

# RAČUNARSKI PROGRAM ZA PRORAČUN TERMIČKI TRAJNO DOZVOLJENE STRUJE ENERGETSKIH KABLOVA POLOŽENIH U ZEMLJU

## SOFTWARE FOR THE AMPACITY CALCULATION OF UNDERGROUND POWER CABLES

Stefan MIČIĆ, G&W Electric Company, Čikago, SAD  
Aleksandar SAVIĆ, Elektrotehnički fakultet Beograd, Srbija  
Mileta ŽARKOVIĆ, Elektrotehnički fakultet Beograd, Srbija  
Tomislav RAJIĆ, Elektrotehnički fakultet Beograd, Srbija

### KRATAK SADRŽAJ

Električna energija je neophodna u svim sferama života savremenog društva. Iz tog razloga potrebno je da se do krajnjih potrošača električna energija prenese na siguran način, a da pritom njen kvalitet bude na visokom nivou. Zbog sve veće naseljenosti u gradovima poslednjih decenija kablovska tehnika postaje sve važnija oblast u elektroenergetici. Prenos električne energije nadzemnim dalekovodima je ekonomičniji, ali zbog raspoloživih koridora i estetskih razloga kablovski prenos u gradovima postaje dominantan.

Kod izbora preseka i tipa energetskih kablova neophodno je za zadate uslove eksploatacije odrediti termički trajnu dozvoljenu struju. U praksi termički proračun kablova se vrši ili na osnovu tehničke preporuke ili upotrebom softverskih alata. U svakom slučaju da bi rezultati proračuna imali smisla moraju se u obzir uzeti svi relevantni faktori koji utiču na termičko naprezanje energetskog kabla.

Tema ovog rada je prikaz računarskog programa za termički proračun energetskih kablova položenih u zemlju. Program je razvijen za potrebe predmeta Kablovska tehnika na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu s ciljem unapređenja nastave. Program je razvijen primenom objektno orijentisanog programiranja u programskom paketu Matlab. Program omogućava unos kabla odgovarajućih karakteristika kao i svih relevantnih faktora koji utiču na eksploataciju kabla. Pri proračunu program uvažava uticaj isušivanja zemljišta kao i uticaj promenljivog dijagrama opterećenja. Kao glavni rezultat proračuna dobija se termički trajno dozvoljena struja za odabrani način polaganja kabla i usvojene polazne pretpostavke. Program omogućava i vizuelni prikaz načina na koji je kabl položen u zemlju sa odgovarajućim podacima.

**Ključne reči:** Energetski kablovi, termički proračun, računarski program

### ABSTRACT

Electricity is essential in all spheres of life in modern society. For this reason, it is necessary to transfer electricity to the consumers in a safe manner, while maintaining its quality at a high level. Due to the increasing population density in cities in recent decades, cable technology has become an increasingly important area in electricity. The transmission of electricity using overhead transmission lines is more economical, but because of the available corridors and aesthetic reasons, cable transmission in cities becomes dominant.

When selecting the cross-section and the type of power cables, it is necessary to determine the cable ampacity for the given operating conditions. In practice, the cable ampacity calculation is performed either on the basis of a technical recommendation or by using software tools. In any case, for the calculation results to make sense, all relevant factors must be taken into account.

The topic of this paper is a computer program for the ampacity calculation of underground power cables. The program was developed for the needs of the course Power Cables at the School of Electrical Engineering in Belgrade, with the aim of improving teaching. The program was developed using object-oriented programming in the Matlab software package. The program allows the cable to be entered with the appropriate characteristics as well as all relevant factors that affect the cable's exploitation. In the calculation, the program takes into account the impact of soil drainage as well as the impact of a variable load. The main result of the calculation is the cable ampacity for the selected cable laying method and the adopted assumptions. The program also provides a visual representation of how the cable is laid in the ground with the appropriate data.

**Key words:** Power cables, cable ampacity, software

## 1. UVOD

U savremenom društvu nijedna aktivnost ne može da se zamisli bez električne energije. Prema tome veoma je važno da se obezbedi pouzdano i kvalitetno napajanje krajnjih potrošača. Tu glavnu ulogu igra prenosni sistem. Električna energija se najvećim delom prenosi dalekovodima koje odlikuju relativno niske cene i lakše održavanje. Mana ovakvog prenosa je to što zauzima dosta prostora, a ovakav prenos utiče i na vizuelni izgled sredine kroz koju prolazi.

Kada su u pitanju gusto naseljeni gradovi, gde je značajno bitan prostor, kao i vizuelni izgled, najviše se koriste kablovski prenosni sistemi. Kablovskim sistemima se obezbeđuje visok kvalitet električne energije, a pri tome su „nevidljivi“ za posmatrača ukoliko su položeni u zemlju ili smešteni u kablovice. Kablovi su generalno i bezbedniji za okolinu jer je mogućnost slučajnog, potencijalno opasnog, kontakta svedena na minimum. Smatra se da je i elektromagnetni uticaj električnog polja kabla dosta manji u odnosu na dalekovodni prenosni sistem. Uprkos činjenici da su kablovski sistemi dosta skuplji od dalekovodnih, prethodno nabrojane prednosti daju opravdanje i nužnost za njihovo korišćenje [1].

