

# Izračun stacionarne temperature vodiča električnog voda

---

Požgaj, Marin

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:175268>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-20**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**

**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

**Sveučilišni studij**

**IZRAČUN STACIONARNE TEMPERATURE VODIČA  
ELEKTRIČNOG VODA**

**Završni rad**

**Marin Požgaj**

**Osijek, 2020**

# Sadržaj

<b>1. UVOD</b> .....	<b>3</b>
<b>1.1. Zadatak završnog rada</b> .....	<b>3</b>
<b>2. PREGLED PODRUČJA TEME</b> .....	<b>4</b>
<b>3. ELEKTIČNI VOD</b> .....	<b>5</b>
<b>3.1. Podjela električnog voda</b> .....	<b>5</b>
3.1.1. Podjela prema konstrukciji .....	6
3.1.2. Podjela prema namjeni .....	6
3.1.3. Podjela prema električnim karakteristikama.....	6
<b>4. ZAGRIJAVANJE VODIČA</b> .....	<b>7</b>
<b>4.1. Prijenosna moć električnog voda</b> .....	<b>7</b>
<b>4.2. Određivanje najveće dopuštene struje prijenosnog voda</b> .....	<b>8</b>
4.2.1. Utjecaj sunčevog zračenja na najveću dopuštenu vrijednost struje. ....	9
4.2.2. Utjecaj vjetra na najveću dopuštenu vrijednost struje .....	9
4.2.3. Utjecaj elektromagnetskog zračenja na najveću dopuštenu temperaturu.....	10
<b>5. IZRAČUN STACIONARNE TEMPERATURE</b> .....	<b>13</b>
<b>5.1. Metoda za izračun stacionarne temperature</b> .....	<b>13</b>
<b>5.2. Izračun iznosa konvekcijskog hlađenja</b> .....	<b>14</b>
<b>5.3. Izračun iznosa radijacijskog hlađenja</b> .....	<b>15</b>
<b>5.4. Izračun iznosa solarnog grijanja</b> .....	<b>16</b>
<b>5.5. Primjeri izračuna</b> .....	<b>18</b>
<b>6. ZAKLJUČAK</b> .....	<b>23</b>
<b>SAŽETAK</b> .....	<b>24</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>24</b>
<b>LITERATURA:</b> .....	<b>25</b>
<b>ŽIVOTOPIS</b> .....	<b>26</b>

## 1. UVOD

Zbog svakodnevnog rasta potražnje za električnom energijom, potrebna je sve veća prijenosna snaga i manji gubici u električnom vodu. Električna energija koja se prenosi vodičima u većini slučajeva je opasna po okolinu, stoga se vodovi izoliraju ili postavljaju na visine koje nisu lako dostupne. Prilikom postavljanja vodova na određenu visinu koriste se stupovi (drveni, čelično-rešetkasti, betonski. itd.), no i tu postoji opasnost električne energije. Prilikom oštećenja stupova može doći do dodirivanja ogoljenih vodiča i posljedično tome do požara ili do strujnog udara. Zbog toga je bitno da poznajemo električni vod u njegovoj suštini i kako se ponašaju njegovi pojedini dijelovi pod raznim utjecajima (vremenske nepogode, ljudski faktor, dotrajalost stupova, itd.). Temperatura vodiča je podatak koji govori o tome koliko je vod opterećen. Temperatura je proporcijalno ovisna o struji, što znači ako se poveća iznos struje koja prolazi kroz vodič, tada će se povećati i iznos temperature voda. S porastom temperature dolazi do povećanja otpora i produljivanje vodiča između dva nosiva stupa. Stoga kako bih predvidjeli ponašanje vodiča bitno je znati temperaturu vodiča kako bih izračunali njegov otpor i promjenu duljine provjesa kako ne bi vod došao u doticaj s okolišem oko njega.



Slika 1.1. Oštećenje nosivog stupa električnog voda ljudskim faktorom

### 1.1. Zadatak završnog rada

U završnom radu potrebno je opisati fizikalne pojave koje utječu na zagrijavanje vodiča nadzemnog voda, iz dostupne literature će biti opisana jedna od metoda za proračun stacionarne temperature vodiča. Na primjeru voda obaviti izračun temperature vodiča za određene iznose struje i vremenske uvjete.

## 2. PREGLED PODRUČJA TEME

Kroz pregled područja literature i područja vidimo kako se za izračun temperature koristi najviše IEEE Std 738 standard, zbog svoje opsežnosti i preciznosti moguće ga je koristiti u različitim uvjetima. Dakako postoje i druge metode koje se koriste. To možemo vidjeti u idućim radovima. Iz članka [2], autora R. Yao, K. Sun, F. Liu i S. Mei koriste se metodom koju predlažu za zamjenu metode koja se radi prema IEEE Std 738. Ti autori kažu kako bi bilo bolje se koristiti analitičkim rješenjima nego numeričkim iz razloga što bi se dobilo značajno poboljšanje učinkovitosti simulacije i na taj način točnije odredila stacionarna temperatura. Isto tako predlažu korištenje numeričke prognoze vremena (eng. *Numerical weather prediction*, NWP) kao izvor za podatke o okolišu vodiča. Kako je članak [2] napisan 2018 godine još nije ušao u IEEE Std 738, pa njihove tvrdnje trebamo uzeti s oprezom. Prema V.T. Morgan [8], stacionarna temperatura električnog voda se treba uzimati kao najveća dopuštena temperatura kod kraćih vodova kako bi se izbjeglo oštećenje voda prilikom prekomjernog provjesa i dugotrajnog zagrijavanja vodiča. Autori članka [9] iz Slovenije kažu, kako nije ista temperatura u jezgri vodiča i na površini, stoga oni uzimaju u obzir prazne prostore između žica vodiča. S tom pretpostavkom dolaze do zaključka kako je razlika u temperaturi nekoliko stupnjeva. Točnije, izračunom su, za alučel vod nazivnog presjeka  $490/65 \text{ mm}^2$ , dobili razliku od  $7 \text{ }^\circ\text{C}$ . Taj podatak su potvrdili i pokusom, kad su za isti vod, s istim okolišnim uvjetima, izmjerili rezultat od  $6 \text{ }^\circ\text{C}$ . To nam govori kako alučel vod nije homogen i da kao takvog trebamo i promatrati.

### 3. ELEKTIČNI VOD

Električni vod je skup električnih vodiča koji su jedan od drugog, od zemlje i od drugih konstruktivnih dijela izolirani. U širem smislu, vod, elektro-magnetski pojam, obuhvaća antene, nehomogene vodove, vodiče u električnim uređajima, instrumentima i strojevima, namote električnih strojeva, transformatora i slično [1]. Električni vodovi imaju vitalnu ulogu u prijenosu električne energije između proizvodnje u elektranama, preko transformatora pa sve do krajnjeg korisnika. Nadzemni vodovi pokrivaju najveće područje u cijelom sustavu i izloženi su različitim vremenskim uvjetima kroz godinu. Mnoge vrste prirodnih nepogoda mogu naštetiti vodu, kao što je udar munje, jako strujanje zraka, visoka temperatura, itd. Vod mora biti projektiran na takav način da u slučaju velikih temperatura zraka, što posljedično podiže temperaturu voda i time se vod linearno rasteže, ne zapinje za okoliš koji je ispod voda (drveće, drugi vodovi, itd.) ili da ne bi došlo do dodirivanja žica vodova međusobno i posljedično tome kratkog spoja



Slika 3.1. Prijelaz nadzemnog prijenosnog vodiča iznad telefonskog kabela

#### 3.1. Podjela električnog voda

Električni vodovi se mogu podijeliti po konstrukciji, prema namjeni ili prema električnim karakteristikama [1].

