

Marko M. Šućurović<sup>1</sup>, Dardan O. Klimenta<sup>2</sup>, Dragan S. Tasić<sup>3</sup>

# Određivanje temperature i struje zemljospoja paralelnog provodnika uzemljenja energetskih kablova sa metalnim ekranima uzemljenim na jednom kraju

<sup>1</sup> Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet tehničkih nauka u Čačku, Srbija\*<sup>2</sup> Univerzitet u Prištini sa privremenim sedištem u Kosovskoj Mitrovici, Fakultet tehničkih nauka, Kosovska Mitrovica, Srbija<sup>3</sup> Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet u Nišu, Srbija

Pregledni rad

## Ključne poruke

- U radu su dati primeri kablovskih vodova sastavljeni od jednožilnih kablova velikog poprečnog preseka čiji su metalni ekrani uzemljeni samo na jednom kraju
- Opisani su razlozi za primenu paralelnog provodnika uzemljenja (PPU), kao i način proračuna njegovog minimalnog poprečnog preseka
- Numeričkom metodom izračunate su temperature PPU, a zatim su analitički određene maksimalne dozvoljene struje zemljospoja u funkciji rastojanja PPU od kablovskog voda

## Kratak sadržaj

Kod kablovskog voda izrađenog od jednožilnih kablova velikih poprečnih preseka provodnika cirkulacione struje i gubici u metalnim ekranima mogu biti znatni. Ukoliko nema tehničkih i ekonomskih opravdanosti za izvođenje transpozicije metalnih ekrana, oni se mogu galvanski spojiti i direktno uzemljiti samo na jednom kraju voda. U tom slučaju dolazi do prekidanja provodnog puta za struje zemljospoja. Iz tog razloga je neophodna upotreba dodatnog zaštitnog provodnika, tj. paralelnog provodnika uzemljenja (PPU) kojim se galvanski povezuju lokalni uzemljivači na početku i na kraju voda. PPU se dimenzioniše tako da njegova izolacija ne bude toplotno ugrožena pri proticanju struje kvara. PPU se polaže zajedno sa energetskim kablovima i zbog toga može imati visoku početnu vrednost temperature. S tim u vezi, u ovom radu su izvršeni numerički proračuni temperature za PPU od bakra sa izolacijom od PVC i umreženog polietilena (XLPE). Proračuni su izvršeni za različita rastojanja između PPU i energetskih kablova. Nakon numerički izračunate temperature analitički su određene maksimalne dozvoljene struje zemljospoja koje se mogu pojaviti u PPU poprečnih preseka 240 i 300 mm<sup>2</sup>. Proračuni su izvedeni sa jednožilnim energetskim kablovima tipa Cu/XLPE/CTS/PVC/AWA/PVC 19/33 kV (BS 6622), preseka provodnika 800 mm<sup>2</sup> i 1.000 mm<sup>2</sup>, pod pretpostavkom da su položeni direktno u zemljište bez isušivanja. Takođe, pretpostavlja se da je zbog transpozicije izvedene na sredini voda eliminisana cirkulaciona struja u samom PPU.

## Ključne reči

Metoda konačnih elemenata, metoda uzemljenja metalnih ekrana, paralelni provodnik uzemljenja, podzemni energetski kabl, trougaona formacija

### Napomena:

Ovaj članak predstavlja proširenu, unapređenu i dodatno recenziranu verziju rada „Proračun minimalnog poprečnog preseka paralelnog provodnika uzemljenja za podzemne energetske kablove u trougaonoj formaciji sa metalnim ekranima uzemljenim na jednom kraju“, nagrađenog u Stručnoj komisiji STK-1 Komponente mreža, na 14. Savetovanju CIRED Srbija, Kopaonik, 16-20. septembra 2024.

Primljeno: 8. april 2025. Recenzirano: 18. maj 2025.

Izmenjeno: 2. jun 2025. Odobreno: 2. jul 2025.

\* Korespondirajući autor: Marko Šućurović, +381640570801

E-mail: [marko.sucurovic@ftn.kg.ac.rs](mailto:marko.sucurovic@ftn.kg.ac.rs)

## 1. UVOD

Vrednost trajno dozvoljene struje srednjenaponskog kablovskog voda zavisi od temperature okolnog zemljišta, toplotne otpornosti tla, dubine polaganja kablova, kao i od konstrukcionih parametara kabla. Usled Džulovih (*Joule*) gubitaka u provodnim delovima (provodnik, metalni ekran, armatura) generiše se toplota. U metalnom ekranu gubici nastaju kao posledica postojanja cirkulacionih i vrtložnih struja, [1]. Kod jednožilnih kablova cirkulacione struje postoje ukoliko su metalni ekrani galvanski povezani i direktno uzemljeni na oba kraja kablovskog voda. U pojedinim situacijama neophodno je povećanje strujnog opterećenja kabla, što se između ostalog može učiniti smanjenjem gubitaka u metalnom ekranu. Gubici u metalnim ekranima se mogu smanjiti eliminisanjem cirkulacionih struja, a u tu svrhu primenjuju se različiti načini povezivanja i uzemljenja ekrana kao što su: transpozicija metalnih ekrana (eng. *Cross-bonding system*) i galvansko povezivanje i direktno uzemljenje metalnih ekrana kablova samo na jednom kraju (eng. *Single-point bonding system*). Primenom ova dva načina povezivanja i uzemljenja ekrana ne eliminišu se gubici u metalnim ekranima usled vrtložnih struja, [2].

Pri spajanju i uzemljenju metalnih ekrana na jednom kraju onemogućeno je proticanje struje kvara između dva lokalna uzemljivača koja se nalaze na početku i na kraju kablovskog voda. Iz tog razloga je kod ovakvog načina uzemljenja metalnih ekrana neophodno korišćenje paralelnog provodnika uzemljenja (PPU). PPU se polaže zajedno sa energetskim kablovima i to na odgovarajući način, u zavisnosti od formacije polaganja jednožilnih kablova, [3, 4]. Površina poprečnog preseka PPU, kao zaštitnog provodnika, mora imati odgovarajuću vrednost kako pri proticanju struje kvara ne bi došlo do oštećenja njegove izolacije. Pojedini standardi definišu minimalne poprečne preseke zaštitnih provodnika, čije vrednosti zavise od materijala i stvarnog poprečnog preseka faznog provodnika. Kao primer, mogu se navesti podaci iz [5], gde su vrednosti poprečnih preseka zaštitnih provodnika dati tablično. Minimalna površina poprečnog preseka zaštitnog provodnika, a samim tim i PPU, generalno se određuje primenom izraza za toplotni impuls (Džulov integral). Prema ovom izrazu uzimaju se u obzir intenzitet struje kvara (zemljospoja) i vreme trajanja kvara, kao i konstrukcioni parametri: materijal provodnika, materijal izolacije, početna i krajnja (maksimalno dozvoljena) temperatura izolacije, [5-7].

