

Izračun dinamičkog opterećenja vodiča dalekovoda u stvarnim uvjetima

Šekerija, Karlo

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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:200:122640>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-19**

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 DINAMIČKOG OPTEREĆENJA VODIČA
DALEKOVODA U STVARNIM UVJETIMA**

Diplomski rad

Karlo Šekerija

Osijek, 2021.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. PREGLED PODRUČJA RADA	3
3. IEEE STANDARD ZA IZRAČUN STRUJNO – TEMPERATURNOG ODNOSA NEIZOLIRANIH NADZEMNIH VODIČA.....	5
3.1. Slučaj stacionarnog stanja	7
3.2. Prijelazni slučaj.....	8
3.3. Vremenski promjenjivi proračuni vremena i struje.....	10
3.4. Dinamički proračun strujno – vremenske karakteristike.....	11
3.4.1. Gubitak topline prilikom konvekcije	11
3.4.2. Prisilna konvekcija.....	12
3.4.3. Prirodna konvekcija	13
3.4.4. Gubitak topline zračenjem.....	13
3.4.5. Solarno upijanje vodiča	14
3.5. Električni otpor neizoliranog nadzemnog vodiča	17
3.6. Jednadžbe svojstva zraka.....	17
4. IZRAČUN DINAMIČKOG OPTEREĆENJA VODIČA DALEKOVODA	19
4.1. Ulazni podaci dalekovoda.....	19
4.1.1. Udaljenost i kut nagiba voda.....	19
4.1.2. Parametri ACSR vodiča	22
4.1.3. Snaga zračenja, solarno upijanje i temperatura vodiča	23
4.2. Ulazni meteorološki podaci	23
4.2.1. Najveća visina vodiča.....	23
4.2.2. Brzina vjetra, temperatura zraka i geografska širina	24
4.2.3. Kut smjera vjetra u odnosu na dalekovod.....	28
4.3. Postupak proračuna.....	29
4.3.1. Mjerna postaja Bilogora.....	30
4.3.2. Mjerna postaja Daruvar.....	34
4.3.3. Mjerna postaja Gorice.....	35
4.3.4. Najveća dopuštena struja	37
5. ZAKLJUČAK.....	41
LITERATURA.....	42
SAŽETAK	44

ABSTRACT	44
ŽIVOTOPIS.....	45

1. UVOD

Od samog početka proizvodnje električne energije postojala je potreba za njenim prijenosom. Kako u prošlosti, tako se i danas vodovima i dalekovodima električna energija prenosi do potrošača tj. krajnjih korisnika. U početku su se za prijenos električne energije koristili bakreni vodiči koji su se zbog svoje cijene počeli sve manje koristiti. Napretkom tehnologije napredovao je i elektroenergetski sustav zbog kojeg je došlo i do razvoja vodiča odnosno dalekovoda. Tako da se danas koriste vodiči napravljeni od više različitih materijala (npr. alučel vodiči).

Dalekovod je nadzemni vodič koji kao i podzemni vodič – kabel čini prijenosnu i distribucijsku mrežu. Upotreba dalekovoda je puno veća, ponajviše iz razloga što su jeftiniji nego podzemni vodiči. Uz to što su jeftiniji, također su lakši za održavanje. Kabeli se zbog toga upotrebljavaju samo na neophodnim mjestima kao što su otoci do kojih je također potrebno dovesti električnu energiju. Protjecanjem električne energije kroz vodič, zbog njegove električne otpornosti, dio prenesene energije pretvara se u toplinu. Maksimalna energija prijenosa, tj. struja koja protječe vodom, ograničena je i dozvoljenom maksimalnom temperaturom ugrijavanja samog vodiča. Konvencionalna metoda šticećenja dalekovoda od preopterećenja je statičkom nadstrujnom zaštitom, ali na ukupnu temperaturu dalekovoda utječu i drugi parametri kao što su meteorološki uvjeti.

Autori literature [1] opisuju važnost dinamičkog temperaturnog monitoringa te kako je za što bolji prijenos energije i najbolje moguće iskorištavanje prijenosnog kapaciteta potrebno poznavanje klimatskih elemenata. Literatura [2] navodi kako dinamičko opterećenje dalekovoda postaje važan alat za povećanje kvalitete prijenosa struje. Literatura [3] opisuje važnost radne temperature za što bolji prijenos električne energije dalekovodima. Autori u literaturi [4] razmatraju primjenu različitih standarda za što kvalitetniji prijenos struje dalekovodima s obzirom na zakonodavstvo Republike Hrvatske. Literatura [5] je od velikog značaja za ovaj diplomski rad iz razloga što je u njoj detaljno opisan i prikazan IEEE standard za izračun strujno – temperaturnog odnosa koji je i glavna tema ovog rada.

Zadatak ovog diplomskog rada je izračun dinamičkog opterećenja dalekovoda u realnim vremenskim uvjetima pritom uzimajući u obzir uz meteorološke uvjete i podatke proizvođača koji znatno utječu u dobivanju realnih i kvalitetnih rezultata. U ovome radu su opisane različite literature te njihova stajališta oko navedene teme. S obzirom na literaturu, u njemu je detaljno opisan postupak izračuna dopuštene struje. Nakon toga napravljen je izračun struje za zamišljeni neizolirani nadzemni vodič između dvije trafostanice na području Republike Hrvatske sa realnim ulaznim podacima potrebnim za proračun.

Rad je rađen prema IEEE standardu za izračun strujno – temperaturnog odnosa neizoliranog dalekovoda. Rad se sastoji od pet poglavlja. U drugom poglavlju opisano je područje rada ovog diplomskog rada. U njemu je navedena i opisana literatura koja se bavi prijenosom struje dalekovodom te kontrolom rada istih. Treće poglavlje opisuje spomenuti IEEE standard te sva njegova moguća stanja. Isto tako, u trećem poglavlju su opisani svi potrebni ulazni podaci i parametri potrebni za rješavanje strujno – temperaturnog standarda. Četvrto poglavlje prikazuje postupak rješavanja standarda. Prva dva potpoglavlja prikazuju ulazne podatke dalekovoda i ulazne meteorološke podatke potrebne za izračun. Treće potpoglavlje prikazuje detaljno objašnjen postupak izračuna za sve referentne mjerne postaje. Peto poglavlje koje je ujedno i zadnje, opisuje te daje osvrt na rezultate dobivene proračunom. Uz zaključno razmatranje, u njemu je uspoređen i spomenuti IEEE standard sa nadstrujnom zaštitom te su radi toga u njemu napisane prednosti i nedostaci istog.

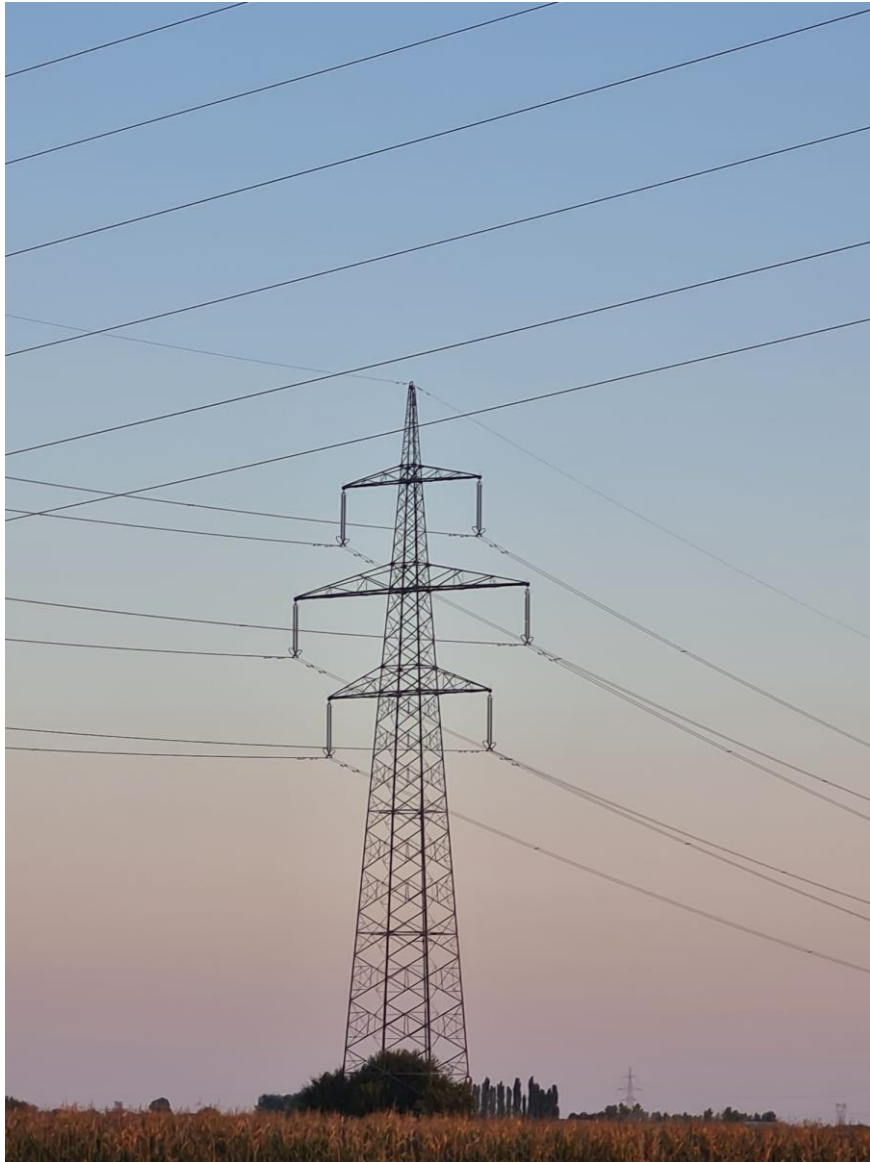
2. PREGLED PODRUČJA RADA

Dinamički temperaturni monitoring nadzemnih vodova u prijenosnom sustavu je pokretač velikog razvoja naprednih mreža. Kako se u literaturi [1] spominje: „za maksimalno iskorištavanje kapaciteta prijenosa i za siguran prijenos električne energije najvažnije je poznavanje stvarne temperature vodiča i klimatskih elemenata“, kao što su sunčevo zračenje, sama temperatura zraka te smjer vjetera i njegova brzina. Oni direktno utječu na status sigurnosnih visina te sami provjes. Također, ista ta literatura [1] želi ukazati kako je već s gore spomenutim monitoringom moguće „sigurno povećati prijenos električne energije na dalekovodima“. Dinamičko opterećenje vodiča dalekovoda, kako literatura [2] navodi, postaje jedan od važnijih alata koji će operatorima prijenosa u budućnosti omogućavati povećanje opterećenja dalekovoda s obzirom na zahtjeve tržišta energije ili samoga sustava. U literaturi [2] se „detaljnije raspravlja o učinku dinamičkog opterećenja na različitim vrstama releja na daljinu.“ Dalekovodi su se počeli suočavati s novim ekonomskim te tehničkim izazovima. Da bi se ovi izazovi riješili, autori literature [3] navode kako je „rješenje u novim i naprednim metodama“. Ona objašnjava kako je „opterećenje dalekovoda ograničeno s dopuštenom radnom temperaturom, a upravo ta radna temperatura ne smije prelaziti dopuštenu radnu temperaturu jer vodiči dalekovoda imaju svoju mehaničku granicu.“ Stoga je cilj ovoga izvora [3] bilo „predložiti prikladne metode za proračun radne temperature nadzemnog dalekovoda vodiča u stvarnim uvjetima kao što su korona, strujno opterećenje te svi vanjski atmosferski utjecaji.“ Ista ova literatura [3] je predložila metodu izračuna radne temperature u stvarnim vremenskim uvjetima uz pomoć diferencijalne jednadžbe. Autori literature [4] navode kako je „kapacitet prijenosa nadzemnih vodova obično određen ograničenjima temperature vodiča, koju karakterizira njegova amplituda“. Ova literatura [4] je rad hrvatskih profesora, stoga se u njoj „razmatra primjena različitih normi te usporedba rezultata za vrijednost prijenosnog kapaciteta, s posebnim osvrtom na hrvatsko zakonodavstvo“. U literaturi [5] prikazan je standard za izračun odnosa između struje i temperature s obzirom na atmosferske uvjete, te će se upravo on koristiti u radu za izračun dinamičkih opterećenja vodiča dalekovoda. U njoj [5] je opisano što sve može utjecati na temperaturu vodiča.

Također su u istoj toj literaturi [5] prikazane jednadžbe koje možemo iskoristiti kada želimo izračunati električnu struju s obzirom na temperaturu vodiča i obrnuto. Spomenuti standard je vrlo općenit, a može se pojavljivati i u više različitih slučajeva kao što su slučaj u stacionarnom stanju i prijelazni slučaj. Ti slučajevi, kako ih riješiti te stvari na koje treba pripaziti pri rješavanju će biti opširnije opisani u ostatku rada. Da je sama potreba za većim prijenosom kapaciteta vidljiva navedeno je u literaturi [6]. Poznato je kako postoje određena građevinska ograničenja koja sprječavaju izgradnju novih dalekovoda čime bi se povećao prijenosni kapacitet. Gore je već spomenuto kako su temperaturna ograničenja vodova jedan od problema koji sprječavaju veći prijenos kapaciteta. Stoga je literatura [6] predstavila strategiju pametnog prijenosa energije pri kojem bi došlo do većeg prijenosnog kapaciteta tako što bi se „izračunao sadašnji i budući prijenosni kapacitet vodova na osnovi stvarnih vremenskih prilika i prognoza nego na osnovi statičkih i konzervativnim fiksnim vrijednostima.“ U ovoj se literaturi [6] kao i u literaturi [3], spominje i istražuje moguća diferencijalna jednadžba kojom se može riješiti prijenos topline. Da se uz povećanje potražnje električne energije, povećava i potražnja za električnom energijom iz obnovljivih izvora kao što je vjetar navodi i autor literature [7]. Literatura [7] je rad u kojem istraživački tim ispituje „mogućnosti povećanja dozvoljene struje na nadzemnim vodovima kako bi se mogla povezati veća snaga s postojećom mrežom“. Koristili su se podacima izmjerenima na području južne Švedske kao što su temperatura okoline, brzina vjetra, sunčeva energija itd. Rezultati provedenih mjerenja u literaturi [7] pokazali su „kako postoji velika granica opterećenja koja bi se mogla iskoristiti za povećanje potrebne maksimalne struje.“ Iz gore spomenutih literatura se može vidjeti kako je dinamičko opterećenje vodiča dalekovoda jedan od većih problema s kojima se struka suočava. Upravo će te iste literature biti važan temelj za pisanje ovog diplomskog rada u kojem će biti potrebno izvršiti proračun dozvoljenog strujnog opterećenja u različitim vremenskim situacijama.

