

Марко М. Шућуровић<sup>1</sup>, Дардан О. Климента<sup>2</sup>, Драган С. Тасић<sup>3</sup>

# Одређивање температуре и струје земљоспоја паралелног проводника уземљења енергетских каблова са металним екранима уземљеним на једном крају

<sup>1</sup> Универзитет у Крагујевцу, Факултет техничких наука у Чачку, Србија\*<sup>2</sup> Универзитет у Приштини са привременим седиштем у Косовској Митровици, Факултет техничких наука, Косовска Митровица, Србија<sup>3</sup> Универзитет у Нишу, Електронски факултет у Нишу, Србија<https://doi.org/10.18485/epij.2025.3.2.1>

Прегледни рад

## Кључне поруке

- У раду су дати примери кабловских вода састављени од једножилних каблова великог попречног пресека чији су метални екрани уземљени само на једном крају
- Описани су разлози за примену паралелног проводника уземљења (ППУ), као и начин прорачуна његовог минималног попречног пресека
- Нумеричком методом израчунате су температуре ППУ, а затим су аналитички одређене максималне дозвољене струје земљоспоја у функцији растојања ППУ од кабловског вода

## Кратак садржај

Код кабловског вода израђеног од једножилних каблова великих попречних пресека проводника циркулационе струје и губици у металним екранима могу бити знатни. Уколико нема техничких и економских оправданости за извођење транспозиције металних екрана, они се могу галвански спојити и директно уземљити само на једном крају вода. У том случају долази до прекидања проводног пута за струје земљоспоја. Из тог разлога је неопходна употреба додатног заштитног проводника, тј. паралелног проводника уземљења (ППУ) којим се галвански повезују локални уземљивачи на почетку и на крају вода. ППУ се димензионише тако да његова изолација не буде топлотно угрожена при протицању струје квара. ППУ се полаже заједно са енергетским кабловима и због тога може имати високу почетну вредност температуре. С тим у вези, у овом раду су извршени нумерички прорачуни температуре за ППУ од бакра са изолацијом од PVC и умреженог полиетилена (XLPE). Прорачуни су извршени за различита растојања између ППУ и енергетских каблова. Након нумерички израчунате температуре аналитички су одређене максималне дозвољене струје земљоспоја које се могу појавити у ППУ попречних пресека 240 и 300 mm<sup>2</sup>. Прорачуни су изведени са једножилним енергетским кабловима типа Cu/XLPE/CTS/PVC/AWA/PVC 19/33 kV (BS 6622), пресека проводника 800 mm<sup>2</sup> и 1.000 mm<sup>2</sup>, под претпоставком да су положени директно у земљиште без исушивања. Такође, претпоставља се да је због транспозиције изведене на средини вода елиминисана циркулациона струја у самом ППУ.

## Кључне речи

Метода коначних елемената, метода уземљења металних екрана, паралелни проводник уземљења, подземни енергетски кабл, троугаона формација

### Напомена:

Овај чланак представља проширену, унапређену и додатно рецензирану верзију рада „Прорачун минималног попречног пресека паралелног проводника уземљења за подземне енергетске каблове у троугаоној формацији са металним екранима уземљеним на једном крају“, награђеног у Стручној комисији СТК-1 Компоненте мрежа, на 14. Саветовању CIRED Србија, Копаоник, 16-20. септембра 2024.

Примљено: 8. април 2025.

Рецензирано: 18. мај 2025.

Измењено: 2. јун 2025.

Одобрено: 2. јул 2025.

\*Кореспондирајући аутор: Марко Шућуровић, +381640570801

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

## 1. УВОД

Вредност трајно дозвољене струје средњенапонског кабловског вода зависи од температуре околног земљишта, топлотне отпорности тла, дубине полагања каблова, као и од конструкционих параметара кабла. Услед Џулових (*Joule*) губитака у проводним деловима (проводник, метални екран, арматура) генерише се топлота. У металном екрану губици настају као последица постојања циркулационих и вртложних струја, [1]. Код једножилних каблова циркулационе струје постоје уколико су метални екрани галвански повезани и директно уземљени на оба краја кабловског вода. У појединим ситуацијама неопходно је повећање струјног оптерећења кабла, што се између осталог може учинити смањењем губитака у металном екрану. Губици у металним екранима се могу смањити елиминисањем циркулационих струја, а у ту сврху примењују се различити начини повезивања и уземљења екрана као што су: транспозиција металних екрана (енг. *Cross-bonding system*) и галванско повезивање и директно уземљење металних екрана каблова само на једном крају (енг. *Single-point bonding system*). Применом ова два начина повезивања и уземљења екрана не елиминису се губици у металним екранима услед вртложних струја, [2].

При спајању и уземљењу металних екрана на једном крају онемогућено је протицање струје квара између два локална уземљивача која се налазе на почетку и на крају кабловског вода. Из тог разлога је код оваквог начина уземљења металних екрана неопходно коришћење паралелног проводника уземљења (ППУ). ППУ се полаже заједно са енергетским кабловима и то на одговарајући начин, у зависности од формације полагања једножилних каблова, [3, 4]. Површина попречног пресека ППУ, као заштитног проводника, мора имати одговарајућу вредност како при протицању струје квара не би дошло до оштећења његове изолације. Поједини стандарди дефинишу минималне попречне пресеке заштитних проводника, чије вредности зависе од материјала и стварног попречног пресека фазног проводника. Као пример, могу се навести подаци из [5], где су вредности попречних пресека заштитних проводника дати таблично. Минимална површина попречног пресека заштитног проводника, а самим тим и ППУ, генерално се одређује применом израза за топлотни импулс (Џулов интеграл). Према овом изразу узимају се у обзир интензитет струје квара (земљоспоја) и време трајања квара, као и конструкциони параметри: материјал проводника, материјал изолације, почетна и крајња (максимално дозвољена) температура изолације, [5-7].