Početna vrednost temperature PPU zavisi od mesta njegovog polaganja, tj. od udaljenosti PPU od energetskog kabla. Gubici koji se u samom PPU mogu pojaviti zbog cirkulacione struje jesu posledica promenljivog magnetnog polja koje postoji u okolini jednožilnih kablova, [8]. Ako se na sredini trase voda izvrši transpozicija PPU, cirkulaciona struja postaje zanemarljiva, a samim tim i gubici u provodniku. Polaganje PPU uz sam kablovski vod koji je opterećen trajno dozvoljenom strujom predstavlja najnepovoljniji slučaj, jer je temperatura PPU tada najviša. Sa povećanjem rastojanja između PPU i energetskih kablova dolazi do smanjenja njegove temperature. Ukoliko se pri određivanju minimalnog poprečnog preseka PPU za

njegovu početnu temperaturu koristi vrednost temperature okolnog tla, može se napraviti određena greška jer se PPU nalazi u blizini kablovskog voda. Iz tog razloga su u ovom radu prikazani i komentarisani rezultati proračuna temperature i jednosekundne struje za PPU. Samim tim prikazan je uticaj pozicije PPU na vrednost početne temperature, a zatim i na dozvoljenu vrednost struje zemljospoja koja se može pojaviti u ovom provodniku. S obzirom na to da za jednožilne kablove sa velikim poprečnim presecima ( $> 630 \text{ mm}^2$ ), [9], pojedini proizvođači preporučuju uzemljenje metalnih ekrana samo sa jedne strane, [10], primena PPU postaje nužna. Iz tog razloga je u ovom radu analizirana primena PPU kod podzemnih vodova sa kablovima tipa Cu/XLPE/CTS/PVC/AWA/PVC 19/33 kV sa provodnicima poprečnih preseka  $800 \text{ mm}^2$  i  $1.000 \text{ mm}^2$ .

U nastavku rada, u Poglavlju 2, predstavljene su metode uzemljenja metalnih ekrana kablova koje podrazumevaju primenu PPU. U Poglavlju 3 prikazan je postupak za proračun minimalnog poprečnog preseka PPU. Postupak numeričkog proračuna temperature energetskih kablova i PPU sa geometrijskim i toplotnim parametrima predstavljen je u Poglavlju 4. Na kraju su, u Poglavlju 5, prikazani i diskutovani rezultati numeričkog proračuna temperature energetskih kablova i PPU sa izolacijom od PVC i XLPE. Takođe, prikazani su i komentarisani rezultati proračuna jednosekundne struje kvara kroz PPU u zavisnosti od njegove pozicije.

## 2. PRIMENA PARALELNOG PROVODNIKA UZEMLJENJA KOD KABLOVSKIH VODOVA

Galvansko spajanje i direktno uzemljenje metalnih ekrana jednožilnih kablova na jednom kraju izvodi se u slučaju postojanja velikih vrednosti cirkulacionih struja pri direktnom uzemljenju metalnih ekrana na oba kraja. Ove struje se mogu eliminisati i primenom *cross-bonding* sistema vezivanja metalnih ekrana. Međutim, ukoliko nema tehničke mogućnosti i ekonomske opravdanosti za to, izvodi se uzemljenje metalnih ekrana na jednom kraju. Uzemljenje metalnih ekrana samo na jednom kraju obično se izvodi kod kablovskih vodova dužine do 500 m, [1]. Ograničenje dužine kablovskog voda sa ovakvim načinom uzemljenja metalnih ekrana neophodno je zbog pojave indukovano napona na neuzemljenom kraju voda, a koji može premašiti vrednost bezopasnog napona, [11]. U normalnom pogonu napon metalnog ekrana na uzemljenom kraju jednak je nuli i postepeno raste kako se ide ka neuzemljenom kraju, gde ima maksimalnu vrednost. Vrednost napona metalnog ekrana na neuzemljenom kraju direktno zavisi od dužine voda i jačine struje u provodniku kabla. Osim indukovanih opasnih napona, na neuzemljenim krajevima metalnih ekrana mogu se pojaviti i prenaponi uzrokovani zemljospojevima, [11], komutacijama ili atmosferskim pražnjenjima, [12]. Usled ovih prenapona direktno su ugroženi spoljašnji plaševi jednožilnih kablova. Iz tog razloga se na neuzemljenim krajevima metalnih ekrana postavljaju ograničavači

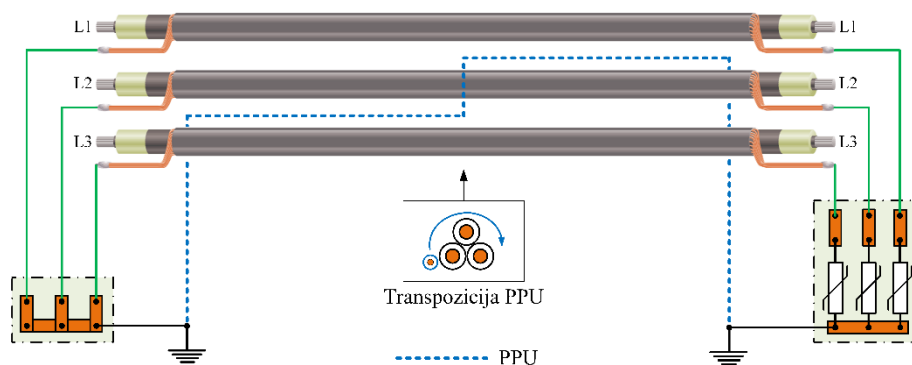
napona (odvodnici prenapona), kao što je to pokazano na Slici 1.

PPU se direktno vezuje za uzemljivače koji se nalaze na oba kraja kablovskog voda čime se obezbeđuje provodni put za struju zemljospoja. U slučaju kada kablovski vod povezuje komponente koje su deo istog postrojenja, tj. jednog uzemljivača, tada nema potrebe za instalacijom PPU, [3]. S obzirom na to da se PPU polaže paralelno sa jednožilnim kablovima, može doći do pojave cirkulacione struje u samom PPU, što je direktna posledica promenljivog magnetnog polja koje stvaraju trofazne struje za cirkulacionu struju formira se od PPU, jednog lokalnog uzemljivača, zemlje i drugog lokalnog uzemljivača. Da bi se ova cirkulaciona struja smanjila, vrši se transpozicija PPU na sredini trase voda (Slika 1). Ukoliko je neophodno, duž trase se vrši višestruka transpozicija PPU, [3]. Za slučaj da se na metalnom ekranu pri zemljospoju može pojaviti nedopustivo visoka vrednost prenapona, neophodno je izvršiti dodatno uzemljenje metalnih ekrana na sredini voda, [11].

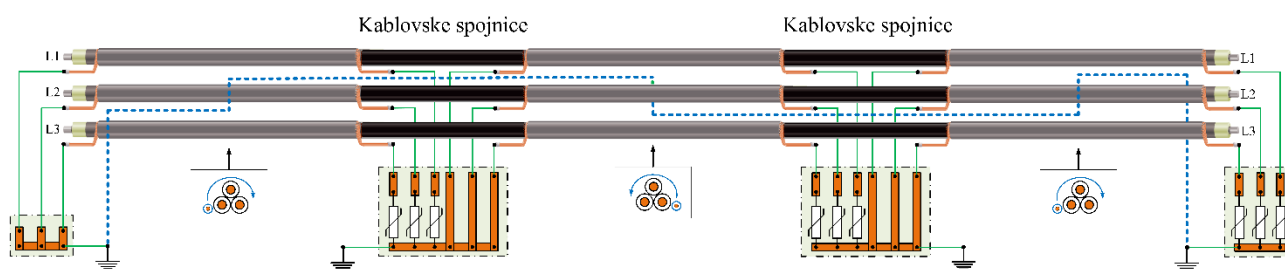
Ako se ovakav sistem uzemljenja metalnih ekrana želi primeniti kod relativno dugih kablovskih vodova, onda se čitava trasa voda mora podeliti na više sekcija, [12]. Na Slici 2 prikazan je primer kablovskog voda koji je podeljen na tri sekcije. U svakoj sekciji metalni ekrani su na jednom kraju galvaniski spojeni i direktno uzemljeni, dok su na drugom kraju povezani sa uzemljivačem preko ograničavača napona. U jednom takvom sistemu dužine pojedinih sekcija ne moraju da budu jednake, kao što je to slučaj kod *cross-bonding* sistema, već je bitno da se ne premaši maksimalni dozvoljeni indukovani napon na krajevima pojedinih sekcija. Na Slici 3 prikazan je kablovski vod sa uzemljenim metalnim ekranima na sredini trase. Metalni ekrani su uzemljeni preko

ograničavača napona na oba kraja voda. U ovom slučaju napon metalnih ekrana na sredini voda je jednak nuli i postepeno raste kako se ide prema krajevima kablovskog voda. Uzemljenje metalnih ekrana na jednom kraju izvodi se i u slučaju delimične transpozicije metalnih ekrana (delimični *cross-bonding* sistem), kao što je to pokazano na Slici 4. Naime, *cross-bonding* sistem se ponekad ne može izvesti na celoj trasi kablovskog voda. Tada se metalni ekrani poslednje sekcije kablovskog voda, koja ne pripada *cross-bonding* sistemu, galvaniski spajaju i direktno uzemljuju samo na jednom kraju. Iz tog razloga se na poslednjoj sekciji voda obično instalira PPU, [13].

