

## NORMALNI I HAVARIJSKI POGON U KABLOVSKOJ MREŽI 110 kV

M. Tanasković, PD „EPS Distribucija“ d.o.o. Beograd, Srbija

### 1. UVOD

Koncepcija napajanja gradova električnom energijom podrazumeva izgradnju izvornih transformatorskih stanica (TS) vrlo visoki napon (kod nas 400 kV) na visoki napon (kod nas 110 kV) obično na periferiji (ruralnom delu) gradske zone. Prenos snage do urbanih gradskih zona sa velikom površinskom gustinom opterećenja neminovno se zbog urbanističkih zahteva mora realizovati kablovskim vodovima 110 kV. Napajanje TS visoki napon (kod nas 110 kV) na srednji napon (kod nas 10 kV ili 20 kV) predviđeno je konceptom tipskog tehnički modul za oblikovanje mreže 110 kV [1], [2]. Za definisane ambijentne uslove za leto i zimu, kao i za izmenjene pogonske uslove pri normalnom i havarijskom režimu rada, potrebno je proveriti eksploatacione mogućnosti za prenos snage kablovskih vodova 110 kV.

U prošlosti, različiti cenjeni analitički pristupi su bili posvećeni razmatranju ustaljenoj cikličnoj promeni opterećenja [3], [4]. Razvijene su analitičke metode za proračun zagrevanja kablova položenih u snopu u zemlju [5], [6], [7], za trajne i promenljive uslove. Granice zone isušivanja oko kabla približno su modelovane pomoću cilindrične izotermalne površine na kritičnoj temperaturi koje se procenjuje na osnovu različitih eksperimentalnih rezultata [3], [4], [5]. U mnogim slučajevima u praksi, ranije pomenuti pristupi obezbeđuju dobre odgovore. Ipak, idealizacije uvedene u modelovanju različitih konstrukcionih detalja i materijala, neminovne u analitičkim pristupima, odražavaju se donekle na dobijene rezultate. Detaljno modelovanje kablovskog rova obezbeđuje metoda konačnih elemenata. Model konačnih elemenata za proračun strujnog opterećenja podzemnih kablova koji je bio razrađen u [8], [9] uzimao je u obzir isušivanje zemljišta i odvođenje toplote pomoću strujanja sa površine zemlje. Glavni doprinos [10] je uključivanje efekata zračenja i zagrevanja površine zemlje od Sunca.

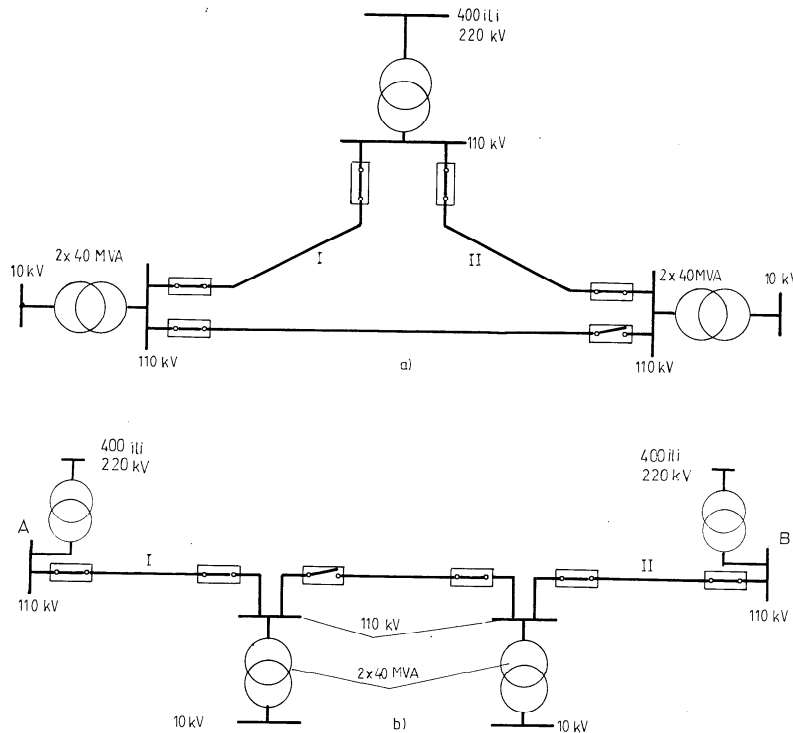
Cilj ovog članka je da prikaže rezultate proračuna dozvoljenih strujnih opterećenja kablovskih vodova 110 kV sa čvrstim dielektrikom XHE 49-A 3x(1x1000 mm<sup>2</sup>) 110/64 kV za normalni i havarijski pogon za dnevni dijagram opterećenja sa faktorom opterećenja za zimski period  $m=0,95$  i letnji period  $m=0,89$ . Dnevni dijagrami opterećenja su dobijeni za karakteristični dan u januaru i julu 2013. godine. Proračuni su urađeni metodom konačnih elemenata i analitičkim postupcima definisanim IEC i VDE Publikacijama.

### 2. KONCEPCIJA NAPAJANJA TS 110/X kV U KABLOVSKOJ MREŽI 110 kV

Tipski tehnički modul za oblikovanje mreže 110 kV [1], [2] dat je na slici 1. (primer izvorne TS 400(220)/110 kV i TS 110/10 kV). Svaka TS 110/10(20) kV se u normalnom pogonu napaja jednim direktnim vodom 110 kV iz izvorne TS 400(220)/110 kV i ima mogućnost dvostranog napajanja preko poveznog voda ili otvorene petlje za slučaj ispada direktnog napojnog voda 110 kV.

