stika, ki služi kot vhodni podatek za izračun nadtemperature navitij v kratkem stiku, določamo tudi vrednost vektorja  $k \times \sqrt{2}$ , ki določa amplitudo udarnega toka kratkega stika.

S pritiskom na gumb *Privzete* nastavimo vse nastavitve na privzete vrednosti.

## 6 Analiza in ovrednotenje rezultatov

V tem poglavju želimo kvalitativno in kvantitativno ovrednotiti rezultate programa. Da uporabnik dobi zaupanje v rezultate, je namreč potrebno preveriti njihovo ujemanje z realnim stanjem. V prvem delu se bomo osredotočili na rezultate izračuna kratkostične napetosti in dodatnih izgub v navitju. Pri tem nam bodo za referenco služili rezultati meritev večih izdelanih in izmerjenih transformatorjev. Meritve kratkostične napetosti in izgub so opravljene brez prisotnosti kotla, kar je najbližje stanju, ki ga zajema naš model. Podali bomo primerjavo med izmerjenimi in računskimi vrednostmi.

Nekoliko več težav je z ovrednotenjem rezultatov izračuna dinamičnih obremenitev. Direktnega merjena slednjih namreč ni moč izvesti na enostaven način. Ravnotako nimamo na razpolago referenčnega transformatorja, ki bi bil dejansko preizkušen s kratkostičnim preizkusom. Zato se bomo oprli na izkušnje proizvajalca močnostnih transformatorjev ETRA33, njegove licenčne izračune in obstoječe podobne programe za izračun dinamičnih obremenitev.

### 6.1 Analiza rezultatov izračuna kratkostične napetosti in izgub

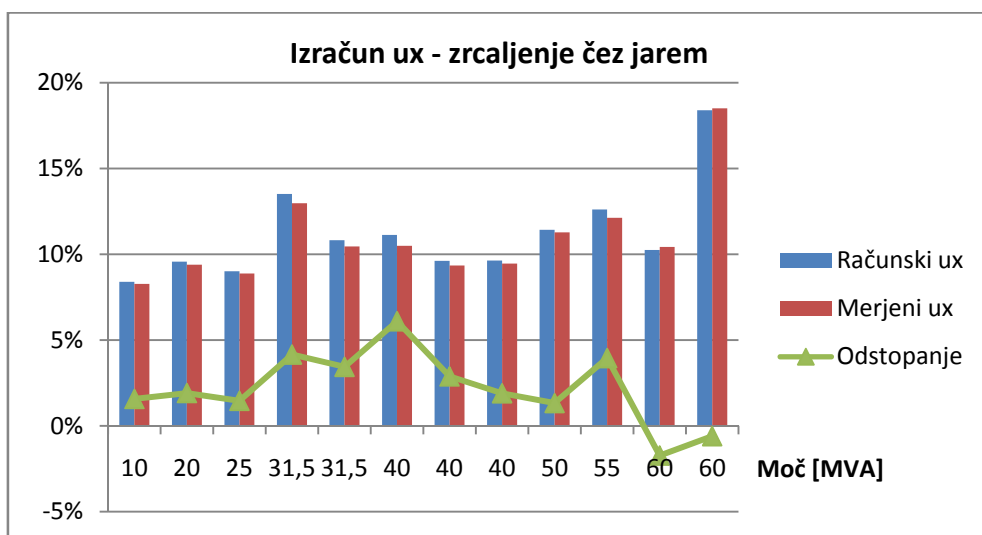
Obravnavamo primer dvanajstih izdelanih in izmerjenih rezultatov. Meritve na transformatorjih so t.i. medfazne meritve, torej meritve med procesom izdelave, brez prisotnosti transformatorskega kotla. Na ta način je merjeno stanje najbolj podobno tistemu, ki smo ga modelirali v samem izračunu. Pri analizi izračuna razsipane napetosti smo obdelali dva primera in sicer pri izračunanem magnetnem polju z in brez zrcaljenja navitij preko jarmov magnetnega kroga. Rezultati so podani v tabeli na naslednji strani.

