

Analiza zagrevanja bakarnih provodnika sa strujom

Heating Analysis of Copper Conductors with Current

Karolina Kasaš-Lažetić*, Gorana Mijatović*, Dejana Herceg*, Miroslav Prša**

* Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, R. Srbija

** Penzionisan sa Fakulteta tehničkih nauka, Univerziteta u Novom Sadu, R. Srbija

Rezime - U radu je prikazan metod merenja temperature na površi tri bakarna provodnika poprečnih preseka, 4 mm², 6 mm² i 10 mm². Pošto su prethodno određene karakteristike temperaturne sonde, izvršene su serije merenja na konkretnim žičanim pro-vodnicima. Prve dve serije merenja su vršene pomoću generatora vremenski konstantne struje, pri čemu su posmatrana dva slučaja: kada je, tokom merenja, napon na krajevima provodnika održavan konstantnim i kada je, tokom merenja, jačina struje u provodniku održavana konstantnom. Nakon toga su izvršena merenja temperature na površi provodnika za slučaj napajanja provodnika vremenski promenljivom, prostoperiodičnom strujom, opet za dva posebna slučaja: kada je, tokom merenja, efektivna vrednost napona na krajevima provodnika održavana konstantnom i kada je, tokom merenja, efektivna vrednost jačine struje u provodniku održavana konstantnom. Zbog prisustva površinskog efekta, Džulovi gubici su bili veći u slučaju napajanja provodnika vremenski promenljivom strujom, što znači da je porast temperature bio brži i da je, pri istim naponima, odnosno, jačinama struja postizana viša temperatura. Džulovi gubici su bili veći i kada je, tokom merenja, jači-na struje u provodniku održavana konstantnom, kako u slučaju vremenski konstantnog, tako i pri vremenski promenljivom napajanju provodnika. Merenja temperature su vršena u toku 30 minuta, na svake 2 sekunde. Rezultati merenja, su prikazani grafički, vremenskim dijagramima temperature, a grafički je prikazano i poređenje metoda i rezultata svih ispitivanih provodnika.

Ključne reči - Merenje temperature na površi provodnika, konstantan napon/struja, vremenski konstantno/promenljivo napajanje

Abstract - The method for the temperature measurement on the surface of three copper conductors, with cross-sections of 4 mm², 6 mm² i 10 mm², are presented in this paper. After the determination of temperature probe, the series of temperature measurements are performed on chosen wire conductors. The first two series are performed applying DC generator, in two different cases: when, during the measurement the voltage on the conductor's end was held constant and the current inside the conductor was held constant. After that, the temperature measurements on the conductor's surface were performed supplying conductors with AC, time harmonic currents, again in two particular cases: constant RMS voltage value on the

conductor's ends and constant RMS value of current inside the conductor. The measuring results were expected for all four cases and for all thee conductors. Due to presence of skin effect, the Joule's losses were higher in the AC cases, meaning that the temperature increase was faster and that the final reached temperature, for the same values of voltage or currents, was higher. It was also demonstrated that the higher Joule's losses appeared when the current was kept constant during the measurements, in both DC and AC supplying. The measurements were performed with the instrument which enabled the results recording on USB stick; hence the measurements duration was 30 minutes, recording result every two seconds. The measuring results were presented graphically, together with graphical presentation of the comparison between methods and the results for all investigated conductors.

Index Terms - temperature measurement on the conductor's surface, dc/ac supplying, constant voltage/current

I UVOD

Bakarni provodnici se, zajedno sa aluminijumskim provodnicima, najčešće koriste u elektroenergetskoj praksi. Usled struja u provodnicima, dolazi do Džulovog efekta, pri čemu se deo električne energije pretvara u toplotu. Samim tim, raste temperatura unutar provodnika i na njegovoj površi, što je uvek ograničavajući faktor u korišćenju provodnika određenog poprečnog preseka.

Rešavanje ovog problema matematičkim putem, bilo da se radi o analitičkim ili približnim metodama, je uvek komplikovan, jer je problem sastavljen od dva dela; određivanja Džulovih gubitaka u svim tačkama provodnika, i određivanja raspodele temperature unutar i na površi provodnika. Osim toga, problem nije linearan, pošto se određene veličine menjaju u toku procesa zagrevanja.

