Proračun dinamičkoga dopuštenoga termičkog opterećenja nadzemnih vodova

Pavlinić, Alen

Doctoral thesis / Disertacija

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:190:448324

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Image not found or type unknown *Repository / Repozitorij:*

Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering

Image not found or type unknown

SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET

ALEN PAVLINIĆ

PRORAČUN DINAMIČKOGA DOPUŠTENOGA TERMIČKOG OPTEREĆENJA NADZEMNIH VODOVA

DOKTORSKA DISERTACIJA

RIJEKA, 2020.

SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET

ALEN PAVLINIĆ

PRORAČUN DINAMIČKOGA DOPUŠTENOGA TERMIČKOG OPTEREĆENJA NADZEMNIH VODOVA

DOKTORSKA DISERTACIJA

MENTOR: red. prof. dr. sc., Vitomir Komen
KOMENTOR: izv. prof. dr. sc., Dubravko Franković

RIJEKA, 2020.

UNIVERSITY OF RIJEKA
FACULTY OF ENGINEERING

ALEN PAVLINIĆ

CALCULATION OF OVERHEAD LINE DYNAMICAL THERMAL RATING

DOCTORAL THESIS

RIJEKA, 2020.

Povjerenstvo za ocjenu doktorske disertacije:

1._____

2._____

3._____

4._____

5._____

Doktorska disertacija obranjena je dana _____ u/na _____.

Povjerenstvo za obranu doktorske disertacije:

1._____

2._____

3._____

4._____

5._____

ZAHVALA

Posebno se zahvaljujem profesorima Vitomiru Komenu i Dubravku Frankoviću zbog prihvaćanja mentorstva i komentorstva moga rada te na angažmanu i pomoći oko pripreme doktorske disertacije i tijekom doktorskoga studija. Zahvaljujem i ostalim profesorima Tehničkog fakulteta koji su mi pomogli prilikom izrade ovoga rada, posebice profesoricama Nelidi Črnjarić Žic i Senki Mačešić. Nadalje, zahvaljujem Tehničkom fakultetu Sveučilišta u Rijeci na prihvaćanju moje disertacije. Konačno, posebno se zahvaljujem mojoj obitelji i prijateljima, na podršci, ljubavi i strpljenju iskazanima prilikom izrade ove doktorske disertacije.

SAŽETAK

Dopušteno termičko opterećenje vodiča nadzemnih elektroenergetskih vodova predstavlja ograničenje u trajanju i vrijednosti struje voda s ciljem da se temperatura vodiča održi ispod maksimalno dozvoljene temperature. Stacionarno dopušteno termičko opterećenje je ovisno o frekvenciji, fizikalnim svojstvima vodiča, zemljopisnim parametrima voda te o četiri aksijalno promjenjiva klimatska uvjeta (brzina vjetra, kut vjetra, intenzitet Sunčeva zračenja te temperatura okoline). Dinamičko odnosno kratkotrajno dopušteno termičko opterećenje je pored navedenih veličina ovisno i o početnoj temperaturi vodiča te o definiranomu vremenskom periodu za koje se određuje. Kroz rad se sagledavaju razlike i utjecajni parametri pojedinih metodologija proračuna stacionarnoga odnosno dinamičkog dopuštenog termičkog opterećenja alučeličnih vodiča. Same razlike među metodologijama proračuna određuju se na razini algoritama te ulaznih parametara korištenih u samim proračunima. Dodatno, razlike među metodologijama utvrđuju se numerički za razmatrane slučajeve i analizirane alučelične vodiče. Efekt utjecajnih parametra na dopuštena termička opterećenja sagledava se definiranjem i numeričkim određivanjem koeficijenta osjetljivosti. Posebno se analizira osjetljivost dopuštenih termičkih opterećenja na brzinu vjetra, kut vjetra, intenzitet Sunčeva zračenja te temperaturu okoline. U radu je razvijena izvorna metodologija proračuna dinamičkoga dopuštenog termičkog opterećenja bazirana na rješavanju problema nelinearnog programiranja. Izvršena je reprezentativna usporedba novo razvijene metodologije s postojećim metodama te je time ocijenjena opravdanost njene primjene.

KLJUČNE RIJEČI: dopušteno opterećenje; nadzemni vod; temperatura vodiča; pametne mreže;

ABSTRACT

The line ampacity represents a limitation in magnitude and duration of the line current aiming at restricting the conductor temperature below the maximum allowable conductor temperature. The steady-state line ampacity is dependent on the frequency, physical properties of conductor, geographical position of the line and on four axially variable weather parameters (wind speed, wind angle, solar radiation intensity and ambient temperature). The dynamic line ampacity in addition to mentioned parameters is also dependent on the initial conductor temperature and period of calculation. Through the work the differences and impact parameters between the methodologies for steady-state and dynamic line ampacity of aluminium steel-reinforced conductors are analysed. The differences between the methodologies are determined upon analysing the algorithms and input parameters used in the calculations. Additionally, the differences are numerically calculated for the analysed cases and aluminium steel-reinforced conductors. The effect of the impact parameters on the line ampacity is examined by defining and numerically calculating the sensitivity coefficients. Through these coefficients the sensitivity of the line ampacity on the wind speed, wind angle, solar radiation intensity and ambient temperature is especially analysed. In addition, a new methodology for calculating the dynamic line ampacity by solving a nonlinear programming problem is developed. This new methodology is compared with the existing methods and the applicability of the new method is discussed.

KEYWORDS: line ampacity; overhead line; conductor temperature; smart grid;

SADRŽAJ

1. UVOD 1
1.1 Predmet istraživanja 1
1.2 Dosadašnja istraživanja 3
1.3 Ciljevi istraživanja i postavljene hipoteze 5
1.4 Metodologija istraživanja 6
1.5 Očekivani znanstveni doprinosi 7
1.6 Struktura doktorske disertacije 8
2. POJAM I NAČINI ODREĐIVANJA DOPUŠTENIH TERMIČKIH OPTEREĆENJA NADZEMNIH VODOVA 10
3. ANALIZA METODOLOGIJA PRORAČUNA STACIONARNOG DOPUŠTENOG TERMIČKOG OPTEREĆENJA 21
3.1 Jednadžba stacionarne toplinske ravnoteže 21
3.1.1 Izmjenični otpor po jedinci duljine (R_{ac}) 22
3.1.2 Snaga dovođenja topline uslijed Sunčeva zračenja po jedinici duljine (P_s) 28
3.1.3 Snaga odvođenja topline uslijed konvekcije po jedinici duljine (P_c) 31
3.1.4 Snaga odvođenja topline uslijed radijacije po jedinici duljine (P_r) 35
3.2 Radijalna distribucija temperature vodiča 36
3.3 Metodologije proračuna stacionarnih dopuštenih termičkih opterećenja 39
3.4 Metodologije proračuna koeficijenta osjetljivosti stacionarnog dopuštenog termičkog opterećenja 42
3.5 Proračun stacionarnih dopuštenih termičkih opterećenja realnih ACSR vodiča 44
3.5.1 Ulazni podaci u proračunu stacionarnog dopuštenog termičkog opterećenja 44
3.5.2 Analiza rezultata bez uzimanja u obzir radijalne distribucije temperature vodiča 46
3.5.3 Analiza rezultata s uzimanjem u obzir radijalne distribucije temperature vodiča 54
3.5.4 Zaključci analize rezultata proračuna stacionarnog dopuštenog termičkog opterećenja 55
4. ANALIZA POSTOJEĆIH METODOLOGIJA PRORAČUNA DINAMIČKOG DOPUŠTENOG TERMIČKOG OPTEREĆENJA 57
4.1 Jednadžba dinamičkog termičkog stanja vodiča 57

4.2 Metoda proračuna dinamičkog dopuštenog termičkog opterećenja primjenom Runge-Kutta metode četvrtog reda 60
4.3 Metoda proračuna dinamičkog dopuštenog termičkog opterećenja primjenom metode linearizacije 65
4.4 Izračun koeficijenta osjetljivosti dinamičkog dopuštenog termičkog opterećenja 67
5. PRIMJENA METODE DIREKTNE KOLOKACIJE U PRORAČUNU DINAMIČKOG DOPUŠTENOG TERMIČKOG OPTEREĆENJA 69
5.1 Definiranje problema optimalnog upravljanja 69
5.2 Proračun dinamičkog dopuštenog termičkog opterećenja primjenom metode direktne kolokacije 71
6. ANALIZA REZULTATA PRORAČUNA DINAMIČKOG DOPUŠTENOG TERMIČKOG OPTEREĆENJA 77
6.1 Ulazni podaci radi proračuna dinamičkog dopuštenog termičkog opterećenja 77
6.2 Rezultati proračuna dinamičkog dopuštenog termičkog opterećenja uz vremenski konstantne klimatske uvjete bez uzimanja u obzir radijalne distribucije temperature vodiča 80
6.3 Rezultati proračuna dinamičkog dopuštenog termičkog opterećenja uz vremenski konstantne klimatske uvjete s uzimanjem u obzir radijalne distribucije temperature vodiča 97
6.4 Rezultati proračuna dinamičkog dopuštenog termičkog opterećenja uz vremenski promjenjive klimatske uvjete 100
6.5 Zaključci analize rezultata proračuna dinamičkog dopuštenog termičkog opterećenja 102
7. ZAKLJUČAK 105
POPIS LITERATURE 107
POPIS SIMBOLA 115
POPIS SLIKA 119
POPIS TABLICA 120
PRILOG A 121
PRILOG B 122
PRILOG C 125
PRILOG D 127
PRILOG E 127
PRILOG F 129
PRILOG G 130

PRILOG H 135
PRILOG I 137
PRILOG J 139
PRILOG K 141
PRILOG L 143
PRILOG M 145
PRILOG N 146
PRILOG O 150
PRILOG P 153
PRILOG R 155
ŽIVOTOPIS 157

1. UVOD

1.1 Predmet istraživanja

Kontinuirani porast potrošnje električne energije iziskuje potrebe za sve većim prijenosnim snagama elektroenergetskih vodova. To se može ostvariti izgradnjom novih distribucijskih i prijenosnih nadzemnih vodova, odnosno povećanjem prijenosne moći postojećih vodova. Iz prostornih i ekoloških razloga, mogućnosti izgradnje novih vodova su ograničene, te se intenzivno razvijaju suvremena rješenja za povećanje prijenosnih snaga postojećih vodova. U ta rješenja ubrajaju se metode točnijeg izračunavanja prijenosnih snaga, uvođenja sustava za dinamički monitoring praćenja nadzemnih voda te novih tehnologija izvedbe vodiča nadzemnih vodova [1-6].

Na prijenosnu snagu nadzemnih vodova utječu razni faktori povezani sa stabilnošću elektroenergetskoga sustava, načinom njegove regulacije te troškovima koje uzrokuju gubici električne energije na samim vodovima [7-10]. No, dominantni ograničavajući faktor prijenosne moći, posebice kod kraćih vodova, čini zapravo dopušteno termičko opterećenje (DTO). Trajno DTO se prema postojećim metodologijama proračuna u hrvatskoj praksi definira pri temperaturi vodiča od 80 ˚C uz veoma konzervativne vrijednosti klimatskih uvjeta [11]. Realno se temperatura vodiča ograničava s ciljem da se udovolje zahtjevi za: propisanim sigurnosnim visinama, razmakom između pojedinih vodiča te radi zaštite od gubitka čvrstoće ili trajnog oštećenja vodiča uzrokovanog prekomjernim zagrijavanjem [11-12]. Samo DTO vodiča nadzemnoga voda uvelike ovisi o prisutnim klimatskim uvjetima. Stoga, razmatranje metodologija proračuna DTO-a u ovisnosti o promjenjivim klimatskim uvjetima, čini ključ razvoja raznih sustava koji njegovim predviđanjem odnosno određivanjem u realnom vremenu omogućuju maksimizaciju prijenosne snage, uz istovremeno zadovoljavanje svih ostalih sigurnosnih aspekata propisanih za nadzemne vodove.

Kroz sam rad sustavno se konstruiraju i analiziraju razni algoritmi proračuna stacionarnog i dinamičkog DTO-a te se razvija vlastita metodologija proračuna dinamičkog DTO-a. Kroz primjere izračuna i algoritamski se definiraju i utvrđuju razlike u pojedinim metodologijama proračuna i definiraju njihova ograničenja primjene, a sve u pogledu određivanje optimalne metode u svrhu implementacije u modernim

sustavima za dinamičko određivanje DTO-a. U posebnome su fokusu svjetski priznate metodologije dane u IEEE 738-2012 standardu i Cigre 601 tehničkoj brošuri [1-2]. Ovisno o složenosti pojedine metodologije na jednostavniji ili složeniji način uzimao se u obzir utjecaj izmjeničnog otpora te radijalne distribucije temperature vodiča. Za vodove tipičnih presjeka u prijenosnom sustavu Republike Hrvatske izrađeni su konkretni algoritmi u Matlab programu te su sagledani svi relevantni rezultati usporedbe i osjetljivosti samih metodologija izračuna. Rad uvodi novitet istraživanja osjetljivosti DTO-a kroz koeficijente osjetljivosti. U slučaju stacionarnog DTO-a koeficijenti osjetljivosti definiraju se kao parcijalne derivacije DTO-a u odnosu na klimatske uvjete (brzinu vjetra, kut vjetra, intenzitet Sunčeva zračenja te temperaturu okoline). U slučaju dinamičkog DTO-a proučava se identičan odnos, ali se parcijalne derivacije aproksimiraju konačnim razlikama. Samim koeficijentima osjetljivosti proučen je utjecaj promjene pojedinih utjecajnih parametra na sam iznos stacionarnog i dinamičkog DTO-a. Posebice se detaljno analizira utjecaj pojedinih klimatskih uvjeta. U sklopu same analize osjetljivosti sagledava se i kojim uvjetima mora udovoljavati oprema u sustavima dinamičkog određivanja DTO-a, u svrhu uspješnog praćenja DTO-a u realnome vremenu. Dodatno, u radu se razrađuju i algoritmi proračuna DTO-a uz radijalnu distribuciju temperature te se prikazuju kriteriji kada je moguće zanemariti radijalnu distribuciju temperature vodiča.

U pogledu dinamičkog DTO-a posebno se analiziraju metode proračuna bazirane na iterativnom rješavanju, odnosno linearizaciji nelinearne jednadžbe dinamičkog termičkog stanja vodiča nadzemnoga voda [14-16]. U sklopu dinamičkog DTO-a razvija se nova metoda proračuna koja se bazira na pretvorbi problema određivanja dinamičkog DTO-a u problem optimalnog upravljanja. Time je stvoren novi algoritam izračuna baziran na primjeni metode direktne kolokacije [17], [161-165]. U navedenom postupku problem rješavanja nelinearne diferencijalne jednadžbe transformira se u problem nelinearnog programiranja koji se potom rješava primjenom sekvencijalnoga kvadratnog programiranja ili sličnih postupaka [18-19], [166-175]. Postojeće i nova metodologija su uspoređene te je zaključeno da novo razvijena metodologija daje zadovoljavajuće rezultate uz mogućnost jednostavne implementacije u postojeće sustave dinamičkog određivanja DTO-a. Dodatno, metoda simplificira postupak traženja konačnoga rješenja u odnosu na postojeće metode koje iterativno povećavaju odnosno smanjuju struju do pronalaska konačne vrijednosti

DTO-a. Kompletna provjera metode i utvrđivanje razlika u proračunima određuje se i numerički na realnim alučeličnim (ACSR) vodičima.

1.2 Dosadašnja istraživanja

Na tematiku metodologija proračuna DTO-a izdano je mnoštvo znanstvenih članaka, knjiga i konferencijskih radova [1-3], [11-16], [20-28], [134], [136], [157-158]. Analizom postojećih istraživanja, prije svega, zaključeno je da se metodologije proračuna DTO-a prema načinu izračuna mogu podijeliti na one bazirane na složenom numeričkom modeliranju te na standardnim metodologijama [1-2], [20-28]. Složene numeričke metode, iako imaju veću točnost izračuna DTO-a, nisu našle širu primjenu u modernim sustavima dinamičkog određivanja DTO-a radi sporosti izračunavanja rezultata. Stoga se u modernim sustavima tipično primjenjuje konzervativniji pristup putem standardnih metodologija. Unutar takvih sustava, ovisno o tipu mjerenih veličina na kojima se bazira rad sustava, određivanje DTO-a se provodi kroz jedan odnosno nekoliko različitih koraka koja mogu obuhvaćati i do nekoliko vrsta proračuna. Mjerene veličine u takvim sustavima obuhvaćaju klimatske uvjete i/ili parametre voda (provjes, sigurnosna visina, temperatura vodiča, sile zatezanja, fazori napona i struja i dr.) [3-4], [27-38], [62-66], [90-95], [98-112]. Upravo radi razvoja takvih sustava u fokusu današnjih istraživanja jesu metodologije proračuna DTO-a, a posebno se razvijaju i algoritmi predikcije DTO-a koji omogućuju ne samo njegovo određivanje u realnom vremenu već i do nekoliko sati odnosno dana unaprijed. Takve predikcije uključuju razne metode vremenske analize niza (regresija, neuronske mreže, *fuzzy* logika, Kalmanovo filtriranje, probabilističke metode i dr.), a za duže periode točnijima su se pokazale metode bazirane na numeričkim prognozama vremena (NPV) [16], [35], [39-44], [71-76]. Suvremeni sustavi uz određivanje DTO-a i njegovih predikcija za određeni unaprijed zadani vremenski period opremljeni su i algoritmima za određivanje provjesa, temperature vodiča te sigurnosnih visina.

Sadašnja istraživanja pokazuju kako je baza izračuna stacionarnog DTO-a stacionarna jednadžba toplinske ravnoteže vodiča nadzemnoga voda, dočim dinamičkog DTO-a je jednadžba dinamičkog termičkog stanja vodiča nadzemnog voda. U stacionarnome stanju vrijedi jednakost topline koju vodič nadzemnoga voda prima i daje u okolinu, dočim je u dinamičkome stanju prisutna vremenska promjena temperature vodiča. U pogledu dinamičke odnosno stacionarne jednadžbe toplinske

ravnoteže pojedine se metode razlikuju u broju članova koje se uzimaju u obzir prilikom izračuna DTO-a. Standardno se uzimaju elementi hlađenja uslijed konvekcijskog i radijacijskog odvođenja topline, odnosno zagrijavanja uslijed Sunčeva zračenja i Jouleovih gubitaka (u kojemu su uračunati magnetski učinci u jezgri) [2-3], [20-26]. Međutim, postoje i metodologije koje uzimaju u obzir zagrijavanje izazvano uslijed fenomena korone na vodovima i hlađenja uslijed padalina [1], [45-46]. Smatra se da je zanemarenje fenomena korone opravdano i ne utječe značajnije na rezultate ukoliko nije prisutna vrlo visoka vlažnost (padaline) uz vrlo visoke brzine vjetra. Efekti hlađenja padalina redovno se zanemaruju jer je teško zaključiti je li aksijalno gledajući raspodjela padalina jednolika uzduž voda [1-2], [47]. Iz navedenih razloga, uz naglasak da se utjecaj ovih efekata uslijed zanemarenja kompenzira, u radu će se zanemariti korona i efekti hlađenja uslijed padalina.

Prilikom proračuna DTO-a velike su razlike prisutne u ovisnosti o zanemarivanju radijalne i/ili aksijalne promjene temperature vodiča [1-2], [20], [26], [48-49], [68], [114-116], [128], [146]. Iz navedenih se istraživanja zaključuje da nije opravdano zanemarivanje takvih raspodjela pri proračunu kod većih gustoća struja (većih od 1 do 3 A/mm^2). Takva zanemarivanja mogu dovesti do previsokog određivanja DTO-a. Navedeno može izazvati prekoračenja sigurnosnih visina vodiča, uslijed veće temperature u jezgri od maksimalno dozvoljene temperature vodiča, odnosno radi zanemarenja aksijalnih promjena utjecajnih parametra uzduž voda. U slučaju aksijalnih metodologija proračuna vrlo je malo izrađenih algoritama koji se koriste pri određivanju DTO-a, već se takve promjene u realnim sustavima uzimaju u obzir aksijalnim postavljanjem mjerne opreme i/ili mjerenjima koja dobro aproksimiraju uvjete na razini zateznog polja (npr. mjerenje provjesa, sile zatezanja i sl.) odnosno kompletnoga voda. Stoga, aksijalno gledajući, bit je u određivanju točke odnosno zateznog polja voda s najgorim klimatskim uvjetima i s opasnošću od prekoračenja sigurnosnih visina, koji na taj način određuju DTO kompletnoga voda koristeći metodologije proračuna koje zanemaruju aksijalnu distribuciju [1-2], [27-38], [68-70]. Upravo iz tih razloga u radu nisu posebno proučene metodologije proračuna koje uzimaju u obzir aksijalne promjene, već se razmatrala isključivo radijalna distribucija u određenim proračunima.

Velike razlike u pojedinim metodologijama uočene su i u načinu izračuna izmjeničnog otpora ACSR vodiča. Naime, izmjenični otpor ACSR vodiča izuzetno je kompleksan za izračun obzirom da je on sam ovisan o temperaturi vodiča, skin efektu,

transformatorskom efektu te magnetskim učincima u jezgri uslijed histereze i vrtložnih struja [1-2], [20-26], [50-53], [118-124]. Efekt blizine radi velike udaljenosti vodiča (izuzev u snopu) uobičajeno je zanemaren [54]. U radu se koristi metodologija dana u prilogu A literature [50] prilikom izračuna izmjeničnog otpora.

Konvekcijsko odvođenje topline je još jedan parametar koji ima jako veliki utjecaj na konačan iznos DTO-a, a ima više različitih oblika ovisno o metodologiji izračuna. Tipično se razlikuju dva proračuna koja uključuju prisilnu (pri brzinama vjetra aproksimativno većim od 0.1 - 0.3 m/s) i prirodnu konvekciju (pri nižim brzinama vjetra) [1-3], [11-16] [20-28], [45-46]. Iako određene metodologije uključuju i proračun miješane konvekcije [1], [134-144]. U radu će biti korištene svjetski priznate metodologije izračuna dane u [1-2]. U načinu proračuna konvekcijskog odvođenja topline postoje velike razlike koje će izazvati relativno velika odstupanja u izračunu DTO-a pojedinim metodologijama.

Sagledavanjem literature pokazuje se da su razlike između pojedinih metodologija proračuna kao i sagledavanje pojedinih utjecajnih parametra (početna temperatura vodiča, duljina trajanja, klimatski uvjeti i značajke voda i vodiča) na sam iznos DTO-a vrlo slabo istražene, a posebice to važi u pogledu dinamičkog DTO-a [1-3], [11-16], [20-28], [55]. Stoga se radom nastoje proučiti razlike i ograničenja primjene među pojedinim metodologijama te definirati ovisnost DTO-a o klimatskim uvjetima i na taj način zaokružiti priča u vidu realnog potencijala primjene stacionarnog i dinamičkog DTO-a.

1.3 Ciljevi istraživanja i postavljene hipoteze

Ciljevi istraživanja ovog doktorskog rada mogu se okarakterizirati kao:

- Modeliranje algoritama postojećih metodologija proračuna DTO-a i usporedna analiza algoritamskih rješenja te utvrđivanje razlika točnosti primjene.
- Određivanje osjetljivosti DTO-a na utjecajne parametre te njihova kvantifikacija kroz statističko modeliranje.
- Izrada nove metodologije proračuna dinamičkog DTO-a, primjenjive u naprednim sustavima dinamičkog određivanja DTO-a.

Prvi cilj predstavlja usporedbu suvremenih algoritama proračuna DTO-a te utvrđivanja razlika kako među pojedinim metodologijama tako i u točnost primjene

određene metodologije. Posebno se navedeno odnosi na ograničenje koje unosi radijalna distribucija temperature vodiča. Drugi se cilj posebno odnosi na istraživanje koeficijenata osjetljivosti dinamičkoga i stacionarnoga DTO-a u prvom redu na klimatske uvjete. Treći se cilj odnosi na izradu metodologije koja se bazira na metodi direktne kolokacije u kojoj se problem određivanja dinamičkog DTO-a svodi na problem rješavanja problema nelinearnog programiranja.

Hipoteze ovog doktorskog rada jesu:

- Postoje značajne razlike u algoritmima postojećih metodologija proračuna DTO-a koje rezultiraju odstupanjem rezultata u određenim uvjetima.
- Od klimatskih uvjeta najveći utjecaj na iznos DTO-a ima brzina vjetra, temperatura okoline, kut vjetra te intenzitet Sunčeva zračenja.
- Izradom nove metodologije proračuna dinamičkog DTO-a postavit će se model koji omogućuje jednostavniju implementaciju u naprednim sustavima dinamičkog određivanja DTO-a.

Prva hipoteza proizlazi iz same usporedbe postojećih metodologija proračuna stacionarnih i dinamičkih DTO-a. Druga je rezultat analize osjetljivosti provedene na konkretnim numeričkim primjerima. Posljednja se odnosi na novitet kojega postavlja doktorska disertacija u vidu drugačije matematičke interpretacije proračuna dinamičkoga DTO-a.

1.4 Metodologija istraživanja

U samom doktorskom radu pristupilo se izradi algoritama postojećih metodologija proračuna kako stacionarnih tako i dinamičkih DTO-a. Odabrani je programski paket Matlab u svrhu izrade algoritama te se izvršila pomna analiza objavljenih istraživanja u dostupnoj literaturi. Složenom statističkom obradom rezultata proračuna DTO-a pomno su se sagledale razlike među pojedinim metodologijama te posebice u pogledu stacionarnog i dinamičkog DTO-a utjecajni parametri na sam iznos DTO-a. Razvijena je vlastita metodologija proračuna dinamičkog DTO-a koja je uspoređena s postojećim metodologijama uz zaključak da predmetna metodologija ne odstupa značajnije od referentnih metoda.

Za dinamički i stacionarni DTO posebno su se obradili algoritmi proračuna DTO-a u pogledu uzimanja u obzir radijalne raspodjele temperature vodiča te samog

proračuna izmjeničnog otpora ACSR vodiča. U pogledu dinamičkog DTO-a, provela se numerička usporedba novo definirane i postojećih metodologija proračuna DTO-a, te su se utvrdile razlike među pojedinim metodologijama koje su okarakterizirane kao izuzetno male. Veliki je naglasak u doktorskoj disertaciji i na sagledavanju utjecajnih parametara na dinamički DTO. Konkretno prikazuje se u kojoj mjeri početna temperatura vodiča, dužina perioda te klimatski uvjeti utječu na sam iznos dinamičkoga DTO-a. Sve navedeno provelo se pri analizi ACSR vodiča tipičnih presjeka za prijenosni sustav Republike Hrvatske.

Konačno se matematičkom analizom objedinjuje te daje završni zaključak kada je moguće uvoditi aproksimacije u proračunima te prikazuje sinteza utjecajnih parametra na stacionarni i dinamički DTO. Dodatno, provodi se i usporedba vrijednosti stacionarnih i dinamičkih DTO-a kako bi se sagledalo kakve prednosti na realnim vodovima donosi opterećivanje u kratkim vremenskim intervalima. Navedenu je informaciju korisno znati prilikom nastupanja izvanrednog odnosno poremećenoga stanja elektroenergetskoga sustava, kada je potrebno relativno često u kratkome vremenskom intervalu povećati prijenos snage određenim ACSR vodičem.

Sam rad dakle matematičkim postupcima prikazuje razlike među pojedinim metodologijama. Razlike se, uz brojčane vrijednosti, određuju i na razini pojedinih elemenata i ulaznih podataka koji se koriste u samoj stacionarnoj odnosno dinamičkoj toplinskoj jednadžbi vodiča nadzemnog voda. Uz definiranje razlika razmatraju se pripadni koeficijenti osjetljivosti DTO-a na pojedine klimatske uvjete. Samim time, uz poznavanje realnih parametra voda i vodiča, moguće je s jedne strane na brzi način procijeniti potencijal određivanja DTO-a u realnom vremenu ovisno o prethodnoj analizi klimatskih uvjeta uzduž voda. S druge strane, navedeni koeficijenti mogu služiti u svrhu definiranja uvjeta za mjernu opremu prisutnu u modernim sustavima za dinamičko određivanje DTO-a.

1.5 Očekivani znanstveni doprinosi

Očekivani znanstveni doprinosi doktorske disertacije su slijedeći:

- Metoda za određivanje primjenjivosti postojećih algoritama proračuna dopuštenoga termičkog opterećenja nadzemnih vodova.

- Kvantifikacija koeficijenata osjetljivosti utjecajnih faktora na stacionarno i dinamičko računanje dopuštenih termičkih opterećenja, bazirana na statističkome modeliranju.
- Metodologija za proračun dinamičkoga dopuštenog termičkog opterećenja bazirana na pretvorbi problema rješavanja nelinearne diferencijalne jednadžbe termičkoga stanja vodiča nadzemnoga voda u problem nelinearnog programiranja.

1.6 Struktura doktorske disertacije

Nakon uvodnih razmatranja doktorske disertacije odnosno definiranja predmeta istraživanja, pregleda dosadašnjih istraživanja, ciljeva istraživanja i postavljanja hipoteza, očekivanoga znanstvenog doprinosa i strukture doktorske disertacije, rad prelazi na drugo poglavlje u kojem se definira pojam DTO-a te način njegova određivanja od starijih načina primjenom koncepta trajnog DTO-a do suvremenih načina baziranih na sustavima za dinamičko određivanje DTO-a. U trećem poglavlju rad pristupa analizi stacionarnih DTO-a. Početak ovoga poglavlja posvećen je jednadžbi stacionarne toplinske ravnoteže vodiča nadzemnog voda i njenim elementima. U ovome se poglavlju detaljno obrađuju pojedini elementi jednadžbe te svi matematički izrazi korišteni u samim metodologijama radi konačnog izračuna stacionarnih DTO-a. Ti elementi uključuju načine proračuna izmjeničnog otpora, snage dovođenja topline uslijed Sunčeva zračenja te odvođenja topline uslijed konvekcije i radijacije. Dodatno, u tome poglavlju definira se pojam i način proračuna radijalne distribucije temperature vodiča. Konačno se definiraju same metodologije proračuna stacionarnoga DTO-a sa i bez uzimanja u obzir radijalne distribucije te koeficijenti osjetljivosti stacionarnog DTO-a na klimatske uvjete. Na kraju poglavlja se na praktičkim primjerima ACSR vodiča prisutnim u prijenosnome sustavu Hrvatske analiziraju rezultati izračuna stacionarnog DTO-a pojedinim metodologijama, potencijala njegove primjene, vrijednosti koeficijenata osjetljivosti te opravdanosti zanemarenja utjecaja radijalne distribucije temperature vodiča pri proračunu. U četvrtom poglavlju rad prelazi na definiranje postojećih metodologija proračuna dinamičkog DTO-a. U ovome se dijelu prvo razrađuje jednadžba dinamičkoga termičkog stanja vodiča nadzemnoga voda i načini izračuna pojedinih elemenata te jednadžbe. Potom se definiraju metodologije izračuna dinamičkoga DTO-a bazirane

na iterativnom rješavanju jednadžbe dinamičkoga termičkog stanja primjenom metode Runge–Kutta četvrtoga reda, odnosno primjenom linearizirane verzije te jednadžbe. U samoj metodi Runge-Kutta četvrtoga reda analizira se i način uzimanja u obzir radijalne distribucije temperature vodiča pri proračunu. Dodatno, definira se i način proračuna koeficijenta osjetljivosti dinamičkog DTO-a. U petom poglavlju definira se vlastita metodologija proračuna, od postavljanja problema optimalnog upravljanja, pa sve do rješavanja problema nelinearnoga programiranja kojom se uspješno određuje dinamički DTO. Dodatno, prikazuje se i proširena verzija metode koja u obzir uzima radijalnu distribuciju temperature vodiča. U šestom poglavlju vrši se numerički izračun i usporedba određenoga dinamičkog DTO-a definiranim metodama te se određuju, za konkretno odabrane vodove, potencijali primjene i koeficijenti osjetljivosti. Konkretno analizira se dinamički DTO, za 10 minutne, 15 minutne i 30 minutne vremenske intervale, uz različite početne temperature. Dodatno, naglašava se važnost uzimanja u obzir vremenskih promjena klimatskih uvjeta. U sedmom se poglavlju iznosi zaključak samog istraživanja te potvrđuje ispravnost postavljenih hipoteza.

2. POJAM I NAČINI ODREĐIVANJA DOPUŠTENIH TERMIČKIH OPTEREĆENJA NADZEMNIH VODOVA

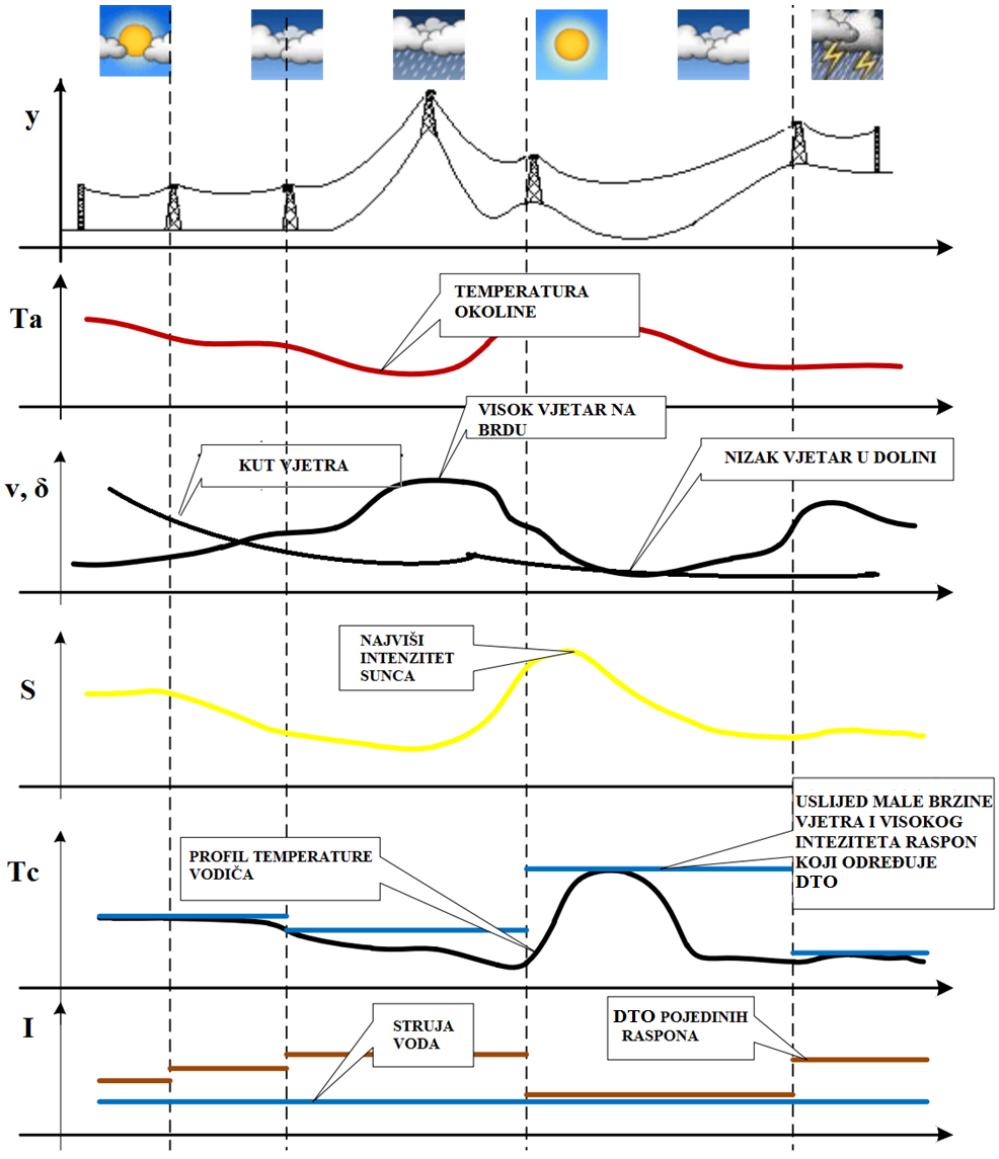
DTO predstavlja ograničenje u trajanju i vrijednosti struje voda s ciljem da se temperatura vodiča održi ispod maksimalno dozvoljene temperature vodiča (T_{max}) [1-3], [11-16], [20-28]. Temperatura vodiča ograničena je s ciljem osiguranja sigurnosti (u vidu sigurnosnih visina i razmaka) i trajnog oštećenja vodiča uzrokovanog prekomjernim zagrijavanjem [11-12], [56-57].

S obzirom na način proračuna razlikuje se: stacionarno i dinamičko DTO. Stacionarno DTO predstavlja konstantu vrijednost struje koja zagrijava vodič do temperature T_{max} uz pretpostavku termalne ravnoteže te uz dane karakteristike vodiča i voda pri određenim vremenski konstantnim klimatskim uvjetima [1-2], [13], [16], [20], [25]. Dinamički DTO predstavlja konstantu vrijednost struje, koja povećava temperaturu vodiča s početne temperature (T_{cin}) na T_{max} u definiranome vremenskom intervalu, uz pretpostavku da nije prisutna toplinska ravnoteža te uz dane karakteristike vodiča i voda pri vremenski konstantnim i/ili promjenjivim klimatskim uvjetima [1-3], [14-16], [20-24], [45-46]. Temeljno je stacionarni DTO ovisan o frekvenciji, fizikalnim svojstvima vodiča i geografskim parametrima voda te o četiri aksijalno promjenjiva klimatska uvjeta: brzina vjetra (v), kut vjetra (δ), globalni intenzitet Sunčeva zračenja (S) te temperatura okoline (T_a). Dinamički DTO je uz te parametre ovisan i o početnoj temperaturi vodiča te o vremenskom intervalu za koji se određuje. Na Slici 1. je za slučaj jednog dalekovoda zorno prikazana aksijalna promjena DTO-a, temperature vodiča (T_c) te klimatskih uvjeta.

S aspekta načina na kojem se vrši određivanje DTO razlikuje se trajno DTO, DTO bazirano na studijama i varijabilno DTO [4-5], [12], [16], [27-38], [58-66].

Trajno se DTO koristi ukoliko se ne vrše nikakva istraživanja klimatskih uvjeta konkretno zadanoga voda, a bazirano je na njihovoj najgoroj kombinaciji. Temeljna je preporuka da se u tom slučaju unutar samih proračuna uzme u obzir efektivna brzina vjetra od 0.6 m/s (kut vjetra od 90 º), uz temperaturu okoline izjednačenu s najvišom očekivanom na trasi dalekovoda (izjednačeno s maksimalnim mjerenjima predmetnog područja) te pri globalnom intenzitetu Sunčeva zračenja od 1000 W/m^2. Pri tome faktor apsorpcije Sunčeva zračenja uzima se u iznosu od 0.8, a faktor emisije u iznosu ne manjem od 0.1 od faktora apsorpcije. Preporuka je i smanjenja efektivne brzine vjetra

na 0.4 m/s ili redukcije T_{max} za 10 °C, u slučaju da dalekovod ima uski i zaklonjeni koridor, odnosno ako su vodiči dalekovoda ispod visine krošnji okolnih stabala ili prolaze između određenih građevina. Dodatno, trajno DTO se može određivati sezonski uz promjenu maksimalne temperature okoline ovisno o njenom iznosu u određenom razdoblju godine [58]. U Hrvatskoj se praksi prema [11] trajno DTO određuje uz efektivni vjetar od 0.6 m/s i T_a=40 °C pri temperaturi vodiča od 80 °C bez uzimanja u obzir ostalih faktora.



Slika 1. Aksijalna promjena DTO-a, T_c i klimatskih uvjeta uzduž realnog voda

Kod određivanja DTO-a bazirano na studijama se na bazi realnih mjerenja tokom razdoblja od minimalno godinu dana na samom dalekovodu statistički ocjenjuje DTO za određena vremenska razdoblja tokom godine. Istraživanja mogu obuhvaćati mjerenja klimatskih uvjeta uzduž dalekovoda uz mjerenja pojedinih parametra u

maksimalno 10 minutnim vremenskim intervalima. Dodatno, sama istraživanja mogu obuhvaćati mjerenje određenih parametra vodiča poput temperature vodiča, provjesa, sile zatezanja ili sigurnosnih visina [4-5], [27-38], [58-66].

Varijabilno DTO obuhvaća ili određivanje DTO-a na bazi promjene temperature okoline uz ostale uvjete izjednačene s najgorima ili se u potpunosti prate sve potrebne veličine radi proračuna DTO-a u realnom vremenu. U prvom slučaju preporuka je u smanjenju efektivne brzine na vrijednosti od 0 do 0.4 m/s, a noću se S uzima u iznosu 0 W/m^2 [58]. U drugom slučaju DTO se određuje suvremenim sustavima dinamičkog određivanja DTO-a koji su bazirani na mjerenjima klimatskih uvjeta i/ili određenih parametra vodiča (provjesa, temperature vodiča, sila zatezanja, sigurnosnih visina). Time je omogućeno u realnom vremenu određivanje DTO-a i njegovih predviđanja [4-5], [27-38], [67]. Predviđanja se vrše na razini nekoliko sati do par dana unaprijed [16], [44], [71], [74-76]. Prema načinu djelovanja razlikuju se četiri osnovna sustava, a to su sustavi bazirani na klimatskom modelu, temperaturnom modelu, na modelu mjerenja provjesa sile/zatezanja te na modelu zasnovanom na uređajima za mjerenje fazora. U nastavku slijedi kratak opis tih sustava i mjerenja koja uključuju. Važno je napomenuti da obuhvaćena mjerenja i postavljeni uvjeti na mjernu opremu vrijede i za slučaj primjene DTO-a baziranih na studijima.

A. Sustavi dinamičkog određivanja DTO-a bazirani na klimatskom modelu

U sustavima baziranim na klimatskome modelu određivanje DTO-a bazira se na mjerenjima najgorih trenutnih (odnosno predviđenih) klimatskih uvjeta (v, δ, T_a i S) na razini određenoga raspona (zateznog polja) promatranog voda. Potom se koristi jednadžba stacionarne toplinske ravnoteže (JSTR) odnosno jednadžba dinamičkoga termičkog stanja vodiča (JDTSV) radi konačnog određivanja stacionarnog odnosno dinamičkog DTO-a [35], [38], [62-66]. Predviđanjima klimatskih uvjeta moguće je određivati i buduća kretanja takvih DTO-a [16], [35], [39-44]. Dodatno, ovi sustavi temeljem mjerenja omogućuju indirektno praćenje stacionarne i trenutne temperature vodiča rješavanjem JSTR odnosno JDTSV uz dostupnost podataka o trenutnoj struji voda [1-2]. Indirektnim praćenjem temperature moguće je iz jednadžbe stanja zateznog polja (JSZP) određivati i provjese odnosno sigurnosne visine na razini pojedinih zateznih polja i na taj način povećati vrijednost takvih sustava [4-5], [12], [27], [57].

Prvi ovakvi sustavi koristili su isključivo lokalna mjerenja iz meteoroloških stanica izravno montiranim na stupove nadzemnih vodova. Samim time klimatski se uvjeti mjere u određenoj točci voda. Određenim tehnikama uprosječnjavanja smatra se da ovako mjereni podaci dobro aproksimiraju prosječne uvjete unutar raspona. Radi uzimanja u obzir aksijalnih promjena klimatskih uvjeta vršila se montaža meteoroloških stanica u više točaka na vodu. Postavljanje meteoroloških stanica na svim stupovima nepraktično je i neekonomično te je uveden koncept kritičnih raspona. U kontekstu kritičnih raspona meteorološke se stanice postavljaju na stupovima u zaklonjenim rasponima (šumama, objektima i sl.), odnosno rasponima u kojima se očekuje mala brzina vjetra ili je vjerojatno da vjetar ima paralelni smjer u odnosu na os vodiča. Dodatno, u nekim slučajevima bazni kriterij postavljanja je, s obzirom na postojanje, mogućnosti prekoračenja sigurnosnih visina u određenim rasponima, a postoje i određeni praktični aspekti koji utječu na konačan izbor (pokrivenost komunikacijskim signalom, adekvatnost montaže i sl.). Stoga, adekvatno postavljanje stanica zahtjeva značajna istraživanja, kako okoline voda tako i promjena klimatskih uvjeta uzduž voda, uz praćenje kritičnih mjesta na kojima su moguća prekoračenja sigurnosnih visina [14], [28], [35], [63-64], [68-70].

Napretkom tehnologije koncept isključivo lokalnih mjerenja proširen je, u jednu ruku na primjenu matematičkih modela koji iz točkasto određenih mjerenja određuju korelacijskim tehnikama aksijalnu raspodjelu klimatskih uvjeta između meteoroloških stanica, a u drugu ruku na korištenju NPV unutar modela ograničenog područja (engl. Limited area region) temeljem vanjskih klimatskih podataka. Navedena integracija novih matematičkih modela kao i korištenja vanjskih podataka u kombinaciji s lokalnim mjerenjima je u fazi istraživanja i ispitivanja [35], [43-44], [71-73].

Klimatske stanice čine bazu ovog modela, a mjerenja u okviru takvih stanica mogu se opisati na slijedeći način:

Mjerenja brzine i kuta vjetra provodi se putem anemometra s propelerom, anemometra s lopaticama i primjenom ultrazvučnih anemometra. Radi točnosti mjerenja sami anemometri trebaju se postaviti na stupu dalekovoda na visinu koja je negdje na razini maksimalnog provjesa vodiča. Tipični raspon mjerenja brzine vjetra je od 0-75 m/s, s točnošću ± 1-2 % i rezolucijom 0.01-0.1 m/s, a kuta vjetra od 0-359 º s točnošću ± 0.5-3 º uz rezoluciju od 0.1-1 º [77-80]. Navedene vrijednosti točnosti

mjerenja mogu biti promijenjene ovisno o konkretnim parametrima vjetra i uvjeta okoline [30], [35], [77-81]. Brzina vjetra kao i kut mogu se u vrlo kratkome vremenskom intervalu naglo i nepredvidivo promijeniti (mogućnosti razlika brizne vjetra i do 12 m/s na pojedinim mjestima voda). Stoga se radi smanjenja varijabilnosti i sigurnosti proračuna koriste razne metode njihova uzimanja u obzir koje uključuju: uprosječnjavanje kuta i brzine vjetra na više minutnim intervalima (tipično 10 min), množenje brzine vjetra s faktorom koji uzima u obzir mjerne pogreške i udaljenost od vodiča te pretpostavljanje kuta vjetra na male iznose od 20 º do 25 º pri nižim brzinama vjetra [28], [35], [44], [71], [81].

Temperatura okoline mjeri se putem klasičnih temperaturnih senzora (termistora, otporničkih termometra, termoparova) [35],[77-80]. Sama temperatura ima gotovo linearan utjecaj na DTO. Aksijalne promjene temperature okoline uzduž voda su veoma male osim ukoliko ne postoje značajne denivelacije vodiča. Pri tome se misli unutar ± 1 ºC razlike na razini zateznoga polja [35]. Kako se sama temperatura okoline mijenja s visinom predlaže se postavljanje na prosječnu visinu vodiča unutar razmatranog dijela voda. Tipični raspon mjerenja temperature okoline je od -40 ºC do 70 ºC, uz rezoluciju manju od ± 0.1 ºC te točnost od 0.1-1 ºC [77-80], [82-84]. Točnost temperaturnih senzora ovisna je o temperaturi [82-84]. Temperatura okoline se tipično uzima u obzir bez uprosječnjavanja.

Radi mjerenja intenziteta Sunčeva zračenja preporuča se uporaba ekonomski prihvatljivijih piranometra. Navedeni uređaji mjere ukupni intenzitet Sunčeva zračenja na vodoravnu plohu (globalni intenzitet). Utjecaj Sunčeva zračenja na DTO može biti velik u slučajevima male brzine vjetra, a obzirom na njegovu veliku promjenjivost uzduž voda (pojava oblaka), važan je i brzi vremenski odziv (obično manji od 3 s do 1 minute). Tipični raspon mjerenja intenziteta je 0-1500 W/m^2 te točnost, ovisno o klasi, varira u rasponu ± 2-5 % [35], [77-80], [85-86].

Pored opreme meteoroloških stanica sustav baziran na klimatskome modelu uključuje strujni mjerni transformator (SMT), pomoćno napajanje, uređaj za registraciju podataka (engl. data logger), komunikacijske uređaje te server. SMT posredno (putem uređaja za registraciju podataka) omogućuje mjerenje struje u jednoj fazi voda (ukoliko se podaci ne preuzimaju iz sustava vođenja). Pomoćno je napajanje najčešće izvedeno putem solarnih panela, regulatora napona i baterije. Uređaj za registraciju podataka komunicira sa senzorikom montiranom na samome vodu putem bežičnih

veza i/ili izravnim žičanim vezama. Ovi su uređaji obično smješteni u upravljačkim kutijama montiranima na stupu dalekovoda ili su integrirani unutar samih kućišta senzora. Svi se podaci unutar uređaja za registraciju podataka spremaju s vremenskom oznakom i rednim brojem. Uređaj za registraciju podataka služi i za djelomičnu pohranu odnosno obradu podataka te je opremljen internom baterijom kako podaci i interno vrijeme ne bi bili izgubljeni u slučaju ispada pomoćnog napajanja. Podaci iz toga uređaja se dalje u komunikacijski sustav šalju putem komunikacijskih uređaja. Najčešće se u slučaju klimatskih stanica koriste mobilne odnosno radio veze. Server je opremljen softverom za izračun DTO-a i ostalih izlaznih veličina koje mogu uključivati: temperaturu vodiča, predviđena DTO-a, provjese te sigurnosne visine. S time da je za potrebe proračuna provjesa i sigurnosnih visina potrebno izračunati temperaturu u jezgri ovisno o opterećenju voda. Dodatno, softver uključuje i dio za podešavanje i prilagođavanje uređaj za registraciju podataka [35], [87-89].

