

**PRELAZNI REŽIMI PRILIKOM ENERGIZACIJE, KRATKIH SPOJEVA I OPTEREĆIVANJA TRONAMOTAJNIH TRANSFORMATORA SA PODELJENIM NAMOTAJIMA****TRANSIENT REGIMES OF ENERGIZATION, SHORT-CIRCUIT AND LOADING OF THREE-WINDING TRANSFORMERS WITH SPLIT WINDINGS**Filip Milanković, Stevan Cvetičanin, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO**

**Kratak sadržaj** – Date su teorijske osnove tronamotajnih transformatora sa podeljenim namotajima, a navedeni su i odgovarajući primeri iz literature i prakse. Razmatrana su tri tipa prelaznih režima sa povećanim stujama – uključenje, udarni kratak spoj i opterećenje. Kod uključjenja je izvršena analiza uključjenja pojedinačnog transformatora i transformatora u paralelnom radu uz primenu specijalizovanog softverskog alata PSCAD. Proračuni reaktanse i sila kratkih spojeva izvršeni primenom metoda konačnih elemenata. Kod analize i praćuna opterećenja korišćen je standard IEC 60076-7 [7]. Za sve prelazne režime razvijeni su odgovarajući dopunski paketi u MS EXCEL-u koji uključuju VBA kod.

**Ključne reči:** Tronamotajni transformator, Podeljeni namotaji, Prelazni režimi, Energizacija, Stuje kratkog spoja.

**Abstract** – This paper presents the theoretical foundations of three-winding transformers with split windings and gives examples from literature and practice. Three transient processes with increased currents were considered - switching on, shock short circuit and loading. When switching on, an analysis of the switching on of individual transformers and transformers in parallel operation was carried out with the application of specialized PSCAD software. Calculations of reactance and short-circuit forces performed using the finite element method. The IEC 60076-7 standard [7] was used for the analysis and calculation of loading. For all transition processes, appropriate software tools have been developed in MS EXCEL that include VBA code.

**Keywords:** Three-winding transformer, Split-winding, Transient processes, Energization, Short-circuit current.

**1. UVOD**

Energetski transformatori su najznačajniji i najskuplji element transformatorskih stanica i kao takvi su posebno važni za naručioce (kupce), vlasnike, korisnike (elektroprivreda i privreda uopšte), operatere, dobavljače, proizvođače transformatora i opreme, itd.

Ekološki i socio-ekonomski zahtevi doprineli su globalnom povećanju instalacija sistema za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora.

**NAPOMENA:**

Članak je proistekao iz master rada čiji mentor je bio dr Stevan Cvetičanin.

Transformatori koji se koriste u vetroelektranama i foto-naponskim elektranama zahtevaju posebne karakteristike kako bi ispunili sve izazovne i uslove rada.

U ovom radu biće reči o posebnoj vrsti tronamotajnog transformatora, koji ima dva primara, podeljena namotaja (eng. *split windings*) i jedan sekundar koji služi za podizanje napona. S obzirom na velika ulaganja u postrojenja za proizvodnju i baterijsko skladištenje električne energije, kao i dinamičan razvoj istih, tema master rada je izuzetno aktuelna i značajna.

Za pravilno projektovanje, izgradnju i korišćenje transformatora veoma je važno proučavanje prelaznih režima rada. Stanja kod kojih se mogu pojaviti povećane struje u transformatoru su:

- Uključenje transformatora i pojave kratkih spojeva, kod kojih struje u namotajima mogu da budu višestruko veće od naznačene struje. Tokom ovih brzih prelaznih procesa, namotaji su izloženi elektrodinamičkim i termičkim naprezanjima u kratkom trajanju (reda veličine sekunde);
- Preopterećenje transformatora u slučaju nužde, do 1,5 naznačene struje za kratkotrajna preopterećenja do 30 minuta i dugotrajna preopterećenja do 1,3 naznačene struje.

Cilj rada jeste da se prikupe i sistematizuju postojeće informacije, da se da teorijski okvir i objasne specifičnosti ove aplikacije, kao i da se metodom analize i proraćuna dođe do novih informacija za tronamotajne transformatore sa podeljenim namotajima. Ove informacije su potrebne kako proizvođačima transformatora za unapređenje projekta i proizvodnje tako i korisnicima za definisanje zahteva (specifikacije) prilikom nabavke novih transformatora, kako bi se izbegli problemi i kvarovi uočeni na drugim novim sistemima za proizvodnju i skladištenje električne energije.