Rezultate proračuna bi svakako trebalo verifikovati, a najpouzdanija verifikacija bi bila merenjem temperature. Zbog toga je odlučeno da se, čak pre samog proračuna, pristupi merenju temperaturne raspodele, kako bi se unapred znalo kakvi rezultati proračuna bi mogli da se očekuju.

Pošto bi rezultati merenja trebalo da posluže samo za poređenje sa rezultatima proračuna, merenje nije zahtevalo neku ekstremno visoku preciznost, tako da nije bilo obavljeno u temperaturno jako stabilizovanom prostoru, niti je bila primenjena automatska

stabilizacija napona ili jačine struje izvora. I pored toga, rezultati merenja daju odličan uvid u događanja unutar i na površi bakarnih provodnika sa strujom.

II TEORIJSKI PRISTUP

U ovom radu su posmatrani cilindrični provodnici od bakra, konstantnog prečnika, koji je mnogo manji od dužine provodnika. Zbog toga, problem može da se definiše kao dvodimenzionalan i da se posmatra u cilindričnom koordinatnom sistemu. Pri tome se osa provodnika poklapa sa z osom usvojenog koordinatnog sistema, a time i vektor gustine struje, kao i vektor jačine električnog polja u provodniku, imaju samo z komponentu,

$$\begin{aligned}\vec{J} &= \vec{i}_z \cdot J_z = \vec{i}_z \cdot J, \\ \vec{E}_{\text{u prov}} &= \vec{i}_z \cdot E_z = \vec{i}_z \cdot E.\end{aligned}\quad (1)$$

Zapreminska gustina snage Džulovih gubitaka u provodniku može da se definiše kao [1]:

$$\frac{dP_J}{dv} = \vec{J} \cdot \vec{E} = JE = \rho J^2 = \sigma E^2 = \frac{1}{\rho} E^2. \quad (2)$$

Važno je napomenuti da u izrazu (2), specifična otpornost ρ i specifična provodnost σ zavise od temperature.

U izrazu (2) može da se uoči i razlika između dva posmatrana slučaja, kada se, tokom merenja održava konstantnom jačina struje, $I = \text{const.}$, i kada se, tokom merenja, napon na krajevima provodnika održava konstantnim, $U = \text{const.}$ U prvom slučaju, kada je jačina struje konstantna ($J = \text{const.}$), zapreminska gustina snage raste tokom vremena, zbog porasta specifične otpornosti usled porasta temperature (temperaturni koeficijent bakra je pozitivan). U slučaju konstantnog napona na krajevima provodnika ($E = \text{const.}$), zapreminska gustina snage opada tokom vremena, zbog povećanja specifične otpornosti materijala pri porastu temperature. Prema tome, može da se očekuje da će brzina porasta temperature u vremenu, kao i konačno dostignuta temperatura, u drugom slučaju imati niže vrednosti.

Za manje promene temperature, promene specifične otpornosti materijala usled temperature, mogu da se izraze jednačinom [2]:

$$\rho_s = \rho_0(1 + \alpha\theta), \quad (3)$$

dok, za veći opseg temperature, promena specifične otpornosti može da se prikaže izrazom [2]:

$$\rho_s = \rho_0(1 + \alpha\theta + \beta\theta^2 + \gamma\theta^3). \quad (4)$$

U (3) i (4) su konstante α , β i γ temperaturni koeficijenti za ispitivani materijal (u ovom slučaju bakar), dok je konstanta ρ_0 specifična otpornost materijala na temperaturi 0°C .

U slučaju vremenski promenljivih struja u provodniku, kada je prisutan i površinski efekat, a ponekad i efekat blizine, promena specifične otpornosti u zavisnosti od temperature može da se izrazi kao [3]:

$$\rho_s = \rho_0(1 + \alpha\theta)(1 + y_s + y_p). \quad (5)$$

Jednačina (5) može da se napiše i u obliku [4]:

$$\rho_s = k_1 k_2 \rho_0(1 + \alpha\theta). \quad (6)$$

U izrazima (5) i (6) konstante y_s i k_1 su koeficijenti koji definišu uticaj površinskog efekta na zavisnost specifične otpornosti materijala od temperature. Koeficijent y_p predstavlja faktor koji uzima u obzir efekat blizine, dok koeficijent k_2 definiše uticaj gubitaka u feromagnetskom materijalu, kada se posmatra alužel uže ($y_{pCu} = 0$).