\* Dr Miladin Tanasković, dipl. inž. el, PD „EPS DISTRIBUCIJA“ d.o.o. Beograd Masarikova 1-3 11000 Beograd  
Tel. +381(0)11/3655513, E-mail: Miladin.Tanaskovic@epsdistribucija.rs

Energetski transformatori u TS 110/10(20) kV u normalnom pogonu mogu da se optereće do naznačene snage od 40 MVA, dok se u havarijskom pogonu različito mogu opterećivati u zavisnosti da li se kvar dogodio u zimskom ili letnjem periodu. Energetski transformatori u TS 110/10(20) kV mogu se u zimskom periodu opterećivati  $1,3 \cdot S_n$  u trajanju od 8 sati ili  $1,5 \cdot S_n$  u trajanju od 2 sata, dok se u letnjem periodu mogu opterećivati  $1,1 \cdot S_n$  u trajanju od 8 sati ili  $1,4 \cdot S_n$  u trajanju od 2 sata i pri tome se ima normalno starenje izolacije transformatora [11].



Slika 1. Tipični tehnički modul 110 kV mreže  
a) poluprsten; b) povezni vod

Direktan napojni vod 110 kV u normalnom pogonu prenosi snagu od 80 MVA, odnosno napaja jednu TS 110/10(20) kV. Međutim, kablovski vodovi 110 kV planiraju se tako da jedan direktan napojni vod može da napaja dve TS 110/10(20) kV, sa transformatorima opterećenim naznačenom snagom, pri ispadu drugog direktnog napojnog voda. Snaga koju kablovski vod 110 kV mora da prenese u ovim pogonskim uslovima je 160 MVA (840 A), pri čemu temperatura provodnika ne sme da premaši maksimalnu dozvoljenu trajnu temperaturu (90 °C za izolaciju od umreženog polietilena), odnosno ima se normalno starenje izolacije.

Havarijski režimi podrazumevaju da su transformatori opterećeni iznad naznačene snage i da istovremeno nastaje ispad direktnog napojnog voda 110 kV, tako da preostali direktni napojni vod 110 kV mora da omogući prenos snage u zimskom periodu od 240 MVA (1261 A) u trajanju od 2 h, ili 208 MVA (1093 A) u trajanju od 8 h, odnosno u letnjem periodu od 224 MVA (1177 A) u trajanju od 2 h ili 176 MVA (925 A) u trajanju od 8 h. Za havarijske režime temperatura provodnika kabla može biti iznad 90 °C, ali ne viša od 130 °C u trajanju od 8 h u toku jedne kalendarske godine, odnosno u ovim režimima se ima ubrzano starenje izolacije kabla.

### 3. PRORAČUN DOZVOLJENOG STRUJNOG OPTEREĆENJA KABLOVSKOG VODA 110 kV

Određivanje maksimalnog dozvoljenog strujnog opterećenja kablovskog voda 110 kV, za uslove pri normalnom i havarijskom pogonu, urađeno je primenom metode konačnih elemenata na osnovu proračuna raspodele temperatura u i oko kablovskog voda za slučaj tranzijentnog prenosa toplote u trodimenzionalnoj oblasti sa homogenim i izotropnim toplotnim karakteristikama materijala [8], [9]:

$$\nabla^2 \theta - \frac{\rho \cdot c}{k} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{Q}{k}, \quad (1)$$

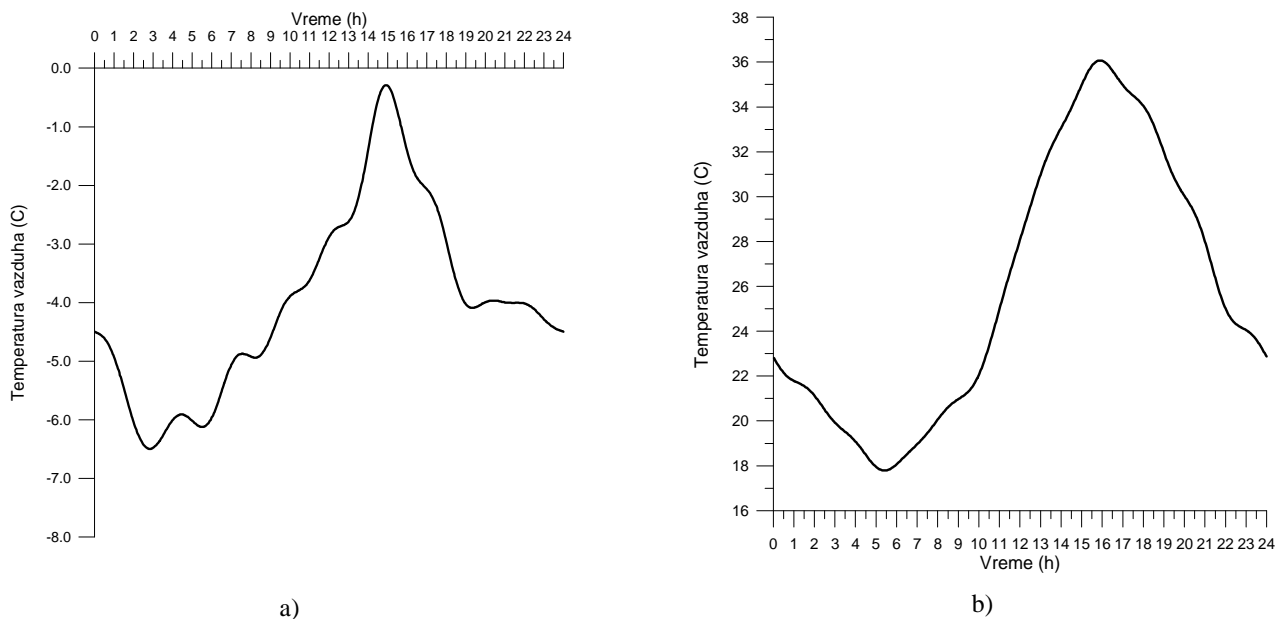
gde je  $Q$  unutrašnji izvor toplote po jedinici zapremine,  $k$  je koeficijent toplote provodnosti,  $\rho$  je gustina, i  $c$  je specifična toplota. Rešenje jednačine provođenja toplote sa pridruženim inicijalnim i graničnim uslovima daje vrednost nepoznate temperature  $\theta$ .