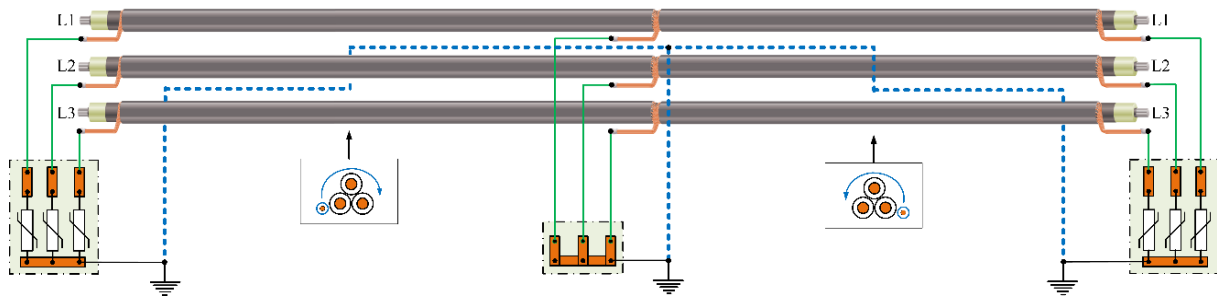
Položaj PPU u odnosu na kablovski vod zavisi od razmeštaja kablova u njemu. Ukoliko su jednožilni kablovi položeni u horizontalnoj ravni na većem međusobnom rastojanju, PPU se postavlja između dva jednožilna kablova. Takođe, u tom slučaju potrebno je da rastojanje između PPU i srednjeg energetskog kablova ima vrednost 70% rastojanja između dva energetska kablova, [4]. U slučajevima kada se jednožilni kablovi dodiruju ne postoji mogućnost polaganja PPU između energetskih kablova. Tada PPU treba postaviti uz same energetske kablove. Kod svih načina polaganja neophodna je transpozicija PPU na sredini trase voda, osim u situacijama kada se vrši transpozicija jednožilnih energetskih kablova duž trase, [14]. Transpozicijom PPU na sredini kablovskog voda smanjuje se cirkulaciona struja i dodatni gubici koji se pri tome generišu. Osim toga, dodatni pozitivni efekat transpozicije PPU predstavlja smanjenje indukovanih napona na neuzemljenim krajevima metalnih plašteva, [4, 11]. Uz standardne načine polaganja PPU, u radu [8] razmatran je slučaj polaganja PPU u sredini trougaone formacije energetskih kablova kada je cirkulaciona struja zanemarljivo mala (reda mA).



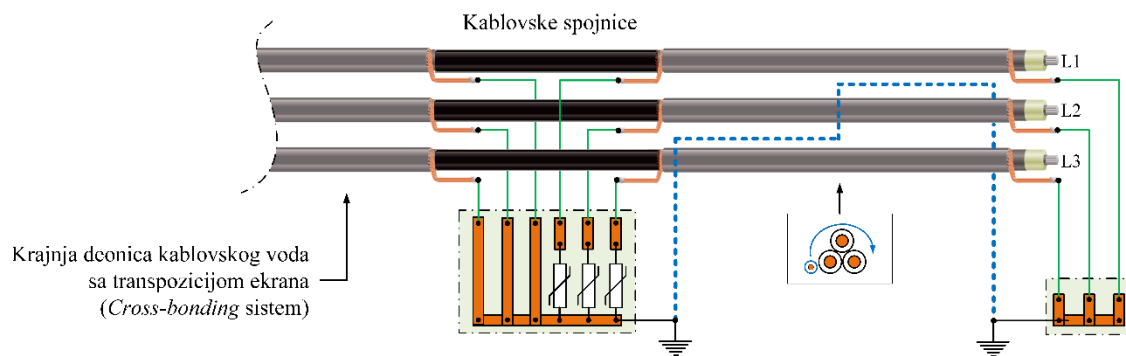
Slika 1. Primena PPU na kablovskom vodu čiji su metalni ekrani galvaniski spojeni i direktno uzemljeni na jednom kraju



Slika 2. Primena PPU na kablovskom vodu podeljenom u tri sekcije



Slika 3. Primena PPU na kablovskom vodu čiji su metalni ekrani galvaniski spojeni i uzemljeni na sredini voda



Slika 4. Primena PPU na preostaloj sekciji kablovskog voda sa delimičnim cross-bonding sistemom

### 3. IZBOR MINIMALNOG POPREČNOG PRESEKA PARALELNOG PROVODNIKA UZEMLJENJA

Minimalna površina poprečnog preseka PPU zavisi od više parametara. Generalno, uslovljena je maksimalno dozvoljenom temperaturom materijala od kojeg je izrađena izolacija PPU. Vreme trajanja kvara, odnosno vreme trajanja proticanja struje kroz PPU je relativno kratko (do nekoliko sekundi). Pretpostavlja se da u tom vremenu nema odvođenja toplote od PPU prema ambijentu, pa se proces njegovog zagrevanja smatra adijabatskim. Tada se sva toplota troši na porast temperature PPU, pa se toplotni impuls može definisati sa [6, 7]:

$$\int_0^{t_k} i_k^2 \cdot dt = k^2 S^2, \quad (1)$$

gde je  $i_k$  – trenutna vrednost struje kvara koja protiče kroz PPU u A,  $t_k$  – vreme trajanja kvara u s,  $S$  – površina poprečnog preseka PPU u  $m^2$ ,  $k$  – koeficijent čija vrednost zavisi od toplotnih i električnih karakteristika materijala provodnika i izolacije PPU u  $(A \cdot s^{0.5})/m$ . Leva strana jednačine (1) predstavlja toplotni impuls oslobođen u provodniku tokom vremenskog intervala trajanja kvara i izražava se u  $A^2 \cdot s$ .

Vremenski oblik struje kvara  $i_k$  je neperiodičnog oblika zbog postojanja jednosmerne komponente struje kvara. Zbog toga su proračun i primena integrala sa leve strane jednakosti (1) komplikovani za inženjersku praksu. Pojednostavljena

formula za proračun minimalne površine poprečnog preseka zaštitnog provodnika koja uzima u obzir adijabatske uslove i koja važi za maksimalno vreme trajanja kvara do 5 s je, prema [6, 7]:

$$S \geq \frac{I_k}{k} \sqrt{t_k}, \quad (2)$$

gde  $I_k$  predstavlja efektivnu vrednost struje kvara koja protiče kroz PPU. Vrednost koeficijenta  $k$  zavisi od toplotnih i električnih karakteristika materijala provodnika PPU, kao i od početne i maksimalno dozvoljene temperature materijala izolacije PPU. Ovaj koeficijent se određuje pomoću izraza, [6, 7]:

$$k = \sqrt{\frac{c}{\alpha_0 \cdot \rho_0} \ln \frac{1 + \alpha_0 \cdot \theta_{\max}}{1 + \theta_0 \cdot \alpha_0}}, \quad (3)$$

gde je  $c$  – specifični zapreminski toplotni kapacitet materijala provodnika u  $J/(m^3 \cdot K)$ ,  $\alpha_0$  – temperaturni koeficijent specifične električne otpornosti materijala provodnika u  $K^{-1}$ ,  $\rho_0$  – specifična električna otpornost materijala provodnika na početnoj temperaturi u  $\Omega \cdot m$ ,  $\theta_0$  – početna temperatura provodnika u  $^{\circ}C$  i  $\theta_{\max}$  – krajnja temperatura provodnika u  $^{\circ}C$ . Vrednosti za  $\alpha_0$ ,  $\rho_0$  i  $c$  za materijale od kojih se izrađuju provodnici i ekrani date su u Tabeli A.I iz Priloga, dok su vrednosti za početnu i krajnju temperaturu,  $\theta_0$  i  $\theta_{\max}$  različitih izolacionih materijala date u Tabeli A.II iz Priloga.

