

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

Marija Vuković
Končar - Distributivni i specijalni transformatori d.d.
marija.vukovic@koncar-dst.hr

Matko Pečur
Končar - Distributivni i specijalni transformatori d.d.
matko.pecur@koncar-dst.hr

Nikola Škreb
Končar - Distributivni i specijalni transformatori d.d.
nikola.skreb@koncar-dst.hr

SPOJNI ELEMENTI NN NAMOTA DISTRIBUTIVNOG TRANSFORMATORA I SPOSOBNOST PODNOŠENJA KRATKOG SPOJA PREMA NORMI IEC 60076-5

SAŽETAK

Uredbama Komisije (EU) br. 548/2014 i br. 2019/1783 definirane su maksimalne vrijednosti gubitaka distributivnih transformatora u dvije razine gubitka od kojih je druga razina (Tier 2 razina) u primjeni od 1. srpnja 2021. godine. Definiranjem nižih razina gubitaka za istu nazivnu snagu došlo je do promjene dimenzija samog transformatora ali i do promjene kratkospojnih naprežanja u transformatoru što je posljedično utjecalo na njegovu sposobnost podnošenja kratkog spoja. U radu je prikazan utjecaj Tier 2 razine gubitaka na kratkospojnu izdržljivost spojnih elemenata NN namota (osobito NN zvjezdista kao potencijalno „slabe točke“) gdje je numerički simulirana udarna struja kratkog spoja i pripadajuće elektromagnetske sile kao i mehanička deformacija NN spojnih elemenata tijekom maksimalnih naprežanja. Ovakav multi-fizikalni numerički pristup predstavlja preventivnu mjeru još u fazi dizajniranja transformatora, što je verificirano na stvarnom transformatoru kroz laboratorijsko ispitivanje prema normi IEC 60076-5.

Glavne riječi: distributivni transformator, Tier 2, NN zvjezdista, kratki spoj, IEC 60076-5, multi-fizika, numerički proračun, sila, naprežanje, deformacija

CONNECTING ELEMENTS OF LV WINDING OF DISTRIBUTION TRANSFORMER AND SHORT-CIRCUIT WITHSTAND CAPABILITY ACCORDING TO IEC 60076-5

SUMMARY

The Commission Regulations (EU) No. 548/2014 and No. 2019/1783 defined the maximum loss values for distribution transformers in two phases where the second tier (Tier 2) came into force July 1, 2021. Lower loss levels for the same rated power impacted the transformer dimensions and short-circuit stresses within the transformer, which consequently affected its short-circuit withstand capability. The paper presents the impact of Tier 2 loss level on the short-circuit withstand capability of the LV winding connection elements (particularly the LV neutral as a potential "weak point") with numerical simulation of short-circuit fault current and the corresponding electromagnetic forces, as well as the mechanical strain of LV connection elements during maximum stress. This multi-physical numerical approach serves as a preventive measure in the transformer design phase, which is verified on an actual transformer through laboratory testing according to the IEC 60076-5 standard.

Key words: distribution transformer, Tier 2, LV neutral, short-circuit, IEC 60076-5, multi-physics, numerical calculation, forces, stress, strain

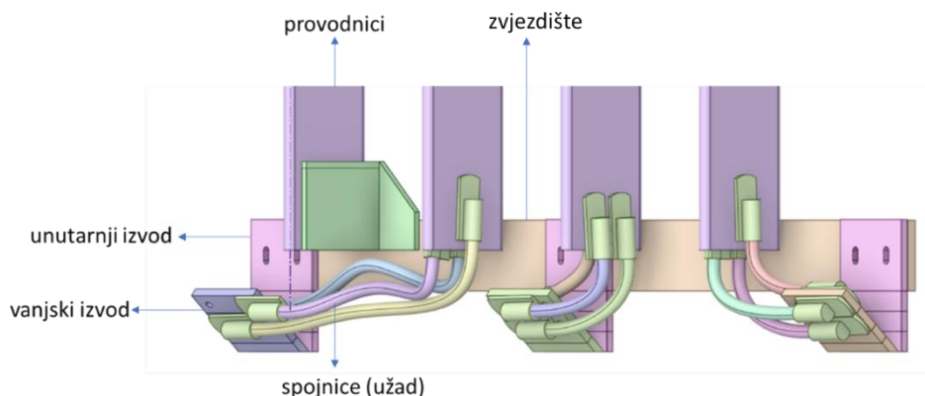
1. UTJECAJ UREDBI KOMISIJE (EU) NA DIZAJN DISTRIBUTIVNIH TRANSFORMATORA

Donošenjem Uredbe EU br. 548/2014 [1], te njezinim amandmanom Uredbom EU br. 2019/1783 [2], propisani su zahtjevi za ekodizajn (energetski učinkovit dizajn) malih, srednjih i velikih energetskih transformatora. U odnosu na ekodizajn Tier 1 razinu (u primjeni od 1. srpnja 2015. godine), gubici u praznom hodu ekodizajna Tier 2 razine (u primjeni od 1. srpnja 2021. godine) manji su za 10 %, a gubici tereta za transformatore snage do uključivo 1000 kVA manji su približno 30 % dok za transformatore snage iznad 1000 kVA do uključivo 3150 kVA prosječno smanjenje gubitaka tereta iznosi 15 % [3].

Sama legislativa značajno je utjecala na konačni dizajn distributivnih transformatora¹ i to u segmentima koji se ne odnose isključivo na smanjenje gubitaka već su njihova indirektna posljedica. Naime, za smanjenje gubitaka praznog hoda bilo je potrebno smanjiti indukciju, odnosno povećati presjek jezgre (manja magnetska indukcija, veća masa jezgre), dok je smanjenje gubitaka tereta zahtijevalo korištenje vodiča većeg presjeka (manja gustoća struje, veća masa vodiča) zbog čega su se dimenzije namota povećale [4]. Namoti većih dimenzija nisu se mogli montirati na jezgru istih dimenzija već je bilo nužno povećati razmak između stupova jezgre tj. simetralu stupova što je u konačnici utjecalo i na dizajn spojnih elemenata na niskonaponskoj strani transformatora (u daljnjem tekstu spojni NN elementi).

