

# Korelacija između strujnog opterećenja i temperature za elektroenergetski kabl instaliran u vertikalnoj PVC cevi

## Correlation between Load Current and Temperature for a Power Cable Installed in a Vertical PVC Pipe

Marko Šućurović\*, Dardan Klimenta\*\*, Dragan Tasić\*\*\*, Bojan Perović\*\*

\* Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet tehničkih nauka – Čačak

\*\* Univerzitet u Prištini sa privremenim sedištem u Kosovskoj Mitrovici, Fakultet tehničkih nauka – Kosovska Mitrovica

\*\*\* Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet – Niš

**Rezime** - U ovom radu se analizira zagrevanje kabla sa izolacijom od etilen-propilen gume (EPR) instaliranog u vertikalnoj cevi od polivinil-hlorida (PVC). Konkretno, razmatra se zagrevanje EPR kabla koji se koristi za napajanje potapajuće pumpe za vodu i analizira se gornji deo cevnog bunara gde je prostor između EPR kabla i unutrašnje površine PVC cevi ispunjen vazduhom. Temperature površine kabla određene su analitički, a zatim su tako dobijene vrednosti potvrđene numerički primenom metode konačnih elemenata (MKE) u COMSOL-u. Uz ove proračune, izvršeni su eksperimenti na fizičkom modelu dela cevnog bunara između statičkog nivoa vode i betonskog poklopca bunara. Ustanovljeno je da se procentualno odstupanje izračunatih vrednosti temperature površine kabla u odnosu na izmerene pri različitim strujnim opterećenjima kreće od 1.47% do 4.63%. Nakon eksperimentalne potvrde izračunatih vrednosti za temperaturu površine kabla, izveden je analitički izraz (tj. korelacija) koji definiše zavisnost te temperature od strujnog opterećenja i temperature unutrašnje površine cevi. Na kraju je izveden i analitički izraz za strujno opterećenje kabla u funkciji od temperature površine kabla i temperature unutrašnje površine cevi, koji se dalje može koristiti za određivanje trajno dozvoljenog strujnog opterećenja bilo kojeg elektroenergetskog kabla za poznate eksploatacione uslove.

**Ključne reči** - elektroenergetski kabl, metoda konačnih elemenata (MKE), PVC cev, strujno opterećenje, temperatura.

**Abstract** - The heating of an ethylene-propylene rubber (EPR) insulated cable installed in a vertical polyvinyl chloride (PVC) pipe is analysed in this paper. In particular, this paper considers the heating of an EPR cable used to energize a submersible water pump and analyses the upper part of the well where the space between the EPR cable and the inner surface of the PVC pipe is filled with air. The temperatures of the cable's surface are determined analytically, and then such temperature values are validated numerically by using the finite element method (FEM) in COMSOL. In addition to these calculations, experiments are performed on a physical model representing the part of the well between the static water level and the solid concrete cover of the

well. The percentage deviation of the calculated values for the cable's surface temperature from the measured ones at different load currents ranges from 1.47% to 4.63%. After the experimental validation of the calculated values for the cable's surface temperature, an analytic expression (i.e. correlation) that defines the dependence of that temperature on the load current and the pipe's inner surface temperature is derived. Finally, an analytic expression for the cable load current as a function of the cable's surface temperature and the pipe's inner surface temperature is also derived, which can be further used to determine the ampacity of any power cable for known service conditions.

**Index Terms** - Finite element method (FEM), Load current, Power cable, PVC pipe, Temperature

### I UVOD

Fotonaponski (PV) pumpni sistemi za snabdevanje pijaćom ili tehničkom vodom obično se koriste u oblastima koje su značajno udaljene od distributivne mreže. Ovakvi sistemi se sastoje od PV generatora, kontrolera za praćenje tačke maksimalne snage PV generatora i rada pumpe, potapajuće pumpe, napojnog kabla pumpe, odgovarajućih zaštita, rezervoara za vodu i cevovoda. Postupak proračuna PV pumpnog sistema predstavljen je u [1], dok se brz način proračuna sa primerom primene u voćarstvu može naći u [2,3]. Za ovakve sisteme mogu se koristiti pumpe sa jednosmernim motorima bez četkica (tzv. BLDC motori). Za napajanje električnog motora takve pumpe koristi se elektroenergetski kabl čija dužina zavisi od pozicije kontrolera, udaljenosti bunara od PV generatora i dubine potapanja pumpe. Bunar se izrađuje u vidu bušotine u koju se zatim utiskuje PVC cev koja sprečava eroziju zemljišta i urušavanje zidova bunara. U cev se zatim spušta potapajuća pumpa zajedno sa napojnim kablom i crevom za vodu. Konačno, pumpa je uronjena u vodu i okačena o sigurnosnu sajlju. Napojni kabl pumpe se proteže vertikalno kroz cev i prolazi kroz različite ambijentne uslove na putu od pumpe do kontrolera. Kabl je u gornjem delu cevnog bunara okružen vazduhom, dok je u donjem delu istog potopljen u vodu. Odnos dužina delova kabla koji će se naći u vazduhu i u vodi zavisi od dubine cevnog bunara,

statičkog nivoa vode u njemu i od dubine potapanja pumpe. Od betonskog poklopca bunara do priključnog mesta PV generatora (kontrolera ili invertora) kabl se nalazi iznad zemlje i može biti izložen direktnim uticajima Sunca i vetra. Shodno tome, napojni kabl pumpe prolazi kroz tri različita termička ambijenta, i to: deo cevnog bunara ispunjen vodom, deo cevnog bunara ispunjen vazduhom i vazduh iznad površine zemlje.