3. IEEE STANDARD ZA IZRAČUN STRUJNO – TEMPERATURNOG ODNOSA NEIZOLIRANIH NADZEMNIH VODIČA

U literaturi [5] IEEE radna skupina koja se bavila standardom za izračun struja neizoliranih nadzemnih vodiča, provela je istraživanja različitih načina i metoda koje su se koristile za izračunavanje strujno – temperaturne ovisnosti. Slika 3.1. prikazuje jedan 110 kV dalekovod.



Slika 3.1. 110 kV dalekovod

Na temperaturu vodiča prema literaturi [4] utječu: „promjer vodiča, površinsko stanje vodiča, svojstvo materijala vodiča (prvenstveno električna vodljivost, vremenski uvjeti (brzina i smjer vjetra, temperatura zraka te solarno grijanje) i električna struja vodiča.“

Promjer i svojstva materijala vodiča su fizikalna specifična svojstva koja inače ostaju nepromijenjena tijekom životnog vijeka voda. Površinsko stanje vodiča je promjenjivo te će se ono kao najudaljeniji sloj vodiča mijenjati tijekom vremena.

Vremenski uvjeti su najpromjenjiviji jer oni variraju ovisno o godišnjem dobu, satu u danu te najbitnije o smjeru te jačini vjetra. Literatura [5] zaključuje kako ovaj „IEEE standard potvrđuje da goli nadzemni vodiči možda nisu izotermni pod vrlo visokom strujom čak i u stacionarnom stanju.“

Jednadžbe za izračun električne struje s obzirom na temperaturu vodiča služe za izračun najveće trajno dopuštene struje vodiča uz uvažavanje najveće temperature koju proizvođač daje.

Autori literature [4] naglašavaju kako je „numerički toplinski model prikazan u ovom standardu vrlo općenit te se on može primjenjivati u više različitih slučajeva“ :

- a) Slučaj stacionarnog stanja – „vremenski uvjeti, električna struja te temperatura vodiča su konstantni u svakom trenutku“,
- b) Prijelazni slučaj – „vremenski uvjeti su stalni, temperatura vodiča se smanjuje ili povećava na „gotovo“ eksponencijalan način od početne temperature sve dok se na kraju ne dosegne nova konačna temperatura, a električna struja se podvrgava promijeni koraka od početne do konačne vrijednosti“ i
- c) Dinamični slučaj – „temperatura vodiča izračunava se za električnu struju te vremenski uvjeti koji se s vremenom mijenjaju na bilo koji način“.

Literatura [5] kazuje kako „ovaj standard uključuje potpuni opis primjenjive numeričke matematičke metode te označava varijable koje će se koristiti za izračun stacionarnih i prijelaznih temperatura vodiča kao i toplinske procjene vodiča“. Ipak, „zbog velike razlike vremenskih uvjeta te radne okoline za koje temperatura vodiča i/ili toplinske procjene moraju biti izračunati, ovaj standard ne preuzima obvezu navođenja stvarnih temperaturno – strujnih odnosa za specifične vodiče ili vremenske uvjete“.

3.1. Slučaj stacionarnog stanja

Ukoliko su poznati temperatura površine vodiča (T_s) i parametri stacionarnog stanja (temperatura okoline – T_{avg} , brzina strujanja zraka – V_w itd.), toplinski gubici uslijed zračenja (q_r) i gubici topline konvekcijom (q_c), otpornost vodiča ($R(T_{avg})$) te solarno upijanje (q_s) se mogu izračunati formulama za ravnotežu topline stacionarnog stanja:

$$q_c + q_r = q_s + I^2 \cdot R(T_{avg}) \quad (3-1a)$$

$$I = \sqrt{\frac{q_c + q_r - q_s}{R(T_{avg})}} \quad (3-1b)$$

i ravnotežu topline u ne-stacionarnom stanju:

$$q_c + q_r + m \cdot C_p \cdot \frac{dT_{avg}}{dt} = q_s + I^2 \cdot R(T_{avg}) \quad (3-2a)$$

$$\frac{dT_{avg}}{dt} = \frac{1}{m \cdot C_p} [R(T_{avg}) \cdot I^2 + q_s - q_c - q_r] \quad (3-2b)$$

Literatura [5] navodi kako se „odgovarajuća struja vodiča (I) koja je proizvela temperaturu vodiča pod određenim vremenskim uvjetima može se pronaći u jednadžbi (3-1b)“. Isto tako navodi kako se spomenuti „izračun može koristiti za izračun pri bilo kojoj temperaturi vodiča i bilo kojem vremenskom uvjetu za koje su modeli prijenosa topline adekvatni, dok se maksimalna dopuštena temperatura vodiča (npr. 95°C) i „konzervativni“ vremenski uvjeti (npr. 0,6 m/s okomite brzine vjetra, jako sunce i ljetna temperatura zraka od 40°C) češće koriste za izračun toplinske procjene stacionarnog stanja vodiča“.

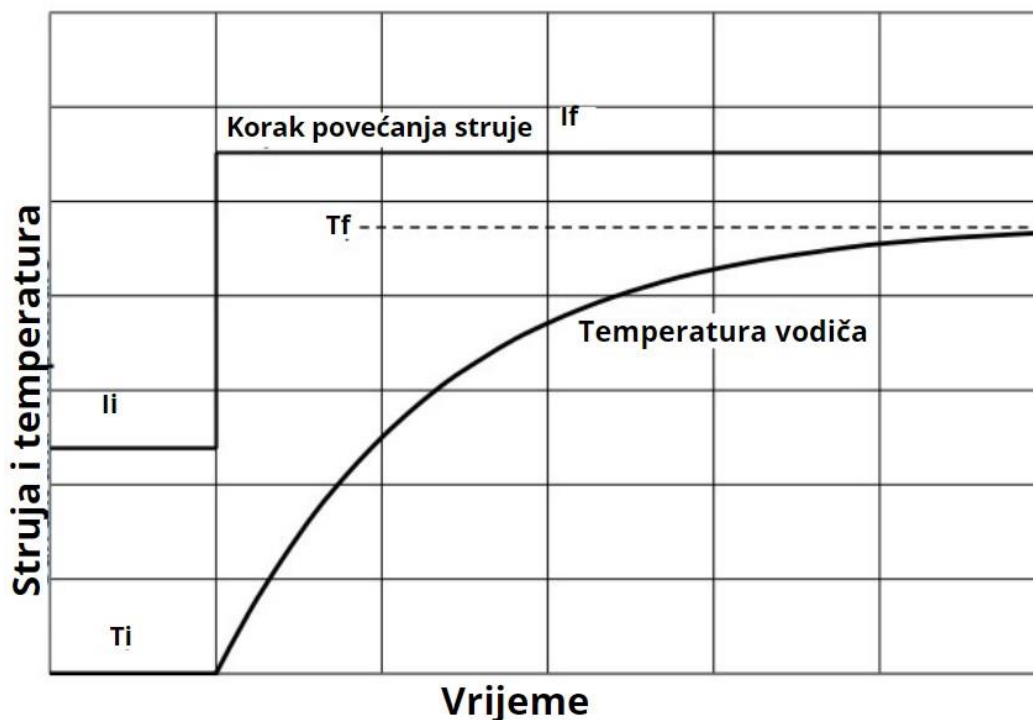
Uvjeti prijenosa topline i otpornost vodiča su prema literaturi [5] „funkcija temperature vodiča dok dobitak topline sunčevim zračenjem u vodič nije“. Ako se umjesto specifične temperature (kao prema gore navedenim uvjetima) izračunava temperatura vodiča, onda se prema literaturi [5] „jednadžba toplinske ravnoteže mora riješiti za temperaturu vodiča prema strujnim uvjetima i vremenskim varijablama postupkom numeričke iteracije (odnosno procjenom temperature vodiča te računanjem struje), čak i ako se pretpostavlja da je vodič u stacionarnom stanju“.

Primjenom gore navedene numeričke iteracije, kako je i opisano, izbjegava se složenost i vremenska aproksimacija potrebna za linearizaciju zračenja te gubitke strujanja topline. Autori literature [5] navode kako je „primjenom odgovarajućih stacionarnih vremenskih uvjeta postupak jednostavan“:

1. „Izračunava se dobitak topline sunčevim zračenjem u vodič“,
2. „Pretpostavlja se probna temperatura vodiča“,
3. „Izračunava se otpornost vodiča za pretpostavljenu probnu temperaturu“,
4. „Izračunavaju se toplinski gubici i konvekcija u kombinaciji s vremenskim uvjetima koji su pretpostavljeni“,
5. „Struja vodiča se izračunava prema formuli (3-1b)“,
6. „Izračunata struja (iz prošlog koraka) se uspoređuje sa izmjerenom strujom vodiča“
i
7. „Probna temperatura vodiča se smanjuje ili povećava sve dok izračunata struja ne bude jednaka probnoj struji uz toleranciju korisnika“.

3.2. Prijelazni slučaj

Temperatura golog nadzemnog voda se, kako literatura [5] objašnjava: „konstantno mijenja kao odgovor promjenama električne struje i vremenskih uvjeta (T_{avg} , Q_s , V_w , Φ)“. Gdje je Φ kut između vjetra i osi vodiča. Ista ta literatura [5] „pretpostavlja da će vremenski parametri ostati konstantni te da će svaka promjena električne struje biti ograničena na promjenu koraka od početne struje I_i pa do konačne struje I_f s trenutkom $t=0$ “. Slika 3.2. [5] prikazuje gore opisan, prijelazni slučaj.



Slika 3.2. Promjena koraka struje vodiča i odgovarajuća promjena temperature vodiča [5]

Literatura [5] objašnjava kako se „neposredno prije promjene koraka struje ($t = 0^-$) pretpostavlja da je vodič u toplinskoj ravnoteži, odnosno da je zbroj generirane topline nastalo Jouleovim grijanjem, $I_f^2 R(T_{avg})$, i sunčevo zagrijavanje jednako gubitku topline zbog zračenja i konvekcije“.

Isto tako navodi kako „nakon promjene koraka struje ($t = 0^+$), temperatura vodiča ostaje nepromijenjena“ ali dolazi do promijene, odnosno povećanja topline koja je nastala spomenutim Jouleovim grijanjem. Literatura [5] objašnjava kako se toplina „koja je rezultat toplinske neravnoteže u vremenu $t = 0^+$, ne može odmah prenijeti dalje ili zračiti stoga se ona zadržava u vodiču“. Samim time dolazimo do zaključka kako „temperatura vodiča počinje rasti brzinom“ koja je opisana jednadžbom (3-2b).

U literaturi [5] dalje stoji kako „nakon nekog vremena, Δt , temperatura vodiča bude povećana promjenom temperature ΔT_{avg} . Povećana temperatura vodiča uzrokuje veće gubitke topline prilikom strujanja topline i zračenja ali uzrokuje povećanje stvaranje Jouleovog zagrijavanja zbog povećane otpornosti vodiča.

Od Δt do $2\Delta t$, temperatura vodiča nastavlja rasti nižom brzinom te se nakon velikog broja takvih vremenskih intervala, temperatura vodiča približava konačnoj temperaturi stacionarnog stanja (T_f).“

Odgovarajuće povećanje temperature vodiča se može izračunati tijekom svakog vremenskog intervala, koristeći gore navedene formule. U istoj literaturi [5] se navodi da je „stopa promjene temperature golog nadzemnog voda približno eksponencijalna, s konstantom toplinskog vremena od 5 min do 20 min za tipičan prijenos vodiča gdje najdulja vremenska konstanta odgovara najvećim vodovima.“ Stoga, kada pogledamo Sliku 3.1. možemo vidjeti kako u razdoblju od 15 min dolazi do povećanja temperature vodiča do njegove konačne vrijednosti.

Prijelazna toplinska granica se prema [5] „obično izračunava ponavljanjem prethodnih izračuna $T_{avg}(t)$ tijekom raspona vrijednosti posljednje struje nakon promjene koraka I_f , te se zatim odabire I_f vrijednost koja uzrokuje maksimum temperature vodiča“.

Struja kvara prijelaznog slučaja se izračunava na isti način kao što se računa i prijelazna temperatura vodiča koja je objašnjena gore. Kao jedinu razliku u računanju literatura [5] navodi kako je „postupno povećanje struje prilično veliko (>10 kA), odgovarajuće vrijeme do postizanja najveće dopuštene temperature je obično kratko (< 1 s), a najveće postignute temperature mogu se približiti točki taljenja aluminijske ili bakrene.“ U osnovi, ovi izračuni su adijabatski. Gubitak topline zračenjem i njenim prijenosom u tako kratkom vremenu je neznatan u usporedbi sa pohranjenom toplinom u vodiču.