U ovom članku izvršena je analiza uključjenja tronamotajnog transformatora u komercijalnom softveru PSCAD čija je glavno svojstvo analiza prelaznih režima u elektro-energetskim sistemima. Pored uključjenja jednog transformatora, dodatno je urađena simulacija uključjenja transformatora u paralelnom radu, gde dolazi do pojave „sao-sećajne“ struje u transformatoru. Proraćun kratkih spojeva je zasnovan na metodu konačnih elemenata koji je impelmentiran u MS EXEL pomoću VBA koda. Proraćun optimalne naznačene snage transformatora je urađen u MS EXEL-u pomoću VBA koda. Rezultati proraćuna su prikazani tabelarno i grafički. Rezultati su prevashodno

analizirani, a potom upoređeni sa primerima iz literature i standarda.

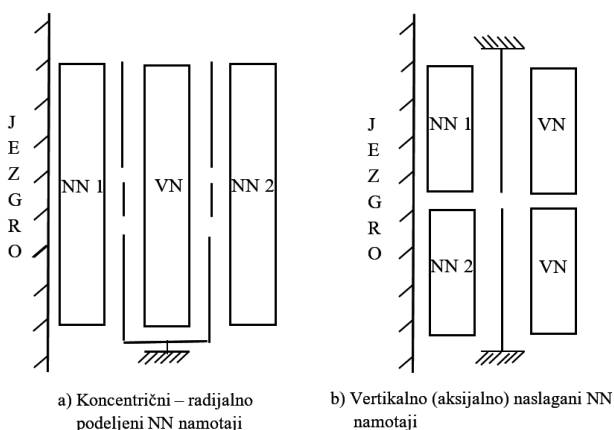
## 2. TRONAMOTAJNI TRANSFORMATORI SA PODELJENIM NAMOTAJIMA

U ovom poglavlju biće prikazana teorijski osnov sa osnovnim konfiguracijama, date preporuke za projekat (dizajn) i navedeni primeri tronamotajnih transformatora sa podeljenim namotajima. U [1] je dato upustvo za transformatore koji se koriste u sistemima za distribuiranu proizvodnju električne energije iz fotonaponskih sistema. Pomenuto upustvo sadrži neka praktična razmatranja za specifikaciju, dizajn i primenu višenamotajnih transformatora sa namerom da se osigura da transformatori za ovu primenu budu efikasniji, pouzdaniji kao i da se zadovolje rastuće potrebe za njima.

Kod tronamotajnih transformatora sa podeljenim namotajima se obično dva primarna (NN) namotaja napajaju sa dva odvojena invertora. Dizajn često zahteva odvojene, galvanski izolovane, primarne (NN) namotaje. Za ove transformatore postoje nekoliko impedansi koje mogu da se definišu:

- NN1, NN2-VN (oba NN namotaja su kratkospojeni, VN namotaj se napaja)
- NN1-VN i NN2-VN (jedan od NN namotaja je kratko spojen, VN namotaj se napaja)
- NN1-NN2 (jedan od NN namotaja je kratko spojen, drugi NN namotaj se napaja).

Impedansa kratkog spoja NN1, NN2-VN se definiše za punu naznačenu snagu dok se preostale impedanse definišu za pola naznačene snage. Važno je da se imaju bliske ili jednake impedanse kratkog spoja svakog od NN namotaja prema VN namotaju. Sa druge strane, preporučuje se da se ima dovoljno visoka impedansa kratkog spoja između dva NN namotaja kako bi se odvojili ovi namotaji (eng. *decouple*). Preporučuje se da impedansa kratkog spoja NN1-NN2 ne bude manja od 8% (kod polovine naznačene snage transformatora).



Slika 2.1. Primeri osnovnih konfiguracija tronamotajnih transformatora sa podeljenim namotajima.

Prednosti koncentričnih namotaja NN1-VN-NN2 (Slika 2.1 a)) su velika vrednost impedanse kratkog spoja NN1-NN2 i kompaktan dizajn a nedostatak su različite impedanse NN1-VN i NN2-VN.