Pretpostavlja se da se za napajanje BLDC motora potapajuće pumpe koristi kabl sa izolacijom od etilen-propilen gume (tzv. EPR kabl) i tri bakarna provodnika poprečnog preseka  $2.5 \text{ mm}^2$ . U projektu iz [4], EPR kabl ovog tipa napaja BLDC motor potapajuće pumpe tipa ECDRIVE 1800-C sa kontrolerom PS2-1800. Zbog bipolarnog pogonskog režima, u svakom trenutku, po dva namotaja BLDC motora su povezana na red [5]. Samim tim, kroz dva provodnika napojnog kabla će u svakom trenutku proticati jednosmerna struja iste jačine, ali suprotnog smera. Usled proticanja struje kroz provodnike kabla dolazi do generisanja toplote u njima. Gubici snage u kablju zavise od njegove dužine, materijala i temperature provodnika, broja opterećenih provodnika i kvadrata struje. Zbog vertikalnog položaja i različitih ambijentnih uslova kabl će imati različite temperature na pojedinim delovima svoje dužine. Toplota se sa površine kabla u cevi odvodi prirodnom konvekcijom i zračenjem. Od zida cevog bunara toplota se dalje odvodi kondukcijom prema referentnom zemljištu. Kao što je već rečeno, napojni kabl i crevo za vodu se obično zajednički vezuju za sigurnosnu sajlju o koju je okačena pumpa. U ovom radu, nije razmatran slučaj gde se napojni kabl i crevo za vodu međusobno dodiruju, pri čemu bi trebalo uvažiti razmenu toplote između kabla i creva za vodu. Pod uslovom da se vrednosti temperature unutrašnje površine cevi i temperature vazduha u cevi ne promene, trajno dozvoljena struja kabla bi u slučaju kontakta kabla sa crevom za vodu mogla da bude veća od one koja se dobija za slučaj gde ovog kontakta nema. Tako se dobijaju vrednosti temperature površine kabla koje su sigurne sa inženjerske strane, tj. više od onih koje odgovaraju slučaju kada napojni kabl dodiruje crevo za vodu.

Za sada nije poznato da li je analiziran slučaj zagrevanja napojnog kabla neke potapajuće pumpe. Uz to, standard IEC 60287, koji se inače koristi za određivanje trajno dozvoljenog strujnog opterećenja kablova, ne definiše strujna opterećenja za elektroenergetske kablove instalirane u vertikalnim cevima, dok IEEE Std 835 [6] određuje vrednosti strujnog opterećenja za elektroenergetske kablove u vazduhu instalirane u vertikalnim cevastim podizačima (eng. *risers*). Neki od primera proračuna strujnog opterećenja za elektroenergetske kablove u vertikalnim cevastim podizačima dati su u [7-9]. Slučaj koji se u ovom radu razmatra sličan je primeru instalacije elektroenergetskog kabla za napajanje naftne platforme ili dela kabla koji povezuje neki vetrogenerator na otvorenom moru sa distributivnom mrežom na kopnu [10]. Kod ovakvih primera elektroenergetski kablovi su instalirani u tzv. J-cevi. Delovi tih J-cevi koji se nalaze ispod nivoa mora ispunjeni su morskom vodom, dok su delovi istih koji se nalaze iznad nivoa mora ispunjeni vazduhom. Shodno tome, u ovom radu su analizirani rezultati proračuna i merenja izvedenih za EPR kabl  $3 \times 2.5 \text{ mm}^2$  instaliran u vertikalnoj PVC cevi, koji je identičan napojnom kablju potapajuće pumpe iz [4].

U drugoj tački ovog rada opisan je način proračuna temperature površine kabla u zavisnosti od strujnog opterećenja i temperature unutrašnje površine PVC cevi. Vrednosti temperature dobijene za više različitih strujnih opterećenja i temperatura unutrašnje površine PVC cevi potvrđene su numerički primenom metode konačnih elemenata (MKE) u softverskom paketu COMSOL, kao i eksperimentalnim putem. Opis eksperimenata dat je u trećoj tački. Eksperimenti su realizovani u laboratoriji na EPR kablju instaliranom u vertikalnoj PVC cevi koja fizički modelira gornji deo cevog bunara, gde je kabl okružen vazduhom. Analiziran je kabl istog tipa i istog poprečnog preseka kao što je napojni kabl potapajuće pumpe iz [4]. Četvrta tačka sadrži uporedne prikaze i opise rezultata dobijenih analitičkim, numeričkim i eksperimentalnim putem. Takođe, u ovoj tački su prikazana procentualna odstupanja izračunata za temperaturu površine kabla. S obzirom na to da su dobijena relativno mala odstupanja temperatura dobijenih analitički, model je iskorišćen za korelaciju temperature površine kabla sa strujnim opterećenjima od 0 do 60 A i temperaturama unutrašnje površine PVC cevi od 0, 10, 20, 30 i 40 °C. Na kraju je, u tački pet, izvedena korelacija između strujnog opterećenja kabla, sa jedne, i temperature površine kabla i temperature unutrašnje površine cevi, sa druge strane.

## II PRORAČUN TEMPERATURE POVRŠINE KABLA

Za proračun temperature površine kabla  $T_k$  neophodno je odrediti snagu kojom se toplota razmenjuje prirodnom konvekcijom ili zračenjem između spoljašnje površine EPR kabla, sa jedne, i vazduha u cevi ili unutrašnje površine PVC cevi, sa druge strane. U jednom provodniku kabla se usled proticanja struje generiše snaga koja se pretvara u toplotu, a njena vrednost po jedinici zapremine (tzv. zapreminska snaga izvora toplote u  $\text{W/m}^3$ ) dobija se pomoću sledećeg izraza

$$Q_{v1} = \frac{\rho_{20} \left[ 1 + \alpha_{20} (T_p - 293,15) \right] \cdot k_{at} \cdot I^2}{S_p^2} \quad (1)$$

gde je:  $\rho_{20}$  – efektivna vrednost specifične električne otpornosti materijala provodnika na temperaturi od 20°C u  $\Omega \cdot \text{m}$ ;  $\alpha_{20}$  – vrednost temperaturnog koeficijenta specifične električne otpornosti materijala provodnika u  $1/\text{K}$ ;  $T_p$  – temperatura provodnika u K,  $k_{at}$  – koeficijent povećanja električne otpornosti provodnika usled pouzavanja, prečnika žice i prevlačenja tankim slojem drugog metala koji se određuje iz [11],  $I$  – jačina struje kroz provodnik u A i  $S_p$  – površina poprečnog preseka provodnika u  $\text{m}^2$ .

Da bi se matematički model pojednostavio, razmatrani trožilni kabl se svodi na ekvivalentni jednožilni kabl uvođenjem ekvivalentnog provodnika. Na taj način se tri stvarna provodnika zamenjuju jednim ekvivalentnim. Snaga koja se u ekvivalentnom provodniku pretvara u toplotu po jedinici zapremine (tzv. ekvivalentna zapreminska snaga izvora toplote u  $\text{W/m}^3$ ) je:

$$Q_{g,v} = Q_{v1} \cdot N_p \cdot \frac{S_p}{S_{p,ekv}} \quad (2)$$

gde je:  $N_p$  – broj opterećenih provodnika stvarnog kabla (u analiziranom slučaju je  $N_p = 2$ ),  $S_p$  – površina poprečnog preseka

jednog provodnika stvarnog kabla u  $m^2$  i  $S_{p,ekv}$  – površina poprečnog preseka ekvivalentnog provodnika u  $m^2$ .