Najčešći način polaganja kablova je njihovo direktno polaganje u zemlju. To je najjednostavniji i najjeftiniji način polaganja. Pored toga on ispunjava sve neophodne bezbednosne i tehnološke preuslove. Polaganje u zemlju je izuzetno popularno i zbog činjenice da su takvi kablovi nevidljivi za posmatrača i na taj način zadovoljavaju i estetske uslove koji su u gradovima sve stroži.

Konstrukcija kablova može biti jako složena i zavisi od njihove namene. Kablovi mogu imati konstrukcione delove koji ih štite od mehaničkih poremećaja i naprezanja, temperaturnih promena, uticaja električnih polja drugih objekata u okolini. Kablovi imaju široku primenu. Počevši od kućnih aparata, automobila, elektronskih uređaja, pa sve do električne mreže, kablovi su prenosni sistem sa najširokom upotrebom [2].

Kod termičkih proračuna kablova moraju se uzeti u obzir njihovi električni parametri poput električne otpornosti provodnika, gubitaka u provodnim delovima kabla, dielektrični gubici u izolacionim slojevima kabla, induktivnosti i kapacitivnosti. Svi ovi parametri se mogu proračunati za odgovarajući kabl ili kablovski sistem ako su zadate njegove dimenzije, naponski nivo, faktori gubitaka u pojedinim elementima, dubina polaganja, i sl. Ovakvi proračuni su od ključne važnosti prilikom projektovanja kablovskih prenosnih sistema.

Najznačajniji parametar kod kablova je termički trajno dozvoljena struja kabla kojom se on može opteretiti, a da ne dođe do njegovog termičkog razaranja. Termički proračun može biti veoma složen jer mora da obuhvati sve relevantne faktore koji utiču na termičko naprezanje kabla. S tim u vezi, tema ovog rada je prikaz računarskog programa koji je razvijen za potrebe proračuna termički trajno dozvoljne struje kablova položenih u zemlju.

## 2. OSNOVE TERMIČKOG PRORAČUNA ENERGETSKIH KABLOVA

Strujnim opterećenjem kabla dolazi do njegovog zagrevanja usled Džulovih gubitaka. Takođe, priključenjem kabla na određeni napon, dolazi do dielektričnih gubitaka. Veličina Džulovih i dielektričnih gubitaka je direktno srazmerna kvadratima jačine struje i priključenog napona respektivno. Odvođenje toplote u kablovima, u opštem slučaju, odvija se na tri načina:

- provođenjem toplote (kondukcijom),
- toplotnim zračenjem (radijacijom),
- konvekcijom.

Prilikom kondukcije toplote se prenosi od jednog tela ka drugom, ako se ta dva tela nalaze na različitim temperaturama. Najčešća je kod čvrstih tela, a objašnjava se kinetičkom teorijom.

Toplotno zračenje predstavlja prenos toplote elektromagnetnim talasima različitih talasnih dužina. Radijacija je moguća u svim sredinama u kojima se prostiru elektromagnetni talasi i zračenje se odvija sa površinskih slojeva tela. Ono zavisi od porasta temperature zagrevanog tela, od same prirode tela, njegove površine. Najviše energije se prenosi infracrvenim zračenjem, a najmanje svetlosnim.

Konvekcija je prenos toplote kretanjem čestica nekog fluida. Ona može biti prirodna i prinudna, što zavisi od načina kretanja čestica. Kako su termički modeli u slučaju konvekcije složeni, koristi se teorija sličnosti koja pojednostavljuje rešavanje problema u vezi sa konvekcijom. Kod kablova položenih u zemlju dominantan način odvođenja toplote je kondukcijom tako da se ostali načini odvođenja toplote neće razmatrati.

### 2.1. Termičke otpornosti kabla

Najveću ulogu u prenosu toplote kod kablova položenih u zemlji igra kondukcija. Smatra se da su provodni i metalni delovi kabla izotermički (imaju istu temperaturu duž cele svoje zapremine) i da kao takvi jako brzo prenose toplotu na ostale slojeve koji se nalaze oko njih. U konstrukciji kabla se oko njih nalaze izolacioni

slojevi. Upravo zbog toga izolacioni slojevi kabla igraju najveću ulogu kada su u pitanju termičke prilike. Različite izolacione slojeve, pored njihovih fizičkih dimenzija, karakterišu njihove specifične termičke otpornosti. One se izražavaju u [Km/W] i pokazuju koliko je dati materijal otporan na prenos toplote.

U opštem slučaju kod kabla imamo sledeće termičke otpornosti:

- $R_{T1}$  - termička otpornost između jednog provodnika i plašta,
- $R_{T2}$  - termička otpornost između plašta i armature,
- $R_{T3}$  - termička otpornost spoljašnjeg omotača.