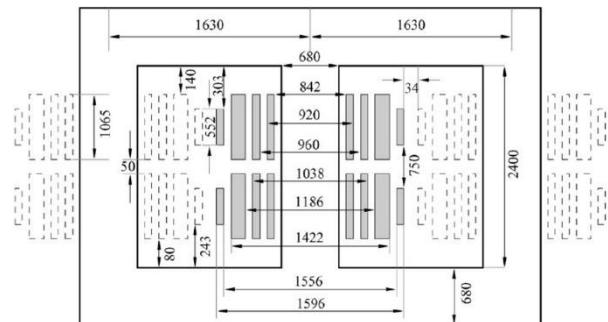
Prednosti vertikalno naslaganih (eng. *stacked*) namotaja NN1-NN2-VN (Slika 2.1 b)) su bliske vrednosti obe

impedanse kratkog spoja NN1-VN i NN2-VN i velika vrednost impedanse kratkog spoja NN1-NN2, dok je nedostatak manje kompaktan dizajn.

Zbog specifičnih zahteva u vezi impedanse i kratkih spojeva projektna rešenja ovih tronamotajnih transformatora su složenija u odnosu na standardne dvonamotajne transformatore. U [2] su date preporuke za projektovanje (dizajn) tronamotajnih transformatora sa podeljenim namotajima. Vertikalno naslagani NN namotaji sa podeljenim VN namotajem (Slika 2.1 b)) je preferiran pristup nekoliko proizvođača zbog navedenih prednosti.

Transformatori koji se koriste u fotonaponskim solarnim elektranama su projektovani za relativno male gubitke u praznom hodu jer transformator tokom noći radi u praznom hodu, tj. napaja se strujom praznog hoda iz elektroenergetskog sistema. NN namotaj transformatora u sistemima fotonaponskih elektrana je obično blizu jezgra. Zbog toga je struja uključanja relativno velika u poređenju sa normalnim transformatorom za sniženje napona, budući da transformator prilikom uključanja ima malu reaktansu vazdušnog jezgra NN namotaja.

U ovom poglavlju će biti prikazana dva primera, prvi iz literature [3], a drugi iz prakse koji približno odgovara stvarnom transformatoru u projektu (iz razloga poverljivosti podataka, snaga transformatora je malo umanjena). U analizi struje uključanja tronamotajnih transformatora, zbog detaljnog poznavanja geometrije i rasporeda ampernavojaka u prozoru transformatora, Slika 2.2, korišćiće se primer transformatora iz literature [3], snage 70 MVA.



Slika 2.2. Primeri geometrije transformatora sa podeljenim namotajima [3], sve dimenzije su u mm.

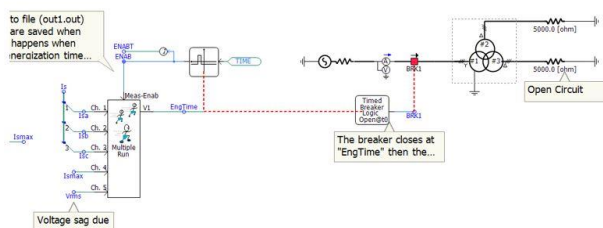
U analizi opterećenja tronamotajnih transformatora korišćiće se podaci transformatora iz prakse. Osnovni podaci transformatora su 400/33/33 kV, 600/300/300 MVA, grupa sprege YNd11d11.

## 3. STRUJA UKLJUČENJA TRANSFORMATORA

U ovom poglavlju vrednost amplitude prvog vrha struje uključanja (eng. *inrush current* ili *magnetization inrush current*) će biti date analitičkim izrazom. Simulacijama u PSCAD-u biće obrađeni slučajevi uključanja pojedinačnog transformatora, kao i transformatora u paralelnom radu (eng. *symphatetic inrush current*).

Simulacija struje uključanja izvršena je pomoću programa za simulaciju elektromagnetskih prelaznih procesa PSCAD verzija 5.0. U ovom poglavlju dat je primer proračuna struje uključanja trofaznog tronamotajnog transformatora naznačene snage 70 MVA prikazanog u poglavlju 2. Maksimalna struja uključanja određena je primenom analitičkog postupka, kao i simulacijom, za

slučaj bez zaostale indukcije, za pojedinačni i paralelan rad transformatora.