U Tabeli A.II date su vrednosti početnih temperatura za materijale izolacije i one zapravo predstavljaju maksimalne temperature izolacije pri referentnim uslovima, odnosno pri normalnim pogonskim uslovima. U izrazu (3) ove temperature predstavljaju početne ukoliko je zaštitni provodnik, tj. PPU, sastavni deo energetskog kabla (sastavni deo višezilnog kabla). S obzirom na to da se u ovom radu razmatra slučaj kablovskog voda sa tri jednožilna kabla, PPU nije sastavni deo višezilnog kabla i njegova početna temperatura može imati i niže vrednosti. Ukoliko se PPU polaže uz same energetske kablove, može se pretpostaviti da je njegova početna temperatura približno jednaka temperaturi spoljašnje površine nekog od tri energetska kabla u vodu. Međutim, PPU se može postaviti i na odgovarajućem odstojanju od kablovskog voda kao što je to učinjeno u [4]. U tom slučaju sprovodi se numerički proračun temperature PPU primenom metode konačnih elemenata.

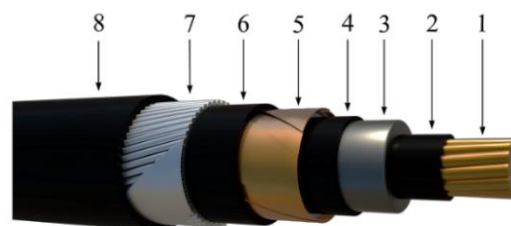
#### 4. NUMERIČKI PRORAČUN TEMPERATURA ENERGETSKOG KABLA I PARALELNOG PROVODNIKA UZEMLJENJA

S obzirom na to da se polaže paralelno sa kablovskim vodom, PPU se nalazi u njegovom temperaturnom polju i ima određenu temperaturu. U stacionarnim uslovima, temperatura PPU zavisi od gubitaka u energetskim kablovima i predstavlja početnu temperaturu PPU za neko havarijsko stanje ( $\theta_0$ ). Samim tim ova temperatura se mora uzeti u obzir pri proračunu koeficijenta  $k$ , odnosno pri proveru uslova za minimalni poprečni presek PPU. Najnepovoljniji slučaj je kada je PPU instaliran uz sam kablovski vod i tada je početna temperatura  $\theta_0$  maksimalna. Takođe, ovde se razmatra najnepovoljniji slučaj po osnovu strujnog opterećenja kablovskog voda, tj. slučaj kada su jednožilni kablovi opterećeni trajno dozvoljenom strujom. S aspekta cirkulacione struje kroz PPU razmatra se povoljniji slučaj – pretpostavlja se da je zbog transpozicije PPU na sredini voda uticaj cirkulacione struje eliminisan i da nema generisanja toplote u samom PPU usled gubitaka.

Numerički proračun temperaturnog polja u okolini kablovskog voda izvršen je softverom *FEMM 4.2* (u modulu za toplotne proračune – *Heat Flow Problem*) primenom metode konačnih elemenata, [15]. Rešavani domen kreiran je saglasno tehničkom izveštaju IEC TR 62095, [16], a njegove dimenzije su  $40\text{ m} \times 20\text{ m}$ . Početni uslovi su uključili zapreminske izvore toplote uzrokovane gubicima u pojedinim elementima konstrukcije energetskih kablova. Ovi izvori toplote su prethodno određeni analitičkim proračunom trajno dozvoljenog strujnog opterećenja saglasno standardu IEC 60287-1-1, a dobijene vrednosti se mogu naći u [17]. Svi toplotni i električni parametri razmatranih kablova preseka provodnika od  $800\text{ mm}^2$  i  $1.000\text{ mm}^2$  takođe su dati u [17]. Granični uslovi definisani su prema [16] i to tako da je gornja granica rešavanog domena (površina zemlje) modelirana graničnim uslovom konstantne temperature od  $15^\circ\text{C}$ , dok su preostale granice (leva, desna i donja) modelirane adijabatskim graničnim uslovom.

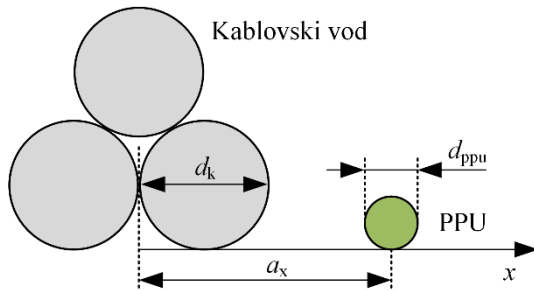
Numerički proračuni temperature izvršeni su za slučaj jednožilnih kablova tipa Cu/XLPE/CTS/PVC/ AWA/PVC 19/33 kV, [9]. Konstrukcija ovog kabla prikazana je na

Slici 5. Pretpostavlja se da su jednožilni kablovi instalirani u formaciji trougla sa centrom na dubini od  $0,8\text{ m}$ . Razmatrana su dva različita poprečna preseka provodnika kablova, od  $800\text{ mm}^2$  i  $1.000\text{ mm}^2$ . Kao PPU upotrebljen je niskonaponski jednožilni kabl sa provodnikom od pouzanih bakarnih žica klase 2. Takođe, razmatrana su dva različita materijala izolacije PPU: od PVC i XLPE. Nazivni poprečni presezi PPU izabrani su saglasno uslovu za minimalne poprečne preseke zaštitnih provodnika iz tabela datih u [5]. Na osnovu vrednosti prečnika provodnika jednožilnih kablova izračunati su stvarni poprečni presezi provodnika koji za kablove nazivnih preseka  $800\text{ mm}^2$  i  $1.000\text{ mm}^2$  iznose redom  $945,7\text{ mm}^2$  i  $1.134,1\text{ mm}^2$  [18]. Kod energetskih kablova čiji su nazivni poprečni presezi provodnika veći od  $630\text{ mm}^2$ , minimalni poprečni presek PPU kao zaštitnog provodnika treba da bude jednak 25% stvarnog poprečnog preseka provodnika energetskog kabla, [5]. Tako su dobijene sledeće vrednosti minimalnog poprečnog preseka PPU:  $0,25 \cdot 945,7 = 236,4\text{ mm}^2$  – za kablovski vod sa provodnicima preseka  $800\text{ mm}^2$  i  $0,25 \cdot 1.134,1 = 283,5\text{ mm}^2$  – za kablovski vod sa provodnicima preseka  $1.000\text{ mm}^2$ , [18]. Ovako su određeni nazivni poprečni presezi provodnika PPU ( $240\text{ mm}^2$  i  $300\text{ mm}^2$ ) koji su korišćeni u daljim proračunima temperature i jednosekundnih struja.