Spojni NN elementi transformatora su izvodi namota svih faza, zvjezdište i spojnice. Zvjezdište služi za povezivanje izvoda faza U, V i W, formirajući zvijezda (Y) spoj. Svaki namot ima dva izvoda: unutarnji i vanjski. Ovisno o geometriji transformatora, jedan izvod faze je povezan sa zvjezdištem, dok je drugi izvod iste faze povezan sa spojnica koje vode prema pripadajućem provodniku.

Tijekom rada transformatora struja u niskonaponskim namotima prolazi kroz izvode, zvjezdište i provodnike. Ako je geometrija takva da su unutarnji izvodi povezani sa zvjezdištem, struja ulazi u unutarnje izvode, prolazi kroz namote i izlazi kroz vanjske izvode prema provodnicima (Slika 1).



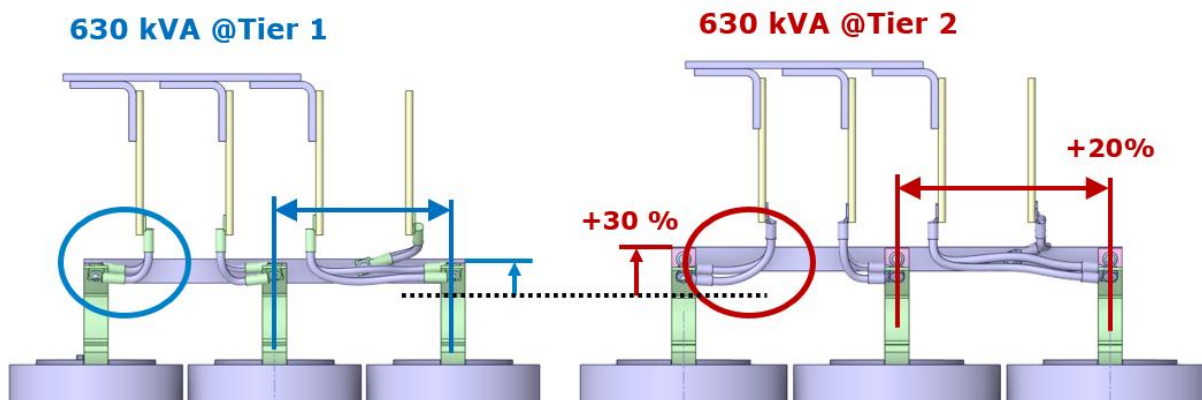
Slika 1. Spojni NN elementi transformatora

Primjena Tier 2 dizajna povećala je gotovo sve dimenzija transformatora stoga je prosječna masa transformatora porasla u prosjeku između nešto iznad 30% (ovisno o snazi) [4]. Povećanje određenih dimenzija obuhvatilo je i spojne NN elemente, a lista promjena navodi se u nastavku kroz ogledni primjer transformatora snage 630 kVA (Slika 2):

- Duljina NN zvjezdišta između dva uporišta povećana je 20% (povećanje simetrale stupa)
- Duljina kraka NN izvoda (na kojemu je montirano NN zvjezdište) do prvog uporišta preko kojega se može savinuti povećana je 30%
- Povećan je paralelni put između NN spojnica i NN zvjezdišta (direktno utječe na sile jer se povećava izloženost NN zvjezdišta promjenjivom magnetskom toku NN spojnica i obrnuto)

U kontekstu otpornosti na deformacije uslijed kratkospojnih naprezanja ovdje imamo različit trend utjecaja Tier 2 dizajna kod npr. namota i spojnih NN elementa. Povećanje dimenzija namota, odnosno smanjenje gustoće struje zbog utjecaja na gubitke tereta, generalno je povećalo njihovu otpornost na deformacije uslijed kratkospojnih naprezanja. S druge strane spojni NN elementi su se izdužili, te im je za iste kratkospojne uvjete inicijalno smanjena mehanička otpornost na deformaciju.

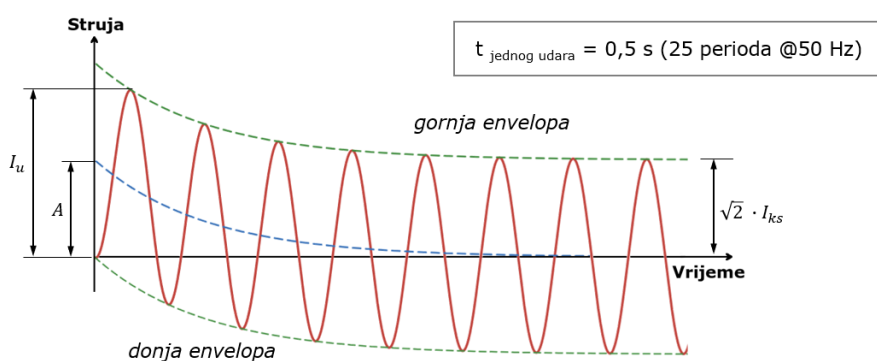
¹ U kontekstu distributivnih transformatora ovdje se misli na srednje energetske transformatore koji su definirani kao transformatori nazivne snage manje ili jednake od 3150 kVA i najvećeg napona opreme većeg od 1,1 kV, a manjeg ili jednakog od 36 kV.



Slika 2. Usporedba aktivnog dijela distributivnog transformatora snage 630kVA za Tier 1 i Tier 2 dizajn

2. SPOSOBNOST PODNOŠENJE KRATKOG SPOJA DISTRIBUTIVNIH TRANSFORMATORA PREMA NORMI IEC 60076-5

Sposobnosti transformatora da izdrži kratki spoj odnosi se na vanjski kratki spoj u mreži, a ne na kratki spoj u samom transformatoru. Transformator mora biti sposoban proći kroz stanje kvara mreže na koju je priključen, odnosno bez oštećenja izdržati dinamičke efekte (destruktivne sile) koje se javljaju tijekom takvih kratkospojnih uvjeta. Najveće destruktivne sile javljaju se pri maksimalno asimetričnoj udarnoj struji kratkog spoja (kvara nastupa tijekom prolaza napona kroz nulu u fazi u kojoj se testira) stoga je to pogonsko stanje relevantno i za numeričko modeliranje spojnih NN elemenata ovoga rada.