Ukupna snaga koja se u ekvivalentnom provodniku pretvara u toplotu u W je:

$$Q_g = Q_{g,v} \cdot S_{p,ekv} \cdot L_k \quad (3)$$

gde je  $L_k$  – dužina kabla ili provodnika u m.

Snaga kojom se toplota razmenjuje zračenjem između površine kabla i unutrašnje površine PVC cevi u W može se odrediti pomoću izraza za razmenu toplote zračenjem između dva beskonačno duga koaksijalna cilindra [12], tj.

$$Q_{zr} = \pi \cdot d_k \cdot L_k \cdot \sigma \cdot \frac{(T_k^4 - T_c^4)}{\frac{1}{\varepsilon_k} + \frac{d_k}{d_c} \left( \frac{1}{\varepsilon_c} - 1 \right)} \quad (4)$$

gde je:  $\sigma$  – Stefan-Boltzmann-ova konstanta u  $W/(m^2 \cdot K^4)$ ,  $T_c$  – temperatura unutrašnje površine PVC cevi u K,  $\varepsilon_k$  – koeficijent emisije toplote sa površine kabla,  $\varepsilon_c$  – koeficijent emisije toplote sa unutrašnje površine PVC cevi,  $d_k$  – spoljašnji prečnik kabla u m i  $d_c$  – unutrašnji prečnik PVC cevi u m.

Konačno, temperatura površine kabla u K može se odrediti pomoću izraza za razmenu toplote prirodnom konvekcijom između površine kabla i vazduha koji ispunjava prostor između kabla u unutrašnje površine cevi:

$$T_k = \frac{(Q_g - Q_{zr})}{\pi \cdot d_k \cdot L_k \cdot h_c} + T_c \quad (5)$$

gde je  $Q_g$  u W,  $Q_{zr}$  u W,  $d_k$  u m,  $L_k$  u m,  $T_c$  u K, a  $h_c$  – koeficijent razmene toplote konvekcijom između površine kabla i vazduha u  $W/(m^2 \cdot K)$ .

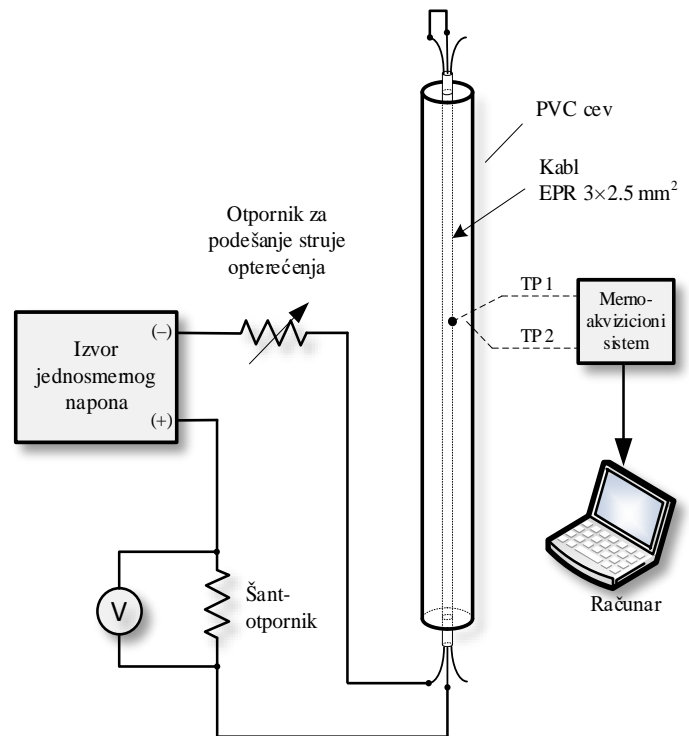
Koeficijent  $h_c$  se određuje na osnovu efektivne vrednosti specifične toplotne provodnosti vazduha između površine kabla i unutrašnje površine cevi, kao i širine vazdušnog kanala između kabla i unutrašnje površine cevi. U vezi s tim, efektivna vrednost specifične toplotne provodnosti vazduha zavisi od karakteristika vazduha koji se nalazi u kanalu između kabla i unutrašnje površine cevi. U ovom konkretnom slučaju razmena toplote vrši se prirodnom konvekcijom između površine kabla i vazduha u kanalu (cevi), koja se modelira odgovarajućom korelacijom za razmenu toplote između dva koaksijalna cilindra. Postupak proračuna je iterativan i sproveden je pomoću MATLAB programa koji su samostalno razvili autori. S obzirom da proračun količina toplote koje se sa površine kabla odvođe konvekcijom i zračenjem zahteva početnu vrednost temperature površine kabla, izvršen je odgovarajući početni proračun iste. Konačno, ovaj proračun se završava kada razlika između novodobijene i početne vrednosti temperature površine kabla postane manja od zadate tačnosti. Pri tome se pretpostavlja da je temperatura unutrašnje površine cevi  $T_c$  konstantna, a njena vrednost se zadaje kao ulazni podatak.

Posle određivanja temperature površine kabla koja odgovara nekom paru strujnog opterećenja i temperature unutrašnje površine cevi, vrši se provera dobijenih vrednosti pomoću

dvodimenzionalnog MKE modela kabla u softverskom paketu COMSOL Multiphysics 4.3 (Heat Transfer Module). Ulazni parametri za simulacije u COMSOL-u su sledeći: (i) temperatura unutrašnje površine PVC cevi, (ii) efektivna vrednost specifične toplotne provodnosti vazduha između površine kabla i unutrašnje površine cevi i (iii) površinska snaga razmene toplote prirodnom konvekcijom između površine kabla i vazduha u cevi (koja se dobija pomoću razvijenog MATLAB programa). Vrednosti temperature površine kabla dobijene primenom analitičkog modela realizovanog u MATLAB-u i numeričkog modela realizovanog u COMSOL-u uporedno su prikazane u tački IV.

### III OPREMA I POSTUPAK REALIZACIJE EKSPERIMENTA

Na Slici 1 dat je šematski prikaz eksperimentalnog kola korišćenog za simulaciju pogona i zagrevanja napojnog EPR kabla potapajuće pumpe koji je instaliran u delu cevnog bunara sa vazduhom. U eksperimentalnom kolu je korišćena PVC cev visine 2.75 m (približno jednaka visini prostorije), unutrašnjeg prečnika 0.1056 m i debljine zida 2.2 mm. Kabl je instaliran u unutrašnjosti cevi tako da kabl i cev formiraju sistem od dva koaksijalna cilindra konačne dužine čije se podužne ose poklapaju. Vertikalna cev je sa oba svoja kraja zatvorena PVC poklopcima kroz čije središnje delove prolaze kablovske uvodnice sa kablom. Uvodnice su iskorišćene za pričvršćivanje i zatezanje kabla. Zatvaranjem cevi onemogućeno je da vazduh struji kroz cev od donjeg prema gornjem poklopcu. Primenom ovakvog fizičkog modela uvaženi su ambijentni uslovi koji vladaju u gornjem delu cevnog bunara sa vazduhom, tj. u delu cevnog bunara između statičkog nivoa vode i betonskog poklopcu bunara.



