

Stipe Mikulić, dipl.ing.el.
Končar - Distributivni i specijalni transformatori d.d.
stipe.mikulic@koncar.dst-hr

dr.sc. Branimir Ćučić, dipl.ing.el.
Končar - Distributivni i specijalni transformatori d.d.
branimir.cucic@koncar.dst-hr

USPOREDBA NUMERIČKIH, ANALITIČKIH I MJERENIH VRIJEDNOSTI MAGNETSKOG POLJA DISTRIBUCIJSKOG TRANSFORMATORA

SAŽETAK

U članku je opisan analitički i numerički (metoda konačnih elemenata) proračun gustoće magnetskog toka B te mjerenje istog u blizini distribucijskog transformatora. Proračuni su provedeni za tipični distribucijski transformator snage 1000 kVA pri nazivnom opterećenju u pokusu kratkog spoja pri čemu je u obzir uzeta i izvedba kratkog spoja na NN priključcima transformatora (kratki spoj izveden je s NN kabelima i NN kratkospojnikom). Glavni rezultati prikazani su u dvije karakteristične ravnine i to kao funkcija udaljenosti od transformatora. Dobivene računске vrijednosti uspoređene su s mjerenim vrijednostima.

Ključne riječi: distribucijski transformator, gustoća magnetskog toka, analitički proračun, numerički proračun, mjerenje

COMPARISON OF THE ANALYTICAL, NUMERICAL AND MEASURED MAGNETIC FIELD VALUES OF DISTRIBUTION TRANSFORMER

SUMMARY

The article describes analytical and numerical (finite element method) calculation of magnetic flux density B and its measuring in the vicinity of the distribution transformer. Calculations are performed for typical distribution transformer of power 1000 kVA at nominal loading in the short-circuit test with two types of short-circuit connection of low voltage connectors (LV connectors are short circuited with cables or shunted). Calculated values of magnetic flux density B are compared to the measured values of the same transformer.

Key words: distribution transformer, magnetic flux density, analytical calculation, numerical calculation, measurement

1. UVOD

Distribucijski transformator predstavlja sabirno elektroenergetsko čvorište rasklopnog postrojenja pri čemu je isti ujedno i izvor magnetskog polja frekvencije 50 Hz. Pojedini kupci distribucijskih transformatora zahtijevaju da gustoća magnetskog polja B^1 , na određenoj udaljenosti od samog transformatora, ne prelazi unaprijed zadane vrijednosti. Osnovni razlog predmetnog zahtjeva proizlazi iz činjenice da se distribucijski transformatori u elektroenergetskom sustavu prirodno smještaju "bliže kupcima" zbog čega su isti jedan od izvora elektromagnetskog polja u radnom, javnom i privatnom prostoru u kojemu borave ljudi.

Slijedom navedenog, u tvornici Končar - Distributivni i specijalni transformatori d.d. (Končar D&ST) kontrola magnetskog polja distribucijskog transformatora provodi se u svim fazama proizvodnog procesa. Preliminarni izračun magnetskog polja transformatora izvodi se još u fazi ponude transformatora, zatim se isti kontrolira u fazi projektiranja, te se u konačnici magnetsko polje mjeri nakon što je transformator napravljen i spreman za isporuku. Zbog toga se u različitim fazama proizvodnog procesa transformatora u tvornici Končar D&ST-u koriste analitički i numerički proračuni magnetskog polja distribucijskih transformatora, ovisno o potrebnoj točnosti proračuna za pojedinu fazu proizvodnje.

Osim transformatora, izvori elektromagnetskog polja u rasklopnom postrojenju su i opterećene sabirnice i razvodi koji svojim poljem obično pokrivaju veći prostor nego sam transformator. Zbog toga se u predmetnom radu, osim samih distribucijskih transformatora, obuhvaća i jedan dio priključaka, odnosno djelomično se simulira utjecaj sabirničkog sustava kroz način izvedbe kratkog spoja. Prema hrvatskoj legislativi [1][2] granična vrijednost gustoće magnetskog toka iznosi 100 μT za javna područja i 40 μT za područja povećane osjetljivosti, što je stroži zahtjev od međunarodnih preporuka (preporuka ICNIRP-a iz 2010. godine za javna područja iznosi 200 μT) [3], ali isto tako blaži od propisane granične vrijednosti prema švicarskoj legislativi koja iznosi 1 μT [4]. U radu je prikazana izračunata (analitički i numerički) te mjerena gustoća magnetskog toka u blizini distribucijskog transformatora za vrijednost $B = 40 \mu\text{T}$ kao najstroži zahtjev hrvatske legislativne i usporedno za $B = 1 \mu\text{T}$ što je zahtjev švicarske legislativne.

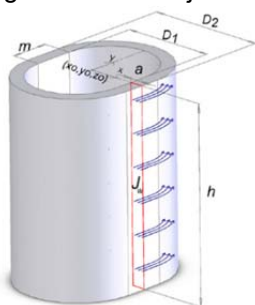
2. ANALITIČKI PRORAČUN

Analitički proračun magnetskog polja u blizini distribucijskog transformatora izveden je na način da se transformator modelira samo s onim dijelovima koji su direktno protjecani strujom (namoti, izvodi i priključci). Pri tome se za promatranu točku u prostoru (x, y, z) zasebno računa doprinos VN i NN namota, a zasebno doprinos NN izvoda i sabirničkog sustava na koji je transformator priključen. Svaki ravni dio izvoda i sabirničkog sustava modelira se kao ravni segment protjecan strujom (strujnica) koji je u prostoru definiran početnom koordinatom (x_1, y_1, z_1) , krajnjom koordinatom (x_2, y_2, z_2) i iznosom protjecane struje [5]. Matematički model i analitički proračuni izvedeni su u programskom alatu "Wolfram Mathematica".