Maksimalno dozvoljeno strujno opterećenje određeno na osnovu numeričkog proračuna raspodele temperatura prema (1) poređeno je sa rezultatima proračuna primenom klasičnih metoda [5], [7] za uslove pri normalnom pogonu.

#### 4. AMBIJENTNI, POGONSKI, INICIJALNI I GRANIČNI USLOVI ZA PRORAČUN RASPODELE TEMPERATURE OKO KABLA 110 kV

Proračuni su rađeni za temperaturu okolnog zemljišta od 10 °C u zimskom periodu, odnosno 20 °C u letnjem periodu, koje su u skladu sa usvojenim ambijentnim uslovima u [12]. Izabrana temperatura zemljišta za zimski period je na strani sigurnosti, jer u slučaju hladnijih zima temperatura zemljišta na dubini polaganja kablova od 1,2 m može prema [13] biti i ispod 5 °C.

Tipični dnevni dijagrami promene temperature vazduha za zimski i letnji period, sa kojima su rađeni proračuni raspodele temperature oko kabla, dati su na slici 2.



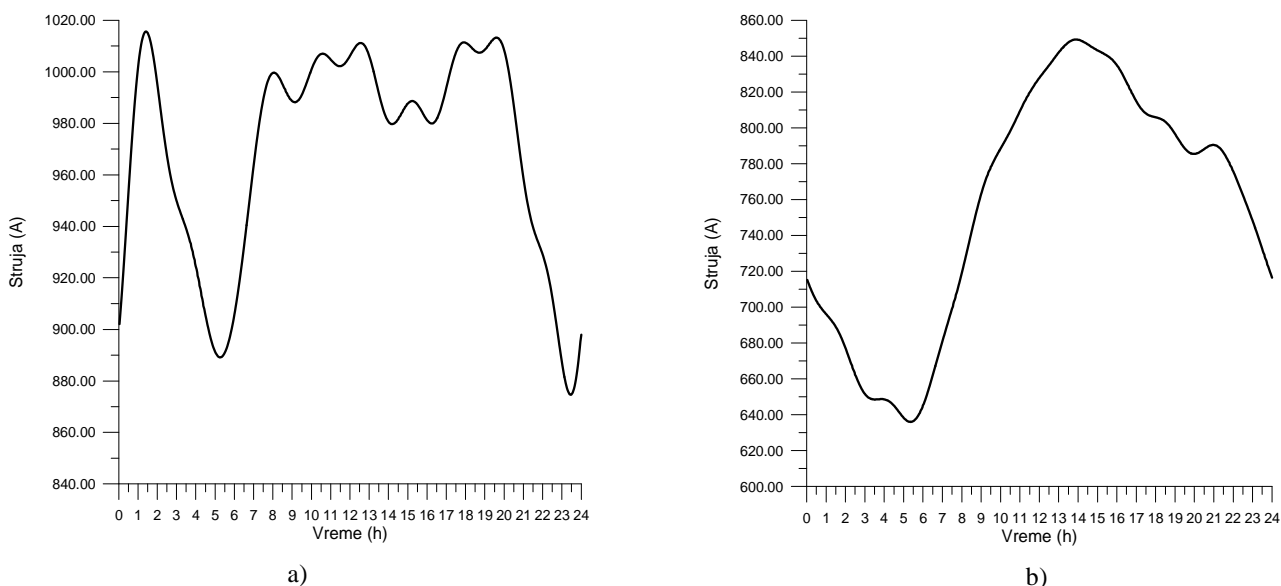
Slika 2. Oblik dnevnog dijagrama promene temperature vazduha za: a) zimski i b) letnji period.

Specifični toplotni otpor ispune (okolne zemlje) i posteljice je modelovan sa 1 K·m/W, pri čemu se smatra da u posteljici nema migracije vlage ni pri maksimalnim opterećenjima. Za standardnu kablovsku posteljicu koristi se mešavina peska i šljunka visokog sadržaja kvarca granulacije do 4 mm [12], koji imaju dobre karakteristike odvođenja toplote. U slučaju teških uslova odvođenja toplote pri paralelnom vođenju ili ukrštanju sa toplovodom, ili grupno položenim kablovima, treba obavezno primeniti kablovsku posteljicu od specijalne mešavine, koja se formira tako što se mešavini peska i šljunka za standardnu posteljicu dodaje 2 % cementa [12].