Odstopanje računskih od merjenih vrednosti kratkostičnih napetosti je v večini primerov nekaj procentov, kar je manj od toleranc, ki jih za odstopanje od garantiranih vrednosti določa IEC standard. Opazimo, da so v primeru izračuna razsipane napetosti iz polja, izračunanega s pomočjo zrcaljenja preko jarmov, izračunane vrednosti v povprečju nekaj procentov višje od merjenih, v primeru brez zrcaljenja pa so od njih za nekaj procentov nižje.

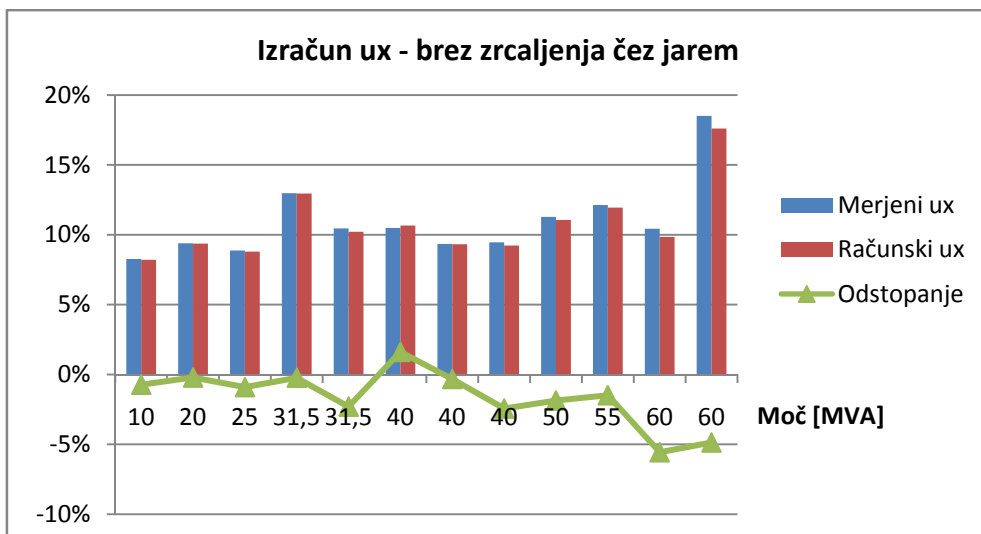
Moč [MVA]	Merjeni $u_x$ [%]	Računski $u_x$ zrcaljenje [%]	Razlika [%]	Računski $u_x$ - brez zrcaljenja [%]	Razlika [%]	Merjene $P_{dod}$ [kW]	Računske $P_{dod}$ [kW]	Razlika do merjenih [kW]
10	8,27	8,4	1,57	8,21	-0,73	4,3	4,4	-0,1
20	9,39	9,57	1,92	9,37	-0,21	9,9	5,4	4,5
25	8,88	9,01	1,46	8,80	-0,90	16,9	8,9	8
31,5*	12,98	13,52	4,16	12,95	-0,23	22,3	14,2	8,1
31,5	10,46	10,82	3,44	10,22	-2,29	17,8	13	4,8
40	10,49	11,13	6,10	10,66	1,62	24,6	15,3	9,3
40	9,35	9,62	2,89	9,32	-0,32	18,3	13	5,3
40	9,46	9,64	1,90	9,23	-2,43	22,3	12,5	9,8
50	11,28	11,43	1,33	11,07	-1,86	21,7	15	6,7
55	12,13	12,61	3,96	11,95	-1,48	32,7	15,5	17,2
60	10,43	10,25	-1,73	9,85	-5,56	30,2	15,3	14,9
60	18,51	18,4	-0,59	17,61	-4,86	55,1	23,2	31,9

\* Transformator z vključeno grobo stopnjo.

Tabela 2: Primerjava računskih in merjenih vrednosti kratkostične napetosti in dodatnih izgub.