Za potrebe analitičkog proračuna u predmetnom radu definirani su sljedeći izvori magnetskog polja: distribucijski transformator s ovalnim NN namotom, ovalnim VN namotom i NN izvodima te pripadajući NN priključak transformatora (NN sabirnice), dok su zbog relativno male vrijednosti struja VN izvodi transformatora i pripadajući VN priključci (VN sabirnice) zanemareni.

2.1. Magnetsko polje namota

Magnetska indukcija namota izračunata je na sljedeći način:



$$\dot{\mathbf{B}}_w(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{V_0} \dot{\mathbf{J}}_w \cdot \mathbf{a}_w(\mathbf{r}') \times \frac{\mathbf{R}}{R^3} dV' \quad (1)$$

$$\dot{\mathbf{J}}_w = \frac{\dot{I}_{ph} \cdot W}{a \cdot h} \quad (2)$$

$$\mathbf{R} = \mathbf{r} - \mathbf{r}' = (x - x')\mathbf{a}_x + (y - y')\mathbf{a}_y + (z - z')\mathbf{a}_z \quad (3)$$

$$R = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2} \quad (4)$$

Slika 1. Model ovalnog namota transformatora i pripadajuće formule za analitički proračun [5]

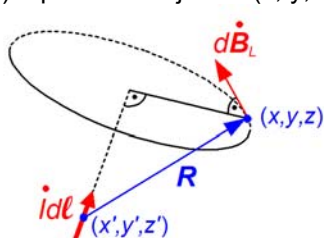
¹ Fizikalna veličina koja je relevantna za analizu magnetskog polja u prostoru je gustoća magnetskog toka B [tesla].

gdje su:

\dot{J}_w	- gustoća struje u namotu (A/mm ²)
$\mathbf{a}_w(\mathbf{r}')$	- jedinični vektor koji definira smjer struje u namotu
dV'	- diferencijalni element volumena V_0 namota
\mathbf{R}	- vektor pozicije
R	- udaljenost između promatrane točke (x, y, z) i točke integracije (x', y', z')
μ_0	- permeabilnost zraka ($\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6}$ H/m)
$I_{ph} \cdot W$	- broj amperzavoja
$D1, D2$	- unutarnji i vanjski promjer ovalnog namota
m	- ravni dio ovalnog namota
a	- širina namota
h	- visina namota

2.2. Magnetsko polje ravnog segmenta vodiča protjecanog strujom

Magnetsko polje ravnog segmenta vodiča protjecanog strujom izračunato je prema slici 1. pomoću Biot-Savartovog zakona pri čemu je $\dot{d\mathbf{B}}_L$ doprinos gustoće magnetskog toka (magnetske indukcije) u promatranoj točki (x, y, z) od strane strujnog elementa \dot{idl} .



$$\dot{d\mathbf{B}}_L = \frac{\mu_0 \dot{idl} \mathbf{R}}{4\pi R^3} \quad (5)$$

\mathbf{R} je vektor pozicije strujnog segmenta \dot{idl} prema točki (x, y, z) u kojoj se računa doprinos magnetske indukcije $\dot{d\mathbf{B}}_L$.

Slika 2. Doprinos strujnog elementa magnetskoj indukciji u točki (x, y, z) i pripadajuće formule za analitički proračun [5]

Magnetska indukcija segmenta ravnog vodiča u fazorskoj domeni u točki (x, y, z) raspisuje se kao pojedinačni doprinos u svim osima koordinatnog sustava na sljedeći način:

$$\dot{\mathbf{B}}_L = \dot{B}_{Lx} \mathbf{a}_x + \dot{B}_{Ly} \mathbf{a}_y + \dot{B}_{Lz} \mathbf{a}_z \quad (6)$$

2.3. Ukupno magnetsko polje

Sumiranjem doprinosa VN i NN namota te svih ravnih segmenata vodiča protjecanih strujom ukupna magnetska indukcija u promatranoj točki (x, y, z) iznosi:

$$\dot{\mathbf{B}} = \sum_{i=1}^{N_w} \dot{\mathbf{B}}_{wi} + \sum_{j=1}^{N_L} \dot{\mathbf{B}}_{Lj} = \dot{B}_x \mathbf{a}_x + \dot{B}_y \mathbf{a}_y + \dot{B}_z \mathbf{a}_z \quad (7)$$

gdje su:

- N_w - broj namota ($N_w = 6$ za promatrani slučaj trofaznog transformatora)
- N_L - broj ravnih segmenata vodiča protjecanih strujom (ovisno o proračunu)

3. NUMERIČKI PRORAČUN

Proračun gustoće magnetskog toka u blizini distribucijskog transformatora izveden je primjenom numeričkog postupka tzv. metodom konačnih elemenata (*engl. Finite Element Method*). Metodom konačnih elemenata numerički se rješavaju parcijalne diferencijalne jednačbe magnetskog polja za što se u Končar D&ST-u koristi programski alat „Mentor MagNet“². Statičko magnetsko polje u prostoru opisano je gustoćom magnetskog toka \mathbf{B} i jakošću magnetskog polja \mathbf{H} koji zadovoljavaju sljedeće jednačbe:

² Prethodno „Infolytica MagNet“ koji je nakon akvizicije postao dio grupacije Siemens pod nazivom „Mentor MagNet“.