Specifični toplotni otpor isušene ispune je modelovan sa 2,5 K·m/W. Temperatura pri kojoj nastaje isušivanje zemljišta zavisi od sastava ispune [13]. Uslov nastanka isušivanja [12], [13] je da je temperatura u najnepovoljnijoj tački na graničnoj površini između posteljice i okolne zemlje veća od 50 °C (za peskovito tlo 30 °C).

Dnevni dijagrami opterećenja dobijeni su na osnovu podataka Dispečerskog centra EDB o opterećenju kablovskog voda 110 kV od TS „Obilić“ do TS „Bogoslavlja“ za treću sredu u januaru i julu 2013. godine. Faktor opterećenja dnevnog dijagrama opterećenja za zimski period je  $m=0,95$ , dok je za letnji period  $m=0,89$ . Primenjeni dnevni dijagrami strujnog opterećenja

su sa najvećim dnevnim faktorom ispunje za predhodni desetogodišnji period. Oblici dnevnih dijagrama opterećenja, sa kojima su rađeni proračuni raspodele temperatura oko kabla, prikazani su na slici 3.



Slika 3. Oblik dnevnog dijagrama strujnog opterećenja kabla 110 kV za: a) zimski i b) letnji period.

Raspodela temperatura u početnom trenutku (inicijalni uslovi) je određena iz uslova da su gubici u provodniku i električnoj zaštiti kabla na početku dvadesetčetvoročasovnog perioda koji se razmatra srazmerni kvadratu srednje vrednosti struje za dnevni dijagram struje za koji se radi proračun raspodele temperature.

Granični uslovi na površini zemlje definisani su kao razmena toplote konvekcijom i zračenjem, sa uzimanjem u obzir emisije Sunca. Odvođenje toplote sa površine zemlje prema [13] ne utiče na temperature zemljišta ispod 0,5 m od površine zemlje. Zbog toga, granični uslovi na dubinama od 0,6 m definisani su preko specificirane temperature (Dirihleovi uslovi), dok su od površine zemlje do 0,6 m dubine granični uslovi definisani kao površinski protok toplote (Nojmanovi uslovi).

## 5. REZULTATI PRORAČUNA RASPODELE TEMPERATURA ZA KABLOVSKI ROV SA STANDARDNOM POSTELJICOM U NORMALNOM POGONU

Proračuni raspodele temperatura i određivanje maksimalnog dozvoljenog strujnog opterećenja urađeni su za standardni rov za jedan kabl 110 kV prema [12], koji je dat na slici 4. Kablovska posteljica je dimenzija 0,74 m x 0,65 m i prikazana je na slici 5 (desni deo od ose simetrije kablovskog voda 110 kV). Kablovi 110 kV se standardno polažu u „trougonaom“ rasporedu sa dubinom polaganja kabla od 1,2 m (rastojanje centra gornjeg kabla od površine zemlje).

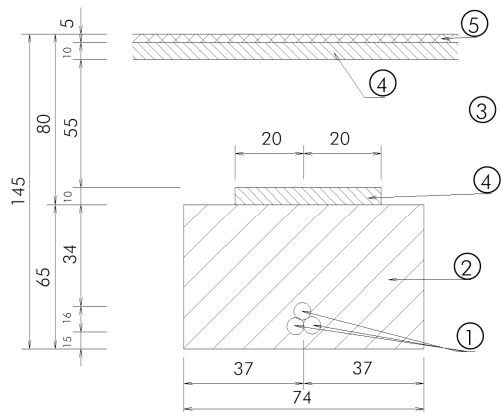
Proračuni raspodela temperature metodom konačnih elemenata rađeni su u više iteracija, sa variranjem maksimalnog strujnog opterećenja u skladu sa usvojenim oblikom dnevnog dijagrama strujnog opterećenja za slučajeve kada nema isušivanja okolnog zemljišta.

Najveća temperatura na graničnoj površini između posteljice i okolne zemlje se ima za strujno opterećenje dato na slici 3. i za zimski period je  $\theta = 49,83$  °C, dok je za letnji period  $\theta = 49,95$  °C.

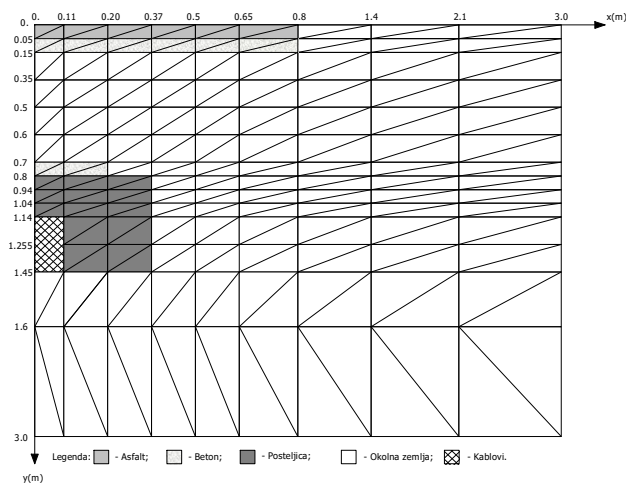
Najveća temperatura provodnika se ima za strujno opterećenje dato na slici 3. i za zimski period je  $\theta = 89,61$  °C, dok je za letnji period  $\theta = 77,97$  °C. Maksimalne vrednosti temperature provodnika za zimski i za letnji period imaju se u periodu od 2 do 3 sata posle dostizanja vršnog opterećenja.

Dijagrami promene temperature provodnika i okolne zemlje, za dnevne dijagrame strujnih opterećenja koji su dati na slici 3, prikazani su na slici 6.