Najveća prednost ovih sustava je u niskim troškovima u odnosu na druge sustave i u velikoj dostupnosti korištene mjerene opreme. Prilikom uvođenja sustava nisu potrebni nikakvi zahvati na samom vodiču nadzemnoga voda, jer se postavljanje meteoroloških stanica obavlja na stupu. Dodatna prednost leži i u činjenici da se ovakvim sustavima formira široka baza podataka o klimatskim uvjetima pomoću koje je moguće bolje određivati i uspoređivati trajno DTO na vodovima. Smatra se da ovi sustavi dobro funkcioniraju pri većim brzinama vjetra [14], [28], [35]. Nedostaci ovakvih sustava, u prvom redu, proizlaze iz složenog postavljanja mjerne opreme u vidu ispravnog praćenja aksijalnih promjena klimatskih uvjeta. Potom sami senzori nisu samo napajajući te zahtijevaju periodično održavanje (posebno anemometri), a kut vjetra pri niskim brzinama je gotovo nemjerljiv [28], [35]. Dodatno, kompletan je sustav mjerenja baziran isključivo na matematičkom modelu te ne postoji izravno praćenje temperature vodiča koja se želi održati unutar zadanih granica [63-64], [68-70].

B. Sustavi dinamičkog određivanja DTO-a bazirani na temperaturnom modelu

U ovim se sustavima izravno mjeri temperatura vodiča, intenzitet Sunčeva zračenja, temperatura okoline te struja voda. Na bazi najgorih trenutnih vrijednosti tih veličina (I, T_c, T_a i S) na razini određenog raspona promatranoga voda primjenom JDTSV estimira se konvekcijsko odvođenje topline. Nakon takve estimacije

konvekcijskog odvođenja topline DTO se izračunava iz JSTR i/ili JDTSV. U svrhu predviđanja uvodi se koncept efektivne brzine vjetra (v_{eff}) koja predstavlja izračunatu vrijednost brzine vjetra prema estimiranom konvekcijskom odvođenju uz pretpostavku kuta vjetra od 90 º. Radi predviđanja budućih kretanja efektivne brzine vjetra koriste se slične tehnike analize vremenskoga niza kao i u slučaju klimatskih parametra, a moguće je korištenje predviđenih klimatskih uvjeta iz NPV. Sukladno određenim najgorem v_{eff} za određena vremenska razdoblja proračun predviđanja DTO se vrši na bazi JSTR i/ili JDTSV. U ovom slučaju se estimiranje konvekcijskog odvođenja topline vrši pri trenutnoj temperaturi vodiča, a ne pri T_{max}. Stoga ovi sustavi bolje funkcioniraju pri većim opterećenjima kada je stvarna temperatura vodiča bliže T_{max} [29], [35], [90-95].

U svrhu praćenja temperature unutar takvih sustava mogu se koristiti temperaturni senzori koji su izvedeni u obliku klasičnih termoparova montiranih izravno na vodiče nadzemnoga voda. Takvi senzori omogućuju mjerenje površinske temperature vodiča u jednoj točci voda. Stoga radi njihovog optimalnog postavljanja i integracije unutar samih sustava vrijede slični uvjeti kao i u slučaju meteoroloških stanica. Tipično se termoparovi postavljaju u uređaju koji omogućuje uz praćenje temperature vodiča i praćenje kuta inklinacije, struje voda, faznih napona te reaktivne i aktivne snage s vremenskom rezolucijom u rasponu do minute. Sami uređaji su samo napajajući putem SMT-a ugrađenog u kućište i interne litijske baterije (uz određenu minimalnu struja prorade i održivo vrijeme napajanja iz baterije). Raspon mjerenja temperature vodiča je u opsegu -40 ºC do 250 ºC sa točnošću 1 ºC i rezolucijom od 0.1 ºC [96]. Dodatno, unutar samoga kućišta integrirani su i uređaji za komunikaciju putem mobilnih ili radio veza. Suvremene mjerene jedinice mogu komuniciraju putem bežičnih tehnologija ili optičkih niti unutar zateznog užeta (*OPGW* vodiča) [35], [96]. Alternativa primjene termoparova je u primjeni optičkih vlakana. Samim time postiže se mjerenje aksijalne raspodjele temperature vodiča na udaljenostima većim od 20 km s rezolucijom mjerenja manjoj od 2 m (ovisno o primijenjenom fizikalnom principu) [96-97]. Stoga ovom se metodom uzima u obzir aksijalna raspodjela temperature vodiča. S druge strane, kako se optička vlakna postavljaju u *OPPC* vodiču smještenom blizu čelične jezgre, mjerena temperatura praktički odgovara temperaturi u jezgri. Tipična uzdužna rezolucija ovakvih sustava je 1-2 m uz točnost mjerenja temperature ± 1-2 ºC na udaljenostima i do 70 km [91], [96-97].

Sustav baziran na temperaturnome modelu koji koristi termoparove se pored temperaturnih senzora, sastoji od meteoroloških stanica, opreme pomoćnog napajanja, uređaja za registraciju podataka, drugih komunikacijskih uređaja te servera sa softverom [29]. S druge strane sustav izveden s optičkim nitima pored tih komponenti (izuzev termoparova) posjeduje završnu jedinicu te upravljačku jedinicu s komunikacijskim uređajima. Sama upravljačka jedinica, ukoliko se koriste optički reflektometri u vremenskom prostoru, sastoji se od lasera, generatora impulsa, optičkih modula prijamnika te mikroprocesora [91], [93-94]. U slučaju da se koriste reflektometri u frekvencijskome prostoru sama upravljačka jedinica se sastoji od lasera, generatora korelacijskog koda ili visokofrekvencijskog miksera, optičkog modula i prijamnika te mikroprocesora [91], [93-94].

Osnovne prednosti ovog sustava naspram drugih su: široka dostupnost ispitanih temperaturnih senzora koji imaju ograničenu pogrešku mjerenja obzirom da su izravno montirani na ili se nalaze u samom vodiču, nema mjerenja brzine i kuta vjetra, kod optičkih se niti ne zahtjeva dodatni komunikacijski sustav te se direktno prati temperatura vodiča kao parametar koji se želi zadržati unutar željenih granica [90-97]. Smatra se da ovi sustavi dobro određuju DTO u uvjetima većeg opterećenja. Osnovni nedostatci ovoga sustava su: montaža temperaturnih senzora i optičkih niti zahtjeva izlazak voda van pogona, aksijalna raspodjela temperaturnih senzora je složena, direktan kontakt senzora s vodičem ima mehaničke, termičke, dielektrične i elektromagnetske utjecaje na vodič [90-95]. Dodatno, prisutni su i visoki troškovi instalacije i održavanja, te se smatra da je uporaba uzdužnog mjerenja temperature vodiča neekonomična za primjenu na postojeće vodove [97].

C. Sustavi dinamičkog određivanja DTO-a bazirani na mjerenju sile zatezanja/provjesa

Ovi sustavi zapravo funkcioniraju identično sustavima baziranim na temperaturnome modelu samo se temperatura vodiča ne mjeri izravno već se određuje na bazi mjernog provjesa odnosno sile zatezanja [35], [98-100]. Mjerena temperatura na ovaj način predstavlja prosječnu aksijalnu temperaturu raspona odnosno zateznog polja u kojem je postavljena mjerna oprema. Radijalno gledajući sama mjerena temperatura predstavlja temperaturu u jezgri [32], [35], [91], [98-100].

U svrhu monitoringa sile zatezanja unutar takvih sustava primjenjuju se pretvornici sile koji se postavljaju između konzole stupa te zateznih izolatora. Tipični nominalni raspon mjerenja sila je od 22.5 kN - 111.25 kN uz izlazni otpor od 350±3 ohma te napajanje 10 V istosmjerno ili 15 V izmjenično [35], [38], [101]. U svrhu praćenja provjesa razvijen je čitav niz metoda. Najvažnije za istaknuti su metode bazirane na mjerenjima putem video kamera, laserske tehnologije, *DGPS (*engl. Differential Global Positioning System) tehnologije, vibracijskih senzora te posrednim mjerenjem inklinacije vodiča odnosno sigurnosne visine. Bez obzira koja se tehnika koristi važno je da se u ovim sustavima provjes mjeri uz točnost od minimalno ± 20 cm [87], [102-108].

Iz mjerene sile zatezanja odnosno provjesa temperaturu vodiča je moguće odrediti na dva načina. Prvi način je postavljanjem jednadžbe stanja zateznog polja, odnosno temeljem poznavanja početnoga stanja (iz početnog zatezanja), moguće je korištenjem mjernih veličina odrediti temperaturu u konačnome stanju koja ujedno predstavlja i mjerenu temperaturu. Opisana prva metoda izračuna temperature vodiča ima određena ograničenja u praktičnoj primjeni. Navedena ograničenja prvenstveno proizlaze iz činjenice da jednadžba stanja automatski podrazumijeva da je naprezanje jednoliko raspoređeno uzduž voda te da je temperatura vodiča konstanta unutar svih raspona. Dodatno, samom metodom se često zanemaruje trajno istezanje te se ne uzima u obzir utjecaj vjetra i snijega. Smatra se da je ovaj pristup dovoljno točan za zatezna polja koja imaju približno iste dužine raspona uz temperaturu vodiča ispod 100 ºC [35], [57], [98]. Alternativa primjeni prve metode čini postavljanje kalibracijskih funkcija. Kalibracijske funkcije predstavljaju odnos između temperature vodiča i provjesa odnosno sile zatezanja [99-100]. Radi postavljanja kalibracijskih funkcija nužna su praktična mjerenja kako temperature vodiča tako i provjesa odnosno sile zatezanja. Osnovni problem njihova postavljanja je da se u tom procesu temperatura vodiča mora mjeriti određenom drugom metodom. Nakon provođenja praktičnih mjerenja, kalibracijske funkcije postavljaju se metodama prilagođenja krivulja u polinomnom obliku obično primjenom metode najmanjih kvadrata [35], [81], [99-100]. Metode kalibracije su različite ovisno o korištenoj opremi te proizvođači opreme moraju dati upute o procedurama kako kalibracije tako i potrebnih rekalibracija [35].

Sam sustav baziran na mjerenju sile zatezanja se pored pretvornika sila slično kao drugi sustavi sastoji od meteoroloških stanica, pomoćnog napajanja, uređaja za

registraciju podataka, SMT (ukoliko se podatak o struji voda ne preuzima iz centra vođenja) te od komunikacijskih uređaja, servera i pripadnih algoritama za proračun. Sustav baziran na mjerenju provjesa može biti izveden komunikacijski vrlo različito ovisno o primijenjenom principu mjerenja provjesa. No, temeljno su komunikacijsko rješenje i dodatna oprema identični sustavu baziranom na mjerenju sile zatezanja [35], [87], [102-108].

Osnovna prednost sustava baziranog na mjerenju provjesa/sile zatezanje je što se mjeri prosječna temperatura zateznog polja u samoj jezgri (ne radi se o točkastom mjerenju) [35]. Sami sustavi ne zahtijevaju mjerenje kuta vjetra i brzine vjetra te su točniji u uvjetima kada zatezno polje ima približno jednaku dužinu samih raspona [99-108]. Dodatno, sam provjes i sigurnosne visine se po pojedinim rasponima lako određuju iz samih mjerenja. Nedostatci ovog sustava su u prvu ruku da postavljanje mjerne opreme i nekih senzora za mjerenje provjesa zahtjeva izlazak voda van pogona te sama oprema zahtjeva periodično održavanje [99-108]. Korišteni senzori nisu samo napajajući te samo postavljanje kalibracijskih funkcija, koje dobro aproksimiraju sve radne uvjete na vodu, je komplicirano i potrebne su rekalibracije. Različite dužine raspona, masa postavljenih senzora na vodiču, vanjski utjecaji, istezanje vodiča te pomicanje izolatora i konstrukcije dalekovoda utječu na točnost mjerenja [99-108]. DTO se točnije određuje pri višim temperaturama vodiča radi bolje estimacije konvekcijskog odvođenja [35]. Relativno visoki troškovi održavanja, instalacije iako navedeno zavise o broju senzora postavljenih na vodu [35], [99-108].

D. Sustavi dinamičkog određivanja DTO-a bazirani na uređajima za mjerenje fazora

U ovim se sustavima temperatura estimira putem uređaja za mjerenje fazora (engl. Phasor measurement unit). Tako mjerena temperatura predstavlja prosječnu temperaturu vodiča gledano radijalno te aksijalno uzduž cijelog voda (odnosno između postavljenih uređaja za mjerenje fazora) [109-112]. Temperatura se proračunava indirektno određivanjem otpora vodiča. Otpor se računa računanjem propagacijske konstante i karakteristične impedancije vodiča na temelju poznatih fazora struje i napona dobivenih iz uređaja za mjerenje fazora. Nakon određivanja temperature vodiče i duljine pri toj temperaturi, na bazi mjerenih fazora napona i struja, DTO se određuje iz JSTR pri T_{max} estimirajući konvencijsko i radijacijsko odvođenje topline odnosno utjecaj Sunčeva zračenja iz JDTSV [112]. Uređaji za mjerenje fazora mogu

se koristiti u sklopu bilo kojeg prethodno analiziranog sustava. U tome se slučaju one koriste isključivo za određivanje/estimaciju temperature vodiča [35], [77], [109-112].

Sustav koji koristi uređaje za mjerenje fazora izuzetno je kompleksan i izazovan u svrhu integracije podatka te u pogledu korištenih komunikacijskih mreža i *GPS* sustava (engl. Global Positioning System) radi sinkronizacije vremena [110-111].

Prikazani sustav s uređajima za mjerenje fazora dobar je jer ne zahtjeva postavljanje mjerene opreme za mjerenje klimatskih uvjeta. Kompletan sustav baziran je isključivo na određivanju temperature vodiča i korištenju mjerenih fazora napona i struja na početku i na kraju voda. Stoga se mjeri temperatura vodiča koja dobro aproksimira uvjete uzduž cijelog voda. Dodatno, ovaj sustav ima i temeljnu prednost brzine rada te se znatno brže obrađuju podaci u ovom sustavu u odnosnu na prethodno razmatrane [77]. No, s druge strane troškovi instalacije uređaja za mjerenje fazora i njihove integracije u postojeći sustav vođenja su značajni, što može znatno ograničiti primjenu razmatranog sustava. Jednako tako aproksimacijske formule proračuna temperature vodiča iz otpora i uporaba mjerenja iz strujnih i naponskih mjernih transformatora pri njegovom određivanju mogu dovesti do znatnih grešaka u određivanju temperature, a time i u određivanju DTO-a. Navedeni efekti se mogu smanjiti pažljivim kalibracijama unutar jedinica za mjerenje fazora u pogledu točnosti određivanja uzdužne impedancije voda [110-113].

U praksi se može pojaviti i čitav niz kombinacija sustava koji određuju DTO na bazi više različitih sustava. Kombinirani sustavi svakako doprinose kvaliteti određivanja DTO-a jer se nedostatci sustava baziranih na jednome modelu otklanjaju prednostima drugoga [35], [77]. Međutim, troškovi takvih sustava se značajno povećavaju, a nejasno ostaje definirano je li bolje ostaviti trajan rad pojedinih sustava ili ih uključivati ovisno o struji voda i klimatskim uvjetima. Posljednje navedeno je u fokusu istraživanja i razmatranja.

U pogledu svih analiziranih sustava leži veliki potencijal primjene, ali još uvijek značajna istraživanja treba provesti u vidu optimalnog postavljanja lokalne mjerne opreme, integracije vanjskih podataka te u vidu određivanja optimalnih metodologija predviđanja samih DTO-a.

3. ANALIZA METODOLOGIJA PRORAČUNA STACIONARNOG DOPUŠTENOG TERMIČKOG OPTEREĆENJA

U ovome poglavlju prvo se definira JSTR i određivanje njezinih elementa kao osnova proračuna stacionarnoga DTO-a. Potom se definira pojam radijalne distribucije temperature vodiča te algoritmi metodologija proračuna stacionarnog DTO-a i samih koeficijenata osjetljivosti. Na kraju poglavlja se temeljem definiranih metoda proračuna vrše izračuni na konkretnim primjerima ACSR vodiča.

3.1 Jednadžba stacionarne toplinske ravnoteže

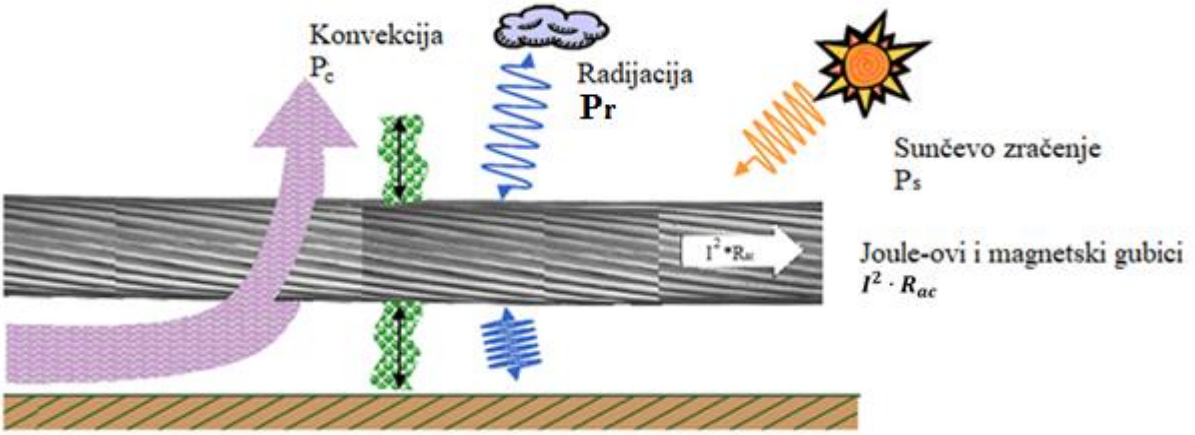
Metodologije proračuna stacionarnih DTO-a bazirane su na JSTR. Navedena jednadžba se u općem obliku uz zanemarenje aksijalne i radijalne temperature vodiča može zapisati u obliku [1-2], [15-16], [20], [25]:

$$g = I^2 \cdot R_{ac} + P_S - P_c - P_r = 0 \tag{1}$$

gdje je: g - funkcija jednadžbe stacionarne toplinske ravnoteže, I - struja voda (A), R_{ac} - izmjenični otpor po jedinici duljine (Ω/m), P_s - snaga dovođenja topline po jedinci duljine uslijed Sunčeva zračenja (W/m), P_c - snaga odvođenja topline uslijed konvekcije po jedinici duljine (W/m), P_r - snaga odvođenja topline uslijed radijacije po jedinici duljine (W/m).

Stacionarno stanje nastupa kada je došlo do izjednačenja između snage dovođenja topline po jedinci duljine koju vodič nadzemnoga voda prima (Joulovi gubici i magnetski učinci te Sunčevo zračenje) i snage odvođenja topline po jedinci duljine koju daje u okolinu (konvekcija i radijacija). Ukoliko ne postoji ravnoteža snaga po jedinci duljine tada se javlja promjena temperature vodiča u vremenu te nastupa dinamičko stanje. U izrazu (1) je zanemareno zagrijavanje izazvano uslijed fenomena korone na vodovima i hlađenje izazvano uslijed padalina. Fenomen korone je zanemaren radi malog utjecaja, a hlađenje uslijed padalina se obično zanemaruje jer nije opravdana pretpostavka jednakih padalina uzduž cijelog voda (rezultati su na strani sigurnosti) [1], [45-46]. Dodatno, zanemarena je radijalna i aksijalna distribucija temperature vodiča. Radijalna distribucija temperature vodiča se razmatra kasnije unutar ovoga poglavlja, a aksijalna se posebno ne obrađuje obzirom da se u realnim

sustavima aksijalno razmatranje dobiva uzdužnim postavljanjem mjerenja [1-2], [16], [20], [35], [26], [48-49], [114-117]. Na Slici 2. su prikazani osnovni elementi JSTR.



Slika 2. Osnovni elementi JSTR

Važno je napomenuti da se jednadžba (1) može koristiti i za određivanje stacionarne vrijednosti temperature vodiča. Navedena stacionarna vrijednost se dobiva numeričkim rješavanjem jednadžbe (1) uz uvjet da je poznata struja voda, klimatski uvjeti i ostali stalni parametri.

U nastavku slijedi opis i načini proračuna pojedinih elemenata jednadžbe stacionarne toplinske ravnoteže. Posebno su u fokusu metodologije dane u Cigre 601 tehničkoj brošuri (u daljnjem tekstu Cigre 601) i IEEE 738-2012 standardu (u daljnjem tekstu IEEE 738) [1-2].

3.1.1 Izmjenični otpor po jedinci duljine (R_{ac})

Istosmjerni otpor ACSR vodiča po jedinci duljine ovisan je o geometriji samog vodiča (uključujući sve slojeve), faktoru koraka použenja te vrsti materijala i temperaturi pojedinog sloja. Tipično su za pojedine ACSR vodiče dane vrijednosti istosmjernog otpora pri temperaturi od 20 ºC. Za razliku od njega R_{ac} je ovisan o frekvenciji struje budući da ona određuje veličinu tzv. skin efekta. Skin efekt je izražen kod ACSR vodiča jer su radijalna distribucija struje u aluminijskom dijelu i gubici u čeličnoj jezgri ovisni o frekvenciji. Skin efekt uzrokuje povećanje R_{ac}, a temeljno nastaje, jer se radi rasipanja magnetskog toka, induktivitet po jedinici površine kod ACSR vodiča smanjuje prema površini uzrokujući tako na tome mjestu povećani tok struje. Kod ACSR vodova sam vodič se sastoji od jednog ili više slojeva aluminija koncentrično použenih preko galvanizirane čelične jezgre sastavljene u jednome ili

više slojeva čelika. Čelična jezgra služi za postizanje mehaničke čvrstoće, dočim aluminiji služi za provođenje električne struje. Izmjenična struja koja prolazi kroz aluminijski dio proizvodi izmjenični aksijalni magnetski tok koji se zatvara u jezgri. Taj magnetski tok stvara gubitke uslijed histereze te vrtložnih struja i redistribuciju struja u aluminijskom dijelu, odnosno tzv. transformatorski efekt. Ti efekti djeluju na uvećanje samog izmjeničnog otpora, a mogu se smanjiti dobrim dizajnom faktora koraka použenja aluminijskih slojeva na veoma male vrijednosti. Međutim kod ACSR vodiča s neparnim brojem slojeva aluminija nisu zanemarivi [1-2], [20], [50-53], [118-124].

Problematika određivanja R_{ac} ACSR vodiča dodatno se usložnjava radi slijedećih razloga [50-53], [118-125]:

- Dobar električni kontakt ostvaren je samo među vanjskim slojevima ACSR vodiča.
- Kontakt među žicama istih slojeva odnosno među žicama susjednih slojeva je ovisan o razini oksidacije i razvijenom naprezanju vodiča. Dodatno, promjenom naprezanja mijenja se permabilnost jezgre što uzrokuje promjene u izmjeničnom otporu.
- Vodič radijalno gledajući nije izoterman odnosno prisutna je radijalna promjena temperature vodiča.
- Uz izmjeničnu struju prisutnost čelične jezgre uzrokuje modifikaciju radijalne raspodjele struje u aluminijskim slojevima kao i temperature vodiča.

Iz svega navedenog moguće je zaključiti da je u realnosti R_{ac} ovisan o geometriji, faktoru koraka použenja vodiča, svojstvima materijala (električnim i magnetskim), frekvenciji, mehaničkom naprezanju te o struji i temperaturi, odnosno njihovim radijalnim raspodjelama po pojedinim slojevima [50-53]. Dodatni, utjecaji mogu biti izazvani zbog efekta blizine (javlja se za slučaj vodiča u snopu) te zbog utjecaja viših harmonijskih članova [54], [126].

Složeni pristupi proračunima izmjeničnog otpora po jedinci duljine mogući su primjenom numeričkih metoda [127-129]. Međutim, u ovome radu je radi proračuna R_{ac}, korištena preporuka dana u Cigre 601, odnosno metodologija proračuna dana u prilogu A Cigre 345 tehničke brošure [50]. Time su uzeti u obzir svi bitniji utjecaji izuzev

efekta blizine i viših harmonijskih članova. Proračun izmjeničnog otpora proveo se sukladno izrazu:

$$R_{ac} = R_{dcT} \cdot (1 + k_{skin} + k_{red} + k_m) = R_{dcT} \cdot K_{acdc} \quad (2)$$

gdje je: R_{dcT} - istosmjerni otpor pri prosječnoj temperaturi vodiča (Ω/m), k_{skin} - faktor uvećanja uslijed skin efekta, k_{red} - faktor uvećanja uslijed transformatorskog efekta, k_m - faktor uvećanja uslijed magnetskih učinaka u jezgri (histereze i vrtložnih struja), K_{acdc} - ukupni faktor uvećanja istosmjernog otpora.

Kod ACSR vodiča s parnim brojem slojeva aluminija moguće je u izrazu (2) zanemariti k_{red} i k_m radi poništenja tih efekata zbog povoljne raspodjele magnetskih tokova [1], [50-53]. Temeljno navedenom metodom proračun otpora se svodi na:

- Proračun istosmjernog otpora pri prosječnoj temperaturi vodiča (R_{dcT})
- Proračun faktora uvećanja uslijed skin efekta (k_{skin})
- Proračun redistribucije ukupne struje i faktora uvećanja uslijed transformatorskog efekta (k_{red})
- Proračun faktora uvećanja uslijed magnetskih učinaka (k_m)

Proračun R_{dcT} se vrši prema:

$$\frac{1}{R_{dcT\check{c}}} = \frac{\pi \cdot d_{\check{c}}^2}{4 \cdot \rho_{\check{c}}} \cdot \left((1 + \alpha_{\check{c}} \cdot T_{1\check{c}}) + \sum_{i=2}^{n_{\check{c}}} \frac{6 \cdot n_{\check{c}}}{k_{n\check{c}}} \cdot (1 + \alpha_{\check{c}} \cdot T_{i\check{c}}) \right) \quad (3)$$

$$\frac{1}{R_{dcTa}} = \frac{\pi \cdot d^2}{4 \cdot \rho_a} \cdot \left(\sum_{i=n\check{c}+1}^{n_s} \frac{6 \cdot n_a}{k_{na}} \cdot (1 + \alpha_a \cdot T_{ia}) \right) \quad (4)$$

$$\frac{1}{R_{dcT}} = \frac{1}{R_{dcT\check{c}}} + \frac{1}{R_{dcTa}} \quad (5)$$

gdje je: d, $d_{\check{c}}$ - promjer žice aluminijskog odnosno čeličnog dijela (m), ρ_a, $\rho_{\check{c}}$ - specifična električna otpornost žice aluminijskog odnosno čeličnog dijela (Ω·m/mm^2), T_{ia}, $T_{i\check{c}}$ - temperatura i-tog sloja aluminijskog odnosno čeličnog sloja (ºC), n_a, $n_{\check{c}}$ - broj slojeva aluminija odnosno čelika, n_s - ukupan broj slojeva, α_a, $\alpha_{\check{c}}$ - temperaturni koeficijent promjene otpora aluminijskog odnosno čeličnog dijela (1/K), k_{na}, $k_{n\check{c}}$ - faktori geometrije aluminijskog odnosno čeličnog dijela.

U izrazima (3) i (4) faktori geometrije se računaju prema izrazu:

$$k_n = \sqrt{1 + \left(\frac{D_n \cdot \pi}{\lambda_n} \right)^2} \quad (6)$$

gdje je: D_n - srednji promjer n-tog sloja (m), λ_n - faktor koraka použenja n-tog sloja.

U izrazima (3-4) napravljena je linearna aproksimacija promjene specifične otpornosti s temperaturom. Navedeno je opravdano za proračune do temperatura od 130 ºC. Pri većim temperaturama potrebno je uzeti u obzir i kvadratni član promjene specifične otpornosti [1-2], [20].

Postupak proračuna skin efekta ACSR vodiča svodi se prvo na određivanje električnog polja po jedinici struje (E/I) i propagacijske konstante (δ) sukladno izrazima:

$$\left(\frac{E}{I}\right) = Re\left(\frac{\rho_1 \cdot (i-1)}{D \cdot \pi \cdot \delta} \cdot \left(\frac{J_0}{J_1}\right)\right) \tag{7}$$

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho_1}{4 \cdot f \cdot \pi^2 \cdot \mu_r \cdot 10^{-7}}} \tag{8}$$

gdje je: D - vanjski promjer vodiča (m), ρ_1 - električna otpornost materijala (Ω·m), J_0, J_1 - Besselove funkcije nultog i prvog reda, μ_r - relativna permeablinost materijala, f - frekvencija (Hz).

U izrazu (7) se varijabla Besselovih funkcija računa prema:

$$x = \frac{(1-i) \cdot D}{2 \cdot \delta} \tag{9}$$

Konačno se skin efekt za ACSR vodiče računa prema:

$$k_{skin} \approx 1 + \left(\frac{D^2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{E}{I}\right)}{4 \cdot \rho_1} - 1\right) \cdot \left(\frac{d_c}{D}\right) \tag{10}$$

gdje je: d_c - promjer čelične jezgre (m).

Iz samih izraza za izračun skin efekta vidljivo je da je on ovisan o električnim i magnetskim svojstvima materijala vodiča, frekvenciji te geometrijskim veličinama. Tipično se faktor skin efekta kreće od 1.02 do 1.08 ovisno o presjeku vodiča (kod većih presjeka poprima veće vrijednosti) [1], [16] [50-53].

Radi proračuna redistribucije struje u slojevima ACSR vodiča s dovoljnom točnošću izračuna primjenjuje se model baziran na nadomjesnim shemama [1], [16], [26], [50]. Naime prema tomu modelu svaki sloj ACSR vodiča se predstavlja kao odgovarajuća impedancija koja je međuinduktivno vezana za sve ostale slojeve, a uzrok navedenih magnetskih veza je kružni i uzdužni magnetski tok koji se stvara

prilikom prolaska izmjenične struje. Proračun redistribucije struje u ACSR vodičima i uvećanja R_{ac} uslijed toga efekta svodi se na iterativnom rješavanju sustava jednadžbi definiranog:

$$R_{acr} = Re\left(\frac{\bar{V}}{\bar{I}}\right) \tag{11}$$

gdje je: R_{acr} - uvećani otpor radi redistribucije struje (Ω/m), $\bar{V}$ - vektor pada napona pojedinoga sloja (V/m), $\bar{I}$ - vektor struja pojedinoga sloja (A).

Sustav definiran izrazom (11) rješava se iterativno jer je kompleksna relativna permabilnost jezgre ovisna o jakosti polja odnosno o samoj struji. Prilikom primjene ove metode nužno je poznavanje karakteristike jakosti magnetskog polja i relativne permeabilnosti jezgre za razmatrani vodič. Ukoliko navedeno nije poznato primjenjuju se praktično dobivene krivulje odnosno rezultati dani u [1], [16], [50-51]. U radu je prilikom izračuna korištena aproksimacija dana u [50], a preuzeta iz [51].

Radi proračuna prema relaciji (11) dodatno se pretpostavlja da vrijedi:

$$\bar{I}_{uk} = \sum_{j}^{n_s} \bar{I}_j \tag{12}$$

$$\bar{V}_1 = \bar{V}_2 = \cdots = \bar{V}_{n_s} \tag{13}$$

gdje je: $\bar{I}_{uk}$ - vektor ukupne struje kroz ACSR vodič (A)

Modul vektora ukupne struje poznat je odnosno predstavlja veličinu struje za koju se računa efekt redistribucije struje. Raspodjela struje u iterativnom postupku određuje se kao:

$$\bar{I} = [\bar{Z}]^{-1} \cdot \bar{V} \tag{14}$$

gdje je: $\bar{Z}$ - matrica impedancija pojedinih slojeva (Ω/m)

Članovi matrice impedancije pojedinih slojeva određuju se sukladno izrazima danim u [50]. Sami članovi obuhvaćaju vlastite otpore pojedinih slojeva i reaktancije uzrokovane uzdužnim i kružnim magnetskim tokom stvorenim prolaskom struje pojedinim žicama ACSR vodiča. Prilikom izračuna matrice impedancija pojedinih slojeva bitno je voditi računa i o smjeru uvijanja pojedinih slojeva jer on određuje predznake pojedinih članova.

Efekt redistribucije rezultira povećanjem izmjeničnog otpora i smanjenjem unutrašnjeg induktiviteta vodiča. Sam efekt ovisan je o frekvenciji, geometriji vodiča,

struji koja prolazi samim vodom, o temperaturi i naprezanju jezgre, smjeru použenja i faktoru koraka použenja aluminijskih slojeva [1], [50-53], [118-124].

Proračun uvećanja uslijed magnetskih učinaka u jezgri provodi se nakon proračuna efekta redistribucije, na način da se iz konačno određene jakosti magnetskog polja i relativne permeabilnosti jezgre prvo odredi maksimalna veličina magnetske indukcije u jezgri sukladno izrazu:

$$B_{max} = \mu_0 \cdot \mu_{r\check{c}} \cdot H_{max} \tag{15}$$

gdje je: μ_0 - permabilnost vakuuma (T·m/A), $\mu_{r\check{c}}$ - relativna permeabilnost čelične jezgre određena proračunom redistribucije, H_{max} - vrijednost maksimalne jakosti magnetskog polja određenog proračunom redistribucije (A/m).

Potom se računaju gubici snage po jedinci duljine uzrokovani magnetskim učincima u jezgri i ukupno uvećanje uzrokovano tim učincima primjenom izraza [1], [50], [119]:

$$P_m = 12.5 \cdot d_{\check{c}} \cdot f \cdot e^{-2.5 \cdot T_j \cdot 10^{-3}} \cdot B_{max}^{1.83} \cdot A_s \tag{16}$$

$$k_m = \frac{P_m}{\left(I_{uk} \cdot \left(1 - \frac{R_{dcT}}{R_{dcT\check{c}}}\right)\right)^2 \cdot R_{dcT}} \tag{17}$$

gdje je: T_j - temperatura u jezgri (ºC), $R_{dcT\check{c}}$ - istosmjerni otpor čelične jezgre (Ω/m)

Iz priloženih jednadžbi moguće je zaključiti da je uvećanje otpora uslijed magnetskih učinka u jezgri ovisno o geometriji vodiča, frekvenciji, radijalnoj raspodjeli temperature vodiča i samoj struji. Pri većim gustoćama struja (> 2 do 3 A/mm^2), za ACSR vodiče s jedim ili tri slojeva aluminija, moguće je očekivati uvećanje R_{ac} od 5-20 % radi utjecaja transformatorskog efekta i magnetskih učinaka u jezgri [50-53], [119].

Iznesena metodologija proračuna otpora identična je onoj prikazanoj u literaturi [50], a na koju se poziva Cigre 601.

IEEE 738 proračun izmjeničnog otpora svodi na primjenu slijedećeg izraza:

$$R_{ac} = \frac{R_{75} - R_{25}}{75 - 25} \cdot (T_{av} - 25) + R_{25} \tag{18}$$

gdje je: R_{75} - izmjenični otpor vodiča pri 75 ºC (Ω/m), R_{25} - izmjenični otpor vodiča pri 25 ºC (Ω/m), T_{av} - prosječna temperatura vodiča (ºC).

Iz priložene jednadžbe (18) može se zaključiti da kod primjene IEEE 738 R_{ac} se dobiva linearnom interpolacijom dviju vrijednosti izmjeničnog otpora pri temperaturi od 75 ºC i 25 ºC. Vrijednosti izmjeničnih otpora pri tim temperaturama su uobičajeno dane u priručnicima kao npr. u [130]. Smatra se da je generalna greška primjene izraza (18) u rasponu od 1-5 %. Jednim dijelom ta greška proizlazi iz linearne interpolacije otpora, a drugim radi zanemarivanja uvećanja višeg otpora i više temperature (R_{75}, 75 ºC) na iznose veće od T_{max} [2].

U disertaciji je prilikom primjene IEEE 738 korištena metodologija proračuna otpora dana u [50] radi određivanja R_{75} i R_{25}. Rezultati proračuna otpora izrazom (2) ili primjenom (18) su praktički identični uz pretpostavku T_{max}=80 ºC (pretpostavljeno u dijelu proračuna).

3.1.2 Snaga dovođenja topline uslijed Sunčeva zračenja po jedinici duljine (P_s)

Sunčevo zračenje djeluje na vodič nadzemnoga voda tako da uzrokuje njegovo zagrijavanje. Pri tome ukoliko se uvaži podjela Sunčevog spektra na kratkovalni, odnosno dugovalni dio zagrijavanje vodiča uslijed Sunčevog zračenja je dvojako. S jedne strane kratkovalno Sunčevo zračenje uzrokuje pojavu direktne, difuzne i reflektirane komponente (javlja se refleksijom Sunčevih zraka od tla) Sučeva zračenja. S druge strane dugovalno Sunčevo zračenja (valne dužine iznad 2 μm) izaziva dodatno zagrijavanje, koje je zbog izuzetno malog doprinosa, obično zanemareno te se ne uzima u obzir prilikom proračuna [1-2], [15-16], [20], [131]. U općem obliku P_S se za slučaj zagrijavanja uslijed Sunčeva zračenja uzima u obzir primjenom:

$$P_S = P_{Sdr} + P_{Sdif} + P_{Sref} + P_{Sd} \tag{19}$$

gdje je: P_{Sdr} - snaga dovođenja topline uslijed direktnog zračenja (W/m), P_{Sdif} - snaga dovođenja topline uslijed difuznog zračenja (W/m), P_{sref} - snaga dovođenja topline uslijed reflektiranog zračenja (W/m), P_{sd} - snaga dovođenja topline uslijed dugovalnog zračenja (W/m).

Cigre 601 proračun ovog elementa provodi primjenom dviju metodologija. Prva je metodologija bazirana na direktnom, difuznom i reflektiranom zračenju. Druga metodologija predstavlja pojednostavljeni postupak u kojemu se ovaj element računa na bazi globalnog intenziteta Sunčeva zračenja.

Prema prvoj metodologiji danoj u Cigre 601 ovaj element se računa prema izrazu [1]:

$$P_S = \alpha_s \cdot D \cdot \left[S_b \cdot \left(\sin(\eta) + \frac{\pi}{2} \cdot F \cdot \sin(H_s)\right) + S_d \cdot \left(1 + \frac{\pi}{2} \cdot F\right)\right] \quad (20)$$

gdje je: α_s - koeficijent apsorpcije Sunčeva zračenja, S_b - intenzitet direktnog Sunčevog zračenja (W/m^2), S_d - intenzitet difuznog Sunčevog zračenja (W/m^2), F - faktor refleksije površine, η - kut između Sunčevih zraka i osi provodnika (º), H_s - visina Sunca (º).

Radi primjene izraza (20) potrebno je još primijeniti slijedeće izraze [1-2], [20], [132]:

$$S_b = \frac{1280 \cdot N_s \cdot \sin(H_s)}{\sin(H_s)+0{,}314} \cdot \left[1 + 1{,}4 \cdot 10^{-4} \cdot y \cdot \left(\frac{1367}{\frac{1280 \cdot N_s \cdot \sin(H_s)}{\sin(H_s)+0{,}314}} - 1\right)\right] \quad (21)$$

$$H_s = arsin\left(sin(\varphi) \cdot sin(\delta_s) + cos(\varphi) \cdot cos(\delta_s) \cdot cos(Z)\right) \quad (22)$$

$$\delta_s = 23{,}3 \cdot sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot (284 + N_d)}{365}\right) \quad (23)$$

$$S_d = (430{,}5 - 0{,}3288 \cdot S_d) \cdot sin(H_s) \quad (24)$$

$$\eta = arccos(\cos(H_s) \cdot \cos(y_c - y_s)) \quad (25)$$

$$y_s = arcsin\left(\frac{cos(\delta_s) \cdot sin(Z)}{\cos(H_s)}\right) \quad (26)$$

gdje je: N_s - faktor jasnoće neba, y - nadmorska visina (m), φ - geografska širina (º), Z - satni kut Sunca (º), δ_s - deklinacija (º), N_d - dan u godini (1 do 365), γ_c - azimut vodiča (º), γ_s - azimut Sunca (º).

U izrazu (20) koeficijent apsorpcije Sunčeva zračenja varira od 0.2 za novi vodič do 0.9 za stariji vodič koji se nalazio u industrijskoj atmosferi. Mjerenje navedenog koeficijenta radi potrebe izračuna DTO-a moguće je no teško izvedivo na realnim vodovima. Stoga se pri proračunima DTO-a preporuča ili korištenje α_s ne manjeg od 0.8 (konzervativan pristup) ili njegovo određivanje uzimanjem u obzir mjerenja u više točaka voda. U izrazu (20) faktor refleksije kreće se od 0.05 do 0.8. te raste s porastom visine Sunca. Primjerice za površinu vode iznosi 0.05, za šumu 0.1, za urbaniziranu površinu 0.15, za travnate i pješčane površine kreće se od 0.4-0.6, a za snijeg i led od 0.6-0.8 [1], [132-133].

U izrazu (21) faktor jasnoće neba kreće se od 0-1.2 ovisno o stanju atmosfere. Za standardnu atmosferu ima vrijednost 1, za čisto nebo sa smanjenom količinom

prašine i aerosoli kreće se 0.8-1.2, a za industrijsku i oblačnu atmosferu kreće se od 0-0.5 [1-2], [20], [35]. U izrazu (22) satni kut Sunca opada za 15 º po satu računajući od podne (odnosno iznosi 15·(12-solarni sat)). Pozitivan je za zalazak, a negativan za izlazak Sunca [1], [58]. Deklinacija Sunca dobivena izrazom (23) predstavlja kut između ekvatora i linije povučene od centra Zemlje prema centru Sunca [1-2].

Primjena izraza (20) omogućuje određivanje P_s samo na bazi poznavanja vremena proračuna, promjera, položaja i nadmorske visine vodiča te određenog skupa konstantnih faktora. Međutim, problematika u realnoj primjeni izraza (20) leži u uzdužnoj promjenjivosti pojedinih faktora, a posebno u tom pogledu F i N_s. Vremenski gledano P_s je različit uzduž voda (različiti položaji i nadmorske visine). Stoga se u stvarnim sustavima određivanje P_s nastoji pojednostaviti. Druga metodologija dana u Cigre 601 je bazirana upravo na pojednostavljenju u kojem se P_s određuje za najnepovoljniji slučaj okomitog padanja zraka na horizontalno postavljeni vodič uz primjenu globalnog intenziteta Sunčeva zračenja. U tome slučaju proračun P_s se vrši primjenom sljedećeg izraza [1]:

$$P_S = \alpha_s \cdot D \cdot S \tag{27}$$

gdje je: S - globalni intenzitet Sunčeva zračenja (W/m^2).

Realna primjena izraza (27) je dodatno opravdana radi postojanja relativno jeftinih i točnih piranometra (senzora) koji služe u svrhu mjerenja globalnog intenziteta. No, određeni autori napominju da primjena izraza (27) na bazi mjerenja u jednoj ili više točaka nije opravdana radi velike vremenske i prostorne varijabilnosti S uzduž voda (npr. nagle promjene stanja atmosfere, nejednoliki položaji i dr.). Stoga, ukoliko se pretpostavlja velika aksijalna varijabilnost, predlažu u realnim sustavima ili pretpostavku najgoreg mogućeg globalnog intenziteta (tipično u rasponu od 1000-1500 W/m^2) ili stvaran proračun baziran na primjeni jednadžbe (20) koja ima prethodno navedene nedostatke [1-2], [35], [58], [132].

IEEE 738 proračun P_s bazira na primjeni slijedeće jednadžbe [2]:

$$P_S = \alpha_s \cdot D \cdot \sin(\eta) \cdot S_b \tag{28}$$

Iz izraza (28) moguće je zaključiti da sam IEEE 738 pri proračunu ove komponente uzima u obzir isključivo direktnu komponentu Sunčeva zračenja. Ostale komponente su zanemarene. U izrazu (28) se S_b određuje izrazima [2]:

$$S_b = K_{sy} \cdot (A + B \cdot H_s + C \cdot H_s^2 + D \cdot H_S^3 + E \cdot H_S^4 + F \cdot H_S^4 + G \cdot H_S^5) \quad (29)$$

$$K_{sy} = a_1 + b_1 \cdot y + c_1 \cdot y^2 \quad (30)$$

gdje je: K_{sy} - faktor korekcije S_b uslijed nadmorske visine, A, B, C, D, E, F, G - faktori jednadžbe za proračun S_b, a_1, b_1, c_1 - faktori jednadžbe za proračun K_s.

Pojedine vrijednosti faktora u jednadžbama (29) i (30) nalaze se u literaturi [2]. Faktori za proračun S_b razlikuju se u ovisnosti razmatra li se industrijska ili čista atmosfera.

Iz svega navedenog moguće je zaključiti da se Cigre 601 i IEEE 738 znatno razlikuju u proračunu ovog elementa. IEEE 738 određivanje P_S bazira isključivo na određivanju direktne komponente Sunčeva zračenja, dočim je Cigre 601 u složenijem pristupu baziran na direktnoj, difuznoj i reflektiranoj komponenti, a u jednostavnijoj na globalnom intenzitetu Sunčeva zračenja.

U sklopu ovoga rada prilikom proračuna ovog elementa koristi se u sklopu obije metodologije izraz (27). Navedeno, je učinjeno u dijelu proračuna, iz razloga što složeniji pristup ima veliku varijabilnosti faktora (posebno faktora F, N_s) te jer u realnim sustavima dinamičkog određivanja DTO-a primjena izraza (27) je široko rasprostranjena [1], [3-4], [27-38], [62-66], [58], [81], [90-95], [98-112].

3.1.3 Snaga odvođenja topline uslijed konvekcije po jedinici duljine (P_c)

Konvekcija je definitivno jedan od najutjecajnijih parametra na sam iznos DTO-a te su najveće razlike pri proračunu DTO-a pojedinim metodologijama posljedica razlika u načinu određivanja ovog elementa JSTR [1-2]. Temeljno se konvekcija može podijeliti na prirodnu i prisilnu konvekciju. Pod pojmom prirodna konvekcija podrazumijeva se kretanje fluida kao posljedice razlike u gustoći uzrokovane neravnomjernom raspodjelom temperature [138], [141]. U pogledu nadzemnih vodova kako je površinska temperatura vodiča viša od temperature okoline to uzrokuje strujanje zraka u okolini vodiča što izaziva njegovo hlađenje. Navedeni fenomen prirodne konvekcije dominantan je kada je brzina vjetra u okolini vodiča približno jednaka 0 m/s (stanje bez vjetra). S druge strane prisilna konvekcija posljedica je djelovanja površinskih sila na graničnim površinama [137], [142]. Važno je naglasiti da i kod prirodne i kod prisilne konvekcije kretanje fluida može biti laminarno ili turbulentno

[134-136], [139-140]. Pri laminarnom kretanju čestice fluida kreću se paralelno što je karakteristično za manje brzine fluida. Povećanjem brzine iznad kritične vrijednosti dolazi do miješanja strujnica fluida te dolazi do vrtložnog odnosno turbulentnoga kretanja. Za potpunu teorijsku analizu same konvekcije u okolini voda, ali i općenito, potrebno je riješiti sustav diferencijalnih jednadžbi. Navedene jednadžbe obuhvaćaju jednadžbu kretanja, kontinuiteta i energije fluida [20]. Da bi se moglo dobiti rješenje navedenih diferencijalnih jednadžbi potrebno je uz njih još postaviti i samu jednadžbu stanja fluida. Navedeni pristup je izuzetno složen za praktičnu primjenu u sustavima i zahtjeva brojna pojednostavljenja radi izračuna (koji dovode do grešaka u proračunu). Stoga, se u gotovo svim metodologijama proračuna DTO-a, primjenjuju pojednostavljeni modeli bazirani na eksperimentalnim istraživanjima odnosno na teoriji sličnosti. Naime, brojni istraživači su laboratorijskim ispitivanjima na vodičima nadzemnoga voda u različitim uvjetima strujanja vjetra prema teoriji sličnosti te primjenom Newtonovog zakona hlađenja, postavili brojne relacije radi proračuna konvekcije [1-2], [134-136], [139-140], [143-144]. Navedeno za posljedicu ima postavljenje raznih izraza baziranih na različitim bezdimenzijskim brojevima, a posebno na: Nusseltovom, Grashofovom i Prandtlovom broju. Ti modeli su u dobroj korelaciji među njima u pogledu određivanja trajnih DTO-a. Međutim, pri malim brzinama vjetra (manjim od oko 0.3 m/s) te izuzetno velikim (većim od oko 5 m/s) dolazi do velikih odstupanja pojedinih modela. Dodatno, razni modeli proračuna konvekcije uzimaju u obzir više ili manje parametara te određeni istraživači predlažu primjenu i mješovite konvekcije u području srednjih brzina vjetra (za veće od oko 0.3 m/s i manje od oko 5 m/s). Navedene razlike postaju značajne pri dinamičkom određivanju DTO-a. Obično se sustavi baziraju na više modela proračuna konvekcije te se uzima u obzir metodologija koja rezultira najmanjim hlađenjem [1-2], [13-16], [20], [134-144].

Cigre 601 radi proračuna konvekcije primjenjuje izraz [1]:

$$P_c = \pi \cdot \lambda_f \cdot (T_s - T_a) \cdot N_u \tag{31}$$

gdje je: λ_f - termalna vodljivost zraka (W/(K·m)), T_s - površinska temperatura vodiča (ºC), T_a - temperatura okoline (ºC), N_u - Nusseltov broj.

U izrazu (31) se termalna vodljivost zraka empirijski određuje kao [1]:

$$\lambda_f = 2.368 \cdot 10^{-2} + 7.23 \cdot 10^{-5} \cdot T_f - 2.763 \cdot 10^{-8} \cdot T_f^2 \tag{32}$$

gdje je: T_f - temperatura filma odnosno prosječna temperatura između temperature na površini i okoline (°C).

Radi primjene izraza (31) određuje se Nusseltov broj za prisilnu (N_{u1}) i prirodnu konvekciju (N_{u2}). Nusseltov broj za prisilnu konvekciju određuje se prema:

$$N_{u1} = B_1 \cdot Re^n \cdot (A_1 + B_2 \cdot sin(\delta)^{m_1}) \tag{33}$$

gdje je: A_1, B_1, B_2, m_1, n - konstante radi proračuna prisilnog Nusseltovg broja, Re - Reynoldsov broj, δ - kut vjetra.