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (8)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \quad (9)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} \quad (10)$$

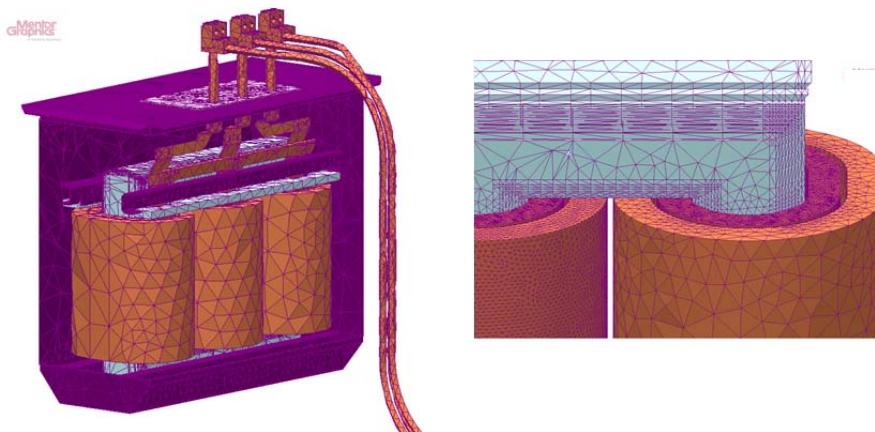
gdje je \mathbf{J} gustoća električne struje (gustoća strujnog toka) koja je ujedno i izvor magnetskog polja. Za numeričko rješavanje predmetnih jednadžbi gustoća magnetskog toka izražava se preko vektorskog magnetskog potencijala \mathbf{A} , pri čemu vrijedi:

$$\mathbf{B} = \operatorname{rot} \mathbf{A} \quad (11)$$

$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \mathbf{A} \right) = \mathbf{J} \quad (12)$$

gdje izraz (12) predstavlja osnovnu formulaciju koja se rješava metodom konačnih elemenata kako bi se dobilo traženo magnetsko polje u prostoru [7].

U metodi konačnih elemenata trodimenzionalni model (3D model) zadane geometrije i materijala (dijelovi transformatora su različite magnetske permeabilnosti) podijeli se na mrežu manjih poddijelova (*engl. mesh*) unutar kojih je potrebno numerički pronaći rješenje nepoznanica (za naš slučaj to je magnetski potencijal \mathbf{A} iz kojega se računa gustoća magnetskog toka \mathbf{B}) pri čemu se parcijalne diferencijalne jednadžbe polja svode na sustav linearnih algebarskih jednadžbi. Pored zadavanja geometrije i materijala transformatora potrebno je zadati i rubne uvjete za proračun magnetskog polja pri čemu se uglavnom koristi tangencijalni granični uvjet (dovoljno daleko od promatranog transformatora definira se "granica" u koji je magnetski tok tangencijalan s definiranim rubom).



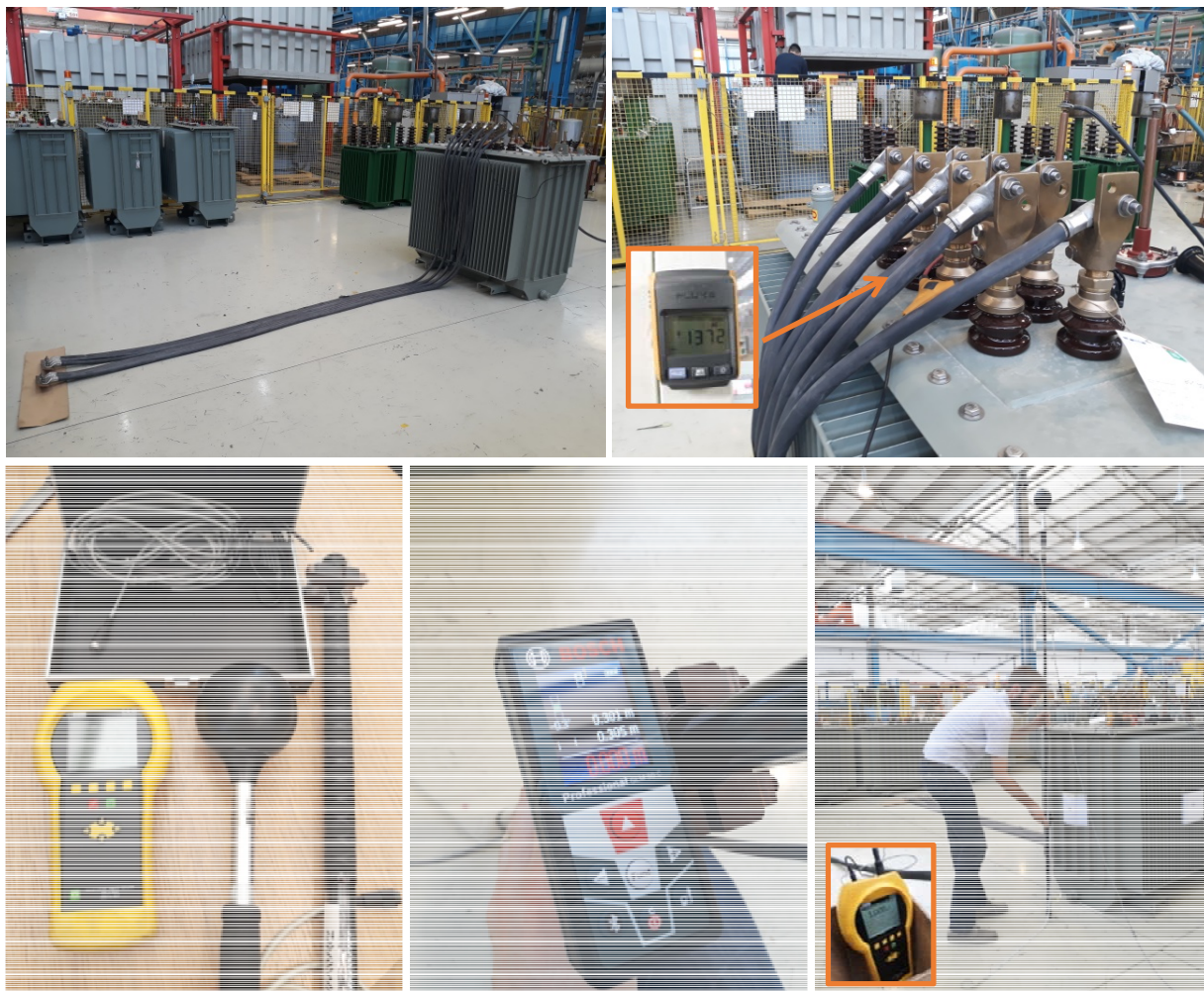
Slika 3. Primjer 3D modela transformatora (lijevo) i primjer različite detaljnosti mreže (*engl. mesh*) (desno) za potrebe numeričkog proračuna