Slika 5. Konstrukcija razmatranog energetskog kabla: 1 – provodnik; 2 – ekran provodnika; 3 – izolacija; 4 – ekran izolacije; 5 – metalni ekran; 6 – postelja; 7 – armatura; 8 – spoljašnji zaštitni plašt

Numerički proračuni temperature izvršeni su za različite položaje PPU u odnosu na energetske kablove. Prema Slici 6, PPU leži na istoj horizontalnoj ravni, kao i dva donja jednožilna energetska kabla iz trougaone formacije. Ovakav položaj PPU u odnosu na energetske kablove je odabran prema primerima iz [4, 11]. Kao što se može videti sa Slike 6, najmanja vrednost horizontalnog odstojanja između centara PPU i trougaone formacije jednožilnih energetskih kablova ( $a_x$ ) određena je spoljašnjim prečnicima jednožilnih kablova ( $d_k$ ) i PPU ( $d_{ppu}$ ). Spoljašnji prečnici jednožilnih kablova sa provodnicima preseka  $800\text{ mm}^2$  i  $1.000\text{ mm}^2$  redom iznose  $d_{k,800} = 71\text{ mm}$  i  $d_{k,1000} = 75,5\text{ mm}$  [17]. Spoljašnji prečnici PPU sa izolacijom od PVC preseka  $240\text{ mm}^2$  i  $300\text{ mm}^2$  redom iznose  $d_{ppu,240} = 26,2\text{ mm}$  i  $d_{ppu,300} = 29,2\text{ mm}$ , dok u slučaju PPU sa izolacijom od XLPE imaju vrednosti  $d_{ppu,240} = 25,8\text{ mm}$  i  $d_{ppu,300} = 27,8\text{ mm}$ .



Slika 6. Položaj PPU u odnosu na trougaonu formaciju jednožilnih energetskih kablova

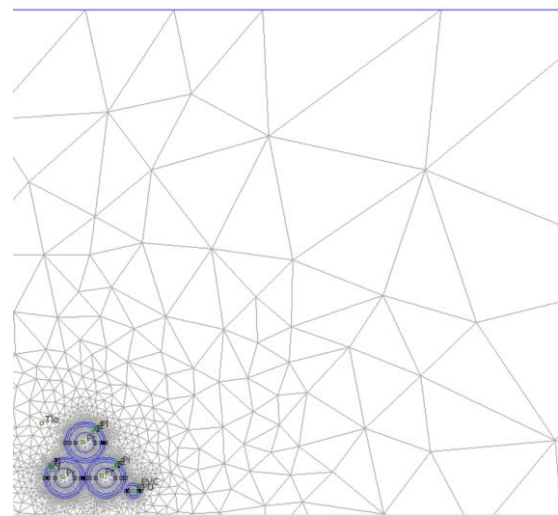
## 5. REZULTATI I DISKUSIJA

Kako je u svim proračunima razmatrana primena PPU uz pretpostavku da su metalni ekrani energetskih kablova uzemljeni samo na jednom kraju, to znači da nije bilo uticaja cirkulacionih struja na dodatno zagrevanje kablova i PPU. Dakle, pošlo se od pretpostavke da se, osim u provodnicima, gubici generišu i u metalnim ekranima usled vrtložnih struja, [19]. Za date uslove polaganja, analitičkim proračunom dobijeno je da trajno dozvoljena strujna opterećenja za kablovske vodove sa provodnicima preseka od 800 mm<sup>2</sup> i 1.000 mm<sup>2</sup> iznose  $I_{td,800} = 970,2$  A i  $I_{td,1000} = 1.055,5$  A. Na osnovu ovih vrednosti trajno dozvoljenih struja, kao i gubitaka usled vrtložnih struja u metalnim ekranima, određene su zapreminske snage izvora toplote u provodnicima i ekvivalentnim ekranima kablova. Zapreminske snage izvora toplote u provodnicima i ekvivalentnim metalnim ekranima energetskih kablova sa provodnicima preseka 800 mm<sup>2</sup> iznose  $Q_{p,800} = 92.944,6$  W/m<sup>3</sup> i  $Q_{ee,800} = 1.295,7$  W/m<sup>3</sup>, dok za energetske kablove sa provodnicima preseka 1.000 mm<sup>2</sup> imaju vrednosti  $Q_{p,1000} = 27.896,3$  W/m<sup>3</sup> i  $Q_{ee,1000} = 1.434$  W/m<sup>3</sup>. Zapreminske snage izvora toplote u izolaciji kablova određene su prema nazivnom faznom naponu korišćenog tipa kabla, dielektričnim karakteristikama i geometriji izolacije od XLPE. Za energetske kablove sa provodnicima preseka 800 mm<sup>2</sup> i 1.000 mm<sup>2</sup> njihove vrednosti redom iznose  $Q_{xlpe,800} = 155,8$  W/m<sup>3</sup> i  $Q_{xlpe,1000} = 156,1$  W/m<sup>3</sup> [17].

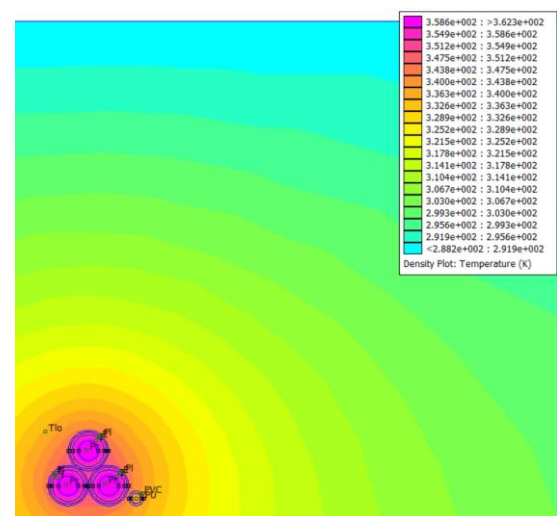
Početni proračuni temperature u FEMM 4.2 izvršeni su samo sa energetskim kablovima, tj. bez prisustva PPU. To je učinjeno zbog numeričke verifikacije analitički izračunatih trajno dozvoljenih strujnih opterećenja i zapreminskih gubitaka u provodnicima i ekvivalentnim metalnim ekranima. Na ovaj način dobijene su maksimalne vrednosti temperatura provodnika koje iznose: 88,9°C – za kablovski vod sa provodnicima preseka 800 mm<sup>2</sup> i 89°C – za kablovski vod sa provodnicima preseka 1.000 mm<sup>2</sup>. S obzirom na to da odstupanja numeričkih temperatura provodnika od 800 mm<sup>2</sup> i 1.000 mm<sup>2</sup> u odnosu na njima odgovarajuće analitičke temperature iznose oko 1°C, može se smatrati da su analitičke vrednosti strujnih opterećenja i gubitaka u provodnicima i ekranima tačne. Time je potvrđeno da se predloženi numerički model može koristiti za proračun raspodele temperaturnog polja po rešavanom domenu, a samim tim i za određivanje početne temperature PPU instaliranog u blizini kablovskog voda.

Na Slici 7 prikazana je mreža konačnih elemenata generisana u delu rešavanog domena sa jednožilnim

kablovima sa provodnicima poprečnog preseka 800 mm<sup>2</sup> i PPU sa provodnikom poprečnog preseka 240 mm<sup>2</sup>. U ovom primeru, PPU je položen uz sami kablovski vod i tada rastojanje  $a_x$  ima minimalnu vrednost. Za ovaj položaj PPU generisana je raspodela temperature po razmatranom domenu sa Slike 8. Očigledno je da u ovom slučaju PPU, zbog svoje lokacije, ima maksimalnu vrednost temperature. Prema [4], PPU se prilikom transpozicije postavlja simetrično u odnosu na kablovski vod, tj. na jednaka odstojanja od kablovskog voda u obe sekcije. Kako je raspodela temperaturnog polja simetrična u odnosu na vertikalnu osu (koja prolazi kroz centar trougaone formacije kablovskog voda), to znači da ne postoji potreba za proračunom temperature PPU za slučaj gde se on nalazi sa druge strane voda posle transpozicije. U ovom radu su svi proračuni temperature urađeni sa PPU koji se nalazi sa desne strane kablovskog voda, kao što je to prikazano u primeru sa Slike 8.