U slučaju kada su izolacioni slojevi kabla cilindričnog oblika termičke otpornosti se računaju preko jedinstvene formule [3, 4]:

$$R_T = \frac{\rho_{Tiz}}{2\pi} \ln \frac{r_s}{r_u}, \quad (1)$$

gde su:

$\rho_{Tiz}$  - specifična termička otpornost datog izolacionog sloja, izražena u [Km/W],

$r_s$  - spoljni prečnik izolacionog sloja,

$r_u$  - unutrašnji prečnik izolacionog sloja.

U slučaju kada izolacioni sloj nije cilindričnog oblika, kao što je slučaj kod trožilnih kablova, koriste se odgovarajuće formule koje uvažavaju takvu konstrukciju kabla [3, 4].

## 2.2. Džulovi i dielektrični gubici

Džulovi gubici su najvećim delom posledica proticanja struje kroz provodnik. Međutim postoje i Džulovi gubici koji potiču i iz električne zaštite (metalnog omotača) i armature kabla (mehaničke zaštite). Ovo se objašnjava postojanjem cirkulacionih i vrtložnih struja. Kako bi se uvažili Džulovi gubici u slojevima koji nisu provodnik, uvodi se pojam faktora gubitaka. Faktor gubitaka je broj koji pokazuje koliko su puta Džulovi gubici manji u posmatranom metalnom sloju kabla u odnosu na one koji postoje u provodniku. U slučaju električne zaštite i armature, faktori gubitaka se označavaju sa  $\lambda_{mo}$  i  $\lambda_{ar}$  respektivno.

Džulovi gubici su srazmerni otpornosti provodnika i kvadratu struje provodnika. Kako bi se proračun pojednostavio što je više moguće, uvodi se pojam fiktivne električne otpornosti provodnika  $R'$ . Ova otpornost uvažava otpornost provodnika na zadatoj temperaturi, kao i otpornosti ostalih provodnih delova kabla preko njihovih faktora gubitaka. Veličina  $R'$  se može proračunati na sledeći način:

$$R' = \frac{P_J(1 + \lambda_{mo} + \lambda_{ar})}{nI^2}, \quad (2)$$

gde su:

$P_J$  - Džulovi gubici,

$n$  - broj žila provodnika,

$I$  - vrednost jačine struje koja protiče kroz provodnik.

Dielektrični gubici nastaju kao posledica priključenja kablovskog voda na određeni napon. Oni su raspoređeni po celoj zapremini izolacije, ali se za potrebe pojednostavljenja može smatrati da su locirani na mestu koje termičku otpornost izolacije deli na dva jednaka dela [3].

Dielektrične gubitke je neophodno računati kad su u pitanju naponi veći od 110 kV. Oni se mogu uvažavati i pri nižim naponskim nivoima ukoliko se želi postići još veća tačnost.

Dielektrični gubici se računaju preko formule:

$$P_d = \omega \cdot C \cdot U^2 \cdot \operatorname{tg} \delta, \quad (3)$$

gde su:

$\omega$  - kružna učestanost sistema,

$C$  - kapacitivnost kabla,

$U$  - fazni napon na koji je kabl priključen,

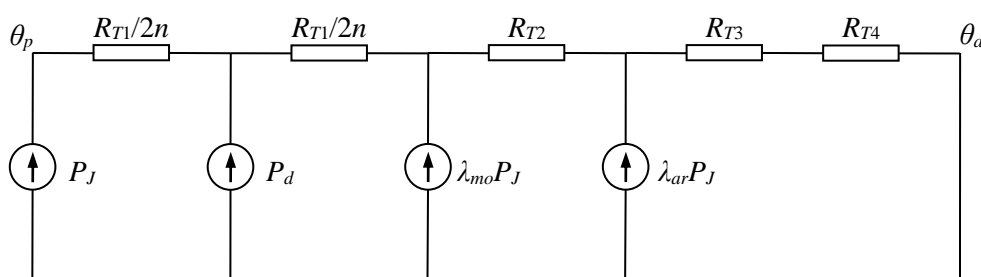
$\operatorname{tg} \delta$  - faktor gubitaka

### 2.3. Jednačina termičke ravnoteže kod kablova

U cilju proračuna vrednosti termički trajno dozvoljene struje kabla, neophodno je poznavati termičke prilike kabla, kao i sve uticajne faktore. Već je rečeno da najveću ulogu u zagrevanju kabla imaju izolacioni slojevi, koji preko svojih termičkih otpornosti zadržavaju toplotu. Iako je poznavanje termičkih otpornosti i gubitaka neophodno, to nije dovoljno. Neophodno je poznavati i maksimalno dozvoljenu temperaturu provodnika kabla, temperaturu ambijenta i da li se pri proračunu uvažava isušivanje zemlje i promenljiv dijagram opterećenja kabla.