Jedna od prednosti numeričkog proračuna je što omogućava detaljnu analizu utjecaja pojedinih dijelova transformatora različite geometrije i različite magnetske permeabilnosti na širenje magnetskog polja oko transformatora kao i analizu utjecaja različitih mjera koje se koriste za smanjenje magnetskog polja (npr. različite izvedbe oklapanja). Za razliku od analitičkog proračuna, model transformatora za numerički proračun (obično izrađen u nekom od računalnih programa za 3D modeliranje npr. CATIA) može se izraditi vrlo detaljno s realnom geometrijom zbog čega su rezultati numeričkog proračuna bliže "stvarnom" stanju. Veća detaljnost u izradi 3D modela te zahtjevi na odgovarajuću preciznost rezultata zahtijevaju i značajne vremenske i računalne resurse za potrebe modeliranja i samog proračuna što mu je mana u odnosu na analitički proračun kad je potreban "brzi proračun" magnetskog polja.

4. MJERENJE GUSTOĆE MAGNETSKOG POLJA (KONČAR D&ST)

Mjerenje gustoće magnetskog polja u Končar D&ST-u provodi se na lokaciji same tvornice gdje se transformator dovede u uvjete nazivnog strujnog opterećenja (pokus kratkog spoja) pri čemu se na NN priključke transformatora obično priključuju kabeli na čijem krajevima se sve faze međusobno kratko spoje. Pomoću instrumenta za mjerenje magnetskog polja očitava se vrijednost gustoće magnetskog toka (npr. $1 \mu\text{T}$) te se laserski mjeri udaljenost mjerne sonde od kotla transformatora. Mjerenje se obično izvodi u dvije glavne presječne ravnine koje dijele transformator na dva simetrična dijela, te se dobivene

udaljenosti preračunavaju u zadani koordinatni sustav (ishodište je obično u središtu transformatora), a gustoća magnetskog toka prikazuju se krivuljama kako je prikazano u nastavku rada.



Slika 4. Primjer mjerenja magnetskog polja na lokaciji Končar D&ST

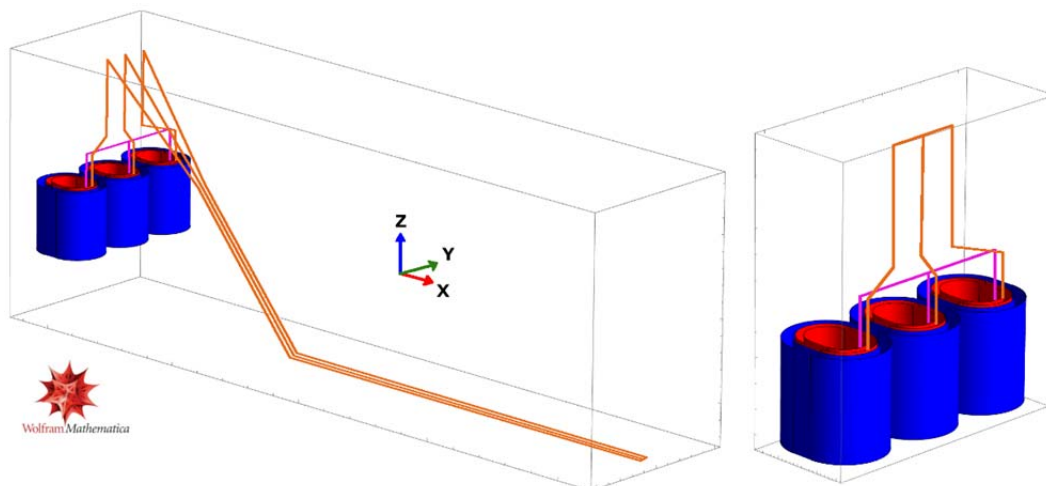
5. USPOREDBA ANALITIČKE, NUMERIČKE I MJERENE VRIJEDNOSTI GUSTOĆE MAGNETSKOG TOKA ZA TIPIČNU IZVEDBU DISTRIBUCIJSKOG TRANSFORMATORA