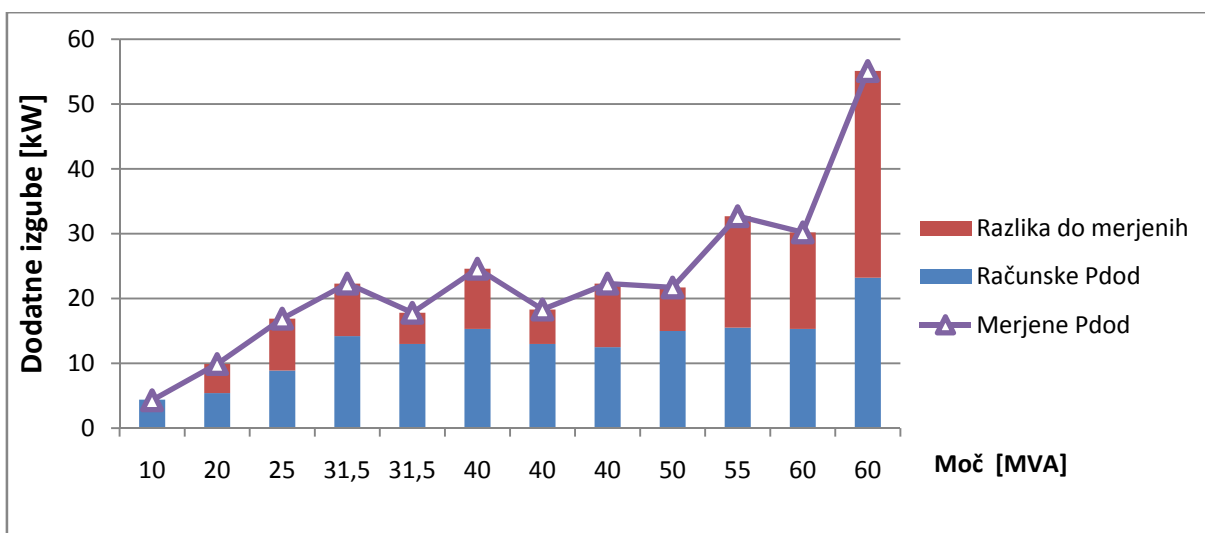


Slika 20: Primerjava računskih in merjenih vrednosti razspane napetosti brez prisotnosti kotla.



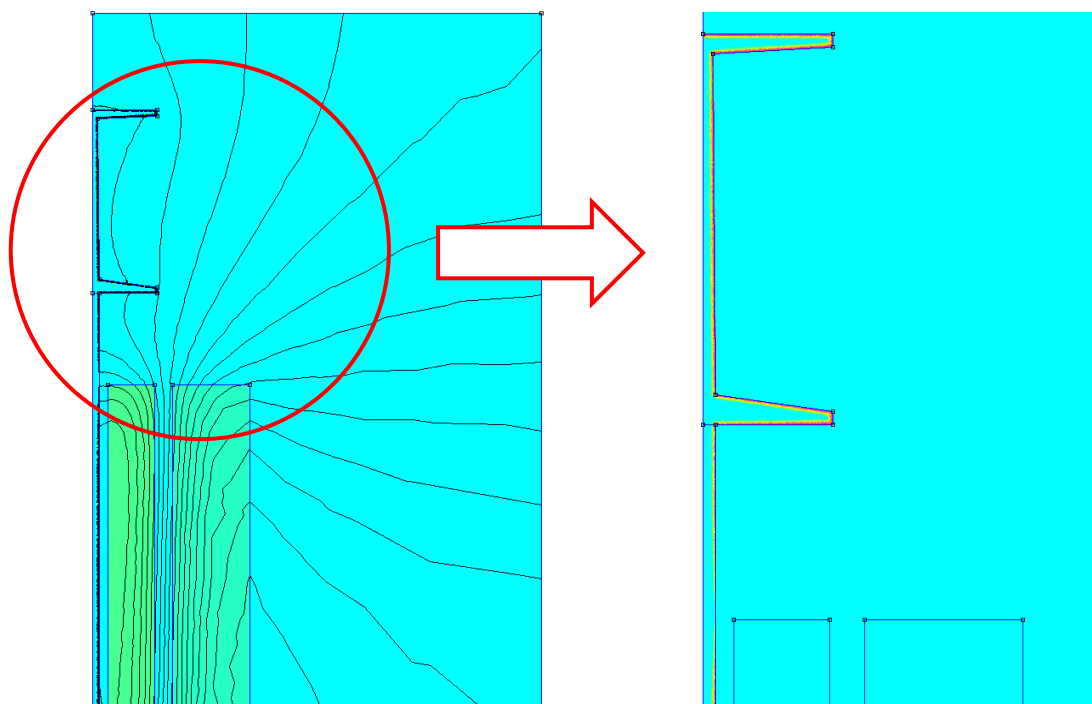
Slika 21: Primerjava računskih in merjenih vrednosti razsipane napetosti brez prisotnosti kotla.

