

Razporeditev udarne napetosti vzdolž zvrnjenega navitja močnostnega transformatorja

Mislav Trbušič¹, Marko Čepin²

¹Kolektor Etra, Šlandrova ul. 10, 1000 Ljubljana, Slovenija

²Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: mislav.trbusic@etra33.si

Povzetek. Članek obsega izračun prečnih in vzdolžnih kapacitivnosti, induktivnosti in napetosti med svitki zvrnjenega navitja močnostnega transformatorja. Pri določanju nadomestne sheme transformatorja je predpostavljeno, da se ob jedru nahaja kratko sklenjeno in ozemljeno navitje. Tako so vse prečne kapacitivnosti hkrati tudi dozemne kapacitivnosti. Pri izračunu vzdolžnih kapacitivnosti je predpostavljena linearna razporeditev napetosti vzdolž svitka. Induktivnosti se dobijo iz stresanega magnetnega polja v oknu transformatorja, ki ga izračunamo v programu FEMM 4.2. Z upoštevanje I. in II. Kirchhoffovega zakona v nadomestnem vezju navitja lahko zapišemo sistema navadnih linearnih diferencialnih enačb za tok in napetost, ki ju numerično rešimo v programskem paketu MATLAB. Dobljeni rezultati gradientov med svitki so primerjani z meritvami, opravljenimi na suhem transformatorju TBS (22/6.3 kV, 800 kVA, $u_k = 5.5\%$). Primerjava kaže, da so razlike med izračunanimi in izmerjenimi gradienti manjše od 20 %, kar je za prakso sprejemljivo.

Ključne besede: transformator, zvrnjeno navitje, udarna napetost, kapacitivnost, induktivnost

Distribution of surge wave through the power transformer continuous disc winding

Paper contains calculations of radial and serial capacitance, inductance and voltage between adjacent coils of power transformer continuous disc winding. Definition of the equivalent electric circuit is based on assumptions that there is a short circuit and grounded winding next to the iron core. This way all radial capacitances are at the same time also ground capacitances. Calculation of the serial capacitance is based on the assumption of linear voltage distribution along the coil. Inductance is obtained from the stray magnetic field in the transformer window, which is calculated in computer code FEMM 4.2. Equivalent circuit with respect to 1st and 2nd Kirchhoff's law gives us two systems of ordinary differential equations for voltage and current that are solved using MATLAB. Results are compared with measurements obtained on dry type transformer TBS (22/6.3 kV, 800 kVA, $u_k = 5.5\%$). Comparison shows the differences between calculated and measured values stays within 20%, which is acceptable.

1 UVOD

Prenapetosti, ki nastajajo v navitjih transformatorjev, so posledica atmosferskih razelektritev ali stikalnih manevrov. To so napetostni sunki visokih temenskih vrednosti, ki s strmino čela in položnostjo hrbta močno vplivajo na potek napetosti vzdolž navitja. Tovrstni pojavi so med obratovanjem transformatorja neizogibni, zato mora biti izolacija navitij skrbno načrtovana, da vzdrži takšne napetostne obremenitve.

S standardom IEC 60076 so predpisane oblike in izolacijski nivoji, s katerimi preskušamo transformator na tovrstne pojave. Udarni val, ki simulira atmosfersko razelektritev, ima obliko $1,2/50 \mu s$ in je standardni preskus, ki ga mora prestat vsak energetski transformator.

Za visokonapetostna navitja močnostnih transformatorjev se v glavnem uporabljata prepleteni in zvrnjeni tip navitja. Zaradi tehnoloških in časovnih razlogov se skušamo prepletenu navitju izogniti. Po drugi strani pa ima zvrnjeno navitje 3–6-krat slabšo začetno porazdelitev napetosti, ki je odločilnega pomena za lastna napetostna nihanja v navitju.