Slika 7. Prikaz mreže konačnih elemenata generisane u delu rešavanog domena sa energetskim kablovima i PPU



Slika 8. Raspodela temperature u delu rešavanog domena sa energetskim kablovima i PPU

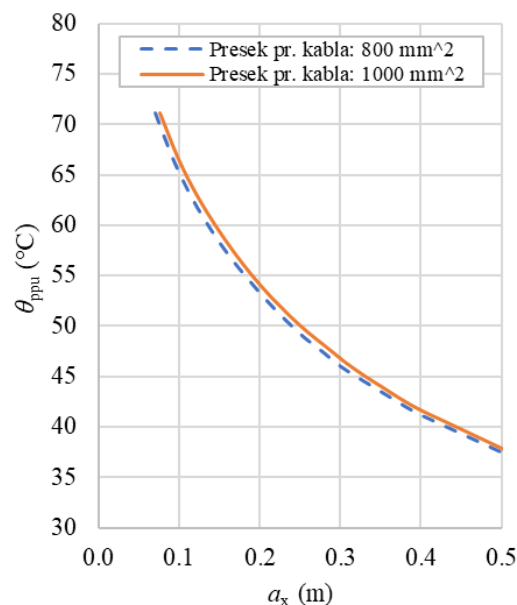
Numerički izračunate temperature PPU u funkciji njihove pozicije  $a_x$  prikazane su na Slici 9. Ovako izračunate vrednosti temperature predstavljaju početne temperature PPU  $\theta_0$  koje se koriste za proračun koeficijenta  $k$  prema izrazu (3). Samim tim, pozicija PPU sa provodnikom datog poprečnog preseka može uticati na vrednost dozvoljene struje kvara koja u određenom vremenskom intervalu protiče kroz PPU. Na Slici 10 prikazane su analitičke vrednosti struje kvara kroz PPU sa izolacijom od PVC izračunate pomoću izraza (2) za trajanje od 1 s (tzv. jednosekundna struja). U proračunima za ovu vrstu izolacije PPU korišćena je vrednost maksimalne temperature izolacije od 140°C (Tabela A.II). Date vrednosti jednosekundnih struja kvara ( $I_{k,1s}$ ) zavise, saglasno izrazima (2) i (3), od početne temperature  $\theta_0$ , a samim tim i od odstojanja  $a_x$ . Jednosekundne struje kvara za PPU sa provodnikom preseka 240 mm<sup>2</sup> i PVC izolacijom kreću se od 24,2 kA, što odgovara poziciji PPU uz sam kablovski vod do vrednosti od 30,2 kA koja odgovara poziciji PPU od  $a_x = 0,5$  m. Kada je u pitanju PPU sa provodnikom preseka od 300 mm<sup>2</sup>, vrednosti jednosekundnih struja su više i kreću se od 30,3 kA za poziciju PPU uz sam kablovski vod do 37,8 kA za poziciju PPU od  $a_x = 0,5$  m. Maksimalna odstupanja vrednosti jednosekundnih struja za oba PPU i kablovske vodove sa provodnicima preseka 800 mm<sup>2</sup> i 1.000 mm<sup>2</sup> iznosi 0,1 kA.

Vrednosti jednosekundnih struja za PPU sa provodnicima preseka 240 mm<sup>2</sup> i 300 mm<sup>2</sup> i izolacijom od XLPE očekivano su više od onih dobijenih za PPU sa izolacijom od PVC. Razlog tome je znatno viša maksimalna (krajnja) temperatura izolacije, koja u slučaju XLPE izolacije iznosi 250°C (Tabela A.II). Izračunate vrednosti jednosekundnih struja u funkciji rastojanja  $a_x$  za slučaj PPU sa izolacijom od XLPE prikazane su na Slici 11. Za razmatrane položaje PPU sa provodnikom poprečnog preseka 240 mm<sup>2</sup> i izolacijom od XLPE jednosekundne struje imaju vrednosti od 36,8 kA do 41 kA. U slučaju PPU sa provodnikom preseka 300 mm<sup>2</sup> i istog opsega vrednosti za rastojanje  $a_x$ , jednosekundna struja imala bi vrednost iz opsega od 46 kA do 51,3 kA.

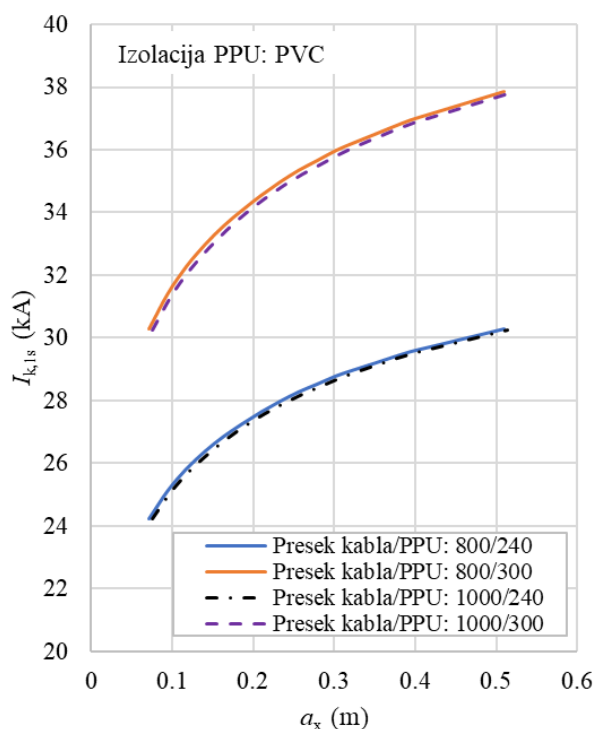
Na osnovu izračunatih vrednosti za jednosekundnu struju ( $I_{k,1s}$ ) sa slika 10 i 11, moguće je izračunati dozvoljene struje kvara ( $I_k$ ) za bilo koje drugo vreme trajanja kvara prema izrazu

$$I_k = I_{k,1s} \sqrt{t_k^{-1}}. \quad (4)$$

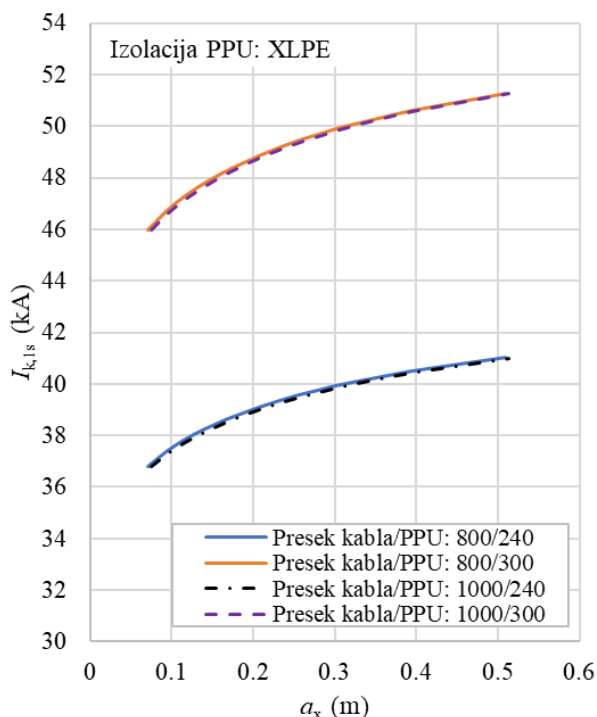
gde je  $t_k$  vreme trajanja kvara u s. Odabir odgovarajućeg poprečnog preseka i materijala izolacije PPU zavisi od vrednosti struje zemljospoja koja bi se imala na kraju razmatranog kablovskog voda, kao i od vremena trajanja kvara, što svakako zavisi od vremena reagovanja zemljospojne zaštite.