Почетна вредност температуре ППУ зависи од места његовог полагања, тј. од удаљености ППУ од енергетског кабла. Губици који се у самом ППУ могу појавити због циркулационе струје јесу последица променљивог магнетног поља које постоји у околини једножилних каблова, [8]. Ако се на средини трасе вода изврши транспозиција ППУ, циркулациона струја

постаје занемарљива, а самим тим и губици у проводнику. Полагање ППУ уз сам кабловски вод који је оптерећен трајно дозвољеном струјом представља најнеповољнији случај, јер је температура ППУ тада највиша. Са повећањем растојања између ППУ и енергетских каблова долази до смањења његове температуре. Уколико се при одређивању минималног попречног пресека ППУ за његову почетну температуру користи вредност температуре околног тла, може се направити одређена грешка јер се ППУ налази у близини кабловског вода. Из тог разлога су у овом раду приказани и коментарисани резултати прорачуна температуре и једносекундне струје за ППУ. Самим тим приказан је утицај позиције ППУ на вредност почетне температуре, а затим и на дозвољену вредност струје земљоспоја која се може појавити у овом проводнику. С обзиром на то да за једножилне каблове са великим попречним пресецима ( $> 630 \text{ mm}^2$ ), [9], поједини произвођачи препоручују уземљење металних екрана само са једне стране, [10], примена ППУ постаје нужна. Из тог разлога је у овом раду анализирана примена ППУ код подземних водова са кабловима типа Cu/XLPE/CTS/PVC/AWA/PVC 19/33 kV са проводницима попречних пресека  $800 \text{ mm}^2$  и  $1.000 \text{ mm}^2$ .

У наставку рада, у Поглављу 2, представљене су методе уземљења металних екрана каблова које подразумевају примену ППУ. У Поглављу 3 приказан је поступак за прорачун минималног попречног пресека ППУ. Поступак нумеричког прорачуна температуре енергетских каблова и ППУ са геометријским и топлотним параметрима представљен је у Поглављу 4. На крају су, у Поглављу 5, приказани и дискутовани резултати нумеричког прорачуна температуре енергетских каблова и ППУ са изолацијом од PVC и XLPE. Такође, приказани су и коментарисани резултати прорачуна једносекундне струје квара кроз ППУ у зависности од његове позиције.

## 2. ПРИМЕНА ПАРАЛЕЛНОГ ПРОВОДНИКА УЗЕМЉЕЊА КОД КАБЛОВСКИХ ВОДОВА

Галванско спајање и директно уземљење металних екрана једножилних каблова на једном крају изводи се у случају постојања великих вредности циркулационих струја при директном уземљењу металних екрана на оба краја. Ове струје се могу елиминисати и применом *cross-bonding* система везивања металних екрана. Међутим, уколико нема техничке могућности и економске оправданости за то, изводи се уземљење металних екрана на једном крају. Уземљење металних екрана само на једном крају обично се изводи код кабловских водова дужине до 500 m, [1]. Ограничење дужине кабловског вода са оваквим начином уземљења металних екрана неопходно је због појаве индукованог напона на неуземљеном крају вода, а који може премашити

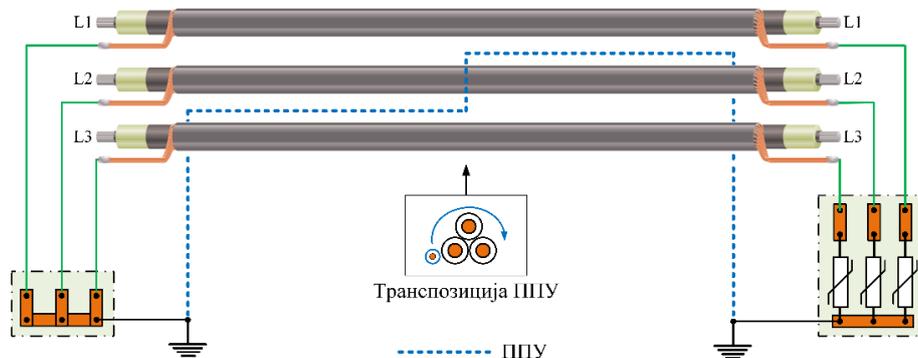
вредност безопасног напона, [11]. У нормалном погону напон металног екрана на уземљеном крају једнак је нули и постепено расте како се иде ка неуземљеном крају, где има максималну вредност. Вредност напона металног екрана на неуземљеном крају директно зависи од дужине вода и јачине струје у проводнику кабла. Осим индукованих опасних напона, на неуземљеним крајевима металних екрана могу се појавити и пренапони узроковани земљоспојевима, [11], комутацијама или атмосферским пражњењима, [12]. Услед ових пренапона директно су угрожени спољашњи плаштеви једножилних каблова. Из тог разлога се на неуземљеним крајевима металних екрана постављају ограничавачи напона (одводници пренапона), као што је то показано на Слици 1.

ППУ се директно везује за уземљиваче који се налазе на оба краја кабловског вода чиме се обезбеђује проводни пут за струју земљоспоја. У случају када кабловски вод повезује компоненте које су део истог постројења, тј. једног уземљивача, тада нема потребе за инсталацијом ППУ, [3]. С обзиром на то да се ППУ полаже паралелно са једножилним кабловима, може доћи до појаве циркулационе струје у самом ППУ, што је директна последица променљивог магнетног поља које стварају трофазне струје једножилних енергетских каблова. Проводни пут за циркулациону струју формира се од ППУ, једног локалног уземљивача, земље и другог локалног уземљивача. Да би се ова циркулациона струја смањила, врши се транспозиција ППУ на средини трасе вода (Слика 1). Уколико је неопходно, дуж трасе се врши вишеструка транспозиција ППУ, [3]. За случај да се на металном екрану при земљоспоју може појавити недопустиво висока вредност пренапона, неопходно је извршити додатно уземљење металних екрана на средини вода, [11].