3.3. Vremenski promjenjivi proračuni vremena i struje

Poznato je kako se temperatura vodiča konstantno mijenja kao odgovor promjenama vremena i struje. Ovom normom je opisan toplinski model koji se može primijeniti upravo na ovaj slučaj. Da bi to uspjelo, literatura [5] navodi kako „korisnik mora provesti niz izračuna, pri čemu se svaki primjenjuje u kratkom vremenskom razdoblju (kao i za prijelazni slučaj) tijekom kojeg se pretpostavlja da su struja i vremenski parametri (npr. brzina i smjer vjetera) konstantni i jednaki njihovim vrijednostima na samom početku intervala.“

U nastavku je objašnjeno da se „tijekom vremenskog intervala Δt , promjena temperature vodiča ΔT_{avg} računa jednadžbom ne stabilizirane toplinske bilance“ koja je na samome početku prikazana: (3-2a) i (3-2b). Temperatura vodiča na kraju jednog vremenskog intervala jednaka je zbroju početne temperature i promjene u temperaturi. Nizom ovakvih vremenskih koraka se temperatura izračunava na kraju svakog intervala.

Temperatura vodiča se tijekom vremena mijenja s promjenom linijske struje te vremenskih uvjeta čime dolazi do njene aproksimacije. Kada je riječ o izračunu u prijelaznom slučaju, literatura [5] navodi kako „točnost dobivenog izračuna dinamičke temperature zahtijeva da odabrani vremenski korak bude dovoljno malen u odnosu na konstantu toplinskog vremena.“

3.4. Dinamički proračun strujno – vremenske karakteristike

Formule koje će se koristiti za izračun odnosa prema IEEE standardu su već gore spomenute, a to su (3-1a) i (3-1b). Oko njih dvije će se temeljiti cijeli izračun standarda. Formule (3-2a) i (3-2b) se neće koristiti prilikom izračuna.

Iako su neke gore već objašnjene, sve oznake, veličine i varijable spomenute u formulama i jednadžbama potrebnim za izračun strujno – meteorološkog odnosa će biti ispod istih objašnjene. Struja se računa uz uvažavanje maksimalne temperature te promjenjivog vremena, odnosno meteoroloških prilika.

3.4.1. Gubitak topline prilikom konvekcije

Postoje dvije vrste konvekcijskog gubitka topline: prirodni i prisilni gubitak topline. Ovaj standard koristi formule za konvekciju koju preporučuje autor literature [8]. Prirodna konvekcija je besplatna konvekcija koja se događa u uvjetima mirnog zraka gdje se, kako literatura [5] objašnjava, „u kontinuiranim procesima, hladan zrak oko vrućeg vodiča zagrijava i diže te se zamjenjuje sa hladnim okolnim zrakom“. Ista ta literatura objašnjava kako se „prisilna konvekcija događa kada zrak koji puše prolazi pokraj vodiča, nosi grijani zrak daleko“. Prisilna konvekcija ima veliku snagu hlađenja u usporedbi s prirodnom.

Veličina gubitka topline prilikom konvekcije je funkcija bezdimenzijskog broja poznatog još kao i Reynoldsov broj koji je naveden jednadžbom (3-3):

$$N_{Re} = \frac{D_0 \cdot \vartheta_f \cdot V_w}{\mu_f} \quad [-] \quad (3-3)$$

Gore napisana jednadžba pokazuje kako je Reynoldsov broj proporcionalan brzini vjetra V_w i promjeru vodiča D_0 . Prema literaturi [5] „gustoća zraka ϑ_f i dinamička viskoznost zraka μ_f su izračunati na srednjoj temperaturi rubnog sloja vodiča“.

Autor literature [8] za niske brzine vjetra preporučuje „izračunavanje i prirodnog i prisilnog gubitka topline prilikom konvekcije te korištenje veće od ove dvije vrijednosti“. Upravo ta konvekcija je usvojena ovim standardom. Jednadžbe prirodnih i prisilnih gubitaka topline opisane u ovom djelu standarda temeljene su na velikim i opsežnim mjerenjima „tunela vjetra“ koje je istraživao autor literature [8].

3.4.2. Prisilna konvekcija

Jednadžba (3-4a) vrijedi za uvjete pri niskim vjetrovima, ali prilikom visokih brzina vjetra podcjenjuje prisilnu konvekciju. Za razliku od jednadžbe (3-4a), jednadžba (3-4b) vrijedi za uvjete pri visokim brzinama vjetra, ali prilikom niskih brzina vjetra podcjenjuje prisilnu konvekciju. Ovaj standard, pri bilo kojoj temperaturi, preporučuje izračun konveksijskih gubitaka topline s obje jednadžbe te zatim korištenje većeg dobivenog rezultata.

$$q_{c1} = K_{angle} \cdot [1,01 + 1,35 \cdot N_{Re}^{0,52}] \cdot k_f \cdot (T_s - T_{avg}) \quad [W/m] \quad (3-4a)$$

$$q_{c2} = K_{angle} \cdot 0,754 \cdot N_{Re}^{0,6} \cdot k_f \cdot (T_s - T_{avg}) \quad [W/m] \quad (3-4b)$$

Prema literaturi [9], jednadžbe za gubitak topline prisilnom konvekcijom valjane su u velikom rasponu varijabli, a one su prikazane tablicom Tab.3.1.:

Tab.3.1. Raspon varijabli za jednadžbu gubitka topline [5]

Varijabla	SI jedinica
Promjer	0,01 – 150 mm
Brzina vjetra	0 – 18,9 m/s
Temperatura zraka	15,6 – 260 °C
Temperatura vodiča	21 – 1004 °C
Tlak zraka	40,5 – 405 kPa

Kako autori literature [9] navode: „širok raspon primjenjivosti je daleko veći od raspona nazivnih parametara koji se upotrebljavaju pri linijskom projektiranju“.

Brzina gubitka topline konvekcijom izračunata gore spomenutim jednadžbama (3-4a) i (3-4b), mora se množiti s faktorom smjera vjetra - K_{angle} . Gdje je kut Φ , kut između smjera vjetra i osi vodiča (3-5).

$$K_{angle} = 1,194 - \cos(\Phi) + 0,194 \cdot \cos(2\Phi) + 0,368 \cdot \sin(2\Phi) \quad (3-5)$$

3.4.3. Prirodna konvekcija

Pri nultoj brzini vjetra, tj brzini vjetra od 0 m/s, dolazi do konvekcije te je pri tome brzina gubitka topline:

$$q_{cn} = 3,645 \cdot \vartheta_f^{0,5} \cdot D_0^{0,75} \cdot (T_s - T_{avg})^{1,25} \quad [W/m] \quad (3-6)$$

gdje je D_0 vanjski promjer vodiča. Iako se prema literaturi [10] tvrdilo „da pri niskim brzinama vjetra stopu hlađenja treba izračunati primjenom vektorskog zbroja brzine vjetra i „prirodne“ brzine vjetra“, preporučuje se da se samo veće stope prirodnog i prisilnog konveksijskog gubitka topline koriste pri malim brzinama vjetra.

Kako za prirodnu tako i za prisilnu konvekciju, viskoznost zraka μ_f , gustoća zraka ϑ_f te koeficijent toplinske provodljivosti zraka k_f , koji će kasnije biti objašnjeni, izračunati su pri temperaturi rubnog sloja, T_{film} :

$$T_{film} = \frac{T_s + T_{avg}}{2} \quad [^{\circ}C] \quad (3-7)$$

3.4.4. Gubitak topline zračenjem

Do prijenosa energije zračenjem u okolinu dolazi prilikom zagrijavanja golog nadzemnog vodiča iznad temperature okoline. Literatura [5] navodi da „brzina zračenja energije ovisi prije svega o razlici temperatura vodiča i njegove okoline“ te navodi kako „površinsko stanje vodiča i njegova emisivnost također utječu na radijativni prijenos topline“.

Spomenuto zračenje je opisano Stefan – Boltzmannovim zakonom koji se, kako literatura [5] objašnjava: „odnosi na prijenos energije zračenja do razlike između temperature površine vodiče i okolne temperature izražene u Kelvinima“.

$$q_r = 17,8 \cdot D_0 \cdot \varepsilon \cdot \left[\left(\frac{T_s + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{avg} + 273}{100} \right)^4 \right] \quad [W/m] \quad (3-8)$$

Gdje ε predstavlja gore spomenutu emisivnost vodiča.

3.4.5. Solarno upijanje vodiča

Sunce daje toplinsku energiju vodiču. Količina toplinske energije koja je isporučena vodiču ovisi o sunčevoj konstanti – prema [5] „količini energije po m^2 izvan zemljine atmosfere“, količini energije koja se prenosi na vodič kroz atmosferu, položaju sunca na nebu, orijentaciji vodiča te površinskom stanju vodiča. Literatura objašnjava kako „sjajni, jarki vodiči projiciraju veliku sunčeve energije, dok crni istrošeni vodiči apsorbiraju većinu sunčeve energije“.

Dolje navedena jednadžba (4-7) predstavlja jednadžbu solarnog upijanja:

$$q_s = \alpha \cdot Q_{se} \cdot \sin(\theta) \cdot A' \quad [W/m] \quad (3-9)$$

gdje α predstavlja apsorpciju sunca, Q_{se} predstavlja ukupni toplinski intenzitet i intenzitet topline isijavan nebom korigiran za povišenje te A' predviđenu površinu vodiča.

U gore napisanoj jednadžbi se θ računa:

$$\theta = \arccos [\cos(H_c) \cdot \cos(Z_c - Z_1)] \quad (3-10)$$

gdje je Z_c azimut sunca, a Z_1 azimut linije.

Sunčeva visina H_c može biti zadana u stupnjevima ili radijanima, a prikazana je jednadžbom (3-11a):

$$H_c = \arcsin[\cos(Lat) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) + \sin(Lat) \cdot \sin(\delta)] \quad (3-11a)$$

gdje je ω kut sata koji predstavlja, prema literaturi [5] „broj sati od podneva puta 15 stupnjeva (11h prijepodne je -15° , a 2h poslijepodne je $+30^\circ$)“, Lat stupnjeve zemljopisne širine, a δ predstavlja smanjenje solarne energije (u stupnjevima):

$$\delta = 23,46 \cdot \sin \left[\frac{284 + N}{365} \cdot 360 \right] \quad (3-11b)$$

gdje N označava broj dana u godini. Gore napisana jednadžba (3-11b) vrijedi za sve geografske širine neovisno je li južna ili sjeverna hemisfera.

Z_c označava azimut sunca (u stupnjevima):

$$Z_c = C + \arctan(\chi) \quad (3-11c)$$

Gdje je C konstanta sunčevog azimuta (izražena u stupnjevima) koja je funkcija „satnog kuta“ ω i varijable sunčevog azimuta χ , prikazana u tablici Tab.3.2. Varijabla sunčevog azimuta χ se računa prema formuli:

$$\chi = \frac{\sin(\omega)}{\sin(Lat) \cdot \cos(\omega) - \cos(Lat) \cdot \tan(\delta)} \quad (3-11d)$$

Tab.3.2. „Konstanta sunčevog azimuta C , kao funkcija „satnog kuta“ ω i varijable sunčevog azimuta χ .“ [5]

„Satni kut“, ω , stupnjevi	C ako je $\chi \geq 0$ stupnjeva	C ako je $\chi \leq 0$ stupnjeva
$-180 \leq \omega < 0$	0	180
$0 \leq \omega < 180$	180	360

Ukupan intenzitet toplinskog zračenja Q_{se} koju primi površina vodiča se može izračunati jednadžbom (3-11e) primjenom koeficijenta za čistu ili zagađenu/industrijsku kvalitetu zraka. Za proračun u ovom radu koristiti će se samo koeficijenti za čisti zrak koji su prikazani tablicom Tab.3.3..

$$Q_s = A + BH_c + CH_c^2 + DH_c^3 + EH_c^4 + FH_c^5 + GH_c^6 \quad [W/m^2] \quad (3-11e)$$

Tab.3.3. Koeficijenti za intenzitet sunčeve topline u odnosu na visinu sunca [5]

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

Intenzitet sunčeva zračenja na površini Zemlje može se korigirati za solarnu visinu slijedećom jednačinom (3-11f):

$$Q_{se} = K_{solar} Q_s \quad (3-11f)$$

Gdje je K_{solar} faktor korekcije sunčeve visine te se ono računa prema formuli (3-11g):

$$K_{solar} = A + B \cdot H_e + C \cdot H_e^2 \quad (3-11g)$$

Gdje H_e predstavlja nadmorsku visinu vodiča (u metrima). Tablica Tab.3.4. prikazuje koeficijente korekcije visine sunčevog toka (u jednačini (3-11g)).

Tab.3.4. Koeficijenti toka sunčevog zračenja [5]

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

3.5. Električni otpor neizoliranog nadzemnog vodiča

Poznato je kako električna otpornost neizoliranog nadzemnog vodiča ovisi o frekvenciji snage, temperaturi, struji te presjeku vodiča. U ovoj se verziji standarda, kako literatura [5] navodi: „električna otpornost se linearno prilagođava temperaturama površine vodiča“.