U izrazu (33) Reynoldsov broj određuje se prema izrazima:

$$Re = \frac{v \cdot D}{ni} \tag{34}$$

$$\mu_f = \left(17.239 + 4.635 \cdot 10^{-2} \cdot T_f - 2.03 \cdot 10^{-5} \cdot T_f^2\right) \cdot 10^{-6} \tag{35}$$

$$\rho_{zrak} = \frac{1.293 - 1.525 \cdot 10^{-4} \cdot y + 6.379 \cdot 10^{-9} \cdot y^2}{1 + 0.00367} \tag{36}$$

$$ni = \frac{\mu_f}{\rho_{zrak}} \tag{37}$$

gdje je: v - brzina vjetra (m/s), ni - kinematska viskoznost (m^2/s), ρ_{zrak} - gustoća zraka (kg/m^3), μ_f - dinamička viskoznost (kg/(m/s)).

Konstante prisutne u izrazu (33) određuju se prema Tablicama 1. i 2.

Tablica 1. Određivanje konstanti B1 i n

Površina vodiča	Reynoldsov broj		B_1	n
	od	do		
Sve površine	10^2	$2.65*10^3$	0.641	0.471
Hrapavost(Rf)≤0.05	$>2.65*10^3$	$5*10^4$	0.178	0.633
Hrapavost(Rf)>0.05	$>2.65*10^3$	$5*10^4$	0.048	0.8

Tablica 2. Određivanje konstanti A_1, B_2 i m_1

Kut vjetra (δ)	A1	B2	m_1
0˚≤δ≤24˚	0.42	0.68	1.08
24˚<δ<90˚	0.42	0.58	0.9

Radi određivanja hrapavosti (R_f) koristi se slijedeći izraz:

$$R_f = \frac{d}{2 \cdot (D - d)} \tag{38}$$

Radi određivanja Nusseltovog broja za prirodnu konvekciju koristi se sljedeći izraz:

$$N_{u2} = K_\beta \cdot (A_2 \cdot (G_r \cdot P_{r1})^{m_2}) \quad (39)$$

gdje je: K_β, A_2, m_2 - konstante radi proračuna prirodnog Nusseltovg broja, G_r - Grashof broj, P_{r1} - Prandtl broj.

U izrazu (39) K_β, Grashof i Prandtl broj određuju se slijedećim izrazima:

$$K_\beta = 1 - 1.76 * 10^{-6} * (\beta^{-2,5}) \quad (40)$$

$$G_r = \frac{D \cdot (T_s - T_a) \cdot g_r}{(T_f + 273) \cdot ni^2} \quad (41)$$

$$P_{r1} = 0.715 - 2.5 \cdot 10^{-4} \cdot T_f \quad (42)$$

gdje je: g_r - gravitacijska konstanta (m^2/s), β - kut inklinacije vodiča prema horizontali (º).

U izrazu (39) pojedine konstante se određuju prema Tablici 3.

Tablica 3. Određivanje konstanti A_2, m_2

Gr*Pr		A2	m_2
U granicama		Vrijednost	Vrijednost
10^{-1}	10^2	1.02	0.148
10^2	10^4	0.85	0.188
10^4	10^7	0.48	0.25
10^7	10^{12}	0.125	0.333

U izrazu (31) koristi se veća vrijednost dobivena izračunom prema (33), odnosno (39). Navedeno je predloženo u istraživanjima danim u [1-2], [134-144].

Sukladno predstavljenim izrazima i tablicama moguće je zaključiti da je prema definiranome modelu konvekcijsko odvođenje ovisno o temperaturi vodiča (na površini), inklinaciji vodiča prema horizontali, temperaturi okoline, nadmorskoj visini, geometriji vodiča (obuhvaća promjer vodiča i žice aluminija) te brzini i kutu vjetra.

IEEE 738 proračun ovog elementa svodi na određivanju veće vrijednosti triju snaga konvekcijskog odvođenja (prve dvije su aproksimacija prisilne, a treća prirodne konvekcije) [2]:

$$P_{c1} = K_{kut} \cdot \left(1.01 + 1.35 \cdot N_u^{0,52}\right) \cdot \lambda_f \cdot (T_s - T_a) \quad (43)$$

$$P_{c2} = K_{kut} \cdot 0.754 \cdot N_u^{0.6} \cdot \lambda_f \cdot (T_s - T_a) \quad (44)$$

$$P_{c3} = 3.645 \cdot \rho_{zrak} \cdot D \cdot (T_s - T_a)^{1.25} \quad (45)$$

Radi proračuna izraza (43), (44), (45) primjenjuju se izrazi [2]:

$$N_u = \frac{D \cdot \rho_{zraka} \cdot v}{\mu_{f1}} \quad (46)$$

$$\lambda_f = 2.424 \cdot 10^{-2} + 7.477 \cdot 10^{-5} \cdot T_f - 4.407 \cdot 10^{-9} \cdot T_f^2 \quad (47)$$

$$\mu_{f1} = \frac{1.458 \cdot 10^{-6} \cdot (T_f + 273)^{1.5}}{T_f + 383.4} \quad (48)$$

$$K_{kut} = 1.194 - \cos(\delta) + 0.194 \cdot \cos(2 \cdot \delta) + 0.368 \cdot sin\,(2 \cdot \delta) \quad (49)$$

gdje je: μ_{f1} - apsolutna kinematska viskoznost (kg/(m·s)).

U izrazu (46) gustoća zraka se računa kao u Cigre 601 odnosno primjenom (36).

Sagledavanjem razlika između Cigre 601 i IEEE 738 moguće je zaključiti da su razlike u samim izrazima velike, iako su oba pristupa bazirana na Newtonovom zakonu hlađenja. Cigre 601 koristi hrapavost površine kao element prisilne konvekcije te pri prirodnoj konvekciji uzima u obzir inklinaciju vodiča prema horizontali. Navedeno je u IEEE 738 potpuno zanemareno. Pristup proračuna predložen od IEEE 738 isključivo je ovisan o temperaturi vodiča (na površini), temperaturi okoline, nadmorskoj visini, geometriji vodiča (obuhvaća promjer vodiča) te brzini i kutu vjetra.

3.1.4 Snaga odvođenja topline uslijed radijacije po jedinici duljine (P_r)

Snaga radijacije (zračenja) posljedica je prijenosa topline elektromagnetskim valovima različite valne dužne. Drugim riječima radijacija je moguća u svim sredinama gdje se rasprostiru elektromagnetski valovi. Intenzitet zračenja zavisi od prirode tijela, njegove temperature, stanja površine, a za a plinove i od debljine sloja i tlaka plina. Kada elektromagnetsko zračenje dođe u dodir sa materijalnom sredinom jedan dio njegovog zračenja se apsorbira, jedan reflektira, a jedan propusti. U općem slučaju može se zapisati jednadžba [20], [145]:

$$P_r = \alpha_r \cdot P_r + r_r \cdot P_r + t_r \cdot P_r \quad (50)$$

gdje je: α_r - koeficijent apsorpcije, r_r - koeficijent refleksije, t_r - koeficijent propuštanja.

U izrazu (50) zbroj koeficijenta α_r, r_r i t_r mora biti jednak 1. U slučaju da se radi o čvrstim sredinama (slučaj analize na nadzemnim vodovima) može se pretpostaviti da je t_r jednak 0.

U osnovi se istraživanje snage radijacije vodiča nadzemnoga voda svodi na primjeni Stefan-Boltzmannovog zakona zračenja, odnosno na analizi razmjene topline zračenjem između dva tijela, pri čemu se uvažava da je površina zemlje odnosno neba beskonačna (jer je izuzetno velika u odnosu na površinu vodiča) [1-2], [20] [145]. Uvažavajući navedeno moguće je snagu radijacije izraziti u općem obliku kao [1-2], [135]:

$$P_r = \pi \cdot D \cdot \sigma_b \cdot \varepsilon \cdot ((T_s + 273)^4 - (T_a + 273)^4) \quad (51)$$

gdje je: σ_b - Stefan-Boltzmannova konstanta (W/(K^4·m^2), ε - koeficijent emisije vodiča.

Koeficijent emisije u suštini predstavlja odnos monokromatskoga zračenja između sivog i crnog tijela pri istoj temperaturi. Za vodiče nadzemnoga voda povećava se u ovisnosti o starenju vodiča te se kreće od 0.2 (novi vodiči) - 0.9 (stariji vodiči). Koeficijent emisije može se mjeriti za konkretni vod. No, temeljna preporuka je da se za vodove u eksploataciji više od 10 godina, pretpostavi vrijednost koeficijenta na iznose od 0.8-0.9 [1-2], [35], [58], [133], [145]. Gledajući metodologije dane u Cigre 601 i IEEE 738 obije metodologije na identičan način određuju vrijednost ovog elemenata JSTR. Razlika u izrazima je isključivo u tome što je u IEEE 738 uvrštena Stefan-Boltzmannova konstanta. Iz svega navedenoga moguće je zaključiti da je radijacija ovisna o promjeru vodiča, temperaturi vodiča (na površini) i okoline te o faktoru emisije koji je ovisan o stanju površine samog vodiča.

3.2 Radijalna distribucija temperature vodiča

Radijalna distribucija temperature vodiča predstavlja raspodjelu temperature vodiča po presjeku samog vodiča. Sam efekt je zanemariv za slabo opterećene vodiče s manjim presjecima. Međutim, kod vodiča s većim presjecima i većim opterećenjem (oko 2 do 3 A/mm^2), moguća su veća odstupanja te se u tim slučajevima prilikom proračuna DTO-a radijalna distribucija temperature vodiča mora uzeti u obzir. Kod realnih ACSR vodiča najveći razlog zbog čega se javlja sama radijalna distribucija je postojanje zračnih šupljina među žicama koje sačinjavaju strukturu ACSR vodiča. Poznato je da je zrak loš vodič topline u odnosu na metale koji sačinjavaju ACSR vodič

te upravo radi navedenoga dolazi do promjene temperature od središta vodiča prema njegovoj površini. Brojna istraživanja pokazuju da se razlika temperature vodiča u središtu i na njegovoj površini može kretati od 5 ºC do 25 ºC, a raznim teorijskim pristupima moguće je dobiti i veće iznose razlike. Praktičnim istraživanjima pokazano je da sam efekt ovisi o načinu použenja vodiča, struji voda, otporu (sa svim parametrima ovisnosti), naprezanju vodiča, stupnju korozije, zračnim šupljinama, kontaktnim površinama među žicama te naprezanju među pojedinim žicama [1-2], [20], [26], [48-49]. Pri tome je važno za naglasiti da, iako je temperatura na površini zavisna o klimatskim uvjetima, sama radijalna distribucija nije ovisna o njima [68], [114-116], [128], [146].

Matematičko modeliranje efekta radijalne distribucije na ACSR vodičima se može provesti rješavanjem sustava diferencijalnih jednadžbi (elektromagnetsko modeliranje) [26], [128]. Dodatno, moguće je analitički rješavati diferencijalnu jednadžbu stacionarnoga termičkog stanja uvođenjem određenih aproksimacija u proračunu [20], [48-49], [114-116]. No, prema praktičnim istraživanjima i sukladno Cigre 601 odnosno IEEE 738 se u realnim sustavima primjenjuju izrazi [1-2]:

$$T_j - T_s = \frac{I^2 \cdot R_{ac}}{2 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \left[\frac{1}{2} - \frac{d_c^2}{D^2 - d_c^2} \cdot ln\left(\frac{D}{d_c}\right)\right] \tag{52}$$

$$T_{av} = \frac{T_j + T_s}{2} \tag{53}$$

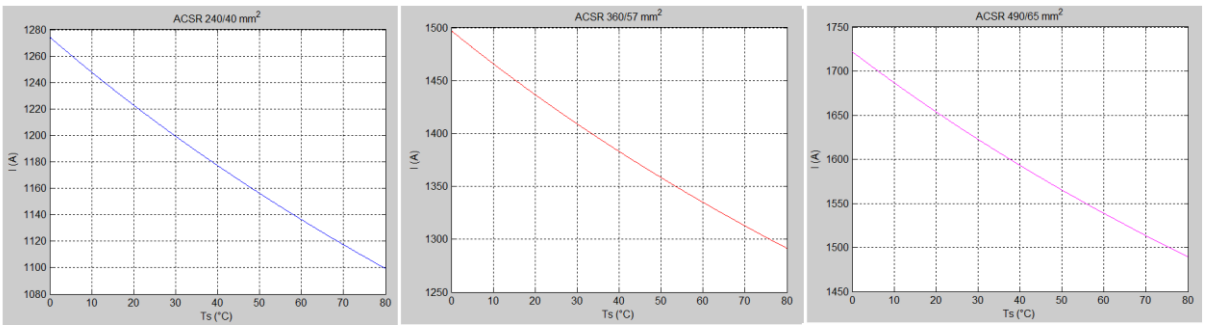
gdje je: λ - efektivna termalna radijalna vodljivost vodiča (W/(m·K)).

Jednadžba (52) dobivena je uz pretpostavku bimetalnog modela ACSR vodiča (aluminijski i čelični dio) te uz pretpostavku da je unutarnja proizvedena toplina po presjeku konstantna [114]. Izraz (53) rezultat je praktičnih istraživanja [114-116]. U izrazu (52) efektivna termalna radijalna vodljivost (λ) ovisna je pretežito o naprezanju vodiča, stupnju korozije, zračnim šupljinama, kontaktnim površinama te naprezanju među pojedinim žicama. Sukladno [48-49] njena vrijednost znatno ovisi o tome rade li ACSR vodiči u području ispod ili iznad koljena krivulje temperatura/provjes. Naime, u području iznad koljena naprezanje aluminijskih žica je izuzetno malo te se smanjuje vrijednost λ. Kretanje λ na realnim vodovima kreće se u rasponu od 0.5 do 7 W/mK. Za ACSR vodiče preporučena vrijednost je u iznosu 0.7-1 W/mK iznad koljena, a 1.5-2 W/mK ispod. Kako i puzno istezanje može utjecati na položaj koljena radi

konzervativnosti proračuna preporuča se uporaba nižih vrijednosti λ pri proračunu DTO-a [1-2], [48-49], [114-116].

Izrazima (52) i (53) postavljen je pojednostavljeni model uzimanja u obzir radijalne distribucije temperature vodiča. Iz postavljenoga modela moguće je zaključiti da se radijana distribucija uzima u obzir s pomoću tri temperature: u jezgri T_j, na površini T_s i prosječne T_{av}. Temperatura u jezgri određuje provjes vodiča, na površini konvekcijsko i radijacijsko odvođenje topline, a prosječna određuje izmjenični otpor. Stoga, je u modelu proračuna DTO-a uz radijalnu distribuciju, uz sam iznos DTO-a potrebno odrediti i vrijednost dviju temperatura, dočim se jedna temperatura smatra maksimalno dopuštenom temperaturom vodiča. U pogledu proračuna DTO-a IEEE 738 ukazuje da se T_s treba smatrati kao T_{max} te da se ukoliko je razlika T_j i T_s veća od 10 °C izvrši samo smanjenje T_s i ponovi izračun s umanjenom T_{max}. Cigre 601 isključivo preporuča provjeru radijalne distribucije i kontrolu provjesa pri uvećanoj temperaturi T_j. Hrvatski pravilnici ne obuhvaćaju navedenu problematiku te smatraju vodič kao izotermno tijelo što zbog razmatranog efekta nije točno u slučaju većih gustoća struje.

Na Slici 3. je za analizirane ACSR vodiče unutar rada prikazano uz prihvaćeni model radijane distribucije pri kojoj se struji dešava odstupanje T_j-T_s=10 °C pri različitim vrijednostima T_s, uz pretpostavku konzervativne vrijednosti λ=1 W/mK.



Slika 3. Izračunate vrijednosti I uz odstupanje 10 °C između T_j i T_s uz promjenu T_s za analizirane ACSR vodiče

Prema Slici 3. moguće je zaključiti da se za analizirane ACSR vodiče razlika T_j i T_s od 10 °C uz T_s=80 °C događa pri struji od 1099 A (4.58 A/mm^2), 1292 A (3.59 A/mm^2) te 1489 A (3.04 A/mm^2). Gledajući presjeke sam efekt obzirom na gustoću struje opaža se prije kod vodova većega presjeka. Na proračun DTO-a sam uvjet da je T_s-T_j<10 °C, utječe na način da je konačno određena vrijednost uvijek

ograničena s vrijednostima prikazanim na krivuljama. Stoga pri povoljnim klimatskim uvjetima, iako bi se iz (1) odredilo DTO većih vrijednosti, konačna vrijednost je uvijek manja ili jednaka onima prikazanim na krivuljama. Dodatno, nelogičnost je da se smanjenjem T_s (koja se u izračunu smatra T_{max}) zapravo poveća dopuštena struja. To je iz razloga što je smanjenjem T_s prema izrazu (52) potrebna veća struja da se održi dana razlika. Navedeno znatno ograničava proračun DTO-a pri većim gustoćama struje. U sklopu ove doktorske disertacije iz tih razloga nije se primijenila navedena metoda nego se izjednačila T_j s T_{max}. Time se nije postavilo navedeno ograničenje pri većim gustoćama, a proračuni su uvijek na strani sigurnosti obzirom da je temperatura u jezgri najviša od triju temperatura razmatranih u radijalnoj distribuciji. Dodatno, obzirom da se u Hrvatskoj praksi računa mehanički proračun uz pretpostavku temperature od 40 °C ograničenje temperature u jezgri koja izravno utječe na provjese je tim više opravdano [20].

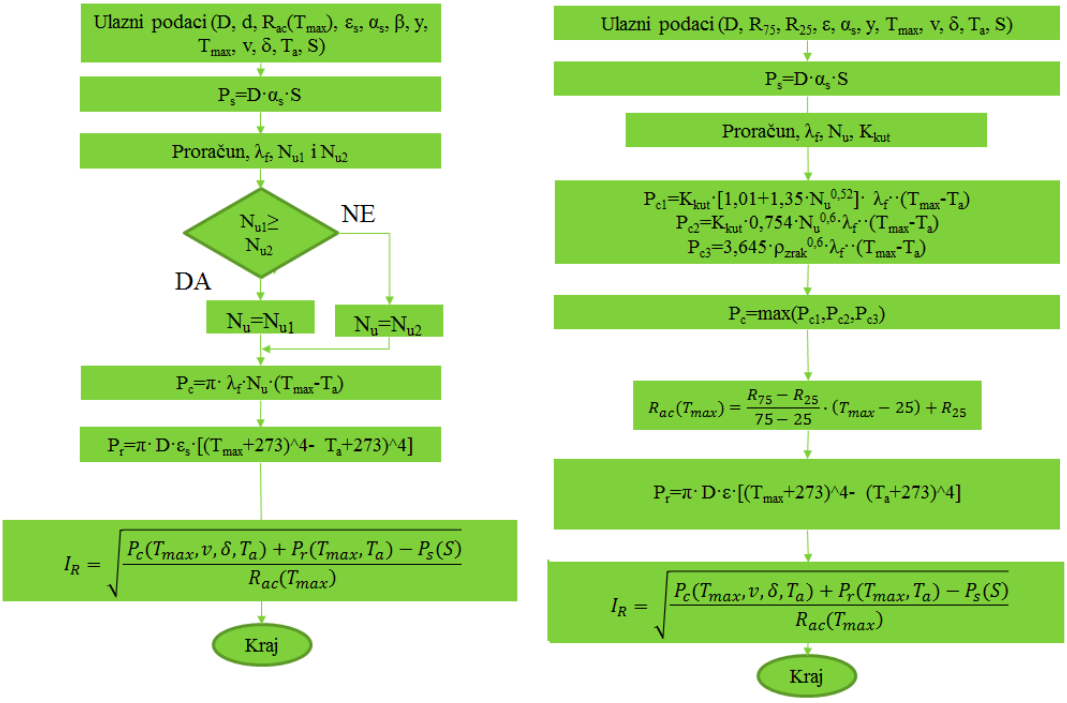
3.3 Metodologije proračuna stacionarnih dopuštenih termičkih opterećenja

Metodologije proračuna definirane u ovome poglavlju bazirane su na izrazima i metodama proračuna elemenata jednadžbe (1) definiranim u poglavlju 3.1 i 3.2 ovoga rada. Analizirane metodologije proračuna se mogu podijeliti na one koje vrijede za paran, odnosno neparan broj aluminijskih slojeva ACSR vodiča te na one koje uzimaju ili ne uzimaju u obzir radijalnu distribuciju temperature vodiča.

Za ACSR vodiče s dva sloja aluminija bez uzimanja u obzir radijalne distribucije (T_j=T_{av}=T_s=T_c) proračun je izvršen na bazi određivanja DTO-a (I_R) iz jednadžbe (1) sukladno izrazu:

$$I_R = \sqrt{\frac{P_c(T_{max},v,\delta,T_a)+P_r(T_{max},T_a)-P_s(S)}{R_{ac}(T_{max})}} \tag{54}$$

Iz izraza (54) moguće je zaključiti da se DTO računa tako da se svi elementi jednadžbe (1) izračunavaju pri T_{max}. Dodatno, u izrazu (54) je naglašena ovisnost pojedinih elemenata o zavisnim klimatskim uvjetima i T_{max}. Na Slici 4. prikazan je blok dijagram proračuna za ACSR vodiče s parnim brojem slojeva aluminija uz zanemarenje radijalne distribucije temperature vodiča te prema metodologiji danoj u Cigre 601 odnosno IEEE 738.



Slika 4. Blok dijagram metodologije proračuna Cigre 601 (lijevo), IEEE 738 (desno) za ACSR vodiče s parnim brojem slojeva aluminija ($T_j=T_{av}=T_s=T_c$)

Za slučaj da je DTO računat, za ACSR vodiče s neparnim brojem slojeva aluminija uz zanemarenje radijalne distribucije temperature vodiča, prvo je određena funkcijska ovisnost R_{ac} o I pri T_{max} korištenjem izraza (2). Potom je navedena ovisnost aproksimirana linearnom interpolacijom koja vrijedi na malom intervalu. Drugim riječima, ovisno o iznosu struje na malom intervalu [I_d I_g) je R_{ac} pri T_{max} aproksimiran izrazom:

$$R_{ac}=\frac{R_{ac}(I_g)-R_{ac}(I_d)}{I_g-I_d}\cdot(I-I_d)+R_{ac}(I_d), R_{ac}\in[I_d,I_g) \tag{55}$$

gdje je: I_d - donja vrijednost struje (A), I_g - gornja vrijednost struje (A), [I_d, I_g) - interval unutar kojeg aproksimacija vrijedi.

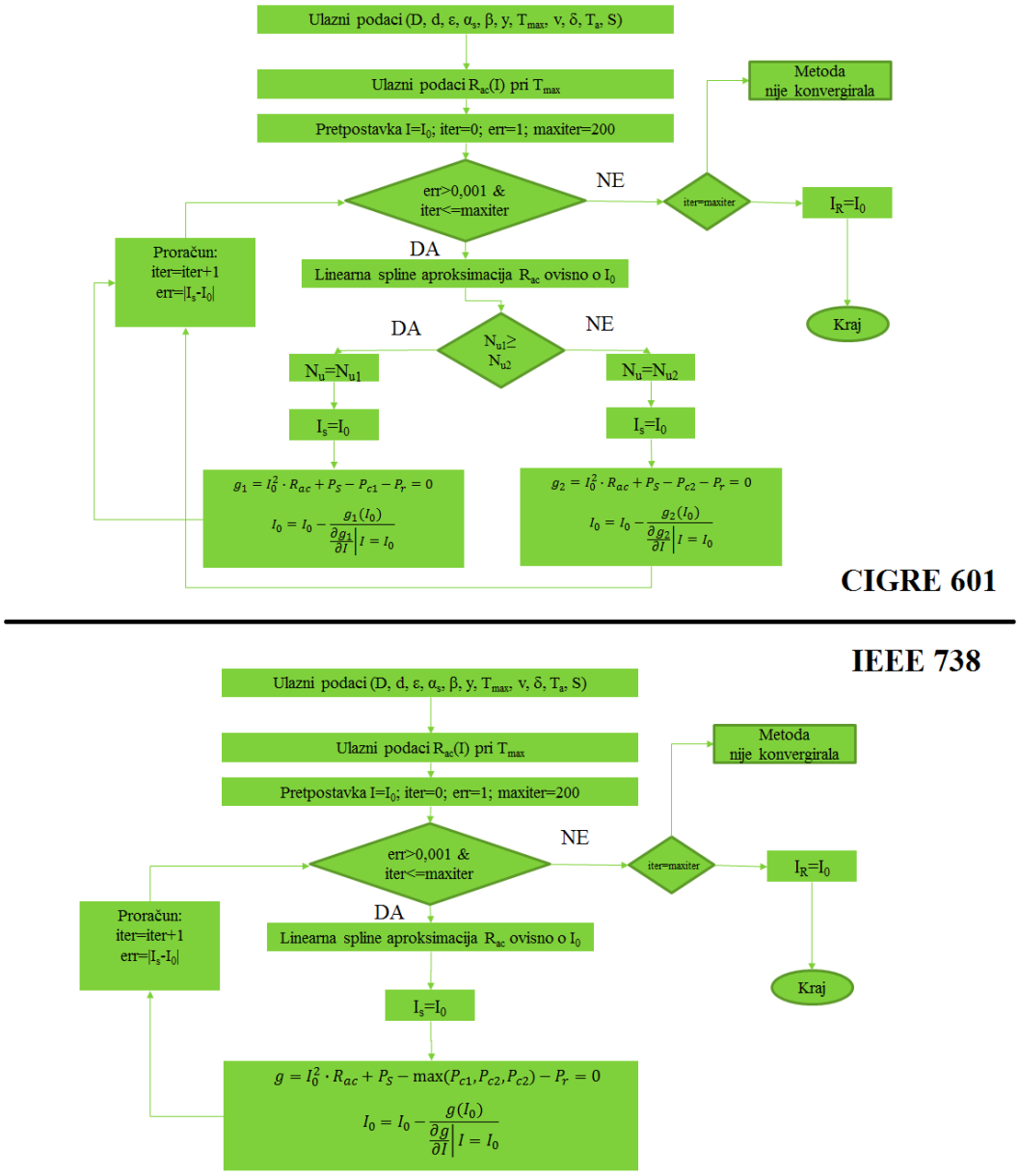
Izraz (55) je korišten u obje metodologije, a jedan od razloga primjene navedenog izraza je radi mogućnosti određivanja koeficijenata osjetljivosti. Kako je, za slučaj ACSR vodiča s neparnim brojem slojeva aluminija, R_{ac} ovisan o struji, radi određivanja DTO-a nije moguće postaviti jednostavan izraz (kao što je izraz (54) za ACSR vodiče s parnim brojem slojeva). Stoga jednadžba (1) postaje nelinearno ovisna o struji te ju je potrebno rješavati primjenom odgovarajuće numeričke metode. U ovoj doktorskoj disertaciji korištena je Newton-Rapshonova metoda [152]. U svakoj se

iteraciji sve dok izraz (1) ne poprimi približno vrijednost 0 nova vrijednost struje voda određuje prema:

$$I^{it+1} = I^{it} - \frac{g(I^{it})}{\frac{\partial g}{\partial I}\Big|I=I^{it}} \tag{56}$$

gdje je: *it* - vrijednost i-te iteracije.

Blok dijagram proračuna za slučaj ACSR vodiča s neparnim brojem slojeva aluminija uz zanemarenje radijalne distribucije temperature vodiča te prema metodologijama Cigre 601 i IEEE 738 dan je na Slici 5.



Slika 5. Blok dijagram metodologije proračuna Cigre 601 (gore), IEEE 738 (dolje) za ACSR vodiče s neparnim brojem slojeva aluminija (T_j=T_{av}=T_s=T_c)

U dijelu izračuna metodologija s radijalnom distribucijom temperature vodiča pojedine su vrijednosti isto određene na bazi primjene izraza (56). Pri tome su se prethodno iz izraza (52), (53) odredile funkcijske ovisnosti T_s i T_{av} o I i T_j, koje su potom uvrštene u izraz (1). U tim izračunima, kako je naglašeno osnovna pretpostavka je bila T_j=80 °C. Radi proračuna R_{ac} korišten je u metodologijama s radijalnom distribucijom izraz (18). Pri tome se tijekom proračuna određivala vrijednost T_{av}, a za slučaj neparnog broja slojeva aluminija računala se ovisnost R_{75} i R_{25} o I prezentirana linearnim interpolacijskim polinomima na malom intervalu (sukladno izrazu (55)). Blok dijagrami su veoma slični onima prikazanima na Slici 5. izuzev slijedećih razlika:

- U ulaznim podacima se dodaje λ i d_c.
- Pri proračunu R_{ac} za neparan broja slojeva aluminija se koristi izraz (18), uz korištenje izraza (55) za određivanje ovisnosti R_{75} i R_{25} o I.
- Postavlja se nova funkcija g koja ovisi isključivo o T_j i I.

3.4 Metodologije proračuna koeficijenta osjetljivosti stacionarnog dopuštenog termičkog opterećenja

Za slučaj stacionarnog DTO-a koeficijenti osjetljivosti se određuju matematički parcijalnim derivacijama sukladno teoriji analize osjetljivosti [148-149]. Naime, iz same analize osjetljivosti poznato je da je, koeficijent osjetljivosti temeljno odnos promjene izlazne varijable uz promjenu određene ulazne, pri čemu se sve ostale ulazne varijable drže konstantnima. Ukoliko je moguće parcijalnu derivaciju analitički odrediti koeficijent osjetljivosti predstavlja parcijalnu derivaciju zavisne varijable (izlaza) u odnosu na nezavisnu varijablu (jednog od ulaza). Navedenu metodu izračuna koeficijenta osjetljivosti moguće je koristiti smo ukoliko je poznat matematički izraz ovisnosti zavisne varijable o nezavisnima [148-149].

Pretpostavljajući, za ACSR vodič da su svi ulazni parametri ovisnosti stacionarnog DTO-a (D, d, β, α_s, ε, y, $R_{ac}(T_{max})$, R_{75}, R_{25}) izuzev klimatskih uvjeta konstantni, moguće je odrediti koeficijente osjetljivosti klimatskih uvjeta na slijedeći način:

$$K_V = \frac{\partial I_R}{\partial v} \tag{57}$$

$$K_\delta = \frac{\partial I_R}{\partial \delta} \tag{58}$$

$$K_S = \frac{\partial I_R}{\partial S} \tag{59}$$

$$K_T = \frac{\partial I_R}{\partial T_a} \tag{60}$$

U slučaju ACSR vodiča s parnim brojem slojeva aluminija koeficijenti osjetljivosti se dakle računaju kao parcijalne derivacije izraza (54). Za slučaj ACSR vodiča s neparnim brojem slojeva aluminija procedura određivanja koeficijenata osjetljivosti je kompleksnija. No, kako se u ovom radu R_{ac} aproksimirao s linearnom aproksimacijom putem izraza (55), sama funkcija *g* odnosno izraz (1) ima kubičnu formu. Stoga je, nakon određivanja rješenja kubične jednadžbe (1), koeficijente osjetljivosti moguće istovrsno računati korištenjem izraza (57-60). Navedeno izračunavanje parcijalnih derivacija primjenom (57-60) za ACSR vodiče s parnim i neparnim brojem slojeva izvršeno je putem Matlab simboličnog okruženja primjenom naredbe diff [149].

3.5 Proračun stacionarnih dopuštenih termičkih opterećenja realnih ACSR vodiča

U ovome poglavlju prvo se definiraju ulazni podaci koji su korišteni u proračunu stacionarnog DTO-a i karakteristike analiziranih ACSR vodiča. Potom se prikazuju rezultati i potencijal primjene stacionarnih DTO-a, uspoređuju pojedine metodologije bez uzimanja u obzir radijalne distribucije temperature vodiča te analiziraju koeficijenti osjetljivosti. Zatim se uspoređuju metode koje uzimaju u obzir radijalnu distribuciju temperature vodiča te određuju odstupanja u odnosu na pojednostavljene metode. Konačno se daje završni osvrt kompletne analize stacionarnih DTO-a analiziranih ACSR vodiča.

3.5.1 Ulazni podaci u proračunu stacionarnog dopuštenog termičkog opterećenja

U doktorskoj disertaciji razmatrana su tri ACSR vodiča nazivnih presjeka 240/40 mm^2, 360/57 mm^2 i 490/65 mm^2. Veličine koje su držane konstante u svim proračunima prikazane su u Tablici 4.

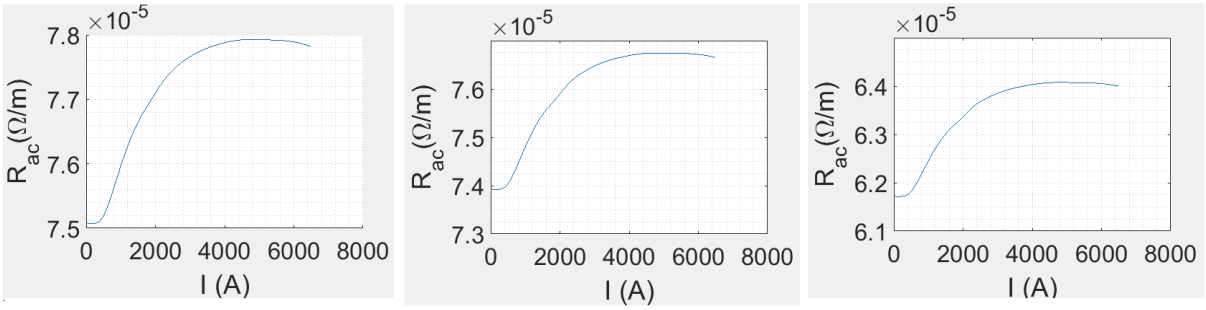
Tablica 4. Konstanti parametri u proračunu stacionarnog DTO-a

Parametar	Vrijednost		
	ACSR 240/40 mm^2	ACSR 360/57 mm^2	ACSR 490/65 mm^2
Nadmorska visina (y)	0 m	0 m	0 m
Koeficijent apsorpcije Sunčeva zračenja (α_s)	0.9	0.9	0.9
Koeficijent emisije (ε)	0.9	0.9	0.9
Kut inklinacije vodiča prema horizontali (β)	0 °	0 °	0 °
Maksimalno dopuštena temperatura vodiča (T_{max})	80 °C	80 °C	80 °C
Vanjski promjer (D)	$21.9 \cdot 10^{-3}$ m	$26.6 \cdot 10^{-3}$ m	$30.6 \cdot 10^{-6}$ m
Promjer žice aluminija (d)	$3.45 \cdot 10^{-3}$ m	$4.2 \cdot 10^{-3}$ m	$3.4 \cdot 10^{-3}$ m
R_{75}	$1.4633 \cdot 10^{-4}$ Ω/m	$1.0178 \cdot 10^{-4}$ Ω/m	Prema Slici 6.
R_{25}	$1.2216 \cdot 10^{-4}$ Ω/m	$8.4963 \cdot 10^{-3}$ Ω/m	Prema Slici 6.
$Rac(T_{max})$	$1.4875 \cdot 10^{-4}$ Ω/m	$1.0346 \cdot 10^{-4}$ Ω/m	Prema Slici 6.
Efektivna termalna radijalna vodljivost (λ)	1 W/m·K	1 W/m·K	1 W/m·K
Promjer čelične jezgre (d_c)	$8.04 \cdot 10^{-3}$ m	$9.8 \cdot 10^{-3}$ m	$10.2 \cdot 10^{-3}$ m
Trajno DTO-a* (I_{SR})	605 A	780 A	950 A

*preuzeto iz [13]

Ulazni podaci o geometrijskim veličinama ACSR vodiča i ulazni podaci radi proračuna R_{ac} preuzeti su iz [50] i [151]. Frekvencija je pretpostavljena sa iznosom od 50 Hz.

Na Slici 6. prikazani su za ACSR vodič nazivnog presjeka 490/65 mm^2 (jedini od analiziranih s neparnim brojem slojeva aluminija) rezultati ovisnosti R_{ac} o I pri temperaturi od 80 ºC, 75 ºC i 25 ºC. Navedeni rezultati su korišteni u proračunima, a dobiveni su sukladno metodologiji opisanoj u poglavlju 3.1.1, odnosno proračunima sukladno izrazu (2).



Slika 6. Izračunate vrijednosti Rac u ovisnosti o I za ACSR vodič 490/65 mm^2 pri temperaturi 80 ºC (lijevo), 75 ºC (centar), 25 ºC (desno)

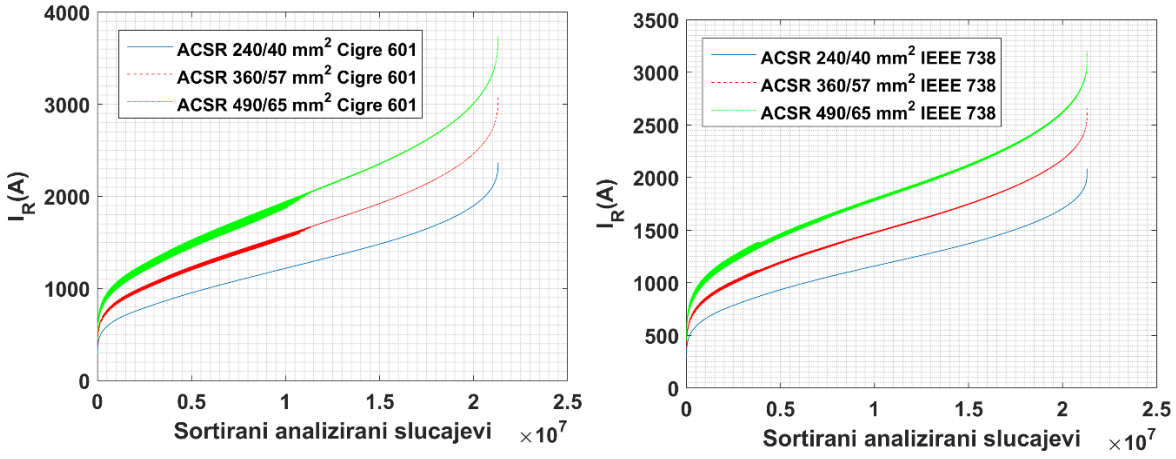
U simulacijama su se klimatski uvjeti mijenjali na slijedeći način:

- Brzina vjetra (v) mijenjala se od 0 m/s do 10 m/s korakom od 0.1 m/s.
- Kut vjetra (δ) mijenjao se od 0 º do 90 º s korakom od 1 º.
- Temperatura okoline (T_a) mijenjala se od -20 ºC do 40 ºC s korakom od 1 ºC.
- Globalni intenzitet Sunčeva zračenja (S) mijenjao se od 0 W/m^2 do 1480 W/m^2 s korakom od 40 W/m^2.

Navedenim promjenama klimatskih uvjeta analizirano je za svaki vodič 21304738 slučajeva kombinacija klimatskih uvjeta. Time su pokriveni gotovo svi slučajevi klimatskih uvjeta za koje se projektiraju dalekovodi. Izuzetak čini brzina vjetra koja u realnosti može poprimiti i znatno veće vrijednosti. No, s druge strane se u realnim sustavima određivanja DTO-a, njen iznos ograničava na određenu maksimalnu vrijednost pri proračunima (približno na vrijednosti od 10 m/s). Navedeno se čini iz razloga što vjetar ima enorman utjecaj na stacionarni DTO uz realno vrlo veliku varijabilnost.

3.5.2 Analiza rezultata bez uzimanja u obzir radijalne distribucije temperature vodiča

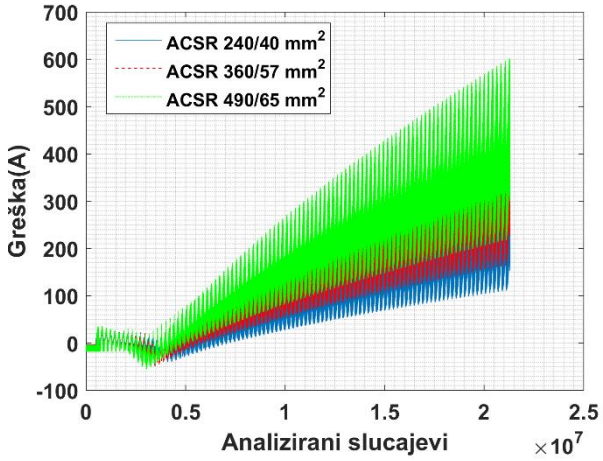
Na Slici 7. prikazani su rezultati proračuna određeni metodologijama Cigre 601 i IEEE 738 prema definiranim ulaznim parametrima uz rezultate stacionarnoga DTO-a složene od najmanje do najveće vrijednosti za ACSR vodič 240/40 mm^2. Cigre 601 pokazuje za ACSR vodiče 240/40 mm^2, 360/57 mm^2, 490/65 mm^2 kretanja stacionarnoga DTO-a u rasponima od: 292.2 A - 2368.3 A, 370.7 A - 3072.4 A te 452.5 A - 3748.9 A. Isti rasponi za metodu IEEE 738 iznose: 296.98 A - 2084.3 A, 376.9 A - 2656 A, 460.28 A - 3201.9 A. Maksimalne su vrijednosti određene za T_a=-20 °C, v=10 m/s, S=0 W/m^2, δ=90 °, a minimalne T_a=40 °C, v=0 m/s, S=1480 W/m^2, δ=0 °.



Slika 7. Izračunate vrijednosti stacionarnog DTO-a za analizirane slučajeve klimatskih uvjeta metodologijama Cigre 601 (lijevo), IEEE 738 (desno)

Razlike u proračunu stacionarnog DTO-a metodologijom Cigre 601 i IEEE 738 prikazane su na Slici 8. Za razmatrane ACSR vodiče razlike u proračunu kreću se u rasponima: -40.1 A - 319 A, -49 A - 462 A, 55.1 A - 602.5 A. Navedeno znači da se ukupna razlika izračunatog stacionarnog DTO-a kreće u granicama -4.54 % - 18.69 %. Maksimalna i minimalna odstupanja nastupaju pri različitim klimatskim uvjetima, ali se generalno minimalne razlike javljaju kod v u rasponu od 1.4 do 1.9 m/s, δ u rasponu od 36 do 37 °, T_a u rasponu od -15 do -20 °C te pri S=1480 W/m^2. Maksimalna se odstupanja javljaju pri v=10 m/s, δ u rasponu od 76 do 77 °, T_a=-20 °C i S=1480 W/m^2. Razlike između pojedinih metodologija primarno su posljedica različitoga načina proračuna konvekcijskog odvođenja topline te se znatno povećavaju pri većim

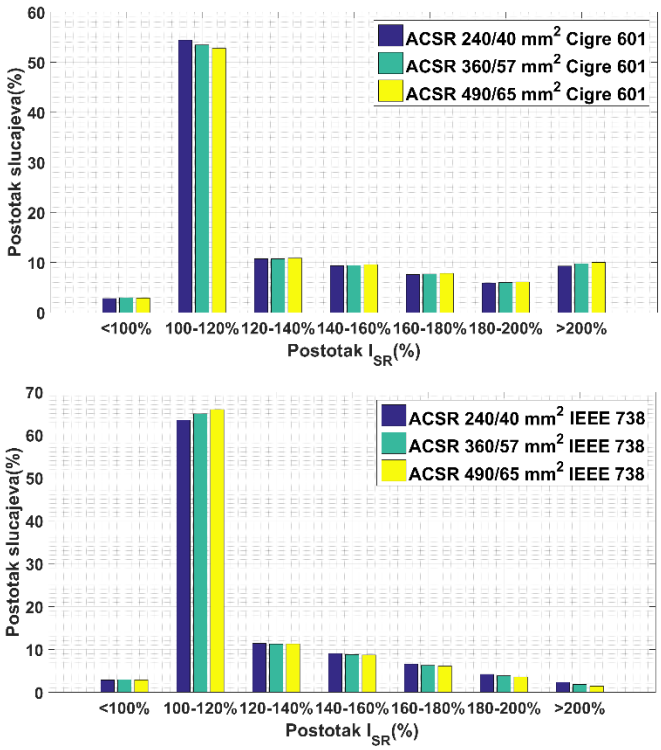
brzinama vjetra. Važno je naglasiti da su greške kao i rasponi kretanja DTO-a zapravo ovisni o odabranim minimalnim i maksimalnim klimatskim uvjetima u analizi.



Slika 8. Izračunate razlike između proračuna stacionarnog DTO-a razmatranih ACSR vodiča metodologijama Cigre 601 i IEEE 738

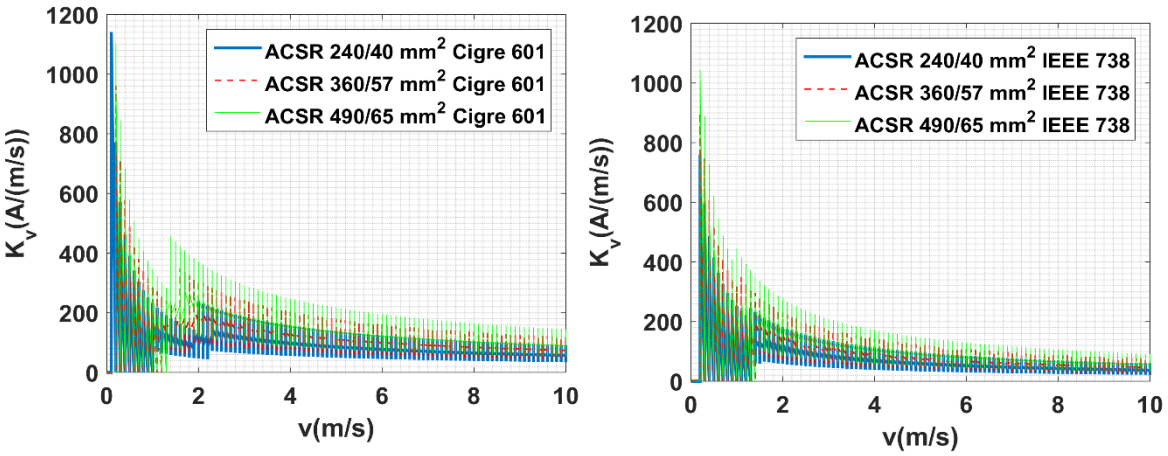
Kako bi se sagledao potencijal primjene tehnologija određivanja stacionarnog DTO-a u realnome vremenu pojedini slučajevi na Slici 7., raspoređeni su u razrede s obzirom na postotak trajnog DTO-a (I_{SR}), te je sagledan udio broja slučajeva u pojedinim intervalima (vrijednosti I_{SR} su navedene u Tablici 4.). Rezultati navedenih izračuna prikazani su na Slici 9.

Iz Slike 9. moguće je zamijetiti da je vrlo mali broj slučajeva od oko 2.8 % - 3 % manji od I_{SR}. U najvećem broju slučajeva 52.8 % - 54.4 % (Cigre 601) i 63.47 % - 65.9 % (IEEE 738) izračunato DTO je u razredu 100-120 % I_{SR}. U ostalim se intervalima zamjećuje kretanje udjela od 5.87 % - 10.84 % (Cigre 601) i 1.48 % - 11.42 % (IEEE 738). Za zamijetiti je da u najvišem razredu, većem od dva puta od I_{SR}, Cigre 601 daje udio od oko 9.28 % - 10 %, a IEEE 738 svega oko 1.47 % - 2.38 %. Stoga, pri razmatranim promjenama klimatskim uvjetima, generalno se može reći da je najvjerojatnije uvećanje trajnoga DTO-a do 20 % (uz pretpostavku jednake vjerojatnosti pojave svih kombinacija klimatskih uvjeta). Navedeno je u dobrom skladu s praktičnim istraživanjima danim u [27], [38], gdje je navedeno uvećanje do 130 % kao najvjerojatnije.



Slika 9. Izračunat potencijal stacionarnog DTO-a ACSR vodiča metodologijama Cigre 601 i IEEE 738

Na Slici 10. prikazano je kretanje K_V za razmatrane ACSR vodiče dobiveno metodologijama Cigre 601 i IEEE 738. U Tablici 5. dani su rezultati dobiveni statističkom analizom podijeljeni u pojedine intervale brzine vjetra. Podjela na intervale vrijednosti brzine vjetra izvršena je radi vjernijeg statističkog opisa.