**Slika 1.** Šematski prikaz eksperimentalnog kola za strujno opterećenje i merenje temperature površine kabla instaliranog u vertikalnoj PVC cevi

Eksperimenti su izvedeni sa trožilnim EPR kablom čiji su provodnici od bakra i imaju poprečni presek od 2.5 mm<sup>2</sup>. Ovaj EPR kabl se inače, zbog svoje fleksibilnosti, koristi za napajanje potapajućih pumpi. Dva provodnika ovog kabla su istovremeno opterećivana jednosmernom strujom iz spoljašnjeg izvora konstantnog napona, dok je treći bio neopterećen. Na taj način je simuliran pogon napojnog kabla BLDC motora, tokom kojeg su u svakom trenutku po dva provodnika opterećena strujom iste jačine. Opterećivanje dva provodnika strujom iste jačine ostvareno je rednim vezivanjem istih. Tako vezani provodnici su priključeni na izvor jednosmernog napona od 5 V. Na red sa ta dva provodnika vezan je i promenljivi otpornik sa ciljem da ograniči i podesi vrednost struje kroz provodnike. Jačina struje u kolu merena je pomoću šant-otpornika integrisanog u univerzalni digitalni instrument (voltmetar). Merenje temperature površine kabla i unutrašnje površine cevi realizovano je pomoću dva termopara tipa J i merno-akvizicionog sistema Agilent 34970A sa 20-kanalnim multiplekserom 34901A. Ovaj merno-akvizicioni sistem je povezan sa računarom koji prikazuje i istovremeno snima izmerene vrednosti temperatura. Termoparovi su postavljeni u istoj ravni na polovini visine kabla (termopar TP1) i cevi (termopar TP2).

Pre početka merenja svi prozori i vrata u laboratoriji bili su zatvoreni, a klima-uređaj i ostali izvori toplote isključeni. Na ovaj način je onemogućeno prinudno strujanje vazduha u laboratoriji i eliminisano dodatno zagrevanje eksperimentalnog kola. Tokom izvođenja eksperimenata, pod dejstvom zagrevanja provodnika dolazilo je do porasta električne otpornosti provodnika, a samim tim i do postepenog smanjenja jačine struje u kolu. Da bi se jačina struje držala na željenoj vrednosti ista je neprekidno praćena, a njena regulacija je vršena pomoću promenljivog otpornika. Tokom svih eksperimenata, temperatura vazduha u laboratoriji iznosila je 27 °C sa odstupanjem od ±2 °C. Opterećivanje provodnika kabla vršeno je sa tri različite jačine jednosmerne struje, i to: 10, 14 i 20 A. Proces zagrevanja provodnika kabla bio je neprekidan, tj. kada je temperatura površine kabla dostigla ustaljenu vrednost koja odgovara jačini struje od 10 A, onda je jačina struje povećana sa 10 na 14 A, pa

se čekalo novo ustaljeno stanje i tako redom. Vremenski period zagrevanja kabla sa jednom jačinom struje približno je trajao 1 čas, odnosno sva tri eksperimenta sa dostizanjem odgovarajućih ustaljenih stanja (temperatura) trajala su oko 3 časa.

#### IV UPOREDNI PRIKAZ VREDNOSTI TEMPERATURE POVRŠINE KABLA DOBIJENIH EKSPERIMENTALNIM, ANALITIČKIM I NUMERIČKIM PUTEM

Kako bi izračunate i izmerene vrednosti temperature površine kabla mogle međusobno da se upoređuju bilo je neophodno postići približno iste eksploatacione uslove, tj. dobiti približno iste eksperimentalne i izračunate vrednosti za temperaturu unutrašnje površine cevi i strujno opterećenje kabla. Kada su eksperimenti u pitanju, s obzirom da temperatura unutrašnje površine cevi, osim od jačine struje (toplote generisane u provodnicima kabla), zavisi i od temperature ambijentnog vazduha (temperature vazduha u laboratoriji), istu je bilo veoma teško regulisati. To je bio glavni razlog zbog čega su prvo merene temperature površine kabla i unutrašnje površine cevi za tri različite jačine struje, a zatim upoređene sa njima odgovarajućim vrednostima iz analitičkog i numeričkog proračuna. Temperature površine kabla/plašta ( $T_k$ ) i unutrašnje površine cevi ( $T_c$ ) izmerene pri jačinama struje ( $I$ ) od 10, 14 i 20 A date su u Tabeli 1. Ovako izmerene temperature su dalje korišćene kao ulazni parametri za analitičke i numeričke proračune.

Za numerički proračun primenom MKE u COMSOL-u korišćeni su sledeći ulazni podaci: (i) izmerena vrednost temperature unutrašnje površine PVC cevi, (ii) efektivna vrednost specifične toplotne provodnosti vazduha u kanalu između EPR kabla i unutrašnje površine PVC cevi – dobijena primenom analitičkog modela i (iii) snaga kojom se toplota razmenjuje prirodnom konvekcijom između površine kabla i vazduha u kanalu – takođe dobijena primenom analitičkog modela. Ako se sada uporede vrednosti temperature površine kabla dobijene primenom analitičkog modela i MKE (Tabela 1), može se zaključiti da među njima nema razlike. Ovako dobijeni rezultati potvrđuju tačnost razvijenog analitičkog modela.

**Tabela 1.** Uporedni prikaz vrednosti temperature površine EPR kabla 3×2.5 mm<sup>2</sup> dobijenih merenjem, primenom analitičkog modela i primenom MKE

Strujno opterećenje <sup>1)</sup>	Izmerene vrednosti za temperature $T_c$ i $T_k$		Temperatura $T_k$ dobijena primenom analitičkog modela u MATLAB-u <sup>2)</sup>	Temperatura $T_k$ dobijena primenom MKE u COMSOL-u <sup>2)</sup>	Razlika između izmerene i izračunate vrednosti za temperaturu $T_k$
	$T_c$ [°C]	$T_k$ [°C]	$T_k$ [°C]	$T_k$ [°C]	$\Delta T_k$ [%]
10	28.2	32.6	32.12	32.12	1.47
14	30.4	38.8	37.42	37.42	3.56
20	34.2	49.7	47.40	47.40	4.63

1) Jačine struje koje su korišćene u eksperimentima i analitičkom modelu.