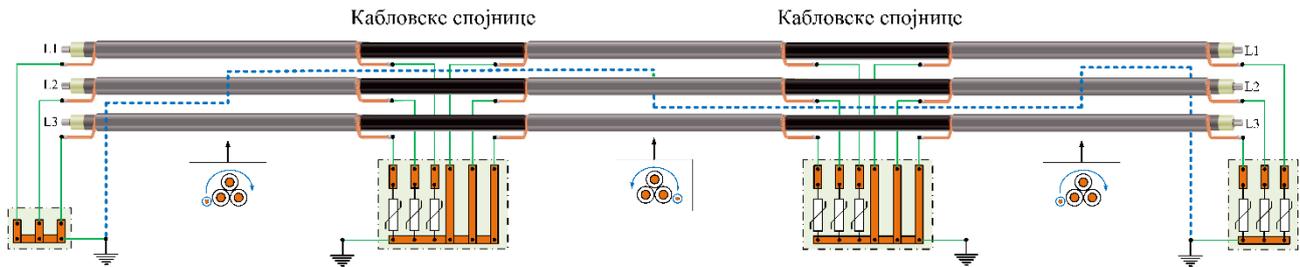
Ако се овакав систем уземљења металних екрана жели применити код релативно дугих кабловских водова, онда се читава траса вода мора поделити на више секција, [12]. На Слици 2 приказан је пример кабловског вода који је подељен на три секције. У свакој секцији метални екрани су на једном крају галвански спојени и директно уземљени, док су на другом крају повезани са уземљивачем преко ограничавача напона. У једном таквом систему дужине

појединих секција не морају да буду једнаке, као што је то случај код *cross-bonding* система, већ је битно да се не премашу максимални дозвољени индуковани напон на крајевима појединих секција. На Слици 3 приказан је кабловски вод са уземљеним металним екранима на средини трасе. Метални екрани су уземљени преко ограничавача напона на оба краја вода. У овом случају напон металних екрана на средини вода је једнак нули и постепено расте како се иде према крајевима кабловског вода. Уземљење металних екрана на једном крају изводи се и у случају делимичне транспозиције металних екрана (делимични *cross-bonding* систем), као што је то показано на Слици 4. Наиме, *cross-bonding* систем се понекад не може извести на целој траси кабловског вода. Тада се метални екрани последње секције кабловског вода, која не припада *cross-bonding* систему, галвански спајају и директно уземљују само на једном крају. Из тог разлога се на последњој секцији вода обично инсталира ППУ, [13].

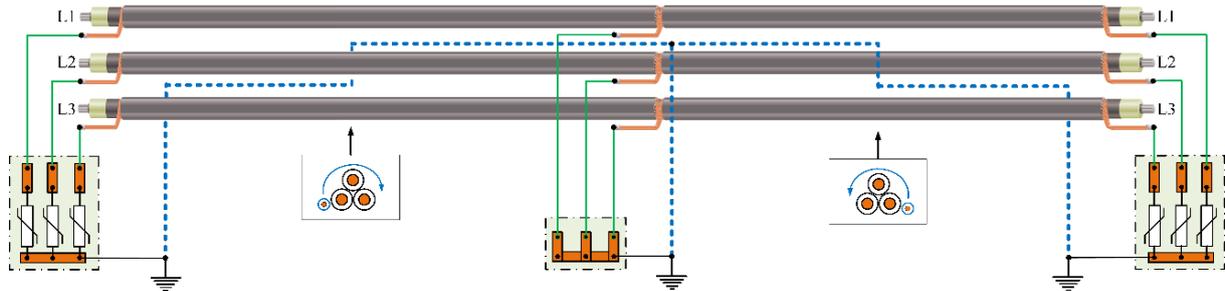
Положај ППУ у односу на кабловски вод зависи од размештаја каблова у њему. Уколико су једножилни каблови положени у хоризонталној равни на већем међусобном растојању, ППУ се поставља између два једножилна кабла. Такође, у том случају потребно је да растојање између ППУ и средњег енергетског кабла има вредност 70% растојања између два енергетска кабла, [4]. У случајевима када се једножилни каблови додирују не постоји могућност полагања ППУ између енергетских каблова. Тада ППУ треба поставити уз саме енергетске каблове. Код свих начина полагања неопходна је транспозиција ППУ на средини трасе вода, осим у ситуацијама када се врши транспозиција једножилних енергетских каблова дуж трасе, [14]. Транспозицијом ППУ на средини кабловског вода смањује се циркулациона струја и додатни губици који се при томе генеришу. Осим тога, додатни позитивни ефекат транспозиције ППУ представља смањење индукованих напона на неуземљеним крајевима металних плаштова, [4, 11]. Уз стандардне начине полагања ППУ, у раду [8] разматран је случај полагања ППУ у средини троугаоне формације енергетских каблова када је циркулациона струја занемарљиво мала (реда мА).



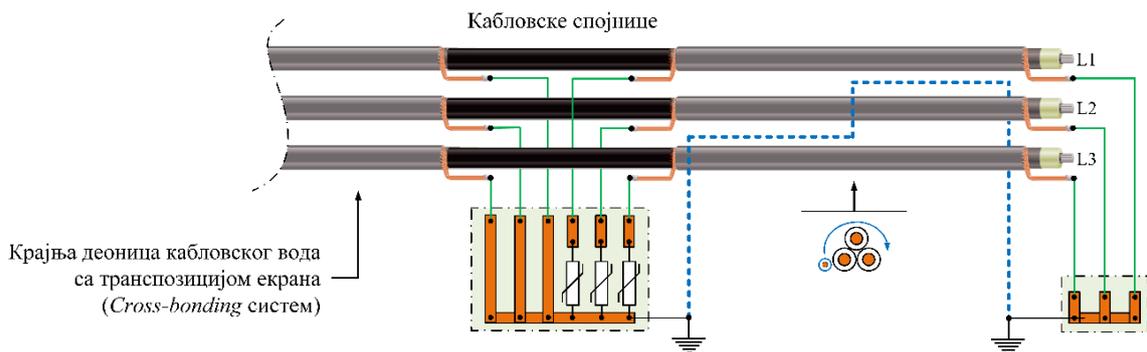
Слика 1. Примена ППУ на кабловском воду чији су метални екрани галвански спојени и директно уземљени на једном крају



Слика 2. Примена ППУ на кабловском воду подељеном у три секције



Слика 3. Примена ППУ на кабловском воду чији су метални екрани галвански спојени и уземљени на средини вода



Слика 4. Примена ППУ на преосталој секцији кабловског вода са делимичним cross-bonding системом

### 3. ИЗБОР МИНИМАЛНОГ ПОПРЕЧНОГ ПРЕСЕКА ПАРАЛЕЛНОГ ПРОВОДНИКА УЗЕМЉЕЊА

Минимална површина попречног пресека ППУ зависи од више параметара. Генерално, условљена је максимално дозвољеном температуром материјала од којег је израђена изолација ППУ. Време трајања квара, односно време трајања протицања струје кроз ППУ је релативно кратко (до неколико секунди). Претпоставља се да у том времену нема одвођења топлоте од ППУ према амбијенту, па се процес његовог загревања сматра адијабатским. Тада се сва топлота троши на пораст температуре ППУ, па се топлотни импулс може дефинисати са [6, 7]:

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

где је  $i_k$  – тренутна вредност струје квара која протиче кроз ППУ у А,  $t_k$  – време трајања квара у s,  $S$  – површина попречног пресека ППУ у  $m^2$ ,  $k$  – коефицијент чија вредност зависи од топлотних и електричних карактеристика материјала проводника и изолације ППУ у  $(A \cdot s^{0.5})/m$ . Лева страна једначине (1) представља топлотни импулс ослобођен у проводнику током временског интервала трајања квара и изражава се у  $A^2 \cdot s$ .