Slika 3. Načelni valni oblik udarne struje kratkog spoja tijekom ispitivanja

Ispitivanje izdržljivosti transformatora na kratki spoj propisno je normom IEC 60076-5 [5], tijekom kojega se svaka faza tri puta (u tri različita položaja transformacije) „udara“ maksimalno asimetričnom strujom kratkog spoja. Nakon ukupno devet udara reaktancija transformatora mora ostati unutar dozvoljenih vrijednosti (promjena reaktancije je mjera deformacije namota), transformator mora proći rutinska i dielektrična ispitivanja, te konačno vizualnu inspekciju kotla i aktivnog dijela. Samo ispitivanje uzima vrlo nepovoljno pogonsko stanje bliskog kratkog spoja gdje ukupna kratkospojna struja ovisi samo o impedanciji transformatora. Naime, za transformatore kategorije I (snage od 25 kVA do 2500 kVA) doprinos impedancije sustava se uglavnom zanemaruje (kriterij $Z_s \leq 5\% Z_{tr}$) [5].

U fazi u kojoj se testira, amplituda udarne struje I_u prvog vrha asimetričnog strujnog vala izračunava se pomoću (1) gdje je I_{ks} trajna struja kratkog spoja (nakon prigušenja aperiodičke komponente), a faktor $k \cdot \sqrt{2}$ je vršni faktor udarne struje koji raste s porastom omjera X/R . Tijekom testiranja vršni faktor se računa za svaki regulacijski položaj (srednji i dva krajnja položaja regulacije), a za promatranu kategoriju distributivnih transformatora teorijski maksimum iznosi $1,8 \cdot \sqrt{2} = 2,55$.

$$I_u = I_{ks} \cdot k \cdot \sqrt{2} \quad (1)$$

Kako je već navedeno Tier 2 dizajn donio je smanjenje djelatnih gubitaka što promotreno u kontekstu vršnog faktora udarne struje znači da je povećan omjer X/R , što u konačnici znači povećanje udarne struje s kojom se ispituju distributivni transformatori. Zbog toga su spojni NN elementi kod Tier 2 razine gubitaka izloženi većim silama nego Tier 1 transformatori obzirom da sile rastu s kvadratom struje

(Poglavlje 3.1). Tako za snage transformatora do 1000 kVA i smanjenje gubitaka od 30% porast udarne struje iznosi približno 10%, odnosno porast udarne sile približno 20%. Primjena većih sila na konstrukciju smanjenje mehanička otpornost potencijalni je izvor slabe točke transformatora koja može uzrokovati trajnu (plastičnu) deformaciju spojnih NN elemenata i nezadovoljavajući ishod testa izdržljivosti na kratki spoj.

Plastična deformacija spojnih NN elemenata može dovesti do kratkog spoja unutar transformatora (npr. kontakt spojnih NN elemenata s jezgrom ili steznikom) i/ili ne prolaz dielektričnih ispitivanja (ispitivanje stranim i induciranim naponom). Primjer plastične deformacije NN zvjezdišta nakon testa izdržljivosti na kratki spoj u sklopu razvojnog ispitivanja prototipa prikazano je na narednoj slici (Slika 4).

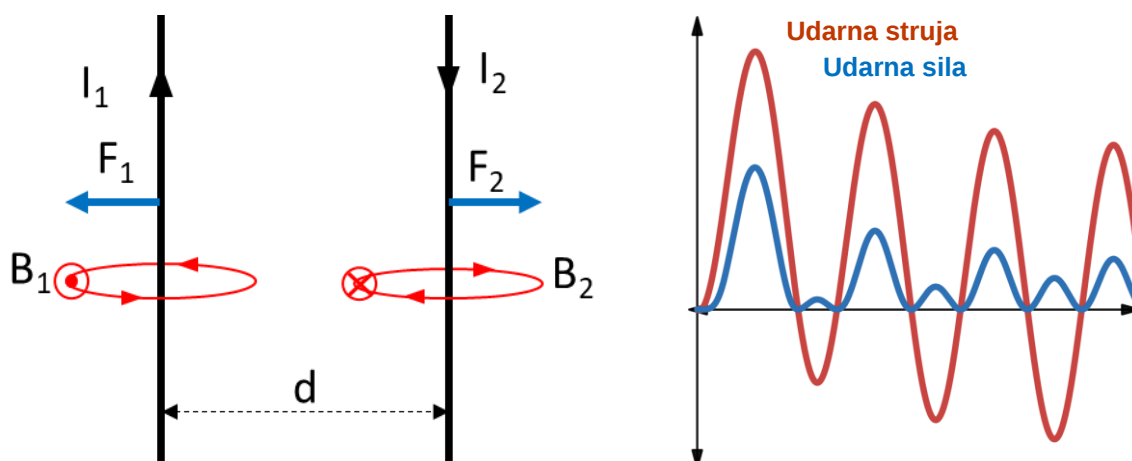


Slika 4. Primjer plastične deformacije NN zvjezdišta nakon testa izdržljivosti (ispitivanje prototipa)

3. SILE NA NN SPOJNIM ELEMENTIMA TIJEKOM KRATKOG SPOJA

3.1. Teorija sile na spojnim NN elementima

Budući da kroz spojne NN elemente teku struje, a blizu su jedni drugima, na njima nastaju sile. Nastanak sile je u nastavku objašnjen jednostavnim primjerom paralele dviju žica kroz koje teku struje I_1 i I_2 (Slika 5, lijevi prikaz).