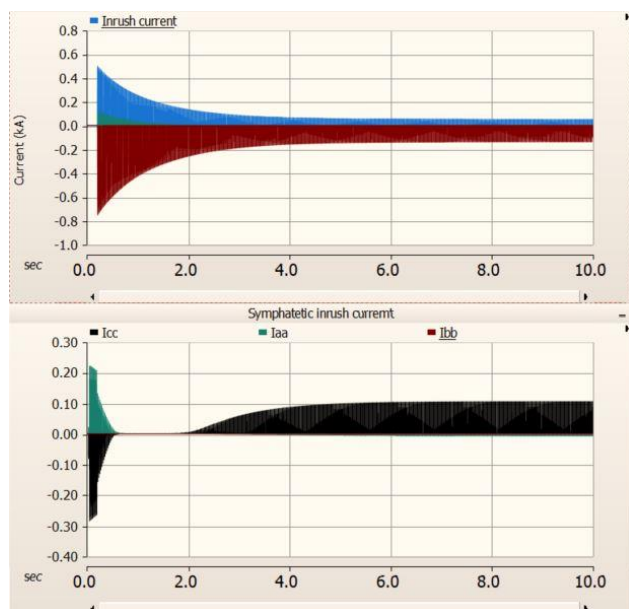


Slika 3.1. Model za simulaciju uključenja pojedinačnog tronomotajnog transformatora u PSCAD-u.

Simulacijom u PSCAD, Slika 3.1, za trofazni trostubni transformator 70 MVA dobijena je maksimalna struja uključenja 697 A. U slučaju bez zaostale indukcije dobijena je maksimalna struja uključenja 280 A, što je relativno dobro podudaranje rezultata analitičkog proračuna i simulacijom PSCAD-om.

Simulacijom u PSCAD-u za dva trofazna trostubna transformatora u paralelnom radu, dobijena je struja uključenja 755 A, u slučaju sa zaostalom indukcijom, i maksimalna „saosećajna“ struja uključenja od 285 A, u transformatoru koji je već bio u pogonu. Na slici 3.2 su grafički prikazani oblici struja, odakle se može zaključiti da „saosećajna“ struja ima manju amplitudu, ali duže trajanje od struje uključenja.

Navedeni problemi pri uključenju transformatoru mogu se izbjeći upravljanim uključenjem (eng, *PoW-Point of Wave switching*). U slučaju da je pad napona prilikom uljučenja veći od 3% ili 5%, koliko je propisano u regulativnim okvirima, sigurno se mora primeniti upravljano uključenje da bi se smanjili padovi napona.



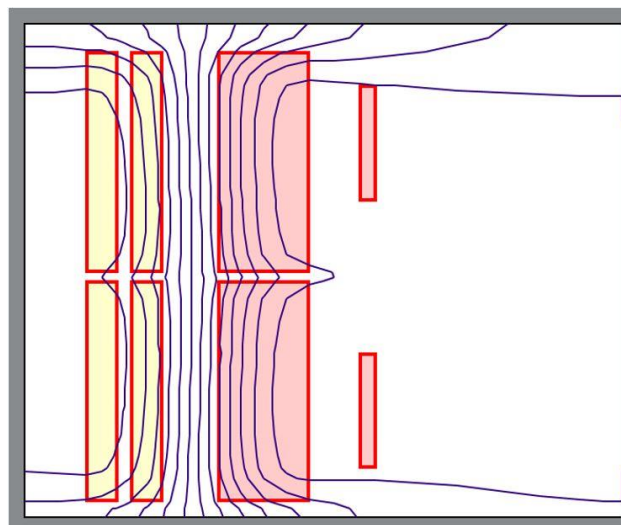
Slika 3.2. Struja uključenja i saosećajna struja transformatora u paralelnom radu- 70 MVA sa uticajem zaostalog fluksa.

#### 4. KRATKI SPOJEVI TRANSFORMATORA

U ovom poglavlju biće razmatrani udarni kratak spoj i proračun reaktanse i sila kratkog spoja na transformatoru 70 MVA iz literature [3], koji je takođe korišćen u poglavlju uključenje transformatora.

Termičke posledice često nisu značajne jer su prelazni režimi kratkotrajni, te se porast temperature izračunava u skladu sa ustaljenom strujom kratkog spoja. Dinamičke posledice su veoma značajne, a kod provere mehaničke izdržljivosti se mora uzeti u obzir najveća trenutna vrednost struje kratkog spoja, gde se standardom SRPS EN 60076-5 [4] utvrđuju zahtevi u pogledu izdržljivosti transformatora pri kratkom spoju.

Osnovni problem pri određivanju reaktanse i sila kratkog spoja u transformatoru jeste određivanje rasipnog magnetnog polja u transformatoru, koje se unazad već decenija određuje numeričkim metodama. U radu je korišćen dvo-dimenzionalni aksijalno simetrični model, a numerički proračun je zasnovan na metodi konačnih elemenata, slika 4.1. Softver koji je originalno razvijen u programskom jeziku FORTRAN [5] za potrebe ovog rada preveden je u Excel VBA kod.