Ukupna snaga Džulovih gubitaka može da se izračuna integracijom (2):

$$P_J = \int_V \frac{dP_J}{dv} dv = \int_V JE dv = \int_V \rho J^2 dv = \int_V \sigma E^2 dv, \quad (7)$$

a ukupna energija Džulovih gubitaka u vremenu od $t = 0$, do konačnog vremena, $t = t$, određuje se integracijom (7) po vremenu:

$$W_J = \int_0^t \int_V \frac{dP_J}{dv} dv dt = \int_0^t \int_V \rho J^2 dv dt = \int_0^t \int_V \sigma E^2 dv dt. \quad (8)$$

Raspodela temperature po celoj zapremini provodnika, prouzrokovana zapreminskom gustinom toplotne energije, \dot{q}_v , predstavlja rešenje parabolodne diferencijalne jednačine [5]:

$$\psi c_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = \dot{q}_v. \quad (9)$$

U izrazu (9) je ψ specifična masa provodnika, k je toplotna provodnost, a c_p je specifični toplotni kapacitet materijala provodnika.

U slučaju vremenski konstantnih struja, problem nije suviše složen. Površinski efekat ne postoji, tako da se struje raspoređuje ravnomerno po poprečnom preseku provodnika; vektor gustine struje je isti u svim tačkama provodnika, pa nema potrebe da se vrši integracija prikazana u (7). Kako su sve veličine vremenski konstantne, nije potrebna ni integracija (8). U tom slučaju i specifična otpornost i otpornost provodnika zavise samo od temperature.

S druge strane, kao što je već napomenuto, pri vremenski promenljivom napajanju provodnika, prisutan je površinski efekat. U slučaju prostoperiodičnog napajanja, površinski efekat može da se opiše izrazom za dubinu prodiranja:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}}. \quad (10)$$

Prema izrazu (10), specifična otpornost definiše i dubinu prodiranja, odnosno, izrazitost površinskog efekta. Prema tome, raspodela struje po poprečnom preseku provodnika zavisi i od temperature, preko specifične otpornosti, tako da ceo problem postaje nelinearan. Proces stvaranja raspodele toplote postaje veoma kompleksan i sadrži u sebi velik broj međusobnih uticaja različitih parametara. Na taj način i proračun raspodele temperature u provodniku i na njegovoj površi postaje takođe veoma složen.

Mnogi računarski programi, kao, na primer COMSOL Multiphysics [6] ili neki drugi pristupi [7] do [10] mogu da reše ovakve probleme, ali bi rezultate proračuna svakako trebalo potvrditi na neki način, pri čemu je najbolje potvrditi računskih rezultata dobiti merenjem.

III OPIS MERNE METODE

Da bi predviđena merenja mogla da se obave, konstruisan je nosač provodnika, prikazan na Sl. 1.



Slika 1. Nosač provodnika sa naponskim priključcima

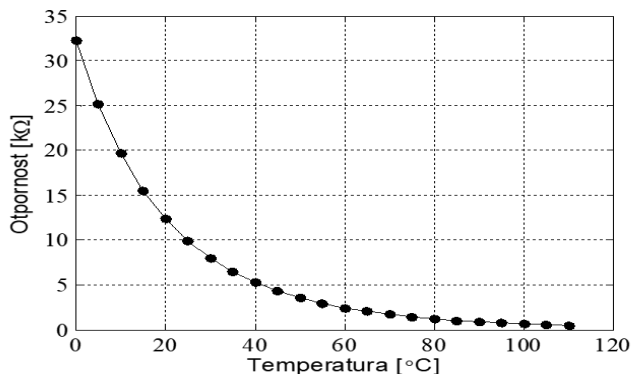
Dužina provodnika, između naponskih priključaka je iznosila 2 m, a naponski priključci su bili povezani sa držačem provodnika, sa donje strane nosača.

Provodnik se povezivao sa generatorima vremenski konstantnog ili vremenski promenljivog napajanja pomoću odgovarajućih zavrtanja i podloški, kako bi se osigurao dobar kontakt, značajan posebno pri većim jačinama struja. Na sredini nosača je bila izbušena rupa, prečnika $\phi = 6$ mm, za postavljanje temperaturne sonde, kao što je prikazano na Sl. 2.



Slika 2. Postavljanje temperaturne sonde

Korišćena temperaturna sonda je konstruisana na bazi otpornika sa negativnim temperaturnim koeficijentom (NTC otpornik) od 10 k Ω . Kalibracija sonde je bila izvršena u Kalibracionoj laboratoriji Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu, a postupak kalibracije je opisan u [11]. Kriva zavisnosti otpornosti sonde od temperature je data na Sl. 3 [11].