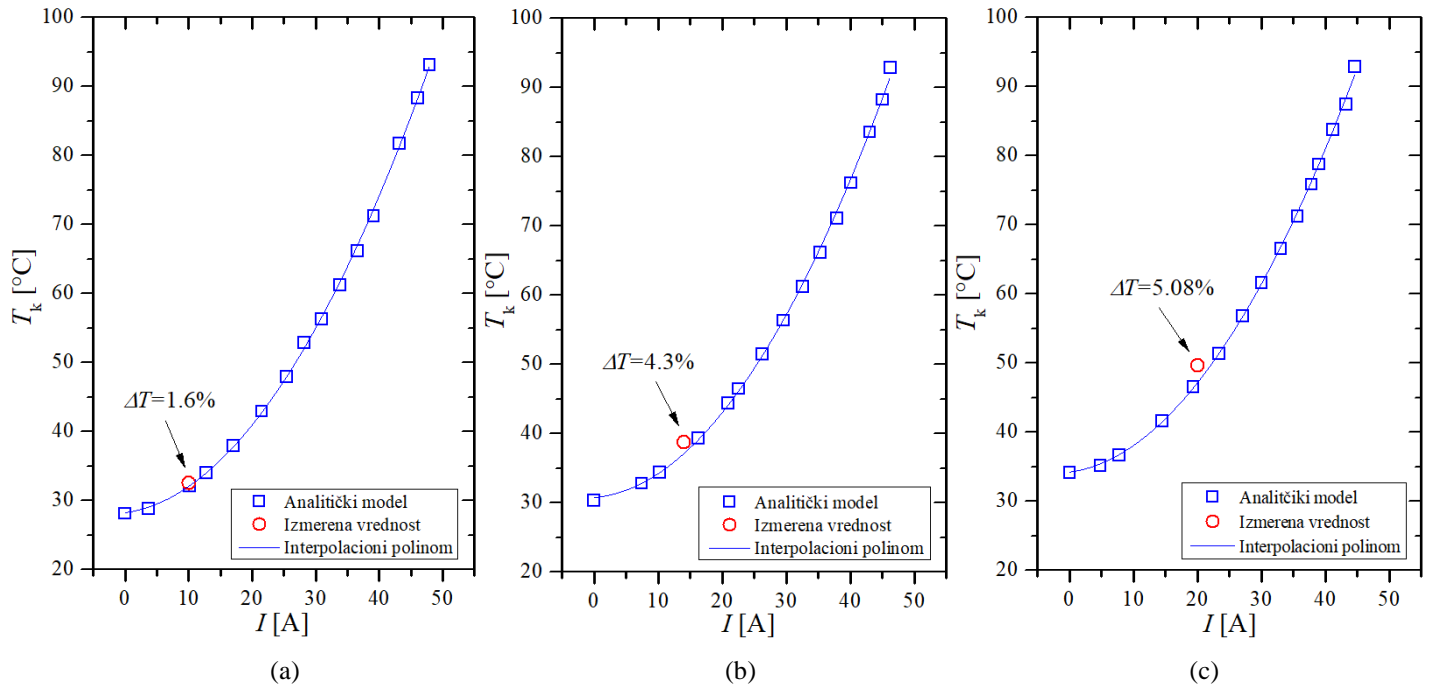
2) Za temperaturu unutrašnje površine cevi  $T_c$  zadavane su vrednosti dobijene eksperimentalnim putem.

U analitičkom modelu korišćene su vrednosti temperature unutrašnje površine cevi dobijene eksperimentalnim putem. Na osnovu njih su zatim dobijene vrednosti temperature površine kabla koje odgovaraju jačinama struje iz opsega od 0 do 48 A. Na Slici 2 prikazane su izračunate vrednosti temperature površine kabla u zavisnosti od jačine struje za tri različite

izmerene vrednosti temperature unutrašnje površine cevi, i to za  $T_c$  jednako 28.2 °C, 30.4 °C i 34.2 °C. Potom je za svaki od ova tri slučaja određena interpolaciona funkcija, tj. polinom drugog stepena. U vezi s tim, na Slici 2 su prikazane izmerene vrednosti temperature  $T_k$  (označene kružićima) zajedno sa procentualnim odstupanjima ( $\Delta T$ ) između izmerenih vrednosti temperatura i

onih dobijenih pomoću interpolacionog polinoma, tj. funkcije  $T_k(I)$  (označene punom linijom). Procentualna odstupanja polinomskih vrednosti u odnosu na izmerene u iznosu od 1.6, 4.3 i 5.08% ne razlikuju se značajnije od procentualnih odstupanja vrednosti dobijenih pomoću analitičkog modela u odnosu na iste izmerene vrednosti, a koje prema Tabeli 1 redom iznose 1.47,

3.56 i 4.63%. Razlike u procentualnim odstupanjima između vrednosti za temperaturu  $T_k$  sa Slike 2 i iz Tabele 1 mogu se objasniti nepotpunim poklapanjem interpolacionog polinoma (puna linija na Slici 2) sa izračunatim vrednostima temperature površine kabla (kvadratići na Slici 2).



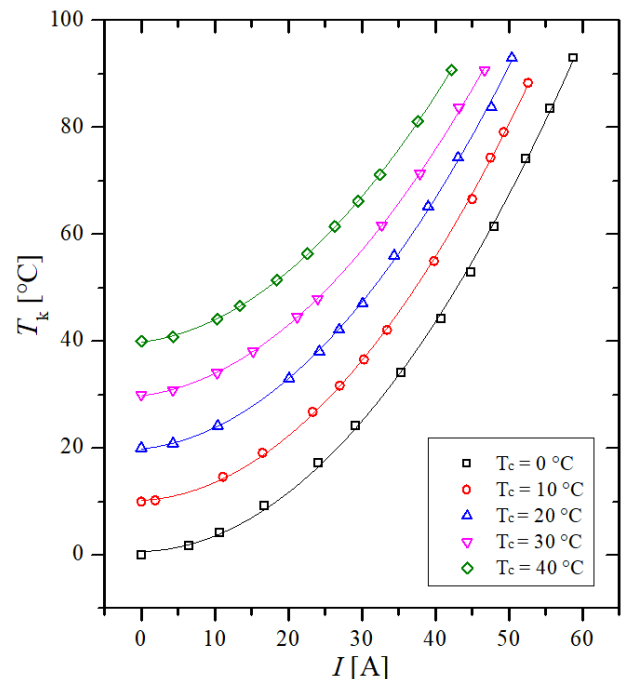
**Slika 2.** Temperatura površine kabla u zavisnosti od jačine struje dobijena primenom analitičkog modela i merenjem za temperaturu unutrašnje površine cevi od (a)  $T_c=28.2$  °C, (b)  $T_c=30.4$  °C i (c)  $T_c=34.2$  °C