Na vrednost trajno dozvoljene struje utiču i drugi faktori poput sadržaja vlage u zemlji, veličine i oblika čestica zemlje, hemijskog sastava zemlje, itd. Sve ove pojave se uvažavaju preko date specifične termičke otpornosti zemlje, koja mora biti zadata kako bi se odredila njena termička otpornost.

U proračunu trajno dozvoljene struje kabla polazi se od činjenice da je temperatura na površini provodnika jednaka maksimalno dozvoljenoj vrednosti. Maksimalno dozvoljena vrednost temperature je različita za svaki materijal i zavisi od niza faktora, poput njegove čistoće i gustine. Uzimajući u obzir prethodno navedene veličine i pojmove, može se nacrtati termička zamenska šema kabla, koja ilustruje sve procese koji utiču na termičke prilike unutar kabla [3]. Na Slici 1 je prikazana ova šema.



Slika 1. Termička zamenska šema kabla

Na ovoj termičkoj šemi su elementi predstavljeni ekvivalentnim oznakama prema analogiji sa strujnim kolima. Izvori toplote su predstavljeni poput idealnih izvora struje u električnim kolima, a termičke otpornosti kao otpornici. Na levom delu šeme se ima temperatura na površini provodnika, a na desnom delu ambijentalna temperatura sredine u kojoj je kabl položen. Elementi koji su označeni na termičkoj šemi su:

$\theta_p$  - temperatura površine provodnika,

$\theta_a$  - temperatura ambijenta, tj. onog dela ambijenta koji je dovoljno udaljen od površine kabla, tako da na njega nemaju uticaj temperaturne promene u kabl ili u njegovoj okolini,

$n$  - broj provodnika kabla,

$P_J$  i  $P_d$  - Džulovi i dielektrični gubici, respektivno.

$R_{T4}$  - termička otpornost okolne zemlje

Ako se, kao i kod strujnih kola, uspostave relacije između navedenih veličina, može se doći do jednačine termičke ravnoteže unutar kabla [3]:

$$\theta_p - \theta_a = \left( P_J + \frac{P_d}{2} \right) \cdot \frac{R_{T1}}{n} + [P_J \cdot (1 + \lambda_{mo}) + P_d] \cdot R_{T2} + [P_J \cdot (1 + \lambda_{mo} + \lambda_{ar}) + P_d] \cdot (R_{T3} + R_{T4}). \quad (4)$$

Prethodni izraz za termičku ravnotežu unutar kabla je kompleksan. U njemu figurišu termičke otpornosti svih izolacionih slojeva i faktori gubitaka. Moguće je dobiti jednostavniji izraz uvođenjem pojmova fiktivnih termičkih otpornosti za Džulove i dielektrične gubitke. Fiktivna termička otpornost koja bi uvažila ukupan uticaj Džulovih gubitaka može se izračunati izrazom [3]:

$$R_{Tki} = \frac{\frac{R_{T1}}{n} + (1 + \lambda_{mo}) \cdot R_{T2}}{1 + \lambda_{mo} + \lambda_{ar}} + R_{T3}. \quad (5)$$

Analogno, fiktivna termička otpornost koja bi uvažila dielektrične gubitke, može se izračunati preko izraza [3]:

$$R_{Tkd} = \frac{R_{T1}}{2 \cdot n} + R_{T2} + R_{T3}. \quad (6)$$

## 2.4. Termički trajno dozvoljena vrednost struje kablova položenih u zemlju

Uvođenjem ekvivalentnih termičkih otpornosti, izraz (4) za termičku ravnotežu kabla se pojednostavljuje [3]:

$$\theta_p - \theta_a = P_J \cdot (1 + \lambda_{mo} + \lambda_{ar}) \cdot (R_{Tki} + R_{T4}) + P_d \cdot (R_{Tkd} + R_{T4}). \quad (7)$$

Ako se u prethodni izraz uvede i ranije pomenuta fiktivna električna otpornost provodnih delova kabla, on postaje [3]:

$$\theta_p - \theta_a = n \cdot R' \cdot I^2 \cdot (R_{Tki} + R_{T4}) + P_d \cdot (R_{Tkd} + R_{T4}). \quad (8)$$

U prethodom izrazu figuriše termička otpornosti ambijenta ( $R_{T4}$ ), i o njoj će biti reči kasnije u tekstu. U izrazu (8) su poznate sve promenljive osim struje, a upravo je nju neophodno izračunati. Na osnovu zadate maksimalne temperature provodnika  $\theta_p$  može se napisati izraz [3]:

$$I = \sqrt{\frac{\theta_p - \theta_a - P_d \cdot (R_{Tkd} + R_{T4})}{n \cdot R' \cdot (R_{Tki} + R_{T4})}}. \quad (9)$$

Ovaj izraz predstavlja osnovnu relaciju za izračunavanje vrednosti termički trajno dozvoljene struje kabla položenog u zemlju. Ovaj izraz se može koristiti u svim proračunima kada se ne uvažava isušivanje zemljišta u okolini kabla i promenljiv dijagram opterećenja. Ukoliko se ovi fenomeni uvažavaju, ovaj izraz je potrebno modifikovati na odgovarajući način [3].