Slika 5. Sile na paralelnim žicama (lijevo) i tipični valni oblik udarne sile tijekom kratkog spoja (desno)

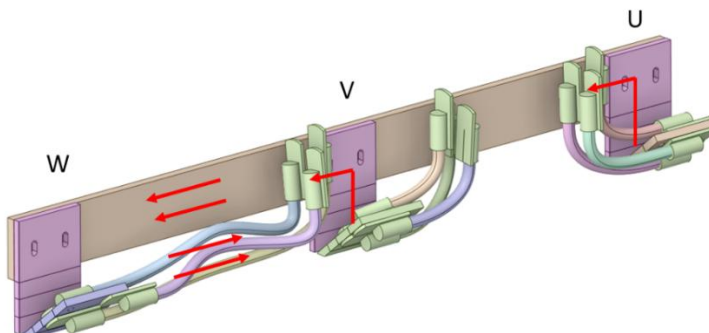
Sile između dvije paralelne žice nastaju zbog međudjelovanja njihovih magnetskih polja i električnih struja koje kroz njih teku. Ova pojava temelji se na osnovnim principima elektromagnetizma, a opisuje se Ampèreovim zakonom i Lorentzovom silom. Svaka žica stvara magnetsko polje oko sebe prema pravilu desne ruke. Smjer magnetskog polja ovisi o smjeru struje u žici. Polje koje stvara jedna žica djeluje na struju u drugoj žici, stvarajući Lorentzovu silu. Ako struje u obje žice teku u istom smjeru, žice se privlače. Ako struje teku u suprotnim smjerovima, magnetska polja se međusobno suprotstavljaju, što stvara silu odbijanja. Iznos sile po duljini L žice izračunava se pomoću (2).

$$F = \frac{\mu_0 I_1 I_2 L}{2\pi d} \quad (2)$$

Pri čemu je μ_0 permeabilnost vakuuma ($\mu_0 \approx 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$), a d udaljenost između žica. Sile rastu s kvadratom struje, a padaju s udaljenošću d . Frekvencija sile je dvostruko veća od frekvencije struje s tim da maksimalna udarna sila nastupa u prvoj polu periodu udarne struje dok se prigušenjem aperiodičke komponente struje sile izjednačuju u svojim parnim i neparnim periodama (Slika 5, desni prikaz).

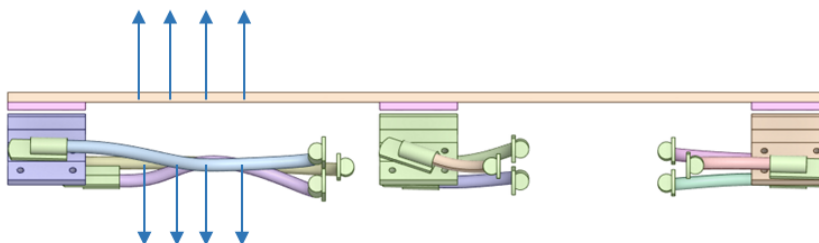
3.2. Smjer struja i sila tijekom testa izdržljivosti na kratki spoj

U slučaju da je kratki spoj nastupio u fazi W struja je najveća u izvodima i spojnica faze W, te u polovici zvjezdišta između faze W i V. Budući da su faze U i V povezane zvjezdištem sa fazom W, iznos struje se u fazama U i V dijeli na pola. Smjerovi struja prikazani su na slici u nastavku (Slika 6).



Slika 6. Smjerovi struja na spojnim elementima tijekom testa izdržljivosti (kratki spoj u fazi W)

Smjer struja je u spojnica faze W i zvjezdištu između faze W i V suprotan. To znači da je na tom mjestu dominantan smjer sila takav da se zvjezdište i spojnice „odbijaju“ (Slika 7).



Slika 7. Smjer sila na zvjezdištu i spojnica (kratki spoj u fazi W)

4. UTJECAJ KARAKTERISTIKA MATERIJALA NA NUMERIČKE PRORAČUNE

4.1. Dijagram naprezanja

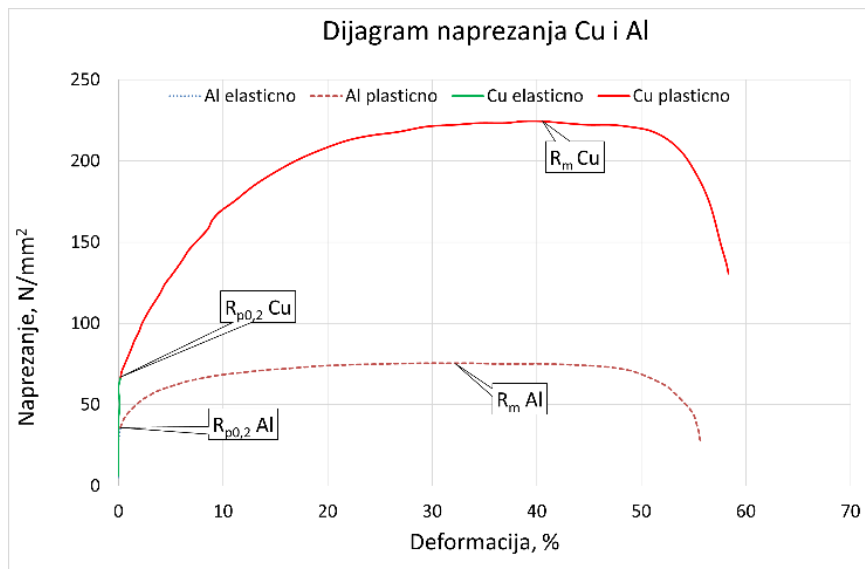
U elektrotehnici za izradu vodljivih elemenata najčešće se upotrebljavaju bakar i aluminij zbog niza povoljnih karakteristika – električna i toplinska vodljivost, obradljivost, dobre mehaničke karakteristike ali i mogućnost recikliranja.

Za provedbu numeričkih FEM analiza (metoda konačnih elemenata) najvažnije su mehaničke karakteristike materijala koje proizlaze iz dijagrama naprezanja, a koji je rezultat vlačnog ispitivanja uzorka materijala na univerzalnoj kralnici. Ispitivanje se provodi prema normi ISO 6892-1 [6].