#### V KORELACIJA IZMEĐU TEMPERATURE PVRŠINE KABLA I STRUJNOG OPTEREĆENJA

S obzirom da su vrednosti temperature površine kabla dobijene primenom analitičkog modela uspešno potvrđene primenom MKE i eksperimentalnim putem, u ovom koraku se može odrediti korelacija između temperature površine kabla, sa jedne, i strujnog opterećenja i temperature unutrašnje površine cevi, sa druge strane. Na isti način kako je to učinjeno pri određivanju interpolacionih funkcija za  $T_c=28.2$  °C,  $T_c=30.4$  °C i  $T_c=34.2$  °C sa Slike 2, ovde su određene interpolacione funkcije za vrednosti  $T_c$  iz opsega od 0 do 40 °C. Zatim su tako dobijene vrednosti temperature površine kabla  $T_k$  funkcionalno povezane pomoću interpolacionih polinoma. Zavisnosti temperature površine kabla od strujnog opterećenja za temperature unutrašnje površine cevi od 0, 10, 20, 30 i 40 °C prikazane su na Slici 3. Dakle, uz tačke dobijene primenom analitičkog modela, na Slici 3 su prikazane i interpolacione funkcije oblika

$$T_k = f(I) = \alpha \cdot I^2 + \beta \cdot I + \gamma, \quad \text{za } T_c = \text{const.} \quad (6)$$

gde  $\alpha$ ,  $\beta$  i  $\gamma$  predstavljaju koeficijente interpolacionog polinoma drugog stepena. Vrednosti ovih koeficijenata za svaki od pet interpolacionih polinoma, kao i srednje kvadratna odstupanja dobijenih funkcija dati su u Tabeli 2.



**Slika 3.** Temperatura površine kabla u zavisnosti od strujnog opterećenja za temperature unutrašnje površine cevi od 0, 10, 20, 30 i 40 °C

**Tabela 2.** Koeficijenti i srednje kvadratno odstupanje ineterpolacionih funkcija temperature površine kabla za različite temperature unutrašnje površine cevi

Temperatura unutrašnje površine cevi – $T_c$ [°C]	Koeficijenti funkcije $T_k = \alpha \cdot I^2 + \beta \cdot I + \gamma$			Srednje kvadratno odstupanje [%]
	$\alpha$	$\beta$	$\gamma^{1)}$	
0	0.02615	0.02772	0.68664 (0)	0.061
10	0.02680	0.06796	10.23518 (10)	0.032
20	0.02579	0.14148	19.85763 (20)	0.061
30	0.02446	0.17359	29.8106 (30)	0.025
40	0.02448	0.17382	39.83215 (40)	0.008

1) Van zagrada su vrednosti dobijene primenom interpolacionog polinoma (6), dok su u zagradama korigovane vrednosti

Da bi se dobila korelacija između temperature površine kabla  $T_k$ , sa jedne, i strujnog opterećenja  $I$  i temperature unutrašnje površine cevi  $T_c$ , sa druge strane, u sledećem koraku je potrebno definisati funkcionalnu zavisnost koeficijenata polinoma  $\alpha$ ,  $\beta$  i  $\gamma$  od temperature unutrašnje površine cevi  $T_c$ . Zadovoljavajuće interpolacione funkcije za zavisnosti  $\alpha=f(T_c)$  i  $\beta=f(T_c)$  trebalo bi da su oblika polinoma četvrtog stepena. Za koeficijent  $\gamma$  izvršena je korekcija vrednosti dobijenih aproksimacionim polinomom (6), a korigovane vrednosti ovog koeficijenta su date u četvrtoj koloni Tabele 2 (u zagradama). Korekcija vrednosti koeficijenta  $\gamma$  izvršena je sa ciljem da se dobije veća tačnost primenjenog polinoma. Vrednost koeficijenta  $\gamma$  predstavlja temperaturu površine kabla koja odgovara slučaju kada kroz provodnike ne protiče struja. U tom slučaju temperatura površine kabla u stacionarnom stanju jednaka je temperaturi unutrašnje površine cevi, odnosno ambijentnog vazduha. Shodno tome, proizilazi da su korigovane vrednosti koeficijenta  $\gamma$  jednake temperaturi unutrašnje površine cevi  $T_c$ . Konkretno, vrednosti interpolacionih koeficijenata  $\alpha$ ,  $\beta$  i  $\gamma$  mogu se redom dobiti pomoću sledećih izraza:

$$\alpha = 1.375 \cdot 10^{-9} \cdot T_c^4 + 1.40833 \cdot 10^{-7} \cdot T_c^3 - 1.34875 \cdot 10^{-5} \cdot T_c^2 + 1.84417 \cdot 10^{-4} \cdot T_c + 0.02615 \quad (7)$$

$$\beta = 3.50917 \cdot 10^{-7} \cdot T_c^4 - 3.35033 \cdot 10^{-5} \cdot T_c^3 + 9.25858 \cdot 10^{-4} \cdot T_c^2 - 2.24 \cdot 10^{-3} \cdot T_c + 0.02772 \quad (8)$$