Slika 3. Dijagram zavisnosti otpornosti temperaturne sonde od temperature

Da bi rezultati dobijeni merenjem pri konstantnoj jačini struje mogli da se porede sa rezultatima merenja pri konstantnom naponu na priključcima provodnika, bilo je neophodno odrediti otpornost otpornika. Otpornost otpornika je definisala parove jačina struje – napon, a izmerena je za svaki od provodnika, U – I metodom, simultanim merenjem jačine struje u provodniku i naponu na njegovim krajevima. Za svaki provodnik je bilo izvršeno 25 merenja i otpornost je određena kao srednja vrednost tih merenja. Otpornosti provodnika, kao i parovi napon – jačina struje su dati u Tabeli 1.

Tabela 1. Otpornosti provodnika i parovi napon – jačina struje

Provodnik	R (m Ω)	Parovi napon – jačina struje				
		U (mV)	I (A)	U (mV)	I (A)	U (mV)
4 mm ²	9,39	120	200	280	360	440
		13,0	21,6	30,3	38,9	48,6
6 mm ²	6,65	180	300	420	540	660
		27,0	45,0	63,0	81,0	99,0
10 mm ²	3,68	140	210	280	350	420
		38,0	57,1	76,1	95,1	114,1

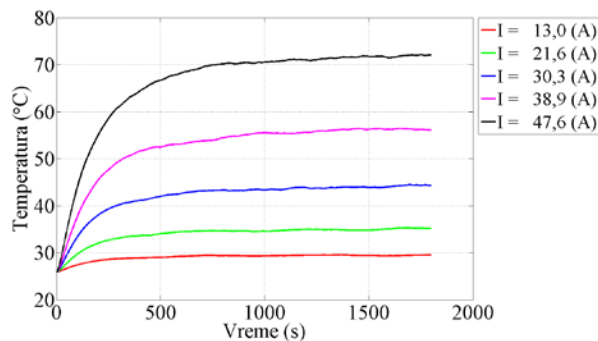
Za merenja je korišćena sledeća oprema: Generator vremenski promenljive struje, koji je konstruisan u firmi „Energobull, d.o.o.“ i može da ostvari prostoperiodičnu struju efektivne vrednosti jačine do 180 A. Kao izvor vremenski konstantne struje je korišćen uređaj Benning TEBECHOP, sa strujom jačine do 200 A. Jačina struje, kako vremenski konstantne, tako i vremenski promenljive, je merena pomoću preciznog šanta GANZ SH-2, sa 5 strujnih priključaka, do 120 A i naponom do 60 mV. Napon na šantu je meren univerzalnim instrumentom VOLT CRAFT M-4660A Multimeter, dok je otpornost temperaturne sonde merena instrumentom FLUKE 8846a Precision Multimeter.

Instrument FLUKE 8846a Precision Multimeter omogućava zapisivanje izmerenih podataka na USB memoriju. Ta mogućnost je iskorišćena za zapisivanje rezultata merenja u memoriju svake 2 sekunde, pri čemu je ukupno trajanje jednog merenja iznosilo 30 minuta (900 podataka za svako merenje). Rezultati merenja su zatim prebačeni u Excel tabele, odakle su, nakon dodatne obrade podataka prikazani grafički.

IV REZULTATI MERENJA

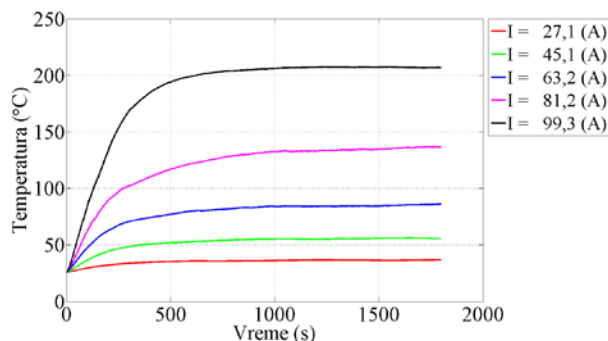
Kao što je već rečeno, u ovom radu će i rezultati merenja i njihovo poređenje biti prikazani grafički. Na Sl. 4 je prikazan vremenski dijagram promene temperature najtanjeg bakarnog provodnika, površine poprečnog preseka 4 mm². Prilikom zagrevanja provodnika je vremenski konstantna jačina struje u provodniku održavana konstantnom, pri promenljivom naponu na krajevima provodnika. Jačina struje je tokom merenja opadala, zbog povećanja specifične otpornosti bakra i time povećanja otpornosti provodnika. Pošto izvori nisu obezbeđivali konstantnu jačinu struje, tokom vremena je bilo neophodno pratiti promene jačine struje i ručno ih korigovati, odnosno, jačina struje je morala da se povećava sve vreme merenja. To povećavanje, svakako nije moglo da bude trenutno i savršeno, pa se i te promene opažaju na rezultatima merenja, na svim ispitivanim provodnicima.