Pretpostavlja se da na vrijednost otpornosti utječu također i „*skin effect*“ te magnituda struje. Literatura [5] navodi primjer: „otpor vodiča na visokoj temperaturi, T_{high} , i niskoj temperaturi, T_{low} , se može uzeti iz tabličnih vrijednosti u jednoj od prethodno navedenih referenci ili ga može osigurati proizvođač“. Otpornost vodiča pri bilo kojoj drugoj temperaturi, T_{avg} , pronalazi se linearnom interpolacijom, prema jednadžbi (3-12):

$$R(T_{avg}) = \left[\frac{R(T_{high}) - R(T_{low})}{T_{high} - T_{low}} \right] \cdot (T_{avg} - T_{low}) + R(T_{low}) \quad [\Omega/m] \quad (3-12)$$

Ova metoda proračuna otpornosti, prema literaturi [5]: „omogućuje primjenu široko prihvaćenih visokotemperaturnih i niskotemperaturnih vrijednosti otpornosti, koje uključuju magnetske efekte, „*skin effect*“ i omjere lakova“. Visoka temperatura, T_{high} , treba biti jednaka ili veća od temperature vodiča koja je pretpostavljena za proračun. Literatura [5] opet navodi primjer da „ako se toplinska snaga golog nadzemnog vodiča izračunava za 180°C, toplinska otpornost koja se upotrebljava u gore navedenoj jednadžbi, trebala bi iznositi 200°C“.

3.6. Jednadžbe svojstva zraka

U ovom odjeljku definirane su jednadžbe svojstva zraka kao što su: gustoća, toplinska provodljivost te dinamička viskoznost.

Dinamička viskoznost zraka računa se prema formuli:

$$\mu_s = \frac{1,458 \cdot 10^{-6} \cdot (T_{film} + 273)^{1,5}}{T_{film} + 383,4} \quad [kg/m - s] \quad (3-13)$$

Gustoća zraka funkcija je temperature zraka i nadmorske visine u rubnom sloju vodiča, te se računa prema formuli:

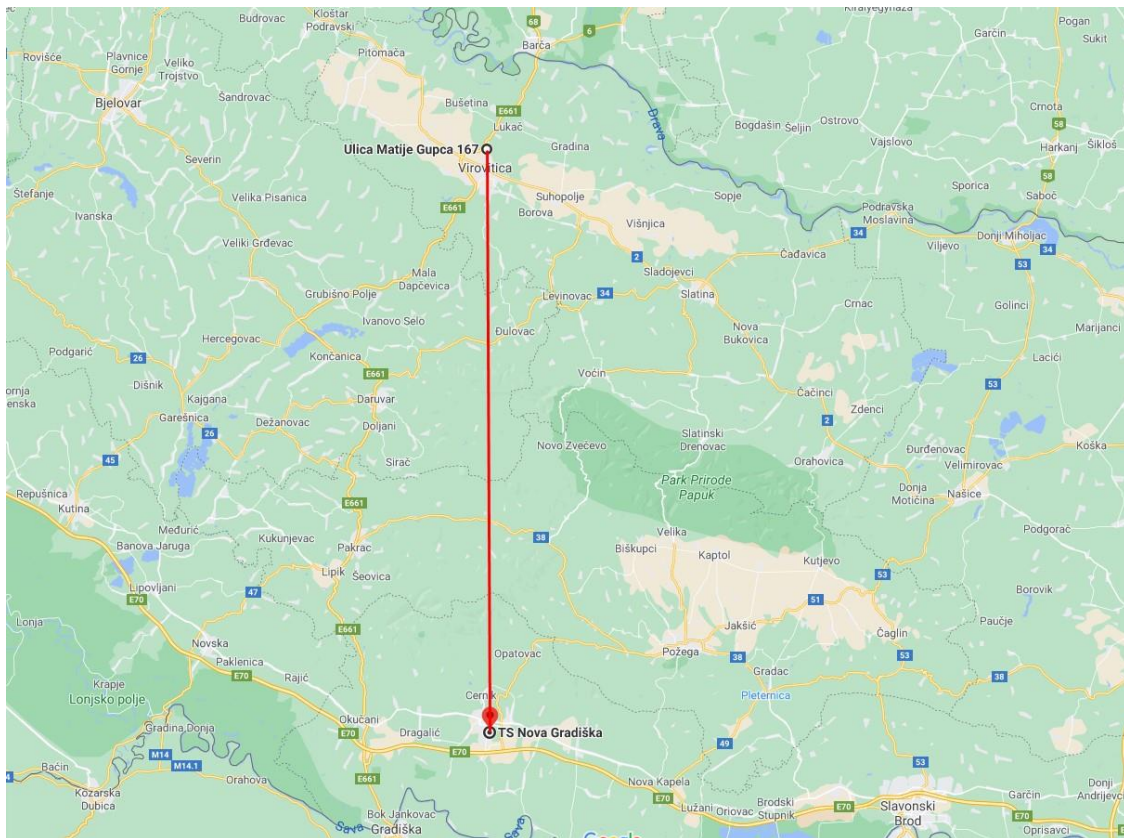
$$\rho_f = \frac{1,293 - 1,525 \cdot 10^{-4} \cdot H_e + 6,379 \cdot 10^{-9} \cdot H_e^2}{1 + 0,00367 \cdot T_{film}} \quad [kg/m^3] \quad (3-14)$$

Toplinska provodljivost zraka ovisi o temperaturi zraka u rubnom sloju vodiča, a ono se računa prema formuli:

$$k_f = 2,424 \cdot 10^{-2} + 7,477 \cdot 10^{-5} \cdot T_{film} - 4,407 \cdot 10^{-9} \cdot T_{film}^2 \quad [W/m \cdot ^\circ C] \quad (3-15)$$

4. IZRAČUN DINAMIČKOG OPTEREĆENJA VODIČA DALEKOVODA

Zadatak ovog diplomskog rada je izvršiti izračun dinamičkog opterećenja vodiča dalekovoda u stvarnim uvjetima. Za izračun ovog zadatka pretpostavljen je dalekovod koji povezuje dvije postojeće trafostanice TS Nova Gradiška ($45^{\circ}14'50.4''N$ $17^{\circ}23'32.5''E$) i TS Virovitica ($45^{\circ}51'05.1''N$ $17^{\circ}23'18.3''E$) kako je prikazano na slici 4.1.



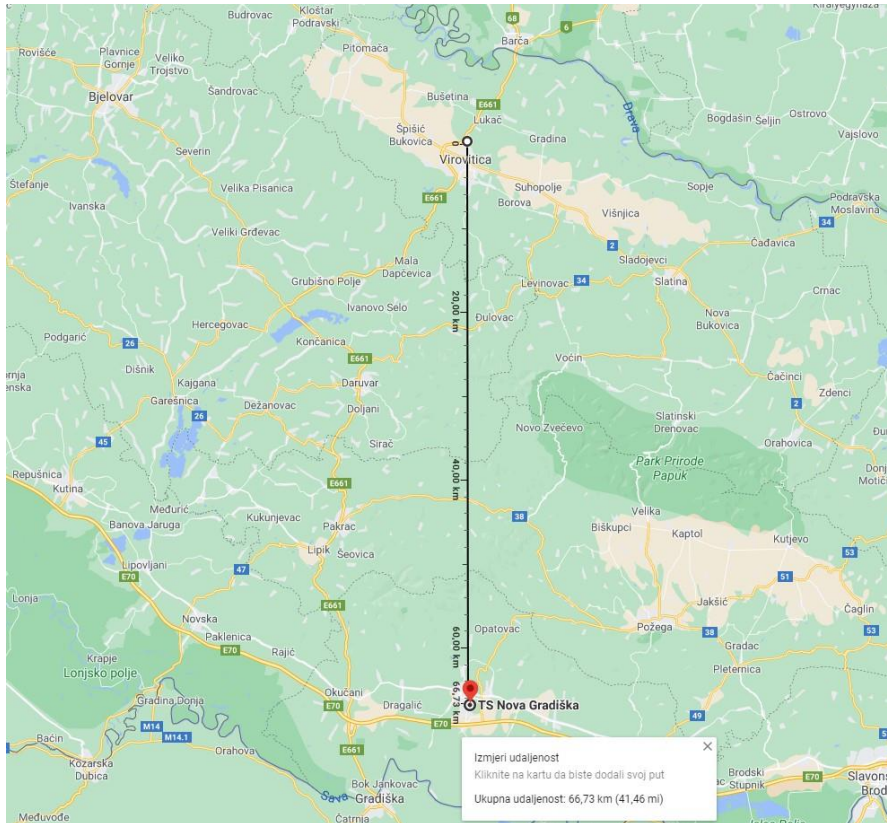
Slika 4.1. Dalekovod TS Nova Gradiška – TS Virovitica [11]

4.1. Ulazni podaci dalekovoda

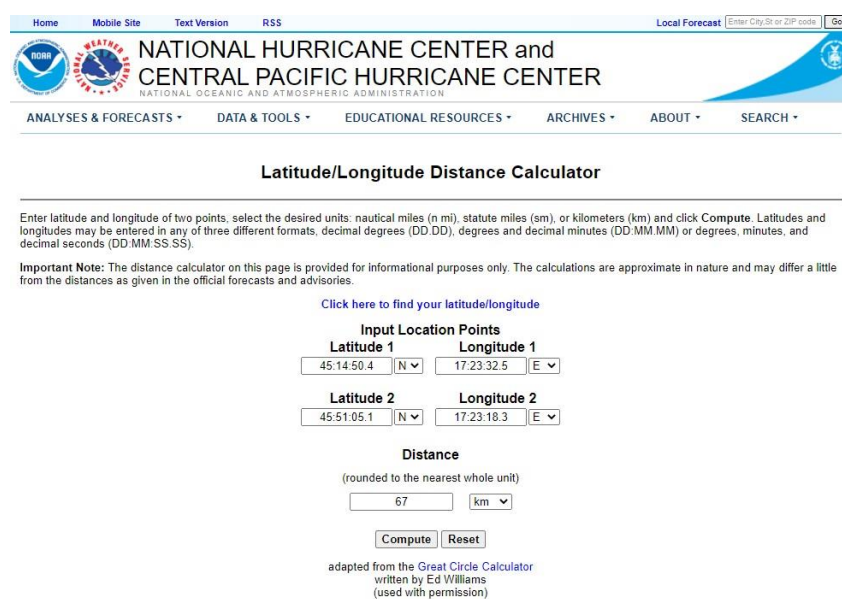
4.1.1. Udaljenost i kut nagiba voda

Iz gore navedenih koordinata trafostanica može se izračunati duljina dalekovoda kao i njegov nagib prema ekvatoru (odnosno x osi) koje će biti potrebni za proračun.

Iako se udaljenost između koordinata može izračunati i uz pomoć alata *Google Maps* [11] kako je prikazano na slici 4.2., ona se još može izračunati i uz pomoć „*National oceanic and atmospheric administration*“ Internet alata [12] za izračunavanje udaljenosti uz pomoć geografske duljine i širine (slika 4.3.).



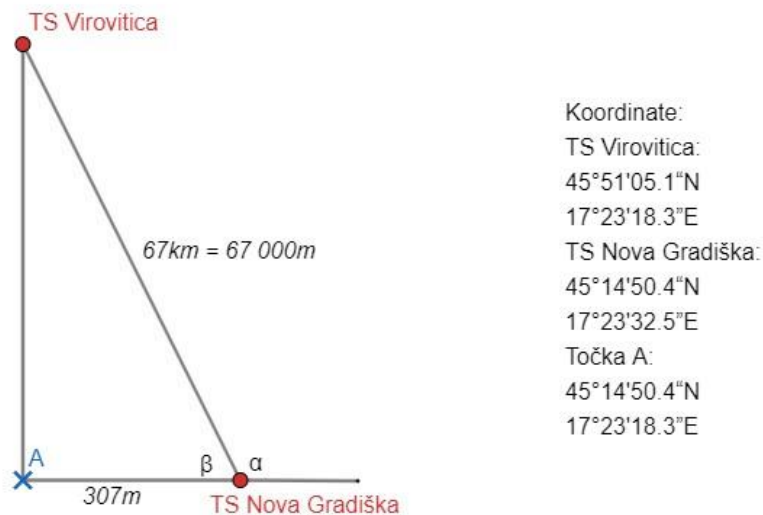
Slika 4.2. Izmjerena udaljenost uz pomoć alata *Google Maps* [11]



Slika 4.3. Izmjerena udaljenost uz pomoć Internet alata [12]

Kako se na slikama može vidjeti, udaljenosti su skoro pa iste. *Google Maps* [11] pokazuje udaljenost od 66,73 km dok alat za izračunavanje udaljenosti [12] zaokružuje na najbližu cijelu jedinicu (67 km) koja će se koristiti za lakši proračun.

Nagib dalekovoda prema ekvatoru također je potreban za izračun. Do njega se došlo trigonometrijom pravokutnog trokuta prikazano na slici 4.4. te formulom (4-1).



Slika 4.4. Trigonometrija pravokutnog trokuta

$$\cos \beta = \frac{\text{priležeća kateta}}{\text{hipotenuza}} \quad (4-1)$$

$$\cos \beta = \frac{307}{67\,000}$$

$$\beta = 89,7374^\circ$$

$$\alpha = 180^\circ - \beta = 90,2625^\circ$$

Izračunom kuta α dobije se nagib kuta prema x osi te on u ovom slučaju iznosi $90,2625^\circ$. U nastavku će se taj kut označavati sa φ .

U svrhu pojednostavljenja, cijeli dalekovod je pod istim kutom što uglavnom nije slučaj. Broj stupova te njihova udaljenost za ovaj proračun nije bitna kao i utjecaj varijabilnog provjesa kojeg zanemarujemo.