Usporedba gustoće magnetskog toka izvedena je za analitički proračun, numerički proračun i mjerenu vrijednost B za tipični distribucijski transformator u pokusu kratkog spoja. Proračuni i mjerenja provedeni su na referentnom transformatoru $S_n = 1000$ kVA, $U_{n1}/U_{n2} = 20/0,42$ kV, $I_{n1}/I_{n2} = 28,9/1374,6$ A, grupe spoja Dyn5 i to za dva različita načina spajanja NN priključaka:

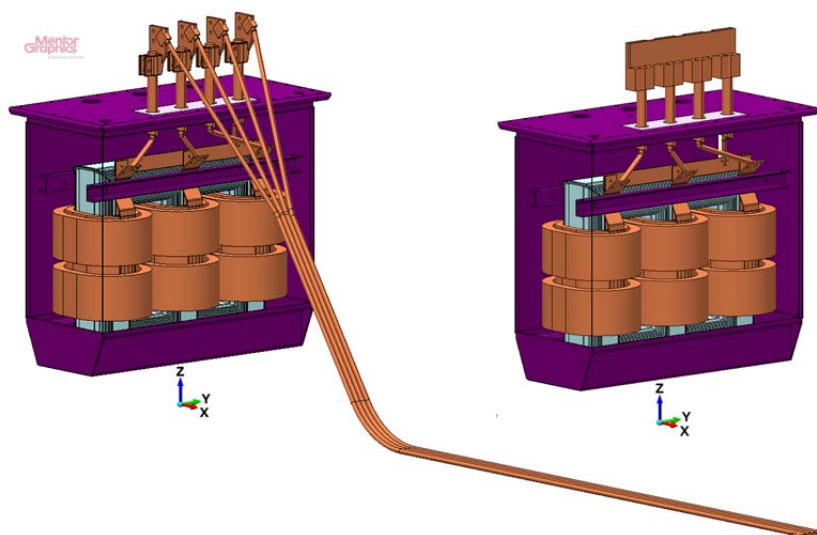
- NN priključci spojeni su pomoću NN kabela koji su na svojim krajevima kratko spojeni i
- NN priključci spojeni su pomoću NN kratkospojnika.

Analitički i numerički model referentnog transformatora grafički su prikazani na narednim slikama (Slika 5. i Slika 6.). Zbog ograničenja u načinu modeliranja i provedbi samog proračuna uvedena su određena pojednostavljenja, tako je analitički model izveden samo s ovalnim NN i VN namotima i NN izvodima dok je numerički model cjelokupan (na slici 6. skrivene su dvije bočne stranice kotla kako bi se vidio aktivni dio) ali s pojednostavljenim kotlom. Naime, zbog brzine proračuna kotao transformatora ne modelira se s valovitim stranicama već se kotao modelira kao puna čelična oplata odgovarajuće debljine.

Mjerenje krivulje $B = 1 \mu\text{T}$ u pokusu kratkog spoja provedeno je u laboratoriju Končar D&ST-a, a izvedeno je prema slici 7. za jednu karakterističnu Y-Z ravninu koja prolazi sredinom poklopca TR. Svi računski modeli i mjerenje na slikama prikazani su za dva različita načina kratko-spajanja NN priključaka (NN kabele i NN kratkospojnik).



Slika 5. Analitički model referentnog TR u pokusu kratkog spoja a) NN kabeli (lijevo)
b) NN kratkospojnik (desno)



Slika 6. Numerički model referentnog TR u pokusu kratkog spoja a) NN kabeli (lijevo)
b) NN kratkospojnik (desno)



Slika 7. Mjerenje gustoće magnetskog toka referentnog TR u pokusu kratkog spoja
a) NN kabeli (lijevo) b) NN kratkospojnik (desno)