Slika 4.1. Raspodela magnetnog polja za primer iz VN-(NN1+NN2), dobijen primenom Metoda konačnih elemenata .

Izračunata vrednost reaktanse kratkog spoja, u osnovnom položaju regulatora napona, iznosi 13,95 %, što približno odgovara vrednosti datoj u literaturi (13,9 %).

U tabeli 4.1 date su vrednosti proračuna sila za primer iz literature.

Tabela 4.1 Maksimalne radijalne, aksijalne i ukupna aksijalna sila u namotajima

Namotaj	Maksimalna radijalna sila (N/mm)	Maksimalna aksijalna sila (N/mm)	Ukupna aksijalna sila (kN)
Namotaj NN1	-1274,4	2593,5	1211,4
Namotaj NN2	-1286,6	-2111,1	-1157,4
Namotaj VN	2134,9	-2587,0	1179,6

#### 5. OPTEREĆENJE TRANSFORMATORA

U ovom poglavlju biće razmatrani termički prelazni režimi prilikom opterećenja uljnih transformatora nazivnim opterećenjem, kao i u slučaju preopterećenja, zasnovani na standardu 60076-7 [7]. Posmatra se dinamička termička sposobnost (DTS) zasnovana na dnevnom profilu proizvodnje/opterećenja. Za proračun preopterećenja ko-

rističe se metoda eksponencijalnih jednačina i softverski alat koji je razvijen za diplomski rad [6].

Osnovni zadatak proračuna jeste određivanje najtoplije tačke namotaja, od koje zavisi brzina starenja transformatora. Matematički modeli predstavljeni u standardu IEC 60076-7 koriste se za procenu temperature gornjeg ulja u sudu i temperature najtoplije tačke u namotaju prilikom opterećenja transformatora, u zavisnosti od promene temperature okoline i struje opterećenja. Ovim metodom pretpostavlja se da je temperatura najtoplije tačke namotaja jednaka zbiru temperature okoline, povišenja temperature gornjeg ulja iznad temperature okoline i povišenja temperature najtoplije tačke namotaja iznad temperature gornjeg ulja.

Standard IEC 600676-7 daje prikaz dva metoda za proračun temperature najtoplije tačke namotaja:

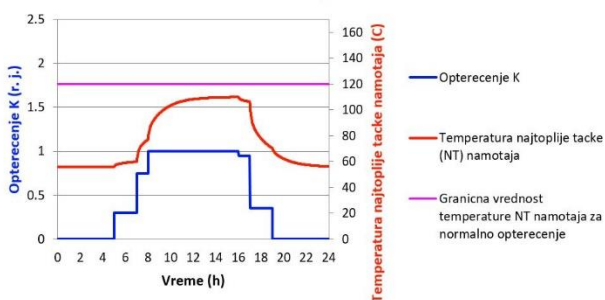
- Metod eksponencijalnih jednačina;
- Metodu diferencnih jednačina.

U radu je primenjena metoda eksponencijalnih jednačina i dat proračun za aktuelni primer iz prakse. U studijskoj fazi projekta, razmatra se mogućnost primene transformatora naznačene snage 600 MVA za solarnu elektranu na Bliskom istoku (jedan od tri identična transformatora u elektrani). Rezultati proračuna su temperatura ulja u najvišem sloju, temperatura najtoplije tačke namotaja i umanjenje životnog veka transformatora, prikazane tablično i grafički u Tabeli 5.1 i na Slici 5.1.

Tabela 5.1. Rezultati proračuna temperature najtoplije tačke namotaja i umanjenja životnog veka transformatora