Slika 10. Izračunati stacionarni K_v za razmatrane ACSR vodiče i analizirane slučajeve

Tablica 5. Statističke vrijednosti stacionarnog K_v

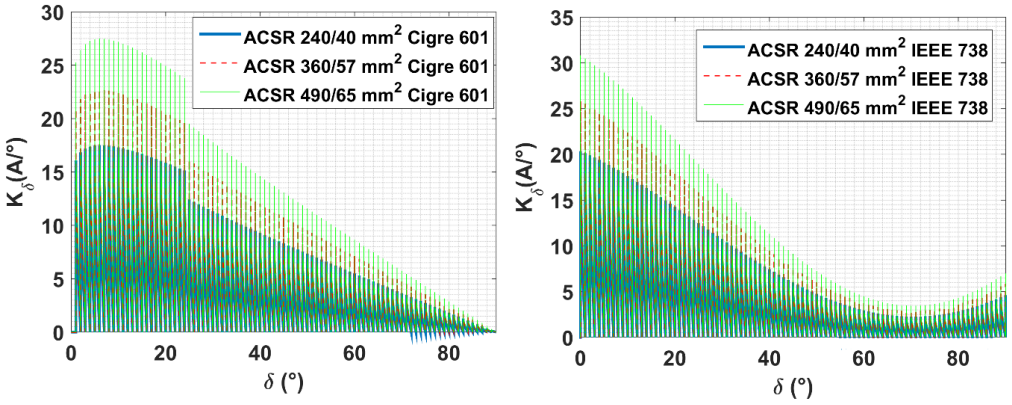
Metoda	ACSR	Tip vrijednosti	K_v (A/ (m/s))				
		v	0-2 m/s	2-4 m/s	4-6 m/s	6-8 m/s	8-10 m/s
Cigre 601	240/40 mm²	Minimalna	0	43.53	44.87	38.55	34.18
		Maksimalna	1141.48	230.28	155.63	123.08	104.04
		Prosječna	155.4	130.56	98.5	80.99	69.95
	360/57 mm²	Minimalna	0	71.14	57.93	49.81	44.18
		Maksimalna	959.98	298.19	201.60	159.45	134.79
		Prosječna	200.90	171.61	127.5	104.87	90.59
	490/65 mm²	Minimalna	0	86.35	70.28	60.43	53.61
		Maksimalna	1100.01	361.03	244.29	193.36	163.58
		Prosječna	244.92	208.08	154.47	127.05	109.77
IEEE 738	240/40 mm²	Minimalna	0	38.0	29.57	24.64	21.35
		Maksimalna	759.28	176.54	111.34	84.57	69.48
		Prosječna	162.2	98.62	69.2	54.94	46.24
	360/57 mm²	Minimalna	0	47.84	37.23	31.06	26.94
		Maksimalna	900.3	224	141.35	107.39	88.23
		Prosječna	200.78	124.89	87.71	69.67	58.66
	490/65 mm²	Minimalna	0	57.04	44.4	37.05	32.14
		Maksimalna	1042.29	267.3	168.75	128.3	105.45
		Prosječna	236.6	149.16	104.7	83.15	70.02

Iz prikazanih rezultata na Slici 10. odnosno Tablici 5. moguće je zaključiti da za analizirane vodove u prosjeku porast brzine vjetra u iznosu od 1 m/s uzrokuje povećanje stacionarnog DTO-a u rasponu od 69.95 A do 244.92 A (Cigre 601), odnosno od 46.24 A do 236.6 A (IEEE 738). Vrijednosti K_v su veće pri nižim vrijednostima brzine vjetra i većim presjecima vodiča. Na Slici 10. moguće je opaziti da se pri nižim brzinama vjetra (od 0.1 m/s do 0.2 m/s) događa diskontinuitet parcijalnih derivacija radi promjene izraza proračuna iz prirodne u prisilnu konvekciju. U rasponu brzina vjetra *v* od 0.1 m/s do 2.2 m/s dodatni diskontinuiteti su prisutni radi promjena u proračunu prisilne konvekcije. Maksimalne vrijednosti K_v kretale su se u rasponu od 104.04 A/(m/s) do 1141.48 A/(m/s) (Cigre 601), odnosno od 69.48 A/(m/s) do 1042.29 A/(m/s) (IEEE 738). Razlika u izračunatomu K_v između Cigre 601 i IEEE 738 kretale su se od 0 % do 33.48 %. Razlike su posebno izražene za maksimalne vrijednosti.

Koeficijent K_v prikazuje da je ovisnost stacionarnog DTO-a o brzini vjetra posebno velika. Primjerice, ukoliko se uzme smanjenje brzine vjetra od 4 m/s na 2 m/s uz odabrani K_v od 230.28 A/(m/s), navedeno uzrokuje smanjenje stacionarnog DTO-a u iznosu od 460.76 A. Stoga je pravilno mjerenje brzine vjetra ključno radi točnog određivanja stacionarnog DTO-a. S druge strane, ukoliko se pretpostavi maksimalna

greška anemometra u iznosu od 2 %, tada se odstupanje uslijed mjerenja brzine vjetra kreće u rasponu od 0 A do 28.88 A.

Na Slici 11. prikazano je kretanje K_δ za razmatrane ACSR vodiče dobiveno metodologijama Cigre 601 i IEEE 738. U Tablici 6. dani su rezultati dobiveni statističkom analizom podijeljeni u pojedine intervale kuta vjetra.



Slika 11. Izračunati stacionarni K_δ za razmatrane ACSR vodiče i analizirane slučajeve

Tablica 6. Statističke vrijednosti stacionarnog K_δ

Metoda	ACSR	Tip vrijednosti	K_δ (A/°)			
			δ	0 – 30 °	30 – 60 °	60 – 90 °
Cigre 601	240/40 mm²	Minimalna		0	0	0
		Maksimalna		17.51	11.32	5.5
		Prosječna		8.57	4.84	1.58
	360/57 mm²	Minimalna		0	0	0
		Maksimalna		22.67	14.67	7.12
		Prosječna		11.02	6.23	2.04
	490/65 mm²	Minimalna		0	0	0
		Maksimalna		27.48	17.79	8.65
		Prosječna		13.3	7.53	2.46
IEEE 738	240/40 mm²	Minimalna		0	0	0
		Maksimalna		20.35	10.74	4.61
		Prosječna		9.5	3.93	1.79
	360/57 mm²	Minimalna		0	0	0
		Maksimalna		25.82	13.64	5.85
		Prosječna		11.98	4.98	2.26
	490/65 mm²	Minimalna		0	0	0
		Maksimalna		30.81	16.29	7
		Prosječna		14.28	5.93	2.7

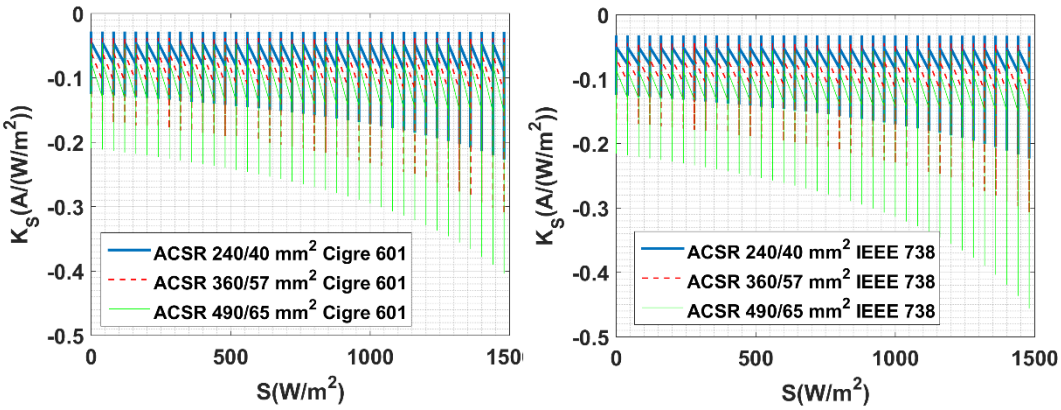
Iz prikazanih rezultata na Slici 11. odnosno Tablici 6. moguće je zaključiti da za analizirane vodove u prosjeku porast kuta vjetra u iznosu od 1 ° uzrokuje povećanje stacionarnog DTO-a u rasponu od 1.58 A do 13.3 A (Cigre 601), odnosno od 1.79 A do 14.28 A (IEEE 738). Vrijednosti K_δ su veće pri nižim vrijednostima kuta vjetra i većim presjecima vodiča. Maksimalne vrijednosti K_δ kretale su se u rasponu od 5.5 A/° do

27.48 A/º (Cigre 601), odnosno od 5.85 A/º do 30.81 A/º (IEEE 738). Razlika u izračunatomu K_δ između Cigre 601 i IEEE 738 kretale su se od -16.22 % do 0 %.

U realnosti kut vjetra se može naglo promijeniti u širem rasponu. Primjerice, ukoliko se uzme smanjenje kuta vjetra od 30 º na 0º uz odabrani K_δ od 13.3 A/º, navedeno uzrokuje smanjenje stacionarnog DTO-a u iznosu od 399 A. Stoga je pravilno mjerenje kuta vjetra, posebice pri nižim kutovima, ključno radi točnog određivanja stacionarnog DTO-a. Ukoliko se pretpostavi maksimalna greška mjerenja kuta vjetra u iznosu od 3 º, tada se najveće odstupanje uslijed mjerenja za definirane uvjete proračuna kreće od 0 A do 92.43 A. Navedeno označava da, bez obzira što je K_δ znatno manji od K_v, moguća su veća odstupanja u određivanju stacionarnog DTO-a radi greške mjerenja kuta vjetra nego same brzine.

Na Slici 12. prikazano je kretanje K_S za razmatrane ACSR vodiče dobiveno metodologijama Cigre 601 i IEEE 738. U Tablici 7. dani su rezultati dobiveni statističkom analizom podijeljeni u pojedine intervale intenziteta Sunčeva zračenja.

Iz prikazanih rezultata na Slici 12. odnosno Tablici 7. moguće je zaključiti da za analizirane vodove u prosjeku porast S u iznosu od 1 W/m^2 uzrokuje smanjenje stacionarnog DTO-a u rasponu od 0.056 A do 0.103 A (Cigre 601), odnosno od 0.059 A do 0.11 A (IEEE 738). Vrijednosti K_S su apsolutno veće pri većim vrijednostima intenziteta Sunčeva zračenja i većim presjecima vodiča. Maksimalne negativne vrijednosti K_S kretale su se u rasponu od 0.142 A/(W/m^2) do 0.403 A/(W/m^2) (Cigre 601), odnosno od 0.141 A/(W/m^2) do 0.456 A/(W/m^2) (IEEE 738). Razlika u izračunatomu K_S između Cigre 601 i IEEE 738 za analizirane slučajeve kretale su se apsolutno od 1.6 % do 17.07 %. Na prvi pogled utjecaj intenziteta Sunčeva zračenja izgleda malen. Međutim, S se u realnosti može naglo promijenit radi pojave oblaka. Primjerice, kod smanjenja S sa 1000 W/m^2 na 520 W/m^2 uz K_S od -0.1 A/(W/m^2), dolazi do povećanja stacionarnog DTO-a u iznosu od 48 A. Ukoliko se pretpostavi maksimalna greška mjerenja S u iznosu od 5 %, tada se najveće odstupanje uslijed mjerenja kreće u rasponu od približno 0 A do 33.74 A.



Slika 12. Izračunati stacionarni K_s za razmatrane ACSR vodiče i analizirane slučajeve

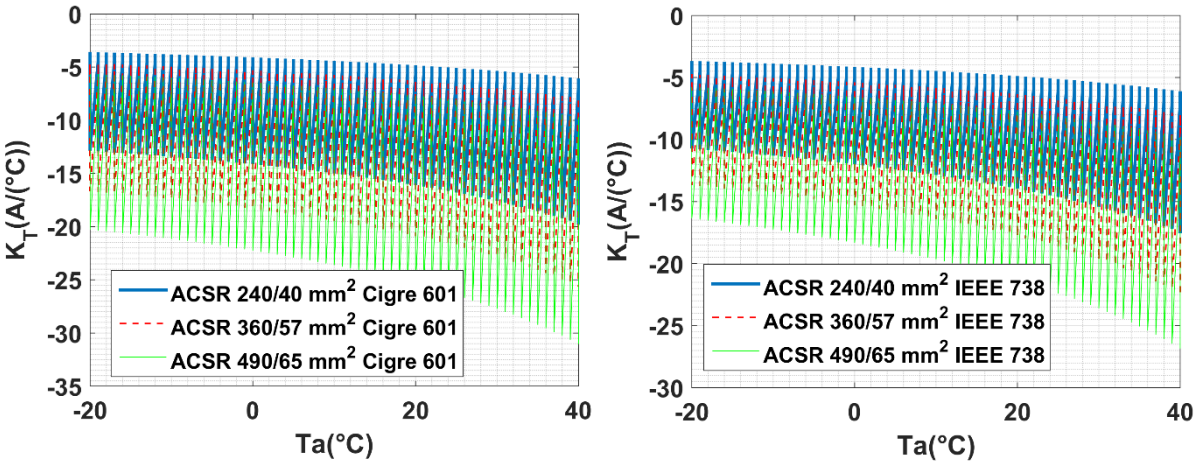
Tablica 7. Statističke vrijednosti stacionarnog K_S

Metoda	ACSR	Tip vrijednosti	K_S (A/(W/m^2))			
			S	0 – 520 W/m^2	520 – 1000 W/m^2	1000 – 1480 W/m^2
Cigre 601	240/40 mm^2	Minimalna		-0.142	-0.169	-0.227
		Maksimalna		-0.028	-0.028	-0.028
		Prosječna		-0.056	-0.058	-0.06
	360/57 mm^2	Minimalna		-0.191	-0.228	-0.312
		Maksimalna		-0.038	-0.038	-0.038
		Prosječna		-0.076	-0.079	-0.082
	490/65 mm^2	Minimalna		-0.240	-0.289	-0.403
		Maksimalna		-0.047	-0.047	-0.048
		Prosječna		-0.095	-0.098	-0.103
IEEE 738	240/40 mm^2	Minimalna		-0.141	-0.167	-0.223
		Maksimalna		-0.032	-0.032	-0.032
		Prosječna		-0.059	-0.060	-0.063
	360/57 mm^2	Minimalna		-0.189	-0.226	-0.307
		Maksimalna		-0.044	-0.044	-0.044
		Prosječna		-0.08	-0.083	-0.087
	490/65 mm^2	Minimalna		-0.25	-0.307	-0.456
		Maksimalna		-0.055	-0.056	-0.056
		Prosječna		-0.101	-0.105	-0.11

Na Slici 13. prikazano je kretanje K_T za razmatrane ACSR vodiče dobiveno metodologijama Cigre 601 i IEEE 738. U Tablici 8. dani su rezultati dobiveni statističkom analizom podijeljeni u pojedine intervale temperature okoline.

Iz prikazanih rezultata na Slici 13. odnosno Tablici 8. moguće je zaključiti da za analizirane vodove u prosjeku porast T_a u iznosu od 1 ºC uzrokuje smanjenje stacionarnog DTO-a u rasponu od 8.7 A do 18.64 A (Cigre 601), odnosno od 7.83 A do 16.94 A (IEEE 738). Vrijednosti K_T su apsolutno veće pri većim vrijednostima temperature okoline i većim presjecima vodiča. Maksimalne negativne vrijednosti K_T kretale su se u rasponu od 14.04 A/ºC do 31.03 A/ºC (Cigre 601), odnosno od

11.92 A/ºC do 26.84 A/ºC (IEEE 738). Razlika u izračunatomu K_T između Cigre 601 i IEEE 738 za analizirane slučajeve kretale su se apsolutno u rasponu od 2.43 % do 13.52 %. Temperatura okoline ima veliki utjecaj na sam iznos stacionarnog DTO-a. Primjerice, kod povećanja T_a sa 10 ºC na 20 ºC uz K_T od -9 A/ºC, dolazi do smanjenja stacionarnog DTO-a u iznosu od 90 A. Ukoliko se pretpostavi maksimalna greška mjerenja T_a u iznosu od 1 ºC, tada se najveće odstupanje uslijed mjerenja kreće u rasponu od približno 3.58 A do 31.03 A.



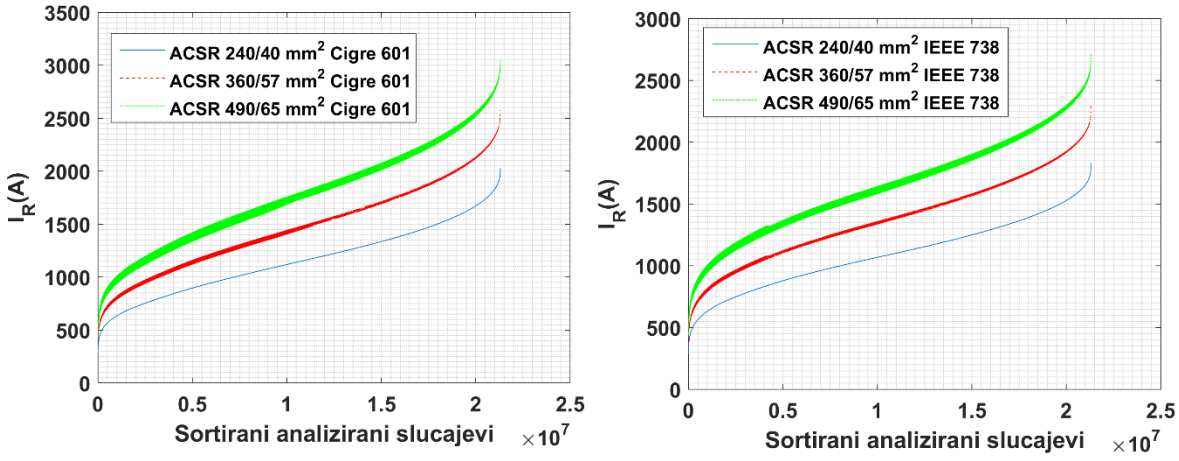
Slika 13. Izračunati stacionarni K_T za razmatrane ACSR vodiče i analizirane slučajeve

Tablica 8. Statističke vrijednosti stacionarnog K_T

Metoda	ACSR	Tip vrijednosti	K_T (A/°C)		
		T_a	-20 – 0 ºC	0 - 20 ºC	20 – 40 ºC
Cigre 601	240/40 mm²	Minimalna	-14.04	-15.98	-19.68
		Maksimalna	-3.58	-4.08	-4.83
		Prosječna	-8.7	-9.82	-11.79
	360/57 mm²	Minimalna	-18.22	-20.74	-25.58
		Maksimalna	-4.62	-5.29	-6.28
		Prosječna	-11.28	-12.74	-15.32
	490/65 mm²	Minimalna	-22.13	-25.18	-31.03
		Maksimalna	-5.62	-6.45	-7.67
		Prosječna	-13.7	-15.48	-18.64
IEEE 738	240/40 mm²	Minimalna	-11.92	-13.83	-17.44
		Maksimalna	-3.68	-4.15	-4.88
		Prosječna	-7.83	-8.98	-10.96
	360/57 mm²	Minimalna	-15.2	-17.66	-22.32
		Maksimalna	-4.74	-5.39	-6.34
		Prosječna	-9.99	-11.48	-14.05
	490/65 mm²	Minimalna	-18.21	-21.17	-26.84
		Maksimalna	-5.76	-6.55	-7.75
		Prosječna	-11.99	-13.8	-16.94

3.5.3 Analiza rezultata s uzimanjem u obzir radijalne distribucije temperature vodiča

Na Slici 14. su prikazani rezultati proračuna određeni metodologijama Cigre 601 i IEEE 738 uz pretpostavku T_j=80 ºC te uz rezultate stacionarnog DTO-a složene od najmanje do najveće vrijednosti za ACSR vodič 240/40 mm^2.



Slika 14. Izračunate vrijednosti stacionarnog DTO-a za analizirane slučajeve klimatskih uvjeta metodologijama Cigre 601 (lijevo), IEEE 738 (desno) uz T_j=80 ºC

Cigre 601 pokazuje za ACSR vodiče 240/40 mm^2, 360/57 mm^2, 490/65 mm^2 kretanja stacionarnog DTO-a u rasponima od: 282.7 A - 2029.7 A, 356.6 A - 2575 A te 432.04 A - 3059.2 A. Isti rasponi za IEEE 738 iznose: 287.3 A - 1831.1 A, 362.53 A - 2299.7 A te 439.38 A - 2721.7 A.

U odnosu na metodologije bez uzimanja u obzir radijalne distribucije temperature vodiča razlike u proračunima kreću se za ACSR vodiče 240/40 mm^2, 360/57 mm^2, 490/65 mm^2 prema Cigre 601 u rasponima od: 8.58 A - 338.6 A, 12.91 A - 497.42 A, 18.73 A - 689.72 A, odnosno postotno gledanu u rasponima od: 2.8 % - 15.73 %, 3.31 % - 17.34 %, 3.88 % - 19.94 %. Prema IEEE 738 navedeni rasponi iznose: 8.81 A - 253.15 A, 13.14 A - 356.26 A, 19.2 A - 480.28 A, odnosno postotno gledano: 2.83 % - 13.44 %; 3.33 % - 14.82 %, 3.95 % - 16.48 %.

Gledajući same greške proračuna utjecaj radijalne distribucije je veći pri većim opterećenjima i većim presjecima vodiča. Uz neku razumnu pogrešku do 5 % u proračunu DTO-a, prema definiranoj metodologiji T_j=T_{max}, gustoća struja pri kojoj je opravdano zanemarenje radijalne distribucije za ACSR vodič 240/40 mm^2 iznosi 2.31 A/mm^2 (556 A), za ACSR vodič 360/65 mm^2 1.71 A/mm^2 (619 A) te za ACSR

vodič 490/65 mm^2 1.28 A/mm^2 (630 A). Pri većim gustoćama opravdano je koristiti izraze za uračunavanje radijalne distribucije temperature vodiča.

3.5.4 Zaključci analize rezultata proračuna stacionarnog dopuštenog termičkog opterećenja

Kroz analizu su se sustavno sagledali rezultati izračunatoga stacionarnog DTO-a pojedinim metodologijama te su definirane vrijednosti koeficijenta osjetljivosti.

Pokazano je kako se same metode razlikuju, a same razlike prvenstveno su posljedica različitog načina određivanja konvekcijskog odvođenja topline u pojedinim metodologijama. Numerički izračunate razlike, za analizirane ACSR vodiče i razmatrane slučajeve, pokazuju da se odstupanja između Cigre 601 i IEEE 738 mogu kretati u visokim rasponima od -40.1 do 602.5 A, odnosno postotno gledano maksimalne razlike su u rasponu od -4.54 % - 18.69 %.

U pogledu određivanja isplativosti uvođenja modernih sustava monitoringa pokazano je kako u analiziranim uvjetima (koji su praktički identični projektiranim uvjetima dalekovoda uz ograničenje brzine vjetra na 10 m/s), najvjerojatnije je da stacionarni DTO-a leži u području od 100-120 % trajno dopuštenog opterećenja.

Analizom osjetljivosti na klimatske uvjete numerički je pokazano da samo stacionarno DTO najviše ovisi o brzini vjetra, temperaturi okoline, kutu vjetra te intenzitetu Sunčeva zračenja. No, s druge strane ukoliko se uvaže realne promjene klimatskih uvjeta može doći do okretanja navedenog redoslijeda. Konkretno pomoću obje metodologije prosječni koeficijenti promjene stacionarnog DTO-a za v kretali su se u rasponu od 46.24 A/(m/s) do 244.92 A/(m/s), za T_a od -18.61 A/°C do -7.83 A/°C, za δ od 1.58 A/° do 14.28 A/° te za S od -0.11 $A/(W/m^2)$ do -0.056 $A/(W/m^2)$. Navedeni se koeficijenti mogu koristiti za brzu estimaciju potencijala uvođenja suvremenih sustava dinamičkog određivanja stacionarnoga DTO-a.

Važno je naglasiti da su u simulacijama veličine ε, β, α_s, T_{max}, y držani konstantnima. Parametri ε i α_s uzeti su s vrijednošću od 0.9. Smanjenjem α_s dolazi do smanjenja K_S, dok smanjenjem ε dolazi do povećanja K_δ, K_T, K_V te smanjenja K_S. Povećanje β dovodi do povećanja K_T i smanjenja K_S u slučajevima gdje je prirodna konvekcija dominantna. Povećanje T_{max} uzrokuje apsolutno povećanje svih razmatranih koeficijenata osjetljivosti. Za provjeru utjecaja promjena koeficijenata

osjetljivosti na y sve simulacije su ponovljene pri y=2000 m. Za slučaj y=2000 m K_T je bio u rasponu od -7.28 % do -8.46 % manji, K_S od 7.4 % do 8.77 % veći, K_δ od -9.25 % do -9.78 % manji i K_v od -6.55 % do -21.39 % manji. Stoga nadmorska visina igra važnu ulogu pri analizi samih koeficijenata.

U pogledu, koliko greška u mjerenju utječe na grešku u određenomu stacionarnom DTO-u, osnovna je pretpostavka bila da su maksimalne greške mjerenih uređaja konstante. U takvim uvjetima za razmatrane vodove greške iznose: za v u rasponu od 0 A do 28.88 A, za δ u rasponu od 0 A do 92.43 A, za S u rasponu od 0 A do 33.74 A te za T_a u rasponu od 3.58 A do 31.03 A. Stoga najveću grešku kod određivanja stacionarnoga DTO-a radi mjerenja uvode anemometri pri mjerenju kuta i brzine vjetra. Navedena analiza može se dodatno proširiti razmatranjem stvarnih krivulja točnosti mjerenja realno instalirane senzorike.

U konačnici je zaključeno da u proračunima utjecaj radijalne distribucije temperature vodiča nije zanemariv pri većim gustoćama struje. Ukoliko se dozvoljava odstupanje od 10 °C između temperature u jezgri i na površini, tada je izračunato da je efekt radijalne distribucije moguće zanemariti pri gustoćama struje manjim od 3 A/mm^2 do 4.58 A/mm^2. S druge strane, ukoliko se želi postići da temperatura u jezgri ne prijeđe značajnije T_{max}, tada uz razumnu pogrešku od 5 % u proračunima efekt radijalne distribucije dolazi do izražaja pri manjim gustoćama od 1.28 A/mm^2 do 2.31 A/mm^2.

4. ANALIZA POSTOJEĆIH METODOLOGIJA PRORAČUNA DINAMIČKOG DOPUŠTENOG TERMIČKOG OPTEREĆENJA

U ovome poglavlju se prvo definira JDTSV nadzemnog voda. Potom se definiraju osnovni načini proračuna elemenata te jednadžbe i uvodne aproksimacije proračuna koje se koriste unutar ove disertacije. Dodatno se definiraju algoritmi postojećih metodologija proračuna dinamičkog DTO-a koji se kasnije uspoređuju s novo razvijenim algoritmom unutar doktorske disertacije. Konkretno se analiziraju algoritmi rješavanja problema dinamičkog DTO-a primjenom numeričke metode Runge-Kutta četvrtog reda, odnosno primjenom metode linearizacije. Konačno se definira način proračuna koeficijenta osjetljivosti dinamičkog DTO-a.

4.1 Jednadžba dinamičkog termičkog stanja vodiča

Dinamičko termičko odnosno nestacionarno stanje vodiča nadzemnih vodova nastupa prilikom svake vremenske promjene tereta odnosno klimatskih uvjeta uzduž voda. Kako su takve promjene uobičajene dolazi do potrebe formiranja odgovarajućih matematičkih modela koji opisuju takvo stanje. Time se zapravo teži u što efikasnijem opisivanju realnih pojava na vodovima, odnosno u izradi mogućnosti kvalitetne analize dinamičkog termičkog stanja. Bez obzira na, relativno jednostavnoj geometriji ACSR vodiča, sami modeli zagrijavanja vodova u realnosti su izuzetno kompleksni. Navedeno je iz razloga što je pored vremenske promjene temperature vodiča prisutna i njezina aksijalna odnosno radijalna promjena [1], [3], [14-16], [20], [22-24], [47], [102], [128], [153-156]. U općenitom obliku JDTSV dana je izrazom:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda_l}{\gamma \cdot c} \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z} \right) + \frac{Q(T,r,t,\phi,z)}{\gamma \cdot c} \tag{61}$$

gdje je: T - temperatura (ºC), t - vrijeme (s), r - radijus (m), Q - toplinska snaga po volumenu (W/m^3), z - aksijalna duljina (m), γ - gustoća materijala (kg/m^3), λ_l - toplinska vodljivost (W/(m/K)), c - specifični toplinski kapacitet (J/kg·ºC), Φ - azimutni kut (º).

U jednadžbi (61) primijenjen je cilindrični koordinatni sustav jer su tipični vodiči nadzemnih vodova kružnog oblika. Ukoliko se zanemari aksijalna raspodjela temperature (z os) i pretpostavi cilindrična simetrija raspodjele temperature tada jednadžba (61) prelazi u [1], [20], [114]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda_l}{\gamma \cdot c} \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{Q(T,r,t)}{\gamma \cdot c} \tag{62}$$

Jednadžba (61) predstavlja diferencijalnu jednadžbu koju nije moguće riješit analitički na realnim vodovima, već se moraju primijeniti složene numeričke metode [20], [128]. Uz navedeno moraju se definirati i rubni uvjeti, a za ACSR vodiče jednadžba (62) poprima dva oblika ovisno o tome opisuju li se prilike u jezgri ili u aluminijskome dijelu. Rubni uvjeti za ACSR vodiče obuhvaćaju početnu temperaturu aluminijskog odnosno čeličnog dijela na njihovim površinama, način provođenja temperature na granici aluminijskog i čeličnog dijela te način razmjene topline na samoj površini vodiča. Rješavanjem (62) dobiva se raspodjela temperature po presjeku ACSR vodiča čime se uzima u obzir radijalna raspodjela temperature vodiča. Samo dinamičko DTO dobiva se višestrukim rješavanjem (62) povećavajući odnosno smanjujući struju sve dok temperatura na površini vodiča (ili sa većom sigurnosti u jezgri) u željenom vremenskom intervalu ne poprimi vrijednost T_{max}. Primjena jednadžbi (61) i (62) je u realnim sustavima dinamičkog opterećivanja nepraktična posebno u pogledu brzine dobivanja rezultata (višestruka primjena složenih numeričkih metoda). Stoga se u ovoj disertaciji koristila aproksimativna diferencijalna jednadžba slijedećeg oblika [1], [3], [14-16], [20], [22-24], [47], [102], [128], [153-157]:

$$m \cdot c_p \cdot \frac{dT_{av}}{dt} = I^2 \cdot R_{ac} + P_S - P_c - P_r \tag{63}$$

gdje je: m - uzdužna masa vodiča (kg/m), c_p - specifični toplinski kapacitet vodiča (J/kg·ºC).

Jednadžba (63) rezultat je niza znanstvenih istraživanja [114-116] koja pokazuju da se radijalni utjecaj u dinamičkim uvjetima pojednostavljeno može opisati kao i u stacionarnome stanju odnosno primjenom izraza (52-53). Time se postupak određivanja promjene temperature u vremenu svodi na rješavanje nelinearne jednadžbe prvoga reda odnosno na analizi isključivo vremenske promjene temperature. Samim rješavanjem (63) uz primjenu izraza (52-53) moguće je pratiti vremenske promjene T_j, T_s i T_{av}. Naravno u slučaju zanemarenja radijalne distribucije aproksimativno se može pretpostaviti T_c=T_j=T_s=T_{av}.

U izrazu (63) se članovi $I^2 \cdot R_{ac}$, P_s, P_c, P_r određuju na jednak način kao i za stacionarna stanja odnosno sukladno poglavljima 3.1.1, 3.1.2, 3.1.3 te 3.1.4 ovoga

rada. Ukupni toplinski koeficijent ACSR vodiča određuje se prema sljedećim izrazima [1]:

$$m \cdot c_p = m_a \cdot c_a + m_s \cdot c_s = \gamma_a \cdot A_a \cdot c_a + \gamma_{st} \cdot A_s \cdot c_s \tag{64}$$

$$c_a = c_{a20} \cdot \left(1 + \beta_a \cdot (T_{av} - 20)\right) \tag{65}$$

$$c_s = c_{s20} \cdot \left(1 + \beta_s \cdot \left(T_j - 20\right)\right) \tag{66}$$

gdje je: m_a, m_s - uzdužna masa aluminijskog odnosno čeličnog dijela ACSR vodiča (kg/m), c_a, c_s - specifični toplinski kapacitet aluminijskog odnosno čeličnog dijela ACSR vodiča (J/kg·ºC), A_a, A_s - površina aluminijskog odnosno čeličnog dijela ACSR vodiča (m^2), γ_a, γ_{st} - gustoća aluminijskog odnosno čeličnog dijela ACSR vodiča (kg/m^3), c_{a20}, c_{s20} - specifični toplinski kapacitet aluminijskog odnosno čeličnog dijela ACSR vodiča pri 20 ºC (J/kg·ºC), β_a, β_s - temperaturni koeficijent promjene specifičnog toplinskog kapaciteta aluminijskog odnosno čeličnog dijela ACSR vodiča (1/ºC).

Tipične vrijednosti konstanta radi proračuna izrazima (64-66) su dane u Tablici 9.

Tablica 9. Konstante za proračun izrazima (64-66)

Materijal vodiča	γ (kg/m^3)	β_a, β_s (1/ºC)	c_{a20}, c_{s20} (J/kg·ºC)
Aluminiji	2703	$3.8 \cdot 10^{-4}$	897
Aluminijska legura	2703	$4.5 \cdot 10^{-4}$	909
Bakar	8890	$3.35 \cdot 10^{-4}$	383
Galvanizirano željezo	7780	$1.0 \cdot 10^{-4}$	481

Sukladno jednadžbi (63) razlikuju se tri stanja u kojima se s termičkog aspekta može nalaziti vod:

- $\frac{dT_{av}}{dt} > 0$, vrijedi ako je snaga dovođenja topline po jedinici duljine veća od one odvođenja. Primjerice, ukoliko se u nekom trenutku nakon uspostave stacionarnoga stanja, poveća intenzitet Sunčeva zračenja uz struju i ostale klimatske uvjete konstante, doći će do porasta snage dovođenja topline uslijed Sunčeva zračenja što će uzrokovati porast temperature vodiča, odnosno pozitivnu vrijednost promjene temperature u vremenu (derivacije).

- $\frac{dT_{av}}{dt} < 0$, vrijedi ako je snaga odvođenja topline po jedinici duljine veća od one dovođenja. Primjerice, ukoliko se u nekom trenutku nakon uspostave stacionarnoga stanja, smanji intenzitet Sunčeva zračenja uz struju i ostale klimatske uvjete konstante, doći će do smanjenja snage dovođenja topline uslijed Sunčeva zračenja što će uzrokovati pad temperature vodiča odnosno, negativnu vrijednost promjene temperature u vremenu (derivacije).
- $\frac{dT_{av}}{dt} = 0$, vrijedi kada postoji ravnoteža između snage dovođenja i odvođenja topline po jedinici duljine. U tom slučaju nema promjene temperature vodiča u vremenu odnosno vodič se s termičkog aspekta nalazi u stacionarnome stanju. Upravo navedeno stanje analizirano je u trećem poglavlju ovog rada.

Sukladno navedenom, rješavanjem jednadžbe (63) dobivaju se vremenske promjene temperature pri raznim promjenama klimatskih uvjeta odnosno struje voda. Radi određivanja dinamičkog DTO-a primjenom (63) potrebno je pri željenim promjenama klimatskih uvjeta navedenu jednadžbu višestruko puta rješavati sve dok se povećanjem odnosno smanjenjem struje u definiranom vremenskom intervalu ne dobije da temperatura vodiča poprimi iznos T_{max}. Iz navedenog je moguće zaključiti da dinamičko DTO, pored o klimatskih uvjeta i ostalih parametra o kojima ovisi stacionarno DTO, ovisi uz određene konstante parametre i o dužini vremenskog intervala proračuna te o temperaturi na kojoj je vod bio zagrijan na početku samoga razmatranja.

Samim radom se u okviru postojećih metodologija obuhvaća numeričko rješavanje jednadžbe (63) primjenom Runge-Kutta metode četvrtog reda, odnosno dobivanje njenog aproksimativnog rješenja primjenom postupka linearizacije, a sve sukladno postupcima opisanim u [1], [14-16], [20], [157], [172].

4.2 Metoda proračuna dinamičkog dopuštenog termičkog opterećenja primjenom Runge-Kutta metode četvrtog reda

Određivanje DTO-a primjenom Runge-Kutta metode četvrtog reda svodi se na iterativnom rješavanju jednadžbe (63). Stoga, radi određivanja dinamičkog DTO-a prvo je potrebno sagledati na koji se način rješava sama jednadžba (63).

U svrhu rješavanja jednadžbe (63) primjenom Runge-Kutta metode četvrtog reda prvo je potrebno izraziti derivaciju promjene prosječne temperature vodiča kako slijedi:

$$g_d = \frac{dT_{av}}{dt} = \frac{1}{m \cdot c_p} \cdot (I^2 \cdot R_{ac} + P_S - P_c - P_r) \tag{67}$$

Za napomenuti je da slično kao i u stacionarnom stanju jednadžba (67) ima više oblika ovisno o korištenim izrazima za P_c.

Rješenje se sada za zadani vremenski interval (od 0 do t_f) određuje tako da se u svakom koraku vremena (iteraciji) na vremenskom razmaku Δt odredi nova vrijednost prosječne temperature vodiča sukladno izrazima:

$$T_{av}^{it+1} = T_{av}^{it} + \frac{1}{6} \cdot (k_1 + 2 \cdot k_2 + 2 \cdot k_3 + k_4) \tag{68}$$

$$k_1 = g_d(t^{it}, T_{av}^{it}) \cdot \Delta t \tag{69}$$

$$k_2 = g_d(t^{it} + \Delta t/2, T_{av}^{it} + 1/2 \cdot k_1 \cdot \Delta t) \cdot \Delta t \tag{70}$$

$$k_3 = g_d(t^{it} + \Delta t/2, T_{av}^{it} + 1/2 \cdot k_2 \cdot \Delta t) \cdot \Delta t \tag{71}$$

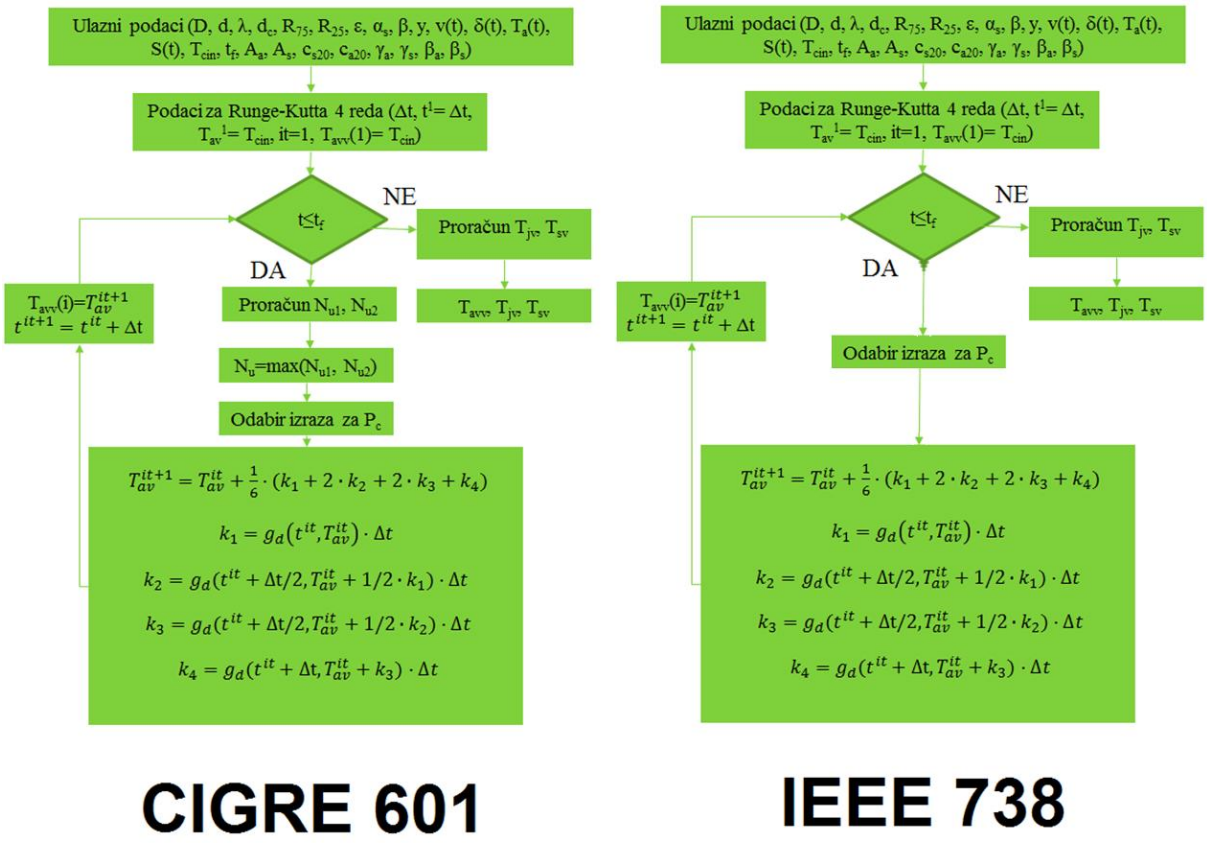
$$k_4 = g_d(t^{it} + \Delta t, T_{av}^{it} + k_3 \cdot \Delta t) \cdot \Delta t \tag{72}$$

gdje je: k_1, k_2, k_3, k_4 - koeficijenti Runge-Kutta metode četvrtoga reda (ºC/s), Δt - korak vremena (s), t^{it} - vrijednost vremena u i-toj iteraciji (s), $T_{av}{}^{it}$ - vrijednost prosječne temperature u i-toj iteraciji (ºC).

Pored samih matematičkih izraza definiranih sa (68-72) radi rješavanja jednadžbe (63) potrebno je poznavati početni uvjet. Početni se uvjet postavlja tako da se u početnom trenutku pretpostavi neka vrijednost temperature tzv. početna temperatura vodiča (T_{cin}). U praktičnim uvjetima se ona određuje senzorima ili se izjednačuje s temperaturom okoline pod pretpostavkom da je vod bio duže vrijeme van pogona (nekoliko sati odnosno period višestruko duži od toplinske konstante) [3-4], [77], [112].

Ukoliko se ne uzima u obzir radijalna distribucija temperature vodiča tada se pretpostavlja T_{av}=T_c, odnosno vrši se izračun jedne vremenske promjene temperature. U slučaju uzimanja u obzir radijalne distribucije u sam se izraz (63) uvrštava izraz za T_s izražen preko T_{av} i I, a dobiven iz izraza (52-53). Nakon određivanja vremenske promjene T_{av} se iz izraza (52-53) određuju vremenske promjene T_s i T_j.

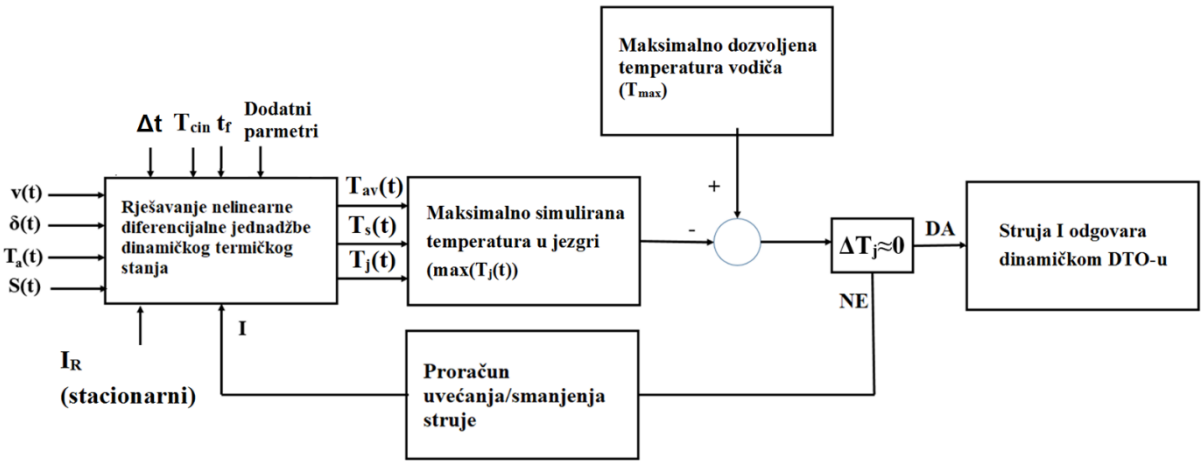
Na Slici 15. prikazan je blok dijagram rješavanja jednadžbe (63) uz uvažavanje radijalne distribucije temperature vodiča primjenom metode Runge-Kutta četvrtog reda za Cigre 601 i IEEE 738 metodologiju proračuna. Na Slici 15. indeks v označava vektor pripadajuće veličine.



Slika 15. Blok dijagram proračuna T_{av}, T_j, T_s primjenom metode Runge-Kutta četvrtog reda

Iz blok dijagrama prema Slici 15. moguće je uočiti da je prilikom proračuna R_{ac} u obje metodologije korišten izraz (18), s izračunima otpora prema (2). Dodatno, za ACSR vodiče s neparnim brojem slojeva aluminija, zanemarena je promjena otpora vodiča sa strujom na način da je u obzir uzet najveći R_{75} i R_{25} izračunat na intervalu od 0 A do 6000 A (proračuni na strani sigurnosti). Navedeno je napravljeno iz razloga da se pojednostavi sam proračun dinamičkog DTO-a, a kako bi se u fazi rezultata mogao analizirati veliki broj slučajeva. Stoga, za slučaj dinamičkog DTO-a, algoritam proračuna je identičan za ACSR vodiče s parnim i neparnim brojem slojeva aluminija. Dodatno, kao što je vidljivo prema Slici 15. za konkretnu iteraciju se tek nakon izračuna Nusseltovih brojeva odnosno veće vrijednosti P_c odabire konačni izraz za P_c korišten u jednadžbi za g_d.

Nakon, definiranja postupka rješavanja nelinearne diferencijalne jednadžbe (63), postupak određivanja dinamičkog DTO-a svodi se na iterativnoj primjeni toga postupka sve dok temperatura vodiča u vremenskom intervalu od 0 do t_f ne poprimi vrijednost T_{max}. Postupak izračuna prikazan je na Slici 16. Pri tome je uvaženo postojanje radijalne distribucije temperature vodiča. Zanemarenjem radijalne distribucije temperature vodiča prikazani koraci su identični, ali se temperatura T_c uspoređuje sa T_{max}.



Slika 16. Blok dijagram proračuna dinamičkog DTO-a primjenom metode Runge-Kutta četvrtog reda uz radijalnu distribuciju temperature vodiča

Dodatni parametri prema Slici 16. ovisno o odabiru metodologije proračuna putem Cigre 601 odnosno IEEE 738 su definirani Tablicom 10.

Tablica 10. Dodatni parametri pri proračunu dinamičkog DTO-a metodom Runge-Kutta četvrtog reda

Metoda izračuna	Dodatni parametri
Cigre 601 bez radijalne distribucije	D, d, R_{75}, R_{25}, ε, α_s, β, y, A_a, A_s, c_{s20}, c_{a20}, γ_a, γ_s, β_a, β_s
Cigre 601 s radijalnom distribucijom	D, d, λ, d_c, R_{75}, R_{25}, ε, α_s, β, y, A_a, A_s, c_{s20}, c_{a20}, γ_a, γ_s, β_a, β_s
IEEE 738 bez radijalne distribucije	D, R_{75}, R_{25}, ε, α_s, y, A_a, A_s, c_{s20}, c_{a20}, γ_a, γ_s, β_a, β_s
IEEE 738 s radijalnom distribucijom	D, λ, d_c, R_{75}, R_{25}, ε, α_s, y, A_a, A_s, c_{s20}, c_{a20}, γ_a, γ_s, β_a, β_s

Problematika primjene navedene metodologije u proračunu dinamičkog DTO-a prije svega leži u činjenici da je prilikom izračuna samoga dinamičkog DTO-a potrebna početna vrijednost struje od koje se kreće prilikom traženja konačnoga rješenja.

Logično je kao početnu vrijednost struje odabrati vrijednost stacionarnog DTO-a pri zadanoj kombinaciji klimatskih uvjeta. Međutim, u slučaju vremenskih promjena samih klimatskih uvjeta, predlaže se uzimanje najmanjeg izračunatog stacionarnog DTO-a pri najlošijoj kombinaciji klimatskih uvjeta.

Drugi problem primjene navedene metode leži u činjenici da je potrebno uvećavati odnosno smanjivati struju da bi se dobilo konačno rješenje. Pokazano je raznim istraživanjima u [14], [20] da je korisno izraziti to uvećanje odnosno smanjenje struje u ovisnosti o veličini razlike između T_{max} i najveće određene temperature na intervalu od 0 do t_f. Kao rješenje navedenoga problema u okviru rada se predlaže uvećanje odnosno smanjenje struje u linearnom obliku sukladno:

$$I_{novo} = I_{staro} + k_d \cdot \Delta T_j \tag{73}$$

gdje je: I_{novo} - nova vrijednost struje (A), I_{staro} - stara vrijednost struje (A), k_d - koeficijent uvećanja (A/ºC), ΔT_j - konačno određena razlika između T_{max} i maksimalne temperatura na intervalu od 0 do t_f (ºC).

U jednadžbi (73) iskustveno je pokazano da je optimalna vrijednost koeficijenta k_d između 5-20. O izboru vrijednosti k_d ovisna je brzina dobivanja konačnog rješenja. Izbor preniskog i/ili previsokog k_d dovodi do nepotrebno visokog broja iteracija prilikom određivanja konačne vrijednosti dinamičkog DTO-a. Tokom izvođenja samih izračuna dinamičkog DTO-a moguće je u algoritmu mijenjati vrijednosti k_d. Naime, nakon prelaska nekog maksimalnog broja iteracija, moguće je vratiti struju na početnu vrijednost i promijeniti iznos k_d. Time se znatno povećava sigurnost dobivanja rješenja. Međutim, navedeno na konkretnim primjerima izračuna nije pokazano kao potrebnim ukoliko se odabire k_d između 5-20 te se primijeni izraz (73).

Metoda opisana u ovome poglavlju se u okviru ovog rada smatra kao referentna metoda izračuna. Prednosti navedene metode leže u vidu točnosti dobivanja rezultata, obzirom da je navedeno priznata metoda na bazi brojnih kako praktičkih tako i teorijskih istraživanja [1-3], [14-16], [22-24], [47], [102], [128], [153-156]. Njena točnost izračuna ovisna o iznosu dozvoljenog odstupanja temperature (ΔT_c ili ΔT_j) te definiranoga vremenskog koraka (Δt). Međutim, nedostaci navedene metode leže kao što je napomenuto u odabiru početnog uvjeta struje radi proračuna te u vidu odabira adekvatnog algoritma uvećanja odnosno smanjenja struje.

4.3 Metoda proračuna dinamičkog dopuštenog termičkog opterećenja primjenom metode linearizacije

Metodu linarizacije moguće je primjenjivati samo za proračune dinamičkog DTO-a bez uzimanja u obzir radijalne distribucije temperature vodiča. Navedeno je iz razloga što uvrštavanjem izraza za T_s i T_{av} preko T_j iz (52-53) u (63), sama jednadžba (63) postaje izuzetno nelinearna te linearizacijom znatno bi se izgubilo na točnosti rješenja.

Modeli linearizacije jednadžbe (63) bez uzimanja u obzir radijalne distribucije temperature vodiča postavljeni su u [20], [158-159]. Naime, radi primjene metode linearizacije potrebno je linearizirati konvekcijsko i radijacijsko odvođenje topline kako bi nelinearna diferencijalna jednadžba postala linearna sukladno izrazu [20]:

$$\frac{dT_c}{dt} = \frac{1}{m \cdot c_p} \cdot \left(I^2 \cdot R_{dc} \cdot K_{acdc} \cdot \left(1 + \alpha \cdot (T_c - 20)\right) + P_s - \pi \cdot h_0 \cdot D \cdot (T_c - T_a) \right) \quad (74)$$

gdje je: R_{dc} - istosmjerni otpor vodiča pri 20 ºC (Ω/m), α - koeficijent promjene otpora s temperaturom (1/ ºC), h_0 - ukupni koeficijent prijenosa topline (W/(m^2·ºC)).