Merjene in izračunane vrednosti dodatnih izgub se procentualno gledano močno razlikujejo. Razlogi za to so različni. Meritve imajo določene pogreške oz. interval zaupanja, vendar razloga za očitno odstopanje zgoj v smeri preseganja merjenih vrednosti ne gre iskati v tej smeri. Bolj fizikalno razumljivo in tudi iz literature (10) znano dejstvo je, da nezanemarljiv delež k dodatnim izgubam doprinaša magnetni krog s pripadajočim vpetjem. Magnetne stebne in masivne jaremske letve se namreč nahajajo v razmeroma močnem magnetnem polju – tudi do 0,1 T. Zaradi njihovih dimenzij, ki so v primerjavi z vodniki v navitju velike, so tudi vrednosti vrtničnih tokov in posledično izgub lahko visoke. Mesta kjer magnetno polje vstopa v magnetni krog vzporedno na lamele, ne morejo veliko doprinesati k skupni bilanci izgub, saj so lamele izredno tanke (0,27 mm).



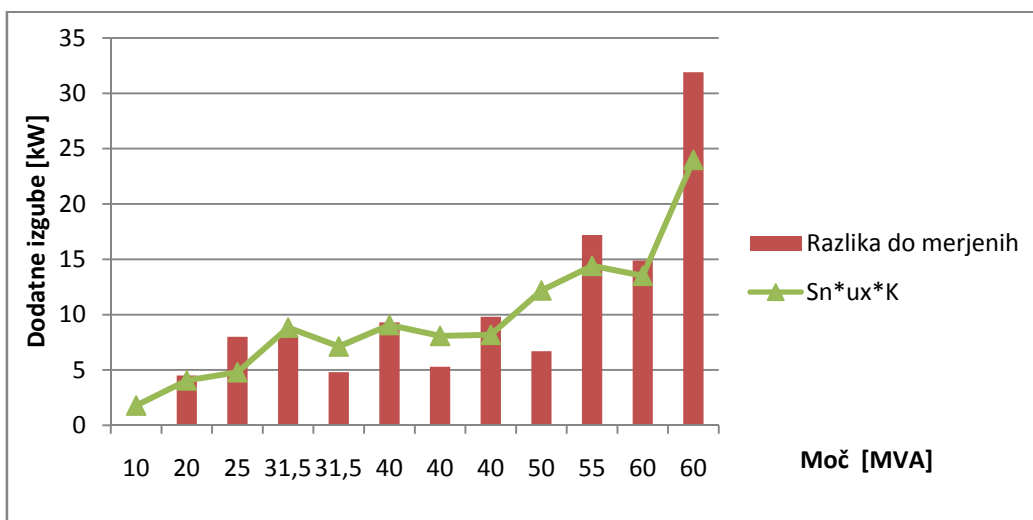
Slika 22: Primerjava računskih dodatnih izgub v navitjih in merjenih dodatnih izgub.