4.1.2. Parametri ACSR vodiča

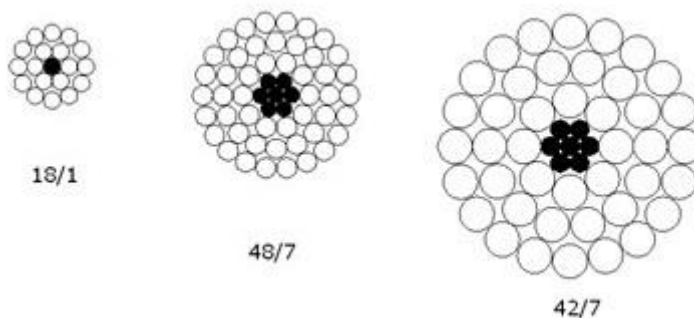
Za proračun se koristio ACSR (*engl. „Aluminium Conductor Steel Reinforced“* [4]) vodič – model Pelican 240/5 mm². Svi potrebni parametri ovog modela vodiča dani su od proizvođača te su prikazani tablicom 4.1. prema literaturi [13].

Tab.4.1. Parametri ACSR vodiča – model Pelican [13]

TIP	Presjek vodiča (m ²)	Vanjski promjer (m)	Otpor vodiča R(Tc) (Ω/m)			Induktivna reaktancija (Ω/m)	Kapacitivna reaktancija (Ω/m)
			DC@20°C	AC@25°C	AC@75°C		
Pelican	0,0002417	0,0207	0,0001191	0,0001224	0,0001463	0,0002743	0,0001616

Kako je aluminij slabiji materijal u odnosu na čelik, autori literature [7] navode kako se „ACSR vodič sastoji od čelične niti koja čini središnju jezgru te od jedne ili više slojeva aluminijskih žica oko nje.“

Postoji puno različitih ACSR vodiča. Na slici 4.4. prikazani su presjeci nekih ACSR vodiča.



Slika 4.4. Neki od presjeka ACSR vodiča [16]

Literatura [7] objašnjava kako „prvi broj označava broj aluminijskih niti, a drugi čeličnih niti“. Ista literatura [7] navodi kako „omjer aluminija i čelika utječe na modul elastičnosti, koeficijent toplinskog produženja, otpornost vodiča i magnetne gubitke“.

Uz to, literatura [13] navodi kako se „središnja jezgra može sastojati od samo jedne niti ili koncentričnog užeta u strukovima od 7, 19, 37 ili više žica“.

Ista literatura [13] navodi kako su ACSR vodiči „prepoznati po svojoj evidenciji ekonomije, pouzdanosti i povoljnom omjeru čvrstoće i težine“.

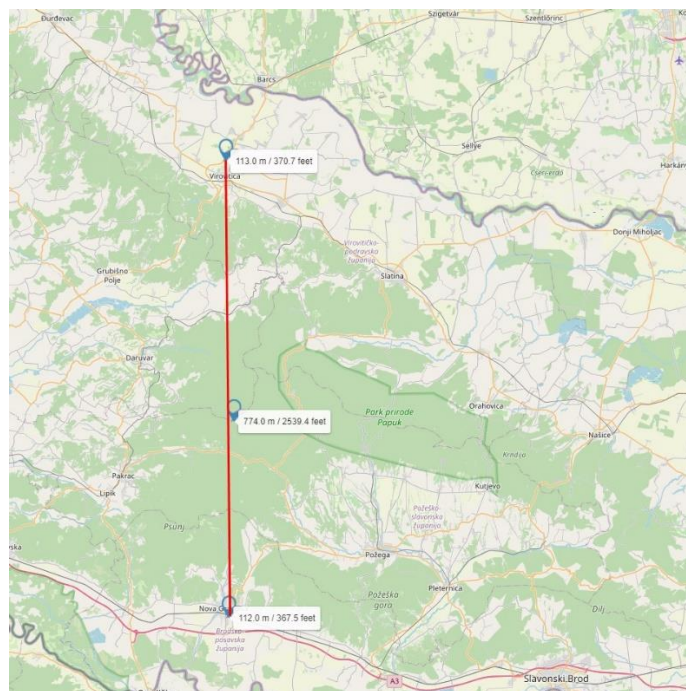
4.1.3. Snaga zračenja, solarno upijanje i temperatura vodiča

Dalekovod je novokonstruiran, stoga literatura [7] navodi kako su „prema tome emisivnost odnosno snaga zračenja (ϵ) te solarno upijanje (α) minimalni – 0,2“. Literatura [13] navodi da je „optimalna dopuštena temperatura vodiča 75°C pri 60Hz“. Za najveću dopuštenu optimalnu temperaturu u ovom proračunu će se uzeti temperatura od 80°C. Atmosfera može biti industrijska odnosno zagađena i čista. Za ovaj proračun je atmosfera čista, jer se dalekovod većim putem nalazi u prirodnoj, nezagađenoj okolini.

4.2. Ulazni meteorološki podaci

4.2.1. Najveća visina vodiča

Za pronalaženje najveće nadmorske visine vodiča na trasi dalekovoda korišten je internet alat „Free Map Tools“ [14]. Nakon pronalaženja koordinata trafostanica, na pravcu dalekovoda iz jedne u drugu trafostanicu, pronađena je najviša visina vodiča koja iznosi 774 m (slika 4.4.).

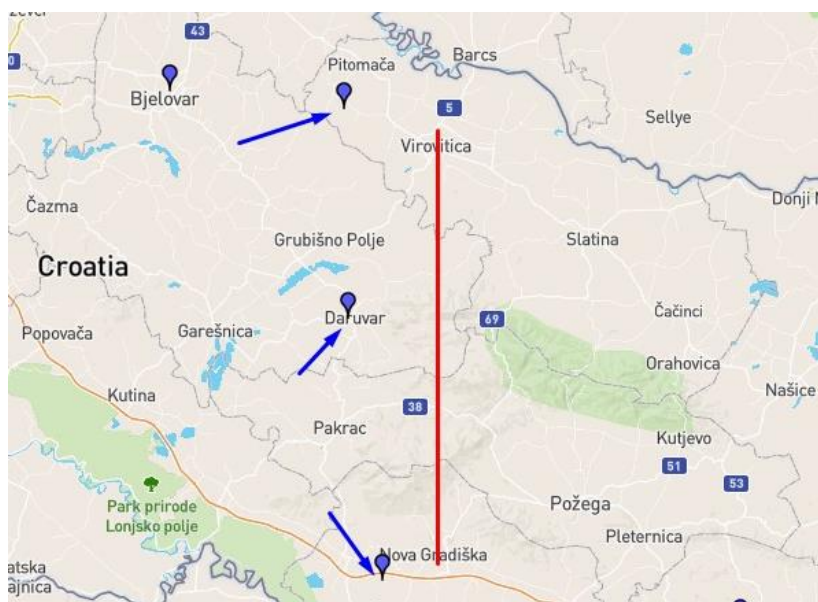


Slika 4.4. Najveća visina vodiča – 774 m [14]

4.2.2. Brzina vjetra, temperatura zraka i geografska širina

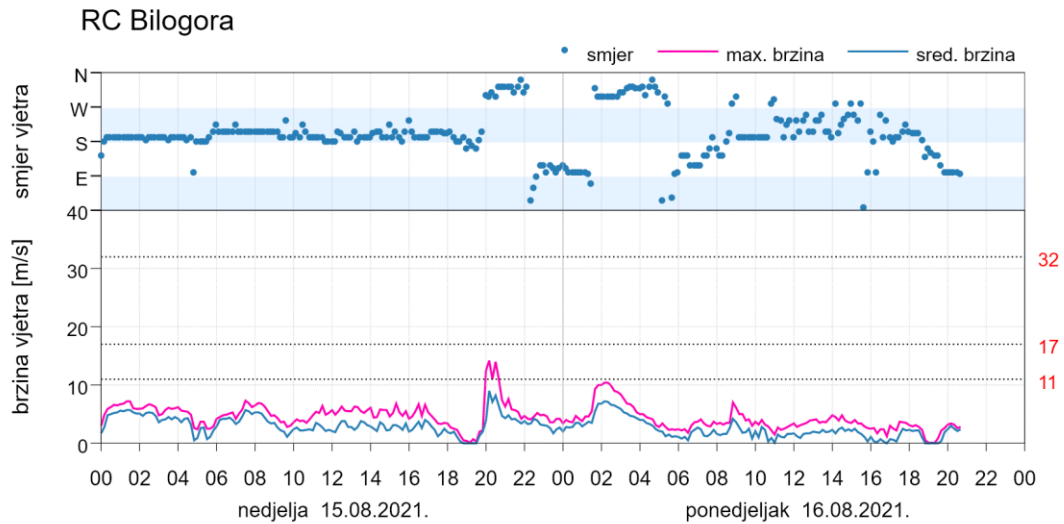
Za proračun su se koristili podaci Državnog hidrometeorološkog zavoda – DHMZ [15] za Nedjelju 15.8.2021. godine. Najveća dopuštena struja se računa za svaki sat u danu, ali će proračun biti prikazan samo za 14 sati. Svi podaci za ostale sate će biti prikazani u tablici. U blizini dalekovoda se nalaze 3 mjerne postaje koje će biti referentne (slika 4.5.):

1. GMP i AMP Bilogora ($45^{\circ} 53' 1''$ N)
2. GMP i AMP Daruvar ($45^{\circ} 35' 29''$ N)
3. GMP i AMP Gorice ($45^{\circ} 13' 25''$ N).

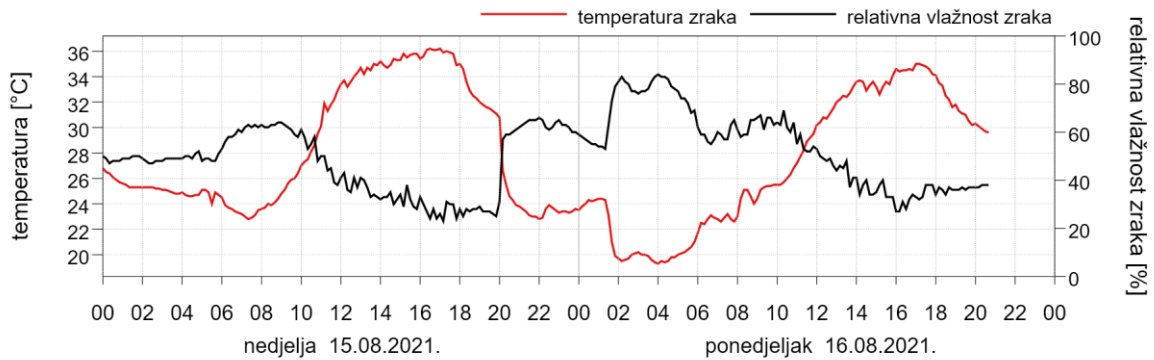


Slika 4.5. Referentne mjerne postaje u blizini dalekovoda [15]

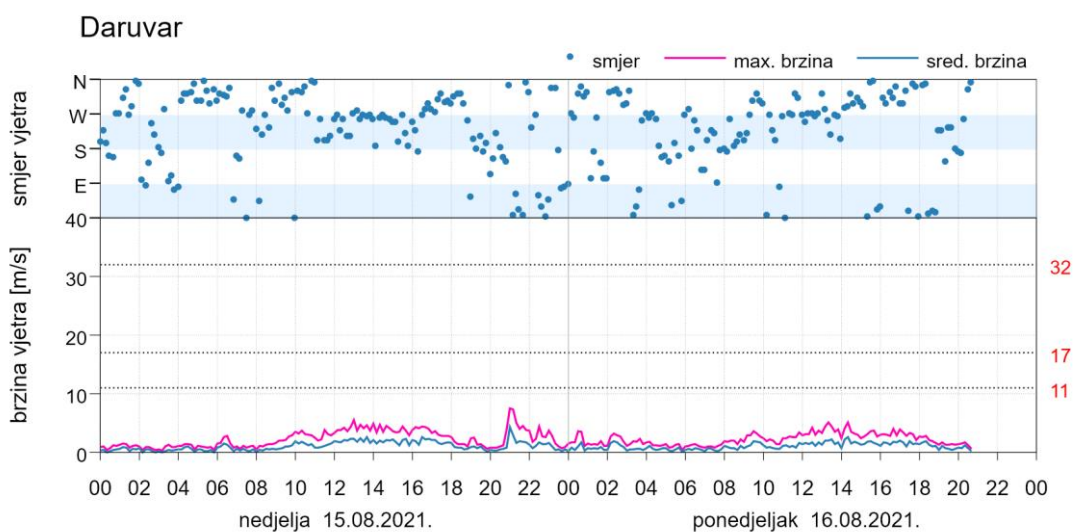
Brzina – V_w i smjer vjetra, temperatura okoline – T_{avg} , te sjeverna geografska širina – Lat potrebni su ulazni parametri uzeti iz gore spomenutih mjernih postaja. Slike u nastavku (Slika 4.6., slika 4.7., slika 4.8., slika 4.9., slika 4.10. i slika 4.11.) preuzete su sa službene DHMZ [15] stranice te prikazuju dijagrame iz kojih je moguće vidjeti potrebne parametre. Radi lakšeg rješavanja proračuna svi podaci su prikazani tablicama u nastavku (Tab.4.2., Tab.4.3. i Tab.4.4.).