U izrazu (74) konvekcijsko i radijacijsko odvođenje topline aproksimirani su linearnom temperaturnom ovisnošću izraženom preko ukupnog koeficijenta prijenosa topline (h_0). Za ACSR vodiče se koeficijent α određuje sukladno:

$$\alpha = \frac{\alpha_a \cdot \alpha_č \cdot \left(\frac{\rho_a}{A_s} + \frac{\rho_č}{A_a}\right) + \alpha_a \cdot \left(\frac{\rho_č}{A_s}\right) + \alpha_č \cdot \left(\frac{\rho_a}{A_a}\right)}{\frac{\rho_a}{A_a} + \frac{\rho_č}{A_s} + \alpha_a \cdot \left(\frac{\rho_a}{A_a}\right) + \alpha_č \cdot \left(\frac{\rho_č}{A_s}\right)} \quad (75)$$

Uvažavajući realnu geometriju i materijal ACSR vodiča Izraz (75) određuje da je α približno jednak kao α_a.

Analitičko rješenje jednadžbe (74) je slijedećeg oblika:

$$T_c(t) = T_{cx} - (T_{cx} - T_{cin}) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (76)$$

gdje je: T_{cx} - granična temperatura vodiča, τ - toplinska vremenska konstanta (s).

Granična temperatura i ukupni koeficijent prijenosa topline se određuju sukladno:

$$T_{cx} = \frac{R_{dc} \cdot K_{acdc} \cdot (1 - \alpha \cdot T_{ref}) + D \cdot (\alpha_s \cdot S + \pi \cdot h_0 \cdot T_a)}{\pi \cdot h_0 \cdot D - \alpha \cdot R_{dc} \cdot K_{acdc}} \quad (77)$$

$$h_0 = \frac{I_{in}^2 \cdot R_{ac} + D \cdot \alpha_s \cdot S}{\pi \cdot h_0 \cdot D - \alpha \cdot R_{dc} \cdot K_{acdc}} \tag{78}$$

gdje je: T_{ref} - referentna temperatura ima iznos od 20 ºC, I_{in} - početna temperatura vodiča.

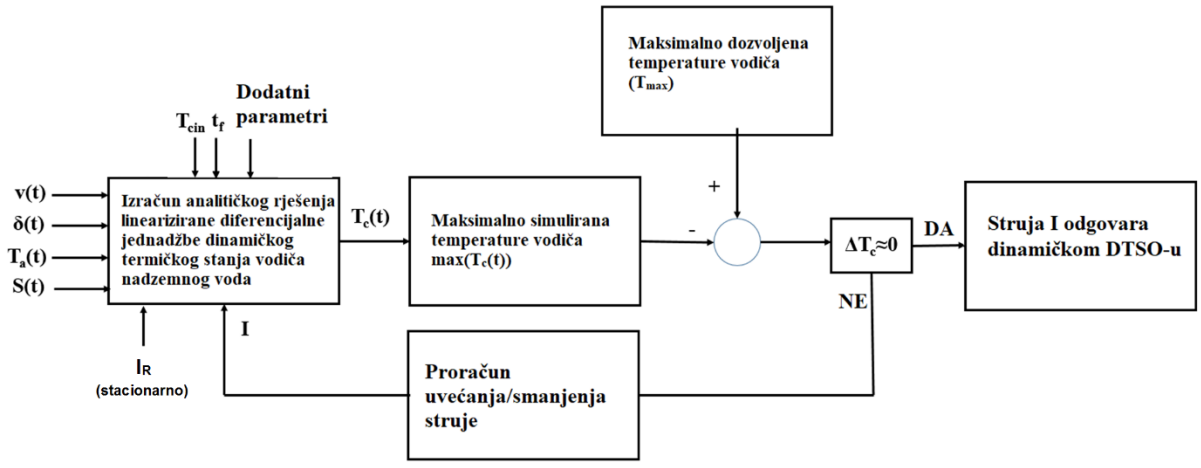
U izrazu (78) I_{in} predstavlja početnu struju koja se računa pretpostavljajući stacionarno stanje te uz pretpostavku temperature vodiča u iznosu T_{cin}. Dakle de facto se radi proračun kao za stacionarni DTO uz razliku u temperaturi izračuna. Ukoliko su prisutne vremenske promjene klimatskih uvjeta, za svaku kombinaciju klimatskih uvjeta potrebno je izračunati novi h_0 izjednačujući temperaturu u izračunu kao temperaturu u trenutku promjene samih klimatskih uvjeta.

Toplinska konstanta se određuje sukladno:

$$\tau = \frac{m \cdot c_p}{\pi \cdot h_0 \cdot D - \alpha \cdot R_{dc} \cdot K_{acdc} \cdot I^2} \tag{79}$$

U izrazu (79) $m \cdot c_p$ se računa pri T_{cin}, odnosno pri temperaturi u kojoj se dešava vremenska promjena samih klimatskih uvjeta.

Radi proračuna dinamičkog DTO-a analitičko rješenje dano jednadžbom (76) primjenjuje se u više iteracija sve dok temperatura u vremenskom intervalu od 0 do t_f ne prijeđe iznos T_{max}. Pri tome se slično kao i u prethodnoj metodi koristi algoritam uvećanja odnosno smanjenja struje sukladno jednadžbi (73). Proračun dinamičkog DTO-a primjenom linearizirane metode dan je na Slici 17.



Slika 17. Blok dijagram proračuna dinamičkog DTO-a primjenom metode linearizacije

Dodatni parametri prema Slici 17. ovisno o odabiru metodologije proračuna putem Cigre 601 odnosno IEEE 738 su definirani Tablicom 11.

Tablica 11. Dodatni parametri pri proračunu dinamičkog DTO-a metodom linearizacije

Metoda izračuna	Dodatni parametri
Cigre 601 bez radijalne distribucije	D, d, R_{75}, R_{25}, ε, α_s, β, y, A_a, A_s, c_{s20}, c_{a20}, γ_a, γ_s, β_a, β_s, R_{dc}, K_{acdc} (pri 20 °C), T_{ref}, α_a, $\alpha_č$, ρ_a, $\rho_č$
IEEE 738 bez radijalne distribucije	D, R_{75}, R_{25}, ε, α_s, y, A_a, A_s, c_{s20}, c_{a20}, γ_a, γ_s, β_a, β_s, R_{dc}, K_{acdc} (pri 20 °C), T_{ref}, α_a, $\alpha_č$, ρ_a, $\rho_č$

Slično kao i u prethodnome slučaju prilikom proračuna R_{ac} u obje metodologije korišten je izraz (18), s izračunima otpora prema (2). Za ACSR vodiče, s neparnim brojem slojeva aluminija, zanemarena je promjena otpora vodiča sa strujom na način da je u obzir uzet najveći R_{75} i R_{25} izračunat na intervalu od 0-6000 A.

Ova metoda izračuna dinamičkog DTO-a znatno je manje složena u odnosu na druge metode. Međutim, samo analitičko rješenje dobiveno je linearizacijom nelinearne jednadžbe dinamičkog termičkog stanja vodiča. Stoga su rezultati dobiveni navedenom metodom smanjenje točnosti u odnosu na druge metode. Dodatno, problem uvećanja i smanjenja struje je i dalje prisutan i u ovoj metodi. No, s druge strane u svakoj se iteraciji vrši samo korištenje analitičkog rješenja danog izrazom (76).

4.4 Izračun koeficijenta osjetljivosti dinamičkog dopuštenog termičkog opterećenja

Za slučaj dinamičkog DTO-a koeficijenti osjetljivosti se određuju matematički konačnim razlikama sukladno teoriji analize osjetljivosti [148-149]. Naime, u slučaju dinamičkoga DTO-a nije moguće odrediti parcijalnu derivaciju zavisne varijable (izlaza) u odnosu na nezavisnu varijablu (jednog od ulaza). Stoga je potrebno aproksimirati način određivanja koeficijenata osjetljivosti [148-149].

Pretpostavljajući za ACSR vodič da su svi definirani dodatni parametri (ovisno o primijenjenoj metodi), vremenski interval (t_f) i početna temperatura (T_{cin}) konstanti, moguće je za slučaj dinamičkog DTO-a odrediti koeficijente na slijedeći način:

$$K_V = \frac{\Delta I_R}{\Delta v} \tag{80}$$

$$K_\delta = \frac{\Delta I_R}{\Delta \delta} \tag{81}$$

$$K_S = \frac{\Delta I_R}{\Delta S} \tag{82}$$

$$K_T = \frac{\Delta I_R}{\Delta T_a} \tag{83}$$

Važno je naglasiti da primjena izraza (80-83) podrazumijeva da su svi ostali klimatski uvjeti konstanti. Primjerice korištenje izraza (80) podrazumijeva da se pri promjeni v odredi promjena u I_R uz sve ostale uvjete konstante (δ, T_a, S). Radi dobivanja točnijih rezultata potrebna je primjena što manjih promjena klimatskih uvjeta.

5. PRIMJENA METODE DIREKTNE KOLOKACIJE U PRORAČUNU DINAMIČKOG DOPUŠTENOG TERMIČKOG OPTEREĆENJA

Primjenom metode direktne kolokacije nastojao se pojednostaviti pristup izračunu dinamičkog DTO-a i omogućiti jednostavnija implementacija algoritma u modernim sustavima dinamičkog određivanja DTO-a. Ovo je poglavlje podijeljeno u dva dijela. U prvome dijelu ovoga poglavlja definira se problem optimalnog upravljanja koji se koristi radi određivanja dinamičkog DTO-a. U drugome dijelu poglavlja prikazuje se metodologija izračuna navedenog problema primjenom metode direktne kolokacije.

5.1 Definiranje problema optimalnog upravljanja

Sagledavanjem postojećih metoda proračuna dinamičkog DTO-a moguće je zaključiti da se sve metode svode na iterativnom postupku traženja dinamičkog DTO-a, bilo rješavanjem nelinearne diferencijalne jednadžbe, bilo korištenjem analitičkog rješenja. Alternativni pristup koji je moguće primijeniti radi traženja dinamičkog DTO-a je u postavljanju problema optimalnog upravljanja. U kontekstu problema optimalnog upravljanja moguće je varijablom stanja smatrati temperaturu vodiča (T_c) odnosno, ukoliko se uzima u obzir radijalna distribucija temperature vodiča, temperaturu u jezgri (T_j). Kao upravljivom varijablom moguće je smatrati struju voda (I). Za slučaj vremenski konstantnih klimatskih uvjeta jasno je da će na kraju vremenskog intervala biti najveća temperatura. Stoga je logički da se funkcija cilja postavi tako da je jednaka kvadratnom odstupanju temperature na kraju vremenskog intervala i T_{max}. Glede slučajeva u kojima se događaju vremenske promjene klimatskih uvjeta moguće je zadržati identičnu funkciju cilja, ali postaviti ograničenje da trenutna temperatura na intervalu od 0 do t_f ne prijeđe vrijednost od T_{max}. Slijedom navedenoga problem optimalnog upravljanja moguće je za slučaj zanemarenja radijalne distribucije temperature vodiča izraziti na sljedeći način:

$$\min(J) = min\left(\left(T_c(t_f) - T_{max}\right)^2\right) \tag{84}$$

pod uvjetom:

$$g_d = \frac{dT_c}{dt} = \frac{1}{m \cdot c_p} \cdot (I^2 \cdot R_{ac} + P_S - P_c - P_r)$$

$$T_c(0) = T_{cin}$$

$$I \geq 0$$

$$T_c(t) \leq T_{max}$$

gdje je: *J* - funkcija cilja, t_f - vremenski interval za koji se računa vrijednost dinamičkog DTO-a (s).

U izrazu (84) moguće je zaključiti da se nastoji pronaći struja koja će minimizirati funkciju cilja odnosno kvadratno odstupanje između temperature na kraju vremenskog intervala i T_{max}. Navedena minimizacija se vrši uz slijedeće uvjete:

- Prvi uvjet unosi JDTSV, odnosno označava da se minimizacija mora provesti tako da rješenje zadovoljiti samu nelinearnu diferencijalnu jednadžbu.
- Drugi uvjet zapravo predstavlja početno stanje.
- Treći uvjet se postavlja kako bi se eliminirale negativne vrijednosti struje koje nisu logično rješenje.
- Četvrti uvjet se postavlja kako bi u svim vremenskim trenucima temperatura vodiča bila ispod T_{max}.

U slučaju da se uzima u obzir radijalna distribucija temperature vodiča problem optimalnog upravljanja se slično (84) postavlja u obliku:

$$\min(J) = min\left(\left(T_j(t_f) - T_{max}\right)^2\right) \tag{85}$$

pod uvjetom:

$$g_d = \frac{dT_{av}}{dt} = \frac{1}{m \cdot c_p} \cdot (I^2 \cdot R_{ac} + P_S - P_c - P_r)$$

$$T_{av}(0) = T_{cin}$$

$$I \geq 0$$

$$T_j(t) \leq T_{max}$$

Izrazom (85) pokazano je da je postavljanje problema optimalnog upravljanja, u slučaju uzimanja u obzir radijalne distribucije temperature vodiča, napravljeno tako da se teži da temperatura u jezgri na kraju vremenskog intervala bude jednaka T_{max}. U izraz za g_d i funkciju cilja se u (85) uvrštavaju temperature T_s i T_j izražene preko T_{av} i *I*

koristeći se izrazima (52-53). U idućem poglavlju bit će prikazan način rješavanja navedenih problema optimalnog upravljanja primjenom metode direktne kolokacije.

5.2 Proračun dinamičkog dopuštenog termičkog opterećenja primjenom metode direktne kolokacije

Problemi optimalnog upravljanja definirani izrazima (84-85) rješavaju se numerički primjenom direktnih i/ili indirektnih metoda. Uporabom indirektnih metoda, problem optimalnog upravljanja se dobiva rješavanjem sustava diferencijalnih jednadžbi koje zadovoljavaju određene rubne i/ili unutarnje uvjete. U tom slučaju radi se o izuzetno složenim matematičkim postupcima. U direktnim metodama se problem optimalnog upravljanja transformira u problem nelinearnog programiranja [17-19], [160-165].

U ovome radu problem optimalnog upravljanja riješen je primjenom metode direktne kolokacije [17], [161-165]. Dva su osnovna razloga radi primjene te metode.

Prvi je razlog što metoda direktne kolokacije omogućuje transformaciju problema optimalnog upravljanja u problem nelinearnog programiranja. Naime, poznato je da je radi rješavanja takvih problema razvijen čitav niz hardverskih i softverskih rješenja, koja omogućuju jednostavnu implementaciju u realnim sustavima [166-171].

Drugi razlog je što se u metodi direktne kolokacije oblik upravljive varijable može slobodno birati. Drugi razlog je veoma važan obzirom da se, kao rješenje samih problema optimalnog upravljanja definiranih izrazima (84-85), teži dobiti jedna konstanta vrijednost struje na intervalu od 0 do t_f.

Primjena metode kolokacije u svrhu rješavanja problema (84-85) podrazumijeva slijedeća tri koraka:

1) Diskretizacija vremenskog intervala

Prvi korak u primjeni metode kolokacije je u diskretizaciji vremenskog intervala. Dužina vremenskog intervala problema optimalnog upravljana definiranih izrazima (84-85) je određena od 0 do konačnog vremena t_f. Navedeni je vremenski interval moguće podijeliti s obzirom na odabrani konstantni korak vremena (Δt). Važnost diskretizacije vremenskog intervala leži u činjenici da se optimizacijski postupak

provodi isključivo u točkama definiranim s diskretizacijom vremenskog intervala. Navedene točke se nazivaju i kolokacijskim točkama [17], [161-165].

Matematički se diskretizacija vremenskog intervala može opisati kao:

$$0 = t_1 < t_2 < t_3 < \cdots < t_{N_t} = t_f \tag{86}$$

$$\Delta t = \frac{t_f}{N_t - 1} \tag{87}$$

gdje je: N_t -broj kolokacijskih točaka.

2) Transformacija problema optimalnog upravljanja u problem nelinearnog programiranja

U svrhu transformiranja problema optimalnog upravljanja u problem nelinearnog programiranja potrebno je odabrati polinomni oblik koji aproksimira varijablu stanja odnosno upravljačku varijablu između kolokacijskih točaka [17], [161]. Kako bi se pravilno izvršila pretvorba u ovome radu varijabla stanja je aproksimirana različitim konstantama na svim intervalima između kolokacijskih točaka, dočim je upravljačka varijabla aproksimirana jednom konstantom vrijednošću na cijelom vremenskom intervalu od 0 do t_f.

Aproksimacije varijable stanja i upravljačke varijable među kolokacijskim točkama mogu se izraziti na slijedeći način:

$$T_c(t) = T_{cjt}, t \in \left[t_{jt}, t_{jt+1}\right], jt = 1,2,3 \dots N_t \tag{88}$$

$$T_{av}(t) = T_{avjt}, t \in \left[t_{jt}, t_{jt+1}\right], jt = 1,2,3 \dots N_t \tag{89}$$

$$I(t) = I_{jt} = I, t \in \left[t_{jt}, t_{jt+1}\right], jt = 1,2,3 \dots N_t \tag{90}$$

gdje je: indeks jt-e kolokacijska točka.

Izraz (88) koristi se kao aproksimacija za problem optimalnog upravljanja definiranog izrazom (84), a izraz (89) za (85). Dakle, razlika je u tome zanemaruje li se ili uzima u obzir radijalna distribucija temperature vodiča. Aproksimacije definirane izrazima (88-90) biti će pogodne radi transformacije problema optimalnog upravljanja u problem nelinearnog programiranja ako se dobro izvrši vremenska diskretizacija, odnosno odabere prikladno mali korak vremena sukladno izrazu (87). U radu se za same proračune koristio period u minutom području, koji je prihvatljiv obzirom na samu toplinsku dinamiku vodova. Prilikom odabira navedenog intervala potrebno je voditi

računa o hardverskoj moći samog procesora na kojoj se vrši računanje podataka [161-165].

Na temelju definiranih aproksimacija izrazima (88), (90) problem optimalnog upravljanja (84) se transformira u problem nelinearnog programiranja sukladno:

$$\min(J) = min\left(\left(T_{cN_t} - T_{max}\right)^2\right) \tag{91}$$

pod uvjetom:

$$g_d - \frac{T_{cjt+1} - T_{cjt}}{\Delta t} =$$

$$\frac{1}{m \cdot c_p\left(T_{cjt+1}\right)} \cdot \left(I^2 \cdot R_{ac}\left(T_{cjt+1}\right) + P_S\left(t_{jt+1}\right) - P_c\left(T_{cjt+1}, t_{jt+1}\right) - P_r\left(T_{cjt+1}, t_{jt+1}\right)\right) - \frac{T_{cjt+1} - T_{cjt}}{\Delta t},$$

$$jt = 1,2,3,4 \ldots N_t - 1$$

$$T_{c1} - T_{cin} = 0$$

$$I > 0$$

$$T_{cjt} \leq T_{max}, jt = 1,2,3,4 \ldots N_t$$

Na temelju definiranih aproksimacija izrazima (89), (90) problem optimalnog upravljanja (85) se transformira u problem nelinearnog programiranja sukladno:

$$\min(J) = min\left(\left(T_{jN_t} - T_{max}\right)^2\right) \tag{92}$$

pod uvjetom:

$$g_d - \frac{T_{avjt+1} - T_{avjt}}{\Delta t} =$$

$$\frac{1}{m \cdot c_p\left(T_{avjt+1}\right)} \cdot \left(I^2 \cdot R_{ac}\left(T_{avjt+1}\right) + P_S\left(t_{jt+1}\right) - P_c\left(T_{avjt+1}, t_{jt+1}\right) - P_r\left(T_{avjt+1}, t_{jt+1}\right)\right) - \frac{T_{avjt+1} - T_{avjt}}{\Delta t},$$

$$jt = 1,2,3,4 \ldots N_t - 1$$

$$T_{av1} - T_{cin} = 0$$

$$I > 0$$

$$T_{jjt} \leq T_{max}, jt = 1,2,3,4 \ldots N_t$$

Izrazi (91) i (92) predstavljaju probleme nelinearnog programiranja čijim se rješavanjem kao izlaz dobiva temperatura (T_c ili T_{av}) te struja koja se može smatrati dinamičkim DTO. U slučaju (92) nakon dobivanja raspodjele T_{av} lako je odrediti raspodjele T_j i T_s korištenjem izraza (52-53).

3) Rješavanje problema nelinearnog programiranja

Za početak rješavanja problema nelinearnog programiranja definiranih izrazima (91-92) potrebno je odrediti početnu vrijednost struje i početnu temperaturu vodiča ili prosječnu (T_{cjt}, T_{avjt}) u svim vremenskim intervalima (jt=1, 2, 3,…, N_t). Kao početnu vrijednost struje moguće je uzeti u obzir vrijednost stacionarnog DTO-a (za najgoru kombinaciju klimatskih uvjeta ukoliko su prisutne vremenske promjene). Početnu vrijednost temperature vodiča ili prosječne (T_{cjt}, T_{avjt}) u svim vremenskim intervalima moguće je izjednačiti kao T_{cin}.

Nakon definiranja početnih uvjeta moguće je primijeniti mnogo postojećih softvera radi rješavanja problema nelinearnoga programiranja definiranih s (91-92). Primjeri takvih softvera su: Matlab (funkcija fmincon()) [150], Sparse Nonlinear Optimizer (SNOPT) [169], Advanced Interactive Multidimensional Modeling System (AIMMS) [170], Wolfram Matematica (funkcija NMinimize) [170]. Ne ulazeći u detaljnu razradu pojedinih metoda rješavanja problema nelinearnog programiranja u radu je korištena Matlab funkcija fmincon() s algoritmom rješavanja sekvencijalno kvadratnog programiranja (SQP). U nastavku slijedi kratki opis metode SQP.

SQP predstavlja jednu od najefikasnijih metoda rješavanja problema nelinearnog programiranja [173-175]. Prije objašnjenja samoga SQP algoritma definirat će se općeniti oblik problema optimalnog upravljanja prema slijedećem izrazu:

$$\min(J(x)) \tag{93}$$

pod uvjetom:

$$h(x) = 0$$

$$\mathrm{l(x)} \leq 0$$

gdje je: $h(x)$ - vektor ograničenja tipa jednakosti, $l(x)$ - vektor ograničenja tipa nejednakosti.

SQP metoda predstavlja iterativnu metodu koja modelira problem nelinearnog programiranja u danoj iteraciji kao podproblem kvadratnoga programiranja. Rješavanjem tog podproblema dobivaju se nove vrijednosti varijabli stanja i upravljivih varijabli koje se koriste u idućoj iteraciji. Konstrukcija podproblema se vrši tako da konačni vektor varijabli stanja i upravljivih varijabli teži lokalnom minimumu problema nelinearnog programiranja [173-175].

Lagrangianov funkcional pridružen problemu nelinearnog programiranja (93) moguće je izraziti prema:

$$\mathrm{L}(\mathrm{x}, \lambda_l, \mu_l) = J(x) + \lambda_l^T \cdot h(x) + \mu_l^T \cdot l(x) \tag{94}$$

gdje je: λ_l^T, μ_l^T - vektori Lagrangianovih multiplikatora.

Temeljna ideja SQP algoritma je u formiranju podproblema kvadratnog programiranja koji kvadratno aproksimira Lagrangianov funkcional sukladno sljedećem izrazu:

$$\min\left(\frac{1}{2} \cdot d_u(x)^T \cdot B_k \cdot d_u(x) + \nabla J(x^k)^T \cdot d_u(x)\right) \tag{95}$$

pod uvjetom:

$$\mathrm{h}(x^k) + \nabla h(x^k)^T \cdot d_u(x) = 0$$

$$\mathrm{l}(x^k) + \nabla l(x^k)^T \cdot d_u(x) \leq 0$$

gdje je: d_u - inkrement, B_k - Hessianova matrica.

Članovi Hessianove matrice u izrazu (93) se određuje sukladno:

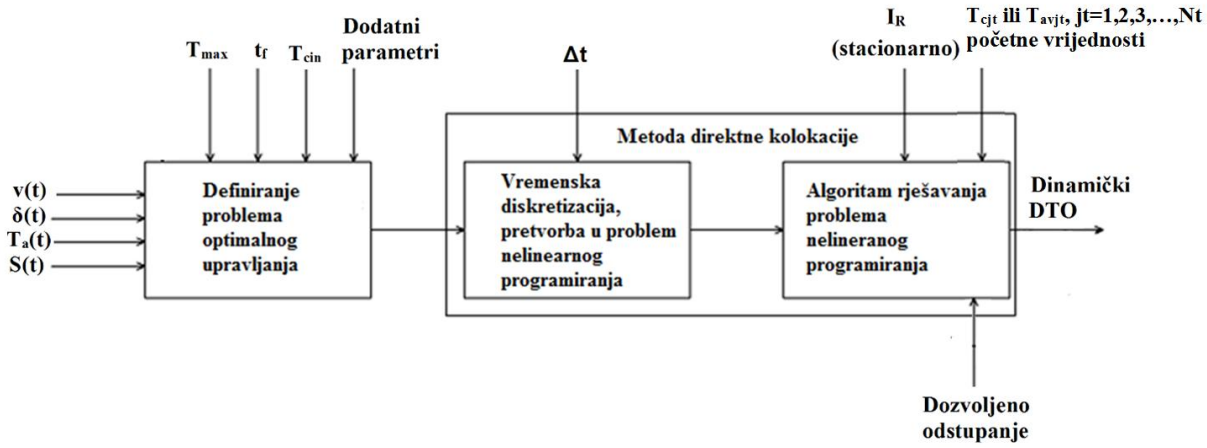
$$B_{zv} = \frac{\partial^2 J(x^k)}{\partial x_z \cdot \partial x_v}, 1 \leq z, v \leq n_u \tag{96}$$

gdje je: n_u - broj varijabli stanja i upravljivih varijabli.

Samim rješavanjem podproblema kvadratnog programiranja dobiva se inkrement d_u koji se koristi za određivanje vrijednosti x^k u novoj iteraciji. Nakon što su uz dozvoljeno odstupanje zadovoljeni svi uvjeti iz (93), sam postupak iterativnog formiranja podproblema kvadratnog programiranja se prekida. Detaljan opis kompletnog algoritma moguće je pronaći u [173-175].

Nakon definiranja svih koraka rješavanja problema optimalnog upravljanja definiranog s (91-92) kompletan postupak određivanja dinamičkog DTO-a primjenom metode direktne kolokacije prikazan je na Slici 18.

Dodatni parametri prema Slici 18. za metodu direktne kolokacije identični su onima danim u Tablici 10. prema metodi Runge-Kutta četvrtog reda. Dozvoljeno odstupanje predstavlja dozvoljenu pogrešku u rješavanju problema nelinearnog programiranja (u zadovoljenu funkcije cilja i danih ograničenja).



Slika 18. Blok dijagram proračuna dinamičkog DTO-a primjenom metode direktne kolokacije

Novo razvijena metoda eliminira potrebu dodatnih algoritama povećanja odnosno smanjenja struja obzirom da se navedeno rješava unutar algoritma koji rješava problem nelinearnog programiranja. Dodatno, sama metoda robusnija je na izbor početnog uvjeta struje. Točnost bi joj trebala biti gotovo identična metodi koja koristi Runge-Kutta četvrtog reda ovisno o željenoj točnosti rješavanja problema nelinearnog programiranja. S praktičnog aspekta implementacija navedene metode je jednostavna obzirom da postoje brojna softverska i hardverska rješenja radi algoritamskog rješavanja problema nelinearnog programiranja.

6. ANALIZA REZULTATA PRORAČUNA DINAMIČKOG DOPUŠTENOG TERMIČKOG OPTEREĆENJA

U ovome poglavlju prvo se definiraju ulazni podaci koji su korišteni u proračunu dinamičkog DTO-a i karakteristike analiziranih ACSR vodiča potrebnih radi samoga proračuna. Potom se za slučaj vremenski konstantnih klimatskih uvjeta prikazuju rezultati proračuna i potencijal primjene dinamičkih DTO-a, uspoređuju pojedine metodologije bez uzimanja u obzir radijalne distribucije temperature vodiča te analiziraju koeficijenti osjetljivosti. Zatim se uspoređuju metode koje uzimaju u obzir radijalnu distribuciju temperature vodiča te određuju odstupanja u odnosu na pojednostavljene metode. Konačno se analizira nekoliko situacija proračuna dinamičkog DTO-a s vremenski promjenjivim klimatskim uvjetima te daje završni osvrt kompletne analize dinamičkog DTO-a analiziranih ACSR vodiča.

6.1 Ulazni podaci radi proračuna dinamičkog dopuštenog termičkog opterećenja

Kao i za slučaj stacionarnog DTO-a u proračunu dinamičkog DTO-a razmatrana su tri ACSR vodiča nazivnih presjeka 240/40 mm^2, 360/57 mm^2 i 490/65 mm^2. Ulazni podaci o geometrijskim veličinama ACSR vodiča i ulazni podaci radi proračuna R_{ac} preuzeti su iz [50] i [151]. Frekvencija je pretpostavljena iznosom od 50 Hz. Veličine koje su držane konstante u svim proračunima prikazane su u Tablici 12.

Tablica 12. Konstanti parametri u proračunu dinamičkog DTO-a

Parametar	Vrijednost		
	ACSR 240/40 mm^2	ACSR 360/57 mm^2	ACSR 490/65 mm^2
Nadmorska visina (y)	0 m	0 m	0 m
Koeficijent apsorpcije Sunčeva zračenja (α_s)	0.9	0.9	0.9
Koeficijent emisije (ε)	0.9	0.9	0.9
Kut inklinacije vodiča prema horizontali (β)	0 °	0 °	0 °
Maksimalno dopuštena temperatura vodiča (T_{max})	80 °C	80 °C	80 °C
Vanjski promjer (D)	$21.9 \cdot 10^{-3}$ m	$26.6 \cdot 10^{-3}$ m	$30.6 \cdot 10^{-6}$ m
Promjer žice aluminija (d)	$3.45 \cdot 10^{-3}$ m	$4.2 \cdot 10^{-3}$ m	$3.4 \cdot 10^{-3}$ m
Koeficijent promjene otpora sa temperaturom (α)	0.00402 1/ °C	0.00402 1/ °C	0.00402 1/ °C

Referentna temperatura (T_{ref})	20 ºC	20 ºC	20 ºC
Računski presjek aluminijskog dijela (A_a)	$243.1 \cdot 10^{-6}$ m^2	$360.22 \cdot 10^{-6}$ m^2	$490.28 \cdot 10^{-6}$ m^2
Računski presjek čeličnog dijela (A_s)	$39.5 \cdot 10^{-6}$ m^2	$57.33 \cdot 10^{-6}$ m^2	$63.55 \cdot 10^{-6}$ m^2
Gustoća aluminija (γ_a)	2703 kg/m^3	2703 kg/m^3	2703 kg/m^3
Gustoća čelika (γ_{st})	7780 kg/m^3	7780 kg/m^3	7780 kg/m^3
Specifični toplinski kapacitet aluminijskog dijela ACSR vodiča pri 20 ºC (c_{a20})	897 J/kg·ºC	897 J/kg·ºC	897 J/kg·ºC
Specifični toplinski kapacitet čeličnog dijela ACSR vodiča pri 20 ºC (c_{s20})	481 J/kg·ºC	481 J/kg·ºC	481 J/kg·ºC
Temperaturni koeficijent promjene specifičnog toplinskog kapaciteta aluminijskog dijela ACSR vodiča (β_a)	$3.8 \cdot 10^{-4}$ 1/ ºC	$3.8 \cdot 10^{-4}$ 1/ ºC	$3.8 \cdot 10^{-4}$ 1/ ºC
Temperaturni koeficijent promjene specifičnog toplinskog kapaciteta čeličnog dijela ACSR vodiča (β_s)	$1 \cdot 10^{-4}$ 1/ ºC	$1 \cdot 10^{-4}$ 1/ ºC	$1 \cdot 10^{-4}$ 1/ ºC
R_{75}	$1.4633 \cdot 10^{-4}$ Ω/m	$1.0178 \cdot 10^{-4}$ Ω/m	$7.6745 \cdot 10^{-5}$ Ω/m
R_{25}	$1.2216 \cdot 10^{-4}$ Ω/m	$8.4963 \cdot 10^{-5}$ Ω/m	$6.4076 \cdot 10^{-5}$ Ω/m
R_{ac} pri 20 ºC ($K_{acdc} \cdot R_{dc}$)	$1.1974 \cdot 10^{-4}$ Ω/m	$8.3282 \cdot 10^{-5}$ Ω/m	$6.3726 \cdot 10^{-5}$ Ω/m
Efektivna termalna radijalna vodljivost (λ)	1 W/m·K	1 W/m·K	1 W/m·K
Promjer čelične jezgre (d_c)	$8.04 \cdot 10^{-3}$ m	$9.8 \cdot 10^{-3}$ m	$10.2 \cdot 10^{-3}$ m
Trajno DTO-a* (I_{SR})	605 A	780 A	950 A

*preuzeto iz [13]

U simulacijama s vremenski konstantnim klimatskim uvjetima na intervalu od 0 do t_f, uvjeti su se mijenjali na slijedeći način:

- Brzina vjetra (v) mijenjala se od 0 m/s do 10 m/s s korakom od 0.1 m/s.
- Kut vjetra (δ) mijenjao se od 0 º do 90 º s korakom od 1 º.
- Temperatura okoline (T_a) mijenjala se od -20 ºC do T_{cin}-1 ºC s korakom od 1 ºC. Maksimalno razmatrana temperatura okoline je u iznosu od 39 ºC.

- Globalni intenzitet Sunčeva zračenja (S) mijenjao se od 0 W/m^2 do 1480 W/m^2 s korakom od 40 W/m^2.

Uz gore navedene klimatske uvjete početna je temperatura mijenjana od 0 ºC do 60 ºC s korakom od 20 ºC. Navedenim promjenama klimatskih uvjeta analizirano je za svaki vodič 62866440 slučajeva kombinacija klimatskih uvjeta i T_{cin}. Time su pokriveni gotovo svi slučajevi klimatskih uvjeta za koje se projektiraju dalekovodi. Dodatno prilikom proračuna s vremenski konstantnim uvjetima razmatrani su dinamička DTO-a u vremenskim intervalima (koja određuju t_f) od 10 minuta, 15 minuta i 30 minuta.

U dijelu rezultata dinamičkog DTO-a gdje su analizirane vremenske promjene klimatskih uvjeta naglašen je sam oblik promjena kao i početna temperatura u samom dijelu izračuna.

Parametri korišteni za proračun putem metode Runge-Kutta četvrtog reda, metode linearizacije i u formiranom problemu nelinearnog programiranja iznose:

- Korak vremena Δt uzet je na način da iznosi: 30 s za 10 minutna DTO-a, 60 s za 15 minutna DTO-a i 90 s za 30 minutna DTO-a. Smanjenjem Δt uočeno je da točnost rezultata nije narušena.
- Dozvoljeno odstupanje temperature (ΔT_j ili ΔT_c) i dozvoljeno odstupanje prilikom rješavanja problema nelinearnog programiranja postavljeno je na vrijednost 0.1 ºC.

Važno je naglasiti da su rezultati prikazani u svim proračunima u kojima nije posebno naglašeno u skladu s metodom Runge-Kutta četvrtog reda. Naravno u dijelu gdje je vršena usporedba metoda, korištene su i metoda linearizacije i novo razvijena metoda. Navedeno je učinjeno jer se sama metoda Runge-Kutta četvrtog reda smatra i referentom metodom proračuna.

6.2 Rezultati proračuna dinamičkog dopuštenog termičkog opterećenja uz vremenski konstantne klimatske uvjete bez uzimanja u obzir radijalne distribucije temperature vodiča

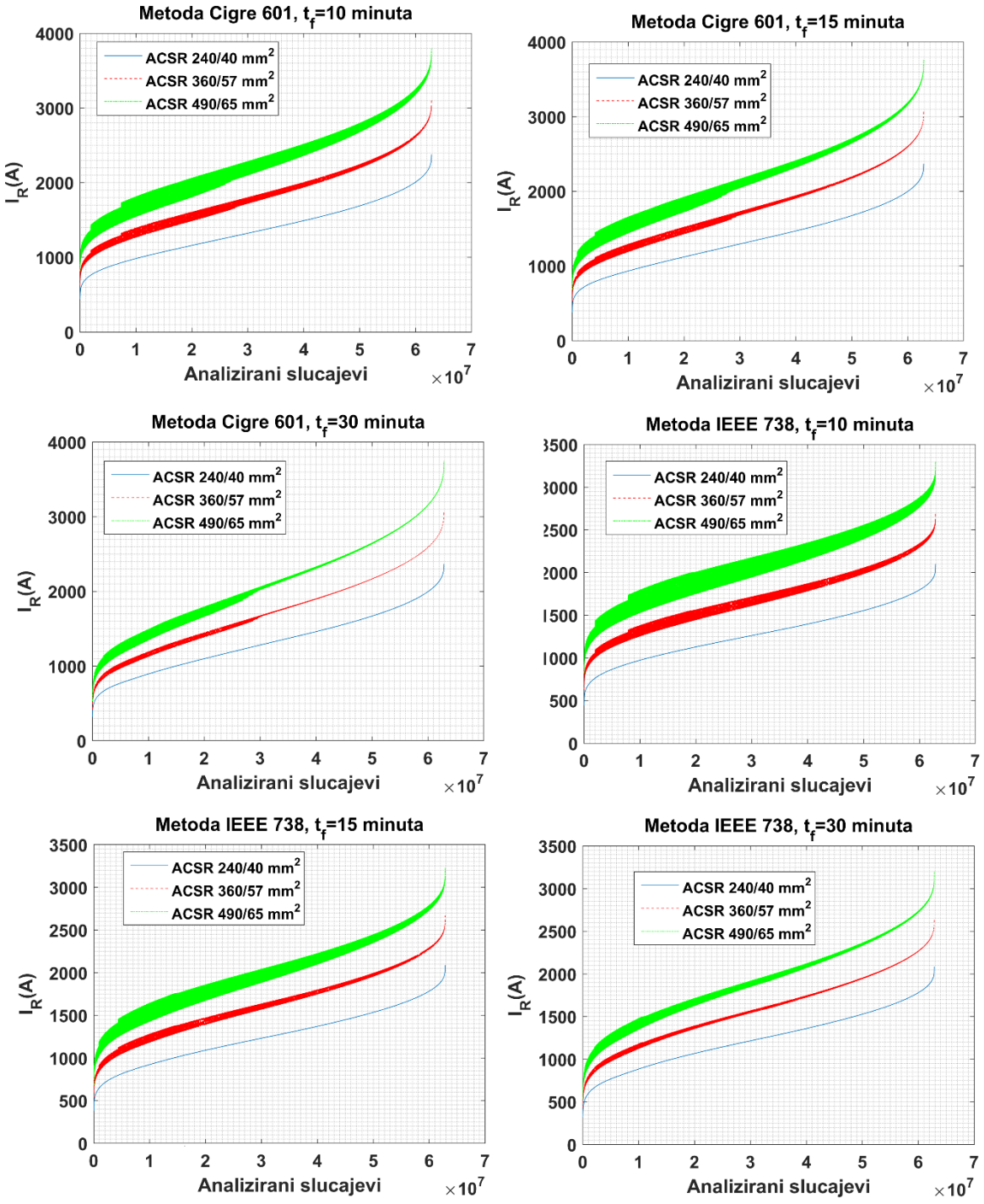
Tablicama 13. i 14. te Slikom 19. prikazani su rezultati proračuna dinamičkog DTO-a određeni metodologijama Cigre 601 i IEEE 738 prema definiranim ulaznim parametrima, uz prikaz rezultata dinamičkog DTO-a na Slici 19. složenih od najmanje do najveće vrijednosti za ACSR vodič 240/40 mm^2. Cigre 601 pokazuje za ACSR vodiče 240/40 mm^2, 360/57 mm^2, 490/65 mm^2 kretanja dinamičkog DTO-a u rasponima od: 319.66 A - 2378.2 A, 423.83 A - 3101.9 A te 529.92 A - 3803.9 A. Isti rasponi za IEEE 738 iznose: 323.75 - 2102.4 A, 429.26 A - 2710.2 A te 535.99 A - 3301.8 A. Maksimalne vrijednosti dinamičkog DTO-a određene su pri T_a=-20 °C, v=10 m/s, S=0 W/m^2, δ=90 °, T_{cin}=0 ºC i t_f=10 minuta, a minimalne pri T_a=39 °C, v=0 m/s, S=1480 W/m^2, δ=0 °, T_{cin}=60 ºC i t_f=30 minuta.

Tablica 13. Rezultati proračuna dinamičkog DTO-a uz vremenski konstantne uvjete bez uzimanja u obzir radijalne distribucije temperature vodiča metoda Cigre 601

Vremenski interval (t_f)	ACSR vodič	Dinamičko DTO (I_R)		
		Maksimalna vrijednost (A)	Minimalna vrijednost (A)	Srednja vrijednost (A)
10 minuta	240/40 mm^2	$2.3782 \cdot 10^3$	441.8921	$1.3665 \cdot 10^3$
10 minuta	360/57 mm^2	$3.1019 \cdot 10^3$	626.4605	$1.8047 \cdot 10^3$
10 minuta	490/65mm^2	$3.8039 \cdot 10^3$	815.0597	$2.2348 \cdot 10^3$
15 minuta	240/40 mm^2	$2.3702 \cdot 10^3$	379.1433	$1.3374 \cdot 10^3$
15 minuta	360/57 mm^2	$3.0787 \cdot 10^3$	527.7788	$1.7503 \cdot 10^3$
15 minuta	490/65mm^2	$3.7591 \cdot 10^3$	680.2133	$2.1522 \cdot 10^3$
30 minuta	240/40 mm^2	$2.3686 \cdot 10^3$	319.6553	$1.3193 \cdot 10^3$
30 minuta	360/57 mm^2	$3.0731 \cdot 10^3$	423.8286	$1.7123 \cdot 10^3$
30 minuta	490/65mm^2	$3.7490 \cdot 10^3$	529.9205	$2.0902 \cdot 10^3$

Tablica 14. Rezultati proračuna dinamičkog DTO-a uz vremenski konstantne uvjete bez uzimanja u obzir radijalne distribucije temperature vodiča metoda IEEE 738

Vremenski interval (t_f)	ACSR vodič	Dinamičko DTO (I_R)		
		Maksimalna vrijednost (A)	Minimalna vrijednost (A)	Srednja vrijednost (A)
10 minuta	240/40 mm^2	$2.1024 \cdot 10^3$	445.6297	$1.2879 \cdot 10^3$
10 minuta	360/57 mm^2	$2.7102 \cdot 10^3$	629.7955	$1.6844 \cdot 10^3$
10 minuta	490/65mm^2	$3.3018 \cdot 10^3$	818.5026	$2.0745 \cdot 10^3$
15 minuta	240/40 mm^2	$2.0876 \cdot 10^3$	382.7011	$1.2560 \cdot 10^3$
15 minuta	360/57 mm^2	$2.6699 \cdot 10^3$	534.3057	$1.6248 \cdot 10^3$
15 minuta	490/65mm^2	$3.2275 \cdot 10^3$	684.3401	$1.9819 \cdot 10^3$
30 minuta	240/40 mm^2	$2.0848 \cdot 10^3$	323.7539	$1.2368 \cdot 10^3$
30 minuta	360/57 mm^2	$2.6567 \cdot 10^3$	429.2647	$1.5816 \cdot 10^3$
30 minuta	490/65mm^2	$3.2021 \cdot 10^3$	535.9935	$1.9111 \cdot 10^3$



Slika 19. Rezultati proračuna dinamičkog DTO-a uz vremenski konstantne uvjete bez uzimanja u obzir radijalne distribucije temperature vodiča metoda IEEE 738 i Cigre 601

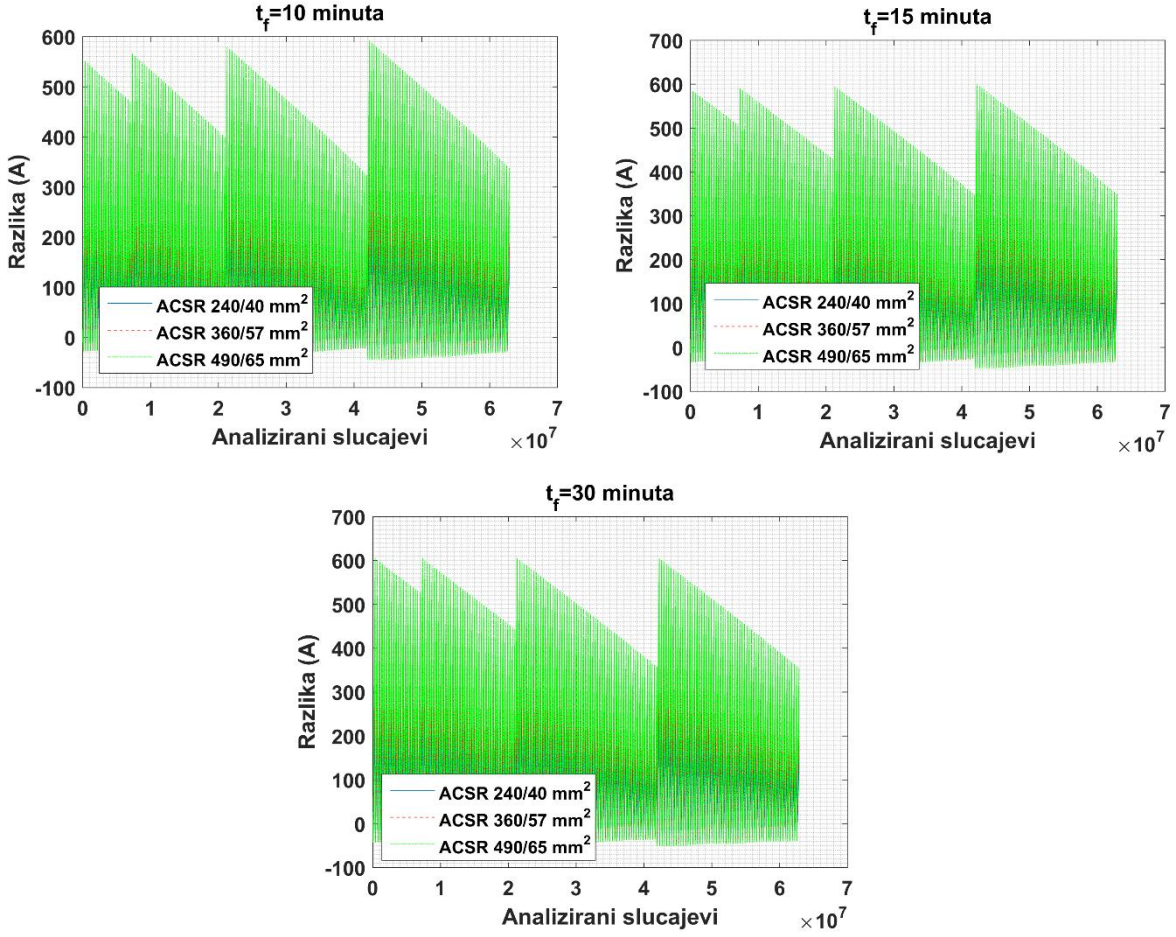
Sagledavajući rezultate dane Tablicom 13. i 14. moguće je zaključiti, da je vrijednost dinamičkog DTO-a, relativno jako ovisna o vremenskom intervalu za koji se određuje posebno pri nepovoljnijim klimatskim uvjetima. Naime analizirajući rezultate 10 minutna maksimalna vrijednost dinamičkog DTO-a je za Cigre 601 metodu i analizirane ACSR vodiče od 0.34 % do 1.54 % veća u odnosu na 15 minutnu, odnosno

30 minutnu vrijednost. Navedeno uvećanje za minimalnu vrijednost iznosi od 14.2 % do 34.98 %. Slično za IEEE 738 standard uvećanje maksimalne vrijednosti je u rasponu od 0.7 % do 3.18 %, odnosno za minimalne od 14.12 % do 34.52 %. Iz ovako jednostavne analize moguće je zaključiti, da se pri povoljnim klimatskim uvjetima (većim brzinama i kutovima vjetra), temperatura vodiča mijenja brzo te shodno tome su razlike u određenim maksimalnim vrijednosti za razne vremenske intervale male. Navedeno se može potvrditi i usporedbom maksimalnih vrijednosti s maksimalnim vrijednostima stacionarnog DTO-a. Naime odstupanja maksimalnih vrijednosti stacionarnog i dinamičkog DTO-a, sukladno Tablici 13. i 14. i poglavlju 3.5.2, kreću se od 0.01 % do 1.45 % (Cigre 601) odnosno od 0.02 % do 3.03 % (IEEE 738). Navedeno potvrđuje da je pri brzoj dinamici relevantnost vremenskog intervala minimalna. Međutim, pri nepovoljnim uvjetima vremenski interval igra jako važnu ulogu. Stoga, ovisno o postavljenoj kombinaciji klimatskih uvjeta, početne temperature vodiča te pri odabranom vremenskom intervalu, dinamičkim DTO-em će se postići veće ili manje uvećanje u odnosu na stacionarno DTO.

Izračunate razlike metodologijama Cigre 601 i IEEE 738 dane su u Tablici 15. te prikazane na Slici 20. Razlike u metodologijama kreću se od -37.33 A do 604.79 A, odnosno postotno gledano od -3.07 % do 22.44 %. Same razlike se u pravilu povećavaju za ACSR vodiče s većim presjekom te pri dužim vremenskim intervalima (t_f). Razlike su naravno ovisne i o odabranim kombinacijama klimatskih uvjeta i početne temperature vodiča, odnosno o simuliranim uvjetima. U odnosu na stacionarno DTO maksimalna greška među metodologijama Cigre 601 i IEEE 738 je 3.75 % veća (za stacionarni DTO određena je maksimalna pogreška u iznosu od 18.69 %).