Временски облик струје квара  $i_k$  је неперидичног облика због постојања једносмерне компоненте струје квара. Због тога су прорачун и примена интеграла са леве стране једнакости (1) компликовани за инжењерску праксу. Поједностављена формула за прорачун минималне површине попречног пресека заштитног проводника која узима у обзир адијабатске услове и која важи за максимално време трајања квара до 5 s је, према [6, 7]:

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

где  $I_k$  представља ефективну вредност струје квара која протиче кроз ППУ. Вредност коефицијента  $k$  зависи од топлотних и електричних карактеристика материјала проводника ППУ, као и од почетне и максимално дозвољене температуре материјала изолације ППУ. Овај коефицијент се одређује помоћу израза, [6, 7]:

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

где је  $c$  – специфични запремински топлотни капацитет материјала проводника у  $J/(m^3 \cdot K)$ ,  $\alpha_0$  – температурни коефицијент специфичне електричне отпорности материјала проводника у  $K^{-1}$ ,  $\rho_0$  – специфична електрична отпорност материјала проводника на почетној температури у  $\Omega \cdot m$ ,  $\theta_0$  – почетна температура проводника у  $^{\circ}C$  и  $\theta_{\max}$  – крајња температура проводника у  $^{\circ}C$ . Вредности за  $\alpha_0$ ,  $\rho_0$  и  $c$  за материјале од којих се израђују проводници и екрани дате су у Табели А.1 из Прилога, док су вредности за почетну и крајњу температуру,  $\theta_0$  и  $\theta_{\max}$  различитих изолационих материјала дате у Табели А.2 из Прилога.

У Табели А.2 дате су вредности почетних температуре за материјале изолације и оне заправо представљају максималне температуре изолације при референтним условима, односно при нормалним погонским условима. У изразу (3) ове температуре представљају почетне уколико је заштитни проводник, тј. ППУ, саставни део енергетског кабла (саставни део вишежилног кабла). С обзиром на то да се у овом раду разматра случај кабловског вода са три једножилна кабла, ППУ није саставни део вишежилног кабла и његова почетна температура може имати и ниже вредности. Уколико се ППУ полаже уз саме енергетске каблове, може се претпоставити да је његова почетна температура приближно једнака температури спољашње површине неког од три енергетска кабла у воду. Међутим, ППУ се може поставити и на одговарајућем одстојању од кабловског вода као што је то учињено у [4]. У том случају спроводи се нумерички прорачун температуре ППУ применом методе коначних елемената.

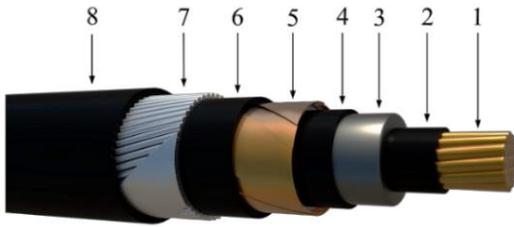
#### 4. НУМЕРИЧКИ ПРОРАЧУН ТЕМПЕРАТУРА ЕНЕРГЕТСКОГ КАБЛА И ПАРАЛЕЛНОГ ПРОВОДНИКА УЗЕМЉЕЊА

С обзиром на то да се полаже паралелно са кабловским водом, ППУ се налази у његовом температурном пољу и има одређену температуру. У стационарним условима, температура ППУ зависи од губитака у енергетским кабловима и представља почетну температуру ППУ за неко хаваријско стање ( $\theta_0$ ). Самим тим ова температура се мора узети у обзир при прорачуну коефицијента  $k$ , односно при провери услова за минимални попречни пресек ППУ. Најнеповољнији

случај је када је ППУ инсталиран уз сам кабловски вод и тада је почетна температура  $\theta_0$  максимална. Такође, овде се разматра најнеповољнији случај по основу струјног оптерећења кабловског вода, тј. случај када су једножилни каблови оптерећени трајно дозвољеном струјом. С аспекта циркулационе струје кроз ППУ разматра се повољнији случај – претпоставља се да је због транспозиције ППУ на средини вода утицај циркулационе струје елиминисан и да нема генерисања топлоте у самом ППУ услед губитака.

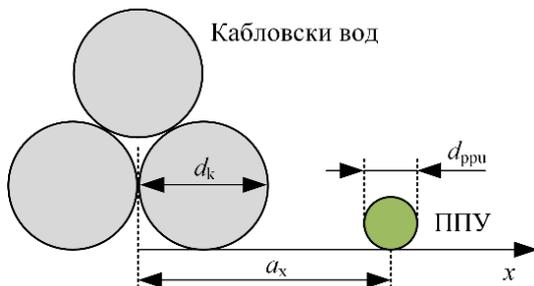
Нумерички прорачун температурног поља у околини кабловског вода извршен је софтвером *FEMM 4.2* (у модулу за топлотне прорачуне – *Heat Flow Problem*) применом методе коначних елемената, [15]. Решавани домен креиран је сагласно техничком извештају IEC TR 62095, [16], а његове димензије су  $40 m \times 20 m$ . Почетни услови су укључили запреминске изворе топлоте узроковане губицима у појединим елементима конструкције енергетских каблова. Ови извори топлоте су претходно одређени аналитичким прорачуном трајно дозвољеног струјног оптерећења сагласно стандарду IEC 60287-1-1, а добијене вредности се могу наћи у [17]. Сви топлотни и електрични параметри разматраних каблова пресека проводника од  $800 mm^2$  и  $1.000 mm^2$  такође су дати у [17]. Гранични услови дефинисани су према [16] и то тако да је горња граница решаваног домена (површина земље) моделирана граничним условом константне температуре од  $15^{\circ}C$ , док су преостале границе (лева, десна и доња) моделиране адијабатским граничним условом.