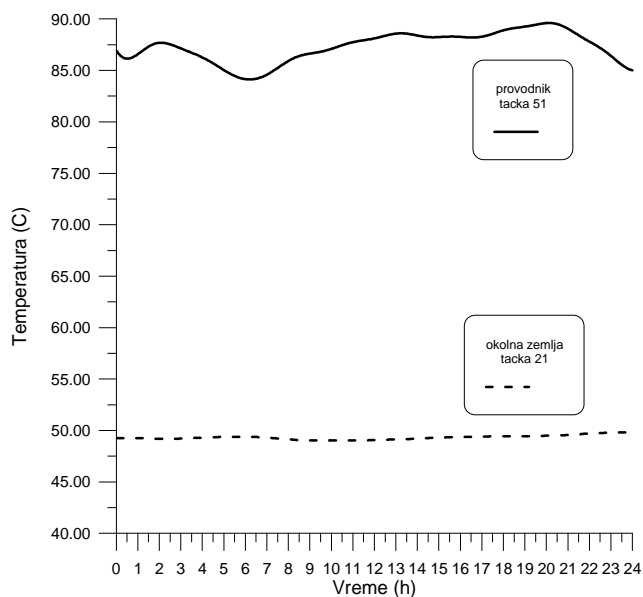
U tabeli 1 date su proračunate vrednosti za maksimalna dozvoljena opterećenja po struji i snazi, prema dnevnim dijagramima sa slike 3. za zimski i letnji period za kablovski vod 110 kV u rovu sa posteljicom, primenom metode konačnih elemenata, IEC metodologijom [7] i VDE metodom [5].



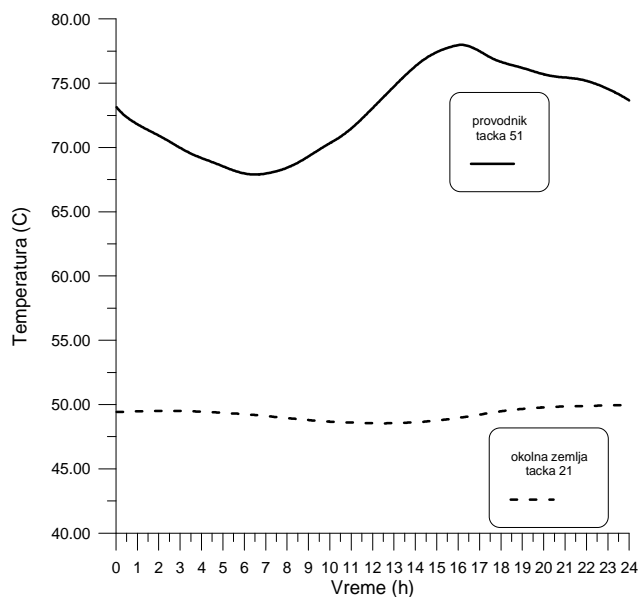
Slika 4. Presek rova za kabl 110 kV (sve mere su u cm)  
 Legenda: 1-kabl XHE 49-A, 1x1000mm<sup>2</sup>, 64/110kV; 2-  
 kablovska posteljica;  
 3-ispuna (zemlja dobre toplotne provodljivosti); 4-beton;  
 5-asfalt



Slika 5. Prikaz zone posteljice u mreži konačnih elemenata oblasti rešenja.



a)



b)

Slika 6. Temperature provodnika i zemlje u: a) zimskom i b) letnjem periodu.

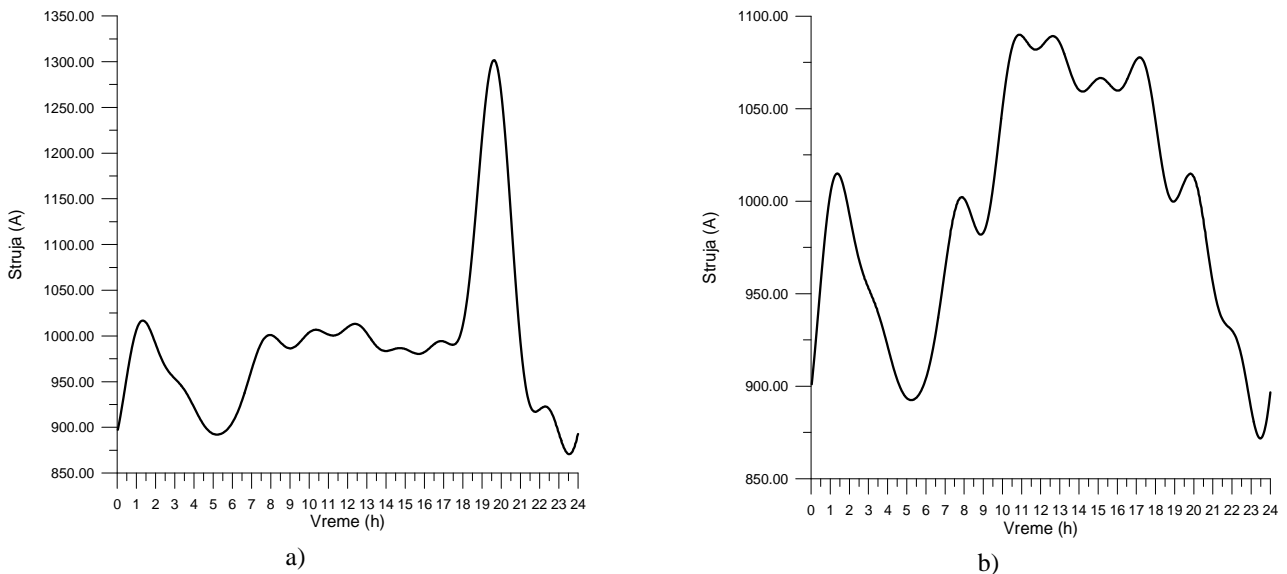
Tabela 1. Maksimalno dozvoljena opterećenja za kablovski vod 110 kV u rovu sa posteljicom