Slika 9. Temperature PPU u zavisnosti od njihovog odstojanja u odnosu na kablovske vodove sa provodnicima preseka 800 mm<sup>2</sup> i 1.000 mm<sup>2</sup>



Slika 10. Vrednosti jednosekundne struje kroz PPU sa izolacijom od PVC preseka 240 mm<sup>2</sup> i 300 mm<sup>2</sup> instaliranih u blizini energetskih kablova sa provodnicima preseka 800 mm<sup>2</sup> i 1.000 mm<sup>2</sup>



Slika 11. Vrednosti jednosekundne struje kroz PPU sa izolacijom od XLPE preseka 240 mm<sup>2</sup> i 300 mm<sup>2</sup> instaliranih u blizini energetskih kablova sa provodnicima preseka 800 mm<sup>2</sup> i 1.000 mm<sup>2</sup>

## 6. ZAKLJUČAK

U ovom radu su analizirani podzemni jednožilni kablovi instalirani u trougaonoj formaciji sa metalnim ekranima koji su galvanski spojeni i uzemljeni samo na jednom kraju. Opisan je razlog za primenu PPU kod kablovskih vodova sa ovakvim načinom vezivanja metalnih ekrana. Za slučaj određivanja minimalnog poprečnog preseka PPU kao zaštitnog provodnika definisana je zavisnost između parametara PPU, struje kvara (zemljospoja) i vremena trajanja kvara. Kao važan parametar izdvojena je početna temperatura izolacije PPU, zbog čega je bilo neophodno uvažiti i odstojanje između kablovskog voda i PPU. Za proračun temperature korišćena je metoda konačnih elemenata. Dati su rezultati proračuna temperature za PPU sa provodnicima od bakra poprečnih preseka 240 mm<sup>2</sup> i 300 mm<sup>2</sup> i dve različite vrste izolacije, od PVC i XLPE. Proračuni su izvedeni za kablovske vodove izrađene od jednožilnih kablova tipa Cu/XLPE/CTS/PVC/AWA/PVC 19/33 kV velikih poprečnih preseka provodnika (800 mm<sup>2</sup> i 1.000 mm<sup>2</sup>). Prema rezultatima proračuna, sa porastom odstojanja između kablovskog voda i PPU dolazi do znatnog pada temperature PPU, što rezultira većim dopuštenim vrednostima jednosekundnih struja kroz korišćeni PPU. Dalja istraživanja u vezi sa kablovskim vodovima sa PPU obuhvatiće različite vrste materijala provodnika PPU i različite formacije jednožilnih energetskih kablova, a time i ostale moguće pozicije PPU u odnosu na kablovski vod.

## ZAHVALNICA

Ovaj rad je zasnovan na istraživanju sprovedenom u okviru naučnoistraživačkog rada na akreditovanim visokoškolskim ustanovama u 2025. godini br. 451-03-137/2025-03/200132, 451-03-18/2025-03/200155 i 451-03-137/2025-03/200102 podržanih od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije.

## LITERATURA

- [1] L. Heinhold, „Power Cables and Their Application – Part 1”, Berlin: Siemens Aktiengesellschaft, 1990.
- [2] D. Tasić, „Osnovi elektroenergetske kablovske tehnike”, Elektronski fakultet, Niš, 2001.
- [3] Sheath Bonding Systems of AC Transmission Cables – Design, Testing, and Maintenance: Reference 797, Technical Brochure, CIGRE, Paris, 2020.
- [4] IEEE Std 575; IEEE Guide for Bonding Shields and Sheaths of Single-Conductor Power Cables Rated 5 kV through 500 kV. IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2014.
- [5] Electrical Installations (Known as the Australian/New Zealand Wiring Rules). AS/NZS 3000:2018.
- [6] Protective Earth Cable Sizing. Electrotechnik: Electrical Power Systems Design and Analysis Software. [citirano 4. 4. 2025] Dostupno na: <https://elek.com/articles/protective-earth-cable-sizing/>
- [7] M. Mitolo, M. Tartaglia, „An Analytical Evaluation of the Factor k2 for Protective Conductors”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 48, no. 1, str. 211-217, 2012.
- [8] J. E. G. Asorza, J. S. Colqui, F. F. da Silva, J. P. Filho, „Earth Continuity Conductor Location in Single-circuit Underground Transmission Line Using the Generalized Model”, *Electric Power Systems Research*, Vol. 235, 2024.
- [9] Standard MV power cables – BS6622/BS7835 Single Core Armoured 33 kV XLPE Stranded Copper Conductor. [citirano 4. 4. 2025] Dostupno na: <https://www.powerandcables.com/wp-content/uploads/2017/03/33kV-MV-Cables-BS6622-BS7835-Single-Core-XLPE-AWA-Stranded-Copper-Conductors.pdf>
- [10] Dynamic Cables Pvt. Ltd, str. 85 [citirano 4. 4. 2025] Dostupno na: [https://www.dynamiccables.co.in/DCL\\_product-catalogue.pdf](https://www.dynamiccables.co.in/DCL_product-catalogue.pdf)
- [11] S. Czapp, K. Dobrzynski, „Safety Issues Referred to Induced Sheath Voltages in High-Voltage Power Cables – Case Study”, *Applied Sciences*, Vol. 10, No. 19, 2020.
- [12] Hitachi ABB Power Grids, „Application note 3.1 – Cable Sheaths Overvoltage Protection”, 2020.
- [13] B. Lalević, „Elektroenergetski kablovi”, Beograd, 1993.
- [14] Cable Systems Electrical Characteristics: Reference 531, Technical Brochure, CIGRE, Paris, 2013.

- [15] Programski paket *Finite Element Method Magnetics*, verzija 4.2 – *FEMM 4.2*.  
[citirano 30. 5. 2025] Dostupno na:  
<http://www.femm.info/wiki/Download>
- [16] Electric cables – Calculations for Current Ratings – Finite Element Method. IEC TR 62095:2003, Ed. 1.0, 2003.
- [17] M. Šućurović, D. Klimenta, D. Tasić, „Correction of the IEC Formula for the Eddy-current Loss Factor: The Case of Single-core Cables in Trefoil Formation with Metallic Screens Bonded and Earthed at One End”, *Facta Universitatis-Series: Electronics and Energetics*, Vol. 37, No. 2, 2024.
- [18] M. Šućurović, D. Klimenta, D. Tasić, „Proračun minimalnog poprečnog preseka paralelnog provodnika uzemljenja za podzemne energetske kablove u trougaonoj formaciji sa metalnim ekranima uzemljenim na jednom kraju”, 14. Savetovanje o elektrodistributivnim mrežama sa regionalnim učešćem – CIREĐ Srbija, Zbornik radova, Broj rada: R-1.12., DOI broj: 10.46793/CIREĐ24.R-1.12MS, Kopaonik, 16-20. septembar 2024.
- [19] Electric cables – Calculation of the Current Rating – Part 1-1: Current Rating Equations (100% Load Factor) and Calculation of Losses – General. IEC 60287-1-1:2023 CMV, Ed. 3.0, 2023.