### **3.1.1. Podjela prema konstrukciji**

Električni vodovi dijele se na nadzemne vodove, izolirane vodove i kabele. Nadzemni vod se sastoji od vodiča koji je ovješena nad zemljom; vodiči mogu biti izolirani ili goli. Goli vodiči se pričvršćuju na nosače ili stupove pomoću staklenih ili keramičkih izolatora. Izolirani vodovi (u širem smislu) dijele se na izolirane vodove (u užem smislu) i kabele. Izolirani vodovi (u užem smislu) koriste se najčešće kao električne instalacije, dok je kabel električni vod koji se najčešće polaže u zemlju, ponekad i u vodu i građevine. Razlika između izoliranih vodova (u užem smislu) i kabela je samo u tome što se izolirani vodovi koriste za napone do 1 kV (osim kad se koriste za svijetleće cijevi) dok kabele se koriste za niske i za visoke napone. Kabele koji su izolirani plastičnim masama se koriste do 110 kV. Postoji izvedba kabela koji mogu podnijeti i do 500 kV, kabele s izolacijom od papira.

### **3.1.2. Podjela prema namjeni**

Prema ovoj podjeli vodovi se mogu podijeliti za prijenos snage i za prijenos informacije. Za prijenos snage koriste se nadzemni vodovi, kabele i drugi izolirani vodovi za električne instalacije u zgradama, na brodovima i u vozilima. U širem smislu, mogu se i vodovi kontaktne mreže električnih željeznica ubrajati za prijenos snage. Od vodova za prijenos informacija najvažniji su vodovi u telekomunikacijama. U telekomunikacijama, stari nadzemni vodovi zamjenjuju se s kablom, gdje god je to moguće. Namoti električnih transformatora i strojeva moraju se promatrati kao električni vodovi iz razloga što moramo u obzir uzeti i konačnu brzinu rasprostiranja pojava; u tu kategoriju idu sva prijelazna stanja.

### **3.1.3. Podjela prema električnim karakteristikama**

Ova podjela razlikuje homogene i nehomogene vodove. Homogeni vodiči su svom svojom dužinom napravljeni od jednog materijala i ne mijenjaju svoja elektromagnetska svojstva i karakteristike po cijeloj svojoj dužini. Nehomogeni vodiči su vodiči koji su napravljeni od dva ili više materijala gdje jedan materijal ima bolja električna svojstva, dok drugi materijali imaju bolja mehanička ili neka druga fizikalna svojstva, kako bih imao što veću primjenu u praksi. Najbolji primjer nehomogenog vodiča je alučel. Alučel (skraćeno od aluminij-čelik, eng. *ACSR – aluminium conductor steel-reinforced*) je naziv za materijal koji se koristi za izradu vodova pri prijenosu električne energije. Alučel se sastoji od dva dijela jezgre i plašta. Jezgra se sastoji od čeličnih žica koje preuzimaju mehanička naprezanja i oko jezgre se nalazi aluminijski plašt koji se sastoji od aluminijskih žica koje imaju bolja električna svojstva koja su korisna za prijenos energije.

## 4. ZAGRIJAVANJE VODIČA

### 4.1. Prijenosna moć električnog voda

Pojam prijenosne moći električnog voda znači najveću moguću vrijednost struje koja može protjecati bez narušavanja električnih ili mehaničkih svojstava voda. Veličina prijenosne moći je ovisna o električnim i mehaničkim svojstvima voda, njegovoj sposobnosti disipirati proizvedenu toplinu te o samim klimatskim uvjetima u okolini voda. U okolišne uvjete voda spadaju okolišna temperatura, brzina i smjer vjetra, intenzitet solarnog zračenja i oborine. ACSR užad je najčešća vrsta užadi koja se koristi u našem prijenosnom sustavu. Ta užad, ovisno o naponskoj razini, su postavljena u snop ili su razdvojena. U ovom radu ćemo kao primjer za pokazatelj utjecaja sunčevog zračenja, vjetra i temperature ćemo koristiti ACSR 350/59 užad.

Tablica 4.1. Parametri korištenog užeta.

Tip	ACSR 350/59
Promjer ( $mm$ )	26,39
Poprečni presjek ( $mm^2$ )	410,80
Jedinična težina ( $\frac{kg}{km}$ )	1453,01
Specifična gravitacija ( $\frac{MN}{m^3}$ )	0,03469
Najveća dopuštena naprežanja (MPa)	108,661
Elastični modul (MPa)	74332
Koeficijent temperaturnog istezanja ( $\frac{1}{^\circ C}$ )	$18,65 * 10^{-6}$
Nazivni istosmjerni otpor ( $\frac{\Omega}{km}$ )	0,835

Stvarna kontrola temperature vodiča kada je poznata vrijednost struje se izvodi za sljedeće uvjete:

- Trenutna vrijednost struje je najveća,
- Temperatura okoline je  $35\text{ }^\circ C$ ,
- Brzina vjetra je  $0.5\frac{m}{s}$  pod kutom od  $45\text{ }^\circ$ ,
- Temperatura sunčeve svjetlosti je  $1000\frac{W}{m^2}$ ,
- Koeficijent apsorpcije je 0.5,
- Koeficijent emisije je 0.5,.



Pod tim uvjetima možemo reći da je vod proračunat za najgore okolišne uvjete i pod najvećim naprežanjem, tako da njegova temperatura ne prelazi najveću dopuštenu temperaturu. Treba dati do znanja kako su ovi okolišni uvjeti rijetki što znači da najveća temperatura voda nije konstanta te da vod može biti preopterećen.

## 4.2. Određivanje najveće dopuštene struje prijenosnog voda

Vod koji je određen svojim mehaničkim i električnim svojstvima ima određen iznos najveće dopuštene struje koja se uzima za konstantu i koja je dana u tvornici gdje je vodič izrađen, uz uvjet da nije oštećen. Procjena okolišnih uvjeta mora se temeljiti na njihovoj promijeni tijekom godine, kao čimbenika koji određuju najveće dopušteno opterećenje električnog voda. Temperatura stacionarnog stanja voda, uzimajući u obzir okolišne uvjete može se izraziti sljedećom jednadžbom (4-1), gdje lijevi dio jednadžbe govori o parametrima za zagrijavanje, a desni nam govori o parametrima za hlađenje električnog voda

$$Q_Z + Q_S + Q_C = C_v * \frac{d\Theta}{dt} + Q_k + Q_r + Q_w \quad (4-1)$$

Gdje je:  $Q_Z$  – zagrijavanje protjecanjem struje,  $Q_S$  – zagrijavanje uslijed sunčevog zračenja,  $Q_C$  – zagrijavanje utjecajem korone,  $C_v$  – toplinski kapacitet električnog voda,  $Q_k$  – hlađenje pomoću zraka,  $Q_r$  – radijacijsko hlađenje,  $Q_w$  – hlađenje uzrokovano isparavanjem vode.