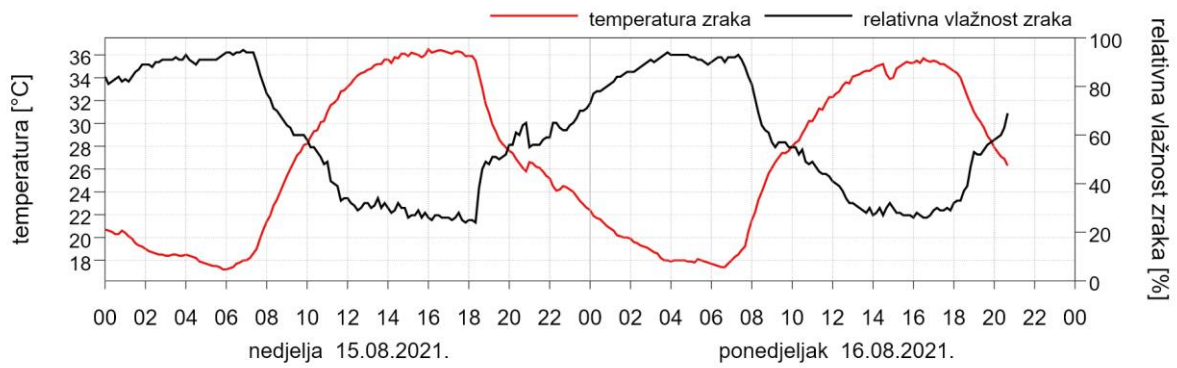
Slika 4.6. Dijagram brzine i smjera vjetra za MP Bilogora [15]



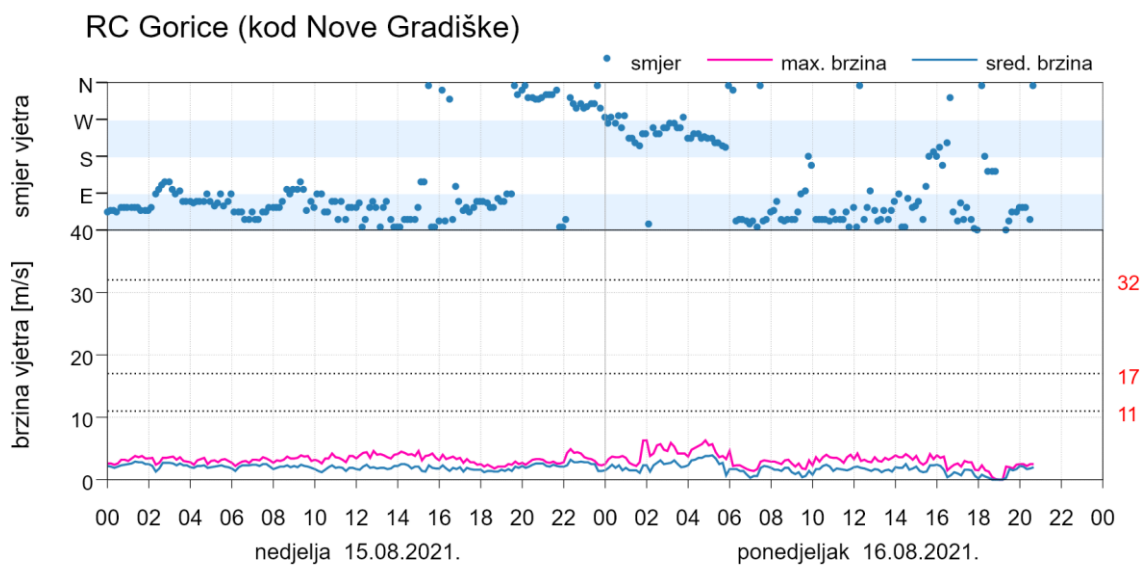
Slika 4.7. Dijagram temperature i relativne vlažnosti zraka za MP Bilogora [15]



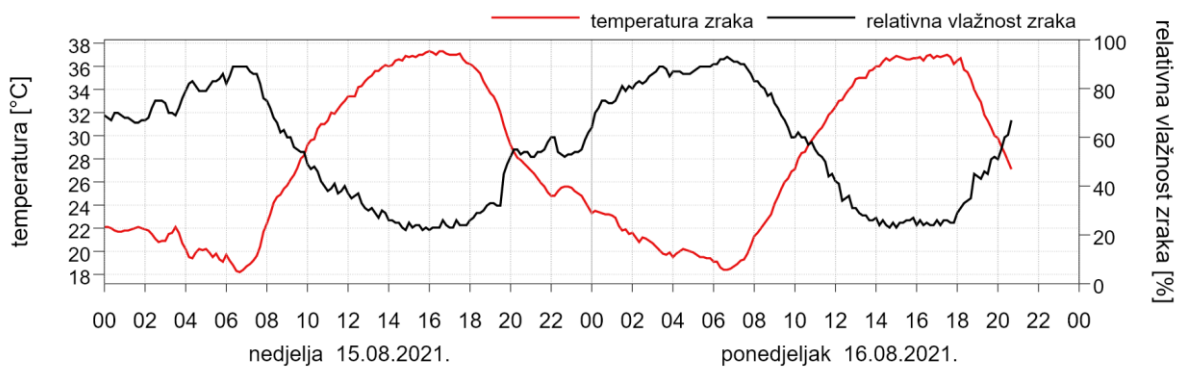
Slika 4.8. Dijagram brzine i smjera vjetra za MP Daruvar [15]



Slika 4.9. Dijagram temperature i relativne vlažnosti zraka za MP Daruvar [15]



Slika 4.10. Dijagram brzine i smjera vjetra za MP Gorice [15]



Slika 4.11. Dijagram temperature i relativne vlažnosti zraka za MP Gorice [15]

Tab. 4.2. Podaci za MP Bilogora

BILOGORA													
<i>Sat (h)</i>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<i>Brzina vjetra (m/s)</i>	3	5	4	4	4	2,5	4	4	6	4	2,5	3	3
<i>Smjer vjetra</i>	S	S	S	S	S	S	S	SW	SW	SW	SW	S	S
<i>Temp. zraka (°C)</i>	27	25	25	25	25	24,5	24	23,5	24	25	26	28	34
		13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
		3	3	3	3	2,8	2,5	0,5	9	6	4,5	4	3
		S	S	SW	SW	SW	SW	S	NW	NW	NE	E	E
		34	35	35	36	36	35	32	27	24	23	24	24

Tab. 4.3. Podaci za MP Daruvar

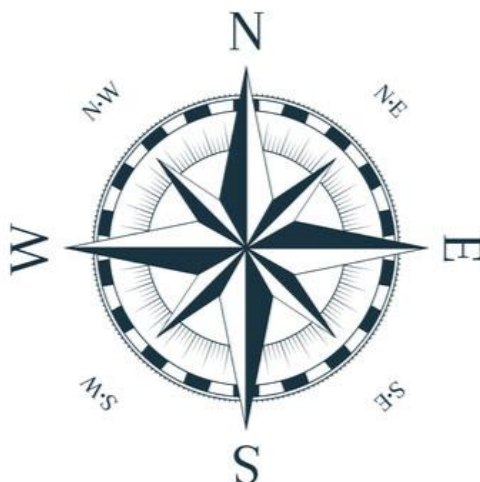
DARUVAR													
<i>Sat (h)</i>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<i>Brzina vjetra (m/s)</i>	1	1	1	0,5	0,5	0	0,5	0,5	0	1	2	1,5	2,5
<i>Smjer vjetra</i>	S	W	SE	S	E	NW	NW	S	SW	NW	NW	SW	SW
<i>Temp. zraka (°C)</i>	20,2	20	19	18,4	18,4	17,8	17	18	21	24	28	30	33
		13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
		2,5	2,5	2,5	2	2	1	0,5	0	4	1	1	0
		W	W	W	SW	NW	NW	S	SE	NE	NE	NE	E
		34,8	36	36	36	36	36	31	27,8	26	25	24	22

Tab. 4.4. Podaci za MP Gorice

GORICE													
Sat (h)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Brzina vjetra (m/s)	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2	2,5	2,5
Smjer vjetra	NE	NE	NE	SE	E	E	E	NE	NE	E	NE	NE	NE
Temp. zraka (°C)	22	22	22	21	20	20	20	18	22	26	28	32	33,4
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
	3	3	2	2,5	2,5	2,5	2	2,5	3	3	3,5	2	
	NE	NE	N	N	NE	E	E	N	NW	NW	NW	W	
	35	36	37	37	37	36	32	28	27	25	25,8	23,8	

4.2.3. Kut smjera vjetra u odnosu na dalekovod

Prosječan kut nagiba vjetra je kut pri kojem silnice vjetra udaraju u dalekovod. Slika 4.12. pokazuje sve moguće smjerove vjetra koje smo koristili u proračunu. Primjera radi, ako je dalekovod orijentiran okomito u odnosu na ekvator (90°) i vjetar puše sjeverno (N) kut je 0° . Isto tako ako vjetar puše južno (S), kut je također 0° . Ako vjetar puše zapadno (W) ili istočno (E) kut je 90° . Isto tako ako vjetar puše sjeverozapadno (NW), kut je 45° . Isto vrijedi i za sjeveroistočni, jugoistočni te jugozapadni vjetar.



Slika 4.12. Osam glavnih vjetrova – ruža vjetrova [17]

U ovom proračunu dalekovod ne stoji okomito u odnosu na ekvator. Dalekovod je pod kutom stoga se dolazi do geometrije. Podsjetimo, kut (φ) pod kojim dalekovod stoji iznosi $90,2625^\circ$. U nastavku je prikazana tablica 4.5. sa svim smjerovima i kutovima udaranja vjetra u dalekovod s obzirom na njegovu os.

Tab. 4.5. Kut između smjera vjetra i osi voda

Vjetar		Kut između smjera vjetra i osi voda
Sjeverni – N	$90^\circ - \varphi$	$-0,2625^\circ$
Sjeveroistočni – NE	$\varphi - 45^\circ$	$45,2625^\circ$
Istočni – E	$180^\circ - \varphi$	$89,7375^\circ$
Jugoistočni – SE	$\varphi + 45^\circ$	$135,2625^\circ$
Južni – S	$90^\circ - \varphi$	$-0,2625^\circ$
Jugozapadni – SW	$\varphi - 45^\circ$	$45,2625^\circ$
Zapadni – W	$180^\circ - \varphi$	$89,7375^\circ$
Sjeverozapadni – NW	$\varphi + 45^\circ$	$135,2625^\circ$

4.3. Postupak proračuna

Postupak izračuna najveće dopuštene struje dalekovoda biti će prikazan paralelno za 3 mjerne postaje – Bilogoru, Daruvar i Gorice za 15.8.2021. u 14 sati. Ostala 23 sata će biti prikazana u tablici na kraju.

Podsjetimo kako formula koja će se koristiti za izračun najveće struje je formula (3-1b)

$$I = \sqrt{\frac{q_c + q_r - q_s}{R(T_{avg})}}$$

4.3.1. Mjerna postaja Bilogora

Prvi korak u rješavanju ovog proračuna je izračun gubitka topline konvekcijom prema formulama (3-4a) i (3-4b) te njihovom usporedbom i zatim izabiranjem većeg dobivenog rezultata.

Kako bi se izračunao gubitak topline konvekcijom potrebni su određeni parametri kao što su Reynoldsov broj N_{Re} (3-3), faktor smjera vjetra K_{angle} (3-5) i toplinska provodljivost zraka k_f (3-15).

Za izračun Reynoldsovog broja potrebno imati dinamičku viskoznost te gustoću zraka:

$$\begin{aligned}\mu_f &= \frac{1,458 \cdot 10^{-6} \cdot (T_{film} + 273)^{1,5}}{T_{film} + 383,4} \quad ; \text{gdje } T_{film} \text{ iznosi } 57,5^\circ\text{C.} \\ &= \frac{1,458 \cdot 10^{-6} \cdot (57,5 + 273)^{1,5}}{57,5 + 383,4} = \\ &= 1,9869 \times 10^{-5} \text{ [kg/m} \cdot \text{s]}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\rho_f &= \frac{1,293 - 1,525 \cdot 10^{-4} \cdot H_e + 6,379 \cdot 10^{-9} \cdot H_e^2}{1 + 0,00367 \cdot T_{film}} \quad ; \text{gdje } H_e \text{ iznosi } 774 \text{ m.} \\ &= \frac{1,293 - 1,525 \cdot 10^{-4} \cdot 774 + 6,379 \cdot 10^{-9} \cdot 774^2}{1 + 0,00367 \cdot 57,5} \\ &= 0,9734 \text{ [kg/m}^3\text{]}\end{aligned}$$

Slijedi da je:

$$\begin{aligned}N_{Re} &= \frac{D_0 \cdot \vartheta_f \cdot V_w}{\mu_f} \\ &= \frac{0,0207 \cdot 0,934 \cdot 3}{1,9869 \times 10^{-5}} \\ &= 3042,279 \text{ [-]}\end{aligned}$$

Faktor smjera vjetra iznosi:

$$\begin{aligned}K_{angle} &= 1,194 - \cos(\Phi) + 0,194 \cdot \cos(2\Phi) + 0,368 \cdot \sin(2\Phi) \\ &= 1,194 - \cos(-0,2625) + 0,194 \cdot \cos(2 \cdot (-0,2625)) + 0,368 \cdot \sin(2 \cdot (-0,2625)) \\ &= 0,3846 \text{ [-]}\end{aligned}$$

Toplinska provodljivost zraka računa se:

$$\begin{aligned} k_f &= 2,424 \cdot 10^{-2} + 7,477 \cdot 10^{-5} \cdot T_{film} - 4,407 \cdot 10^{-9} \cdot T_{film}^2 \\ &= 2,424 \cdot 10^{-2} + 7,477 \cdot 10^{-5} \cdot 57,5 - 4,407 \cdot 10^{-9} \cdot 57,5^2 \\ &= 0,0285 [W/m^{\circ}C] \end{aligned}$$

Nakon što su se dobili svi potrebni podaci, toplinski gubici q_c iznose:

$$\begin{aligned} q_{c1} &= K_{angle} \cdot [1,01 + 1,35 \cdot N_{Re}^{0,52}] \cdot k_f \cdot (T_s - T_{avg}) \\ &= 0,3846 \cdot [1,01 + 1,35 \cdot 3042,279^{0,52}] \cdot 0,0285 \cdot (80 - 35) \\ &= 43,6579 [W/m] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_{c2} &= K_{angle} \cdot 0,754 \cdot N_{Re}^{0,6} \cdot k_f \cdot (T_s - T_{avg}) \\ &= 0,3846 \cdot 0,754 \cdot 3042,279^{0,6} \cdot 0,0285 \cdot (80 - 35) \\ &= 45,7897 [W/m] \end{aligned}$$

Kako je $q_{c1} < q_{c2}$, q_{c2} se izabire za računanje.