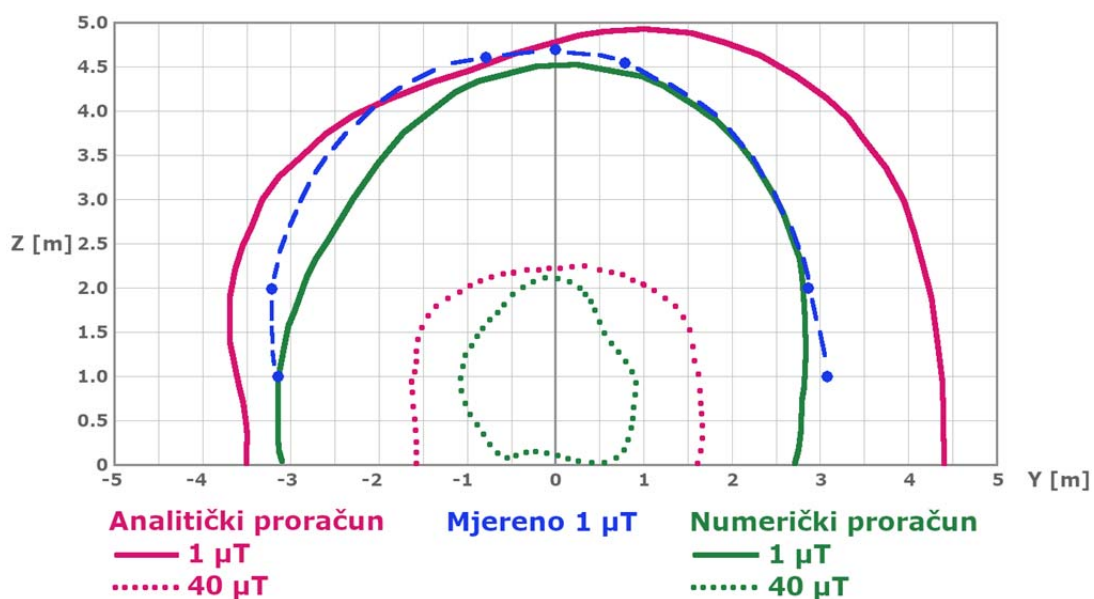
Rezultati proračuna i mjerenja gustoće magnetskog toka usporedno su prikazani kao 2D krivulje na ravninama koje prolaze središtem referentnog transformatora i "sijeku" isti na dva jednaka dijela, pri čemu je transformator postavljen u ishodište koordinatnog sustava. Rezultati su prikazani u dvije presječne ravnine ($Y-Z_{x=0\text{ mm}}$ i $X-Z_{y=0\text{ mm}}$) kao funkcija udaljenosti od ishodišta koordinatnog sustava (Slika 8.) pri čemu su računate vrijednosti $B = 1\ \mu\text{T}$ i $B = 40\ \mu\text{T}$ prikazane za obje presječne ravnine (Y-Z i X-Z) dok su mjerene vrijednosti prikazane samo za $B = 1\ \mu\text{T}$ u jednoj presječnoj ravnini (Y-Z).

5.1. Pokus kratkog spoja s NN kabelima

Na narednim slikama prikazane su mjerene i izračunate vrijednosti B za pokus kratkog spoja koji je izveden s NN kabelima. Važno je napomenuti kako je mjerenje gustoće magnetskog toka provedeno u ožujku 2014. godine stoga analitički i numerički proračuni predstavljaju "rekonstrukciju mjerenja" zbog čega određeni parametri u proračunskim modelima, a koji značajno utječu na točnost rezultata, nisu mogli biti precizno definirani već su procijenjeni (npr. prema slici 7. procijenjen je točan položaj NN kabela s kojima je izveden kratki spoj). Mjerenje vrijednosti B u ravnini Y-Z provedeno je u 7 točaka mjerenja koje su prikazane na slici 8. zajedno s pretpostavljenom interpoliranom krivuljom gustoće magnetskog toka $B = 1\ \mu\text{T}$ (isprekidana plava linija).

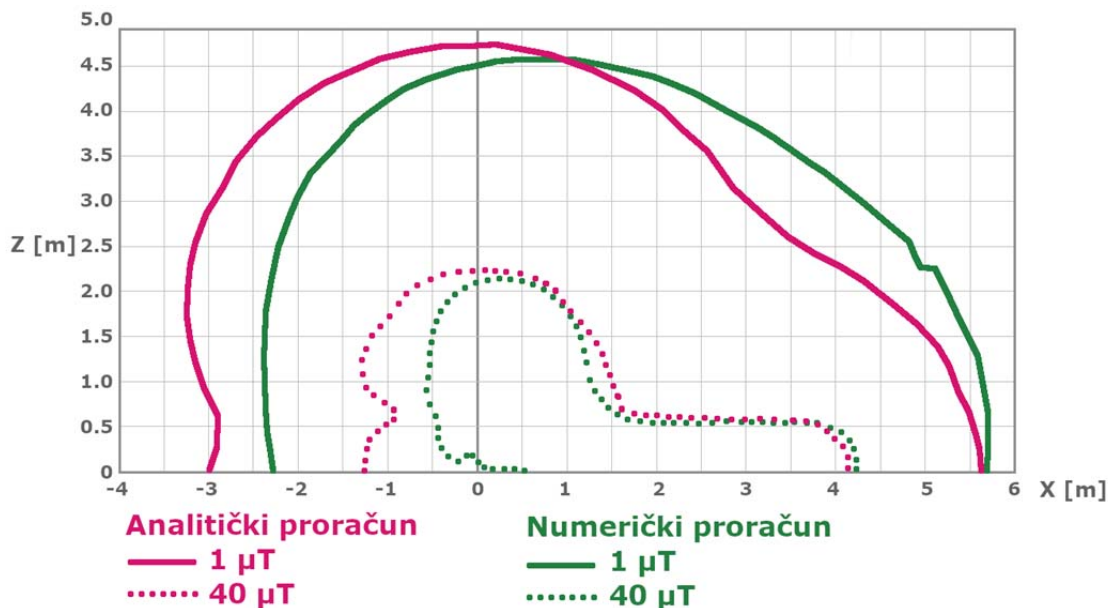
Analitički proračun ne uzima u obzir utjecaj kotla, jezgre i stezanog sustava pa je očekivano da analitičke vrijednosti gustoće magnetskog toka budu prostorno udaljenije od transformatora u odnosu na numerički izračunate i mjerene vrijednosti B . Usporedbom rezultata potvrđena su očekivanja, ali uz određenu nesimetriju krivulje $B = 1\ \mu\text{T}$ kod analitičkog modela. Naime, analitičke vrijednosti $B = 1\ \mu\text{T}$ su u pojedinim točkama mjerenja i do 1,5 m udaljene (odstupanje 30%) od mjerenih vrijednosti dok se u drugim točkama mjerenja (iznad samog transformatora) poklapaju s mjerenim vrijednostima (odstupanje 0%). Nasuprot analitičkim vrijednostima, odstupanje numerički izračunatih vrijednosti $B = 1\ \mu\text{T}$ je znatno manje (do maksimalnih 0,3 m od mjerenih vrijednosti), te uz bolju simetričnosti krivulje u odnosu na ishodište.