U proračunu, zagrijavanje voda utjecajem korone se zanemaruje. Najznačajniji porast temperature zbog utjecaja efekta korone javlja se kod jakog hlađenja voda. U tom slučaju zanemarujemo doprinos hlađenja uzrokovanog isparavanjem. U svrhu ovoga rada, rješenje ćemo temeljiti na jednadžbi statičkog modela, tako da će jednadžba (4-1) imati sljedeći oblik (4-2)

$$Q_Z + Q_S = Q_k + Q_r \quad (4-2)$$

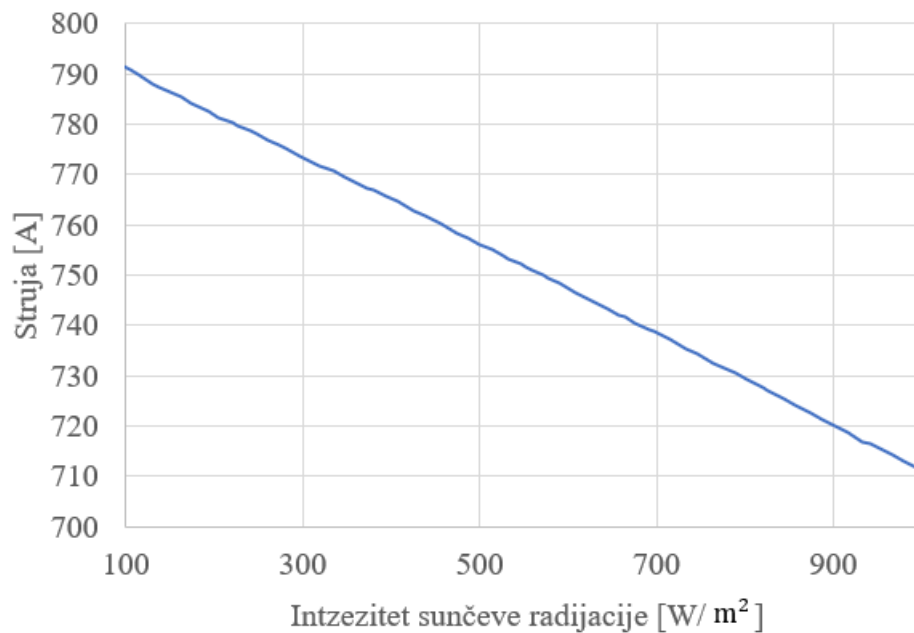
Prema normi EN 50341 proračun se provodi prema sljedećim uvjetima:

1. Sunčevo zračenja u rasponu od 100 W/m<sup>2</sup> do 1000 W/m<sup>2</sup>
2. Okolišna temperatura u rasponu od -40 °C do -1 °C i u rasponu od +1 °C do 40 °C
3. Strujanje zraka brzinom od 1 m/s do 40 m/s

Bitno je napomenuti kako su za proračun postavljeni stalni okolišni uvjeti i najveća preporučena temperatura ispitnog užeta ne prelazi 70 °C

#### 4.2.1. Utjecaj sunčevog zračenja na najveću dopuštenu vrijednost struje.

Sunčevo zračenje koje ozračuje ispitno uže ima tri komponente: izravno zračenje, difuzno zračenje i reflektirano zračenje. Prilikom određivanja sunčevog zračenja s dovoljnom točnošću možemo isključiti difuzno i reflektirajuće sunčevo zračenje jer imaju zanemarivi učinak, oko 2 – 4 %. Ovisnost najveće dopuštene vrijednosti struje o jakosti sunčevog zračenja prikazano je donjoj slici (Sl. 4.1.).



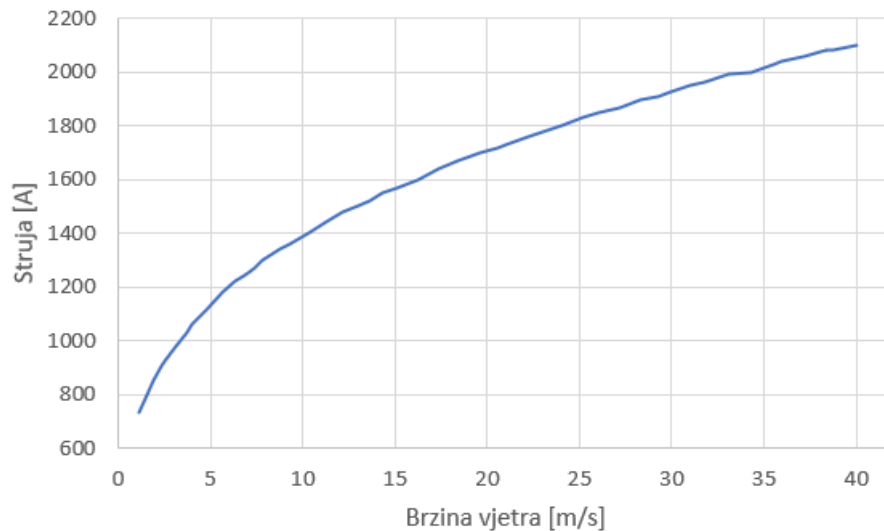
Sl. 4.1. Graf ovisnosti intenziteta sunčeve radijacije i struje [3]

Iz slike 4.1. je vidljivo kako porastom sunčeva intenziteta dolazi do linearnog pada najveće dopuštene vrijednosti struje koja smije protjecati vodičem. Pri najmanjem intenzitetu sunčeve radijacije ( $100 \text{ W/m}^2$ ) možemo, iz slike 4.1., iščitati kako je najveća dopuštena struje koja smije protjecati u iznosu od 790,07 A, za vodič nazivnog presjeka  $350/59 \text{ mm}^2$ . Kako iznos struje opada s porastom intenziteta, možemo zaključiti da će iznos struje na najvećem ispitnom intenzitetu biti manje vrijednosti. Vrijednost struje na tom intenzitetu je 711,22 A. Ovi rezultati su za jednu žicu u snopu od tri žice.

#### 4.2.2. Utjecaj vjetra na najveću dopuštenu vrijednost struje

Vjetar, kao protok zraka, predstavlja prijenos energije u makroskopskom mjerilu između čestica koja sadrže veliki broj molekula, sa stajališta smanjenja temperature električnog voda. Najviša dopuštena struja električnog voda će se promatrati prilikom različitih brzina vjetra, od 1 m/s do 40

m/s pod kutom strujanja zraka na dalekovod od  $45^\circ$ . Ovisnost najveće vrijednosti struje prilikom promijene brzine zraka je prikazana na slici (Sl. 4.2.)

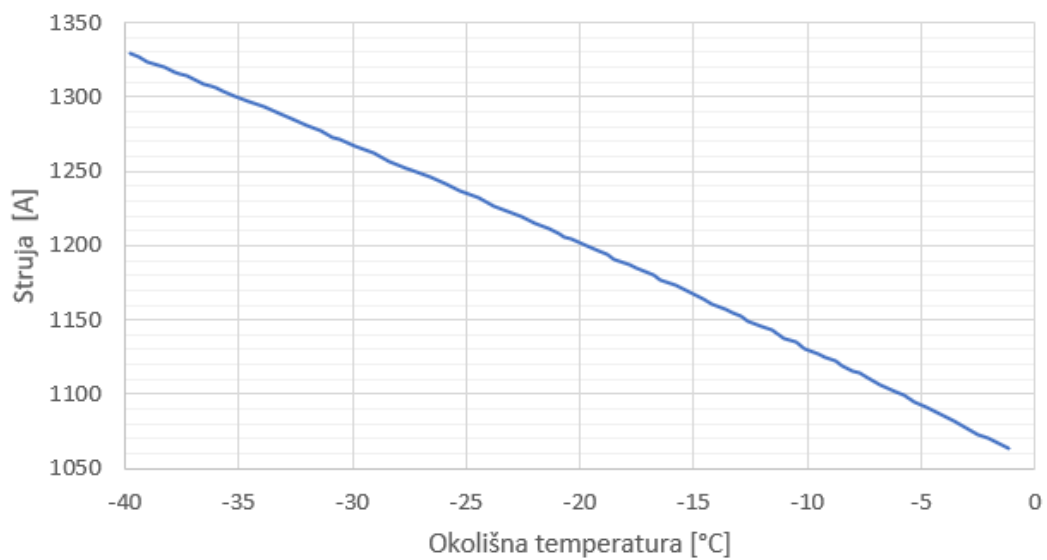


Slika 4.2. Graf ovisnosti brzine vjetra i iznosa najveće dopuštene struje [3]