Dijagram naprezanja prikazuje međusobnu ovisnost naprezanja i deformacije. Karakteriziraju ga dva osnovna područja – elastično i plastično područje. U **elastičnom području**, nakon prestanka djelovanja sile na presjek uzorka, uzorak se vraća u prvotni oblik i dimenzije, dok **plastično područje** karakterizira trajna deformacija i promjena dimenzija uzorka. Karakteristične točke dijagrama naprezanja predstavljaju:

- **Granica razvlačenja ($R_{p0.2}$)** - točka dijagrama naprezanja koja dijeli elastično od plastičnog područja.
- **Vlačna čvrstoća (R_m)** - točka dijagrama naprezanja pri kojoj djeluje maksimalna sila na početni presjek uzorka.

Slika 8. prikazuje dijagrame naprezanja za aluminij EN 485-3 1350 H111 [7] i bakar EN 13601 CW004A R200 [8] te njihove karakteristične točke.



Slika 8. Dijagram naprezanja Al i Cu

4.2. Karakteristike materijala u numeričkim FEM programima

Dijagrami naprezanja dobiveni ispitivanjem na univerzalnoj kraljici, prikazani u prethodnom poglavlju, nazivaju se Engineering stress - strain dijagramima. Kako bi se u numeričkom FEM programu opisalo ponašanje materijala u elastičnom i plastičnom području, potrebno je unijeti vrijednosti naprezanja i odgovarajuće plastične deformacije uzimajući u obzir promjenu presjeka uzorka tijekom ispitivanja. Takve vrijednosti nazivamo True stress - strain vrijednostima, a moguće ih je izračunati iz Engineering stress - strain vrijednosti s pomoću analitičkih izraza [9]:

$$\sigma_{true} = \sigma_{engineering} * (1 + \epsilon_{engineering}) \quad (3)$$

$$\epsilon_{true} = \ln(1 + \epsilon_{engineering}) \quad (4)$$

gdje su:

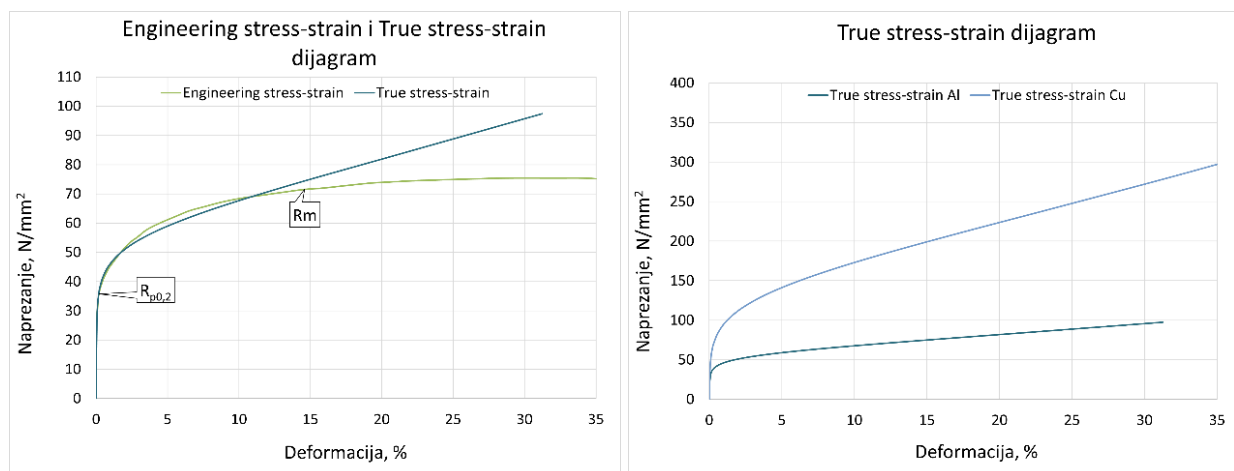
σ_{true} – True stress

$\sigma_{engineering}$ – Engineering stress

ϵ_{true} – True strain

$\epsilon_{engineering}$ – Engineering strain

Koristeći izrazima dobivene True stress – strain vrijednosti nastaje True stress – strain dijagram kako je prikazano na narednoj slici.



Slika 9. True stress - strain i Engineering stress - strain za Al (lijevo) i True stress - strain dijagram za Al i Cu (desno)

Slika 9 (prikaz lijevo) prikazuje usporedbu Engineering stress-strain i True stress – strain dijagrama za aluminij EN 485-3 1350 H111. Može se primijetiti da u elastičnom području i pri malim deformacijama su razlike između krivulja male, ali se povećavaju kako rastu plastične deformacije sve do vlačne čvrstoće.

Slika 9 (prikaz desno) prikazuje True stress – strain krivulje za Al i Cu koje mogu poslužiti za očitavanje vrijednosti napreznja i plastične deformacije te njihov unos u numerički FEM program. Prije nego što se krivulje unesu u program bitno je uračunati i potencijalna odstupanja mehaničkih svojstava što je moguće ostvariti praćenjem i dodatnim ispitivanjem uzorka od različitih dobavljača. Navedena slika ukazuje i na razlike u mehaničkim karakteristikama materijala, te da je upotrebom materijala boljih mehaničkih karakteristika, uz pretpostavku identične geometrije, moguće utjecati na smanjenje konačnih plastičnih deformacija.

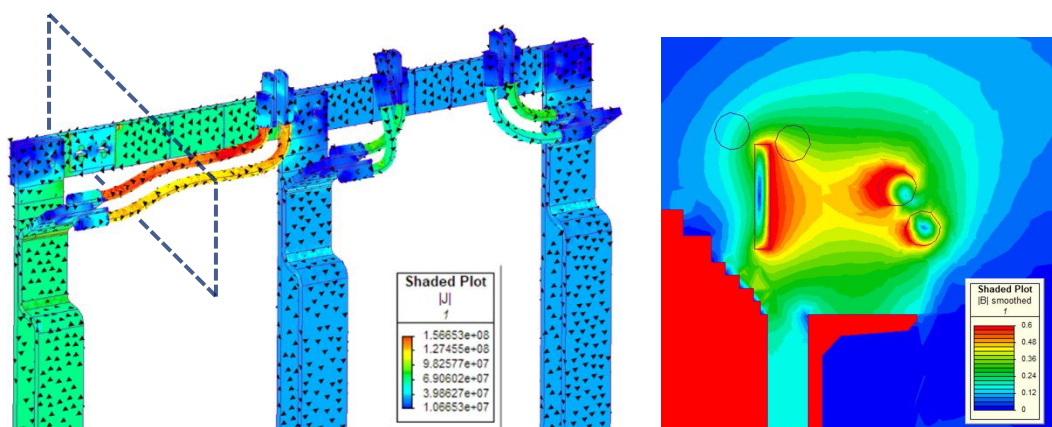
5. MULTI-FIZIKALNI NUMERIČKI PRORAČUN DEFORMACIJA