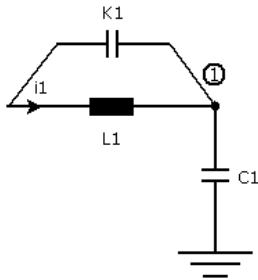
Zaradi velikega obsega dela in prezasedenosti navijalnih strojev v proizvodnem ciklu potreba po zvrnjenem tipu navitja narašča. Da bi se prilagodili novim zahtevam, je nujno poznavanje napetostnih razmer znotraj navitja med trajanjem udarnega vala, saj na podlagi le-teh podamo presojo o primernosti navitja.

Članek obravnava izračun kapacitivnosti, induktivnosti in napetosti vzdolž zvrnjenega navitja transformatorja. Rezultati so primerjani z meritvami in dajejo odgovor o uporabnosti izračuna v vsakdanji projektantski praksi.

2 IZRAČUN UDARNE NAPETOSTI

Razporeditev udarne napetosti vzdolž zvrnjenega navitja transformatorja se računa na podlagi

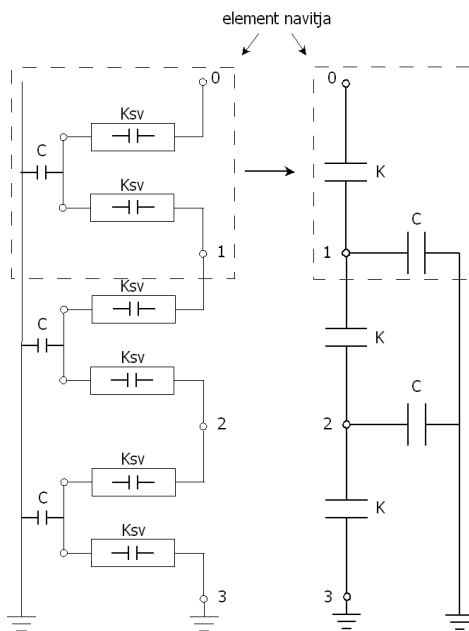
nadomestnega vezja navitja, ki ga predstavimo s koncentriranimi parametri L, C, K (slika 1). Medsebojne induktivnosti M so prav tako upoštevane, vendar zaradi preglednosti niso narisane. Elementi nadomestnega vezja so sestavljeni iz dveh svitkov, tako da napetost vzdolž posameznega elementa pomeni napetost v kanalu med svitkoma. Konec navitja je ozemljen.



Slika 1: Nadomestno vezje elementa navitja, predstavljeno s koncentriranimi parametri

2.1 Izračun kapacitivnosti

Za določanje kapacitivnosti lahko predstavimo navitje kot kapacitivno vezje, ki vsebuje prečne in vzdolžne kapacitivnosti. Slika 2 prikazuje navitje iz šestih svitkov in pripadajoče kapacitivno vezje.



Slika 2: Nadomestno kapacitivno vezje navitja

S črko C je označena prečna, s K pa vzdolžna kapacitivnost elementa navitja. Zveza med vzdolžno kapacitivnostjo svitka K_{sv} in vzdolžno kapacitivnostjo nadomestnega elementa K je določena z enačbo (1) [1].

$$K = \frac{K_{sv}}{2} \tag{1}$$

2.1.1 Izračun vzdolžnih kapacitivnosti

Vzdolžne kapacitivnosti se nanašajo na kapacitivnosti med ovoji in svitki preskušane navitja. Z dovolj dobrim približkom lahko izračunamo kapacitivnost svitka po izrazu (2) [1],[2].

$$K_{sv} = \frac{4}{3} \cdot C_d + \frac{C_{ov}}{m-1} \tag{2}$$

Za skrajna svitka brez potencialnega obroča velja izraz (3) [1].