Нумерички прорачуни температуре извршени су за случај једножилних каблова типа *Cu/XLPE/CTS/PVC/AWA/PVC 19/33 kV*, [9]. Конструкција овог кабла приказана је на Слици 5. Претпоставља се да су једножилни каблови инсталирани у формацији троугла са центром на дубини од  $0,8 m$ . Разматрана су два различита попречна пресека проводника каблова, од  $800 mm^2$  и  $1.000 mm^2$ . Као ППУ употребљен је нисконапонски једножилни кабл са проводником од поужених бакарних жица класе 2. Такође, разматрана су два различита материјала изолације ППУ: од *PVC* и *XLPE*. Називни попречни пресеци ППУ изабрани су сагласно услову за минималне попречне пресеке заштитних проводника из табела датих у [5]. На основу вредности пречника проводника једножилних каблова израчунати су стварни попречни пресеци проводника који за каблове називних пресека  $800 mm^2$  и  $1.000 mm^2$  износе редом  $945,7 mm^2$  и  $1.134,1 mm^2$  [18]. Код енергетских каблова чији су називни попречни пресеци проводника већи од  $630 mm^2$ , минимални попречни пресек ППУ као заштитног проводника треба да буде једнак 25% стварног попречног пресека проводника енергетског кабла, [5]. Тако су добијене следеће вредности минималног попречног пресека ППУ:  $0,25 \cdot 945,7 = 236,4 mm^2$  – за кабловски вод са проводницима пресека  $800 mm^2$  и  $0,25 \cdot 1.134,1 = 283,5 mm^2$  – за кабловски вод са проводницима пресека  $1.000 mm^2$ , [18]. Овако су одређени називни попречни пресеци проводника ППУ ( $240 mm^2$  и  $300 mm^2$ ) који су коришћени у даљим прорачунима температуре и једносекундних струја.



Слика 5. Конструкција разматраног енергетског кабла: 1 – проводник; 2 – екран проводника; 3 – изолација; 4 – екран изолације; 5 – метални екран; 6 – постелица; 7 – арматура; 8 – спољашњи заштитни плашт

Нумерички прорачуни температуре извршени су за различите положаје ППУ у односу на енергетске каблове. Према Сlici 6, ППУ лежи на истој хоризонталној равни, као и два доња једножилна енергетска кабла из троугаоне формације. Овакав положај ППУ у односу на енергетске каблове је одабран према примерима из [4, 11]. Као што се може видети са Сликe 6, најмања вредност хоризонталног одстојања између центра ППУ и троугаоне формације једножилних енергетских каблова ( $a_x$ ) одређена је спољашњим пречницима једножилних каблова ( $d_k$ ) и ППУ ( $d_{ppu}$ ). Спољашњи пречници једножилних каблова са проводницима пресека  $800 \text{ mm}^2$  и  $1.000 \text{ mm}^2$  редом износе  $d_{k,800} = 71 \text{ mm}$  и  $d_{k,1000} = 75,5 \text{ mm}$  [17]. Спољашњи пречници ППУ са изолацијом од PVC пресека  $240 \text{ mm}^2$  и  $300 \text{ mm}^2$  редом износе  $d_{ppu,240} = 26,2 \text{ mm}$  и  $d_{ppu,300} = 29,2 \text{ mm}$ , док у случају ППУ са изолацијом од XLPE имају вредности  $d_{ppu,240} = 25,8 \text{ mm}$  и  $d_{ppu,300} = 27,8 \text{ mm}$ .



Слика 6. Положај ППУ у односу на троугаону формацију једножилних енергетских каблова

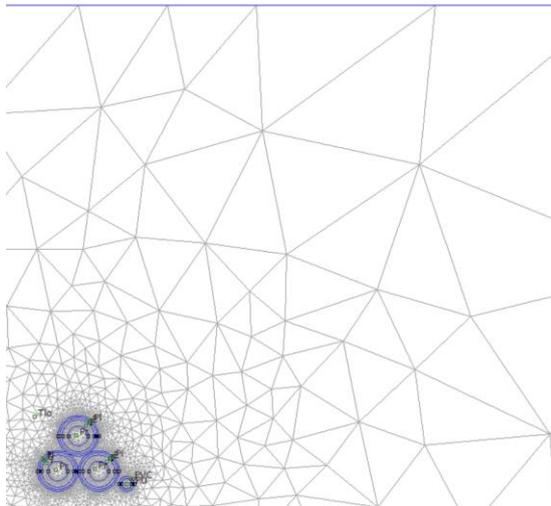
## 5. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

Како је у свим прорачунима разматрана примена ППУ уз претпоставку да су метални екрани енергетских каблова уземљени само на једном крају, то значи да није било утицаја циркулационих струја на додатно загревање каблова и ППУ. Дакле, пошло се од претпоставке да се, осим у проводницима, губици генеришу и у металним екранима услед вртложних струја, [19]. За дате услове полагања, аналитичким прорачуном добијено је да трајно дозвољена струјна оптерећења за кабловске водове са проводницима пресека од  $800 \text{ mm}^2$  и  $1.000 \text{ mm}^2$  износе