Kljub razmeroma velikem odstopanju merjenih in računskih vrednostih dodatnih izgub, verjamemo, da so izračunane vrednosti teoretično pravilne. To potrjuje dejstvo, da se vrednost dodatnih aksialnih izgub pri klasični razporeditvi navitij jedrnega tipa transformatorja praktično popolnoma ujema z vrednostjo teoretično izpeljanega faktorja dodatnih izgub zaradi aksialnega polja. Slednji izhaja iz iste enačbe za dodatne izgube na enoto volumna navitja (Enačba 4.13) in predpostavlja zgolj aksialno magnetno polje, ki v radialni smeri preko navitja linearno narašča od nič do maksimalne vrednosti  $B_{max} = \mu_0 \cdot NI/b_e$ . Zaradi enakih zakonitosti in uporabljenih izrazov lahko sklepamo, da so teoretično pravilne tudi izračunane vrednosti dodatnih izgub zaradi radialnega magnetnega polja. Z analiziranjem večjega števila transformatorjev in predpostavko o pravilno določenih dodatnih izgubah v samih navitjih, je možno empirično določiti dodatne izgube v ostalih prevodnih delih, ki se nahajajo v razsipanem magnetnem polju. Slednje očitno predstavljajo nezanemarljiv del, ki je, kot kaže, po velikosti kar primerljiv s tistim v navitjih. To je možno preveriti tudi z natančnejšim modeliranjem aktivnega dela transformatorja in izračuna dodatnih izgub s programom, ki temelji na končnih elementih, ali uporabo katerih drugih metod za izračun izgub zaradi časovno spreminjajočega se magnetnega polja v feromagnetikih (8). Modelirali smo stanje transformatorja v 2D FEM programu in z grobo oceno potrdili, da izgube v stebrih in jarnskih letvah dosegajo vrednosti podobne tistim v navitjih.



Slika 23: Magnetno polje in vrtnični tokovi v konstrukcijskih delih magnetnega kroga.

Pri statistično empiričnem določevanju, se je smiselno opreti predvsem na parametre kot sta nazivna moč in induktivni del kratkostične napetosti, saj njun produkt predstavlja celotno energijo razsipanega magnetnega polja, katere vrednost nedvomno vpliva na vrednost dodatnih izgub. Ujemanje odstopanja med računskimi in merjenimi vrednostmi, ki predstavlja ob predpostavki o pravilno izračunanih dodatnih izgubah v navitjih, dodatne izgube v ostalih prevodnih delih, je razvidno iz naslednjega histograma. Lepo je razvidno, kako produkt  $S_n \cdot u_x \cdot K$  v grobem sledi vrednosti dodatnih izgub.



Slika 24 Dodatne izgube v prevodnih konstrukcijskih elementih in magnetna energija.

Še pomembneje kot določiti dodatne izgube v magnetnem jedru in konstrukcijskih delih je določiti celotne izgube transformatorja s kotlom in morebitnimi magnetnimi šenti. Tega problema se ravnatoko lahko lotimo s statistično obravnavo večjega števila transformatorjev in osredotočenjem na pomembnejše vplivne parametre. V tem primeru lahko program za izračun izgub v navitjih služi kot osnova. Dodatne izgube v kotlu je nenazadnje možno določiti s FEM programom, kar pa predstavlja samostojen in po naših izkušnjah dokaj zahteven problem.



## 6.2 Analiza rezultatov izračuna dinamičnih obremenitev

Pri analizi rezultatov izračuna kratkostične napetosti in dodatnih izgub, smo imeli na razpolago merjene vrednosti. Pri izračunu dinamičnih obremenitev te možnosti nimamo. Na voljo so nam le izkušnje ob okvarah, ki so bile posledica delovanja sil, licenčni izračuni proizvajalca ETRA33 ter obstoječi program prof. dr. Lenasija. V nadaljevanju želimo predstaviti primerjavo rezultatov izračuna najpomembnejših veličin na konkretnem primeru transformatorja.

VELIČINA	RAČUNSKA VREDNOST					
	Naš program		Program dr. Lenasija		Licenčni izračun	
Navitje	NN	VN	NN	VN	NN	VN
$\sigma_{\text{hoop}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	22,1	28,7	23,4	30,2	25,7	33,9
$\sigma_{\text{rad}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	91,1	/	/	/	/	/
$\sigma_{\text{aks}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	12,2	15,1	16,5	14,5	/	/
$\sigma_{\text{celotna}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	91,1	33,5	39,9	44,7	/	/
$P_{\text{na distančnike}}$ [MPa]	8,5	1,9	11,7	1,9	10,1	2,9
$F_{\text{na plošče}}$ [kN]	151,8		158,4		132,0	

Tabela 3 Primerjava izračuna dinamičnih obremenitev.