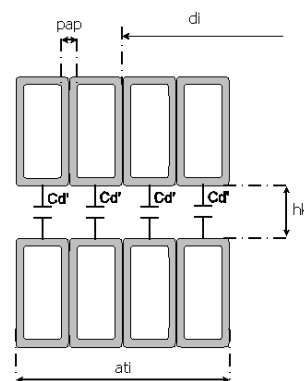
$$K_{sv} = \frac{2}{3} \cdot C_d + \frac{C_{ov}}{m-1} \tag{3}$$

m ...število ovojev v svitku

C_d je kapacitivnost v radialnem kanalu med svitkoma (slika 3), ki jo določa enačba (4) [3].

$$C_d = 27,8 \cdot d_i \cdot \left[\frac{a_{ti} + 2 \cdot (h_k + pap)}{\frac{pap}{\epsilon_{pap}} + \frac{h_k}{\epsilon_{TB-Oil}}} \right] \cdot 10^{-15} \text{ [F]} \tag{4}$$

- h_k ... višina radialnega kanala [mm]
- a_{ti} ...debelina navitja [mm]
- pap ...dvostranski prirast papirne izolacije [mm]
- d_i ...srednji premer navitja [mm]
- β' ...prekritje navitja z distančniki
- ϵ_{pap} ...relativna dielektričnost papirja
- ϵ_{TB-Oil} ...relativna dielektričnost kanala med svitkoma



Slika 3: Kapacitivnost v radialnem kanalu med svitkoma

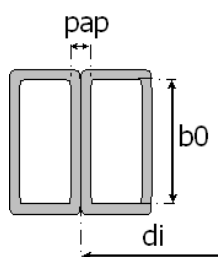
C_d' je kapacitivnost v radialnem kanalu med isto ležečima ovojem (5).

$$C'_d = \frac{C_d}{m} \quad (5)$$

Kapacitivnost med ovojem (slika 4) je določljiva z enačbo (6) [3].

$$C_{ov} = 27,8 \cdot \varepsilon_{pap} \cdot d_i \cdot \left[\frac{b_0 + 2 \cdot pap}{pap} \right] \cdot 10^{-15} \text{ [F]} \quad (6)$$

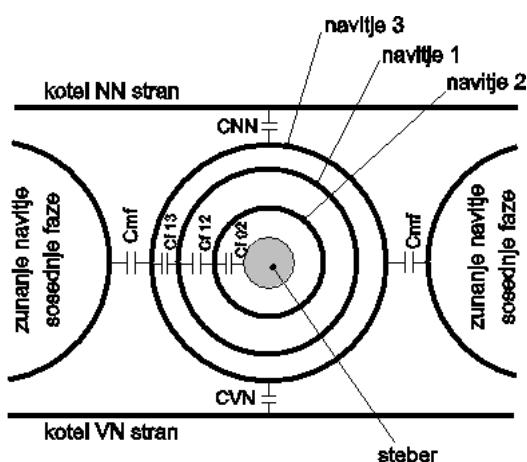
b_0 ...višina gole žice ali transponiranega kabla [mm]
 d_i ...srednji premer navitja [mm]
 pap ...dvostranski prirast papirne izolacije ovoja [mm]
 ε_{pap} ...relativna dielektričnost papirja



Slika 4: Kapacitivnost med ovojem

2.1.2 Izračun prečnih kapacitivnosti

Prečne kapacitivnosti so kapacitivnosti preskušane navitja do sosednjih navitij in ozemljenih delov (steber, kotel). Ker so med preskusom vsa sosednja navitja kratko sklenjena in ozemljena, so vse prečne kapacitivnosti hkrati dozemne kapacitivnosti. Določanje teh kapacitivnosti je odvisno od položaja preskušane navitja. Slika 5 prikazuje dozemne kapacitivnosti za sredinsko fazo transformatorja.

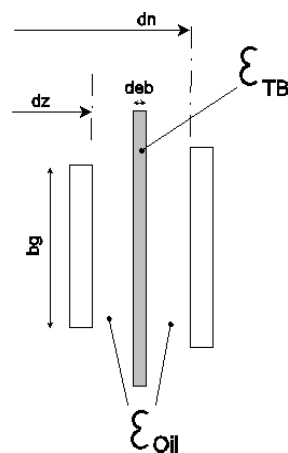


Slika 5: Dozemne kapacitivnosti za sredinsko fazo transformatorja

Med navitji iste faze (slika 6) so kapacitivnosti C_f in jih računamo z enačbo (7) [3].