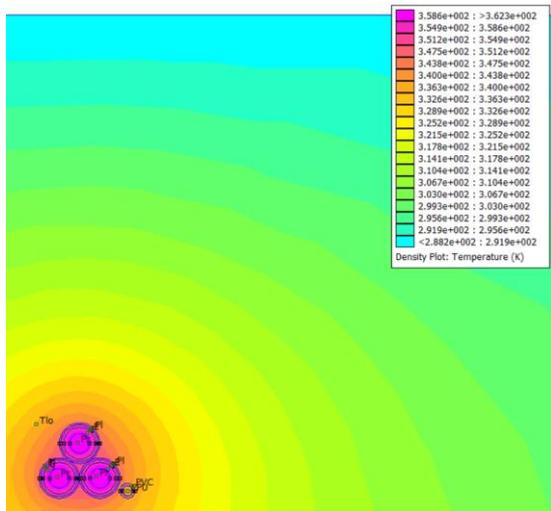
$I_{td,800} = 970,2 \text{ A}$  и  $I_{td,1000} = 1.055,5 \text{ A}$ . На основу ових вредности трајно дозвољених струја, као и губитака услед вртложних струја у металним екранима, одређене су запреминске снаге извора топлоте у проводницима и еквивалентним екранима каблова. Запреминске снаге извора топлоте у проводницима и еквивалентним металним екранима енергетских каблова са проводницима пресека  $800 \text{ mm}^2$  износе  $Q_{p,800} = 92.944,6 \text{ W/m}^3$  и  $Q_{ec,800} = 1.295,7 \text{ W/m}^3$ , док за енергетске каблове са проводницима пресека  $1.000 \text{ mm}^2$  имају вредности  $Q_{p,1000} = 27.896,3 \text{ W/m}^3$  и  $Q_{ec,1000} = 1.434 \text{ W/m}^3$ . Запреминске снаге извора топлоте у изолацији каблова одређене су према називном фазном напону коришћеног типа кабла, диелектричним карактеристикама и геометрији изолације од XLPE. За енергетске каблове са проводницима пресека  $800 \text{ mm}^2$  и  $1.000 \text{ mm}^2$  њихове вредности редом износе  $Q_{xlpe,800} = 155,8 \text{ W/m}^3$  и  $Q_{xlpe,1000} = 156,1 \text{ W/m}^3$  [17].

Почетни прорачуни температуре у FEMM 4.2 извршени су само са енергетским кабловима, тј. без присуства ППУ. То је учињено због нумеричке верификације аналитички израчунатих трајно дозвољених струјних оптерећења и запреминских губитака у проводницима и еквивалентним металним екранима. На овај начин добијене су максималне вредности температура проводника које износе:  $88,9^\circ\text{C}$  – за кабловски вод са проводницима пресека  $800 \text{ mm}^2$  и  $89^\circ\text{C}$  – за кабловски вод са проводницима пресека  $1.000 \text{ mm}^2$ . С обзиром на то да одступања нумеричких температура проводника од  $800 \text{ mm}^2$  и  $1.000 \text{ mm}^2$  у односу на њима одговарајуће аналитичке температуре износе око  $1^\circ\text{C}$ , може се сматрати да су аналитичке вредности струјних оптерећења и губитака у проводницима и екранима тачне. Тиме је потврђено да се предложени нумерички модел може користити за прорачун расподеле температурног поља по решавањем домену, а самим тим и за одређивање почетне температуре ППУ инсталираног у близини кабловског вода.

На Сlici 7 приказана је мрежа коначних елемената генерисана у делу решавањем домена са једножилним кабловима са проводницима попречног пресека  $800 \text{ mm}^2$  и ППУ са проводником попречног пресека  $240 \text{ mm}^2$ . У овом примеру, ППУ је положен уз сами кабловски вод и тада растојање  $a_x$  има минималну вредност. За овај положај ППУ генерисана је расподела температуре по разматраном домену са Сликe 8. Очигледно је да у овом случају ППУ, због своје локације, има максималну вредност температуре. Према [4], ППУ се приликом транспозиције поставља симетрично у односу на кабловски вод, тј. на једнака одстојања од кабловског вода у обе секције. Како је расподела температурног поља симетрична у односу на вертикалну осу (која пролази кроз центар троугаоне формације кабловског вода), то значи да не постоји потреба за прорачуном температуре ППУ за случај где се он налази са друге стране вода после транспозиције. У овом раду су сви прорачуни температуре урађени са ППУ који се налази са десне стране кабловског вода, као што је то приказано у примеру са Сликe 8.



Слика 7. Приказ мреже коначних елемената генерисане у делу решаваног домена са енергетским кабловима и ППУ



Слика 8. Расподела температуре у делу решаваног домена са енергетским кабловима и ППУ

Нумерички израчунате температуре ППУ у функцији њихове позиције  $a_x$  приказане су на Слици 9. Овако израчунате вредности температуре представљају почетне температуре ППУ  $\theta_0$  које се користе за прорачун коефицијента  $k$  према изразу (3). Самим тим, позиција ППУ са проводником датог попречног пресека може утицати на вредност дозвољене струје квара која у одређеном временском интервалу протиче кроз ППУ. На Слици 10 приказане су аналитичке вредности струје квара кроз ППУ са изолацијом од PVC израчунате помоћу израза (2) за трајање од 1 s (тзв. једносекундна струја). У прорачунима за ову врсту изолације ППУ коришћена је вредност максималне температуре изолације од 140°C (Табела А.И). Дате вредности једносекундних струја квара ( $I_{k,1s}$ ) зависе, сагласно изразима (2) и (3), од почетне температуре  $\theta_0$ , а самим тим и од одстојања  $a_x$ . Једносекундне струје квара за ППУ са проводником пресека 240 mm<sup>2</sup> и PVC изолацијом крећу се од 24,2 kA, што одговара позицији ППУ уз сам кабловски вод до вредности од 30,2 kA која одговара

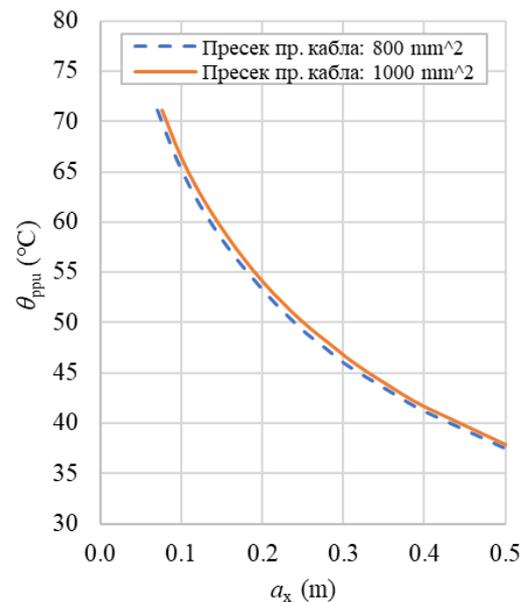
позицији ППУ од  $a_x = 0,5$  m. Када је у питању ППУ са проводником пресека од 300 mm<sup>2</sup>, вредности једносекундних струја су више и крећу се од 30,3 kA за позицију ППУ уз сам кабловски вод до 37,8 kA за позицију ППУ од  $a_x = 0,5$  m. Максимална одступања вредности једносекундних струја за оба ППУ и кабловске водове са проводницима пресека 800 mm<sup>2</sup> и 1.000 mm<sup>2</sup> износи 0,1 kA.