Kao što može da se uoči na Sl. 4, dijagrami porasta temperature tokom vremena imaju karakterističan oblik, a činjenica da krive nisu glatke je posledica, kako ručnog podešavanja konstantne jačine struje, tako i promene temperature ambijenta. Naime, prostorija u kojoj su vršena merenja je bila klimatizovana standardnim klima uređajem, koji ima svoj histerezis i male varijacije temperature nisu mogle da budu kompenzovane.



Slika 4. Vremenski dijagram temperature na površi provodnika 4 mm²

Vremenski dijagram temperature na površi provodnika poprečnog preseka 6 mm², pri konstantnoj vrednosti vremenski konstante jačine struje tokom merenja, prikazan je na Sl. 5.

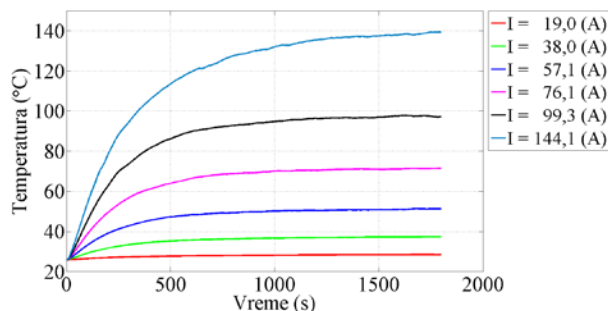


Slika 5. Vremenski dijagram temperature na površi provodnika 6 mm²

I u ovom slučaju se vide male promene temperature usled promena temperature okoline (krive nisu sasvim glatke).

U skladu sa (7) i (8), zbog većih jačina struja, porast temperature je brži, i krajnja postignuta temperatura je viša.

Na Sl. 6 je prikazan vremenski dijagram temperature na površini najdebljeg ispitivanog provodnika, poprečnog preseka 10 mm², pri konstantnoj jačini vremenski konstantne struje u provodniku.

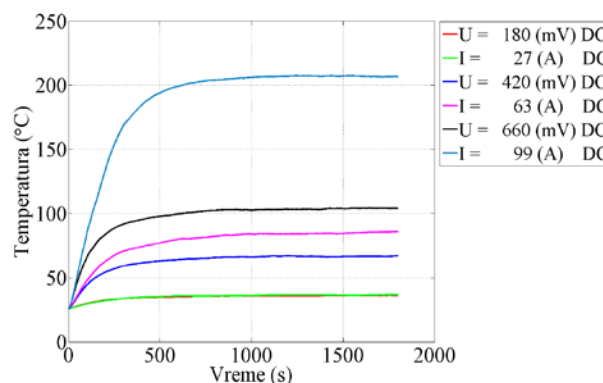


Slika 6. Vremenski dijagram temperature na površi provodnika 10 mm²

Prema očekivanju, zbog najvećih vrednosti jačina struja tokom grejanja provodnika, u ovom slučaju je porast temperature još brži, a viša je i konačna temperatura.

Kao primer upoređivanja rezultata, na Sl. 7 su prikazane neke od krivih zagrevanja provodnika poprečnog preseka 6 mm², za napajanje provodnika vremenski konstantnom jačinom struje i vremenski konstantnim naponom.