Maksimalno dozvoljeno strujno opterećenje $I_{max}$ [A]						Maksimalno dozvoljeno opterećenje po snazi $S_{max}$ [MVA]					
zima			Leto			zima			letno		
MKE	IEC	VDE	MKE	IEC	VDE	MKE	IEC	VDE	MKE	IEC	VDE
1014	872	874	850	840	844	192,9	165,9	166,3	161,7	159,8	160,6

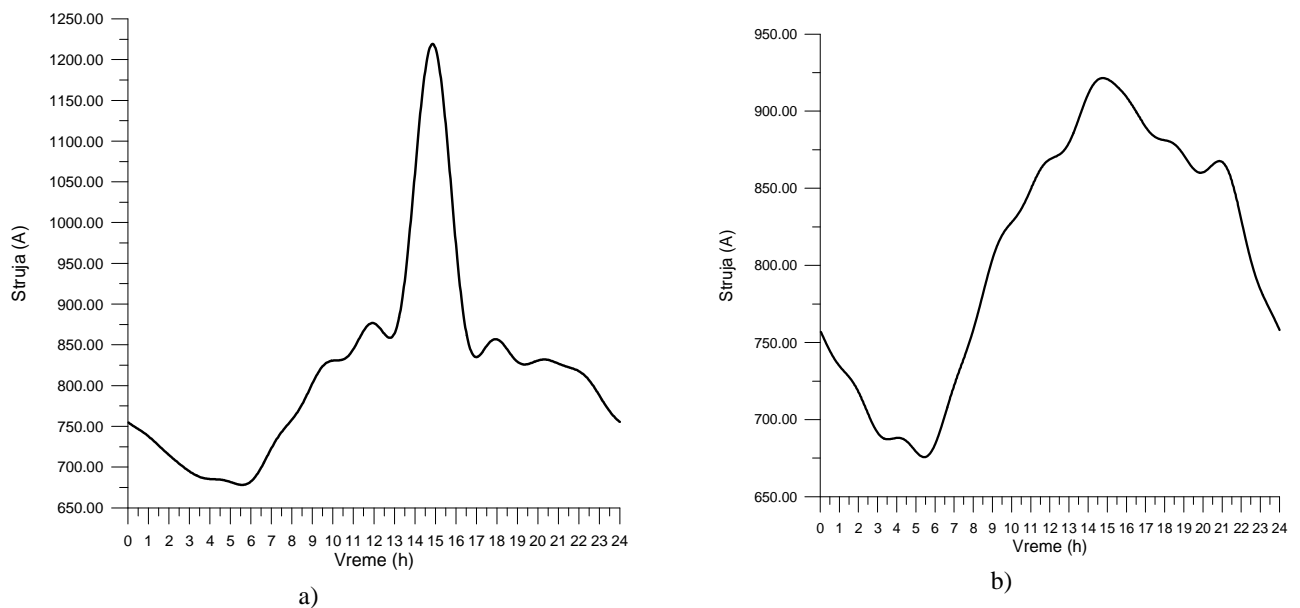
Raspodela temperatura koja je proračunata za letnji period kada nema isušivanja okolnog zemljišta pokazuje da se kablovi 110 kV u letnjem periodu mogu više opteretiti (maksimalna temperatura provodnika 77,97 °C je manja od trajno dozvoljeno 90 °C), što bi svakako izazvalo isušivanje okolnog zemljišta. Međutim, za takve pogonske uslove nisu napravljene proračuni raspodele temperatura sa isušenom zonom u okolnom zemljištu oko posteljice jer se prema rezultatima iz tabele 1. vidi da se svi zahtevani eksploatacioni uslovi za normalni pogon mogu postići i bez isušivanja okolnog zemljišta.

## 6. REZULTATI PRORAČUNA RASPODELE TEMPERATURA ZA KABLOVSKI ROV SA STANDARDNOM POSTELJICOM U HAVARIJSKOM POGONU

U analizi raspodele temperatura razmatrani su havarijski režimi definisani u poglavlju 2. ovog članka. Dnevni dijagrami strujnog opterećenja za havarijske režime dobijeni su iz maksimalnih radnih režima uz uvećanje struje do havarijskih vrednosti i prikazani su na slikama 7 i 8.