Kako su upravo NN priključci i NN kabeli dominantni izvor magnetskog polja u okolini distribucijskog transformatora [6] nepreciznost u njihovom modeliranju uzrokuje veće odstupanje rezultata proračuna od mjerenja, što osobito vrijedi za analitički proračun koji nema prigušenje kotla, jezgre i steznog sustava. Zbog nemogućnosti preciznog modeliranja (točna pozicija NN kabela u radu morala je biti procijenjena) i dominantnog utjecaja kabela na magnetsko polje, utjecaj kotla, jezgre i steznika na prigušenje širenja magnetskog polja ne može se utvrditi s velikom sigurnošću (utjecaj prigušenja je u rasponu od 0% do 40%). Očekuje se da će prigušenje biti ravnomjernije raspoređeno u modelu s NN kratkospojnikom obzirom da je na istom osigurana bolja geometrijska konzistentnost između računskog modela i mjerenog transformatora.



Slika 8. Usporedba mjerenih i izračunatih vrijednosti gustoće magnetskog toka referentnog transformatora u pokusu kratkog spoja s NN kabelima u ravnini Y-Z

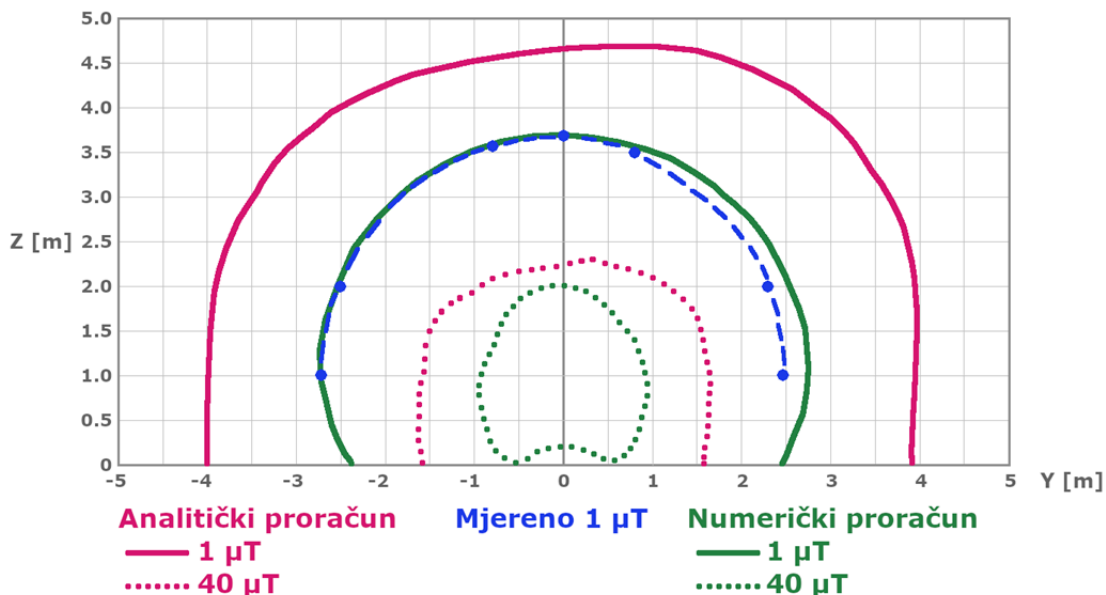
Mjerenje gustoće magnetskog toka za ravninu X-Z nije provedeno ali su zbog kompletnosti rada prikazani predmetni rezultati analitičkog i numeričkog proračuna gdje se može vidjeti koliko su NN kabeli dominantni kao izvor magnetskog polja u blizini distribucijskog transformatora.



Slika 9. Usporedba analitički i numerički izračunatih vrijednosti gustoće magnetskog toka referentnog transformatora u pokusu kratkog spoja s NN kabelima u ravni X-Z