$$C_f = \frac{27,8 \cdot d_{sr} \cdot (b_g + 2 \cdot d)}{d - fak \cdot deb} \cdot 10^{-15} \text{ [F]} \quad (7)$$

d_{sr} ...srednji premer kanala med navitjema [mm]
 b_g ...višina nižjega navitja [mm]
 d ...dvojna širina kanala med navitjema [mm]
 deb ...debelina trde izolacije med navitjema [mm]
 ε_{TB} ...relativna dielektričnost trde izolacije med navitjema
 ε_{Oil} ...relativna dielektričnost olja
 fak ... $(\varepsilon_{TB} \cdot \varepsilon_{Oil}) / \varepsilon_{TB}$



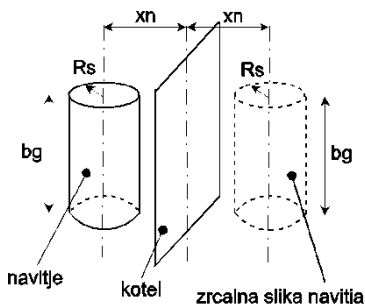
Slika 6: Kapacitivnost med navitjema iste faze

Enačba (8) [3] velja za kapacitivnost med zunanjima navitjema sosednjih faz (slika 7).

$$C_{mf} = \frac{27,8 \cdot b_g}{\ln \left(\frac{x_n}{R_s} + \sqrt{\left(\frac{x_n}{R_s} \right)^2 - 1} \right)} \cdot \kappa \cdot 10^{-15} \text{ [F]} \quad (8)$$

$$\kappa = \frac{x_n - R_s}{\frac{x_n - R_s - deb}{\varepsilon_{Oil}} + \frac{deb}{\varepsilon_{TB}}}$$

x_n ...polovična medosna razdalja stebrov [mm]
 R_s ...zunanji premer zunanjega navitja [mm]
 Druge oznake pomenijo isto kot prej.



Slika 7: Geometrija pri določanju kapacitivnosti med zunanjsima navitjema sosednjih faz in med zunanjsim navitjem in kotlom

Enačbo (8) lahko uporabimo za določanje kapacitivnosti med zunanjsim navitjem in kotlom (C_{NN} , C_{VN}), le da namesto polovične medosne razdalje x_n vstavimo najmanjšo razdaljo med navitjem in kotlom ter celoten izraz pomnožimo še z 2 (9)[3].

$$C_k = 2 \cdot C_{mf} \tag{9}$$

Skupna dozemna kapacitivnost navitja C_g je seštevek vseh delnih dozemnih kapacitivnosti, ki nastopajo v konkretnem primeru.

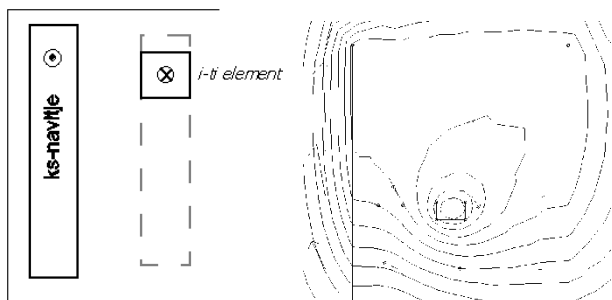
Kapacitivnost C v nadomestnem vezju navitja se določi tako, da se skupna dozemna kapacitivnost deli s številom elementov v nadomestnem vezju navitja (10).

$$C = \frac{C_g}{N_{el}} \tag{10}$$

N_{el} ...število elementov nadomestnega vezja navitja

Izračun induktivnosti

Določitev induktivnosti v nadomestnem vezju navitja se temelji na predpostavki, da se ob stebri nahaja kratkosklenjeno navitje. Ta predpostavka nam omogoča, da lahko vpliv železnega jedra v sistemu induktivnosti zanemarimo [1].



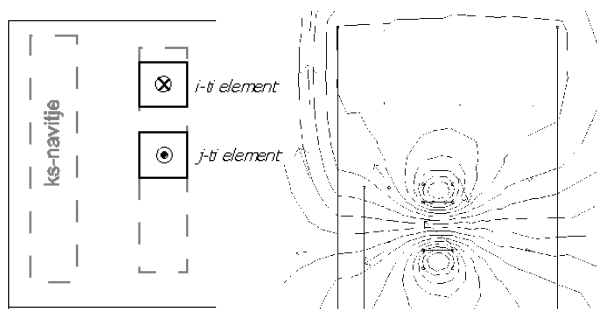
Slika 8: Postavitev elementov in izračun $L_{\sigma-KS}$ v programu FEMM 4.2.