Vreme na kraju svakog perioda (h)	Temperature i umanjenje životnog veka na kraju svakog perioda						
	Period 1	Period 2	Period 3	Period 4	Period 5	Period 6	Period 7
5	7	8	16	17	19	24	
Opterećenje K (r. j.)	0.00	0.30	0.75	1.00	0.95	0.35	0.00
Terećenje	mirujuće	povećavajuće	povećavajuće	povećavajuće	smanjujuće	smanjujuće	smanjujuće
Početno povišenje temperature ulja (K)	3.8	3.8	6.2	15.0	39.9	38.2	16.2
Povišenje temperature gornjeg ulja (u sudu) (K)	3.8	6.2	15.0	39.9	38.2	16.2	4.3
Početno povišenje temp. najtoplije tačke 1 (K)	0.0	0.0	1.6	10.1	18.0	16.2	2.2
Povišenje temperature najtoplije tačke 1 (K)	0.0	1.6	10.1	18.0	16.2	2.2	0.0
Početno povišenje temp. najtoplije tačke 2 (K)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Povišenje temperature najtoplije tačke 2 (K)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Povišenje temperature najtoplije tačke (K)	0.0	1.6	10.1	18.0	16.2	2.2	0.0
Konačno povišenje temp. najtoplije tačke (K)	3.8	7.9	25.1	57.9	54.5	18.4	4.3
Temperatura gornjeg ulja (u sudu) (°C)	55.8	58.2	67.0	91.9	90.2	68.2	56.3
Temperatura najtoplije tačke namotaja (°C)	55.8	59.9	77.1	109.9	106.5	70.4	56.3
Umanjenje životnog veka (normalni dani)	0.00	0.00	0.00	0.24	0.27	0.27	0.28

Transformator 600 MVA OD hlađenje sa ciklusom 7 perioda



Slika 5.1. Promena temperature najtoplije tačke namotaja u zavisnosti od promene opterećenja.

Za ovaj primer iz prakse može se zaključiti da naznačena snaga transformatora zadovoljava definisanu dnevnu promenu opterećenja. Može da se uoči da postoji rezerva temperature najtoplije tačke od oko 10 °C.

## 6. ZAKLJUČAK

U radu su analizirani prelazni režimi prilikom uključivanja, udarnog kratkog spoja i opterećenja tronamotajnih transformatora sa podeljenim namotajima, koji predstavlja tipično rešenje u fotonaponskim elektranama i baterijskim sistemima za skladištenje energije. U realizaciji ovog rada korišćeni su specijalizovani softverski alati, PSCAD za uključivanje transformatora, a takođe i razvijeni su posebni algoritmi u EXCEL-u primenom VBA koda za uključivanje, kratk spoj i opterećenje transformatora. Rezultati razvijenih algoritama su verifikovani poređenjem sa primerima iz literature. Za razvijene algoritme za opterećenje dat je kratak opis i upustvo za rad, uključujući ulazno/izlazne podatke.

Doprinos ovog rada ogleda se u odgovarajućoj analizi potreba, zahteva, metoda i primena proračuna opterećenja transformatora, definisanju ulazno-izlaznih podataka proračuna, kao i razvoju odgovarajućeg algoritma zasnovanog na standardu IEC 60076-7.

## 7. LITERATURA

- [1] IEEE Std C57.159-2016 – *IEEE Guide on Transformers for Application in Distributed Photovoltaic (DPV) Power Generation Systems.*
- [2] R. Krishnan, *Transformer for Distributed Photovoltaic Generation*, Third International Conference (IEECCOT), 2018.
- [3] G. B. Kumbhar, S. V. Kulkarni: *Analysis of Short-Circuit Performance of Split-Winding Transformer Using Coupled Field-Circuit Approach*, IEEE Transactions on Power Delivery, 2007.
- [4] SRPS EN 60076-5:2008, *Energetski transformatori- Deo 5: Izdržljivost pri kratkom spoju.*
- [5] M. Milanković, *Numerički proračun sila u transformatoru u kratkom spoju, ETF Zagreb, 1986*
- [6] F. Milanković, *Terećenje energetskih transformatora potopljenih u mineralno ulje*, diplomski rad, FTN Novi Sad, 2021
- [7] IEC 60076-7:2011 *Power transformers- Part 2: Temperature rise for liquid-immersed transformers.*

### Kratka biografija:



**Filip Milanković** rođen je u Novom Sadu 1998. god. Osnovne studije na Fakultetu tehničkih nauka na studijskom programu Energetik, elektronika i telekomunikacije, mosul elektroenergetski sistemi završio je 2021. godine. kontakt: filip.milankovic@gmail.com



**Dr Stevan Cvetičanin** rođen je u Bačkoj Palanci 1986. god. Doktorirao je 2017. god. na Fakultetu tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu, gde je i zaposlen, u kontinuitetu, od 2012. god, a trenutno je u zvanju vanr. profesora. Oblast interesovanja su mu modeliranje i prelazni procesi u elektrici. kontakt: stevan.cveticanin@uns.ac.rs