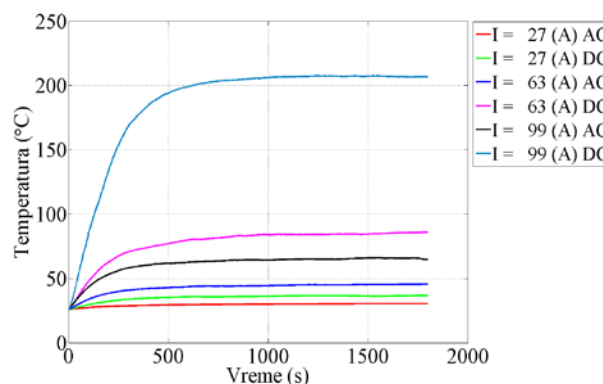
U prikazanom dijagramu su dati parovi podataka o temperaturama na površi provodnika, napajanog vremenski konstantnim generatorima, pri čemu je, u jednom slučaju, za vreme merenja, napon održavan konstantnim, a u drugom slučaju je struja održavana konstantnom. Od vremenskih dijagrama za 5 različitih jačina struja (vidi Sl. 5), u ovom poređenju su, kao primer, prikazana 3 para zagrevanja provodnika u toku vremena.



Slika 7. Poređenje napajanja provodnika 6 mm², konstantnim naponom ili konstantnom jačinom struje.

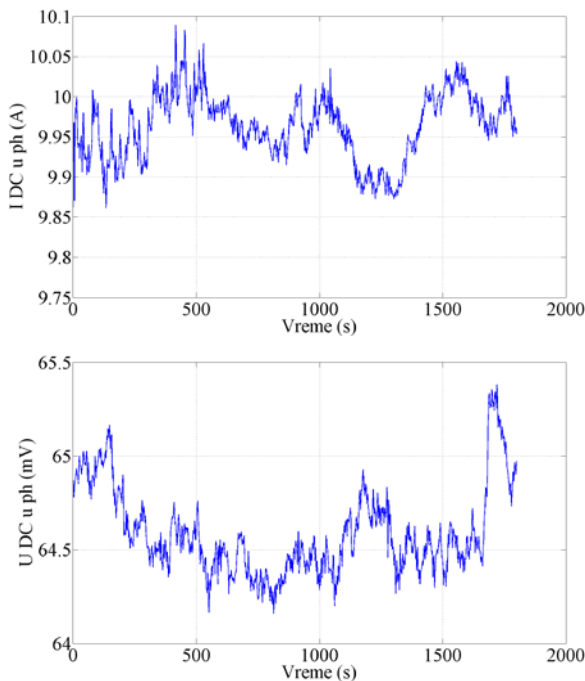
Prema izrazima (7) i (8), kada je, tokom merenja, jačina struje konstantna, zagrevanje provodnika je brže i konačna temperatura je viša, nego u slučaju kada je napon na krajevima provodnika konstantan. Takvo ponašanje temperature na površi provodnika je evidentno na gornjem dijagramu, prikazanom na Sl. 7.

Poređenje napajanja vremenski konstantnom ili vremenski promenljivom strujom, dato je na Sl. 8. Pri tome je, ponovo kao primer, posmatran provodnik poprečnog preseka 6 mm². Ovog puta su prikazani rezultati za vremenski promenljivo napajanje provodnika, a tokom merenja je napon održavan konstantnim.

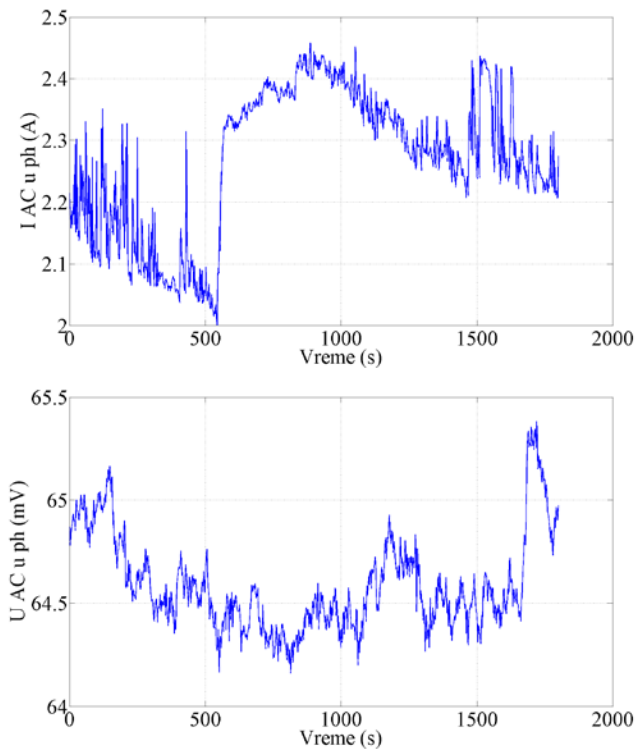


Slika 8. Poređenje napajanja provodnika 6 mm², vremenski konstantnim i vremenski promenljivim naponom

Kao i prethodno, i ovo poređenje je prikazano na konkretnom primeru zagrevanja provodnika poprečnog preseka 6 mm², za tri para napona na krajevima provodnika.