Za potrebe multi-fizikalnog numeričkog proračuna deformacija spojnih NN elemenata elektromagnetske sile računane su u programu Simcenter MAGNET dok je mehanički proračun deformacija napravljen u programu ANSYS Mechanical. Kako dva numerička programa nisu unutar iste programske familije prijenos velike količine numeričkih podataka predstavlja netrivialni problem sam za sebe.

Sile izračunate u MAGNET-u se prebacuju pomoću datoteka koje sadrže tri komponente svake pojedinačne sile, te tri koordinate hvatišta djelovanja svake pojedinačne sile. Geometrijski model zvjezdista i izvoda korišten u MAGNET-u se koristi i u ANSYS-u čime se osigurava jednakost koordinatnih sustava. U nelinearnim mehaničkim analizama u pravilu je bitan redoslijed opterećivanja i rasterećivanja. Međutim, zbog rubnih uvjeta, te zbog samih raspodjela sila, redoslijed terećenja faza za ovaj slučaj nije bitan jer ovdje „pogrešan“ redoslijed producira zanemarivu grešku.

5.1. Elektromagnetski proračun (Simcenter MAGNET)

Prvi dio multi-fizikalnog numeričkog proračuna čini elektromagnetski proračun. U program Simcenter MAGNET uvezen je model transformatora koji uključuje kotao, jezgru, steznike, namote i spojne NN elemente. U električnom krugu modela parametrizirani su namoti i izvodi. U nastavku (Slika 10) su grafički prikazani gustoća i smjer struje, te gustoća magnetskog toka u jednoj ravnini spojnih NN elemenata nakon provedene simulacije.



Slika 10. Gustoća struje na spojnim elementima (lijevo) i gustoća magnetskog toka u presječnoj ravnini (desno) za kratki spoj u fazi W

5.2. Mehanički proračun (ANSYS Mechanical)

Udarne struja kratkog spoja uzrokuje silu koja se ne nameće beskonačno sporo ili dovoljno sporo da bi se slučaj promatrao kao statički. Frekvencija udarne struje je 50 Hz, što znači da je trajanje jedne periode 20 ms. Ako se pretpostavi da udarna struja postigne svoj maksimum nakon trajanja četvrtine periode, to znači da udar traje 5 ms, a jednako toliko bi trajalo i rasterećenje. U mehaničkom smislu, fizikalno vrijeme je prekratko da se zanemari inercija ($t \ll 1$ s). To znači da se općenito rješava sljedeća diferencijalna jednačina:

$$m\ddot{x} + kx = F(t) \quad (5)$$

gdje su:

m – masa sustava
 k – krutost sustava
 x – pomak sustava
 F – sila koja djeluje na sustav
 t – vrijeme

Tijekom izrade numeričkog FEM modela u ANSYS-u, za rješavanje navedene diferencijalne jednadžbe u praktičnom smislu najbolja se pokazala dinamička implicitna analiza koja za računanje koristi Eulerovu metodu prema natrag (*Backward Euler Method*):

$$y_{i+1} = y_i + \Delta t \left. \frac{dy}{dt} \right|_{i+1} \quad (6)$$

$$\left. \frac{dy}{dt} \right|_{i+1} = \left. \frac{dy}{dt} \right|_i + \Delta t \left. \frac{d^2y}{dt^2} \right|_{i+1} \quad (7)$$

gdje je:

y – fizikalna veličina promjenjiva u vremenu
 i – inkrement u vremenu

Za potrebe rada napravljena su dva multi-fizikalna proračuna različitih spojnih NN elemenata (dva različita distributivna transformatora), te su računski dobivene vrijednosti pomaka uspoređene s izmjerenim vrijednostima pomaka na stvarima transformatorima.

5.3. Izrada simulacije (prvi primjer)

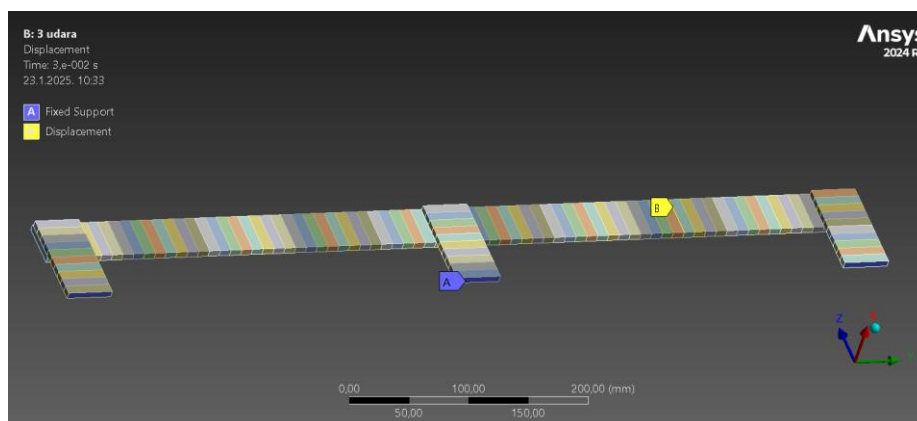
Svaki mehanički proračun mora sadržavati elastična svojstva materijala: Youngov modul E i Poissonov faktor ν . Budući da se radi o dinamičkoj analizi, mora se uvesti i gustoća materijala ρ . Tablica 1 prikazuje spomenuta svojstva aluminija i bakra.