Slijedeći korak za dobivanje maksimalne dopuštene struje je izračun koliko iznosi gubitak topline dobiveno zračenjem q_r prema jednadžbi (3-8).

$$\begin{aligned} q_r &= 17,8 \cdot D_0 \cdot \varepsilon \cdot \left[\left(\frac{T_s + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{avg} + 273}{100} \right)^4 \right] \\ &= 17,8 \cdot 0,0207 \cdot 0,2 \cdot \left[\left(\frac{80 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{35 + 273}{100} \right)^4 \right] \\ &= 4,8108 [W/m] \end{aligned}$$

Nakon dobivanja rezultata za gubitke topline prilikom zračenja, slijedeći korak je izračun količine solarnog upijanja prema jednadžbi (3-9). Za dobivanje rezultata potrebno je prije toga dobiti sve potrebne podatke kao što je npr. intenzitet sunčeva zračenja.

Kako bi se dobio ukupni intenzitet toplinskog zračenja Q_{se} (3-11f), prije toga se trebaju dobiti faktor korekcije sunčeve visine (3-11g) i količinu ukupnog intenziteta toplinskog zračenja koju primi površina Q_s (3-11e) u čistoj atmosferi.

$$\begin{aligned} K_{solar} &= A + B \cdot H_e + C \cdot H_e^2 \quad ; \text{gdje su A, B i C koeficijenti korekcije sunčevog toka (Tab.3.4.)} \\ &= 1 + 1,148 \times 10^{-4} \cdot 774 - 1,108 \times 10^{-8} \cdot 774^2 \\ &= 1,0822 [-] \end{aligned}$$

Slijedeći korak je dobivanje Q_s , ali prije toga se treba dobiti sunčeva visina H_c (3-11a). Za dobivanje sunčeve visine H_c potrebno je prije toga dobiti koliko je smanjenje solarne energije δ (3-11b):

$$\delta = 23,46 \cdot \sin \left[\frac{284+N}{365} \cdot 360 \right]$$

gdje se N dobije kao zbroj svih dana u godini uključujući u ovom slučaju i 15.8.:

$$N = 31 + 28 + 31 + 30 + 31 + 30 + 31 + 15 = 227 \text{ dana.}$$

Prema tome,

$$\delta = 13,8 [^\circ]$$

$$H_c = \arcsin[\cos(Lat) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) + \sin(Lat) \cdot \sin(\delta)]$$

gdje Lat iznosi $45,531^\circ$, ω iznosi 30° i δ iznosi $13,8$.

$$H_c = \arcsin[\cos(45,531) \cdot \cos(13,8) \cdot \cos(30) + \sin(45,531) \cdot \sin(13,8)]$$

$$= 49,41 [^\circ]$$

$Q_s = A + BH_c + CH_c^2 + DH_c^3 + EH_c^4 + FH_c^5 + GH_c^6$;gdje su A-G koeficijenti čistog zraka (Tab.3.3.)

$$\begin{aligned} &= -42,231 + 63,8044 \cdot 49,41 - 1,9220 \cdot 49,41^2 + 3,46921 \times 10^{-2} \cdot 49,41^3 \\ &\quad - 3,61118 \times 10^{-4} \cdot 49,41^4 + 1,94318 \times 10^{-6} \cdot 49,41^5 - 4,07608 \times 10^{-9} \cdot 49,41^6 \\ &= 963,491 [W/m^2] \end{aligned}$$

$$Q_{se} = K_{solar} Q_s$$

$$= 1,0822 \cdot 963,491$$

$$= 1042,7 [-]$$

Kako bi se došlo do θ prema formuli (3-10), prvo se moraju dobiti azimut sunca Z_c (3-11c) i azimut linije Z_1 . Isto tako se za dobivanje azimuta sunca prvo treba dobiti varijabla sunčevog azimuta χ prema (3-11d).

$$\begin{aligned}\chi &= \frac{\sin(\omega)}{\sin(Lat) \cdot \cos(\omega) - \cos(Lat) \cdot \tan(\delta)} \\ &= \frac{\sin(30)}{\sin(45,531) \cdot \cos(30) - \cos(45,531) \cdot \tan(13,8)} \\ &= 1,1212\end{aligned}$$

Nakon dobivanja varijable sunčevog azimuta, može se dobiti i konstanta sunčevog azimuta C prema tablici Tab.3.2.. Kako je satni kut 30° , a varijabla sunčevog azimuta χ veća od $0 - C$ onda iznosi 180° . Pa prema tome:

$$\begin{aligned}Z_c &= C + \arctan(\chi) \\ &= 180 + \arctan(1,1212) \\ &= 228,3 [^\circ]\end{aligned}$$

Azimut linije se dobiva prema formuli (4-2):

$$\begin{aligned}Z_1 &= 90^\circ + \vartheta && (4-2) \\ &= 90^\circ + 90,2625 \\ &= 180,2625 [^\circ]\end{aligned}$$

Nakon svega potrebno izračunatog:

$$\begin{aligned}\theta &= \arccos[\cos(H_c) \cdot \cos(Z_c - Z_1)] \\ &= \arccos[\cos(49,41) \cdot \cos(228,3 - 180,2625)] \\ &= 64,212 [^\circ]\end{aligned}$$

Prema tome, solarno upijanje q_s iznosi:

$$\begin{aligned}q_s &= \alpha \cdot Q_{se} \cdot \sin(\theta) \cdot A' \quad ; \text{gdje je } A' \text{ jednak } D_0 \\ &= 0,2 \cdot 1042,7 \cdot \sin(64,212) \cdot 0,0207 \\ &= 3,8858 [W/m^2]\end{aligned}$$

Nakon što su se izračunali svi gubici ostao je samo jedan korak do kraja, a to je električni otpor neizoliranog dalekovoda koji se računa prema formuli (3-12).

$$\begin{aligned}
 R(T_{avg}) &= \left[\frac{R(T_{high}) - R(T_{low})}{T_{high} - T_{low}} \right] \cdot (T_{avg} - T_{low}) + R(T_{low}) \quad ; \text{gdje je } T_{avg} = 35^\circ\text{C} \\
 &= \left[\frac{0,0001463 - 0,0001224}{80 - 25} \right] \cdot (35 - 25) + 0,0001224 \\
 &= 1,4869 \times 10^{-4} \text{ } [\Omega/m]
 \end{aligned}$$

4.3.2. Mjerna postaja Daruvar

Za mjernu postaju Daruvar biti će samo napisani krajnji rezultati.

μ_f ;pri $T_{film}=58^\circ\text{C}$.

$$\mu_f = 1,9891 \times 10^{-5} \text{ } [kg/m \cdot s]$$

ρ_f ;gdje H_e iznosi 774 m.

$$\rho_f = 0,9719 \text{ } [kg/m^3]$$

Slijedi da je:

$$N_{Re} = 2528,53 \text{ } [-]$$

Faktor smjera vjetra iznosi:

$$K_{angle} = 0,9988 \text{ } [-]$$

Toplinska provodljivost zraka računa se:

$$k_f = 0,0286 \text{ } [W/m^\circ\text{C}]$$

Toplinski gubici:

$$q_{c1} = 100,9326 \text{ } [W/m]$$

$$q_{c2} = 104,1858 \text{ } [W/m]$$

Kako je $q_{c1} < q_{c2}$, stoga se q_{c2} izabire za računanje.

Gubitak topline dobiven zračenjem q_r prema jednadžbi (3-8) iznosi:

$$q_r = 4,7242 [W/m]$$

Za dobivanje količine solarnog upijanja (3-9), potrebni su određeni podaci:

$$K_{solar} = 1,0822 [-]$$

$$Q_s = 963,9614 [W/m^2] \quad ; \text{gdje } H_c (Lat = 45,3529) \text{ iznosi } 49,5185^\circ$$

$$Q_{se} = 1043,2159 [-]$$

$$\chi = 1,127$$

$$Z_c = 228,43 [^\circ] \quad ; \text{uz } C=180 [^\circ]$$

$$Z_1 = 180,2625 [^\circ]$$

$$\theta = 64,3350 [^\circ]$$

Nakon što su se dobili svi potrebni parametri za računanje solarnog upijanja q_s (3-9), isto iznosi:

$$q_s = 3,8928 [W/m^2]$$

Električni otpor neizoliranog dalekovoda dobiven prema formuli (3-12) iznosi:

$$R(T_{avg}) = 1,4790 \times 10^{-4} [\Omega/m] \quad ; \text{uz } T_{avg} = 35,8^\circ\text{C}$$

4.3.3. Mjerna postaja Gorice

Za mjernu postaju Gorice biti će samo napisani krajnji rezultati.

μ_f ;pri $T_{film}=55,5^\circ\text{C}$.

$$\mu_f = 1,9891 \times 10^{-5} [kg/m \cdot s]$$

ρ_f ;gdje H_e iznosi 774 m.

$$\rho_f = 0,9719 [kg/m^3]$$

Slijedi da je:

$$N_{Re} = 3034,233 [-]$$

Faktor smjera vjetra iznosi:

$$K_{angle} = 0,8563 [-]$$

Toplinska provodljivost zraka računa se:

$$k_f = 0,0286 [W/m^{\circ}C]$$

Toplinski gubici:

$$q_{c1} = 95,0350 [W/m] \qquad q_{c2} = 99,6528 [W/m]$$

Kako je $q_{c1} < q_{c2}$, q_{c2} se izabire za računanje.

Gubitak topline dobiven zračenjem q_r prema jednadžbi (3-8) iznosi:

$$q_r = 4,7242 [W/m]$$

Za dobivanje količine solarnog upijanja (3-9), potrebni su određeni podaci:

$$K_{solar} = 1,0822 [-]$$

$$Q_s = 964,701 [W/m^2] \quad ;gdje H_c (Lat = 45,1325) \text{ iznosi } 49,6645^{\circ}$$

$$Q_{se} = 1043,9096 [-]$$

$$\chi = 1,1351$$

$$Z_c = 228,621 [^{\circ}] \quad ;uz C=180 [^{\circ}] \qquad Z_1 = 180,2625 [^{\circ}]$$

$$\theta = 64,5211 [^{\circ}]$$

Nakon što su se dobili svi potrebni parametri za računanje solarnog upijanja q_s (3-9), isto iznosi:

$$q_s = 3,9014 [W/m^2]$$

Električni otpor neizoliranog dalekovoda dobiven prema formuli (3-12) iznosi:

$$R(T_{avg}) = 1,4790 \times 10^{-4} [\Omega/m] \quad ;uz T_{avg} = 36^{\circ}C$$

4.3.4. Najveća dopuštena struja

Zadnji, najvažniji korak ovog proračuna je dobivanje najveće dopuštene struje (3-1b). Uz sve potrebne podatke može se izračunati struja za svaku mjernu postaju. Najveća dopuštena struja voda biti će najmanja vrijednost struje dobivena na sve tri mjerne postaje.

BILOGORA:

$$\begin{aligned} I &= \sqrt{\frac{q_c + q_r - q_s}{R(T_{avg})}} \\ &= \sqrt{\frac{40,76 + 4,1761 - 3,887}{1,2718 \times 10^{-4}}} \\ &= 560,5134 [A] \end{aligned}$$

DARUVAR:

$$I = 842,6480 [A]$$

GORICE:

$$I = 824,2255 [A]$$

Gledajući dobivene rezultate najvećih dopuštenih struja dalekovoda dolazimo da zaključka kako je za 15.8. u 14 sati najveća dopuštena struja voda, kako se on ne bi zagrijavao preko 80°C iznosila $I = 560,5134 [A]$.

4.3.5. Struje tokom dana – 15.8.2021.

U nastavku se nalaze sve dopuštene struje dalekovoda uzimajući u obzir spomenute 3 mjerne postaje – Bilogora, Daruvar i Gorice. U tablicama (Tab.4.6., Tab.4.7. i Tab.4.8.) će biti sve struje za svaki sat u danu uključujući i za gore izračunatih 14h.