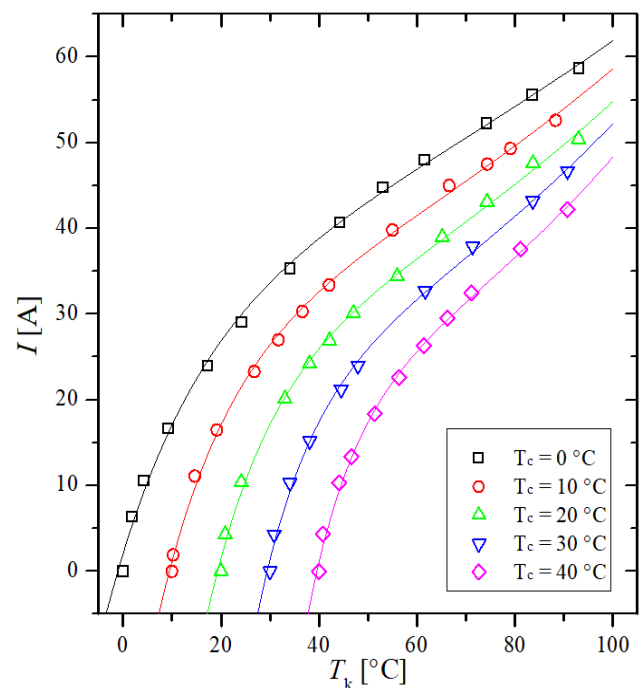
$$\gamma = T_c \quad (9)$$

U slučaju određivanja funkcionalnih zavisnosti koeficijenata  $\alpha$  i  $\beta$  od temperature  $T_c$ , srednje kvadratno odstupanje interpolacione funkcije bilo je jednako nuli. Konačno, analitički izraz (6) se može koristiti za proračun temperature površine kabla  $T_k$  pod uslovom da vrednost strujnog opterećenja pripada opsegu od 0 do 48 A, a izrazi (7), (8) i (9) se mogu koristiti redom za koeficijente  $\alpha$ ,  $\beta$  i  $\gamma$  pod uslovom da vrednost temperature unutrašnje površine cevi  $T_c$  pripada opsegu od 0 do 40 °C.

#### VI KORELACIJA IZMEĐU STRUJNOG OPTEREĆENJA I TEMPERATURA POVRŠINE KABLA I UNUTRAŠNJE POVRŠINE CEVI

Na isti način kako je dobijena korelacija između temperature površine kabla  $T_k$ , sa jedne, i strujnog opterećenja  $I$  i temperature unutrašnje površine cevi  $T_c$ , sa druge strane, može se dobiti korelacija između strujnog opterećenja  $I$  i temperatura  $T_k$  i  $T_c$ . Tako dobijena korelacija za strujno opterećenje može se generalno koristiti za određivanje trajno dozvoljenog strujnog

opterećenja nekog kabla pod određenim eksploatacionim uslovima, kao npr. u slučaju kabla instaliranog u vertikalnoj PVC cevi kada su temperature površine kabla i unutrašnje površine cevi poznate. Na Slici 4 su date vrednosti strujnog opterećenja dobijene za različite temperature površine kabla i unutrašnje površine cevi. U pitanju su iste tačke sa Slike 3 koje su dobijene primenom analitičkog modela i MATLAB programa, s tim da su sada ove tačke predstavljene u formi zavisnosti  $I=f(T_k, T_c)$ .



**Slika 4.** Strujno opterećenje u zavisnosti od temperature površine kabla za različite temperature unutrašnje površine cevi

Funkcija koja sa zadovoljavajućom tačnošću povezuje tačke sa Slike 4 (predstavljena punom linijom) je sledećeg oblika

$$I = f(T_k) = a \cdot e^{(b \cdot T_k)} + c \cdot e^{(d \cdot T_k)}, \text{ za } T_c = \text{const.} \quad (10)$$

što znači da se korelacija između strujnog opterećenja  $I$  i temperatura  $T_k$  i  $T_c$  u razmatranom opsegu može predstaviti zbirom dve eksponencijalne funkcije, gde su  $a$ ,  $b$ ,  $c$  i  $d$  odgovarajući koeficijenti. Koeficijenti  $a$ ,  $b$ ,  $c$  i  $d$  su određeni u postupku interpolacije funkcije strujnog opterećenja za temperature unutrašnje površine cevi od 0, 10, 20, 30 i 40 °C. Vrednosti ovih koeficijenata i njima odgovarajuća srednje kvadratna odstupanja data su u Tabeli 3.



**Tabela 3.** Koeficijenti i srednje kvadratno odstupanje interpolacionih funkcija strujnog opterećenja za različite temperature unutrašnje površine cevi

Temperatura unutrašnje površine cevi $T_c$ [°C]	Koeficijenti funkcije $I = a \cdot e^{(b \cdot T_k)} + c \cdot e^{(d \cdot T_k)}$				Srednje kvadratno odstupanje [%]
	$a$	$b$	$c$	$d$	
0	32.82	0.006368	-30.79	-0.05418	0.22
10	25.93	0.008168	-54.06	-0.06956	0.16
20	21.25	0.009483	-114.2	-0.07765	0.22
30	16.80	0.01135	-331.2	-0.09004	0.22
40	12.59	0.01346	-1284	-0.1037	0.26

Izrazi za koeficijente  $a$ ,  $b$ ,  $c$  i  $d$  iz eksponencijalne funkcije (10) mogu se izvesti na osnovu vrednosti ovih koeficijenata iz Tabele 3, tj. njihovih zavisnosti od temperature unutrašnje površine cevi  $T_c$ . Vrednosti ovih koeficijenata se sa zadovoljavajućom tačnošću mogu odrediti pomoću interpolacionih polinoma četvrtog stepena, tj.

$$a = 8.292 \cdot 10^{-6} \cdot T_c^4 - 8.275 \cdot 10^{-4} \cdot T_c^3 + 3.007 \cdot 10^{-2} \cdot T_c^2 - 0.9153 \cdot T_c - 32.82 \quad (11)$$

$$b = -5.608 \cdot 10^{-9} \cdot T_c^4 + 5.093 \cdot 10^{-7} \cdot T_c^3 - 1.378 \cdot 10^{-5} \cdot T_c^2 + 2.725 \cdot 10^{-4} \cdot T_c + 6.368 \cdot 10^{-3} \quad (12)$$

$$c = -1.912 \cdot 10^{-3} \cdot T_c^4 + 9.474 \cdot 10^{-2} \cdot T_c^3 - 1.688 \cdot T_c^2 + 6.991 \cdot T_c - 30.79 \quad (13)$$

$$d = 6.092 \cdot 10^{-8} \cdot T_c^4 - 5.587 \cdot 10^{-6} \cdot T_c^3 + 1.614 \cdot 10^{-4} \cdot T_c^2 - 2.654 \cdot 10^{-3} \cdot T_c - 5.418 \cdot 10^{-2} \quad (14)$$

Izrazi za koeficijente  $a$ ,  $b$ ,  $c$  i  $d$  važe za vrednosti temperature unutrašnje površine cevi iz opsega od 0 do 40 °C, dok se korelacija (10) može koristiti za vrednost temperature površine kabla manju od ili jednaku 93 °C.