## 2.5. Termička otpornost zemlje u koju je položen kabl

Termička otpornost zemlje u koju je položen kabl ima značajnu ulogu u određivanju trajno dozvoljene struje kabla. Ona predstavlja dominantni član kada su u pitanju termičke otpornosti. Termičku otpornost zemlje nije lako izračunati. Ona zavisi, kako od fizičkih parametara samog kabla i ambijenta, tako i od prisustva drugih kablova i izvora toplote u okolini posmatranog kabla. Broj takvih tela može biti veliki, a što je veći njihov broj, to je i proračun ove termičke otpornosti kompleksniji. Prilikom određivanja termičke otpornosti zemlje, koristi se teorija likova. Ona ovde neće biti izložena zbog ograničenog prostora. Opšta formula po kojoj se računa termička otpornost zemlje je [3]:

$$R_{TZ} = \frac{\rho_{Tz}}{2\pi} \ln k \quad (10)$$

gde je:

$\rho_{Tz}$  - specifična termička otpornost zemlje,

$k$  - faktor oblika kabla.

Faktor oblika kabla  $k$  zavisi od načina pologanja kabla, prisustva ostalih izvora toplote i sl. Detaljna analiza proračuna faktora oblika kabla može se naći u [3].

## 2.6. Uticaj isušivanje zemljišta

Da bi se pri proračunu termički trajno dozvoljene struje kabla dobila što tačnija vrednost neophodno je uvažiti i dodatna dva fenomena koji imaju značajan uticaj na termičke procese u kablu. Prvi od njih je isušivanje zemljišta u okolini kabla.

U toku eksploatacije kablova dolazi do njihovog zagrevanja. Usled kondukcije kablovi prenose deo svoje toplote na okolnu sredinu, u ovom slučaju na zemlju. Kako se kablovi u toku rada zagrevaju, oni zagrevaju i zemlju oko njih, pri čemu utiču na smanjenje njene vlažnosti. Smanjenje vlažnosti dalje utiče na povećanje specifične termičke otpornosti isušenog zemljišta, što znači da ono slabije odvodi toplotu generisanu radom kablova. Kako

je termička otpornost zemlje direktno srazmerna specifičnoj termičkoj otpornosti, neophodno je što tačnije izračunati njenu vrednost. Detaljna analiza ovog fenomena, i njegov kvantitativni uticaj na termički trajno dozvoljenu struju može se naći u [3].

## 2.7. Uticaj promenljivog dijagrama opterećenja

Drugi fenomen koji značajno utiče na vrednost termički trajno dozvoljene struje opterećenja kablova je uticaj promenljivog opterećenja kabla ili sistema kablova. Prilikom promene opterećenja kabla dolazi i do promene snaga gubitaka u kablu. Ovo dovodi do toga da je zagrevanje kabla različito od slučaja kada ne bi bilo promene opterećenja. Pretpostavlja se da jedan deo okolnog zemljišta kabla prati promenu opterećenja. Zemljište koje se nalazi van oblasti koju definiše prečnik zemljišta koje prati promenu opterećenja ne podleže ovim promenama zbog velike temperaturne inertnosti ambijenta. Pri uvažavanju ovog fenomena proračunom se dobija promenljivo dozvoljeno strujno opterećenje. Detaljna analiza ovog fenomena objašnjena je u [3].

## 3. RAČUNARSKI PROGRAM ZA TERMIČKI PRORAČUN

Proračun termički trajno dozvoljene struje je komplikovan i složen pa je to bio motiv za razvoj računarskog programa. On će biti predstavljen u ovom radu. Program omogućava lako definisanje konstrukcije kablova i uz unos neophodnih parametara daje informaciju o svim željenim veličinama do kojih se u toku termičkog proračuna dolazi. Kao glavnu informaciju, pruža uvid u vrednost termički trajno dozvoljene struje kojom se može opteretiti odabrani kabl ili trofazni sistem kablova.

### 3.1. Glavni korisnički meni

Prilikom pokretanja programa, korisnik se najpre susreće sa glavnim menijem (Slika 2). Ovo je glavni navigacioni prozor na kom korisnik može da izabere kabl koji će koristiti u proračunu, ili da odmah krene sa proračunom sa odabranim kablom.

Na glavnom meniju korisnik dobija informaciju i o nazivu kablu koji je trenutno izabran, a može da dobije i detaljan uvid u električne i konstrukcione elemente tog kabla. Pregled konstrukcionih slojeva se može videti i sa slike kabla, ukoliko je detaljno definisan u postupku kreiranja i unet u bazu podataka.