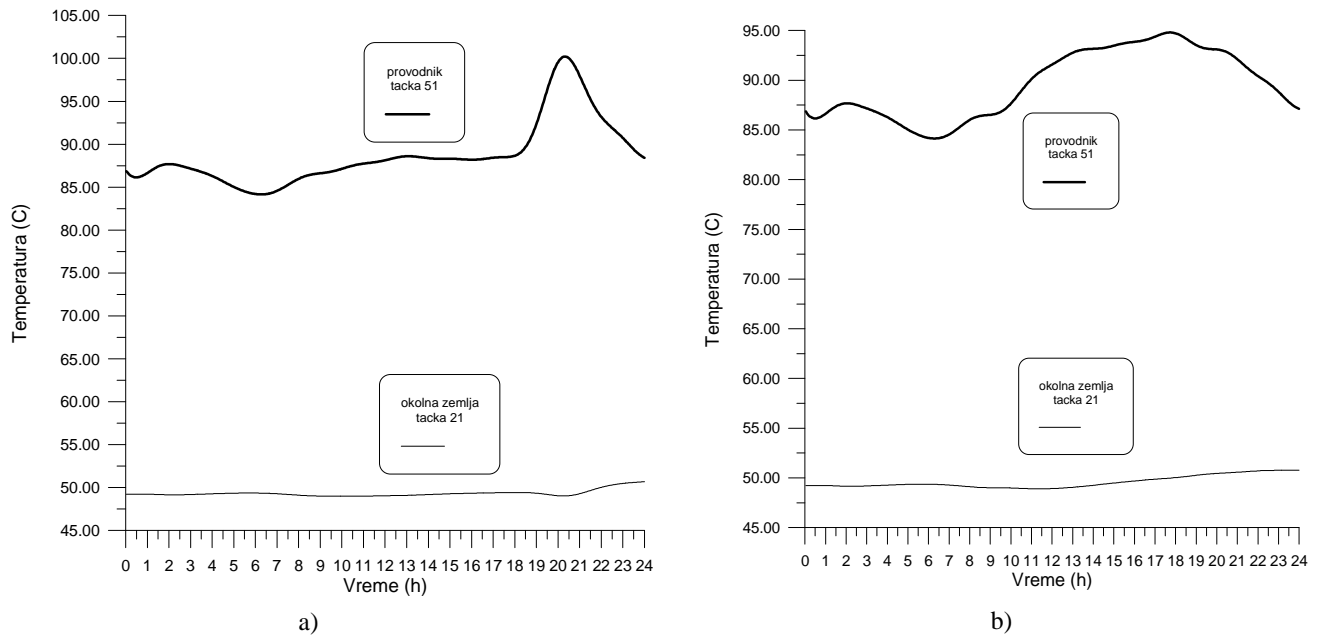
Slika 7. Dnevni dijagram strujnog opterećenja za zimski period i havarijski režim od: a) 2 h i b) 8 h.



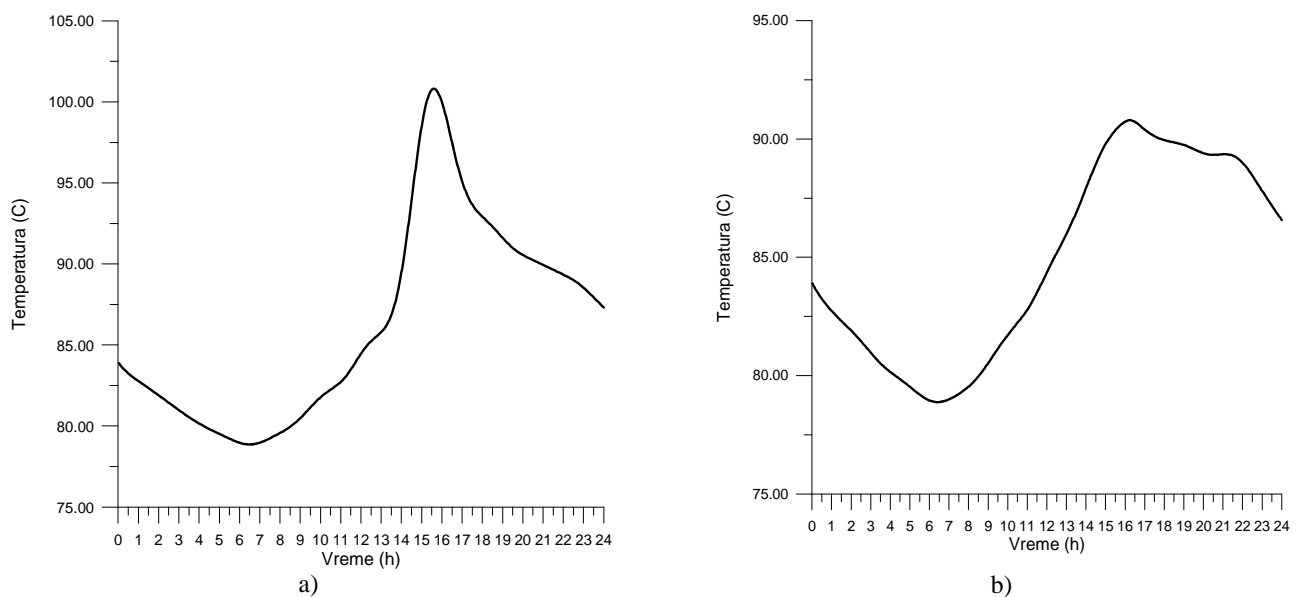
Slika 8. Dnevni dijagram strujnog opterećenja za letnji period i havarijski režim od: a) 2 h i b) 8 h.

Havarijski režimi koji se razmatraju podrazumevaju da je kablovski vod 110 kV koji ulazi u havarijski režim prethodno bio u maksimalnom radnom režimu, odnosno da su transformatori u TS 110/10(20) kV opterećeni naznačenom snagom. Proračuni raspodela temperature u havarijskim režimima za zimski i letnji period urađeni su za kablovski vod 110 kV koji je položen u standardnoj posteljici dimenzija 0,74m x 0,65m.