S primerjavo izračunanih obremenitev lahko ugotovimo, da se rezultati med seboj ujemajo. Primerjalna izračuna ne dajeta rezultatov za upogibno radialno natezno napetost notranjega navitja, ampak zgolj njegovo »hoop« kompresijsko napetost. Slednjo izračunamo tudi mi, a jo uporabimo zgolj za preverjanje stabilnosti. Aksialne obremenite izračunane s programom dr. Lenasija so v poševnem tisku, ker niso direktno izpisane kot rezultat programa. Izračunali smo jih naknadno kot razliko med celotnimi in radialnimi, in vidimo, da so številske vrednosti zelo podobne našim. Ravnotako se ujema izračunana sila na montažne plošče.

Dodatna potrditev o pravilnosti izračuna je tudi dejstvo, da ob obravnavi popolnoma simetričnega primera, ko sta magnetni osi navitij popolnoma izenačeni in postavljeni v sredino transformatorskega okna, kot rezultat dobimo ničelno rezultančno silo na obe navitij, kar se ujema s teoretičnim sklepanjem.

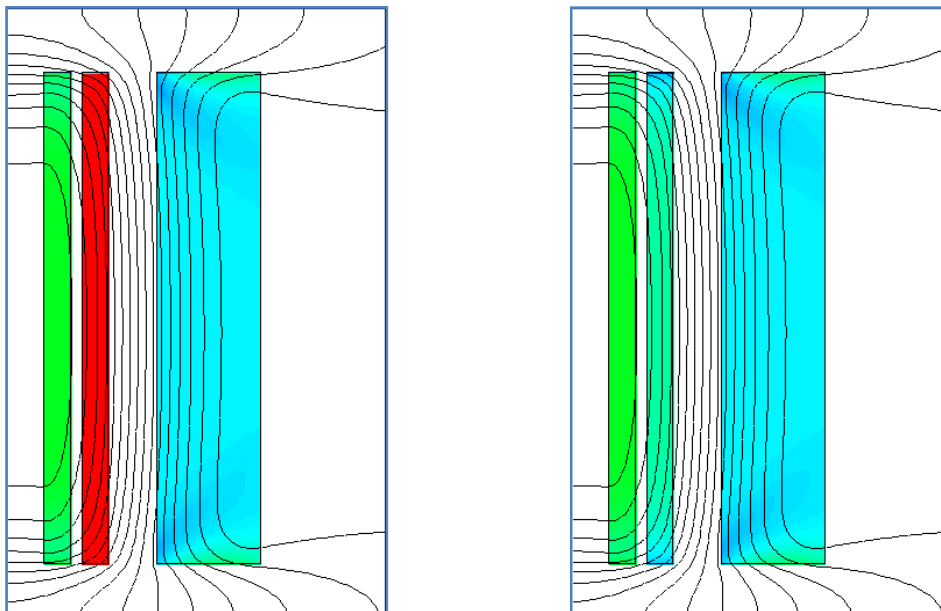
Glede na dobljene rezultate izračunanih obremenitev za tipičen distribucijski transformator moči nekaj deset MVA se izkažejo za najbolj kritične ravno radialne upogibne natezne napetosti notranjega navitja in preseganje vrednosti stabilnostnega kriterija vbočitve. Izkušnje kažejo, da je ravno vbočitev notranjega navitja tudi najpogostejša poškodba transformatorja ob kratkih stikih. Tipično stanje prikazuje naslednja slika.



Slika 25: Primer vbočitve notranjega navitja zaradi prevelikih radialnih obremenitev.

Za preprečitev tovrstnih defektov sta najučinkovitejša dva ukrepa. Prvi je izbira vodnika z večjo trdnostjo, ki v primeru previsokih vrednosti povečuje tudi težave pri navijanju in tretiranju navitij in njihovih izvodov. Drugi ukrep je povečanje števila podprtih letvic po notranjem obodu navitja. V primerih, ko aksialne obremenitve skrajnih svitkov niso tako visoke, lahko povečamo zgolj število podprtih letvic brez distančnikov. S tem z večjo trdnostjo in stabilnostjo navitja ne poslabšujemo bistveno njegove zmožnosti hlajenja. Ob zaključku tega poglavja naj kot enega od primerov obravnave izračuna sil s tem programom, omenimo še znano, a zanimivo dejstvo. Gre za opazovanje radialnih sil v dvoplastnih vijajnih navitjih, ko se med prvo in drugo plastjo nahajajo letvice in cilinder iz tlačne lepenke. Iz slike obremenitev je razvidno, da je bistveno bolj obremenjena zunanja

plast, zato je nujno dovolj veliko število letvic med obema plastema, ki del obremenitve prenese na notranjo plast. Slednja je zaradi bistveno manjše aksialne komponente magnetnega polja, sama po sebi praktično neobremenjena v radialni smeri.