Tablica 15. Razlike u proračunu dinamičkog DTO-a uz vremenski konstantne klimatske uvjete bez uzimanja u obzir radijalne distribucije temperature vodiča

Vremenski interval (t_f)	ACSR vodič	Razlika u dinamičkom DTO-u Cigre 601 i IEEE 738 (I_R)			
		Opseg razlika (A)		Opseg razlika (%)	
		Od	Do	Od	Do
10 minuta	240/40 mm^2	-37.3318	316.7826	-3.5601	14.7603
10 minuta	360/57 mm^2	-41.6334	455.7063	-3.0739	15.8864
10 minuta	490/65mm^2	-45.3047	592.3718	-3.4387	20.3178
15 minuta	240/40 mm^2	-38.4908	318.8477	-3.9535	15.1568
15 minuta	360/57 mm^2	-44.1138	459.8647	-3.8276	16.4115
15 minuta	490/65mm^2	-47.7019	600.0425	-4.1360	21.0907
30 minuta	240/40 mm^2	-39.8318	318.9925	-4.3344	15.6984
30 minuta	360/57 mm^2	-46.6500	462.3338	-4.2768	17.4447
30 minuta	360/57 mm^2	-51.6662	604.7929	-5.1541	22.4399



Slika 20. Razlike u proračunu dinamičkog DTO-a Cigre 601 i IEEE 738 metode uz vremenski konstantne uvjete bez uzimanja u obzir radijalne distribucije temperature vodiča

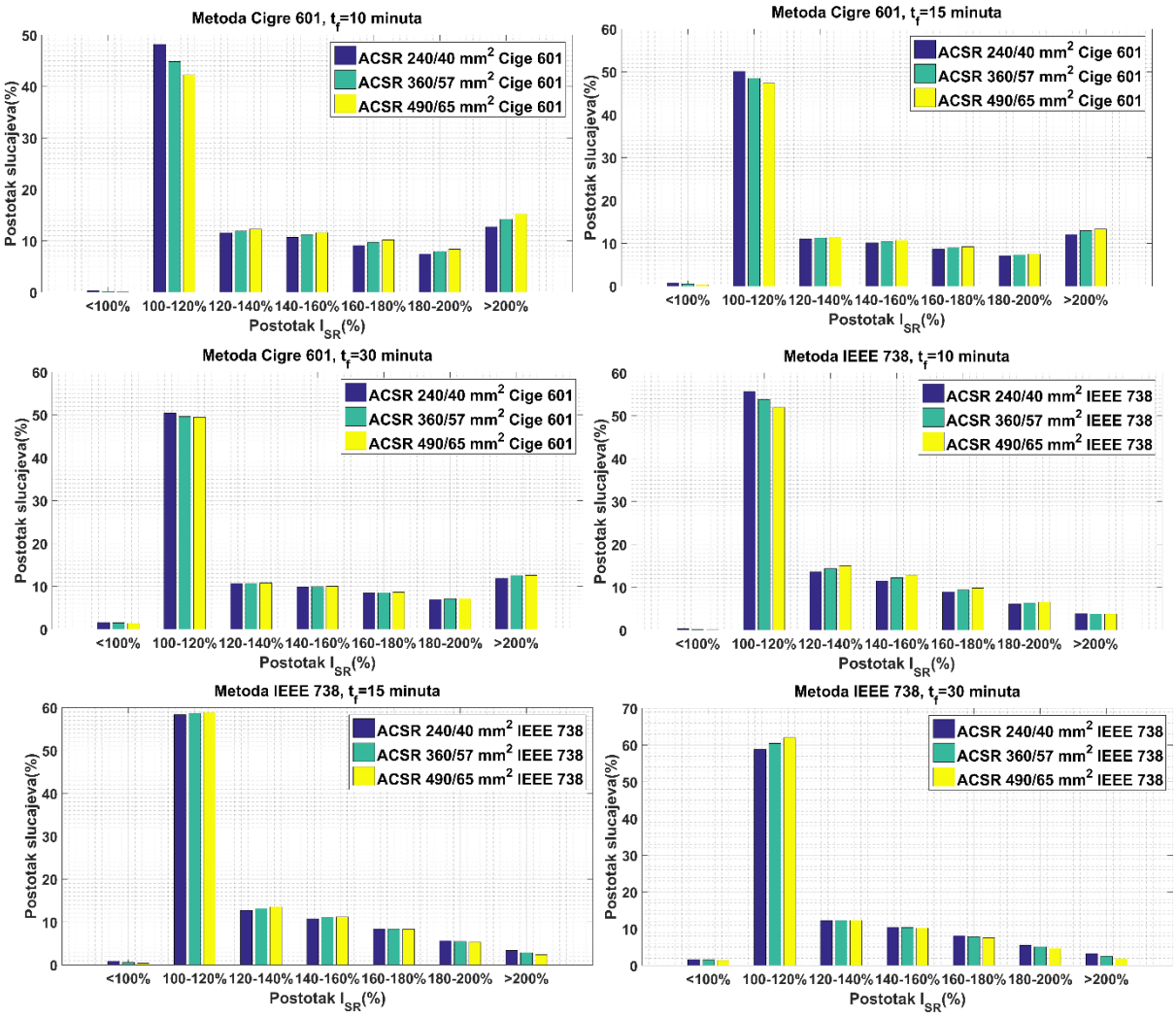
Izračunati potencijali dinamičkog DTO-a putem metodologija Cigre 601 i IEEE 738 dani su u Tablici 16. i 17. te prikazani na Slici 21.

Tablica 16. Rezultati proračuna potencijala dinamičkog DTO-a uz vremenski konstantne uvjete bez uzimanja u obzir radijalne distribucije temperature vodiča metoda Cigre 601

Vremenski interval (t_f)	ACSR vodič	Postotak trajnog DTO-a (I_{SR})						
		<100 %	100 -120 %	120-140 %	140-160 %	160-180 %	180 - 200 %	≥200 %
10 minuta	240/40 mm^2	0.3068	48.1811	11.5669	10.6795	9.1235	7.4278	12.7144
10 minuta	360/57 mm^2	0.1512	44.8383	11.9416	11.2040	9.7138	7.9460	14.2052
10 minuta	490/65mm^2	0.0786	42.2977	12.2839	11.5975	10.1624	8.3556	15.2243
15 minuta	240/40 mm^2	0.8158	50.1462	11.0405	10.1477	8.6583	7.0890	12.1025
15 minuta	360/57 mm^2	0.5340	48.4821	11.2655	10.4543	8.9634	7.3517	12.9490
15 minuta	490/65mm^2	0.3740	47.3786	11.4835	10.6960	9.1993	7.5348	13.3338
30 minuta	240/40 mm^2	1.6292	50.4001	10.7205	9.8754	8.4656	6.9686	11.9406
30 minuta	360/57 mm^2	1.5009	49.598	10.7416	9.965	8.5729	7.0866	12.5350
30 minuta	490/65mm^2	1.3877	49.4394	10.8055	10.0216	8.6185	7.1189	12.6083

Tablica 17. Rezultati proračuna potencijala dinamičkog DTO-a uz vremenski konstantne uvjete bez uzimanja u obzir radijalne distribucije temperature vodiča metoda IEEE 738

Vremenski interval (t_f)	ACSR vodič	Postotak trajnog DTO-a (I_{SR})						
		<100 %	100 -120 %	120-140 %	140-160 %	160-180 %	180 - 200 %	≥200 %
10 minuta	240/40 mm^2	0.3157	55.7138	13.5574	11.5134	8.9425	6.1093	3.8479
10 minuta	360/57 mm^2	0.1543	53.7645	14.3521	12.2178	9.3935	6.3280	3.7898
10 minuta	490/65mm^2	0.0796	51.9465	14.9622	12.8622	9.8271	6.5423	3.7800
15 minuta	240/40 mm^2	0.8433	58.3597	12.7008	10.7731	8.3383	5.6424	3.3424
15 minuta	360/57 mm^2	0.5355	58.6555	13.1496	11.0135	8.3447	5.4680	2.8332
15 minuta	490/65mm^2	0.3782	58.9074	13.5381	11.2086	8.3234	5.2688	2.3755
30 minuta	240/40 mm^2	1.6739	58.8146	12.2291	10.4430	8.1166	5.4956	3.2272
30 minuta	360/57 mm^2	1.5201	60.4371	12.2683	10.3304	7.8328	5.0934	2.5180
30 minuta	490/65mm^2	1.4003	62.0116	12.3037	10.1939	7.5335	4.6621	1.8949

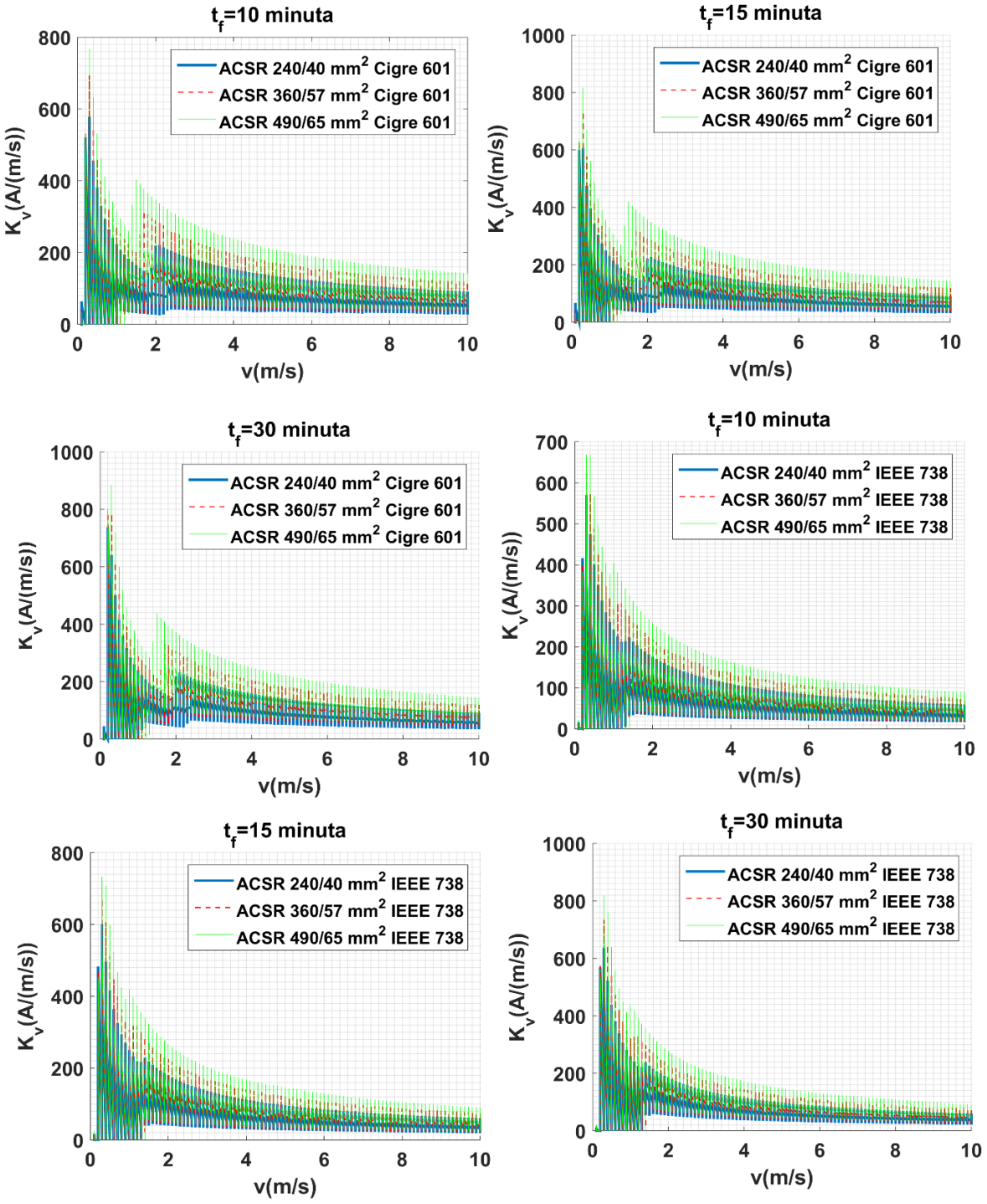


Slika 21. Proračunati potencijali primjene dinamičkog DTO-a uz jednaku vjerojatnost svih analiziranih slučajeva

Iz samih rezultata prema Slici 21. moguće je zamijetiti da je u vrlo malom broju slučajeva, u rasponu od 0.08 % - 1.63 % (Cigre 601) i 0.08 % - 1.67 % (IEEE 738), dinamičko DTO manje od I_{SR}. U najvećem broju slučajeva, u rasponu od 42.29 % - 50.4 % (Cigre 601) i 51.95 % - 62.01 % (IEEE 738), izračunato je dinamičko DTO u razredu od 100-120 % I_{SR}. U ostalim razredima se zamjećuje kretanje udjela od 6.97 % - 15.22 % (Cigre 601) i 1.89 % - 14.96 % (IEEE 738). Za zamijetiti je da u najvišem razredu većem od dva puta od I_{SR} Cigre 601 daje udio od oko 11.94 % - 15.22 %, a IEEE 738 svega oko 1.89 % - 3.84 %. Stoga pri razmatranim promjenama generalno se može reći da je, kao i za slučaj stacionarnog DTO-a, najvjerojatnije uvećanje trajnog DTO-a do 20 % (uz pretpostavku jednake vjerojatnosti pojave svih kombinacija klimatskih uvjeta i početne temperature vodiča te pri razmatranim vremenskim intervalima). Navedeno je u dobrom skladu s praktičnim istraživanjima danim u [27], [38], gdje je navedeno uvećanje do 130 % kao najvjerojatnije. Ukoliko se usporede podaci sa stacionarnim vrijednostima sama struktura podijele je takva da se pri većim vremenskim intervalima rezultati približavaju onima u stacionarnom stanju. Drugim riječima pri većim vrijednostima t_f manji je potencijal primjene dinamičkog DTO-a.

Na Slici 22. prikazano je kretanje K_v dinamičkog DTO-a za definirane slučajeve i razmatrane ACSR vodiče dobiveno metodologijama Cigre 601 i IEEE 738. U Tablici 18. prikazani su rezultati dobiveni statističkom analizom K_v podijeljeni u pojedine intervale brzine vjetra. Iz prikazanih rezultata moguće je zaključiti da za analizirane vodove u prosjeku porast brzine vjetra u iznosu od 1 m/s povećava dinamički DTO za od 70.22 A do 232.06 A (Cigre 601), odnosno od 45.36 A do 226.06 A (IEEE 738). Zanimljivo je uočiti da je kretanje prosječnoga koeficijenta K_v u odnosu na stacionarno stanje neznatno promijenjeno. Dodatno, oblici određenih krivulja koeficijenta K_v odgovaraju po oblicima onima u stacionarnom stanju. Iz rezultata se može zaključiti da se vrijednosti K_v povećavaju s smanjenjem brzine vjetra i pri većim presjecima ACSR vodiča. Povećanjem intervala t_f se vrijednosti koeficijenta K_v značajno ne mijenjaju osim ukoliko se ne promatraju niže brzine vjetra. Maksimalne vrijednosti K_v kretale su se u rasponu od 104.08 A/(m/s) - 884.74 A/(m/s) (Cigre 601), 69.24 A/(m/s) - 819.74 A/(m/s) (IEEE 738). Maksimalne vrijednosti su nešto niže u odnosu na stacionarno stanje iz razloga što su korištene konačne razlike, a ne parcijalne derivacije radi određivanja samoga koeficijenta K_v. Kretanje K_v prikazuje da

je ovisnost dinamičkog DTO-a o brzini vjetra posebno velika. Stoga je slično kao i za stacionarno stanje pravilno mjerenje brzine vjetra posebno pri nižim brzinama ključno radi točnog određivanja dinamičkog DTO-a. S druge strane ukoliko se pretpostavi maksimalna greška anemometra u iznosu od 2 % tada se odstupanje uslijed mjerenja kreće u rasponu od 0 A do 35.39 A.

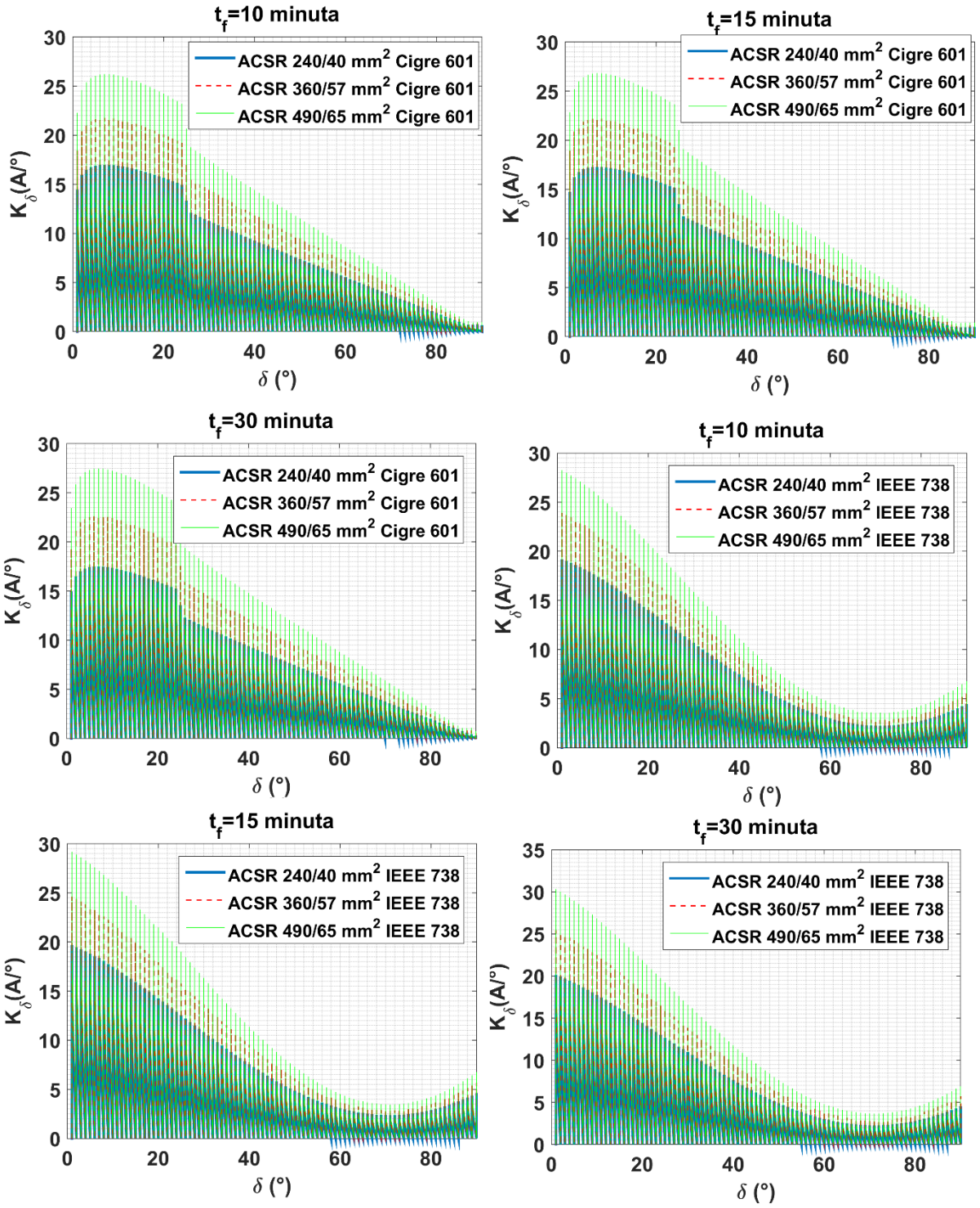


Slika 22. Rezultati proračuna Kv dinamičkog DTO-a uz vremenski konstantne uvjete bez uzimanja u obzir radijalne distribucije temperature vodiča metoda Cigre 601 i IEEE 738

Tablica 18. Rezultati proračuna K_v dinamičkog DTO-a uz vremenski konstantne uvjete bez uzimanja u obzir radijalne distribucije temperature vodiča metoda Cigre 601 i IEEE 738

Vremenski interval (t_f)/metoda	ACSR	Tip vrijednosti	K_v (A/ (m/s))					
			v	0-2 m/s	2-4 m/s	4-6 m/s	6-8 m/s	8-10 m/s
10 minuta Cigre 601	240/40 mm^2	Minimalna		0.0000	25.0617	33.7222	29.8212	27.3152
		Maksimalna		577.9833	221.5419	154.3427	122.7489	104.0820
		Prosječna		127.7833	117.1681	94.4635	80.0710	70.2192
	360/57 mm^2	Minimalna		0.0000	43.8376	39.1895	34.4048	33.6923
		Maksimalna		693.3894	290.5327	197.5031	157.4150	133.8121
		Prosječna		152.4754	148.1260	117.4232	100.2846	88.5086
	490/65 mm^2	Minimalna		0.0000	49.3186	44.5991	42.1420	39.7575
		Maksimalna		767.2033	346.8712	238.0276	190.0825	161.7451
		Prosječna		178.2070	173.3333	138.4151	118.8444	105.3320
15 minuta Cigre 601	240/40 mm^2	Minimalna		0.0000	31.6018	39.6628	35.1289	30.7436
		Maksimalna		606.0639	226.8109	157.0181	124.2489	104.9590
		Prosječna		141.1379	125.9587	99.7909	83.3133	72.2522
	360/57 mm^2	Minimalna		0.0000	52.7533	46.1375	41.4571	37.2287
		Maksimalna		734.0347	298.9828	201.6608	159.9916	135.5132
		Prosječna		169.4887	161.3625	125.6639	105.8310	92.3336
	490/65 mm^2	Minimalna		0.0000	59.7701	53.9624	49.7846	42.2125
		Maksimalna		816.8038	358.2844	243.6247	193.6663	164.2418
		Prosječna		199.1893	190.0474	149.3092	126.5515	110.9082
30 minuta Cigre 601	240/40 mm^2	Minimalna		0.0000	40.7313	45.2943	39.1679	34.0250
		Maksimalna		738.3886	232.2641	158.9500	124.9160	105.2526
		Prosječna		159.3120	134.6952	103.6438	85.0567	73.0929
	360/57 mm^2	Minimalna		0.0000	67.0614	55.8830	49.8021	41.7671
		Maksimalna		788.8398	307.5250	205.5809	161.7780	136.3784
		Prosječna		194.8238	177.9288	133.3884	109.8465	94.5887
	490/65 mm^2	Minimalna		0.0000	78.0351	65.3734	59.5458	53.4402
		Maksimalna		884.7430	372.3120	249.5741	196.6961	165.8733
		Prosječna		232.0584	212.9118	161.0833	133.1800	114.8398
10 minuta IEEE 738	240/40 mm^2	Minimalna		0.0000	24.9840	20.9570	18.4554	16.6102
		Maksimalna		570.4420	175.8431	110.5027	84.1084	69.2498
		Prosječna		132.8481	89.5456	65.3917	53.1908	45.3618
	360/57 mm^2	Minimalna		0.0000	27.8171	23.4441	20.1279	17.6576
		Maksimalna		628.0154	218.8157	138.1796	105.4356	86.8134
		Prosječna		153.8410	106.8755	78.6943	64.4178	55.2478
	490/65 mm^2	Minimalna		0.0000	30.4265	25.6896	22.7792	20.6494
		Maksimalna		667.8277	258.3247	163.6575	125.0743	103.2607
		Prosječna		172.5975	122.5158	90.6596	74.4779	64.0545
15 minuta IEEE 738	240/40 mm^2	Minimalna		0.0000	29.8834	24.7146	21.4835	19.1129
		Maksimalna		600.8335	180.3330	112.5860	85.3260	70.0104
		Prosječna		146.5787	96.8164	69.5617	55.9184	47.2474
	360/57 mm^2	Minimalna		0.0000	33.1817	25.7938	22.0089	20.2785
		Maksimalna		673.2130	225.3603	141.3717	107.4755	88.3902
		Prosječna		171.2584	116.9985	85.0266	68.9061	58.5821
	490/65 mm^2	Minimalna		0.0000	37.0871	31.1240	27.4435	24.7194
		Maksimalna		732.9496	267.0981	167.9960	129.3501	105.3523
		Prosječna		193.2736	134.9690	98.7245	80.3988	68.6304
30 minuta IEEE 738	240/40 mm^2	Minimalna		0.0000	37.0667	29.4166	24.7589	21.4340
		Maksimalna		636.3888	185.3346	114.1229	86.6277	70.6875
		Prosječna		165.0400	104.3409	72.8160	57.6410	48.3199
	360/57 mm^2	Minimalna		0.0000	43.9297	35.4609	30.2253	25.7797
		Maksimalna		733.6773	233.1818	144.5479	109.1559	90.1656
		Prosječna		197.5298	129.7420	91.4404	72.6911	61.0152
	490/65 mm^2	Minimalna		0.0000	49.5965	40.4795	34.8030	30.6518
		Maksimalna		819.7477	277.9043	172.7894	131.2559	109.4123
		Prosječna		226.0608	152.5077	108.3653	86.5213	72.7773

Na Slici 23. prikazano je kretanje K_δ dinamičkog DTO-a za analizirane slučajeve i razmatrane ACSR vodiče dobiveno metodologijama Cigre 601 i IEEE 738. U Tablici 19. prikazani su rezultati dobiveni statističkom analizom K_δ podijeljeni u pojedine intervale kuta vjetra.



Slika 23. Rezultati proračuna K_δ dinamičkog DTO-a uz vremenski konstantne uvjete bez uzimanja u obzir radijalne distribucije temperature vodiča metoda Cigre 601 i IEEE 738

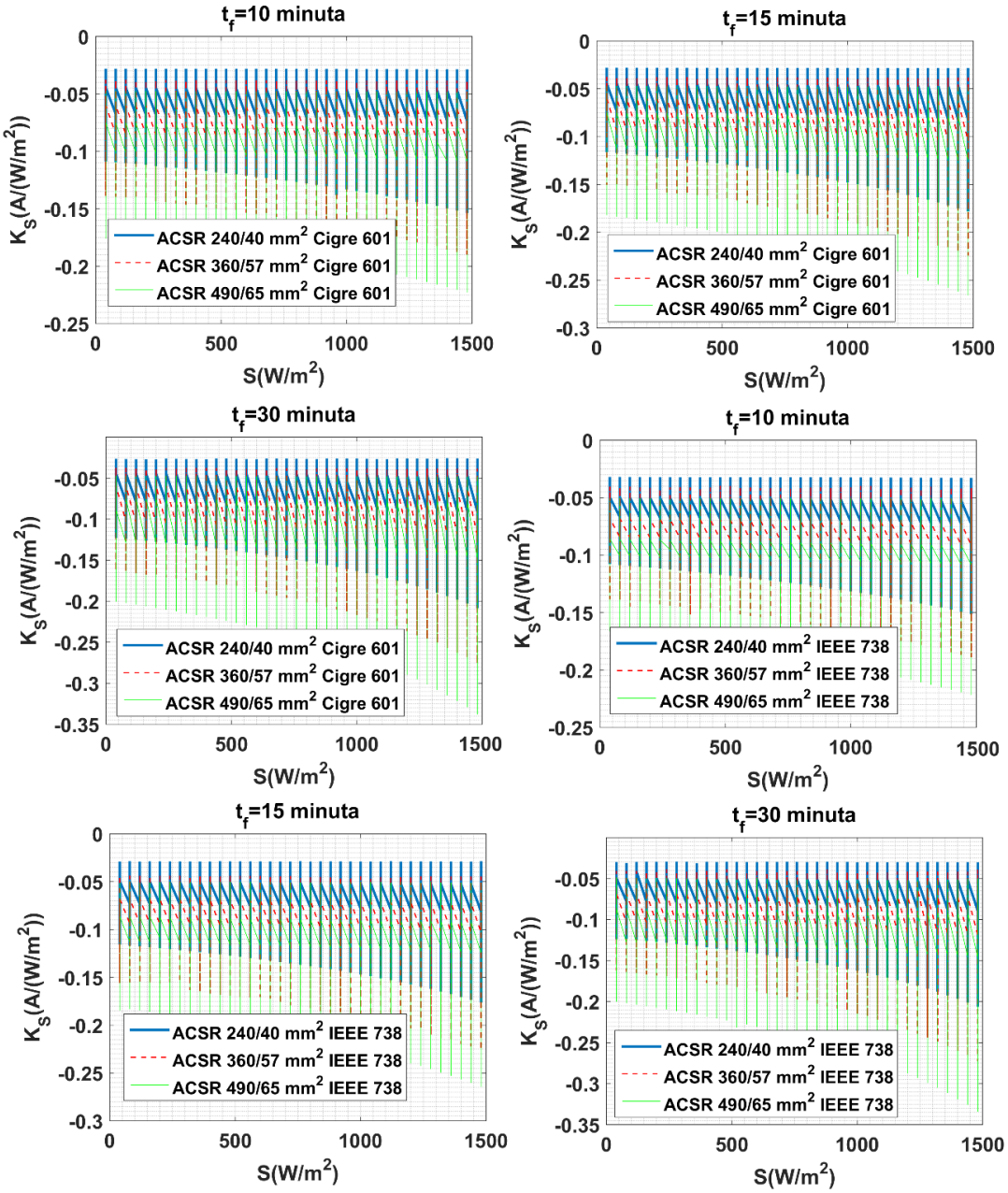
Tablica 19. Rezultati proračuna K_δ dinamičkog DTO-a uz vremenski konstantne uvjete bez uzimanja u obzir radijalne distribucije temperature vodiča metoda Cigre 601 i IEEE 738

Vremenski interval (t_f)/metoda	ACSR	Tip vrijednosti	K_δ (A/°)			
			δ	0 – 30 °	30 – 60 °	60 – 90 °
10 minuta Cigre 601	240/40 mm²	Minimalna		0.0000	0.0000	0.0000
		Maksimalna		16.9967	11.2619	5.5459
		Prosječna		7.9954	4.6304	1.5741
	360/57 mm²	Minimalna		0.0000	0.0000	0.0000
		Maksimalna		21.7529	14.4606	7.1346
		Prosječna		9.8334	5.7496	1.9635
	490/65 mm²	Minimalna		0.0000	0.0000	0.0000
		Maksimalna		26.2187	17.4688	8.6317
		Prosječna		11.5109	6.7782	2.3213
15 minuta Cigre 601	240/40 mm²	Minimalna		0.0000	0.0000	0.0000
		Maksimalna		17.2865	11.3817	5.5833
		Prosječna		8.5462	4.8620	1.6400
	360/57 mm²	Minimalna		0.0000	0.0000	0.0000
		Maksimalna		22.2052	14.6759	7.2124
		Prosječna		10.6281	6.1142	2.0719
	490/65 mm²	Minimalna		0.0000	0.0000	0.0000
		Maksimalna		26.8282	17.7741	8.7502
		Prosječna		12.5286	7.2667	2.4701
30 minuta Cigre 601	240/40 mm²	Minimalna		0.0000	0.0000	0.0000
		Maksimalna		17.4914	11.4297	5.5978
		Prosječna		9.0722	5.0393	1.6862
	360/57 mm²	Minimalna		0.0000	0.0000	0.0000
		Maksimalna		22.6258	14.8085	7.2497
		Prosječna		11.5310	6.4500	2.1635
	490/65 mm²	Minimalna		0.0000	0.0000	0.0000
		Maksimalna		27.4698	18.0084	8.8189
		Prosječna		13.8004	7.7701	2.6099
10 minuta IEEE 738	240/40 mm²	Minimalna		0.0000	0.0000	0.0000
		Maksimalna		19.1969	10.6689	4.4446
		Prosječna		8.3196	3.7297	1.6805
	360/57 mm²	Minimalna		0.0000	0.0000	0.0000
		Maksimalna		23.9174	13.3755	5.6038
		Prosječna		9.9087	4.4933	2.0347
	490/65 mm²	Minimalna		0.0000	0.0000	0.0000
		Maksimalna		28.2501	15.8677	6.7894
		Prosječna		11.3420	5.1787	2.3512
15 minuta IEEE 738	240/40 mm²	Minimalna		0.0000	0.0000	0.0000
		Maksimalna		19.6834	10.8216	4.6252
		Prosječna		8.9824	3.9509	1.7656
	360/57 mm²	Minimalna		0.0000	0.0000	0.0000
		Maksimalna		24.6133	13.6323	5.6680
		Prosječna		10.8339	4.8361	2.1733
	490/65 mm²	Minimalna		0.0000	0.0000	0.0000
		Maksimalna		29.1812	16.3214	6.7626
		Prosječna		12.4824	5.6204	2.5353
30 minuta IEEE 738	240/40 mm²	Minimalna		0.0000	0.0000	0.0000
		Maksimalna		20.1573	10.9865	4.5098
		Prosječna		9.6710	4.1258	1.8277
	360/57 mm²	Minimalna		0.0000	0.0000	0.0000
		Maksimalna		25.4313	13.8422	5.7314
		Prosječna		11.9844	5.1725	2.2962
	490/65 mm²	Minimalna		0.0000	0.0000	0.0000
		Maksimalna		30.3206	16.5682	6.9336
		Prosječna		14.0633	6.1278	2.7277

Iz prikazanih rezultata na Slici 23. odnosno Tablici 19. moguće je zaključiti da za analizirane slučajeve u prosjeku porast kuta vjetra u iznosu od 1 º uzrokuje povećanje dinamičkog DTO-a u rasponu od 1.57 A do 13.8 A (Cigre 601), odnosno od 1.68 A do 14.06 A (IEEE 738). Kretanje prosječnoga koeficijenta K_δ je u odnosu na stacionarno stanje neznatno promijenjeno. Dodatno, oblici određenih krivulja koeficijenta K_δ odgovaraju po oblicima onima u stacionarnom stanju. Iz rezultata se može zaključiti da se vrijednosti K_δ povećavaju sa smanjenjem kuta vjetra i pri većim presjecima ACSR vodiča. Povećanjem intervala t_f vrijednosti se koeficijenta K_δ značajno ne mijenjaju. Maksimalne vrijednosti K_δ kretale su se u rasponu od 5.58 A/º do 27.46 A/º (Cigre 601), odnosno od 4.51 A/º do 30.32 A/º (IEEE 738). Maksimalne vrijednosti su nešto niže u odnosu na stacionarno stanje iz razloga što su korištene konačne razlike. Kretanje K_δ prikazuje da je numerički gledano ovisnost dinamičkog DTO-a znatno manja u odnosu na brzinu vjetra. Međutim, s druge stane se sam kut vjetra može značajno promijeniti. Primjerice, pri smanjenju kuta vjetra od 30 º na 0º uz odabrani K_δ od 16.99 A/(º), navedeno uzrokuje smanjenje dinamičkog DTO-a u iznosu od 509.7 A. Stoga je mjerenje kuta vjetra posebice pri nižim kutevima ključno radi točnog određivanja dinamičkog DTO-a. Ukoliko se pretpostavi maksimalna greška mjerenja kuta vjetra u iznosu od 3 º tada se najveće odstupanje uslijed mjerenja za definirane koeficijente osjetljivosti kreće u rasponu od 0 A do 90.96 A. Navedeno, označava da bez obzira što je K_δ znatno manji od K_v moguća su veća odstupanja u određivanju dinamičkog DTO-a radi greške mjerenja kuta vjetra nego same brzine.

Na Slici 24. prikazano je kretanje K_S za razmatrane ACSR vodiče i analizirane slučajeve dobiveno metodologijama Cigre 601 i IEEE 738. U Tablici 20. prikazani su rezultati dobiveni statističkom analizom podijeljeni u pojedine intervale intenziteta Sunčeva zračenja. Iz prikazanih rezultata na Slici 24. odnosno Tablici 20. moguće je zaključiti da za analizirane vodove u prosjeku porast S u iznosu od 1 W/m^2 uzrokuje smanjenje dinamičkog DTO-a u rasponu od 0.052 A do 0.098 A (Cigre 601), odnosno 0.055 A do 0.104 A (IEEE 738). Vrijednosti K_S su apsolutno veće pri većim vrijednostima intenziteta Sunčeva zračenja i većim presjecima vodiča. Dodatno, povećanjem vremenskog intervala apsolutna se vrijednost koeficijenta K_S povećava. Maksimalne negativne vrijednosti K_S kretale su se u rasponu od 0.118 A/(W/m^2) do 0.338 A/(W/m^2) (Cigre 601), odnosno od 0.117 A/(W/m^2) do 0.334 A/ (W/m^2) (IEEE 738). Maksimalne vrijednosti su nešto niže u odnosu na stacionarno stanje iz

razloga što su korištene konačne razlike. Kao i za stacionarni slučaj na prvi pogled utjecaj intenziteta Sunčeva zračenja izgleda malen. Međutim, *S* se u realnosti može naglo promijenit radi pojave oblaka. Primjerice, kod smanjenja *S* sa 1000 W/m^2 na 520 W/m^2 uz K_S od -0.1 A/(W/m^2), dolazi do povećanja dinamičkog DTO-a u iznosu od 48 A. Ukoliko se pretpostavi maksimalna greška mjerenja S u iznosu od 5 % tada se najveće odstupanje uslijed mjerenja kreće u rasponu od približno 0 A do 25.07 A.

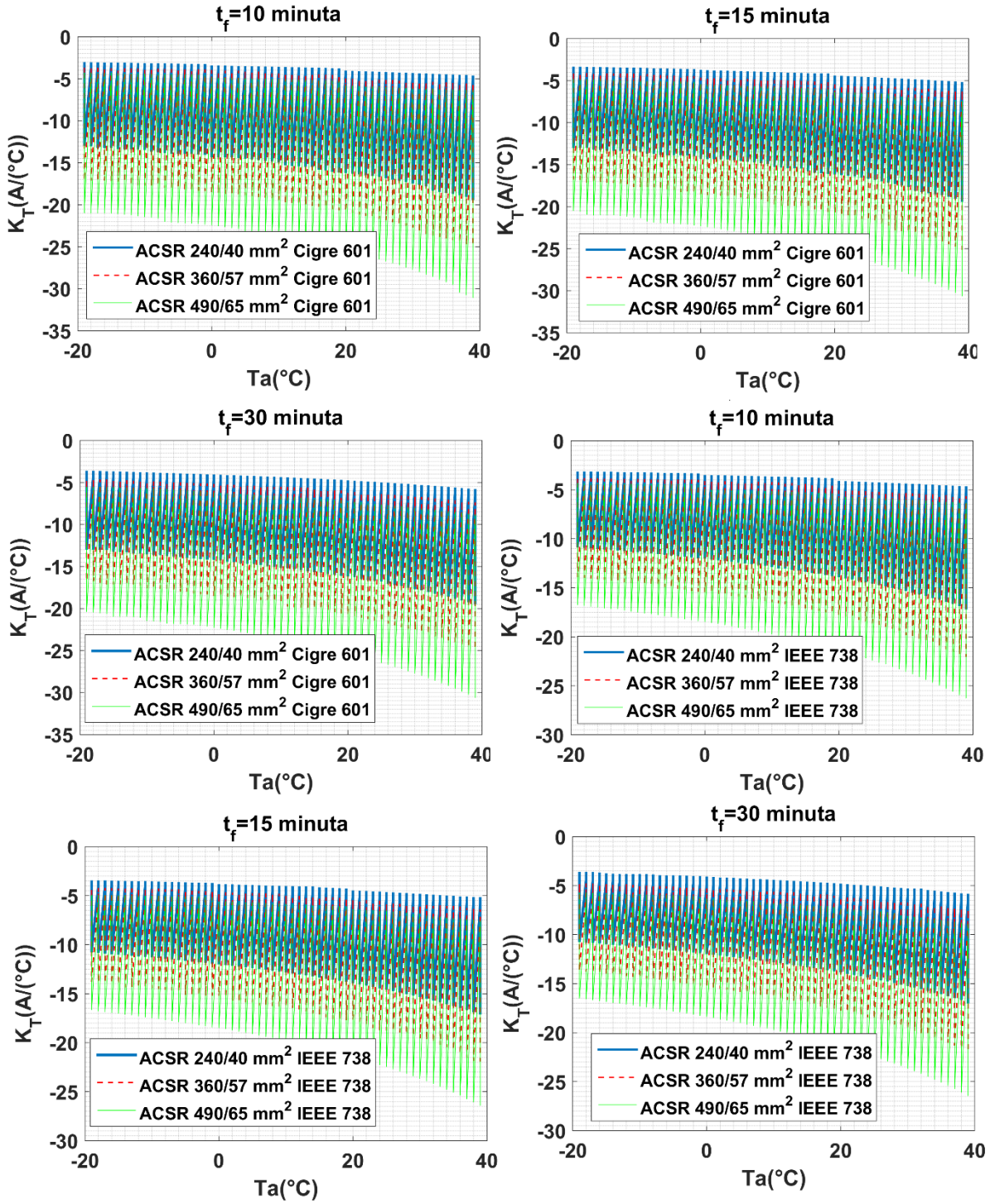


Slika 24. Rezultati proračuna Ks dinamičkog DTO-a uz vremenski konstantne uvjete bez uzimanja u obzir radijalne distribucije temperature vodiča metoda Cigre 601 i IEEE 738

Tablica 20. Rezultati proračuna K_s dinamičkog DTO-a uz vremenski konstantne uvjete bez uzimanja u obzir radijalne distribucije temperature vodiča metoda Cigre 601 i IEEE 738

Vremenski interval (t_f)/metoda	ACSR	Tip vrijednosti	K_S (A/(W/m^2))		
		S	0 – 520 W/m^2	520 – 1000 W/m^2	1000 – 1480 W/m^2
10 minuta Cigre 601	240/40 mm^2	Minimalna	-0.1180	-0.1381	-0.1538
		Maksimalna	-0.0280	-0.0282	-0.0283
		Prosječna	-0.0524	-0.0538	-0.0553
	360/57 mm^2	Minimalna	-0.1498	-0.1655	-0.1899
		Maksimalna	-0.0378	-0.0380	-0.0382
		Prosječna	-0.0694	-0.0711	-0.0731
	490/65 mm^2	Minimalna	-0.1791	-0.1966	-0.2228
		Maksimalna	-0.0474	-0.0476	-0.0479
		Prosječna	-0.0856	-0.0876	-0.0900
15 minuta Cigre 601	240/40 mm^2	Minimalna	-0.1279	-0.1460	-0.1783
		Maksimalna	-0.0280	-0.0281	-0.0283
		Prosječna	-0.0535	-0.0550	-0.0567
	360/57 mm^2	Minimalna	-0.1649	-0.1867	-0.2243
		Maksimalna	-0.0377	-0.0379	-0.0381
		Prosječna	-0.0715	-0.0735	-0.0758
	490/65 mm^2	Minimalna	-0.1993	-0.2242	-0.2659
		Maksimalna	-0.0473	-0.0475	-0.0478
		Prosječna	-0.0888	-0.0912	-0.0941
30 minuta Cigre 601	240/40 mm^2	Minimalna	-0.1372	-0.1607	-0.2083
		Maksimalna	-0.0261	-0.0259	-0.0257
		Prosječna	-0.0540	-0.0556	-0.0576
	360/57 mm^2	Minimalna	-0.1822	-0.2132	-0.2764
		Maksimalna	-0.0376	-0.0378	-0.0380
		Prosječna	-0.0729	-0.0751	-0.0779
	490/65 mm^2	Minimalna	-0.2239	-0.2618	-0.3380
		Maksimalna	-0.0471	-0.0474	-0.0477
		Prosječna	-0.0912	-0.0941	-0.0975
10 minuta Cigre 601	240/40 mm^2	Minimalna	-0.1170	-0.1303	-0.1513
		Maksimalna	-0.0319	-0.0321	-0.0324
		Prosječna	-0.0547	-0.0561	-0.0578
	360/57 mm^2	Minimalna	-0.1519	-0.1648	-0.1889
		Maksimalna	-0.0395	-0.0395	-0.0398
		Prosječna	-0.0732	-0.0751	-0.0772
	490/65 mm^2	Minimalna	-0.1787	-0.1960	-0.2218
		Maksimalna	-0.0501	-0.0502	-0.0502
		Prosječna	-0.0907	-0.0930	-0.0957
15 minuta Cigre 601	240/40 mm^2	Minimalna	-0.1272	-0.1450	-0.1766
		Maksimalna	-0.0286	-0.0286	-0.0286
		Prosječna	-0.0559	-0.0575	-0.0594
	360/57 mm^2	Minimalna	-0.1712	-0.1895	-0.2259
		Maksimalna	-0.0436	-0.0440	-0.0443
		Prosječna	-0.0754	-0.0775	-0.0801
	490/65 mm^2	Minimalna	-0.1994	-0.2232	-0.2643
		Maksimalna	-0.0498	-0.0500	-0.0503
		Prosječna	-0.0944	-0.0972	-0.1004
30 minuta Cigre 601	240/40 mm^2	Minimalna	-0.1369	-0.1600	-0.2064
		Maksimalna	-0.0294	-0.0295	-0.0298
		Prosječna	-0.0564	-0.0581	-0.0602
	360/57 mm^2	Minimalna	-0.1811	-0.2116	-0.2728
		Maksimalna	-0.0386	-0.0389	-0.0391
		Prosječna	-0.0770	-0.0794	-0.0824
	490/65 mm^2	Minimalna	-0.2230	-0.2604	-0.3342
		Maksimalna	-0.0487	-0.0495	-0.0496
		Prosječna	-0.0971	-0.1003	-0.1042

Na Slici 25. prikazano je kretanje K_T dinamičkog DTO-a za analizirane slučajeve i razmatrane ACSR vodiče dobiveno metodologijama Cigre 601 i IEEE 738. U Tablici 21. prikazani su rezultati dobiveni statističkom analizom K_T podijeljeni u pojedine intervale temperature okoline.



Slika 25. Rezultati proračuna K_T dinamičkog DTO-a uz vremenski konstantne uvjete bez uzimanja u obzir radijalne distribucije temperature vodiča metoda Cigre 601 i IEEE 738

Tablica 21. Rezultati proračuna K_T dinamičkog DTO-a uz vremenski konstantne uvjete bez uzimanja u obzir radijalne distribucije temperature vodiča metoda Cigre 601 i IEEE 738

Vremenski interval (t_f) /metoda	ACSR	Tip vrijednosti	K_T (A/°C)		
		T_a	-20 – 0 ºC	0 - 20 ºC	20 – 39 ºC
10 minuta Cigre 601	240/40 mm^2	Minimalna	-16.1511	-19.0568	-19.2901
		Maksimalna	-3.0308	-4.0411	-4.5999
		Prosječna	-9.0833	-11.3312	-12.5790
	360/57 mm^2	Minimalna	-20.6855	-24.7576	-25.0609
		Maksimalna	-3.6813	-4.9532	-5.5700
		Prosječna	-11.6601	-14.5056	-16.0540
	490/65 mm^2	Minimalna	-25.2455	-30.7630	-31.0905
		Maksimalna	-4.2638	-5.7917	-6.3589
		Prosječna	-14.0789	-17.4901	-19.3118
15 minuta Cigre 601	240/40 mm^2	Minimalna	-16.1037	-19.0460	-19.2794
		Maksimalna	-3.3355	-4.3947	-5.1552
		Prosječna	-9.1589	-11.4855	-12.8062
	360/57 mm^2	Minimalna	-20.6365	-24.7563	-25.0618
		Maksimalna	-4.0857	-5.4661	-6.2105
		Prosječna	-11.8368	-14.8140	-16.4894
	490/65 mm^2	Minimalna	-25.4231	-30.2791	-30.6534
		Maksimalna	-4.8022	-6.3536	-7.4200
		Prosječna	-14.3747	-17.9719	-19.9795
30 minuta Cigre 601	240/40 mm^2	Minimalna	-16.1301	-19.2676	-19.5049
		Maksimalna	-3.5946	-4.7563	-5.7990
		Prosječna	-9.1788	-11.5692	-12.9428
	360/57 mm^2	Minimalna	-20.6016	-24.6262	-24.9208
		Maksimalna	-4.6125	-6.0845	-7.3684
		Prosječna	-11.9080	-15.0058	-16.7854
	490/65 mm^2	Minimalna	-25.2160	-30.2631	-30.6375
		Maksimalna	-5.4983	-7.2723	-8.8003
		Prosječna	-14.5213	-18.3084	-20.4752
10 minuta IEEE 738	240/40 mm^2	Minimalna	-13.8198	-16.8600	-17.0860
		Maksimalna	-3.1360	-4.0950	-4.6533
		Prosječna	-8.2100	-10.4854	-11.7241
	360/57 mm^2	Minimalna	-17.6602	-21.7784	-22.0526
		Maksimalna	-3.8068	-5.0345	-5.6353
		Prosječna	-10.3327	-13.1875	-14.7010
	490/65 mm^2	Minimalna	-21.1988	-25.9390	-26.2877
		Maksimalna	-4.3018	-5.7200	-6.3307
		Prosječna	-12.2637	-15.6430	-17.3860
15 minuta IEEE 738	240/40 mm^2	Minimalna	-13.8083	-16.8969	-17.1248
		Maksimalna	-3.4344	-4.4633	-5.1397
		Prosječna	-8.3058	-10.6683	-11.9891
	360/57 mm^2	Minimalna	-17.6973	-21.8727	-21.9370
		Maksimalna	-4.2104	-5.4353	-6.4038
		Prosječna	-10.5331	-13.5101	-15.1543
	490/65 mm^2	Minimalna	-21.2976	-26.0810	-26.4358
		Maksimalna	-4.9330	-6.3879	-7.5054
		Prosječna	-12.6265	-16.2065	-18.1631
30 minuta IEEE 738	240/40 mm^2	Minimalna	-13.7546	-16.6715	-16.8820
		Maksimalna	-3.5962	-4.8074	-5.8397
		Prosječna	-8.3293	-10.7543	-12.1296
	360/57 mm^2	Minimalna	-17.6386	-21.5978	-21.9773
		Maksimalna	-4.7365	-6.1600	-7.4375
		Prosječna	-10.6400	-13.7607	-15.5349
	490/65 mm^2	Minimalna	-21.2369	-26.0940	-26.4525
		Maksimalna	-5.6808	-7.3469	-8.8911
		Prosječna	-12.8194	-16.5951	-18.7416

Iz prikazanih rezultata na Slici 25. odnosno Tablici 21. moguće je zaključiti da za analizirane vodove u prosjeku porast T_a u iznosu od 1 ºC uzrokuje smanjenje dinamičkog DTO-a u rasponu od 9.08 A do 20.47 A (Cigre 601), odnosno od 8.21 A do 18.74 A (IEEE 738). Vrijednosti K_T su apsolutno veće pri većim vrijednostima temperature okoline i većim presjecima vodiča. Dodatno, vrijednosti K_T se povećavaju s povećanjem vremenskog intervala t_f. Maksimalne negativne vrijednosti K_T kretale su se u rasponu od 16.01 A/ºC do 31.09 A/ºC (Cigre 601), odnosno od 13.75 A/ºC do 26.45 A/ºC (IEEE 738). Maksimalne vrijednosti za razliku od ostalih koeficijenata su nešto apsolutno veće u odnosu na stacionarno stanje. Rezultatima je pokazano kako temperatura okoline ima veliki utjecaj na sam iznos dinamičkog DTO-a. Primjerice, kod povećanja T_a sa 10 ºC na 20 ºC uz K_T od -10.64 A/ºC, dolazi do smanjenja dinamičkog DTO-a u iznosu od 106.4 A. Ukoliko se pretpostavi maksimalna greška mjerenja T_a u iznosu od 1 ºC tada se najveće odstupanje uslijed mjerenja kreće u rasponu od približno 3.03 A do 31.09 A.