Zaradi dobre magnetne povezave med navitji in svitki, lastne in medsebojne induktivnosti elementov določimo iz stresanih induktivnosti prek magnetnega polja v oknu transformatorja (11) [1].

Sliki 8 in 9 prikazujeta postavitev elementov in smer tokov pri izračunu stresanih induktivnosti v programu FEMM 4.2 [4].

$$L_{\sigma} = \frac{2 \cdot W_{mag}}{I^2} \quad (I = I A, \text{ enosmerni tok}) \tag{11}$$

W_{mag} ...magnetna energija v oknu transformatorja



Slika 9: Postavitev elementov in izračun $L_{\sigma-i-j}$ v programu FEMM 4.2

Lastno induktivnost elementa navitja L_i izračunamo tako, da pomnožimo stresano induktivnost med elementom in kratko sklenjenim navitjem reducirano na en ovoj s kvadratom števila ovojev v elementu (12) [1].

$$L_i = w_i^2 \cdot L_{\sigma-i-KS} \tag{12}$$

Medsebojna induktivnost med elementoma M_{i-j} se določi po enačbi (13) [1].

$$M_{i-j} = \frac{L_{\sigma-i-KS} + L_{\sigma-j-KS} - L_{\sigma-i-j}}{2} \cdot w_i \cdot w_j \tag{13}$$

w_i ...število ovojev v i-tem elementu

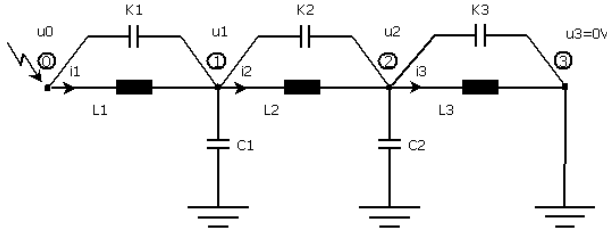
w_j ...število ovojev v j-tem elementu

$L_{\sigma-i-KS}$...stresana induktivnost med i-tim elementom in kratko sklenjenim navitjem, reducirana na en ovoj

$L_{\sigma-j-KS}$...stresana induktivnost med j-tim elementom in kratko-sklenjenim navitjem reducirana na en ovoj

$L_{\sigma-i-j}$...stresana induktivnost med i-tim in j-tim elementom reducirana na en ovoj

2.2 Postavitev enačb



Slika 10: Nadomestno vezje navitja s tremi elementi

Slika 10 prikazuje nadomestno vezje navitja, na podlagi katerega zapišemo Kirchhoffova zakona. Za tokove v vozliščih velja I. Kirchhoffov zakon.

$$i_1 - i_2 + K_1 \cdot \frac{d}{dt}(u_0 - u_1) - K_2 \cdot \frac{d}{dt}(u_1 - u_2) - C_1 \cdot \frac{du_1}{dt} = 0$$

$$i_2 - i_3 + K_2 \cdot \frac{d}{dt}(u_1 - u_2) - K_3 \cdot \frac{d}{dt}(u_2 - u_3) - C_2 \cdot \frac{du_2}{dt} = 0$$

Po ureditvi in prehodu na matrični zapis dobimo.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_1 + K_2 + C_1 & -K_2 \\ -K_2 & K_2 + K_3 + C_2 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_1 + K_2 + C_1 & -K_2 \\ -K_2 & K_2 + K_3 + C_2 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} K_1 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \frac{du_0}{dt}$$

Ali krajše:

$$\frac{d}{dt} [u] = [CK]^{-1} \cdot [D] \cdot [i] + [CK]^{-1} \cdot [EK] \cdot \frac{du_0}{dt} \quad (14)$$