Slika 26: Radialna obremenitev zunanje plasti notranjega navitja brez in z zadostnim radialno podporo.

## 7 Sklepne ugotovitve

Na koncu ugotavljamo, da smo na osnovi celovite obravnave razsipanega magnetnega polja v kotlu transformatorja uspešno izdelali program za izračun najpomembnejših parametrov in lastnosti transformatorja, ki so od tega polja odvisni. Opisali smo način uporabe programa in dokazali pravilnost njegovih rezultatov.

Program je specifično prilagojen uporabi pri projektantskem delu. Omogoča razmeroma hiter izračun opisanih parametrov transformatorja ter oceno ustreznosti konstrukcije z vidika kratkostičnih dinamičnih obremenitev. Omogoča pristop k celovitejši obravnavi dodatnih izgub v transformatorju, predvsem v kombinaciji s statistično obravnavo meritev izmerjenih transformatorjev ter 3D programi za elektromagnetne izračune. Izhajajoč iz predpostavke o pravilnosti s tem programom izračunanih dodatnih izgub v navitjih, je namreč lažje oceniti preostali del dodatnih izgub v prevodnih konstrukcijskih delih.

Z uporabo programa v praksi, preučevanjem njegovih rezultatov in izrisov pričakujemo, da bo možno natančneje ovrednotiti konstrukcijske rešitve, ki bodo vodile k zmanjšanju deleža dodatnih izgub v navitju in s tem neredko zahtevanih nizkih celotnih izgub transformatorja, ob doseganju zadostne mehanske stabilnosti aktivnega dela, tako da delovanje transformatorja ob kratkih stikih v omrežju ne bo ogroženo.

## 8 Viri

1. P. Kokelj, Elektromagnetne strukture, Ljubljana, Fakulteta za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, 2000.
2. A. Sinigoj, Osnove elektrotehnike I, Ljubljana, Zalžba FE, 1995.
3. A. Jurman, K.Lenasi, M. Berlec, Izračun kratkostične napetosti v transformatorju, Diplomsko delo. 2003.
4. M. Željeznov, Osnove teorije elektromagnetnega polja, Ljubljana, Zalžba FER, 1991.
5. Standard IEC 60076-1. s.l. , CIGRE.
6. G. Bertagnolli, Short-Circuit Duty of Power Transformers, Milano, ABB Trasformatori, 1996.
7. Stadnard IEC 60076-5. s.l. , CIGRE.
8. B. Kraut, Strojniški priročnik.
9. Brochure CIGRE WG 12 19, The Short Circuit Performance of Power Transformers, Paris , CIGRE, 2002.
10. K. Karsai, D. Kerenyi, L. Kiss, Large Power Transformers, Budapest , s.n., 1987.
11. M. Berlec, K. Lenasi, Izračun elektromagnetnih polj s ploskovnimi toki, magistrsko delo, Ljubljana , s.n., 1989.
12. A. Dolenc, Transformatorji, Ljubljana , Fakulteta za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, 1969.
13. E. Prelog, Elasto in plastomehanika, Ljubljana , Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani, 1978.
14. P. Hribar, Delphi - Zvijaje in triki, Nova Gorica , Flamingo Založba, 2000.
15. M. Škerlj, Mehanika - Trdnost, druga izdaja, Ljubljana , Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani, 1977.
16. P. Hribar, Spoznajmo Delphi, Nova Gorica , Flamingo Založba, 1999.
17. [www.google.com](http://www.google.com) - groups. [Elektronski]
18. [www.google.com](http://www.google.com) - groups. [Elektronski]

## **Izjava**

Izjavljam, da sem magistrsko delo izdelal samostojno pod vodstvom mentorja prof.dr. Konrada Lenasija. Izkazano pomoč drugih sodelavcev sem v celoti navedel v zahvali.