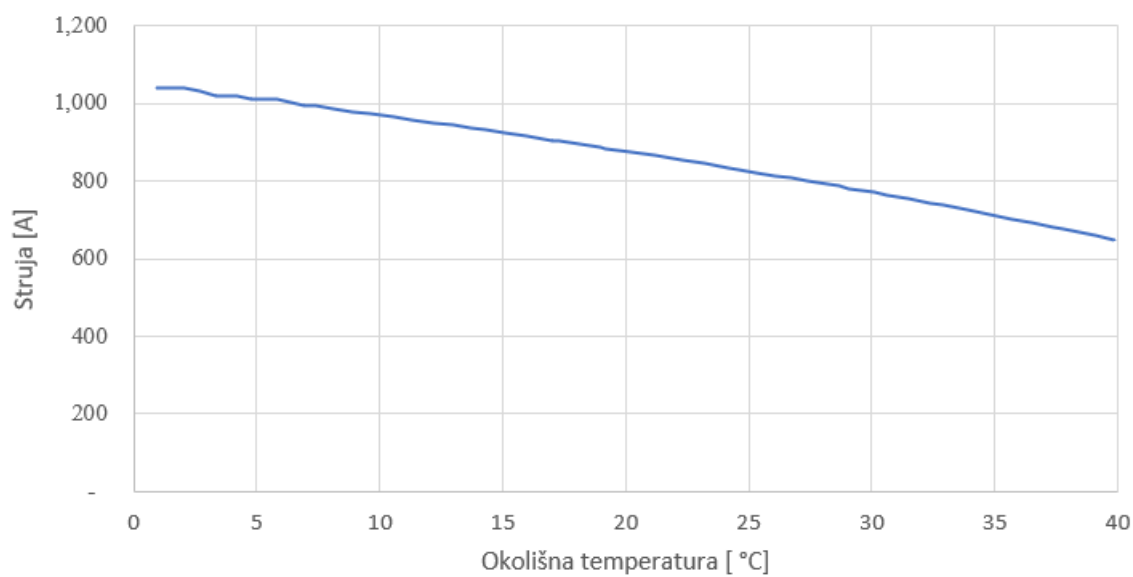
Iz gore navedene slike (4.2.) možemo zaključiti kako će vrijednost najveće dopuštene struje porasti eksponencijalno s porastom brzine vjetra. Kako je graf na slici eksponencijalan, vidimo kako će najveći porast najveće dopuštene struje biti u prvom dijelu krivulje (od 1 m/s do 15 m/s) u iznosu od 120%, u odnosu na početnu vrijednost. Nakon što brzina vjetra poraste preko 15 m/s vidimo da je rast najveće dopuštene struje dalje linearan. Iz tih podataka možemo zaključiti kako i najmanji povjetarac može biti značajan prilikom proračuna stacionarne temperature voda.

#### 4.2.3. Utjecaj elektromagnetskog zračenja na najveću dopuštenu temperaturu

Zračenje predstavlja mehanizam preko kojeg se dešava prijenos topline emisijom i apsorpcijom elektromagnetskog zračenja kojeg emitira neki objekt s nekom temperaturom većom od 0 K, prema Planckovom zakonu. Ukupna količina koja se emitira s površine predmeta ovisi o njegovoj temperaturi na površini. Pored vlastitog zračenja nekog tijela svaki objekt hvata i fotone zračene iz obližnjeg predmeta. Proučavanje efekta zračenja na konačni strujni kapacitet će se temeljiti na pretpostavci da temperatura električnog voda ne prelazi dopuštenih  $70^\circ\text{C}$ , pri radnoj temperaturi. Ispitivanje će se sastojati od dva dijela, prvo će biti na temperaturama od  $-40^\circ\text{C}$  do  $-1^\circ\text{C}$ , a drugi dio će biti od  $1^\circ\text{C}$  do  $40^\circ\text{C}$ , za alučel vod nazivnog presjeka  $350/57\text{ mm}^2$ .



Slika 4.3. Graf ovisnosti povećanja temperature i najveće dopuštene struje [3]



Slika 4.4. Graf ovisnosti povećanja temperature i najveće dopuštene struje [3]

Kako možemo vidjeti iz grafova, porastom temperature u oba slučaja dolazi do smanjenja najveće dopuštene vrijednosti struje. Takav rezultat je bio i očekivan zbog same fizike gibanja čestica (elektrona u ovom slučaju) na različitim temperaturama. Svakako trebamo uzeti u obzir temperaturne razlike u vanjskoj temperaturi jer raspon temperatura u kojem smo izradili graf je moguć u našoj okolini (razlika temperature zima-ljeto). Amplitude vrijednosti najveće dopuštene struje se kreću od 1330,23 A, na temperaturi od  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , do 645,74 A, na temperaturi od  $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , za alučel vod nazivnog presjeka  $350/57\text{ mm}^2$ , što svakako nije zanemarivo.

## 5. IZRAČUN STACIONARNE TEMPERATURE

### 5.1. Metoda za izračun stacionarne temperature

Prema IEEE Std 738 -2006, za izračun stacionarne temperature prijenosnog voda, kod voda golih vodova, površinska temperatura voda i parametri stabilnog vremena su nam poznati. Gubitak topline zbog radijacije i konvekcije, sunčevo zagrijavanje, otpor voda se izračunavaju pomoću formula. Odgovarajući iznos struje koji je pod ovim vremenskim uvjetima se izračunava pomoću dolje navedene jednadžbe (5-1). Ovaj izračun je ostvariv za bilo koje vremenske uvjete i bilo koju temperaturu voda, većinom se koriste vrijednosti ustaljenog stanja voda. Odnosno najveća dopuštena temperatura voda (70 °C) i uobičajeni vremenski uvjeti (0.5 m/s brzina vjetra koja je okomita na vod, puno sunce i ljetna temperatura od 40 °C). Prijenos topline i otpor voda ovise o temperaturi voda, dok količina sunčeve topline ne ovisi. Zbog toga, ako treba izračunati temperaturu voda, ne ju specificirati, nego, jednadžba (5-1), se rješava u smislu trenutne temperature i vremenskih uvjeta, koji su specificirani, za postupak numeričke iteracije, čak i ako se pretpostavlja da je vod u ustaljenom stanju. Korištenjem metoda numeričkog rješavanja, koje su navedene u gore navedenom standardu, izbjegavaju se složene i dugotrajne aproksimacije koje su potrebne za linearizaciju brzine gubitaka zračenja topline i konvekcije. Koristeći stabilne vremenske uvijete, postupak izračuna je sljedeći:

- Izračunava se sunčeva toplina koja zagrijava vod (neovisna o temperaturi voda)
- Temperatura ispitnog voda se pretpostavlja
- Otpor voda se izračunava za ispitnu temperaturu
- Ovisno o pretpostavljenim vremenskim uvjetima, izračunavaju se uvjeti gubitka topline u konvekciji i zračenju
- Izračunata struja se uspoređuje s ispitnom strujom
- Temperatura ispitnog voda se mijenja dok ne dobijemo struju koja odgovara unutar tolerancija koja je zadana

$$q_c + q_r = q_s + I^2 * R(T_c) \quad (5-1)$$

$$I = \sqrt{\frac{q_c + q_r - q_s}{R(T_c)}} \quad (5-2)$$

Gdje je:  $q_c$  – hlađenje konvekcijom po dužini,  $q_r$  – hlađenje radijacijom po dužini,  $q_s$  – sunčevo zagrijavanje po dužini,  $I$  – struja,  $R(T_c)$  – izmjenični otpor na određenoj temperaturi.

$$R(T_c) = \left[ \frac{R(T_{high}) - R(T_{low})}{T_{high} - T_{low}} \right] * (T_c - T_{low}) + R(T_{low}) \quad (5-3)$$

Gdje je :  $R(T_{low})$  – otpor na  $T_{low}$ ,  $R(T_{high})$  – otpor na  $T_{high}$ ,  $T_{low}$  – temperatura na kojoj je definiran otpor,  $T_{high}$  - temperatura za koju je izračunat otpor formulom (5-4)

$$R(T_{high}) = R(T_{low}) * (1 + \alpha(T_{high} - T_{low})) \quad (5-4)$$

## 5.2. Izračun iznosa konvekcijskog hlađenja

Hlađenje konvekcijom se može podijeliti na dva tipa hlađenja: prirodno hlađenje (nema vjetra) i prisilno hlađenje (postoji strujanje zraka). Prirodno hlađenje konvekcijom je ovisno o gustoći zraka, promjeru voda i razlici između vanjske i temperature dalekovoda. Jednadžbu (5-5) u ovom proračunu ne ćemo koristiti iz razloga što imamo strujanje zraka u iznosu od 0,5 m/s.

$$q_{cn} = 0,0205 * \rho_f^{0,5} * D^{0,75} * (T_s - T_a)^{1,25} \quad (5-5)$$

Gdje je:  $\rho_f$  – gustoća zraka,  $D$  – promjer voda,  $T_s$  – površinska temperatura voda,  $T_a$  – okolišna temperatura.

Kod prisilnog hlađenja konvekcijom postoje dvije jednadžbe koje se koriste ovisno o brzini vjetra. Kod slabog vjetra koristi se jednadžba (5-6), a kod velikih brzina se koristi jednadžba (5-7). Razlog zbog kojeg postoje dvije jednadžbe je u tome što prva jednadžba (5-6) zanemaruje velike brzine vjetra, dok druga jednadžba (5-7) zanemaruje male brzine vjetra. Oba koeficijenta se moraju izračunati u bilo kojem slučaju i u proračun se uzima onaj koeficijent koji ima veći iznos.

$$q_{c1} = K_{angle} * (1,01 + 0,372 * N_{re}^{0,52}) * k_f * (T_s - T_a) \quad (5-6)$$

$$q_{c2} = K_{angle} * 0,0119 * N_{re}^{0,6} * k_f * (T_s - T_a) \quad (5-7)$$

Gdje je:  $K_{angle}$  – faktor smjera vjetra,  $N_{re}$  – Reynoldsov broj,  $k_f$  – toplinska vodljivost zraka.

Oba koeficijenta,  $q_{c1}$  i  $q_{c2}$  su pomnoženi s faktorom smjera vjetra,  $K_{angle}$ , koji nam govori pod kojim kutom,  $\varphi$ , vjetar puše u odnosu na vod, odnosno kut  $\varphi$  je kut između smjera strujanja zraka i samog voda, (5-8).  $K_{angle}$  može se i izraziti pomoću kuta  $\beta$  koji govori koliki je kut između smjera strujanja zraka i okomice na vod. Kut  $\beta$  je komplement kutu  $\varphi$  te zbog toga faktor smjera vjetra možemo izraziti kao što je u jednadžbi (5-9).

$$K_{angle} = 1,194 - \cos(\varphi) + 0,194 * \cos(2\varphi) + \sin(2\varphi) \quad (5-8)$$

$$K_{angle} = 1,194 - \sin(\beta) - 0,194 * \cos(2\beta) + \sin(2\beta) \quad (5-9)$$

Reynoldsov broj ( $N_{re}$ ) je bezdimenzionalni podatak koji govori kolika je magnituda hlađenja konvekcijom.  $N_{re}$  je direktno proporcionalan s promjerom voda  $D_0$ , brzinom vjetra  $V_w$  i gustoćom zraka  $\rho_f$ , a obrnuto proporcionalan s viskoznošću zraka  $\mu_f$ , što može vidjeti po jednadžbi (5-10).

$$N_{re} = \frac{D_0 * \rho_f * V_w}{\mu_f} \quad (5-10)$$

Viskoznost zraka  $\mu_f$  i gustoća zraka  $\rho_f$  se izračunavaju za srednju vrijednost temperature filma  $T_{film}$ , odnosno za temperaturu koja je srednja vrijednost između okolišne temperature i površinske temperature voda (5-11).

$$T_{film} = \frac{T_s + T_a}{2}, \quad (5-11)$$

$$\mu_f = \frac{1.458 * 10^{-6} * (T_{film} + 273)^{1.5}}{T_{film} + 273} \quad (5-12)$$

$$\rho_f = \frac{1.293 - 1.525 * 10^{-6} * H_e + 6.379 * 10^{-9} * H_e^2}{1 + 0.00367 * T_{film}} \quad (5-13)$$

Gdje je :  $H_e$  – nadmorska visina voda

$$k_f = 2,424 * 10^{-2} + 7,477 * 10^{-5} * T_{film} - 4,407 * 10^{-9} * T_{film}^2 \quad (5-14)$$

### 5.3. Izračun iznosa radijacijskog hlađenja

Kada je goli nadzemni vod zagrijan preko temperature vanjske okoline tada se energija prenosi putem radijacije na okolinu voda. Brzina radijacijskog hlađenja ovisi o razlici temperature između ispitnog voda i okoliša voda za koji se pretpostavlja temperatura. Stanje površine voda, njegova sposobnost da emitira toplinu također utječe na prijenos energije (topline) zračenjem. Zračenje voda je opisano Stefan-Boltzmannovim zakonom, povezujući zračenje s razlikom između površinske temperature voda i temperature njegove okoline. Temperature su izražene u Kelvinima. Jednadžba (5-15) uključuje i faktore pretvorbe kako bi se dobio rezultat u željenim jedinica, uz Stefan-Boltzmannovu konstantu.



$$q_r = 17,8 * D_0 * \varepsilon * \left[ \left( \frac{T_s + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_a + 273}{100} \right)^4 \right] \quad (5-15)$$

#### 5.4. Izračun iznosa solarnog grijanja

Količina solarne energije ovisi o poziciji sunca na nebu solarnoj konstanti, količina te energije koja se prenosi, kroz zemljinu atmosferu na vod, orijentaciji voda i stanje površine voda, tj. o mogućnosti apsorpcije. Vodovi svjetlije boje većinu energije odbijaju dok vodovi tamnije boje više energije zadržavaju u sebi.

$$q_s = \alpha * Q_{se} * \sin(\theta) * A' \quad (5-16)$$

$$Q_{se} = K_{solar} * Q_s \quad (5-17)$$

$$\theta = \arccos [\cos(H_c) * \cos(Z_c - Z_a)] \quad (5-18)$$

Gdje je:  $\alpha$  – koeficijent apsorpcije,  $Q_{se}$  – ukupna solarna i nebeska radijacija ispravljena za visinu,  $\theta$  – efektivni kut upada sunčevih zraka,  $A'$  – projektirano područje voda,  $H_c$  – nadmorska visina voda,  $Z_c$  – azimut sunca,  $Z_l$  – azimut voda.

$$A' = D_0 / 1000 \quad (5-19)$$

$$Z_c = C + \arctan(\chi) \quad (5-20)$$

Tablica 5.1. Izbor koeficijenta C u odnosu na  $\omega$  [5].