## VII ZAKLJUČAK

Na osnovu sprovedene analitičke i numeričke analize zagrevanja trožilnog EPR kabla instaliranog u vertikalnoj PVC cevi, kao i eksperimentalnih rezultata dobijenih pomoću fizičkog modela za deo napojnog kabla potapajuće pumpe koji je u cevnom bunaru okružen vazduhom, izvedeni su sledeći zaključci: **(i)** Uspešno je izvedena i potvrđena korelacija između temperature površine kabla, sa jedne, i strujnog opterećenja i temperature unutrašnje površine cevi, sa druge strane. **(ii)** Uspešno je izvedena i potvrđena korelacija između strujnog opterećenja, sa jedne, i temperatura površine kabla i unutrašnje površine cevi, sa druge strane. **(iii)** Procentualna odstupanja vrednosti dobijenih pomoću analitičkog modela u odnosu na izmerene vrednosti iznose 1.47-4.63% za slučaj kada se strujno opterećenje menja u granicama od 10 do 20 A. **(iv)** Procentualna odstupanja vrednosti dobijenih pomoću

analitičkog modela u odnosu na vrednosti dobijene primenom MKE jednaka su nuli, čime je potvrđena tačnost analitičkog modela. **(v)** Procentualna odstupanja interpolisanih vrednosti u odnosu na izmerene vrednosti iznose 1.6-5.08% za slučaj kada se strujno opterećenje menja u granicama od 10 do 20 A. **(vi)** Izvedena korelacija za strujno opterećenje može se generalno koristiti za određivanje trajno dozvoljenog strujnog opterećenja nekog kabla instaliranog u vertikalnoj cevi pod sledećim eksploatacionim uslovima: vrednost temperature unutrašnje površine cevi iz opsega 0-40 °C i maksimalnu vrednost temperature površine kabla od 93 °C.

## ZAHVALNICA/ACKNOWLEDGEMENT

Ovaj rad je zasnovan na istraživanju sprovedenom u okviru programa NIO 200155 i NIO 200132 koje finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

## LITERATURA/REFERENCES

- [1] Solar Powered Water Systems - Design and Installation Guide, UNICEF Water Mission, 2020. [Online] <https://watermission.org/wp-content/uploads/2020/10/Solar-Powered-Water-Systems-Design-and-Installation-Guide-Water-Mission-UNICEF.pdf>
- [2] Klimenta, D., Lekic, J., Arsic, S., Tasic, D., Krstic, N., Radosavljevic, D. A Novel Procedure for Quick Design of Off-Grid PV Water Pumping Systems for Irrigation. *Elektronika Ir Elektrotehnika*, Vol. 27, No. 2. pp. 64-77, 2021. <http://dx.doi.org/10.5755/402.eie.28503>
- [3] Klimenta, D., Tasic, D., Krstic, N., Radosavljević, D. Postupak projektovanja PV pumpnih sistema za navodnjavanje sa motorom jednosmerne struje i fiksnim PV panelima na osnovu istorijskih podataka o klimi sa meteoroloških online servisa. *Zbornik radova Energetika 2021*, str. 320-328, Zlatibor, Srbija, 22–25. jun 2021.
- [4] Mičić, M. Solar Pumping Project: Požarevac 3.5ha Trešnja. Belgrade, Serbia: Turn-Key Project d.o.o. 2019. [Online]. [https://www.tkpenery.com/wp-content/uploads/2019/12/Projekat\\_PS2-1800\\_35-hektara-4-sekcije-tre%C5%A1nja\\_Pozarevac\\_35m\\_42cbm\\_2880Wp.pdf](https://www.tkpenery.com/wp-content/uploads/2019/12/Projekat_PS2-1800_35-hektara-4-sekcije-tre%C5%A1nja_Pozarevac_35m_42cbm_2880Wp.pdf) [pristupljeno 18.02.2022]
- [5] Purna Chandra Rao, A., Obulesh, Y. P., Sai Babu, Ch. Mathematical modeling of BLDC motor with closed loop speed control using PID controller under various loading conditions. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 7, No. 10, pp. 1321–1328, 2012. [http://www.arnpjournals.com/jeas/research\\_papers/rp\\_2012/jeas\\_1012\\_796.pdf](http://www.arnpjournals.com/jeas/research_papers/rp_2012/jeas_1012_796.pdf)
- [6] IEEE Standard Power Cable Ampacity Tables. IEEE Std 835-1994: 3.5.7 Vertical Cables in Air-Cable Riser. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7297793?partnum=STD94232&searchProductType=IEEE%20Standards> [pristupljeno 18.02.2022]
- [7] Hartlein, R. A., Black, W. Z. Ampacity of Electric Power Cables in Vertical Protective Risers. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-102, No. 6, pp. 1678-1686, 1983.

- [8] Anders, G. J. Rating of cables on riser poles, in trays, in tunnels and shafts, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 1, pp. 3-11, 1996.
- [9] Baker, I., De Leon, F. Equivalent Circuit for the Thermal Analysis of Cables in Non-Vented Vertical Risers, IET Science Measurement Technology, Vol. 9, No. 5, pp. 606-614, 2015. <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2014.0127>
- [10] Chippendale, R. D., Pilgrim, J. A., Goddard, K. F., Canga, P. Analytical Thermal Rating Method for Cables Installed in J-Tubes, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 32, No. 4, pp. 1721-1729, 2016. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2016.2571844>
- [11] International Standard IEC 60228:2004. *Conductors of insulated cables*, 3rd ed., International Electrotechnical Commission, Switzerland, 2004.
- [12] Holman, J. P. *Heat transfer*, 10th ed., The McGraw-Hill Companies, New York, 2010.

## AUTORI/AUTHORS

**msr Marko Šučurović** – asistent, Fakultet tehničkih nauka u Čačku, Univerzitet u Kragujevcu. [marko.sucurovic@ftn.kg.ac.rs](mailto:marko.sucurovic@ftn.kg.ac.rs), ORCID [0000-0001-9574-6101](https://orcid.org/0000-0001-9574-6101).

**dr Dardan Klimenta** - redovni profesor, Fakultet tehničkih nauka Univerziteta u Kosovskoj Mitrovici. [dardan.klimenta@pr.ac.rs](mailto:dardan.klimenta@pr.ac.rs), ORCID [0000-0003-0019-8371](https://orcid.org/0000-0003-0019-8371).

**dr Dragan Tasić** – redovni profesor, Elektronski fakultetu Univerziteta u Nišu, [dragan.tasic@elfak.ni.ac.rs](mailto:dragan.tasic@elfak.ni.ac.rs), ORCID [0000-0001-5957-9617](https://orcid.org/0000-0001-5957-9617).

**dr Bojan Perović** – docent, Fakultet tehničkih nauka Univerzitet u Kosovskoj Mitrovici. [bojan.perovic@pr.ac.rs](mailto:bojan.perovic@pr.ac.rs), ORCID [0000-0001-7236-2156](https://orcid.org/0000-0001-7236-2156).