## DODATAK

Tabela A.I Parametri materijala provodnika i metalnih ekrana korišćenih za proračun faktora  $k$ , [6]

| Materijal                 |                        | $\rho_0$ ( $\Omega \cdot m$ ) | $\alpha_0$ ( $K^{-1}$ ) | $C$ ( $J/(mm^3 \cdot K)$ ) |
|---------------------------|------------------------|-------------------------------|-------------------------|----------------------------|
| Provodnik:                | – Bakar                | $1,7241 \cdot 10^{-5}$        | $3,93 \cdot 10^{-3}$    | $3,45 \cdot 10^{-3}$       |
|                           | – Aluminijum           | $2,8264 \cdot 10^{-5}$        | $4,03 \cdot 10^{-3}$    | $2,422 \cdot 10^{-3}$      |
| Metalni ekran i armatura: | – Olovo i legure olova | $21,4 \cdot 10^{-5}$          | $4 \cdot 10^{-3}$       | $1,44 \cdot 10^{-3}$       |
|                           | – Čelik                | $13,8 \cdot 10^{-5}$          | $4,5 \cdot 10^{-3}$     | $3,756 \cdot 10^{-3}$      |
|                           | – Nerđajući čelik      | $70 \cdot 10^{-5}$            | Zanemarljivo            | $3,756 \cdot 10^{-3}$      |
|                           | – Aluminijum           | $2,84 \cdot 10^{-5}$          | $4,03 \cdot 10^{-3}$    | $2,422 \cdot 10^{-3}$      |

Tabela A.II Početne i krajnje temperature izolacionih materijala, [6]

| Vrsta izolacije                                                                                                                    | Temperatura provodnika ( $^{\circ}C$ )                                         |                                         |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
|                                                                                                                                    | Pod normalnim pogonskim uslovima (pri trajno dozvoljenom strujnom opterećenju) | Maksimalna vrednost tokom kratkog spoja |
| Termoplastika (V-75, HFI-75-TP, TPE-75, V-90, HFI-90-TP, TP-90, V-90HT)<br>– $S \leq 300 \text{ mm}^2$<br>– $S > 300 \text{ mm}^2$ | 75                                                                             | 140                                     |
|                                                                                                                                    | 75                                                                             | 160                                     |
| Polietilen (PE, linearni RE niske gustine)<br>– $S \leq 300 \text{ mm}^2$<br>– $S > 300 \text{ mm}^2$                              | 70                                                                             | 140                                     |
|                                                                                                                                    | 70                                                                             | 160                                     |
| Umreženi elastomer:<br>– R-EP-90, R-CPE-90, R-HF-90, R-CSP-90<br>– R-HF-110, R-E-110                                               | 90                                                                             | 250                                     |
|                                                                                                                                    | 110                                                                            | 250                                     |
| Umreženi polietilen (XLPE):<br>– X-90, X-90UV, X-HF-90<br>– X-HF-110                                                               | 90                                                                             | 250                                     |
|                                                                                                                                    | 110                                                                            | 250                                     |
| Kablovi sa mineralnom izolacijom i spoljašnjim zaštitnim plaštom od metala                                                         | 100                                                                            | 250                                     |
| Za visoke temperature: R-S-150 i tip 150 fiber                                                                                     | 150                                                                            | 350                                     |
| Impregnirani papir                                                                                                                 | 85                                                                             | 250                                     |

## BIOGRAFIJE



**Marko Šućurović** je rođen 1988. godine u Trsteniku. Osnovne akademske studije završio je 2011. godine, a master akademske studije 2012. godine na Fakultetu tehničkih nauka u Čačku Univerziteta u Kragujevcu. Student je doktorskih studija Elektronskog fakulteta Univerziteta u Nišu, na modulu

Elektroenergetika. Glavne oblasti njegovog interesovanja su tehnika elektroenergetskih kablova, elektromagnetno i termičko modelovanje elemenata elektroenergetskih sistema i termičko modelovanje fotonaponskih tehnologija. Zaposlen je na Fakultetu tehničkih nauka u Čačku kao asistent. ORCID: 0000-0001-9574-6101.



**Dardan Klimenta** je rođen 1975. godine u Peći. Diplomirao je na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Prištini 1998. godine. Magistrirao je na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu 2001. godine, gde je i doktorirao 2007. godine. Glavne oblasti njegovog interesovanja su tehnika elektroenergetskih kablova,

elementi elektroenergetskih sistema, obnovljivi izvori energije, termički procesi i metoda konačnih elemenata. Zaposlen je na Fakultetu tehničkih nauka u Kosovskoj Mitrovici kao redovni profesor. ORCID: 0000-0003-0019-8371.



**Dragan Tasić** je rođen 1961. godine u Guberevcu, opština Leskovac. Diplomirao je 1986. godine na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu, gde je i magistrirao 1991. godine. Doktorirao je 1997. godine na Elektronskom fakultetu Univerziteta u Nišu. Glavne oblasti njegovog

interesovanja su analiza elektroenergetskih sistema, tehnika elektroenergetskih kablova, metode optimizacije u elektroenergetici i termički procesi. Zaposlen je na Elektronskom fakultetu u Nišu kao redovni profesor. ORCID: 0000-0001-5957-9617.

Marko M. Šučurović<sup>1</sup>, Dardan O. Klimenta<sup>2</sup>, Dragan S. Tasić<sup>3</sup>

# Determining the Temperature and Earth Fault Current of an Earth Continuity Conductor of Power Cables with Metallic Screens Bonded and Earthed at One End

<sup>1</sup> University of Kragujevac, Faculty of Technical Sciences, Čačak, Republic of Serbia\*<sup>2</sup> University of Priština in Kosovska Mitrovica, Faculty of Technical Sciences, Kosovska Mitrovica, Republic of Serbia<sup>3</sup> University of Niš, Faculty of Electronic Engineering, Niš, Republic of Serbia

Review article

## Highlights

- The paper presents examples of power cable installations using large single-core cables with metallic screens bonded and earthed at one end only
- It explains the purpose of an Earth Continuity Conductor (ECC) and outlines a method for calculating its minimum cross-sectional area
- The temperatures of selected ECCs are calculated numerically, followed by an analytical determination of the maximum permissible earth fault currents, based on the ECC's distance from the cable line

## Abstract

When a power cable line comprises large single-core cables, significant circulating currents and losses may occur in the metallic screens. If cross-bonding of these screens is not technically or economically justified, they can instead be bonded and earthed at one end only. This interrupts the earth fault current path, necessitating the use of an additional protective conductor – commonly referred to as an Earth Continuity Conductor (ECC) – to interconnect the local earthing systems at both ends of the line.

To prevent thermal damage to its insulation during fault conditions, the ECC must be accurately sized. Since it is placed near the power cables, it may be exposed to high ambient temperatures. This paper performs numerical calculations to assess the thermal behaviour of copper ECCs insulated with PVC and cross-linked polyethylene (XLPE), taking into account various distances from the power cables.

Following the temperature simulations, analytical methods are used to determine the maximum permissible earth fault currents for ECCs with cross-sectional areas of 240 mm<sup>2</sup> and 300 mm<sup>2</sup>. These calculations are based on single-core power cables of the Cu/XLPE/CTS/PVC/AWA/PVC 19/33 kV type (BS 6622), with conductor cross-sections of 800 mm<sup>2</sup> and 1000 mm<sup>2</sup>. It is assumed that the cables are laid directly in soil, without considering soil drying, and that due to transposition at the midpoint of the line, no circulating current flows through the ECC itself.

## Keywords

Earth Continuity Conductor (ECC), Finite Element Method (FEM), Metallic Screen Bonding Design, Trefoil Formation, Underground Power Cable

### Note:

This article represents an expanded, improved and additionally peer-reviewed version of the paper "Calculating Minimum Cross-Sectional Area of the Parallel-Earthing-Conductor for Underground Power Cables in Trefoil Formation with Metallic Screens Bonded and Earthed at one End", awarded by Expert Committee EC-1 Network Components at the 14<sup>th</sup> CIRED Serbia Conference, Kopaonik, September 16-20, 2024

Received: April 8<sup>th</sup>, 2025Reviewed: May 18<sup>th</sup>, 2025Modified: June 2<sup>nd</sup>, 2025Accepted: July 2<sup>nd</sup>, 2025

\*Corresponding author: Marko Šučurović, +381640570801

E - mail: [marko.sucurovic@ftn.kg.ac.rs](mailto:marko.sucurovic@ftn.kg.ac.rs)