Napetosti vzdolž zaključenih zank popisuje II. Kirchhoffov zakon.

$$u_0 - u_1 = L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} + M_{1-2} \cdot \frac{di_2}{dt} + M_{1-3} \cdot \frac{di_3}{dt}$$

$$u_1 - u_2 = M_{1-2} \cdot \frac{di_1}{dt} + L_2 \cdot \frac{di_2}{dt} + M_{2-3} \cdot \frac{di_3}{dt}$$

$$u_2 = M_{1-3} \cdot \frac{di_1}{dt} + M_{2-3} \cdot \frac{di_2}{dt} + L_3 \cdot \frac{di_3}{dt}$$

S prehodom na matrični zapis sledi:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 & M_{1-2} & M_{1-3} \\ M_{1-2} & L_2 & M_{2-3} \\ M_{1-3} & M_{2-3} & L_3 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 1 & -1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \frac{du_0}{dt}$$

$$\begin{bmatrix} L_1 & M_{1-2} & M_{1-3} \\ M_{1-2} & L_2 & M_{2-3} \\ M_{1-3} & M_{2-3} & L_3 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot u_0$$

Krajše zapišemo:

$$\frac{d}{dt} [i] = -[L]^{-1} \cdot [D]^T \cdot [u] + [L]^{-1} \cdot [F] \cdot u_0 \quad (15)$$

Združitve izrazov (14) in (15) nam da sistem navadnih linearnih diferencialnih enačb (16), ki ga rešimo v programskem okolju MATLAB.

$$\begin{bmatrix} \frac{di}{dt} \\ \frac{du}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \alpha \\ \beta & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i \\ u \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \gamma \cdot u_0 \\ \delta \cdot \frac{du_0}{dt} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\alpha = -[L]^{-1} \cdot [D]^T$$

$$\beta = [CK]^{-1} \cdot [D]$$

$$\gamma = [L]^{-1} \cdot [F]$$

$$\delta = [CK]^{-1} \cdot [EK]$$

$[u_0]$...udarna napetost

$[u]$...vektor iskanih vozliščnih napetosti

$[i]$...vektor neznanih vejnih tokov

$[CK]$...matrika kapacitivnosti

$[EK]$...vektor kapacitivnih povezav udarne napetosti u_0 z drugimi vozlišči

$[D]$...matrika prvih diferenc

$[L]$...matrika induktivnosti

$[F]$...vektor povezav udarne napetosti u_0 z drugimi vozlišči

3 REZULTATI

Rezultat izračuna udarne napetosti so gradienti med sosednjimi svitki v navitju in so določeni z enačbo (17). Izračun je bil zaradi primerjave rezultatov z meritvami izveden za suhi transformator TBS (22/6.3 kV, 800 kVA, $u_k = 5.5\%$), ki se nahaja v dokumentu [1].

$$\Delta u_{i+1} = \max(|u_i - u_{i+1}|) \quad i=0,1,2,\dots,N_{el} \quad (17)$$

u_i ...napetost v i-tem vozlišču nadomestnega vezja navitja

N_{el} ...število elementov v navitju

Udarni val, uporabljen pri izračunu in meritvah, je oblike $1,2/50 \mu\text{s}$, temenske vrednosti 95 kV . Popisuje ga enačba (18).

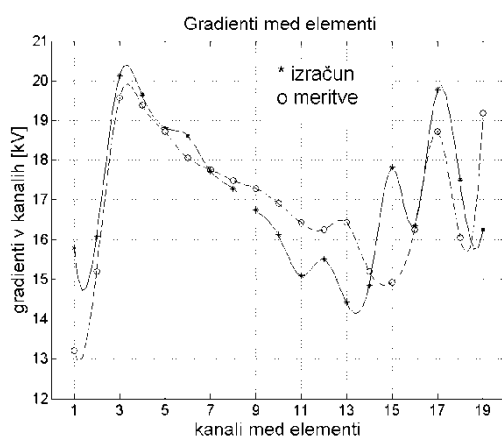
$$u_0 = 95 \cdot U_0 \cdot (e^{-p_1 t} - e^{-p_2 t}) \quad [kV] \quad (18)$$