Dosada je u svim proračunima dinamičkog DTO-a korištena metoda Runge-Kutta četvrtog reda kao referentna metoda. Radi usporedbe rezultata referentne metode te metode linearizacije i novo razvijene metode ponovno je za sve analizirane slučajeve izračunat dinamički DTO, ali sada primjenom tih metoda. U Tablici 22. dani su rezultati usporedbe referentne metode i metode linearizacije. Sukladno Tablici 22. zaključuje se da su razlike metode linearizacije posebno velike kod proračuna pri većim vremenskim intervalima t_f. Razlike za razmatrane ACSR vodiče 240/40 mm^2, 360/57 mm^2, 490/65 mm^2 kretale su se u rasponu -72.25 A - 194.10 A, -92.30 A - 222.01 A te -83.70 A - 254.2 A (Cigre 601), odnosno -8.27 A - 208.18 A, -7.92 A - 234.06 A te 14.63 A - 264.22 A (IEEE 738). Postotno gledano navedene razlike se kreću u rasponu -3.11 % - 30.86 %, -3.06 % - 18.43 % te -2.77 % - 20.14 % (Cigre 601), odnosno -0.41 % - 28.60 %, -0.31 % - 19.96 %, 0.47 % - 17.54 % (IEEE 738). Analizirajući rezultate sami rezultati su očekivani obzirom da se u lineariziranom pristupu dinamički DTO određuje posredno računajući temperaturu vodiča koristeći linearizani ukupni koeficijent prijenosa topline (sukladno izrazu (78)) koji je ovisan o početnoj struji određenoj pri T_{cin} (a ne mijenjanja se sa T_c ukoliko su vremenski konstanti klimatski uvjeti). Može se zaključiti da je linearizirana metoda u većini slučajeva na strani sigurnosti obzirom da prema izračunatim razlikama daje i do 30 % manje rezultate u odnosu na referentnu metodu, a svega 3 % veće. Prema

izračunatim razlikama posebice se maksimalna vrijednost povećava numerički pri većim presjecima vodiča. S druge strane postotni utjecaj se smanjuje s navedenim povećanjem. Važno je navesti da su navedene razlike računate uz pretpostavku ulaznih parametra Runge-Kutta metode prema poglavlju 6.1. Drugim riječima razlike mogu odstupati od navedenih ukoliko se promjeni korak simulacije (Δt), dozvoljeno odstupanje (ΔT_c) i ostali uvjeti o kojima ovisi dinamičko DTO.

Tablica 22. Rezultati usporedbe dinamičkog DTO-a uz primjenu referentne metode i metode linearizacije za Cigre 601 i IEEE 738 metodologiju proračuna

Vremenski interval (t_f)/metoda	ACSR vodič	Razlika u dinamičkom DTO-u referentna i linearizirana metoda			
		Opseg razlika (A)		Opseg razlika (%)	
		Od	Do	Od	Do
10 minuta Cigre 601	240/40 mm^2	-67.8511	92.1505	-2.9046	9.9187
	360/57 mm^2	-81.7122	106.2759	-2.6835	8.0019
	490/65mm^2	-65.1323	132.3343	-2.1403	9.9731
15 minuta Cigre 601	240/40 mm^2	-71.1582	120.3981	-3.0563	16.5355
	360/57 mm^2	-89.3003	137.1265	-2.9549	12.5606
	490/65mm^2	-77.4230	163.3132	-2.5619	14.6561
30 minuta Cigre 601	240/40 mm^2	-72.2506	194.1034	-3.1052	30.8638
	360/57 mm^2	-92.2968	222.0067	-3.0595	18.4319
	490/65mm^2	-83.7043	254.2004	-2.7747	20.1367
10 minuta IEEE 738	240/40 mm^2	-6.7016	99.7669	-0.3262	10.6842
	360/57 mm^2	-4.5509	112.7441	-0.1721	8.4558
	490/65mm^2	14.6251	137.8965	0.6362	7.9221
15 minuta IEEE 738	240/40 mm^2	-7.9535	129.9433	-0.3899	18.6392
	360/57 mm^2	-6.6737	145.8347	-0.2563	13.9356
	490/65mm^2	15.1383	170.2431	0.5406	11.8318
30 minuta IEEE 738	240/40 mm^2	-8.2663	208.1773	-0.4058	28.5987
	360/57 mm^2	-7.9184	234.0593	-0.3056	19.9639
	490/65mm^2	14.7459	264.2158	0.4735	17.5443

U Tablici 23. prikazani su rezultati usporedbe referentne metode i novo razvijene metode. Sukladno Tablici 23. zaključuje se da se razlike između referentne metode i novo razvijene metode male. Za Cigre 601 raspon razlika između razmatranih metoda za ACSR vodiče 240/40 mm^2, 360/57 mm^2, 490/65 mm^2 je od: -20.3 A - 6.54 A, -36.6 A - 6.35 A te -52.7 A - 6.66 A. Postotno gledano te iste razlike iznose -3.42 % - 2.04 %, -3.86 % - 1.5 % te -3.98 % - 1.26 %. Iste razlike za IEEE 738 iznose -25.2 A - 6.232 A, -42.2 A - 6.38 A, -58.4 A - 6.45 A, odnosno postotno iznose -1.72 % - 1.92 %, -3.33 % - 1.49 % te -4.01 % - 1.2 %. Iz samih rezultata zaključuje se da novo razvijena metoda daje u većini slučajeva nešto veće rezultate (negativni postotak). Razlike između metoda prvenstveno su posljedica odabranoga koraka simulacije (Δt), dozvoljenog odstupanja (ΔT_c), početnog uvjeta struje pri proračunu te kompletno drugačijega postupka proračuna dinamičkog DTO-a. Smanjenjem Δt i ΔT_c

razlike između referentne metode i novo razvijene metode su zanemarive. No, takva smanjenja dovode do znatno dužih vremena određivanja vrijednosti dinamičkog DTO-a, čime nije moguće analizirati toliko veliki broj slučajeva. Ovim proračunima je pokazano kako novo razvijena metoda zadovoljava u odnosu na referentnu metodu u pogledu proračuna dinamičkog DTO-a. Samim time pokazano je kako je prikladna za implementaciju u moderne sustave dinamičkog određivanja DTO-a.

Tablica 23. Rezultati usporedbe dinamičkog DTO-a uz primjenu referentne metode i metode direktne kolokacije za Cigre 601 i IEEE 738 metodologiju proračuna

Vremenski interval (t_f)/metoda	ACSR vodič	Razlika u dinamičkom DTO-u referentna metoda i metoda direktne kolokacije			
		Opseg razlika (A)		Opseg razlika (%)	
		Od	Do	Od	Do
10 minuta Cigre 601	240/40 mm^2	-20.3000	-8.5230	-1.9288	-0.8536
	360/57 mm^2	-36.6000	-12.4644	-1.7133	-1.1799
	490/65mm^2	-52.7000	-12.9644	-3.4194	-1.3854
15 minuta Cigre 601	240/40 mm^2	-12.9644	-6.8000	-3.4194	-0.2869
	360/57 mm^2	-20.3632	-16.3000	-3.8583	-0.5294
	490/65mm^2	-28.2000	-27.0910	-3.9827	-0.7502
30 minuta Cigre 601	240/40 mm^2	0.2000	6.5355	0.0084	2.0445
	360/57 mm^2	0.4000	6.3511	0.0130	1.4985
	490/65mm^2	3.1000	6.6562	0.0827	1.2561
10 minuta IEEE 738	240/40 mm^2	-25.2000	-7.6815	-1.7237	-1.1986
	360/57 mm^2	-42.2000	-10.7720	-1.7104	-1.5571
	490/65mm^2	-58.4000	-12.8276	-1.7687	-1.5672
15 minuta IEEE 738	240/40 mm^2	-12.7631	-11.0000	-1.5672	-0.5269
	360/57 mm^2	-23.9000	-17.7817	-3.3280	-0.8952
	490/65mm^2	-40.0000	-27.4346	-4.0089	-1.2393
30 minuta IEEE 738	240/40 mm^2	0.3000	6.2320	0.0144	1.9249
	360/57 mm^2	-0.4000	6.3832	-0.0151	1.4870
	490/65mm^2	2.7000	6.4492	0.0843	1.2032

6.3 Rezultati proračuna dinamičkog dopuštenog termičkog opterećenja uz vremenski konstantne klimatske uvjete s uzimanjem u obzir radijalne distribucije temperature vodiča

U Tablici 24. dani su rezultati usporedbe metoda proračuna dinamičkog DTO-a koje uzimaju u obzir odnosno zanemaruju radijalnu distribuciju temperature vodiča. Pri tome su se simulacije vršile isključivo za najpovoljniju (T_a=-20 ºC, v=10 m/s, δ=90 º, S=0 W/m^2, T_{cin}=0 ºC) i najnepovoljniju (T_a=40 ºC, v=0 m/s, δ=0 º, S=1480 W/m^2, T_{cin}=60 ºC) kombinaciju klimatskih uvjeta i početne temperature. Time su zapravo pokriveni svi mogući slučajevi jer je efekt radijalne distribucije isključivo ovisan o veličini struje. Iz samih rezultata moguće je zaključiti da su oni veoma slični rezultatima dobivenim u stacionarnom stanju. U odnosu na metodologiju koja zanemaruje radijalnu

distribuciju temperature vodiča razlike u proračunima kreću se za ACSR vodiče 240/40 mm^2, 360/57 mm^2, 490/65 mm^2 prema Cigre 601 u iznosima 21.17 A - 343.8 A, 29.5 A - 512.4 A, 40.19 A - 721.4 A, odnosno postotno u iznosima od 5.58 % - 14.46 %, 6.31 % - 16.52 %, 7.16 % - 18.96 %. Prema IEEE 738 iste razlike iznose 21.15 A - 259.2 A, 29.93 A - 374.3 A, 40.53 A - 517.8 A, odnosno postotno gledano 5.78 % - 12.33 %; 6.39 % - 13.81 %, 7.13 % - 15.68 %. Gledajući same razlike u proračunu utjecaj radijalne distribucije je veći pri većim opterećenjima i većim presjecima vodiča. Dodatno, manji je i za proračune s dužim vremenskim intervalima.

Tablica 24. Rezultati usporedbe dinamičkog DTO-a sa i bez uzimanja u obzir radijalne distribucije temperature vodiča

Vremenski interval (t_f)/metoda	ACSR vodič	Razlika u dinamičkom DTO-u referentna metoda sa i bez uzimanja u obzir radijalne distribucije temperature vodiča			
		Opseg razlika (A)		Opseg razlika (%)	
		Od	Do	Od	Do
10 minuta Cigre 601	240/40 mm^2	24.65	343.80	5.58	14.46
	360/57 mm^2	39.86	512.40	6.36	16.52
	490/65mm^2	60.91	721.40	7.47	18.96
15 minuta Cigre 601	240/40 mm^2	22.04	340.00	5.81	14.34
	360/57 mm^2	33.29	501.50	6.31	16.29
	490/65mm^2	48.74	699.30	7.16	18.60
30 minuta Cigre 601	240/40 mm^2	21.17	338.90	6.62	14.31
	360/57 mm^2	29.50	498.10	6.96	16.21
	490/65mm^2	40.19	694.80	7.58	18.53
10 minuta IEEE 738	240/40 mm^2	25.77	259.20	5.78	12.33
	360/57 mm^2	40.24	374.30	6.39	13.81
	490/65mm^2	61.14	517.80	7.47	15.68
15 minuta IEEE 738	240/40 mm^2	22.39	254.50	5.85	12.19
	360/57 mm^2	36.13	361.70	6.76	13.55
	490/65mm^2	48.79	492.60	7.13	15.26
30 minuta IEEE 738	240/40 mm^2	21.15	253.60	6.53	12.16
	360/57 mm^2	29.93	356.90	6.97	13.43
	490/65mm^2	40.53	486.50	7.56	15.19

Uz neku razumnu pogrešku do 5 % u proračunu dinamičkog DTO-a, prema definiranoj metodologiji T_j=T_{max}, gustoća struje za 10 minutno dinamičko DTO (najgori slučaj) pri kojoj je opravdano zanemarenje radijalne distribucije za ACSR vodič 240/40 mm^2 iznosi 2.28 A/mm^2 (547.2 A), za ACSR vodič 360/65 mm^2 1.62 A/mm^2 (583.2 A) te za ACSR vodič 490/65 mm^2 1.25 A/mm^2 (612.5 A). Stoga gustoće su nešto niže u odnosu na one određene u stacionarnom stanju.

Razlike između referentne metoda i metode direktne kolokacije za metodologije koje uzimaju u obzir radijalnu distribuciju temperature vodiča prikazane su u Tablici 25.

Tablica 25. Razlike dinamičkog DTO-a određene uz primjenu referentne metode i metode direktne kolokacije s uzimanjem u obzir radijalne distribucije temperature vodiča

Vremenski interval (t_f)/metoda	ACSR vodič	Razlika u dinamičkom DTO-u referentna metoda i metoda direktne kolokacije			
		Opseg razlika (A)		Opseg razlika (%)	
		Od	Do	Od	Do
10 minuta Cigre 601	240/40 mm^2	-14.39	-13.80	-3.4485	-0.6783
	360/57 mm^2	-24.30	-17.05	-2.9070	-0.9384
	490/65mm^2	-19.08	-33.60	-2.5297	-1.0900
15 minuta Cigre 601	240/40 mm^2	-20.28	-4.40	-5.6792	-0.2167
	360/57 mm^2	-28.11	-10.10	-5.6837	-0.3919
	490/65mm^2	-35.15	-16.30	-5.5657	-0.5327
30 minuta Cigre 601	240/40 mm^2	-4.28	-0.10	-1.4354	-0.0049
	360/57 mm^2	-6.64	-0.10	-1.6835	-0.0039
	490/65mm^2	-8.63	-0.40	-1.7629	-0.0131
10 minuta IEEE 738	240/40 mm^2	-19.10	-14.47	-3.4460	-1.0362
	360/57 mm^2	-31.30	-17.17	-2.9131	-1.3400
	490/65mm^2	-41.30	-19.24	-2.5400	-1.4835
15 minuta IEEE 738	240/40 mm^2	-20.24	-8.00	-5.6162	-0.4364
	360/57 mm^2	-28.07	-17.50	-5.6352	-0.7582
	490/65mm^2	-35.12	-27.40	-5.5265	-1.0019
30 minuta IEEE 738	240/40 mm^2	-4.36	-0.10	-1.4404	-0.0055
	360/57 mm^2	-6.74	-0.60	-1.6868	-0.0261

Sukladno Tablici 25. zaključuje se da za Cigre 601 raspon razlika između razmatranih metoda za ACSR vodiče 240/40 mm^2, 360/57 mm^2, 490/65 mm^2 iznosi od -20.28 A do -0.10 A, od -28.11 A do -0.10 A, od -35.15 A do -0.40 A. Postotno gledano te iste razlike iznose od -5.679 % do -0.004 %, -5.684 % do -0.004 % i od -5.566 % do -0.013 %. Iste razlike za IEEE 738 iznose od -20.24 A do -0.10 A, od -31.30 do -0.60 A te od -41.30 A do -0.40 A. U slučaju IEEE 738 postotni iznosi se kreću od -5.616 % do -0.006 %, od -5.635 % do -0.0261 % te od -5.527 % do -0.013 %. Iz samih rezultata zaključuje se da novo razvijena metoda daje u većini slučajeva veće rezultate (negativni postotak). Razlike između metoda su, kao i što je prethodno naglašeno, prvenstveno posljedica odabranog koraka simulacije (Δt), dozvoljenog odstupanja (ΔT_j), početnog uvjeta struje pri proračunu te kompletno drugačijega postupka proračuna dinamičkog DTO-a. Smanjenjem Δt i ΔT_j razlike između referentne metode i novo razvijene metode su zanemarive.

6.4 Rezultati proračuna dinamičkog dopuštenog termičkog opterećenja uz vremenski promjenjive klimatske uvjete

Dosada su svi proračuni dinamičkog DTO-a rađeni uz pretpostavku vremenski konstantnih klimatskih uvjeta. U realnosti su naravno prisutne vremenske promijene tih uvjeta te ovisno o njima dinamičko DTO, može realno biti nešto veće ili manje, u odnosu na ono određeno za vremenski konstante uvjete. Važnost analize samih vremenskih promjena leži u činjenici da takve promjene mogu značajno promijeniti vrijednost dinamičkog DTO-a. Dodatno, analiza vremenski promjenjivih uvjeta omogućuje sagledavanje koliko se brzo moraju prikupljati mjerenja radi potreba samih proračuna dinamičkog DTO-a i njegovih predviđanja u realnim sustavima dinamičkog određivanja DTO-a. Glede samih prikupljanja mjerenja praktično je pokazano kako je navedeno opravdano izvoditi u minutnom području tipično u razdoblju od 5-10 minuta [27]. Stoga analiza kraćih vremenskih promjena realno nema praktičnu primjenu. Kao primjer utjecaja na vrijednost dinamičkog DTO-a u ovome dijelu izračuna, sagledava se kako vremenska promjena klimatskih uvjeta koja se događa u petoj minuti, iz stanja 1 u stanje 2 i obrnuto odnosno iz stanja 2 u stanje 1 utječe, na sam iznos deset minutnog dinamičkog DTO-a.

Sami klimatski uvjeti i početna temperatura pri ovim stanjima definirani su Tablicom 26. Pri vremenskoj promjeni klimatskih uvjeta iz stanja 1 u stanje 2 i obrnuto početna temperatura je identična kao i za slučaj samih stanja 1 i 2 i iznosi 40 ºC.

Tablica 26. Klimatski uvjeti i početna temperatura u stanju 1 i stanju 2

Parametar	T_a (ºC)	v (m/s)	δ (º)	S (W/m^2)	T_{cin} (ºC)
Stanje 1	20	1	90	0	40
Stanje 2	23	0.6	20	1000	40

Izračunate vrijednosti dinamičkog DTO-a pri stanju 1 i stanju 2 dane su Tablicom 27. Iz samih rezultata vidljivo je da Cigre 601 i IEEE 738 pri zadanim uvjetima daju vrlo slične rezultate proračuna dinamičkog DTO-a.

Tablica 27. Proračunati 10 minutni dinamički DTO u stanju 1 i stanju 2

Stanje	Metoda	Vrijednost dinamičkog DTO-a (A)		
		ACSR 240/40 mm^2	ACSR 360/57 mm^2	ACSR 490/65 mm^2
Stanje 1	Cigre 601	991.49	1322.26	1652.37
Stanje 2	Cigre 601	749.91	1035.11	1323.94
Stanje 1	IEEE 738	989.85	1322.75	1655.3
Stanje 2	IEEE 738	747.33	1033.24	1323.21

Svaku vremensku promjenu klimatskih uvjeta moguće je opisati matematički Heavisideovom funkcijom [176]. Drugim riječima prijelaz klimatskih uvjeta iz stanja 1 u stanje 2 moguće je opisati:

$$v(t) = 1 - 0.4 \cdot u(t - 300)[m/s] \quad (97)$$

$$\delta(t) = 90 - 70 \cdot u(t - 300)[°] \quad (98)$$

$$S(t) = 0 + 1000 \cdot u(t - 300)[W/m^2] \quad (99)$$

$$T_a(t) = 20 + 3 \cdot u(t - 300)[℃] \quad (100)$$

gdje je: *u(t)* - Heavisideova funkcija.

Obrnuti prijelaz klimatskih uvjeta iz stanja 2 u stanje 1 moguće je opisati:

$$v(t) = 0.6 + 0.4 \cdot u(t - 300)[m/s] \quad (101)$$

$$\delta(t) = 20 + 70 \cdot u(t - 300)[°] \quad (102)$$

$$S(t) = 1000 - 1000 \cdot u(t - 300)[W/m^2] \quad (103)$$

$$T_a(t) = 23 - 3 \cdot u(t - 300)[℃] \quad (104)$$

Izračunate vrijednosti dinamičkog DTO-a određene pri prijelazu među stanjima dane su Tablicom 28. Analizom Tablice 28. i usporedbom s Tablicom 27. moguće je zaključiti da u odnosu na stanje 1 prijelaz iz stanja 1 u stanje 2 u petoj minuti uzrokuje smanjenje dinamičkog DTO-a u iznosu od 15.6 % do 19.97 %. Dodatno, uspoređujući stanje 1 s prijelazom iz stanja 2 u stanje 1 smanjenje dinamičkog DTO-a je u iznosu od 2.89 % do 3.43 %. Ukoliko se na isti način usporedi stanje 2 s izračunatim vrijednostima pri prijelazu iz stanja 1 u stanje 2 moguće je zaključiti da su izračunate vrijednosti za stanje 2 od -6 % do -5.35 % manje. Jednako tako u stanju 2 izračunate

su vrijednosti od -28.4 % do -20.95 % manje u odnosu na prijelaz iz stanja 2 u stanje 1.

Tablica 28. Proračunati 10 minutni dinamički DTO pri prijelazu iz stanja 1 u 2 i obrnuto

Prijelaz	Metoda	Vrijednost dinamičkog DTO-a (A)		
		ACSR 240/40 mm^2	ACSR 360/57 mm^2	ACSR 490/65 mm^2
Prijelaz iz stanja 1 u stanje 2 u petoj minuti	Cigre 601	794.56	1093.84	1394.72
Prijelaz iz stanja 2 u stanje 1 u petoj minuti	Cigre 601	962.85	1281.57	1601.43
Prijelaz iz stanja 1 u stanje 2 u petoj minuti	IEEE 738	792.14	1091.45	1394.04
Prijelaz iz stanja 2 u stanje 1 u petoj minuti	IEEE 738	958.69	1279.01	1600.42

Iz svega navedenog moguće je zaključiti da same vremenske promjene mogu značajno utjecati na samu vrijednost dinamičkog DTO-a. Same izračunate vrijednosti dinamičkog DTO-a uvijek su negdje između najgoreg i najpovoljnijeg stanja klimatskih uvjeta unutar vremenske promjene u odnosu na vremenski konstantnu situaciju. Stoga poznavanjem tih najgorih i nepovoljnih stanja moguće je estimirati intervale vrijednosti vremenski promjenjivog dinamičkog DTO-a. Iz same analize pokazano je kako su, točnost predikacija klimatskih uvjeta i pravilno mjerenje samih klimatskih uvjeta u sustavima od veoma velike važnosti, jer minimalna odstupanja mogu značajno promijeniti samu vrijednost dinamičkog DTO-a. Stoga ključni aspekt u pogledu realne primjene dinamičkog DTO-a je u razvoju preciznih algoritama predviđanja koji mogu, ne samo u realnom vremenu, već i za neko buduće vrijeme precizno određivati vrijednost dinamičkog DTO-a.

6.5 Zaključci analize rezultata proračuna dinamičkog dopuštenog termičkog opterećenja

Kroz analizu su se sustavno sagledali rezultati izračunatog dinamičkog DTO-a pojedinim metodologijama te su definirane vrijednosti koeficijenta osjetljivosti.

Pokazano je kako se same metode proračuna putem Cigre 601 i IEEE 738 razlikuju, a same razlike prvenstveno su posljedica različitoga načina određivanja konvekcijskog odvođenja topline u pojedinim metodologijama. Numerički izračunate razlike za analizirane ACSR vodiče i razmatrane slučajeve bez vremenskih promjena pokazuju da se odstupanja Cigre 601 i IEEE 738 mogu kretati u visokim rasponima od

-37.33 A do 604.79 A, odnosno postotno gledano od -3.07 % do 22.44 %. Same razlike se u pravilu povećavaju za ACSR vodiče s većim presjekom te pri dužim vremenskim intervalima (t_f).

U pogledu određivanja isplativosti uvođenja modernih sustava monitoringa pokazano je kako je, u analiziranim uvjetima za vremenski konstante klimatske uvjete, najvjerojatnije da dinamički DTO-a leži u području od 100-120 % trajno dopuštenog opterećenja. Dodatno, pri kraćim vremenskim intervalima (t_f) smanjuje se udio slučajeva u tom intervalu i povećava udio u višim intervalima (>120 % I_{SR}).

Analizom osjetljivosti na klimatske uvjete numerički je pokazano da samo dinamičko DTO najviše ovisi o brzini vjetra, temperaturi okoline, kutu vjetra te intenzitetu Sunčeva zračenja. No, s druge strane ukoliko se uvaže realne promjene klimatskih uvjeta može doći do okretanja navedenog redoslijeda. Zanimljivo je bilo zamijetiti i da su koeficijenti veoma slični onima računatim u stacionarom stanju za odabrane vremenske intervale od 10, 15 i 30 minuta, te da se povećanjem vremenskog intervala zapravo statistički pokazatelji relativno malo mijenjaju odnosno smanjuju ili povećavaju. Konkretno pomoću obje metodologije su se prosječni koeficijenti promjene dinamičkog DTO-a za v kretali u rasponu od 45.36 A/(m/s) do 232.06 A/(m/s), za T_a od -20.41 A/°C do -8.21 A/°C, za δ od 1.57 A/° do 14.6 A/° te za S od -0.104 A/(W/m^2) do -0.052 A/(W/m^2).

Važno je naglasiti da su u simulacijama parametri ε, β, α_s, T_{max}, y držani konstantnima. Parametri ε i α_s uzeti su s vrijednošću od 0.9. Smanjenjem α_s dolazi do smanjenja K_S, dok smanjenjem ε dolazi do povećanja K_δ, K_T, K_v te smanjenja K_S. Povećanje β dovodi do povećanja K_T i smanjenja K_S, u slučajevima gdje je prirodna konvekcija dominantna. Povećanje T_{max} će uzrokovati apsolutno povećanje svih razmatranih koeficijenta osjetljivosti. Povećanjem y se smanjuje K_T, K_δ, K_v, a povećava K_S.

U pogledu koliko greška u mjerenju utječe na grešku u određenom dinamičkom DTO-u osnovna je pretpostavka bila da su maksimalne greške mjerenih uređaja konstante. U takvim uvjetima za razmatrane vodove greške iznose: za v u rasponu od 0 A do 35.39 A, za δ u rasponu od 0 A do 90.96 A, za S u rasponu od 0 A do 25.07 A te za T_a u rasponu od 3.03 A do 31.09 A. Stoga, slično kao i za stacionarno stanje najveću grešku kod određivanja dinamičkog DTO-a radi mjerenja uvode anemometri

pri mjerenju kuta i brzine vjetra. Navedena se analiza može dodatno proširiti razmatranjem stvarnih krivulja točnosti mjerenja realno instalirane senzorike.

U pogledu različitih načina matematičkoga računanja dinamičkog DTO-a razlike između Runge-Kutta metode četvrtog reda i linearizirane metode kretale su se od -92.3 A do 264.22 A odnosno postotno gledano od -3.11 % do 30.86 %. Generalno, se može zaključiti da linearizirani pristup daje točnije rezultate pri kraćim vremenski intervalima te da su izračunati rezultati putem toga pristupa manji u odnosnu na one računate putem Runge-Kutta metode četvrtog reda. U pogledu metode direktne kolokacije i metode Runge-Kutta četvrtog reda razlike su se kretale od -58.4 A do 6.66 A odnosno postotno od -4.01 % do 2.04 %. Sama metoda kolokacije u većini je slučajeva dala nešto veće rezultate. Međutim, smanjenjem Δt i ΔT_c razlike među metodama su zanemarive. Samim time je pokazano da je pristup razvijenoga načina proračuna adekvatan u svrhu proračuna dinamičkog DTO-a.

Analizom metodologija koje uzimaju u obzir utjecaj radijalne distribucije temperature vodiča, zaključeno je kako taj utjecaj na vrijednost dinamičkog DTO-a nije zanemariv pri većim gustoćama struje. Pokazano je kako metodologija koja uzima u obzir radijalnu distribuciju temperature vodiča pri analiziranim vremenski konstantnim situacijama daje od 21.15 A do 721.4 A manje rezultate dinamičkog DTO-a. Postotno gledano navedeno je iznosilo od 5.58 % do 18.96 %. Uz neku razumnu pogrešku do 5 % u proračunu dinamičkog DTO-a prema definiranoj metodologiji $T_j=T_{max}$ gustoća struja za 10 minutno dinamičko DTO (najgori slučaj) pri kojoj je opravdano zanemarenje radijalne distribucije za razmatrane ACSR vodiče kreće se od 1.25 A/mm^2 do 2.28 A/mm^2 i nešto je niža u odnosu na stacionarno stanje.

Usporedbom proračuna metode Runge-Kutta četvrtog reda i metode direktne kolokacije za slučaj uzimanja u obzir radijalne distribucije temperature vodiča zaključeno je da se razlike kreću od -5.684 % do -0.004 %. U pravilu razvijena metoda daje nešto veće rezultate koji su zanemarivi ukoliko se smanji Δt i ΔT_j.

Analizom vremenskih promjena koje se događaju u petoj minuti na primjeru 10 minutnog dinamičkog DTO-a zaključeno je da razlike koje unose vremenske promjene mogu iznositi od -28.4 % do 19.97 %. Stoga je naglašena važnost pravilnog određivanja predviđanja vremenskih promjena klimatskih uvjeta te njihova utjecaja na samu vrijednost dinamičkog DTO-a.

7. ZAKLJUČAK

Sustavnom analizom algoritama proračuna stacionarnih i dinamičkih dopuštenih termičkih opterećenja vodiča nadzemnih vodova zaključeno je da su razlike između referentno priznatih metodologija proračuna primjenom metoda Cigre 601 i IEEE 738 posebno velike pri većim brzinama vjetra te da su suštinski te razlike posljedica drugačijega pristupa računanja konvekcijskog odvođenja topline (P_{konv}). Dodatno, od ulaznih parametra Cigre 601 uzima u obzir parametre d i β prilikom proračuna konvekcije što je u IEEE 738 metodi potpuno zanemareno. Numeričkim primjerima za analizirane slučajeve pokazano je kako se razlike između rezultata proračuna stacionarnog i dinamičkog DTO-a za Cigre 601 i IEEE 738 kreću od -40.1 A do 604.79 A, odnosno postotno gledano od -3.07 % do 22.44 %. Navedeno ukazuje na nužnost razvoja unificiranog načina i verifikacija metoda proračuna P_{konv}, kako bi se smanjile nedoumice koju metodologiju proračuna treba primijeniti u praksi radi određivanja vrijednost DTO-a, a u svrhu primjene u naprednim sustavima dinamičkog određivanja DTO-a.

Analizom metodologija koje uzimaju i ne uzimaju u obzir radijalnu distribuciju temperature vodiča zaključeno je da su razlike između tih metoda velike pri većim vrijednostima struja te da je efekt značajniji pri većim presjecima vodiča i kraćim vremenskim intervalima t_f (čime su ujedno i veće vrijednosti računatog DTO-a). Numerički je za analizirane slučajeve pri proračunu stacionarnih i dinamičkih DTO-a pokazano kako se razlike mogu kretati od 8.58 A do 721.4 A, odnosno postotno od 2.8 % do 19.94 %. Stoga kako se ne bi previsoko odredila vrijednost DTO-a, koja bi mogla ugroziti sigurnosne visine (radi povećane vrijednosti T_j), predlaže se da se za analizirane ACSR vodiče radijalna distribucija temperature vodiča uzima u obzir pri gustoćama struje u rasponu od 1.25 A/mm^2 do 2.31 A/mm^2 (smanjuje se vrijednost za veće presjeke).

Usporedbom proračuna dinamičkog DTO-a referentnom metodom Runge-Kutta četvrtog reda i linearizirane metode utvrđeno je da se pri vremenski konstantnim klimatskim uvjetima razlike u proračunu povećavaju sa povećanjem t_f te da je u pravilu linearizirani pristup na strani sigurnosti (manje vrijednosti određenog DTO-a). Numerički je pri tome pokazano kako su se za analizirane slučajeve razlike kretale u rasponima od 92.3 A do 264.22 A, odnosno postotno gledano od -3.11 % do 30.86 %.

Navedenim je potvrđena prva hipoteza koja definira da postoje značajne razlike u algoritmima postojećih metodologija proračuna DTO-a koje rezultiraju odstupanjem rezultata.

Utjecaj klimatskih uvjeta na vrijednosti stacionarnog i dinamičkog DTO-a istražen je kroz koeficijente osjetljivosti. Koeficijenti osjetljivosti su matematički računati za stacionarni DTO kao parcijalne derivacije, a za dinamički kao konačne razlike. Numeričkim primjerima za analizirane slučajeve određeno je da se prosječni koeficijenti promjene stacionarnog i dinamičkog DTO-a za v kreću od 45.36 A/(m/s) do 244.92 A/(m/s), za δ od 1.57 A/° do 14.6 A/°, za S od -0.11 A/(W/m^2) do -0.052 A/(W/m^2) te za T_a od -20.41 A/°C do -7.83 A/°C. Time je potvrđena druga hipoteza, odnosno da numerički gledano najveći utjecaj na iznos DTO-a ima brzina vjetra pa potom temperatura okoline, kut vjetra te intenzitet Sunčeva zračenja.

U radu je razvijena izvorna metodologija proračuna dinamičkog DTO-a vodiča nadzemnih vodova primjenom metode direktne kolokacije. Primjenom te metode problem određivanja dinamičkog DTO-a svodi se na rješavanje problema nelinearnog programiranja. S jedne strane navedeno omogućuje jednostavan postupak određivanja dinamičkog DTO-a. S druge strane obzirom na brojnost softverskih i hardverskih rješenja omogućuje i jednostavnu implementaciju u modernim sustavima dinamičkog određivanja DTO-a. Navedenom metodologijom proračuna uklonjen je i problem algoritma iterativnog povećanja odnosno smanjenja struje koji je prisutan u metodi Runge-Kutta četvrtog reda i lineariziranoj metodi. U numeričkim primjerima glede točnosti proračuna razlike u proračunu dinamičkog DTO-a metodom Runge-Kutta četvrtog reda i direktne kolokacije kretale su se u rasponu od -4.01 % do 2.04 % za slučaj ne uzimanja radijalne distribucije temperature vodiča. U slučaju uzimanja u obzir radijalne distribucije iste razlike su se kretale u rasponu od -5.684 % do -0.004 %. Same razlike su zanemarive ukoliko se pri proračunu smanji Δt i ΔT_c ili ΔT_j. Time je potvrđena treća hipoteza rada, odnosno da nova metodologija proračuna predstavlja matematički model koji omogućuje jednostavnu implementaciju u naprednim sustavima dinamičkog određivanja DTO-a. Važno je naglasiti da se razvijena metoda može jednako dobro koristiti za slučaj vremenski konstantnih i vremenski promjenjivih klimatskih uvjeta.

POPIS LITERATURE

[1] Cigre Technical Brochure N° 601, "Guide for thermal rating calculations of overhead lines," 2014.
[2] IEEE Std. 738-2012," IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors," 2013.
[3] S. D. Foss, S. H. Lin, R. A. Fernandes, "Dynamic Thermal Line Ratings Part I Dynamic Ampacity Rating Algorithm," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-102, no. 6, pp. 1858-1864, June 1983.
[4] E. Fernandez, I. Albizu, M.T. Bedialauneta, A.J. Mazon, P.T. Leite, "Review of dynamic line rating systems for wind power integration," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 53, pp. 80-92, 2016.
[5] C. R. Black, W. A. Chisholm, "Key Considerations for the Selection of Dynamic Thermal Line Rating Systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 5, pp. 2154-2162, Oct. 2015.
[6] A. V. Kenge, S. V. Dusane, J. Sarkar, "Statistical analysis & comparison of HTLS conductor with conventional ACSR conductor," *2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT)*, Chennai, 2016, pp. 2955-2959.
[7] Y. ALShamli, N. Hosseinzadeh, H. Yousef, A. Al-Hinai, "A review of concepts in power system stability," *2015 IEEE 8th GCC Conference & Exhibition*, Muscat, 2015, pp. 1-6.
[8] Y. Liu, Z. Qu, H. Xin, D. Gan, "Distributed Real-Time Optimal Power Flow Control in Smart Grid," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, no. 5, pp. 3403-3414, Sept. 2017.
[9] A. Gomez-Exposito, A. J. Conejo, C. Canizares, "Electric Energy Systems Analysis and Operation", CRC Press, New York, 2009.
[10] D. Lukman, T. R. Blackburn, "Loss minimization in load flow simulation in power system," *4th IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems. IEEE PEDS 2001 - Indonesia. Proceedings (Cat. No.01TH8594)*, Denpasar, Indonesia, 2001, pp. 84-88 vol.1.
[11] G. Mirošević, F. Vidaković, "Projektiranje građenje i održavanje dalekovoda", Kigen, Zagreb, 2008.
[12] F. Kiessling, P. Nefzger, J. Felix i dr. "Overhead Power Lines: Planning, Design, Construction", Springer, New York, 2003.
[13] V.T. Morgan, "The thermal rating of overhead-line conductors part II. A sensitivity analysis of the parameters in the steady-state thermal model," Electric Power Systems Research, vol. 6, no.4 4, pp. 287-300, 1983.
[14] T. Krontiris, A. Wasserrab and G. Balzer, "Weather-based loading of overhead lines — Consideration of conductor's heat capacity," *2010 Modern Electric Power Systems*, Wroclaw, 2010, pp. 1-8.
[15] W. Z. Black, W. R. Byrd, "Real-Time Ampacity Model for Overhead Lines," *IEEE Power Engineering Review*, vol. PER-3, no. 7, pp. 56-56, July 1983.
[16] A. K. Deb, "Power Line Ampacity System Theory, Modelling and Applications," CRC Press, Florida, 2006.
[17] O. Stryk, "Numerical Solution of Optimal Control Problems by Direct Collocation," *International Series of Numerical Mathematics*, vol. 111, pp. 129-143, 1993.
[18] K. Schittkowski, C. Zillober, R. Zotemantel, "Numerical comparison of nonlinear programming algorithms for structural optimization," *Structural optimization*, vol. 7, no. 2, pp. 1-19, Feb 1994.
[19] G. Straten, G. Willigenburg, Henten E., "Optimal Control of Greenhouse Cultivation", CRC press, New York, 2011.
[20] D. S. Tasić, "Termički aspekti strujne opteretljivosti provodnika nadzemnih elektroenergetskih vodova," Univerziret u Nišu Elektronski fakultet, Niš, 2002.
[21] D. A. Douglass, A. -. Edris, "Field studies of dynamic thermal rating methods for overhead lines," *1999 IEEE Transmission and Distribution Conference (Cat. No. 99CH36333)*, New Orleans, LA, USA, 1999, pp. 842-851 vol.2.
[22] G. A. Davidson, T. E. Donoho, P. R. H. Landrieu, R. T. McElhaney and J. H. Saeger, "Short-Time Thermal Ratings for Bare Overhead Conductors," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-88, no. 3, pp. 194-199, March 1969.
[23] T. Y. Wong, J. A. Findlay, A. N. McMurtrie, "An On-Line Method for Transmission Ampacity Evaluation," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-101, no. 2, pp. 309-315, Feb. 1982.
[24] Z. Xia, Y. Xia, Z. Xu, J. Wu, "Study on the calculation model of maximum allowable time and ampacity for overload operation of overhead transmission line in a short time," *2015 5th International*

Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), Changsha, 2015, pp. 1458-1461.
[25] K. E. House and P. D. Tuttle, "Current-carrying capacity of ACSR," *Electrical Engineering*, vol. 77, no. 8, pp. 719-719, Aug. 1958.
[26] J. F. Minambres, J. J. Barandiaran, R. Alvarez-Isasi, M. A. Zorrozua, I. Zamora, A. J. Mazon, "Radial temperature distribution in ACSR conductors applying finite elements," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, no. 2, pp. 472-480, April 1999.
[27] T. O. Seppa, "Increasing transmission capacity by real time monitoring," *2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.02CH37309)*, New York, NY, USA, 2002, pp. 1208-1211 vol.2.
[28] S. D. Foss and, R. A. Maraio, "Evaluation of an overhead line forecast rating algorithm," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 7, no. 3, pp. 1618-1627, July 1992.
[29] J. S. Engelhardt, S. P. Basu, "Design, installation, and field experience with an overhead transmission dynamic line rating system," *Proceedings of 1996 Transmission and Distribution Conference and Exposition*, Los Angeles, CA, USA, 1996, pp. 366-370.
[30] Viktor Lovrenčić, Marko Gabrovšek, Matej Kovač,Nenad Gubeljak, Zdravko Šojat, Zaviša Klobas, "The Contribution of Conductor Temperature and Sag Monitoring to increased Ampacities of Overhead Lines (OHLs)," *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 59, no. 3, pp. 70-77, Aug. 1992.
[31] I. Albizu, E. Fernandez, P. Eguia, E. Torres and A. J. Mazon, "Tension and Ampacity Monitoring System for Overhead Lines," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, no. 1, pp. 3-10, Jan. 2013.
[32] I. Albizu, E. Fernandez, A. J. Mazon, J. Bengoechea, "Influence of the conductor temperature error on the overhead line ampacity monitoring systems," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 5, no. 4, pp. 440-447, April 2011.
[33] D. Douglass *et al*., "Real-Time Overhead Transmission-Line Monitoring for Dynamic Rating," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 31, no. 3, pp. 921-927, June 2016.
[34] K. M. Klein, P. L. Springer, W. Z. Black, "Real-Time Ampacity and Ground Clearance Software for Integration Into Smart Grid Technology," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 25, no. 3, pp. 1768-1777, July 2010.
[35] Cigre Technical Brochure N° 498, "Guide for Application of Direct Real-Time Monitoring Systems," 2012.
[36] J. G. Olazarri, A. J. Mazon, E. Fernandez, I. Albizu, M. T. Bedialauneta, "Analysis of different dynamic line rating system configurations in a distribution line," 23 *Cired*, Lyon, France, 2015, pp. 1-5.
[37] S. S. Mousavi-seyedi, F. Aminifar, S. Azimi and Z. Garoosi, "On-line assessment of transmission line thermal rating using PMU data," *2014 Smart Grid Conference (SGC)*, Tehran, 2014, pp. 1-6.
[38] J. G. Olazarri, A. J. Mazon, S. Rementeria, I. Albizu and E. Fernandez, "Performance of dynamic line rating systems for wind integration," *2015 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)*, Taormina, 2015, pp. 567-573.
[39] H. Shaker, M. Fotuhi-Firuzabad, F. Aminifar, "Fuzzy Dynamic Thermal Rating of Transmission Lines," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, no. 4, pp. 1885-1892, Oct. 2012.
[40] S. Karimi, A. M. Knight, P. Musilek, "A comparison between fuzzy and probabilistic estimation of Dynamic Thermal Rating of transmission lines," *2016 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)*, Vancouver, BC, 2016, pp. 1740-1744.
[41] J. Fu, D. J. Morrow, S. M. Abdelkader, "Modelling and prediction techniques for dynamic overhead line rating," *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, San Diego, CA, 2012, pp. 1-7.
[42] D. L. Alvarez, F. F. da Silva, E. E. Mombello, C. L. Bak and J. A. Rosero, "Conductor Temperature Estimation and Prediction at Thermal Transient State in Dynamic Line Rating Application," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 33, no. 5, pp. 2236-2245, Oct. 2018.
[43] J. L. Aznarte and N. Siebert, "Dynamic Line Rating Using Numerical Weather Predictions and Machine Learning: A Case Study," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 32, no. 1, pp. 335-343, Feb. 2017.
[44] A. Michiorri, H.-M. Nguyen, S. Alessandrini et al., "Forecasting for dynamic line rating," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 52, pp.1713-1730, Jul. 2015.
[45] V.T. Morgan, "The thermal rating of overhead-line conductors Part I. The steady state thermal model," *Electric Power Systems Research*, vol. 5, no. 2, pp. 119-139, June 1982.
[46] D. Balangó, I. Pácsonyi and B. Németh, "Overview of a new dynamic line rating system, from modelling to measurement," *2015 5th International Youth Conference on Energy (IYCE)*, Pisa, 2015, pp. 1-6.
[47] Cigre Technical Brochure N° 207, "Thermal behaviour of overhead conductors," 2002.

[48] D. A. Douglass, "Radial and Axial Temperate Gradients in Bare Stranded Conductor," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 1, no. 2, pp. 7-15, April 1986.
[49] B. Clairmont, D. A. Douglass, J. Iglesias, "Radial and longitudinal temperature gradients in bare stranded conductors with high current densities", 2012 CIGRE, Paris, 2012, pp. 1-7.
[50] Cigre Technical Brochure N° 345, "Alternating current (ac) resistance of helically stranded conductors," 2008.
[51] J. S. Barrett, O. Nigol, C. J. Fehervari, R. D. Findlay, "A New Model of AC Resistance in ACSR Conductors," *IEEE Power Engineering Review*, vol. PER-6, no. 4, pp. 47-48, April 1986.
[52] V. T. Morgan, Bo Zhang, R. D. Findlay, "Effect of magnetic induction in a steel-cored conductor on current distribution, resistance and power loss," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 12, no. 3, pp. 1299-1308, July 1997.
[53] W. A. Lewis, P. D. Tuttle, "The Resistance and Reactance of Aluminum Conductors, Steel Reinforced," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems*, vol. 77, no. 3, pp. 1189-1214, April 1958.
[54] A. H. M. Arnold, "Proximity effect in solid and hollow round conductors," *Journal of the Institution of Electrical Engineers - Part I: General*, vol. 88, no. 9, pp. 343-344, September 1941.
[55] Staszewski L., Rebizant W., "The differences between IEEE and CIGRE heat balance concepts for line ampacity considerations," Modern Electric Power Systems, Wrocław, Sept. 2010, pp. 1-4.
[56] R. Li, "The Application of the Real-time Temperature Monitoring System for Electric Transmission Lines," Computer and information science, vol. 2, no. 4, pp. 165-168, Nov. 2009.
[57] Cigre Technical Brochure N° 324, "Sag-Tension calculation methods for overhead lines," 2016.
[58] Cigre Technical Brochure N° 299, "Guide for selection of weather parameters for bare overhead conductor ratings," 2006.
[59] Convenor R. Stephen; Description of State of the Art Methods to Determine Thermal Rating of Lines in Real-Time and Their Application in Optimizing Power Flow, Cigre, Paris, 2000, pp. 1-10.
[60] T. O. Seppa, E. Cromer and W. F. Whitlatch, "Summer thermal capabilities of transmission lines in Northern California based on a comprehensive study of wind conditions," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, no. 3, pp. 1551-1561, July 1993.
[61] M. J. Tunstall, "Probabilistic Transmission Line Book Ratings Employed by National Grid- UK", IEEE-SPM, San Diego, CA, USA, July 1998, pp 1-15.
[62] T. O. Seppa, "A practical approach for increasing the thermal capabilities of transmission lines," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, no. 3, pp. 1536-1550, July 1993.
[63] S. D. Foss, R. A. Maraio, "Dynamic line rating in the operating environment," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 5, no. 2, pp. 1095-1105, April 1990.
[64] D. A. Douglass, "Weather-Dependent Versus Static Thermal Line Ratings," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol.3, no.2, pp.742-753, April 1988.
[65] J. Reding, "BPA's Probability-Based Clearance Buffers—Part III: Application to the Analysis of Existing Lines," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol.18, no.1, pp.237-242, Jan. 2003.
[66] D. A. Douglass, A. A. Edris and G. A. Pritchard, "Field application of a dynamic thermal circuit rating method," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 12, no. 2, pp. 823-831, Apr. 1997.
[67] ENTSOE, "Dynamic Line Rating for overhead lines –V6," 2015.
[68] V. Lovrenčić, D. Kozjek, M. Gabrovšek, et al., "Spot and longitudinal temperature measurements base for static and dynamic thermal rating of ohl 2x110 kv slovenj gradec – dravograd," Cigre, Cavtat, Hrvatska 2013, pp. 1-10.
[69] J. Teh, I. Cotton, "Critical span identification model for dynamic thermal rating system placement," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 9, no. 16, pp. 2644-2652, Dec. 2015.
[70] M. Matus *et al*., "Identification of Critical Spans for Monitoring Systems in Dynamic Thermal Rating," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, no. 2, pp. 1002-1009, April 2012.
[71] E. Fernandez, I. Albizu, G. Buigues, V. Valverde, A. Etxegarai and J. G. Olazarri, "Dynamic line rating forecasting based on numerical weather prediction," *2015 IEEE Eindhoven PowerTech*, Eindhoven, 2015, pp. 1-6.
[72] R. Yao, K. Sun, F. Liu and S. Mei, "Efficient Simulation of Temperature Evolution of Overhead Transmission Lines Based on Analytical Solution and NWP," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 33, no. 4, pp. 1576-1588, Aug. 2018.
[73] Tyler Phillips, Rey DeLeon, Inanc Senocak, "Dynamic rating of overhead transmission lines over complex terrain using a large-eddy simulation paradigm", *Renewable Energy*, vol. 108, pp. 380-389, Aug. 2017.