Tablica 1. Svojstva materijala za aluminij i bakar

	Aluminij	Bakar
E [MPa]	71 000	110 000
ν [-]	0,33	0,34
ρ [t/mm ³]	2,77e-09	8,3e-09

Bez obzira na materijal zvjezdista i izvoda (aluminij ili bakar), u analizu se uključuje i plastično ponašanje materijala. To znači da se moraju dodati stvarne vrijednosti naprezanja (*true stress*) i stvarne vrijednosti plastične deformacije (*true plastic strain*) koje opisuju takvo ponašanje (Poglavlje 4). Za simulaciju prvog primjera su primijenjena samo svojstva aluminija. Kad god je moguće geometrijski model se diskretizira heksaedarskim konačnim elementima i to tako da se po debljini generiraju barem dva elementa.

Slika 11 prikazuje nametnute rubne uvjete na modelu prvog primjera. Na površinama A (plavo osjenčano) nametnuto je uklještenje. Ovaj tip rubnog uvjeta je odabran jer je to mjesto gdje namot pritišće izvode uz jezgru pa se pretpostavlja da su svi pomaci i sve rotacije spriječene. Na liniji B (žuto) spriječen je pomak u smjeru koordinatne osi X . Ovaj rubni uvjet je odabran jer je na tom mjestu spojnica koja ograničava pomake u tom smjeru.

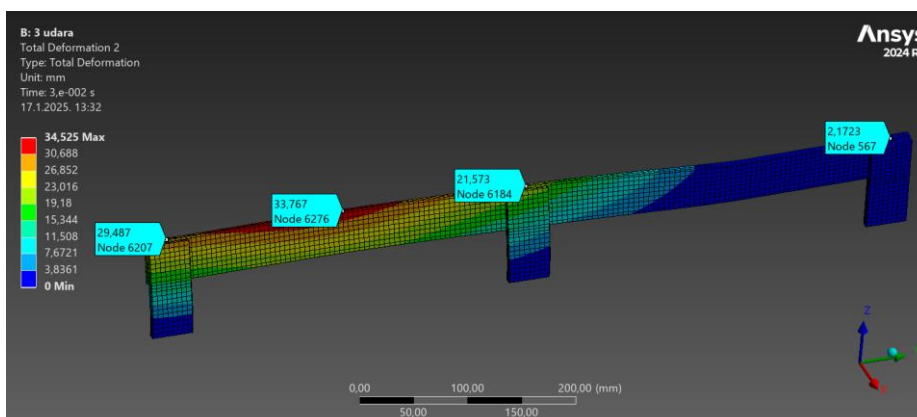


Slika 11. Rubni uvjeti na modelu prvog primjera

Sama analiza se definira kao nelinearna, dinamička i implicitna. U kontekstu ANSYS-a to znači da se se odabire *Static Structural | Large Deflection | Quasi-Static Solution*. Budući da zvjezdšte i izvodi trpe tri maksimalna udara, a svako opterećenje i rasterećenje traje po 5 ms, ukupno fizikalno vrijeme je 30 ms.

5.4. Rezultati simulacije (prvi primjer)

Rezultati simulacije grafički su prikazani na narednoj slici (Slika 12), te su tako dobivene proračunske vrijednosti uspoređene s izmjerenim vrijednostima i prikazane tablično (Tablica 2). Odstupanja za izmjerene i proračunate pomake na izvodima su relativno velika (od 18 do 65 %). Međutim, najveći pomak koji je relevantan za dodir zvjezdšta s jezgrom, a koji je izmjeren na sredini između faze U i V, je kvantitativno blizak proračunskoj vrijednosti (odstupanje 8 %), što je za praktičke svrhe zadovoljavajuće.



Slika 12. Karakteristični pomaci [mm] mehaničkog proračuna prvog primjera

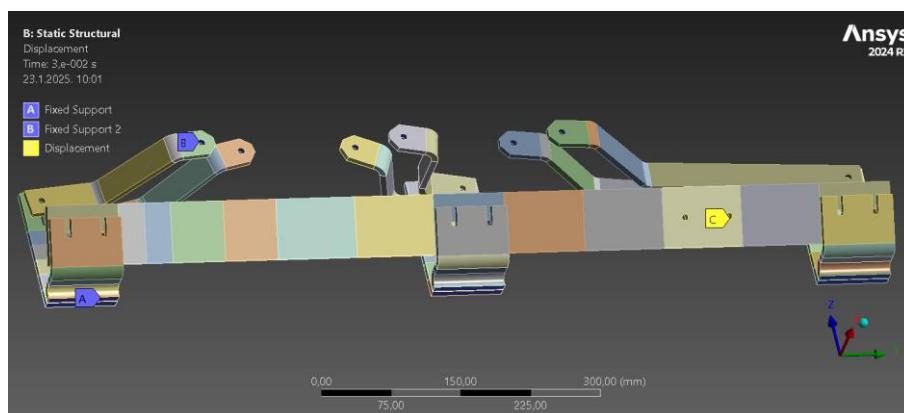
Tablica 2. Usporedba izmjerenih i proračunatih pomaka simulacije prvog primjera

	Izmjereni pomak [mm]	Proračunati pomak [mm]
Pomak na W izvodu	0,8	2,2
Pomak na V izvodu	17,7	21,6
Pomak na U izvodu	19,7	29,5
Pomak na sredini zvjezdšta između izvoda U i V faze	31,1	33,8

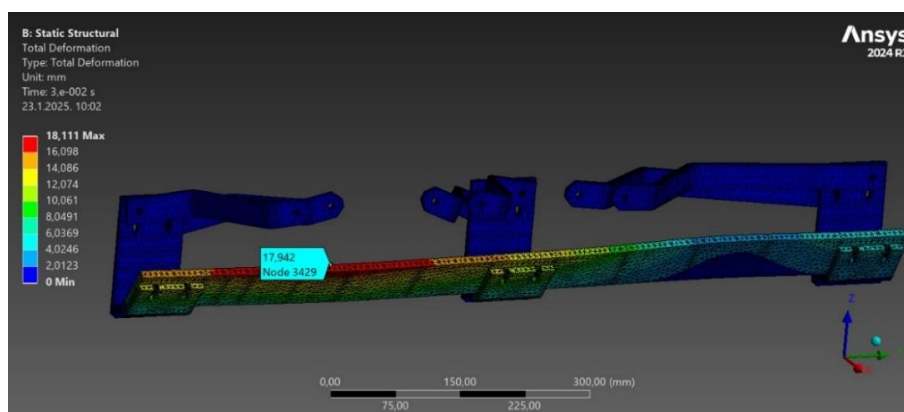
5.5. Izrada i rezultati simulacije (drugi primjer)