Вредности једносекундних струја за ППУ са проводницима пресека 240 mm<sup>2</sup> и 300 mm<sup>2</sup> и изолацијом од XLPE очекивано су више од оних добијених за ППУ са изолацијом од PVC. Разлог томе је знатно виша максимална (крајња) температура изолације, која у случају XLPE изолације износи 250°C (Табела А.И). Израчунате вредности једносекундних струја у функцији растојања  $a_x$  за случај ППУ са изолацијом од XLPE приказане су на Слици 11. За разматране положаје ППУ са проводником попречног пресека 240 mm<sup>2</sup> и изолацијом од XLPE једносекундне струје имају вредности од 36,8 kA до 41 kA. У случају ППУ са проводником пресека 300 mm<sup>2</sup> и истог опсега вредности за растојање  $a_x$ , једносекундна струја имала би вредност из опсега од 46 kA до 51,3 kA.

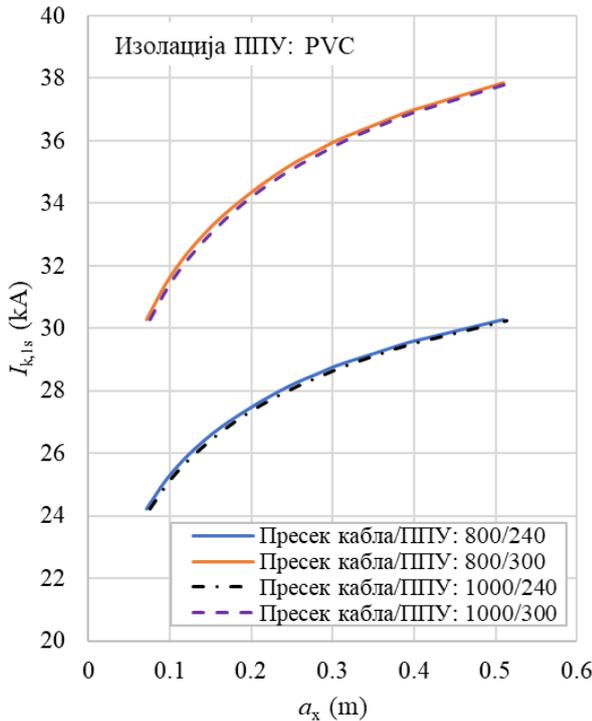
На основу израчунатих вредности за једносекундну струју ( $I_{k,1s}$ ) са слика 10 и 11, могуће је израчунати дозвољене струје квара ( $I_k$ ) за било које друго време трајања квара према изразу

$$I_k = I_{k,1s} \sqrt{t_k^{-1}} \tag{4}$$

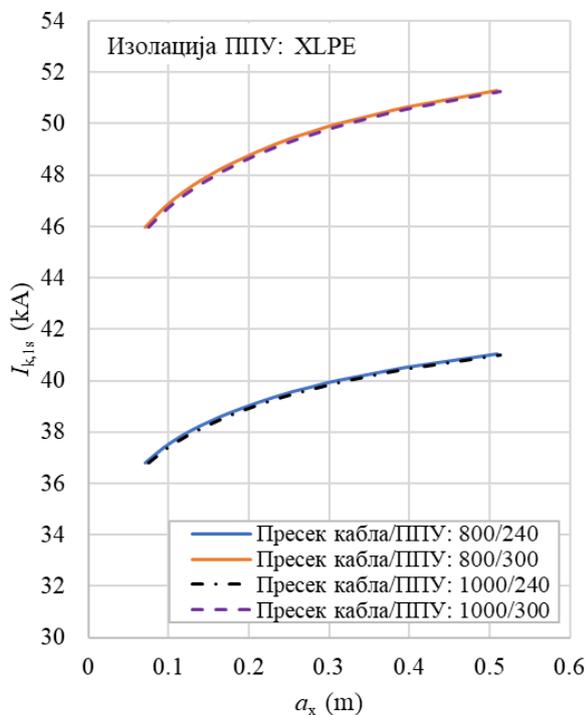
где је  $t_k$  време трајања квара у s. Одабир одговарајућег попречног пресека и материјала изолације ППУ зависи од вредности струје земљоспоја која би се имала на крају разматраног кабловског вода, као и од времена трајања квара, што свакако зависи од времена реаговања земљоспојне заштите.



Слика 9. Температуре ППУ у зависности од њиховог одстојања у односу на кабловске водове са проводницима пресека 800 mm<sup>2</sup> и 1.000 mm<sup>2</sup>



Слика 10. Вредности једносекундне струје кроз ППУ са изолацијом од PVC пресека 240 mm<sup>2</sup> и 300 mm<sup>2</sup> инсталираних у близини енергетских каблова са проводницима пресека 800 mm<sup>2</sup> и 1.000 mm<sup>2</sup>



Слика 11. Вредности једносекундне струје кроз ППУ са изолацијом од XLPE пресека 240 mm<sup>2</sup> и 300 mm<sup>2</sup> инсталираних у близини енергетских каблова са проводницима пресека 800 mm<sup>2</sup> и 1.000 mm<sup>2</sup>

## 6. ЗАКЉУЧАК

У овом раду су анализирани подземни једножилни каблови инсталирани у троугаоној формацији са металним екранима који су галвански спојени и уземљени само на једном крају. Описан је разлог за примену ППУ код кабловских водова са оваквим начином везивања металних екрана. За случај одређивања минималног попречног пресека ППУ као заштитног проводника дефинисана је зависност између параметара ППУ, струје квара (земљоспоја) и времена трајања квара. Као важан параметар издвојена је почетна температура изолације ППУ, због чега је било неопходно уважити и одстојање између кабловског вода и ППУ. За прорачун температуре коришћена је метода коначних елемената. Дати су резултати прорачуна температуре за ППУ са проводницима од бакра попречних пресека 240 mm<sup>2</sup> и 300 mm<sup>2</sup> и две различите врсте изолације, од PVC и XLPE. Прорачуни су изведени за кабловске водове израђене од једножилних каблова типа Cu/XLPE/CTS/PVC/AWA/PVC 19/33 kV великих попречних пресека проводника (800 mm<sup>2</sup> и 1.000 mm<sup>2</sup>). Према резултатима прорачуна, са порастом одстојања између кабловског вода и ППУ долази до знатног пада температуре ППУ, што резултира већим допуштеним вредностима једносекундних струја кроз коришћени ППУ. Даља истраживања у вези са кабловским водовима са ППУ обухватиће различите врсте материјала проводника ППУ и различите формације једножилних енергетских каблова, а тиме и остале могуће позиције ППУ у односу на кабловски вод.