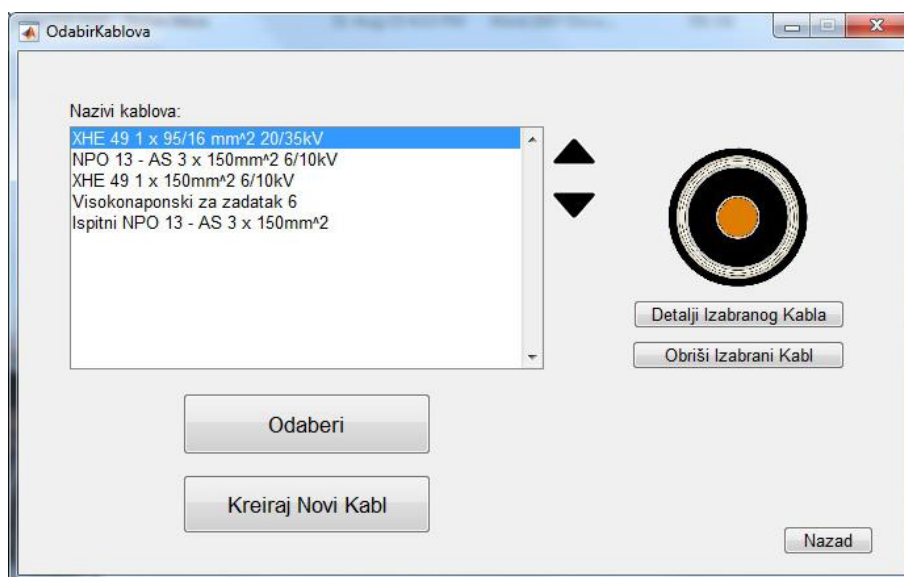
Slika 2. Glavni korisnički meni

### 3.2. Odabir željenog kabla

Korisnik u meniju za odabir kabla ima uvid o svim kablovima koji se nalaze u bazi podataka (Slika 3). Za svaki od kablova se mogu videti detalji (električni i konstrukcioni). Pritiskom na dugme "Odaberi" korisnik odabira vrstu kabla koju želi da nadalje koristi u proračunima. Ukoliko neke kablove češće koristi od drugih, korisnik može preuređivati redosled kablova u listi po svojoj želji, kako bi mu bili pristupačniji.

Ovde je takođe moguće i obrisati kablove iz baze podataka uz unos sigurnosnog koda.

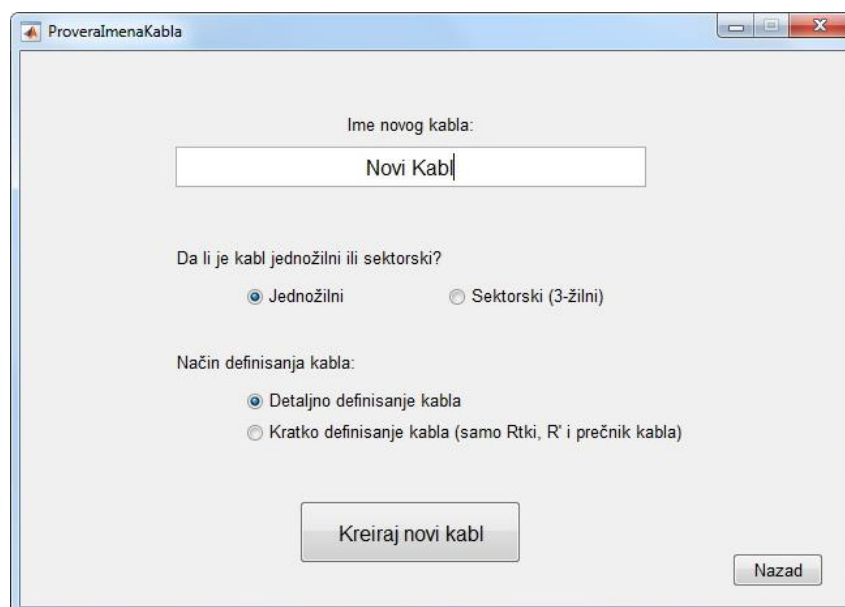
Ukoliko je potrebno izvesti proračun sa kablom koji trenutno ne postoji u bazi podataka, odavde se mogu i kreirati novi kablovi. U svakom trenutku je moguće vratiti se na ovaj prozor i odabrati neki drugi kabl, ili samu bazu podataka uređivati na bilo koji način.