Za drugi proračun definirana su prethodno opisana svojstva materijala kao u prvom primjeru (Poglavlje 5.3). Za razliku od simulacije prvog primjera, ovdje se unose i svojstva aluminija (izvodi i zvjezdšte) i svojstva bakra (spojnice). Također, geometrijski model je diskretiziran tetraedarskim konačnim elementima jer se s heksaedarskim elementima nije mogla postići kvalitetna mreža za potrebe simulacije. Kao i prethodno, po debljini su opet generirana dva elementa.

Slika 13 prikazuje nametnute rubne uvjete na modelu drugog primjera. Na površinama A (plavo osjenčano) nametnuto je uklještenje iz istog razloga kao i u prvom primjeru. Taj rubni uvjet je za drugi primjer proširen i na mjesta gdje se bakrene spojnice vežu na provodnike (površine B). Na površinama C (žuto osjenčano) spriječen je pomak u smjeru koordinatne osi X, opet iz istog razloga kao i u prvom primjeru (na tom mjestu je spojnica koja ograničava pomake u smjeru X).



Slika 13. Rubni uvjeti na modelu drugog primjera



Slika 14. Najveći pomak [mm] mehaničkog proračuna drugog primjera

Za drugi primjer je izmjerena samo jedna vrijednost pomaka, i to na sredini između faze U i V. Izmjerena vrijednost pomaka iznosi 20 mm, što je dovoljno blisko proračunskom pomaku od 17,9 mm (odstupanje 12%). Kao i u prethodnom primjeru, odstupanje je prihvatljivo za praktičnu primjenu.

Kako bi se dodatno smanjila odstupanja tj. daljnje unaprijedio predstavljani multi-fizikalni numerički model moguće je postojeći fizikalni model doraditi s modelom savijenih limića i užadi s kojima se ostvaruje veza između izvoda i provodnika. Model se može unaprijediti i odabirom eksplicitnog solvera koji je primjereniji za fizikalne procese koji se odvijaju unutar 100 ms.

6. ZAKLJUČAK

Uredbe EU koje su za cilj imale postizanje energetski učinkovitog dizajna transformatora (Tier 2) u značajnoj mjeri su utjecale i na dijelove transformatora koji ne utječu direktno na smanjenje gubitka kao što su spojni elementi NN namota (izvodi, zvjezdište, spojnice). Tranzicija iz Tier 1 u Tier 2 razinu gubitaka povećala je iznose udarnih struja kratkog spoja kod distributivnih transformatora, te istodobno smanjila mehaničku otpornost spojnih NN elemenata tijekom kratkospojnih naprezanja. Time je potencijalno stvorena slaba točka u transformatoru kod koje može doći do trajne (plastične) deformacije, a koja se manifestira tek tijekom testiranja transformatora na izdržljivost na kratki spoj.

Implementacijom multi-fizikalnog numeričkog modela koji je predstavljen u radu moguće je s dovoljnom točnošću predvidjeti mehaničku otpornost spojnih NN elemenata na kratki spoj još u fazi projektiranja, odnosno predvidjeti ulazak u nelinearno plastično područje deformacija. Time se može izbjeći

ponavljanje laboratorijskih ispitivanja što štedi resurse i vrijeme, a finim optimiranjem svih utjecajnih parametara moguće je u fazi dizajna odabrati optimalno idejno, tehnološko i ekonomski isplativo rješenje.

7. LITERATURA

- [1] Uredba Komisije (EU) br. 548/2014 od 21. svibnja 2014. o provedbi Direktive 2009/125/EZ Europskog parlamenta i Vijeća u pogledu malih, srednjih i velikih energetskih transformatora, Službeni list Europske unije, 2014.
- [2] Uredba komisije (EU) br. 2019/1783 od 1. listopada 2019. o izmjeni Uredbe (EU) br. 548/2014 o provedbi Direktive 2009/125/EZ Europskog parlamenta i Vijeća u pogledu malih, srednjih i velikih energetskih transformatora, 2019.
- [3] I. Dunodović, R. Ćucić, M. Majnarić, K. Trupinić: „Kapitalizacija troškova gubitaka energetski učinkovitih transformatora prema normi HRN EN 50708-1-1:2020“, 8. (14.) Savjetovanje HO CIRED, Seget Donji/Trogir, 2023.
- [4] K. Pongrašić, J. Kralj, D. Trstoglavec, M. Mikulić: „Ekološki dizajn distributivnih transformatora prema Uredbi Komisije (EU) br. 548/2014 i europskoj normi HRN EN 50588-1:2017“, 6. (12.) Savjetovanje HO CIRED, Opatija, 2018.
- [5] HRN EN 60076-5 Energetski transformatori -- 5. dio: Otpornost na kratki spoj, 2008.
- [6] HRN ISO 6892-1 Metalni materijali -- Vlačno ispitivanje -- 1. dio: Metoda ispitivanja pri sobnoj temperaturi, 2019.
- [7] HRN EN 485-3 Aluminij i aluminijeve legure -- Limovi, trake i ploče -- 3. dio: Dopusštena odstupanja mjera i oblika toplo valjanih proizvoda, 2008.
- [8] HRN EN 13601 Bakar i legure bakra -- Bakrena vučena žica, šipka i žica za opću primjenu u elektrotehnici, 2021.
- [9] Nikolaos Mavrodontis: „Converting Engineering Stress-strain to True Stress-strain in Abaqus“, listopad, 2017. (URL: <https://simulation-blog.technia.com/simulation/converting-engineering-stress-strain-to-true-stress-strain-in-abaqus>)