## ЗАХВАЛНИЦА

Овај рад је заснован на истраживању спроведеном у оквиру научноистраживачког рада на акредитованим високошколским установама у 2025. години бр. 451-03-137/2025-03/200132, 451-03-18/2025-03/200155 и 451-03-137/2025-03/200102 подржаних од стране Министарства науке, технолошког развоја и иновација Републике Србије.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] L. Heinhold, „Power Cables and Their Application – Part 1”, Berlin: Siemens Aktiengesellschaft, 1990.
- [2] Д. Тасић, „Основи електроенергетске кабловске технике”, Електронски факултет, Ниш, 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. [цитирано 4. 4. 2025] Доступно на: <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. [цитирано 4. 4. 2025] Доступно на: <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, стр. 85 [цитирано 4. 4. 2025] Доступно на: [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] Б. Лалевић, „Електроенергетски каблови”, Београд, 1993.
- [14] Cable Systems Electrical Characteristics: Reference 531, Technical Brochure, CIGRE, Paris, 2013.
- [15] Програмски пакет *Finite Element Method Magnetics*, верзија 4.2 – *FEMM 4.2*. [цитирано 30. 5. 2025] Доступно на: <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. Šučurović, 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] М. Шућуровић, Д. Климента, Д. Тасић, „Прорачун минималног попречног пресека паралелног проводника уземљења за подземне енергетске каблове у троугаоној формацији са металним екранима уземљеним на једном крају”, 14. Саветовање о електродистрибутивним мрежама са регионалним учешћем – CIRED Србија, Зборник радова, Број рада: P-1.12., DOI број: 10.46793/CIRED24.R-1.12MS, Копаоник, 16-20. септембар 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.

## ДОДАТАК

Табела А.1 Параметри материјала проводника и металних екрана коришћених за прорачун фактора  $k$ , [6]

Материјал		$\rho_0$ ( $\Omega \cdot m$ )	$\alpha_0$ ( $K^{-1}$ )	$c$ ( $J/(mm^3 \cdot K)$ )
Проводник:	– Бакар	$1,7241 \cdot 10^{-5}$	$3,93 \cdot 10^{-3}$	$3,45 \cdot 10^{-3}$
	– Алуминијум	$2,8264 \cdot 10^{-5}$	$4,03 \cdot 10^{-3}$	$2,422 \cdot 10^{-3}$
Метални екран и арматура:	– Олово и легуре олова	$21,4 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$1,44 \cdot 10^{-3}$
	– Челик	$13,8 \cdot 10^{-5}$	$4,5 \cdot 10^{-3}$	$3,756 \cdot 10^{-3}$
	– Нерђајући челик	$70 \cdot 10^{-5}$	Занемарљиво	$3,756 \cdot 10^{-3}$
	– Алуминијум	$2,84 \cdot 10^{-5}$	$4,03 \cdot 10^{-3}$	$2,422 \cdot 10^{-3}$

Табела А.ИИ Почетне и крајње температуре изолационих материјала, [6]

Врста изолације	Температура проводника (°C)	
	Под нормалним погонским условима (при трајно дозвољеном струјном оптерећењу)	Максимална вредност током кратког споја
Термопластика (V-75, HFI-75-TP, TPE-75, V-90, HFI-90-TP, TP-90, V-90HT) – $S \leq 300 \text{ mm}^2$ – $S > 300 \text{ mm}^2$	75 75	140 160
Полиетилен (PE, линеарни PE ниске густине) – $S \leq 300 \text{ mm}^2$ – $S > 300 \text{ mm}^2$	70 70	140 160
Умрежени еластомер: – R-EP-90, R-CPE-90, R-HF-90, R-CSP-90 – R-HF-110, R-E-110	90 110	250 250
Умрежени полиетилен (XLPE): – X-90, X-90UV, X-HF-90 – X-HF-110	90 110	250 250
Каблови са минералном изолацијом и спољашњим заштитним плаштом од метала	100	250
За високе температуре: R-S-150 и тип 150 фибер	150	350
Импрегнирани папир	85	250

## БИОГРАФИЈЕ



**Марко Шућуровић** је рођен 1988. године у Трстенику. Основне академске студије завршио је 2011. године, а мастер академске студије 2012. године на Факултету техничких наука у Чачку Универзитета у Крагујевцу. Студент је докторских студија Електронског факултета

Универзитета у Нишу, на модулу Електроенергетика. Главне области његовог интересовања су техника електроенергетских каблова, електромагнетно и термичко моделовање елемената електроенергетских система и термичко моделовање фотонапонских технологија. Запослен је на Факултету техничких наука у Чачку као асистент. ORCID: 0000-0001-9574-6101.



**Дардан Климента** је рођен 1975. године у Пећи. Дипломирао је на Електротехничком факултету Универзитета у Приштини 1998. године. Магистрирао је на Електротехничком факултету Универзитета у Београду 2001. године, где је и докторирао 2007. године. Главне области

његовог интересовања су техника електроенергетских каблова, елементи електроенергетских система, обновљиви извори енергије, термички процеси и метода коначних елемената. Запослен је на Факултету техничких наука у Косовској Митровици као редовни професор. ORCID: 0000-0003-0019-8371.



**Драган Тасић** је рођен 1961. године у Губеревцу, општина Лесковац. Дипломирао је 1986. године на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, где је и магистрирао 1991. године. Докторирао је 1997. године на Електронском факултету Универзитета у Нишу. Главне области његовог

интересовања су анализа електроенергетских система, техника електроенергетских каблова, методе оптимизације у електроенергетици и термички процеси. Запослен је на Електронском факултету у Нишу као редовни професор. 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)