Tab.4.6. Sve najveće dopuštene struje kroz dalekovod (0-8h)

Sat (h)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Bilogora (A)	632,75	742,37	697,97	698,14	698,26	614,36	694,7	1021,86	1144,98
Daruvar (A)	514,86	787,71	974,3	452,31	681,06	524,64	829,81	427,45	482,92
Gorice (A)	901,48	913,76	913,93	1222,36	1000,76	1000,81	993,88	933,54	899,84
Dopuštena struja (A)	514,86	742,37	697,97	452,31	681,06	524,64	694,7	427,45	482,92

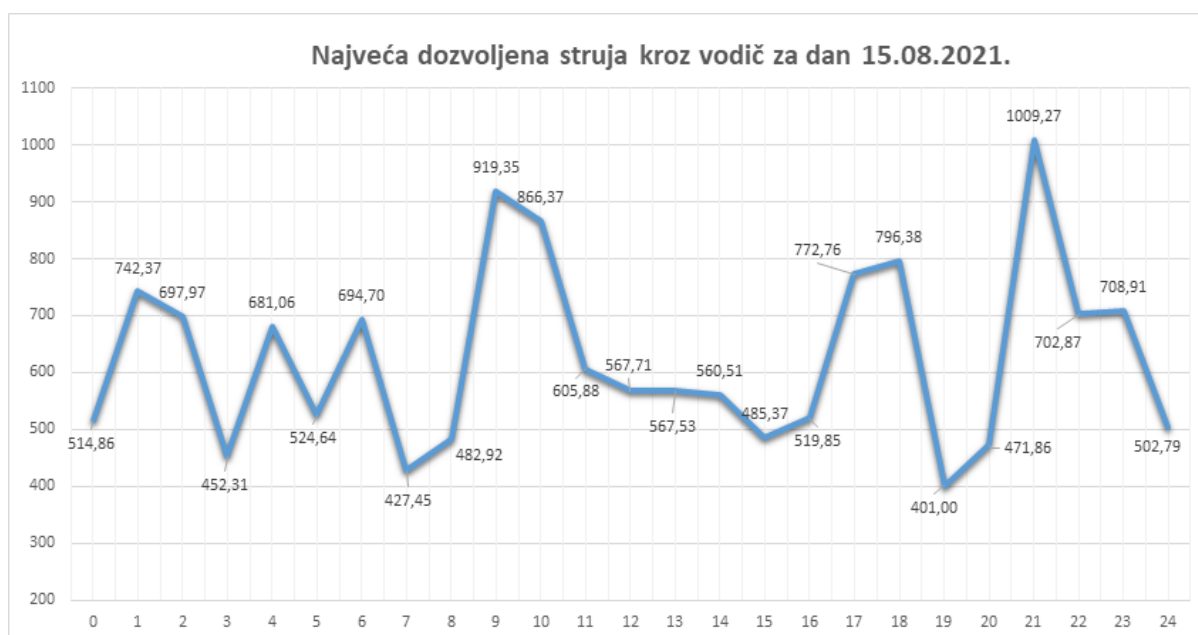
Tab.4.7. Sve najveće dopuštene struje kroz dalekovod (9-17h)

Sat (h)	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Bilogora (A)	1005,23	866,37	605,88	567,71	567,53	560,51	837,78	822,90	808,61
Daruvar (A)	919,35	1062,11	720,09	806,34	850,52	842,65	840,43	729,67	977,06
Gorice (A)	934,64	1062,08	1089,34	1072,98	1112,65	824,23	485,37	519,58	772,76
Dopuštena struja (A)	919,35	866,37	605,88	567,71	567,53	560,51	485,37	519,58	772,76

Tab.4.8. Sve najveće dopuštene struje kroz dalekovod (18-24h)

Sat (h)	18	19	20	21	22	23	24
Bilogora (A)	796,38	401,00	1687,73	1539,39	1072,93	1106,91	1018,23
Daruvar (A)	820,5	404,95	471,86	1009,27	702,87	708,91	502,79
Gorice (A)	848,42	83943	597,49	1221,29	1244,25	1289,57	906,19
Dopuštena struja (A)	796,38	401,00	471,86	1009,27	702,87	708,91	502,79

Slika 4.13. prikazuje grafički prikaz najvećih dozvoljenih struja kroz dalekovod tijekom 15.08.2021. izvučenih iz gore napisanih tablica.



Slika 4.13. Najveće dozvoljene struje kroz vodič tijekom 15.08.

Ako se pogledaju podaci iz tablica Tab.4.2., Tab.4.3. te Tab.4.4. te iz ovih tablica gore, može se doći do zaključka kako dopuštena struja jako ovisi o smjeru puhanja vjetra odnosno kutu te samoj brzini vjetra koja uvelike ima utjecaj u hlađenje voda.

To se može zaključiti slijedećim primjerom kada je struja iznosila najvećih dotad, a i u danu – 1687,73 A. Pogledamo li posebno ulazne podatke za 20h npr. za mjernu postaju Bilogora, možemo vidjeti kako je brzina vjetra bila 9 m/s te da je kut puhanja vjetra u dalekovod bio sjeverozapadni (prema tablici Tab.4.5. on iznosi $135,2625^\circ$). Kut vjetra je bio takav da je udarao u površinu vodiča i nije toliko strujao njegovom površinom. Ipak, brzina vjetra bila je velika te je zbog toga došlo do velikog hlađenja vodiča. S druge strane, ako se opet pogledaju rezultati može se vidjeti kako je najniža struja bila u 19h također u mjernoj postaji Bilogora. Tada je brzina puhanja vjetra bila samo 0,5 m/s, a vjetar je puhao iz južnog smjera odnosno kut puhanja vjetra je bio najmanji. Iako je vjetar strujao cijelom površinom vodiča, brzina je bila minimalna stoga hlađenja skoro pa i nije bilo te je zbog toga struja bila najmanja.

Da se primijetiti kako su razlike u struji velike, skoro pa duplo. Može se zaključiti kako smjer puhanja vjetra te njegova brzina imaju jako veliki utjecaj u hlađenju vodiča odnosno prijenosu struje. Naravno, za visinu struje ne utječu samo ova dva gore navedena parametra. Također utječu i temperatura okoline, vlažnost zraka, gustoća zraka itd..

5. ZAKLJUČAK

Uloga dalekovoda u elektroenergetskom sustavu je vrlo važna. Njima se prenose velike količine električne energije krajnjim korisnicima kojima je ona potrebna za normalan život. Kako bi prijenos struje dalekovodima tekao normalno bez prevelikih problema, u obzir se moraju uzeti određeni meteorološki uvjeti i parametri dalekovoda. Tako nam proizvođači za svaku vrstu dalekovoda daju optimalne i kritične vrijednosti parametara. Uzimajući ih u obzir uz meteorološke uvjete, dolazimo do kvalitetnog i sigurnog prijenosa struje i električne energije od elektrana do potrošača.

Gledajući proračunom dobivene rezultate možemo zaključiti kako meteorološki uvjeti uvelike utječu na prijenos struje dalekovodima. Jako velik utjecaj na zagrijavanje vodiča, a samim time i prijenos struje uz temperaturu okoline imaju brzina i smjer kretanja vjetra. Što je brzina vjetra veća tada dolazi do većeg hlađenja voda, a samim time i većeg prijenosa struje. Isto tako ako je brzina vjetra manja – dolazi do manjeg hlađenja i manjeg prijenosa struje. Nije bitna samo brzina vjetra, bitan je i kut između smjera vjetra i osi voda. Ako vjetar u vod udara okomito doći će do minimalnog skoro pa i nikakvog hlađenja. Odnosno što je kut manji tada dolazi do većeg strujanja vjetra površinom voda, a s time dolazi i do većeg hlađenja.

Nadstrujnom zaštitom dalekovoda daleko je lakše kontrolirati prijenos struje dalekovodom nego preko strujno – temperaturnog standarda koji je u ovom radu opisan. On se u praksi ne koristi, iako se uz ovaj standard dolazi do kvalitetnije kontrole i većeg prijenosa struje što je svakako svima u cilju. Nadstrujna zaštita se može dinamički programirati kako bi pratila promjenu dopuštene struje u teoriji, u praksi je to malo teže jer se nailazi na nekoliko problema npr. mora se odabrati vremenski period kada će se nadstrujna zaštita mijenjati. Još jedan problem na koji se nailazi je taj što mora postojati jedan sustav spojen na relej koji je na privatnoj mreži te koji će biti spojen na Internet kako bi prikupljao meteorološke podatke. Tu postoji kontakt s vanjskom mrežom te samim time se mogućnost *cyber* napada povećava. Kada se sve sagleda, nadstrujnu zaštitu se može dinamički programirati ali je taj postupak dosta nezgodan za napraviti bez potencijalnih problema.

LITERATURA

- [1] V. Lovrenčić, M. Kovač, M. Krevelj, Dinamički temperaturni monitoring nadzemnih vodova prijenosnog sustava, 10. simpozij o sustavu vođenja EES-a, str. 1 – 10, Opatija, 2012.
- [2] A.P. Apostolov, D. Tholomier, S.H. Richards, Distance protection and dynamic loading of transmission lines, IEEE Power Engineering Society General Meeting, str. 1 – 6, Denver, SAD, 2004.
- [3] L. Bena, V. Gáll, M. Kanálik, M. Kolcun, A. Margitová, A. Meszáros, J. Urbansky, Calculation of the overhead transmission line conductor temperature in real operating conditions, Electr Eng, 103, str. 769 – 780, Rujan, 2020.
- [4] I. Petrović, H. Glavaš, Ž. Hederić, Current – temperature analysis of the ampacity of overhead conductors depending on applied standards, Journal of Energy Technology, 7, str. 11 – 28, Svibanj, 2014.
- [5] IEEE Working Group, IEEE 738-2012 Standard for Calculating the Current-Temperature of Bare Overhead Conductors, Revision of IEEE Std 738-2006, SAD, 2013, url: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6692858> [4.9.2021.]
- [6] M. Strobach, U. Straumann, C. M. Franck, Smart Energy Transmission: Dynamic Thermal Rating, Smart Energy Strategies SES, str. 1 – 4, Zurich, Švicarska, 2011, url: https://www.researchgate.net/publication/324720463_Smart_Energy_Transmission_Dynamic_Thermal_Rating [30.8.2021.]
- [7] E. Lindberg, The Overhead Line Sag Dependence on Weather Parameters and Line Current, Department of Earth Sciences Uppsala University, Uppsala, Švedska, 2011, url: <https://www.semanticscholar.org/paper/The-overhead-line-sag-dependence-on-weather-and-Lindberg/619f6f969445f7d633cf1e7bdc97154b3b736a96#paper-header> [2.9.2021.]
- [8] W. H. McAdams, Heat Transmission, 3rd ed., McGraw-Hill, New York, SAD, 1954.
- [9] US Navy Hydrographic Office, Sight Reduction Tables for Air Navigation, Washington, SAD, 1961.
- [10] V. T. Morgan, The Current Carrying Capacities of Overhead Line Conductors, IEEE/PES Summer Meeting, str. 1 – 67, Los Angeles, SAD, 1978.

- [11] Google Maps, url: <https://www.google.com/maps> [29.8.2021.]
- [12] National Oceanic and Atmospheric Administration Internet alat, url: <https://www.nhc.noaa.gov/gccalc.shtml> [29.8.2021.]
- [13] Podaci o ACSR vodičima proizvođača GeneralCable, url: http://www.stabiloy.com/NR/rdonlyres/9E21DB59-9342-4B2A-9B78-823C8FB86BA3/0/GC_pg7390_TransPwr_ACSR.pdf [1.9.2021.]
- [14] Free Map Tools – elevation finder Internet alat, url: <https://www.freemaptools.com/elevation-finder.htm> [1.9.2021.]
- [15] Državni hidrometeorološki zavod, url: <https://meteo.hr/> [1.9.2021.]
- [16] Slika preuzeta sa stranice Aluminium PowerCable, url: <https://www.aluminumpowercable.com/sale-11878566-acsr-bare-conductor-cable-with-steel-heart-basic-design-to-bs-215-2-bs-en-50182-iec-61089.html> [29.8.2021.]
- [17] Slika preuzeta sa stranice E-skole, url: <https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/3ac8074c-0cca-435a-9000-fecbad5443ab/na-koju-stranu-krenuti.html> [29.8.2021.]

SAŽETAK

Cilj ovog diplomskog rada je proučiti strujno – temperaturni standard IEEE grupe koji se odnosi na proučavanje utjecaja meteoroloških uvjeta na goli nadzemni vodič kao i utjecaja parametara vodiča danih od samih proizvođača. Naglasak rada je na izradi proračuna prema gore spomenutom standardu na ACSR vrsti vodiča. Nakon poglavlja u kojem se detaljno opisuje svaki korak potreban za rješavanje standarda slijedi poglavlje samog proračuna. Proračun je prikazan za samo jedan dan u godini i određen sat u danu. U prvom dijelu proračuna objašnjeni su svi potrebni ulazni podaci za isti. Drugi dijelom se prikazuje sami izračun najveće dopuštene struje voda s obzirom na tri referentne mjerne postaje. Proučenim teorijskim dijelom te rezultatima proračuna se dolazi do samog zaključka o tome koji sve meteorološki uvjeti i parametri dalekovoda utječu na što kvalitetniji prijenos struje.

Ključne riječi: Dalekovod, IEEE standard, strujno – temperaturni odnos, struja, temperatura, dinamičko opterećenje, proračun, mjerna postaja, ACSR vodič.

ABSTRACT

The scope of this thesis is to study the IEEE current-temperature standard which refers to the study of meteorological parameters on a bare stranded overhead line as well as the impact of line parameters given by the manufacturer. The essence of the thesis is to provide a calculated estimate by the given standard on an ACSR line type. After the chapter in which the calculus is given in great detail the chapter with the calculus itself follows. The calculus is given only for one day of the year and for a specific hour. In the first part of the calculus all of the needed variables are explained. The second part given a calculated estimate of a line current regarding 3 meteorological stations nearby. With regards to the study and the calculus results, a conclusion about which meteorological conditions and parameters of the transmission line affect energy transmission can be derived.

Key words: Overhead line, IEEE standard, current – temperature relation, current, temperature, dynamic load, calculus, measuring station, ACSR conductor.

ŽIVOTOPIS

Karlo Šekerija rođen je u Osijeku 08.06.1997. godine. Nakon završetka Osnovne škole u Višnjevcu upisuje Elektrotehničku i prometnu školu Osijek, smjer tehničar za računalstvo. Nakon završetka srednje škole odlučuje se upisati na preddiplomski sveučilišni studij elektrotehnike na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku. Na drugoj godini opredjeljuje se za izborni blok elektroenergetike. Nakon završenog preddiplomskog studija elektrotehnike, 2019. godine upisuje diplomski studij elektrotehnike, smjer Elektroenergetika, izborni blok DEA – Elektroenergetski sustavi. Tokom diplomskog studija pohađao je praksu u Hrvatskom operatoru prijenosnog sustava (HOPS) Osijek. Uz dvije godine kao član studentskog zbora, bio je član i studentske volonterske organizacije IEEE kao i njegovog ogranka za energetiku IEEE Power and Energy Society.