Slika 9. Vremenski dijagram izlaznih veličina vremenski konstantnih generatora

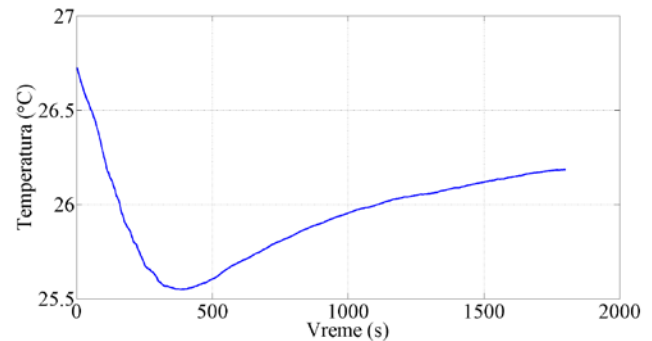


Slika 10. Vremenski dijagram izlaznih veličina vremenski promenljivih generatora

U slučaju napajanja provodnika vremenski promenljivim naponima, prisustvo površinskog efekta dodatno utiče na način zagrevanja provodnika. Bilo da se uticaj površinskog efekta prikaže ekvivalentnim porastom otpornosti provodnika, ili dodatnim zagrevanjem provodnika usled postojanja indukovanih struja, rezultat je isti i jasno je vidljiv i na Sl. 8.

Da bi se sa sigurnošću utvrdio razlog zbog koga krive u izvršenim merenjima nisu glatke, snimljene su karakteristike oba korišćena generatora, pri malim jačinama struja, odnosno, praktično u praznom hodu, kada nema značajnog zagrevanja provodnika. Promene izlaznih veličina tih generatora, u toku 30 min., prikazane su na Sl. 9 i Sl. 10.

Kao što može da se uoči na Sl. 9 i Sl. 10, izlazne veličine generatora (jačina struje na izlazu strujnog generatora i napon na izlazu naponskog generatora) nisu stabilizovane, konstantne, već se menjaju tokom merenja, prouzrokujući promene temperature. Osim toga, ni temperatura ambijenta nije bila konstantna tokom merenja, što prikazuje vremenski dijagram Prikazan na Sl. 11.



Slika 11. Promena temperature ambijenta tokom merenja

Tokom merenja je, kao što je već napomenuto, u prostoriji u kojoj su merenja vršena, bio uključen klima uređaj, koji je vršio samu grubu stabilizaciju temperature okoline, kao što to može da se uoči na Sl. 11.

Kada je temperatura ambijenta dostigla svoju maksimalnu vrednost, približno 366 s nakon početka merenja, klima uređaj se uključio i temperatura ambijenta je počela da pada.

Kao što je rečeno na početku, cilj ovih istraživanja je bilo određivanje temperature na površi provodnika u cilju verifikacije rezultata dobijenih proračunima. Zbog toga od rezultata merenja nije bila zahtevana velika tačnost i opisana odstupanja izlaznih veličina na generatora, kao i odstupanje od konstantne temperature ambijenta, su bila sasvim prihvatljive opcije.

V ZAKLJUČAK

Polazeći od naizgled jednostavnog problema merenja temperature na površi provodnika sa strujom, pokazalo se da je bilo potrebno razmotriti još niz uslova, koji su zahtevali drugačije pristupe i davali različita rešenja. Istraženi su svi slučajevi kada je u provodniku bila uspostavljena vremenski konstantna struja, kao i situacije kada je struja u provodniku bila vremenski promenljiva, prostoperiodična. Osim toga, ustanovljeno je da je bilo veoma važno definisati da li je, tokom merenja, jačina struje (efektivna vrednost u vremenski promenljivom slučaju) u provodniku ili napon na krajevima provodnika imala konstantnu vrednost. Razlika između ta dva slučaja se pokazala suštinskom i sve kombinacije su bile izmerene, upoređene i diskutovane.