$$U_0 = 1.043325$$

$$p_1 = 14732 \text{ s}^{-1}$$

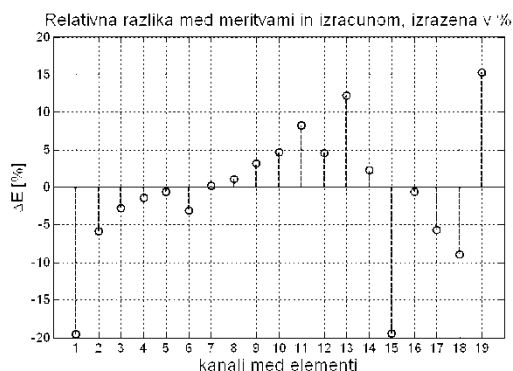
$$p_2 = 2080313 \text{ s}^{-1}$$

Slika 11 kaže izračunane in merjene vrednosti gradientov v radialnih kanalih med nadomestnimi elementi navitja, ki ustrezajo gradientom med svitki. Preskusna napetost je izbrana tako, da gradienti med svitki ustrezajo odstotnim vrednostim udarne napetosti.



Slika 11: Gradienti v radialnih kanalih med elementi, izračunane (*) in izmerjene vrednosti (o)

Slika 12 prikazuje relativna odstopanja izmerjenih vrednosti glede na izračunane.



Slika 12: Relativna razlika med izmerjenimi in izračunanimi gradienti v radialnih kanalih med elementi

4 SKLEP

Prikazana je metoda za izračun kapacitivnosti, induktivnosti in napetosti vzdolž zvrnjene navitja transformatorja. Razvit je bil lasten računalniški program, ki podpira izvajanje izračunov s prikazano metodo. Izračunani rezultati so bili primerjani z meritvami, ki so bile na voljo v literaturi.

Na podlagi rezultatov vidimo, da so odstopanja računskih vrednosti od merjenih znotraj 20 %, kar je za prakso sprejemljivo [1], [5]. Odstopanja nastanejo predvsem zaradi induktivnosti, ki jih ne moremo natančno določiti, ter dušenja, ki v izračunu ni upoštevano. Lahko rečemo, da se z izračunom razporeditve udarne napetosti vzdolž zvrnjene navitja dovolj dobro približamo dejanskim napetostnim razmeram v navitju, da ga lahko uporabimo pri načrtovanju izolacije navitja.

LITERATURA

- [1] B. Čučić: Raspodjela udarnog napona po preloženom namotu transformatora, Magistrsko delo, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2001.
- [2] B. Heller, A. Veverka, Surge Phenomena in Electrical Machines, Publishing House of the Czechoslovak Academy of Sciences, Prague, 1968.
- [3] K. Lenasi, Program ZVRU – koda, Tovarna transformatorjev, Ljubljana, 1991.
- [4] <http://www.femm.info/wiki/HomePage> (zadnjič obiskano 27.1.2011).
- [5] K. Lenasi, Udarne prenapetosti v navitjih močnostnih transformatorjev z vpeljavo dušenja induktivnih tokov, doktorska disertacija, Ljubljana 1975.
- [6] IEC 60076-1, Power Transformers, Part 1: General, IEC Standard, 2000.
- [7] H. M. Ryan, High Voltage Engineering and Testing, Institution of Electrical Engineers, 2001.

Mislav Trbušić je diplomiral leta 2011 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. V podjetju Kolektor Etra se ukvarja z izračunom energetskih transformatorjev.

Marko Čepin je diplomiral leta 1992, magistriral leta 1995 in doktoriral leta 1999 na Univerzi v Ljubljani. V letih 1992–2009 je bil zaposlen na Inštitutu Jožef Stefan. V letu 2001 je gostoval na Politehnični univerzi v Valenciji. Od leta 2009 je izredni profesor na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Je predsednik Društva jedrskih strokovnjakov Slovenije (2010–2014). Njegova raziskovalna dejavnost vključuje splošno energetiko, elektrarne in zanesljivost elektroenergetskih sistemov.