Slika 3. Odabir kabla koji će se koristiti

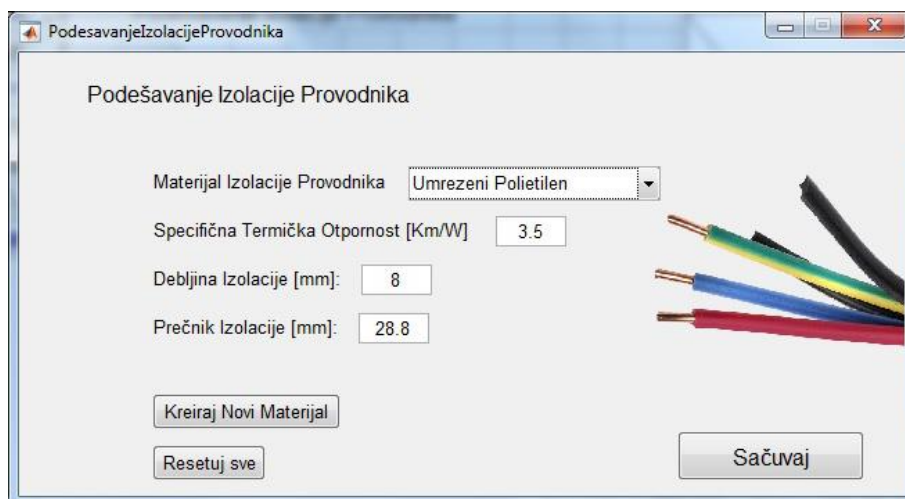
### 3.3. Kreiranje novog kabla

Ukoliko je korisniku potrebno da vrši proračun sa kablom koji trenutno ne postoji u bazi podataka, on može kreirati novi kabl pritiskom na dugme "Kreiraj novi kabl" u okviru odeljka za odabir kablova (Slika 3). Pri tome je neophodno da najpre definiše naziv novog kabla, vrstu provodnika kabla i nivo detaljnosti kojom želi da definiše novi kabl (Slika 4).



Slika 4. Zadavanje naziva novog kabla, vrste provodnika i definisanje detaljnosti

Kabl se može definisati detaljno, sa svim električnim i prostornim detaljima konstrukcionih elemenata koje poseduje. U drugom slučaju kabl se može definisati direktno preko fiktivnih električnih otpornosti provodnika i preko ekvivalentnih termičkih otpornosti. Korisniku je u ovom programu omogućeno da bira jedan od ova dva načina definisanja kabla. Ilustracije radi, kod detaljnog definisanja kabla, na Slici 5 prikazano je unošenje podataka o izolaciji provodnika kabla. Na sličan način moguće je definisati i ostale parametre kabla.

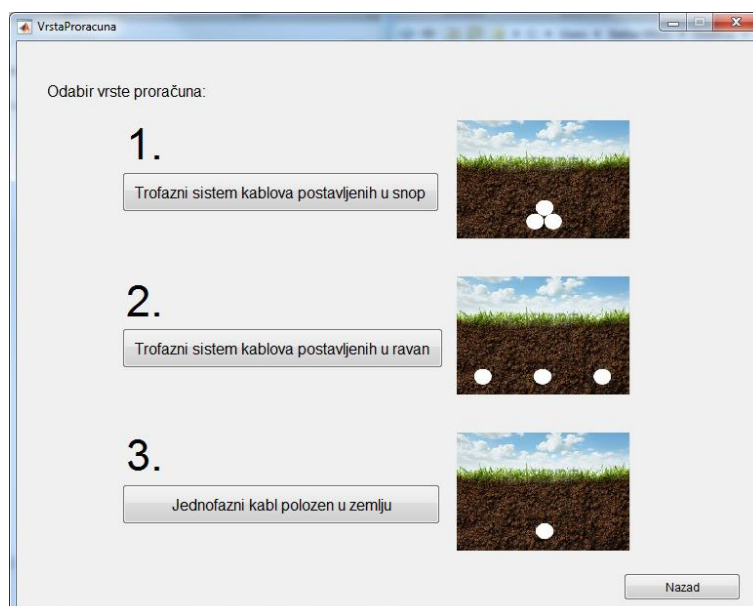


Slika 5. Unošenje podataka o izolaciji provodnika kabla

### 3.4. Proračun termički trajno dozvoljenje struje kabla

Kada korisnik odabere kabl koji želi da koristi u proračunu, sa glavnog menija može pristupiti definisanju detalja novog proračuna. Najpre je potrebno da odabere način postavljanja kabla ili kablovskih sistema u zemlju (Slika 6). Korisnik može da bira između:

- trofaznog kablovskog sistema postavljenog u snop,
- trofaznog kablovskog sistema postavljenog u ravan,
- jednofaznog kabla koji je usamljeno položen u zemlju.



Slika 6. Način polaganja kablova u zemlju

Takođe, neophodno je da korisnik precizira i ostale parametre za proračun:

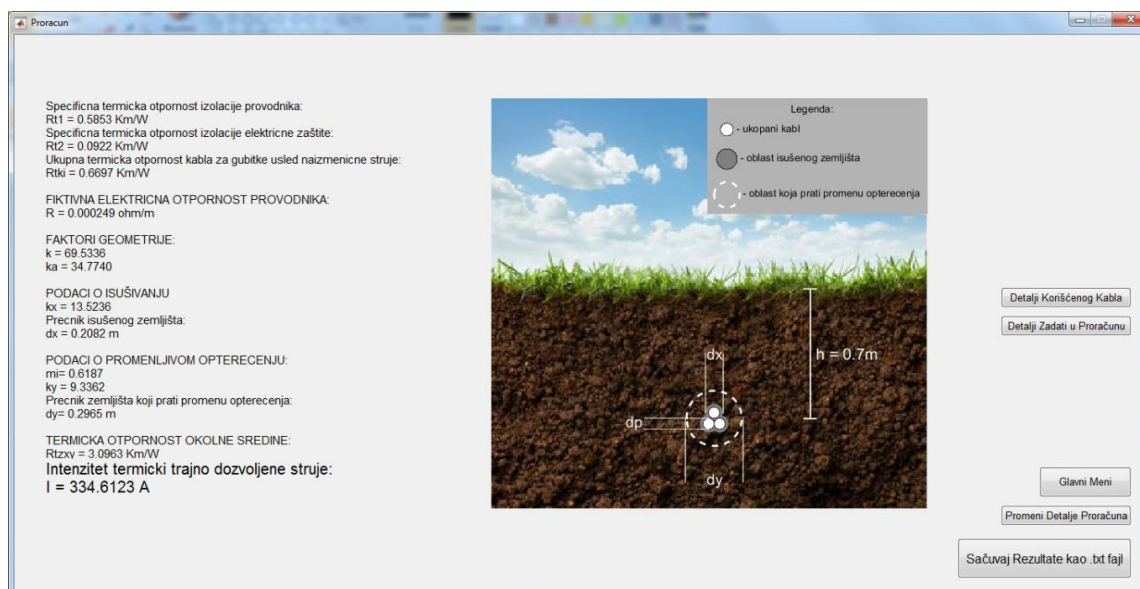
- temperaturu referentne zemlje,
- maksimalno dozvoljenu temperaturu provodnika kabla,
- dubinu polaganja kabla ili kablovskog sistema,
- rastojanje između kablova (ukoliko su kablovi postavljeni u ravni),
- specifičnu termičku otpornost neisušene zemlje,
- faktor gubitaka u električnoj zaštiti (ako je izabrani kabl poseduje),
- faktor gubitaka u armaturi (ako je izabrani kabl poseduje).



Ovo su obavezni parametri koji se moraju definisati prilikom svakog proračuna i oni se unose preko odgovarajućeg prozora. Korisnik može izabrati da uvaži i:

- isušivanje zemljišta, pri čemu se mora definisati specifična termička otpornost isušene zemlje,
- promenljiv dijagram opterećenja, pri čemu se mora uneti vrednost faktora opterećenja,
- dielektrične gubitke.

Pokretanjem proračuna program računa sve relevantne veličine koje se odnose na termički proračun kabla. Kao najvažniji rezultat dobija se termički trajno dozvoljena struja. Svi relevantni podaci se nakon proračuna ispisuju u odgovarajućem prozoru prikazanom na Slici 7. Grafički se prikazuje i način polaganja kabla, prečnik isušenog zemljišta (ukoliko je uvaženo) i prečnik zemljišta koje prati promenu opterećenja (ako je uvaženo).



Slika 7. Ispis rezultata proračuna i grafički prikaz načina polaganja

Korisnik ima uvid u sve detalje proračuna, a sve dobijene rezultate može sačuvati u tekstualnoj datoteci čije ime i lokaciju definiše. Ona sadrži sve dobijene parametre proračuna, kao i prikaz svih detalja analiziranog kabla. Ispisom rezultata proračun je završen i korisnik se može vratiti na glavni korisnički meni kako bi nastavio sa radom na drugom proračunu, sa trenutno izabranim ili nekim drugim kablom.

#### 4. ZAKLJUČAK

Termički procesi u kablovima su složeni. Oni zavise od konstrukcione strukture kablova i od parametara okolne sredine u kojoj se kablovi polažu. Iako se termički proračun kablova može uraditi i ručno, ovakav pristup nije praktičan jer je vremenski zahtevan, a moguće su i greške u proračunu. Zbog toga se najčešće koriste softverska rešenja koja korisnicima pružaju daleko veći komfor, kao i sistematičnost u rešavanju problema.

Softver opisan u ovom radu omogućava efikasnost i jednostavnost u određivanju svih parametara koji karakterišu termičke prilike u kablovima. Postupnim koracima, on korisnika vodi kroz proces definisanja kabla i svih njegovih elemenata. Uz uvažavanje svih procesa koji se odigravaju kod kablova položenih u zemlju, korisnik kao rezultat dobija jasan uvid u dobijene parametre, za daleko kraće vreme i uz manje uloženi napora. Upravo ovo je cilj namenskih softverskih alata. Uz njih je moguće ostvariti velike uštede, kako materijalne, tako i vremenske. Pored toga oni se mogu koristiti za edukaciju kako studenata tako i svršenih inženjera.

#### LITERATURA

1. William Thue ed., 2012, Electrical Power Cable Engineering, 3rd edition, CRC Press, Taylor & Francis Group.
2. Sushil Kumar Ganguli, Vivek Kohli, 2016, Power Cable Technology, CRC Press, Taylor & Francis Group.
3. Dragan S. Tasić, 2001, Osnovi elektroenergetske kablovske tehnike, Osnovni udžbenici.
4. Dragan. S. Tasić, 2003, Osnovi elektroenergetske kablovske tehnike, Zbirka rešenih Zadataka, Niš: Udruženje književnika „Branko Miljković“.