5.2. Pokus kratkog spoja s NN kratkospojnikom

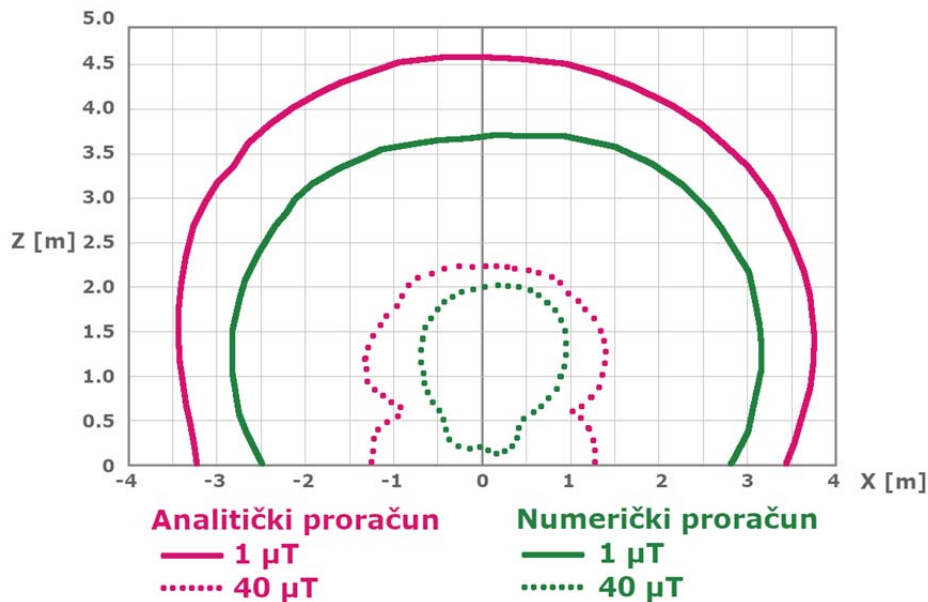
Na narednim slikama prikazane su izračunate i mjerene vrijednosti B za pokus kratkog spoja koji je izveden s NN kratkospojnikom. Za razliku od pokusa kratkog spoja s NN kabelima, postizanje geometrijske konzistentnosti između računskog modela i stvarnog transformatora mnogo je lakša s NN kratkospojnikom stoga su i rezultati za $B = 1 \mu\text{T}$ bliži mjerenim vrijednostima, a krivulje su "simetričnije".



Slika 10. Usporedba mjerenih i izračunatih vrijednosti gustoće magnetskog toka referentnog transformatora u pokusu kratkog spoja s NN kratkospojnikom u ravni Y-Z

Analitički izračunate vrijednosti $B = 1 \mu\text{T}$ odstupaju od mjenjenih vrijednosti u prosjeku 30% (raspon od 20% do 40%, odnosno od 1,0 m do 1,6 m) što je ujedno i gruba procjena ukupnog utjecaja kotla, jezgre i steznika na prigušenje širenja magnetske indukcije za vrijednost $1 \mu\text{T}$ u okolini referentnog

distribucijskog TR. Numerički izračunate vrijednosti $B = 1 \mu\text{T}$ gotovo su identične u pet točaka mjerenja dok je u samo dvije točke mjerenja prisutno odstupanje (maksimalno 0,3 m od mjerene vrijednosti) što potvrđuje visoku točnost numeričkog proračuna.



Slika 11. Usporedba analitički i numerički izračunatih vrijednosti gustoće magnetskog toka referentnog transformatora u pokusu kratkog spoja s NN kratkospojnikom u ravnini X-Z

6. ZAKLJUČAK

Distribucijski transformator, kao izvor elektromagnetskog polja u radnom, javnom i privatnom prostoru u kojemu borave ljudi, mora udovoljavati određenim zahtjevima / propisima. Stoga se u svim fazama proizvodnje transformatora vodi računa da mjerene vrijednosti gustoće magnetskog toka u neposrednoj blizini transformatora budu u skladu s očekivanim, izračunatim vrijednostima.

Pokazano je kako se numeričkim proračunom može postići zadovoljavajuća točnost, no isto tako da je u procesu modeliranja nužno poznavati sve parametre koji bitno utječu na širenje magnetskog polja u prostor. Zbog toga je preporuka da se usporedba između mjerenja i računski dobivenih vrijednosti uvijek provodi istodobno kako bi se uklonio što veći broj nesigurnosti koje mogu utjecati na rezultate (geometrijska nekonzistentnost između modela i objekta, preciznost samog mjerenja, točnost mjernih uređaja, preciznost metode mjerenja, simetričnost opterećenja kod mjerenja i slično). U protivnom, rezultati mogu odstupati više od očekivanih vrijednosti (primjer kratki spoj s NN kabelima) bez poznavanja svih razloga odstupanja.

U radu je pokazano kako osim numeričkog proračuna, koji zahtjeva znatno vrijeme i računalne resurse, i analitički proračun gustoće magnetskog toka može osigurati zadovoljavajuću točnost pri početnom izračunu gustoće magnetskog toka, obzirom da se zbog određenih pojednostavljenja (bez utjecaja kotla, jezgre i steznog sustava) uvijek ostaje na strani sigurnosti. Ako se na analitički izračunate vrijednosti želi primijeniti utjecaj prigušenja kotla, jezgre i steznog sustava tada je potrebno primijeniti prosječni faktor prigušenja u iznosu od 30% (konkretno za $B = 1 \mu\text{T}$).

7. LITERATURA

- [1] Zakon o zaštiti od neionizirajućeg zračenja, Narodne Novine 91/2010 i 114/2018
- [2] Pravilnik o zaštiti od elektromagnetskih polja, Narodne Novine 146/2014 i 31/2019
- [3] International Commission on non-ionizing radiation protection (ICNIRP): „Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1Hz – 100kHz)“, Health Physics, 99 (6):818-836, 2010.
- [4] Ordinance relating to Protection from Non-Ionizing Radiation (ONIR; RS 814.710), The Swiss Federal Council, 9.12. 2008.
- [5] B. Ćučić: “Magnetic field computation of loaded transformer”, International Colloquium Transformer Research and Asset Management“, Dubrovnik, Hrvatska, svibanj 2012.
- [6] S. Mikulić, B. Ćučić, N. Meško: “Magnetsko polje u blizini distribucijskih transformatora za različite izvedbe NN priključka“, 14. savjetovanje HRO CIGRÉ, Šibenik, studeni 2019.
- [7] Mentor Graphics Corporation, “An introduction to MagNet for Static 2D Modeling“, travanj 2018.