„Sunčani sat“, $\omega$ , stupnjevi	C ako je $\chi \geq 0$ stupnjeva	C ako je $\chi < 0$ stupnjeva
$-180 \leq \omega < 0$	0	180
$0 \leq \omega < 180$	180	160

$$\chi = \frac{\sin(\omega)}{\sin(Lat) * \cos(\omega) - \cos(Lat) * \tan(\delta)} \quad (5-21)$$

$$H_c = \arcsin [\cos(Lat) * \cos(\delta) * \cos(\omega) + \sin(Lat) * \sin(\delta)] \quad (5-22)$$

Gdje je: Lat – geografska širina,  $\delta$  – solarna deklinacija,  $\omega$  – satni kut o ovisnosti na podne (11h je -15°)

$$Q_s = A + B * H_c + C * H_c^2 + D * H_c^3 + E * H_c^4 + F * H_c^5 + G * H_c^6 \quad (5-23)$$

Tablica 5.2. Polinomski koeficijenti za intenzitet sunčeve topline u ovisnosti o visini sunca u SI sustavu [5].

Čista atmosfera	SI
A	-42,2391
B	63,8044
C	-1,9220
D	$3,46921 * 10^{-2}$
E	$-3,61118 * 10^{-4}$
F	$1,94318 * 10^{-6}$
G	$-4,07608 * 10^{-9}$

Industrijska atmosfera	SI
A	53,1821
B	14,2110
C	$6,6138 * 10^{-1}$
D	$-3,1658 * 10^{-2}$
E	$5,4658 * 10^{-4}$
F	$-4,3446 * 10^{-6}$
G	$1,3236 * 10^{-8}$

$$K_{solar} = A + B * H_e + C * H_e^2 \quad (2-24)$$

Tablica 5.3. Koeficijenti za korekciju solarnog toka.[5]

	SI
A	1
B	$1,148 * 10^{-4}$
C	$1,108 * 10^{-8}$

## 5.5. Primjeri izračuna

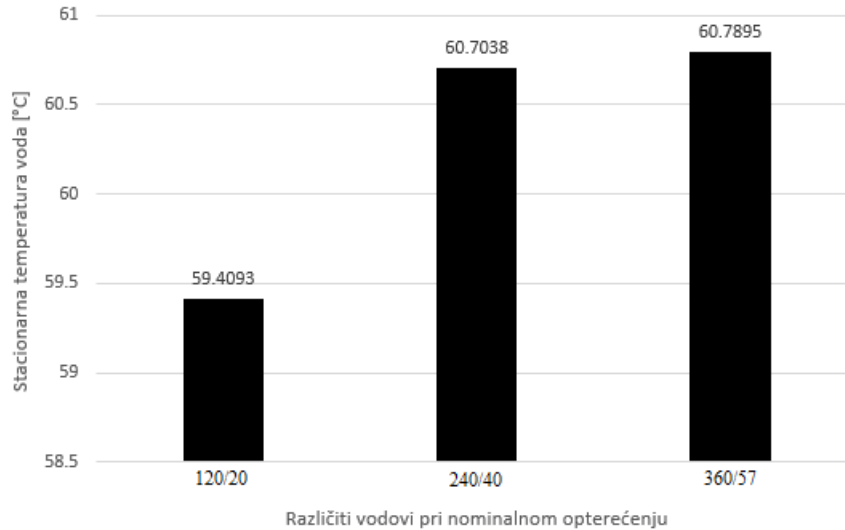
Za zadane vremenske prilike i karakteristike vodiča temperatura se može izračunati pomoću algoritma danog u IEEE Std 738. Bez tog programa nije moguće jednostavno napraviti izračun iz razloga što je potrebno ponavljati izračune za iznos struje, za početne vrijednosti da konvergira ka nekom rješenju. Za tri različita alučel voda, nazivnih presjeka:  $mm^2$ , [5][6] ćemo napraviti izračun temperature u stacionarnom stanju pri nominalnom opterećenju i za jedan vod, u ovom slučaju 360/57, ćemo napraviti usporedbu kad je vod na 75% opterećenosti, 100% opterećenosti i 125% opterećenosti. Izračun stacionarne temperature za tri voda pri nominalnom opterećenju. Podaci za sva tri voda će biti prikazani u tablici 5.4. s mjernim jedinicama u SI sustavu.

Tablica 5.4. Podaci koji su korišteni u proračun za dalekovode.

	120/20	240/40	360/57
$V_W$ [m/s]	0,5	0,5	0,5
$\varepsilon$	0,5	0,5	0,5
$\alpha$	0,5	0,5	0,5
$T_a$ [°C]	35	35	35
$\alpha_t$ [ $10^{-6}/^{\circ}C$ ]	18,9	18,9	18,9
$D_0$ [m]	0,0155	0,0219	0,0266
$T_{min}$ [°C]	20	20	20
$T_{max}$ [°C]	75	75	75
$T_s$ [°C]	75	75	75
$R(T_{min})$ [ $\Omega/m$ ]	0,0002374	0,0001188	0,00008014
$R(T_{max})$ [ $\Omega/m$ ]	0,00023765	0,00011892	0,0000802233
$R(T_c)$ [ $\Omega/m$ ]	0,00023765	0,00011892	0,0000802233
$Lat$ [°]	45	45	45
$H_e$ [m]	0	0	0
$Z_l$ [°]	45	45	45
$T_{film}$ [°C]	52,5	52,5	52,5
$\rho_f$ [ $kg/m^3$ ]	1,08411764	1,08411764	1,08411764
$\mu_f$ [kg/ms]	$1,96425 * 10^{-5}$	$1,96425 * 10^{-5}$	$1,96425 * 10^{-5}$
$k_f$ [W/m°C]	0,028153278	0,028153278	0,028153278
$N_{re}$	427,7410875	737,31525	895,5518562