Uočavanjem parametara koji utiču na tačnost merenja i stepenom tih uticaja, sada je moguće ostvariti i mnogo preciznija merenja temperature, kako na neizolovanim, tako i na izolovanim

provodnicima.

Prikazani dijagrami dobijeni merenjem temperature na površi provodnika imaju karakterističan oblik i veličine, tako da mogu uspešno da se koriste u praksi, za procenu zagrevanja provodnika u određenim situacijama.

Na kraju, rezultati ovih istraživanja će sigurno poslužiti kao verifikacija rezultata dobijenih analitičkim ili numeričkim proračunima.

ZAHVALNICA

Autori se zahvaljuju osoblju kompanije „d.o.o. Energobul“ iz Novog Sada, na pomoći prilikom merenja temperature provodnika.

Autori se zahvaljuju kolegama iz Centra za metrologiju, Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu, na pomoći prilikom kalibracije temperaturne sonde, uređajima datim na korišćenje i korisnim savetima tokom merenja.

Ovaj rad je deo istraživanja koji finansira Ministarstvo za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije, putem projekata TR 32055 i TR 32019.

LITERATURA

- [1] Popović, B. *Elektromagnetika*, Beograd, Građevinska knjiga, 1986.
- [2] Prša, M. *Osnovi elektrotehnike za studente elektrotehničkih fakulteta*, Novi Sad, Stylos, 1995.
- [3] Lindström, L. Evaluating impact on ampacity according to IEC-60287 regarding thermally unfavorable placement of power cables, Stockholm, 2011, pp. 23-24. <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:511556/FULLTEXT01.pdf> [pristupljeno 15.03.2020]
- [4] Kotni, L. A proposed algorithm for an overhead transmission line conductor temperature rise calculation, *Intenational Tranaction on Electrical Energy Systems*, Vol. 24, pp. 578-596, 2014. <https://doi.org/10.1002/etep.1715>
- [5] Karahan, M., Kalenderli, O. Coupled electrical and thermal analysis of power cables using finite element method, 2011. <https://doi.org/10.5772/27350>
- [6] COMSOL MULTIPHYSICS, CLS 3.5a documentation 2008.
- [7] Paulech J. Cooling of an electric conductor by free convection – analytical, computational and experimental approaches, 2012. <http://www.posterus.sk/?p=13724>. [pristupljeno 15.03.2020]
- [8] Chávez, O. Méndez, F. The simultaneous influence of the skin effect, environmental conditions and variable resistivity on current and temperature distribution in overhead conductors, in *Proc. World Congress on Engineering 2010*, Vol. II, , pp. 1-6, 2010. http://www.iaeng.org/publication/WCE2010/WCE2010_pp1162-1167.pdf [pristupljeno 15.03.2020]
- [9] Yannu L., Yongchun, L., Yanming, L., Wenrong, S., Peng, Y., Junhao, L. Coupled electromagnetic – Thermal modeling the temperature distribution of XLPE cable, in *Proc. Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, pp. 1-7, 2009. <https://doi.org/10.1109/appeec.2009.4918246> [pristupljeno 15.03.2020]
- [10] Yang, L., Qiu, W., Huang, J., Hao, Y., Fu, M., Hou, S., Li, L. Comparison of conductor temperature calculations based on different radial position temperature detections for high-voltage power cable, *Energies*, Vol. 11, Issue 1, pp. 1-17, 2018. <https://doi.org/10.3390/en11010117> [pristupljeno 15.03.2020]
- [11] Kasaš-Lažetić, K., Mijatović, G., Herceg, D., Antić, D., Prša, M. Temperatura na površi provodnika sa vremenski promenljivom strujom, in *Proc. XVIII Međunarodni skup Infoteh - Jahorina 2019*, Jahorina, 20-22.03.2019. str. 73-78, 2019. <https://infoteh.etf.ues.rs.ba/zbornik/2019/radovi/ENS-2/ENS-2-1.pdf> [pristupljeno 15.03.2020]

AUTORI

dr Karolina Kasaš-Lažetić, docent, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, R. Srbija, kkasas@uns.ac.rs
dr Gorana Mijatović, docent, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, R. Srbija, gorana86@uns.ac.rs
dr Dejana Herceg, docent, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, R. Srbija, vuletic@uns.ac.rs
dr Miroslav Prša, profesor, penzionisan sa Fakulteta tehničkih nauka, Univerziteta u Novom Sadu, R. Srbija, prsa@uns.ac.rs