Raspodele temperatura za havarijski pogon u i oko kablovskog voda 110 kV za zimski period je prikazana na slici 9. Maksimalna temperatura provodnika koja se dostiže u havarijskom režimu od 2 h je 100,2 °C, dok je u havarijskom režimu od 8 h maksimalna temperatura 94,78 °C.



Slika 9. Temperature provodnika i zemlje u zimskom periodu i havarijskom režimu od: a) 2 h i b) 8 h.



Slika 10. Temperature provodnika u letnjem periodu i havarijskom režimu od: a) 2 h i b) 8 h.

Maksimalna temperatura provodnika za standardnu posteljicu u havarijskom režimu od 2 h je 100,91 °C, dok u havarijskom režimu od 8 h iznosi 90,79 °C, što znači da se u letnjem periodu havarijski režimi u trajanju od 8 h mogu realizovati a da se pri tome ne utiče značajno na životni vek kabla. Raspodele temperatura za havarijski pogon u i oko kablovskog voda 110 kV za letnji period je prikazana na slici 10.

## 7. ZAKLJUČCI

Maksimalno dozvoljeno opterećenje kablovskog voda 110 kV u kablovskom rovu sa standardnom posteljicom u zimskom periodu je 192,9 MVA (1014 A), dok je u letnjem periodu 161,7 MVA (850 A). U zimskom periodu moguće je iskoristiti kabl u potpunosti, a da se pri tome ne izazove isušivanje okolnog zemljišta, što nije slučaj u letnjem periodu.

Standardna kablovska posteljica dimenzija 0,74 m x 0,65 m sa jednim kablovskim vodom 110 kV u rovu omogućava i u zimskom i u letnjem periodu prenos snage od 160 MVA bez isušivanja okolnog zemljišta. Značaj primene posteljice u kablovskom rovu ogleda se u stabilnoj vrednosti specifične toplotne otpornosti koja vrlo malo zavisi od sadržaja vlage u zemljištu.

Havarijski pogoni u trajanju od 8 h i u letnjem i u zimskom periodu ne utiču značajno na smanjenje životnog veka kabla.

Odstupanje rezultata proračuna za maksimalno dozvoljeno strujno opterećenje različitim metodološkim pristupima značajnije je u zimskim uslovima. Uzrok odstupanjima u zimskim uslovima je izražen uticaj odvođenja toplote konvekcijom sa površine zemlje na strujno opterećenje. Kako se uticaj konvekcije na odvođenje toplote sa površine zemlje metodološki obuhvata jedino metodom konačnih elemenata jasno je zašto su dobijene vrednosti za dozvoljena strujna opterećenja ovom metodom veća od proračunatih vrednosti prema [5] i [7]. S druge strane, neznatno odstupanje dozvoljenih strujnih opterećenja određenih metodom konačnih elemenata od proračunatih vrednosti prema [5] i [7] u letnjim uslovima je posledica poništavanja negativnog uticaja emisije Sunca na površinu zemlje na strujno opterećenje i pozitivnog uticaja odvođenja toplote konvekcijom sa površine zemlje na strujno opterećenje.

## 8. LITERATURA

- [1] Interni standard EDB – S.B1.0.130/01: 2005, Planiranje elektrodistributivne mreže, Konceptijske postavke za planiranje elektrodistributivne mreže.
- [2] Tehnička preporuka br. 14a ED Srbije: "Planovi razvoja i osnovna konceptijska rešenja za planiranje elektrodistributivne mreže", I-o izdanje, septembar 2001. god.
- [3] G. Mainka, "Berechnung der Belastbarkeit von in Erde verlegten Starkstromkabeln, Unter Berücksichtigung von Belastungsfaktor und Bodenaustrocknung", *ETZ-A*, vol. 92, No 3, pp.125-130, 1971.
- [4] L. Heinhold, *Power Cables and Their Applications*, Third Edition, Siemens Aktiengesellschaft, Erlangen, 1990.
- [5] Franz Winkler "Strombelastbarkeit von Starkstromkabeln in Erde bei Berücksichtigung der Bodenaustrocknung und eines Tageslastspieles", *ETZ Report-13*, VDE-Verlag GmbH, Berlin 1978.
- [6] M. Liang, "An assessment of conductor temperature rises of cables caused by a sudden application of short pulse in a daily cyclic load", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol.14 No.2, pp.307-313, April 1999.
- [7] IEC 60853-2/1989-07: Calculation of the cyclic and emergency current rating of cables.
- [8] K. Huebner, and E. Thornton, *The Finite Element Method for Engineers*, J. Wiley & Sons, New York, 1982.
- [9] J. Nahman, and M. Tanaskovic, "Determination of the current carrying capacity of cables using the finite element method", *Electric Power Systems Research* vol. 61, pp.109-117, 2002.
- [10] J. Nahman, M. Tanaskovic "Calculation of the ampacity of high voltage cables by accounting for radiation and solar heating effects using FEM". Article first published online: 14 DEC 2011. DOI: 10.1002/etep.660. Copyright © 2011 John Wiley & Sons.
- [11] SRPS N.H1.016:1985 Energetski transformatori – opterećivanje uljnih transformatora.
- [12] Tehnička preporuka br. 3 ED Srbije: "Osnovni tehnički zahtevi za izbor i montažu energetskih kablova i kablovskog pribora u elektrodistributivnim mrežama 1 kV, 10 kV, 20 kV, 35 kV i 110 kV", V-o izdanje, novembar 2012. god.
- [13] B. Lalević: "Elektroenergetski kablovi", Beograd, 1993.