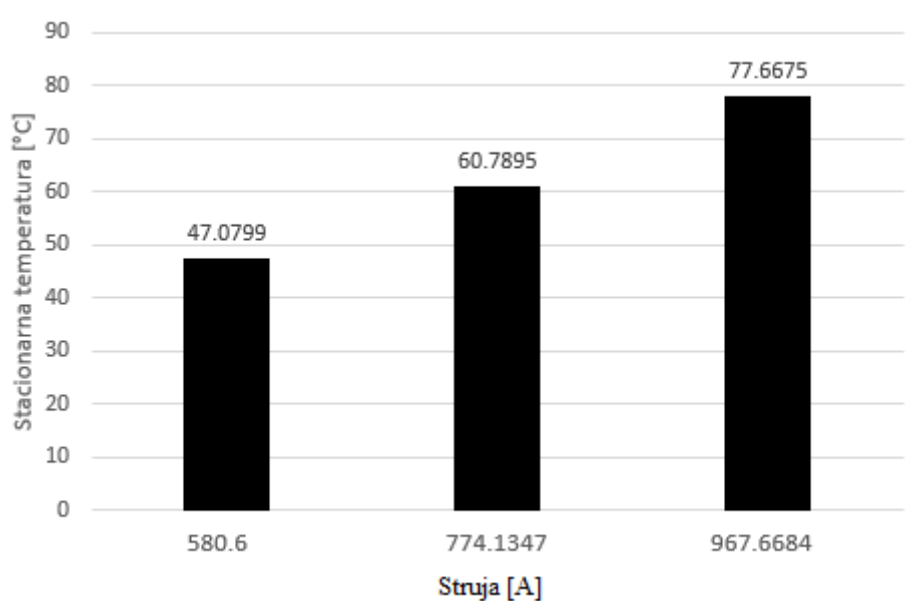
$K_{angle}$	1	1	1
$q_c$ [W/m]	32,05117339	42,21545282	46,60079685
$q_r$ [W/m]	6,6796889	15,10040652	18,34113304
$q_s$ [W/m]	7,846700887	17,73860639	21,54552192
$\omega$ [°]	-15	-15	-15
$N$	161	161	161
$\delta$ [°]	23,02144979	23,02144979	23,02144979
$H_c$ [°]	64,76346537	64,76346537	64,76346537
$Q_c$ [W/m <sup>2</sup> ]	1012,487452	1012,487452	1012,487452
$\chi$	-0,67656051	-0,67656051	-0,67656051
$Z_c$ [°]	179,4051791	179,4051791	179,4051791
$\theta$ [°]	89,74639815	89,74639815	89,74639815
$m_{Al}$ [kg/m]	0,3353	0,6702	0,9933
$m_{\check{c}e}$ [kg/m]	0,1556	0,3096	0,4414
$c_{p_{Al}}$ [kJ/kgK]	900	900	900
$c_{p_{\check{c}e}}$ [kJ/kgK]	536	536	536
$mC_p$ [J/m°C]	385,1716	769,1256	1130,5604
$I$ [A]	360,514	576,911898	735,5244525

Svi podaci u tablici 5.4. su izračunati pomoću gore navedenih formula. Za izračun stacionarne temperature električnog voda koristi se metoda iteracije, točnije Mullerova metoda iteracije. Zbog količine koraka od kojih se ona sastoji u ovom radu ćemo samo prikazati rezultate.

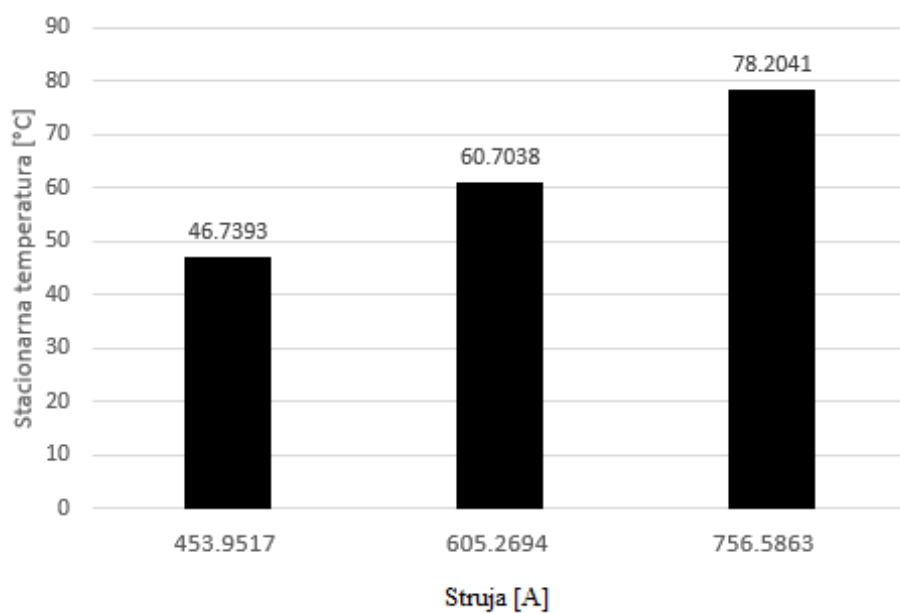


Slika 5.1. Iznosi stacionarne temperature pojedinog voda.

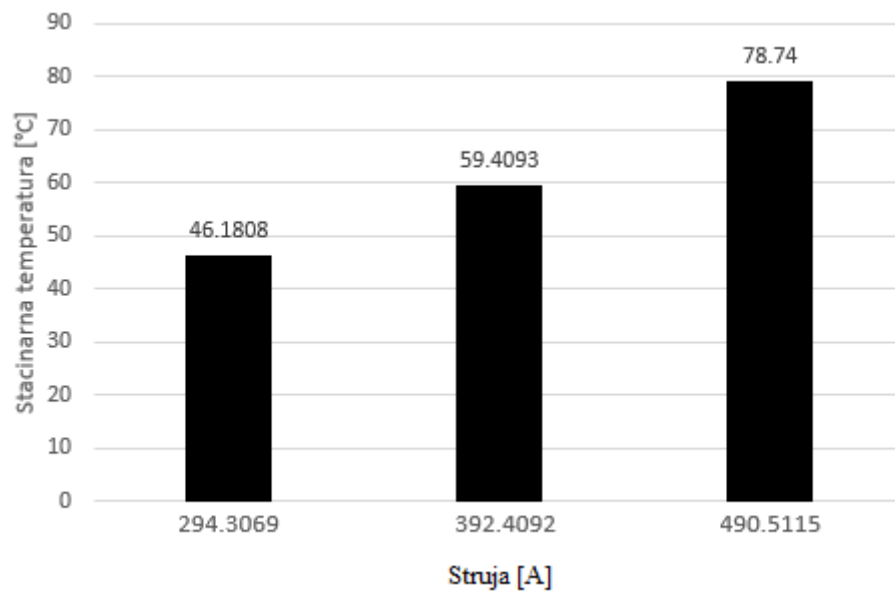
Na slici 5.1. vidimo kolika je stacionarna temperatura za određeni električni vod. Kako nam je vidljivo da za različite vodove su različiti iznosi stacionarne temperature. Prvi stupac pokazuje stacionarnu temperaturu za alučel vod nazivnog presjeka 120/20 mm<sup>2</sup>, drugi stupac prikazuje stacionarnu temperaturu za alučel vod nazivnog presjeka 240/40 mm<sup>2</sup>, dok treći pokazuje stacionarnu temperaturu za alučel vod nazivnog presjeka 360/57 mm<sup>2</sup>. Te temperature su iznosa koji je bio i očekivan. Na sljedećim slikama vidljivo je kako se s promjenom opterećenja mijenja i temperatura. Kada su ispitni vodiči pod 75% nominalne struje vidimo kako vodiči imaju manji iznos stacionarne temperature, nego kad su bili pod nominalnim opterećenjem. Isto tako je vidljivo iz sljedećih slika kako svi vodiči imaju veću temperaturu kad je iznos struje za 25% veći nego što je nominalan iznos.



Slika 5.2. Iznosi stacionarne temperature vodiča nazivnog presjeka 360/57 mm<sup>2</sup> na različitim strujnim opterećenjima



Slika 5.3. Iznos stacionarne temperature vodiča nazivnog presjeka 240/40 mm<sup>2</sup> na različitim strujnim opterećenjima



Slika 5.4. Iznos stacionarne temperature vodiča nazivnog presjeka 120/20 mm<sup>2</sup> na različitim strujnim opterećenjima

Iz gore navedeni slika je vidljivo kako vodovi manjeg presjeka imaju veći iznos razlike u temperaturi između 75% strujnog opterećenja (drugi stupac) i 125% strujnog opterećenja (treći stupac). Razlog tome može biti u samoj količini materijala koji se zagrijava prilikom protjecanja struje kroz vodič.

## 6. ZAKLJUČAK

Iz gore svega navedenog možemo zaključiti kako je stacionarna temperatura voda bitan podatak koji govori o temperaturi voda pri nekim uvjetima. U ovom radu su se koristili idealni uvjeti za izračun, no ovaj postupak izračuna je značajan i kad uvjeti nisu idealni, odnosno kad je atmosfera u kojoj se vod nalazi je industrijska, kad imamo nepovoljne vremenske uvijete. U toj situaciji se možemo poslužiti sa standardom IEEE Std 738 kod kojeg je izračun detaljnije opisan nego u ovom radu. Vidljivo je kako s porastom nazivnog presjeka, samim tim i materijala koji je u vodiču, smanjuje se porast temperature ovisno o iznosu struje. U stacionarnom stanju, kod vodiča većih presjeka, temperature su nešto većeg iznosa nego što je kod vodiča manjih presjeka iz razloga što hlađenje vodiča pomoću vjetra i okolišne temperature nema toliki utjecaj na sam vod. Metoda izračuna stacionarne temperature je složena iz razloga što se koristi Mullerova metoda iteracija koja iziskuje mnogo vremena, ako bi se radila rukom, no u današnjem svijetu, kad su kućna računala dovoljno snažna za pokretanje simulacijskih programa kao što je MATLAB ili sličnih programa koji su pisani u nekom drugom programskom jeziku, moguće je metoda napisati u nekom od programskih jezika i računalo će odraditi posao izračuna umjesto nas. Podaci koji su potrebni za izračun stacionarne temperature prijenosnog vodiča se mogu naći u bilo kojem katalogu alučel vodova, a i izračun potrebnih varijabli, potrebnih za krajnji izračun stacionarne temperature, nije problem izračunati, zbog jednostavnosti izračuna.



## SAŽETAK

Cilj ovog završnog rada je bio prikazati izračun stacionarne temperature prijenosnog voda. Za izračun se koristio IEEE Std 738 standard. U radu se nalaze sve potrebne jednadžbe za izračun potrebnih podataka. Isto tako u radu se nalazi i objašnjenje varijabli koje se koriste za izračun kao i njihov iznos koji se koristio u izračunu. Za izračun stacionarne temperature je koristila metoda koja je navedena u IEEE Std 738 standardu, odnosno Mullerova metoda iteracije. Pomoću nje su riješena šest slučajeva, tri različita voda pri nominalnim strujnim opterećenjem i njihova usporedba, kao i tri voda na različitim opterećenja kako bi se pokazalo kakav struja ima utjecaj na stacionarnu temperaturu voda. Rješenja su prikazana grafički uz iznose stacionarne temperature iznad grafova.

Ključne riječi: stacionarna temperatura, izračun, Mullerova metoda, konveksijsko hlađenje, radijacijsko hlađenje, solarno grijanje.

## ABSTRACT

The aim of this final paper was to present calculation of steady-state temperature of conductor. The IEEE Std 738 was used for the calculation. The paper contains all the necessary equations to calculate the required data. Also in the paper there is an explanation of the variables that is used for calculation as well as their amount. The method specified in IEEE Std 738 standard is the Muller iteration method, that was used to calculate the steady-state temperature. It solved six cases, three different conductor at nominal current load, as well as three conductors on three different loads to show impact of current that has on the steady state temperature of conductor. The solutions is shown graphically with amounts of steady state temperature above the graphs.

Key words: steady state temperature, calculation, Mullers iteration method, convection heat loss rate, radiated heat loss rate, rate of solar heat gain.

## LITERATURA:

- [1] Tehnička enciklopedija, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, Zagreb, 1963.
- [2] M. Špes, L. Beňa, M. Kostelec, M. Márton, Determining the current capacity of transmission lines based on ambient conditions, Journal of energy technology, sv. 10, str. 61-69, izdanje 2.6.2017, [https://www.fe.um.si/images/jet/05\\_poglavje\\_-\\_JET\\_junij\\_2017.pdf](https://www.fe.um.si/images/jet/05_poglavje_-_JET_junij_2017.pdf).
- [3] R. Yao, K. Sun, F. Liu, S. Mei, Efficient simulation of temperature evolution of overhead transmission lines based on analytical solution and NWP, IEEE transaction on power delivery, br. 4, sv. 33, str. 1576-1588, kolovoz 2018, <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1702/1702.07284.pdf>, [22.9. 2020.]
- [4] I. Petrović, H. Glavaš, Ž. Hederić, Current – temperature analysis of the ampacity of overhead conductor depending on applied standards, Journal od energy technology, sv. 7, str 11 – 28, izdanje 2.5.2014, <https://bib.irb.hr/datoteka/716853.7-2-1-Final.pdf>
- [5] IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors," u IEEE Std 738-2012 (Revizija od IEEE Std 738-2006 – uključuje IEEE Std 738-2012 Cor 1-2013), sv., br., str.1-72, 23. 12. 2013.
- [6] Užad za nadzemne vodove, ELKA, Zagreb, 2005, <http://elka.hr/wp-content/uploads/2017/03/Nadzemni-vodi%C4%8Di-Ropes-for-overhead-lines.pdf> [21.9.2020]
- [7] Aluminijsko-čelično uže za nadzemni vod, Tim Kabel, Sesvete, 2020, [http://www.tim-kabel.hr/images/stories/katalog/datasheetHRV/0602\\_ACSR.pdf](http://www.tim-kabel.hr/images/stories/katalog/datasheetHRV/0602_ACSR.pdf) [21.9. 2020.]
- [8] V.T. Morgan, The thermal rating of overhead-line conductor part I. The steady-state thermal model, Sydney, 1981.
- [9] Ž. Voršič, R. Maruša, J. Pihler, New method for calculating the heating of the conductor, Basel, 2019. <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/14/2769/pdf-vor> [22.9.2020]

## **ŽIVOTOPIS**

Marin Požgaj je rođen 12. svibnja 1997 godine u Zagrebu. Živi u mjestu Brezine, u općini Farkaševac, nedaleko od Vrbovca. Završio je osnovnu školu „Grigor Vitez“ u Svetom Ivanu Žabnu s vrlo dobrim uspjehom te srednju školu Tehnička škola Bjelovar, smjer elektrotehničar. Nakon završetka srednje škole upisao je preddiploski sveučilišni studij elektrotehnike na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku. Trenutno je student treće godine preddiplomskog sveučilišnog studija, smjera elektroenergetike. U slobodno vrijeme bavi se dobrovoljnim vatrogastvom u DVD Crikvena, gdje s muškom „A“ ekipom ostvario zapažene rezultate na vatrogasnim natjecanjima. Za vrijeme osnovnoškolskog obrazovanja pohađao je natjecanja na županijskoj razini iz fizike i geografije.