[74] F. Fan, K. Bell, D. Infield, "Probabilistic Real-Time Thermal Rating Forecasting for Overhead Lines by Conditionally Heteroscedastic Auto-Regressive Models," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 32, no. 4, pp. 1881-1890, Aug. 2017.
[75] E. Fernandez, I. Albizu, A. J. Mazon, A. Etxegarai, G. Buigues, R. Alberdi, "Power line monitoring for the analysis of overhead line rating forecasting methods," *2016 IEEE PES PowerAfrica*, Livingstone, 2016, pp. 119-123.
[76] H. Nguyen, J. Lilien, P. Schell, "Dynamic line rating and ampacity forecasting as the keys to optimise power line assets with the integration of res. The European project Twenties Demonstration inside Central Western Europe," *CIRED 2013*, Stockholm, 2013, pp. 1-4.
[77] M. Weibel, W. Sattinger, P. Rothermann i dr, "Overhead Line Temperature Monitoring Pilot Project," *CIGRE 2006*, Paris, 2006, pp.1-8.
[78] IEC 61400-12-1, "Wind energy generation systems - Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines," 2017.
[79] J. G. Olazarri, A. J. Mazon, E. Fernandez i dr., "Analysis of different dynamic line rating system configurations in a distribution line, " *2015 CIRED*, Lyon, 2015, pp.1-5.
[80] V. Lovrenčić, N. Gubeljak, Bojan Banić i dr., "Monitoring za posredno određivanje promjene horizontalne sile u zavisnosti od promjene temperature i nagiba nadzemnog voda dalekovoda prijenosnog sustava," *2014 CIGRE*, Opatija, 2015, pp.1-10.
[81] TNSP manual, "TNSP OPERATIONAL LINE RATINGS", 2009.
[82] IEC 60539-1, "Directly heated negative temperature coefficient thermistors - Part 1: Generic specification", 2016.
[83] IEC 60584-1, "Thermocouples - Part 1: EMF specifications and tolerances", 2013.
[84] IEC 60751, "Industrial platinum resistance thermometers and platinum temperature sensors", 2008.
[85] IEC 61724-1, "Photovoltaic system performance - Part 1: Monitoring", 2017.
[86] P.-M. Nast, "Measurements on the accuracy of pyranometers," *Solar Energy*, vol. 31, no. 3, pp. 279-282, Nov. 1983.
[87] Philips, A., "Evaluation of Instrumentation and Dynamic Thermal Ratings for Overhead Lines", Interim Report, 2011.
[88] W. Wang, S. Pinter, "Dynamic Line Rating Systems for Transmission Lines, Smart Grid demonstration program," Apr. 2014.
[89] B. P. Bhattarai, J.-P. Gentle, T. McJunkin i dr., "Transmission line ampacity improvements of altalink wind plant overhead tie-lines using weather-based dynamic line rating," *2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Chicago, 2017, pp. 1-5.
[90] S. Chandrpal, S. Abhaskumar, P. Priyeshkumar i dr., "Power Donuts in Overhead Lines for Dynamic Thermal Rating Measurement, Prediction and Electric Power Line Monitoring," *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, vol. 3, pp. 9394-9400, May 2014.
[91] T. Leskinen, V. Lovrenčić, "Finnish and Slovene experience of covered conductor overhead lines", *2004 Cigre*, Paris, 2013, pp. 1-8.
[92] M. Musavi, D. Chamberlain, Q. Li, "Overhead conductor dynamic thermal rating measurement and prediction," *2011 IEEE International Conference on Smart Measurements of Future Grids (SMFG) Proceedings*, Bologna, 2011, pp. 135-138.
[93] J. Luo, Y. Hao, Q. Ye, Y. Hao, L. Li, "Development of Optical Fiber Sensors Based on Brillouin Scattering and FBG for On-Line Monitoring in Overhead Transmission Lines," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 31, no. 10, pp. 1559-1565, May15, 2013.
[94] R. Bernini, A. Minardo, G. V. Persiano, A. Vaccaro, D. Villacci, L. Zeni, "Dynamic loading of overhead lines by adaptive learning techniques and distributed temperature sensing," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 1, no. 6, pp. 912-919, Nov. 2007.
[95] H. L. M. Boot, F. H. Wild, A. H. Wey i dr., "Overhead line local and distributed conductor temperature measurement techniques, models and experience at TZH", 2002 Cigre, Paris, 2002, pp. 1-6.
[96] Usi priručnik, "Power Donut2 The Instrumentation Platform For High Voltage Power Systems," 2010.
[97] A. Ukil, H. Braendle, P. Krippner, "Distributed Temperature Sensing: Review of Technology and Applications," *IEEE Sensors Journal*, vol. 12, no. 5, pp. 885-892, May 2012.

[98] I. Albizu, E. Fernández, A. J. Mazón, J. Bengoechea and E. Torres, "Hardware and software architecture for overhead line rating monitoring," 2011 IEEE Trondheim PowerTech, Trondheim, 2011, pp. 1-6.
[99] M. T. Bedialauneta, I. Albizu, E. Fernandez i dr., "Monitoring the Tension and the Temperature in an Overhead Line," *Mediterranean Electrotechnical Conference, Sfax*, 2012, pp. 1-4.
[100] E. Fernandez, I. Albizu, M. T. Bedialauneta, S. de Arriba and A. J. Mazón, "System for ampacity monitoring and low sag overhead conductor evaluation," *2012 16th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference*, Yasmine Hammamet, 2012, pp. 237-240.
[101] T. O. Seppa, H. W. Adams, D. A. Douglass,i dr. "Use of on-line tension monitoring for real-time thermal ratings, ice loads and other environmental effects," *CIGRE*, Paris, 1998, pp. 1-10.
[102] B. Forbes, D. Bradshaw, F. Campbell, “Finding hidden capacity in transmission lines,” T&D World Magazine, 2002.
[103] T. O. Seppa, H. W. Adams, D. A: Douglass i dr.: "Conductors sag monitoring by means of a laser based scanning measuring system: Experimental results," *Cigre*, Brescia, 1998, pp. 1-4.
[104] E. Golinelli, S. Musazzi, U. Perini, U. i dr.: "Laser based scanning system for high voltage power lines conductors monitoring conductors sag monitoring by means of a laser based scanning measuring system", *Cired*, Prague, 2009, pp. 1-3.
[105] S. M. Mahajan, U. M. Singareddy, "A Real-Time Conductor Sag Measurement System Using a Differential GPS," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, no. 2, pp. 475-480, April 2012.
[106] E. Cloet, J. L. Lilien, "Uprating Transmission Lines through the use of an innovative real-time monitoring system," *Trans. and Distr. Construction, Operation and Live-Line Maintenance,* Rhode Island, 2011, pp. 1-6.
[107] S. H. Tlotlollo, D. Shengzhi: "Real Time Monitoring Of High Voltage Transmission Line Conductor Sag: The State - of -The -Art," *International Journal of Engineering and Advanced Tech*., no. 3, vol.1, pp. 297-302.
[108] Syracuse, S., Clark, R., Halverson, P.i dr.: "Sensor, method and system of monitoring transmission lines," US Patent 8280652 B2, Priority Date Sept. 8, 2006.
[109] Y. Du, Y. Liao, "Methodology for transmission line capacity assessment based on PMU data," North American Power Symposium (NAPS), Genova, 2011, pp. 1-6.
[110] S. S. Mousavi-seyedi, F. Aminifar, S. Azimi i dr., "On-line assessment of transmission line thermal rating using PMU data, " Smart Grid Conference, Venice, 2014, pp. 1-6.
[111] I. Oleinikova, A. Mutule, M. Putnins M., "PMU measurements application for transmission line temperature and sag estimation algorithm development," *Intern. Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University*, Riga, 2014, pp 181-185.
[112] R. Mai, L. Fu, Xu HaiBo, "Dynamic Line Rating estimator with synchronized phasor measurement," *2011 International Conference on Advanced Power System Automation and Protection*, Beijing, 2011, pp. 940-945.
[113] D. Ritzmann, P. Wright, W. Holderbaum i dr.: "Application and analysis of synchrophasor-based online impedance measurement methods," *Cigre*, Lyon, 2015, pp. 1-5.
[114] V. T. Morgan, "The radial temperature distribution and effective radial thermal conductivity in bare solid and stranded conductors," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 5, no. 3, pp. 1443-1452, July 1990.
[115] W. Z. Black, S. S. Collins, J. F. Hall, "Theoretical model for temperature gradients within bare overhead conductors," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 3, no. 2, pp. 707-715, April 1988.
[116] S. D. Foss, S. H. Lin, R. Carberry, "Significance of the Conductor Radial Temperature Gradient Within a Dynamic Line Rating Methodology," *IEEE Power Engineering Review*, vol. PER-7, no. 4, pp. 60-60, April 1987.
[117] Xudong Zhang, Zhanfeng Ying, Yuansheng Chen, Xiong Chen, "A thermal model for calculating axial temperature distribution of overhead conductor under laboratory conditions," *Electric Power Systems Research*, vol. 166, Jan. 2019, pp. 223-231.
[118] D. A. Douglass, "AC Resistance of ACSR-Magnetic and Temperature Effects," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-104, no. 6, pp. 1578-1584, June 1985.

[119] V. T. Morgan, C. F. Price, "Magnetic properties in axial 50 Hz fields of steel core wire for overhead-line conductors," in *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 116, no. 10, pp. 1681-1694, October 1969.
[121] V. T. Morgan, "Effects of alternating and direct current, power frequency, temperature, and tension on the electrical parameters of ACSR conductors," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 18, no. 3, pp. 859-866, July 2003.
[122] V. T. Morgan and R. D. Findlay, "The effect of frequency on the resistance and internal inductance of bare ACSR conductors," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 6, no. 3, pp. 1319-1326, July 1991.
[123] R. D. Findlay, "Equivalent nonlinear lumped-parameter network representations for a.c.s.r. conductors," *IEE Proceedings C - Generation, Transmission and Distribution*, vol. 127, no. 6, pp. 430-433, November 1980.
[124] Morgan, Findlay, Bo Zhang, "Distribution of current density in ACSR conductors," *1994 Proceedings of Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, Halifax, pp. 165-168.
[125] V. T. Morgan, B. Zhang, D. Findlay, "Effects of temperature and tensile stress on the magnetic properties of a steel core from an ACSR conductor," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, no. 4, pp. 1907-1913, Oct. 1996.
[126] G. Gaba and M. Abou-Dakka, "A simplified and accurate calculation of frequency dependence conductor impedance," *8th International Conference on Harmonics and Quality of Power. Proceedings (Cat. No.98EX227)*, Athens, Greece, 1998, pp. 939-945 vol.2.
[127] Karolina Kasaš-Lažetić, Dejana Herceg, Dragan Kljajić i dr.: "Frequency Dependant Current Distribution and Resistance Coefficient of Aluminium Conductors," *X International Symposiumon Industrial Electronics INDEL2014*,BanjaLuka, 2014, pp. 1-4.
[128] M. Zunec, I. Ticar and F. Jakl, "Determination of current and temperature distribution in overhead conductors by using electromagnetic-field analysis tools," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, no. 3, pp. 1524-1529, July 2006.
[129] Carlos Arruda, Fernando C. Dart, Anny A. Silveira, "Comparison of Power Transmission Line Models with Finite Elements," Comsol Conference, Curitiba, 2014, pp 1-10.
[130] Larry Kirckpatrick, "Aluminum Electrical Conductor Handbook", The Aluminum Association, Washington, 1989.
[131] V.T. Morgan, "Thermal behaviour of electrical conductors", Research Studies Press, Somerset, 1991.
[132] J.W. Spancer, "Calculation of solar position for building purposes", CSIRO Australia Division of Building Research, Melbrune, 1965.
[133] W. S. Rigdon, H. E. House, R. J. Grosh, W. B. Cottingham, "Emissivity of Weathered Conductors After Service in Rural and Industrial Environments," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems*, vol. 81, no. 3, pp. 891-896, April 1962.
[134] V.T. Morgan, "The heat transfer from bare stranded conductors by natural and forced convection in air," *Inter. J. Heat Mass Transfer*, vol. 16, no. 11, pp. 2022-2034, Nov. 1973.
[135] W.H. McAdams, "Heat Transmission", McGraw-Hill," New York, 1954.
[136] M. W. Davis, "A new thermal rating approach: The real time thermal rating system for strategic overhead conductor transmission lines -- Part II: Steady state thermal rating program," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 96, no. 3, pp. 810-825, May 1977.
[137] M. Isozaki, H. Haji, K. Nagano, N. Iwama, "Verification of forced convective cooling from overhead conductors in low velocity by wind tunnel testing," *Trans. Institute Electrical Engineers of Japan B*, vol. 121B, no. 6, pp. 782-788, Dec. 2001.
[138] S.B. Clemes, K.G.T. Hollands, A.P. Brunger, "Natural convection heat transfer from long isothermal cylinders," *ASME J. Heat Transfer*, vol. 116, pp. 96-104, Feb. 1994.
[139] S.W. Churchill and H.H.S. Chu, "Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a horizontal cylinder", *Inter. J. Heat Mass Transfer*, vol. 18, pp. 1049-1053, Sep. 1975.
[140] V.T. Morgan, "The overall convective heat transfer from smooth circular cylinders", Advances in Heat Transfer, vol. 11, pp. 199-264, Sep. 1975.
[141] S. S. Girshin, E. A. Kuznetsov, E. V. Petrova, "Application of least square method for heat balance equation solving of overhead line conductors in case of natural convection," *2016 2nd International*

Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Chelyabinsk, 2016, pp. 1-5.
[142] S. S. Girshin, A. Y. Bigun, E. V. Petrova, "Analysis of dynamic thermal rating of overhead power lines in the conditions of forced convection considering non-linearity of heat transfer processes," *2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, Chelyabinsk, 2016, pp. 1-6.
[143] J. Iglesias, S. Fernandez de Sevilla, "Analysis of Convection Models for Overhead Lines. Application to Dynamic Thermal Rating Systems for Integrating Renewable Energy," Cigré, Auckland, 2013, pp.
[144] S. Kitamura, K. Nagano, Y. Terao i dr., "Wind Tunnel Equipment for Inspection of Conductor Radiation in Breeze", *IEEJ Transactions on Power and Energy*, vol. 121, no. 9, pp. 1199-1205, Sep. 2001.
[145] M. W. Davis, "Nomographic Computation of the Ampacity Rating of Aerial Conductors," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-89, no. 3, pp. 387-399, March 1970.
[146] J. F. Hall, A. K. Deb, J. Savoullis, "Wind tunnel studies of transmission line conductor temperatures," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 3, no. 2, pp. 801-812, April 1988.
[147] A. Saba, A. Qurrat, "Newton Raphson Method," *International Journal of Scientific & Engineering Research*, vol. 6, no. 7, pp. 1748-1952, July 2015.
[148] Helton J. C., L. Ronald Iman, Brown B. L., "Sensitivity analysis of the asymptotic behavior of a model for the environmental movement of radionuclides," *Ecological Modelling*, vol. 28, no. 4, Aug. 1985.
[149] Atherton, R., Schainker, R., Ducot, E., "On the statistical sensitivity analysis of models for chemical kinetics," *AIChE Journal*, vol. 21, no. 3, 441–448, 1975.
[150] Joe E. K., "MATLAB 6 for Engineers: Hands-on Tutorial", Edwards, Philadelphia, 2001.
[151] IEC 61089 standard, "Round wire concentric lay overhead electrical stranded conductors," 1991.
[152] A. Saba, A. Qurrat, "Newton Raphson Method," *International Journal of Scientific & Engineering Research*, vol. 6, n. 7, pp. 1748-1952 July 2015.
[153] S. S. Girshin, V. N. Gorjunov, A. Y. Bigun, E. V. Petrova, E. A. Kuznetsov, "Overhead power line heating dynamic processes calculation based on the heat transfer quadratic model," *2016 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics),* Omsk, 2016, pp. 1-5.
[154] V. T. Morgan, "Rating of conductors for short-duration currents," *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 118, no. 3.4, pp. 555-570, March-April 1971.
[155] Jian Hu, Xiaofu Xiong, Jian Wang, "Current Tolerance Capability Calculation Model of Transmission Lines and its Application in Overload Protection", *Electric Power Components and Systems*, vol. 46, pp., no. 14-15, pp. 1509-1521, Jan. 2019.
[156] E. Ogliari, A. Nespoli, R. Faranda, D. Poli, F. Bassi, "Preliminary model comparison for Dynamic Thermal Rating estimation," *2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, Genova, 2019, pp. 1-6.
[157] S. S. Girshin, V. N. Gorjunov, A. Y. Bigun, E. V. Petrova, E. A. Kuznetsov, "Overhead power line heating dynamic processes calculation based on the heat transfer quadratic model," *2016 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)*, Omsk, 2016, pp. 1-5.
[158] W. Z. Black and R. L. Rehberg, "Simplified Model for Steady State and Real-Time Ampacity of Overhead Conductors," <*IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-104, no. 10, pp. 2942-2953, Oct. 1985.
[159] M. W. Davis, "A new thermal rating approach: The real time thermal rating system for strategic overhead conductor transmission lines -- Part II: Steady state thermal rating program," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 96, no. 3, pp. 810-825, May 1977.
[160] H. Waschl, I. Kolmanovsky, M. Steinbuch, "Optimization and Optimal Control in Automotive Systems", Springer, New York, 2014.
[161] M. Kelly, "An Introduction to Trajectory Optimization: How to Do Your Own Direct Collocation", *SIAM Rev.*, vol. 59, no. 4, pp. 849–904, Nov. 2017.
[161] G. S. Hu, C. J. Ong, C. L. Teo, "Direct collocation and nonlinear programming for optimal control problem using an enhanced transcribing scheme," *Proceedings of the 1999 IEEE International*

Symposium on Computer Aided Control System Design (Cat. No.99TH8404), Kohala Coast, HI, USA, 1999, pp. 369-374.
[163]C. R. Hargraves, "Direct Trajectory Optimization Using Nonlinear Programming and Collocation", *Journal of Guidance Control and Dynamics*, vol. 10, no. 4, pp. 338-342, July 1987.
[164] C. Jansch and M. Paus, "Aircraft trajectory optimization with direct collocation using movable gridpoints," *1990 American Control Conference*, San Diego, CA, USA, 1990, pp. 262-267.
[165] F. D. Groote, A. L. Kinney,A. V. Rao, B. J. Fregly, "Evaluation of Direct Collocation Optimal Control Problem Formulations for Solving the Muscle Redundancy Problem," *Ann Biomed Eng*, vol. 44, no.10, pp. 2922–2936, Mar. 2016.
[166] S.-Y. Lin, "Basic hardware module for a nonlinear programming algorithm and applications," *Automatica*, vol. 33, no. 8, pp. 1579-1586, Aug. 1997.
[167] M. L. Psiaki, K. Park, "Trajectory Optimization for Real-Time Guidance: Part 1, Time-Varying LQR on a Parallel Processor," *1990 American Control Conference*, San Diego, CA, USA, 1990, pp. 248-253.
[168] D. Pardo, L. Möller, M. Neunert, A. W. Winkler, J. Buchli, "Evaluating Direct Transcription and Nonlinear Optimization Methods for Robot Motion Planning," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 1, no. 2, pp. 946-953, July 2016.
[169] M. Grötschel, O. Sven, R. J. Krumke Joerg, "Online Optimization of Large Scale Systems," Springer, Berlin, 2001.
[170] J. Bisschop, "Aimms Optimization Modeling," Paragon Decision Technology B.V., Haarlem, 1990.
[171] M. L: Abell, J. P. Braselton J. P, "Mathematica by Example," Elsavier Academic Press, London, 2017.
[172] G. Palanisamy, "A Case Study on Runge Kutta 4 th Order Differential Equations and Its Application," *Imperial Journal of Interdisciplinary Research (IJIR)*, vol. 3, no. 2, pp. 134-139, Jan 2017.
[173] K. Schittkowski, “NLQPL: A FORTRAN-Subroutine Solving Constrained Nonlinear Programming Problems,” *Annals of Operations Research*, Vol. 5, pp 485-500, 1985.
[174] M.J.D. Powell, “Variable Metric Methods for Constrained Optimization,” *Mathematical Programming: The State of the Art*, Springer Verlag, pp 288–311, 1983.
[175] W. Hock, K. Schittkowski, “A Comparative Performance Evaluation of 27 Nonlinear Programming Codes,” *Computing*, vol. 30, no. 4 pp. 335-358, Dec. 1983.
[176] J. Venetis, "An Analytic Exact Form of the Unit Step Function," *Mathematics and Statistics*, vol. 2, no. 7, pp. 1-3, Oct 2014.

POPIS SIMBOLA

Simbol	Opis	Mjerna jedinica
(E/l)	Jakost električnog polja po jedinici struje	V/(m·A)
A, B, C, D, E, F, G	Faktori jednadžbe za proračun S_b	/
A_1, B_1, B_2, m_1, n	Konstante radi proračuna prisilnog Nusseltovg broja u Cigre 601	/
a_1, b_1, c_1	Faktori jednadžbe za proračun K_s	/
A_a, A_s	Površina aluminijskog odnosno čeličnog dijela ACSR vodiča	m^2
B_k	Hessianova matrica	/
B_{max}	Maksimalna vrijednost magnetske indukcije u jezgri	T
c	Specifična toplinski kapacitet	J/kg·ºC
c_a, c_s	Specifični toplinski kapacitet aluminijskog odnosno čeličnog dijela ACSR vodiča	J/kg·ºC
c_{a20}, c_{s20}	Specifični toplinski kapacitet aluminijskog odnosno čeličnog dijela ACSR vodiča pri 20 ºC	J/kg·ºC
c_p	Specifični toplinski kapacitet vodiča	J/kg·ºC
D	Vanjski promjer vodiča	m
d_c	Promjer čelične jezgre	m
$d_č, d$	Promjer žice čeličnog odnosno aluminijskog dijela	m
D_n	Srednji promjer n-tog sloja	m
d_u	Inkrement	/
f	Frekvencija	/
F	Faktor refleksije površine	/
g	Funkcija jednadžbe stacionarne toplinske ravnoteže	/
g_r	Gravitacijska konstanta	m^2/s
g_d	Jednadžba dinamičkog termičkog stanja vodiča	/
Gr	Grashof broj	/
$h(x)$	Vektor ograničenja tipa jednakosti	/
h_0	Ukupni koeficijent prijenosa topline	$W/(m^2 \cdot ºC)$
H_{max}	Maksimalna jakost magnetskog polja u jezgri	A/m
H_s	Visina Sunca	º
I	Struja voda	A
i	Vektor kompleksnog broja	/
I_d	Donja vrijednost struje	A
I_g	Gornja vrijednost struje	A
I_{in}	Početna struja vodiča	A
I_{novo}	Nova vrijednost struje	A
I_R	DTO	A
I_{staro}	Stara vrijednost struje	A
it	Indeks it-te iteracija	/
J	Funkcija cilja	/
J_0, J_1	Besselove funkcije nultog i prvog reda	/
jt	Indeks jt-te kolokacijske točke	/
k_1, k_2, k_3, k_4	Koeficijenti Runge-Kutta metode četvrtoga reda	ºC/s
K_{acdc}	Ukupni faktor uvećanja istosmjernog otpora	/
k_d	Koeficijent uvećanja	A/ºC
K_{kut}	Konstanta proračuna prisilne konvekcije u IEEE 738	/
k_m	Faktor uvećanja uslijed magnetskih učinaka u jezgri (histereze i vrtložnih struja)	/
$k_{nč}, k_{na}$	Faktori geometrije čeličnog odnosno aluminijskog dijela	/
k_{red}	Faktor uvećanja uslijed transformatorskog efekta	/
K_{sy}	Faktor korekcije S_b uslijed nadmorske visine	/

K_s	Koeficijent osjetljivosti DTO na intenzitet Sunčeva zračenja	A/(W/m^2)
k_{skin}	Faktor uvećanja uslijed skin efekta	/
K_T	Koeficijent osjetljivosti DTO na temperaturu okoline	A/(ºC)
K_v	Koeficijent osjetljivosti DTO na brzinu vjetra	A/(m/s)
K_β, A_2, m_2	Konstante radi proračuna prirodnog Nusseltovg broja u Cigre 601	/
K_δ	Koeficijent osjetljivosti DTO na kut vjetra	A/(º)
$l(x)$	Vektor ograničenja tipa nejednakosti	/
m	Uzdužna masa vodiča	kg/m
m_a, m_s	Uzdužna masa aluminijskog odnosno čeličnog dijela ACSR vodiča	kg/m
$n_č$, n_a	Broj slojeva čelika odnosno aluminija	/
N_d	Dan u godini (1 do 365)	/
ni	Kinematska viskoznost	m^2/s
N_s	Faktor jasnoće neba	/
Nt	Ukupan broj kolokacijskih točaka	/
N_u	Nusseltov broj	/
n_u	Broj varijabli stanja i upravljivih varijabli	/
P_c	Snaga odvođenja topline uslijed konvekcije po jedinci duljine	W/m
P_m	Gubici snage po jedinci duljine uzrokovani magnetskim učincima u jezgri	W/m
P_r	Snaga odvođenja topline uslijed radijacije po jedinici duljine	W/m
P_{r1}	Prandtl broj	/
P_s	Snaga dovođenja topline uslijed Sunčeva zračenja	W/m
P_{Sdr}	Snaga dovođenja topline uslijed direktnog zračenja	W/m
P_{sd}	Snaga dovođenja topline uslijed dugovalnog zračenja	W/m
P_{Sdif}	Snaga dovođenja topline uslijed difuznog zračenja	W/m
P_{sref}	Snaga dovođenja topline uslijed reflektiranog zračenja	W/m
Q	Toplinska snaga po jedinici volumena	W/m^3
r	Radijus	m
R_{25}	Izmjenični otpor vodiča pri 25 ºC	Ω/m
R_{75}	Izmjenični otpor vodiča pri 75 ºC	Ω/m
R_{ac}	Izmjenični otpor po jedinici duljine	Ω/m
R_{acr}	Uvećani otpor radi redistribucije struje	Ω/m
R_{dc}	Istosmjerni otpor vodiča pri 20 ºC	Ω/m
R_{dcT}	Istosmjerni otpor pri prosječnoj temperaturi vodiča	Ω/m
R_{dcTa}	Istosmjerni otpor aluminijskog dijela pri prosječnoj temperaturi vodiča	Ω/m
$R_{dcTč}$	Istosmjerni otpor čeličnog dijela pri prosječnoj temperaturi vodiča	Ω/m
R_e	Reynoldsov broj	/
R_f	Hrapavost vodiča	/
r_r	Koeficijent refleksije	/
S	Globalni intenzitet Sunčeva zračenja	W/m^2
S_b	Intenzitet direktnog Sunčevog zračenja	W/m^2
S_d	Intenzitet difuznog Sunčevog zračenja	W/m^2
T	Temperatura	ºC
t	Vrijeme	s
T_a	Temperatura okoline	ºC
T_{av}	Prosječna temperatura vodiča	ºC
T_{av}^{it}	Vrijednost prosječne temperature u i-toj iteraciji	ºC
T_{cx}	Granična temperatura vodiča	ºC
T_f	Temperatura filma	ºC
t_f	Vremenski interval računanja dinamičkog DTO-a	s

$T_{ič}$, T_{ia}	Temperatura i-tog sloja čeličnog odnosno aluminijskog sloja	ºC
t^{it}	Vrijednost vremena u i-toj iteraciji	s
Tj	Temperatura u jezgri	ºC
T_{max}	Maksimalno dopuštena temperatura vodiča	ºC
t_r	Koeficijent propuštanja	/
T_{ref}	Referentna temperatura ima iznos od 20 ºC	ºC
T_s	Površinska temperatura vodiča	ºC
v	Brzina vjetra	m/s
y	Nadmorska visina	m
Z	Satni kut Sunca	º
z	Aksijalna duljina	m
α	Koeficijent promjene otpora s temperaturom	1/ K
$\alpha_č$, α_a	Temperaturni koeficijent promjene otpora čeličnog odnosno aluminijskog dijela	1/K
α_r	Koeficijent apsorpcije	/
α_s	Koeficijent apsorpcije Sunčeva zračenja	/
β	Kut inklinacije vodiča prema horizontali	º
β_a, β_s	Temperaturni koeficijent promjene specifičnog toplinskog kapaciteta aluminijskog odnosno čeličnog dijela ACSR vodiča	1/ºC
γ	Gustoća materijala	kg/m^3
γ_a, γ_{st}	Gustoća aluminijskog odnosno čeličnog dijela ACSR vodiča	kg/m^3
γ_c	Azimut vodiča	º
γ_s	Azimut Sunca	º
δ	Propagacijska konstante	
δ	Kut vjetra	º
δ_s	Deklinacija	º
Δt	Korak vremena	s
ΔT_j	Konačno određena razlika između T_{max} i maksimalne temperatura na intervalu od 0 do t_f	ºC
ε	Koeficijent emisije vodiča	/
η	Kut između Sunčevih zraka i osi provodnika	º
λ	efektivna termalna radijalna vodljivost vodiča	W/(m·K)
λ_f	Termalna vodljivost zraka	W/(K·m)
λ_l	Toplinska vodljivost	W/(m/K)
λ_n	Faktor koraka použenja n-tog sloja	/
μ_0	Permeabilnost vakuuma	(T·m)/A
μ_f	Dinamička viskoznost	kg/(m/s)
μ_{f1}	Apsolutna kinematska viskoznost	kg/(m·s)
μ_r	Relativna permeablinost materijala	/
$\mu_{rč}$	Relativna permeabilnost čelične jezgre	/
ρ_1	Električna otpornost materijala	Ω·m
$\rho_č$, ρ_a	Specifična električna otpornost žice čeličnog odnosno aluminijskog dijela	Ω·m/mm^2
ρ_{zrak}	Gustoća zraka	kg/m^3
σ_b	Stefan-Boltzmannova konstanta	W/(m^2·K^4)
τ	Toplinska vremenska konstanta	s
φ	Geografska širina	º
Φ	Azimutni kut	º
$\bar{V}$	Vektor pada napona pojedinoga sloja	V/m
$\bar{I}$	Vektor struja pojedinoga sloja	A
$\bar{Z}$	Matrica impedancija slojeva	Ω/m
$\bar{V_1}, \bar{V_2}, .. \bar{V_{ns}},$	Pad napona sloja od 1 do n_s	V/m

$\bar{I}_{uk}$	Vektor ukupne struje	A
λ_i^T, μ_i^T	Vektori Lagrangianovih multiplikatora	/

POPIS SLIKA

Slika 1. Aksijalna promjena DTO-a, T_c i klimatskih uvjeta uzduž realnog voda 11
Slika 2. Osnovni elementi JSTR 22
Slika 3. Izračunate vrijednosti I uz odstupanje 10 °C između T_j i T_s uz promjenu T_s za analizirane ACSR vodiče 38
Slika 4. Blok dijagram metodologije proračuna Cigre 601 (lijevo), IEEE 738 (desno) za ACSR vodiče s parnim brojem slojeva aluminija ($T_j=T_{av}=T_s=T_c$) 40
Slika 5. Blok dijagram metodologije proračuna Cigre 601 (gore), IEEE 738 (dolje) za ACSR vodiče s neparnim brojem slojeva aluminija ($T_j=T_{av}=T_s=T_c$) 41
Slika 6. Izračunate vrijednosti Rac u ovisnosti o I za ACSR vodič 490/65 mm^2 pri temperaturi 80 ºC (lijevo), 75 ºC (centar), 25 ºC (desno) 45
Slika 7. Izračunate vrijednosti stacionarnog DTO-a za analizirane slučajeve klimatskih uvjeta metodologijama Cigre 601 (lijevo), IEEE 738 (desno) 46
Slika 8. Izračunate razlike između proračuna stacionarnog DTO-a razmatranih ACSR vodiča metodologijama Cigre 601 i IEEE 738 47
Slika 9. Izračunat potencijal stacionarnog DTO-a ACSR vodiča metodologijama Cigre 601 i IEEE 738 48
Slika 10. Izračunati stacionarni K_v za razmatrane ACSR vodiče i analizirane slučajeve 48
Slika 11. Izračunati stacionarni K_δ za razmatrane ACSR vodiče i analizirane slučajeve 50
Slika 12. Izračunati stacionarni K_s za razmatrane ACSR vodiče i analizirane slučajeve 52
Slika 13. Izračunati stacionarni K_T za razmatrane ACSR vodiče i analizirane slučajeve 53
Slika 14. Izračunate vrijednosti stacionarnog DTO-a za analizirane slučajeve klimatskih uvjeta metodologijama Cigre 601 (lijevo), IEEE 738 (desno) uz T_j=80 ºC 54
Slika 15. Blok dijagram proračuna T_{av}, T_j, T_s primjenom metode Runge-Kutta četvrtog reda 62
Slika 16. Blok dijagram proračuna dinamičkog DTO-a primjenom metode Runge-Kutta četvrtog reda uz radijalnu distribuciju temperature vodiča 63
Slika 17. Blok dijagram proračuna dinamičkog DTO-a primjenom metode linearizacije 66
Slika 18. Blok dijagram proračuna dinamičkog DTO-a primjenom metode direktne kolokacije 76
Slika 19. Rezultati proračuna dinamičkog DTO-a uz vremenski konstantne uvjete bez uzimanja u obzir radijalne distribucije temperature vodiča metoda IEEE 738 i Cigre 601 81
Slika 20. Razlike u proračunu dinamičkog DTO-a Cigre 601 i IEEE 738 metode uz vremenski konstantne uvjete bez uzimanja u obzir radijalne distribucije temperature vodiča 83
Slika 21. Proračunati potencijali primjene dinamičkog DTO-a uz jednaku vjerojatnost svih analiziranih slučajeva 84
Slika 22. Rezultati proračuna Kv dinamičkog DTO-a uz vremenski konstantne uvjete bez uzimanja u obzir radijalne distribucije temperature vodiča metoda Cigre 601 i IEEE 738 86
Slika 23. Rezultati proračuna K_δ dinamičkog DTO-a uz vremenski konstantne uvjete bez uzimanja u obzir radijalne distribucije temperature vodiča metoda Cigre 601 i IEEE 738 88
Slika 24. Rezultati proračuna Ks dinamičkog DTO-a uz vremenski konstantne uvjete bez uzimanja u obzir radijalne distribucije temperature vodiča metoda Cigre 601 i IEEE 738 91
Slika 25. Rezultati proračuna K_T dinamičkog DTO-a uz vremenski konstantne uvjete bez uzimanja u obzir radijalne distribucije temperature vodiča metoda Cigre 601 i IEEE 738 93

POPIS TABLICA

Tablica 1. Određivanje konstanti B1 i n 33
Tablica 2. Određivanje konstanti A_1, B_2 i m_1 33
Tablica 3. Određivanje konstanti A_2, m_2 34
Tablica 4. Konstanti parametri u proračunu stacionarnog DTO-a 44
Tablica 5. Statističke vrijednosti stacionarnog K_v 49
Tablica 6. Statističke vrijednosti stacionarnog K_δ 50
Tablica 7. Statističke vrijednosti stacionarnog K_S 52
Tablica 8. Statističke vrijednosti stacionarnog K_T 53
Tablica 9. Konstante za proračun izrazima (64-66) 59
Tablica 10. Dodatni parametri pri proračunu dinamičkog DTO-a metodom Runge-Kutta četvrtog reda 63
Tablica 11. Dodatni parametri pri proračunu dinamičkog DTO-a metodom linearizacije 67
Tablica 12. Konstanti parametri u proračunu dinamičkog DTO-a 77
Tablica 13. Rezultati proračuna dinamičkog DTO-a uz vremenski konstantne uvjete bez uzimanja u obzir radijalne distribucije temperature vodiča metoda Cigre 601 80
Tablica 14. Rezultati proračuna dinamičkog DTO-a uz vremenski konstantne uvjete bez uzimanja u obzir radijalne distribucije temperature vodiča metoda IEEE 738 80
Tablica 15. Razlike u proračunu dinamičkog DTO-a uz vremenski konstantne klimatske uvjete bez uzimanja u obzir radijalne distribucije temperature vodiča 82
Tablica 16. Rezultati proračuna potencijala dinamičkog DTO-a uz vremenski konstantne uvjete bez uzimanja u obzir radijalne distribucije temperature vodiča metoda Cigre 601 83
Tablica 17. Rezultati proračuna potencijala dinamičkog DTO-a uz vremenski konstantne uvjete bez uzimanja u obzir radijalne distribucije temperature vodiča metoda IEEE 738 84
Tablica 18. Rezultati proračuna K_v dinamičkog DTO-a uz vremenski konstantne uvjete bez uzimanja u obzir radijalne distribucije temperature vodiča metoda Cigre 601 i IEEE 738 87
Tablica 19. Rezultati proračuna K_δ dinamičkog DTO-a uz vremenski konstantne uvjete bez uzimanja u obzir radijalne distribucije temperature vodiča metoda Cigre 601 i IEEE 738 89
Tablica 20. Rezultati proračuna K_s dinamičkog DTO-a uz vremenski konstantne uvjete bez uzimanja u obzir radijalne distribucije temperature vodiča metoda Cigre 601 i IEEE 738 92
Tablica 21. Rezultati proračuna K_T dinamičkog DTO-a uz vremenski konstantne uvjete bez uzimanja u obzir radijalne distribucije temperature vodiča metoda Cigre 601 i IEEE 738 94
Tablica 22. Rezultati usporedbe dinamičkog DTO-a uz primjenu referentne metode i metode linearizacije za Cigre 601 i IEEE 738 metodologiju proračuna 96
Tablica 23. Rezultati usporedbe dinamičkog DTO-a uz primjenu referentne metode i metode direktne kolokacije za Cigre 601 i IEEE 738 metodologiju proračuna 97
Tablica 24. Rezultati usporedbe dinamičkog DTO-a sa i bez uzimanja u obzir radijalne distribucije temperature vodiča 98
Tablica 25. Razlike dinamičkog DTO-a određene uz primjenu referentne metode i metode direktne kolokacije s uzimanjem u obzir radijalne distribucije temperature vodiča 99
Tablica 26. Klimatski uvjeti i početna temperatura u stanju 1 i stanju 2 100
Tablica 27. Proračunati 10 minutni dinamički DTO u stanju 1 i stanju 2 101
Tablica 28. Proračunati 10 minutni dinamički DTO pri prijelazu iz stanja 1 u 2 i obrnuto 102

PRILOG A

MATLAB KOD PRORAČUNA R_{AC} ZA ACSR VODIČE SA PARNIM BROJEM SLOJEVA ALUMINIJA (ZA ACSR 240/40 mm^2)

```
clear all;
close all;
%ulazni podaci:
f=50;%frekvencija
mi0=4*pi*10^-7;%permeablinost vakuuma
aal=0.00403;%temperaturni koeficijent aluminija
ast=0.0045;%temperaturni koeficijent čelika
rost=0.28736;%specifični otpor čelika
roal=0.0283;%specifični otpor aluminija
n1=1;%broj žica 1 sloja (centar)
d1=2.68;%promjer žica 1 sloja (čelik)
l1=0;%faktor uvijanja 1 sloja
n2=6;%broj žica 2 sloja
d2=2.68;%promjer žica 2 sloja (čelik)
l2=12;%faktor uvijanja 2 sloja
n3=10;%broj žica 3 sloja
d3=3.45;%promjer žica 3 sloja (aluminiji)
l3=10;%faktor uvijanja 3 sloja
n4=16;%broj žica 4 sloja
d4=3.45;%promjer žica 4 sloja (aluminiji)
l4=8;%faktor uvijanja 4 sloja
Nl=4;%ukupan broj slojeva
%vektor i ulaznih podataka
ro=[rost roal roal];%vektor specifičnog otpora
a=[ast ast aal aal];%vektor temperaturnog koeficijenta
L=[l1 l2 l3 l4];%vektor faktora uvijanja
Nz=[n1 n2 n3 n4];%vektor broja žica
d=[d1 d2 d3 d4];%vektor promjera žica
Tav=[80 80 80 80];%vektor temperatura pojedinih slojeva
%proračun istosmjernog otpora pri temperaturi vodiča
for i=1:1:Nl;
   if(i==1)
   dl(i)=d(i);
   else
      dl(i)=dl(i-1)+2*d(i);
   end
end
for i=1:1:Nl;
   lambda(i)=L(i)*dl(i);
end
for i=1:1:Nl;
A(i)=Nz(i)*pi/4*(d(i)^2);
end
for i=1:1:Nl;
if(i==1)
   R20(i)=ro(i)/A(i);
else
   R20(i)=((ro(i)/A(i)))*sqrt(1+((pi*(dl(i)-d(i)))/lambda(i))^2);
end
end
R20=1/sum(1./R20); %ukupni istosmjerni otpor
for i=1:1:Nl;
if(i==1)
   Rdc(i)=(ro(i)/A(i))*(1+a(i)*(Tav(i)-20));
else
   Rdc(i)=(((ro(i)/A(i)))*sqrt(1+((pi*(dl(i)-d(i)))/lambda(i))^2))*(1+a(i)*(Tav(i)-20));
end
end
Rdcuk=1/sum(1./Rdc); %ukupni istosmjerni otpor
%proračun uvećanja otpora uslijed skin efekta
Dalv=21.9;%vanjski promjer aluminija
Dalu=8.04;%unutarnji promjer aluminija
a0=sqrt(pi^2*(f/(roal*10^5)))-1i*sqrt(pi^2*(f/(roal*10^5)));
x1=a0*(Dalv/20);
x2=a0*(Dalu/20);
a0X=real(x1)+j*imag(x1);
a0x=real(x2)+1i*imag(x2);
n1=besselj(1,a0X);
n2=besselj(0,a0x);
```

```
n3=besselj(0,a0X);
ir=((a0X/2)*n2)/n1;
Skon=ir*abs(n3);
Skin=real(Skon);
for i=3:1:4;
   Radc(i)=1/(Rdc(i));
end
 Raldc=1./sum(Radc);
 Ral=Raldc*Skin;
for i=1:1:2;
   Rsdc(i)=1/(Rdc(i));
end
Rsdc=1./sum(Rsdc);
Rs=Rsdc;
Rvskin=1/((1/Ral)+(1/Rs))%ukupni otpor uvećan za skin efekt
```

PRILOG B

MATLAB KOD PRORAČUNA R_{AC} ZA ACSR VODIČE SA NEPARNIM BROJEM SLOJEVA ALUMINIJA (ZA ACSR 490/65 mm^2)

```
clear all;
close all;
%ulazni podaci:
f=50;%frekvencija
mi0=4*pi*10^-7;%permeablinost vakuuma
aal=0.00403;%temperaturni koeficijent aluminija
ast=0.0045;%temperaturni koeficijent čelika
rost=0.28736;%specifični otpor čelika
roal=0.0283;%specifični otpor aluminija
n1=1;%broj žica 1 sloja (centar) %18, 16 12 11
d1=3.4;%promjer žica 1 sloja (čelik)
l1=0;%faktor uvijanja 1 sloja
n2=6;%broj žica 2 sloja
d2=3.4;%promjer žica 2 sloja (čelik)
l2=24;%faktor uvijanja 2 sloja
n3=12;%broj žica 3 sloja
d3=3.4;%promjer žica 3 sloja (aluminiji)
l3=16;%faktor uvijanja 3 sloja
n4=18;%broj žica 4 sloja
d4=3.4;%promjer žica 4 sloja (aluminiji)
l4=11.9;%faktor uvijanja 4 sloja
n5=24;%broj žica 5 sloja
d5=3.4;%promjer žica 4 sloja (aluminiji)
l5=11.85;%faktor uvijanja 4 sloja
Nl=5;%ukupan broj slojeva
%vektor ulaznih podataka
ro=[rost rost roal roal roal];%vektor specifičnog otpora
a=[ast ast aal aal aal];%vektor temperaturnog koeficijenta
L=[l1 l2 l3 l4 l5];%vektor faktora uvijanja
Nz=[n1 n2 n3 n4 n5];%vektor broja žica
d=[d1 d2 d3 d4 d5];%vektor promjera žica
Tav=[80 80 80 80 80];%vektor temperatura pojedinih slojeva
%Proračun istosmjernog otpora pri temperaturi vodiča
for i=1:1:Nl;
   if(i==1)
   dl(i)=d(i);
   else
      dl(i)=dl(i-1)+2*d(i);
   end
end
for i=1:1:Nl;
   lambda(i)=L(i)*dl(i);
end
for i=1:1:Nl;
A(i)=Nz(i)*pi/4*(d(i)^2);
end
for i=1:1:Nl;
if(i==1)
   R20(i)=ro(i)/A(i);
else
   R20(i)=((ro(i)/A(i)))*sqrt(1+((pi*(dl(i)-d(i)))/lambda(i))^2);
end
```

```
end
for i=1:1:Nl;
if(i==1)
   Rdc(i)=(ro(i)/A(i))*(1+a(i)*(Tav(i)-20));
else
   Rdc(i)=(((ro(i)/A(i)))*sqrt(1+((pi*(dl(i)-d(i)))/lambda(i))^2))*(1+a(i)*(Tav(i)-20));
end
end
Rdcuk=1/sum(1./Rdc); %ukupni istosmjerni otpor
%proracun uvećanja otpora uslijed skin efekta
Dalv=30.6;%vanjski promjer aluminija
Dalu=10.2;%unutarnji promjer aluminija
a0=sqrt(pi^2*(f/(roal*10^5)))-j*sqrt(pi^2*(f/(roal*10^5)));
x1=a0*(Dalv/20);
x2=a0*(Dalu/20);
a0X=real(x1)+j*imag(x1);
a0x=real(x2)+j*imag(x2);
n1=besselj(1,a0X);
n2=besselj(0,a0x);
n3=besselj(0,a0X);
ir=((a0X/2)*n2)/n1;
Skon=ir*abs(n3);
Skin=real(Skon);
for i=3:1:5;
   Radc(i)=1/(Rdc(i));
end
 Raldc=1./sum(Radc);
 Ral=Raldc*Skin;

for i=1:1:2;
   Rsdc(i)=1/(Rdc(i));
end
Rsdc=1./sum(Rsdc);
Rs=Rsdc;
Rvskin=1/((1/Ral)+(1/Rs));%ukupni otpor uvećan za skin efekt

%proračun uvećanja otpora uslijed transformatorskog efekta
bg=1;
for Itot=10:0.5:6000;
Itop=Itot;
for i=1:1:Nl;
I(i)=(Rdcuk/Rdc(i))*Itot;
end
for i=1:1:Nl;
   if(rem(i,2)==0)
    H(i)=1000*(I(i)/lambda(i));
   else
      if(i==1)
      else
      H(i)=-1000*(I(i)/lambda(i));
      end
   end
end
Huk=abs(sum(H));
XY1=dlmread('ac1.txt');
XY2=dlmread('ac2.txt');
Re=interp1(XY1(:,1),XY1(:,2),Huk,'spline');
Im=interp1(XY2(:,1),XY2(:,2),Huk,'spline');
for i=1:1:Nl;
if(i<3)
   mi(i)=Re-j*Im;
else
   mi(i)=1;
end
end
Asc=A(1)+A(2);
for i=2:1:Nl;
   for g=2:1:Nl;
      X(i,g)=j*2*pi*f*mi0*(((pi/4)*(dl(i)^2)-Asc)+mi(1)*Asc)/(lambda(i)*lambda(g));
   end
end
Kint=0.21;
Ko=0.79;
for i=1:1:Nl-1;
   for g=i+1:1:Nl;
```

```
Lok(i,g)=j*f*mi0*Kint*log((dl(g)-d(g))/dl(g))+j*f*mi0*Ko*log(dl(g)/(dl(g)-d(g)));
    end
end
for i=2:1:Nl;
    for g=2:1:Nl;
        if(g==i)
Lok(i,g)=j*f*mi0*Ko*log(dl(g)/(dl(g)-d(g)));
        end
    end
end
for i=1:1:Nl-1;
    for g=i:1:Nl-1;
       Lop(i,g)=j*f*mi0*(log((dl(Nl)-d(Nl))/dl(g))+log(dl(Nl)/(dl(g+1)-d(g+1))));
       Lop(Nl,Nl)=0;
        end
end
Lop1=Lop;
Lok1=Lok;
for i=1:1:Nl;
    for g=1:1:Nl;
        if(i==g)
            Lop1(i,g)=0;
            Lok1(i,g)=0;
        else
        Lop1(i,g)=Lop(g,i);
        Lok1(i,g)=Lok(g,i);
        end
        end
end
Flux=Lop+Lop1+Lok+Lok1;
for i=1:1:Nl
    for g=1:1:Nl
        if(i==g)
        Res(i,g)=Rdc(i);
        else
            Res(i,g)=0;
        end
    end
end
for i=1:1:Nl;
    for g=1:1:Nl;
        if(rem(i,2)==0)
        SGN1=1;
        else
            SGN1=-1;
        end
        if(rem(g,2)==0)
        SGN2=1;
        else
        SGN2=-1;
        end
        Z(i,g)=Res(i,g)+SGN1*SGN2*X(i,g)+Flux(i,g);
        Z(g,i)=Res(g,i)+SGN1*SGN2*X(g,i)+Flux(g,i);
    end
end
deltaV=Rdc.*I;
I0=linsolve(Z,deltaV');
Zpp=Z;
eps=0.001;
err=eps+1;
b=1;
%while(err>eps)
while(b<50)
    for i=1:1:Nl;
    if(rem(i,2)==0)
     H1(i)=1000*(I0(i)/lambda(i));
    else
    if(i==1)
        else
        H1(i)=-1000*(I0(i)/lambda(i));
        end
    end
    end
    Huk=abs(sum(H1));
    Re=interp1(XY1(:,1),XY1(:,2),Huk,'spline');
```

```
    Im=interp1(XY2(:,1),XY2(:,2),Huk,'spline');
    for i=1:1:Nl;
    if(i<3)
    mi(i)=Re-j*Im;
    else
    mi(i)=1;
    end
    end
    for i=2:1:Nl;
    for g=2:1:Nl;
        X(i,g)=j*2*pi*f*mi0*(((pi/4)*(dl(i)^2)-Asc)+mi(1)*Asc)/(lambda(i)*lambda(g));
    end
    end
    for i=1:1:Nl;
    for g=1:1:Nl;
        if(i==g)
        Res(i,g)=R20(i)*(1+a(i)*(Tav(i)-20));
        else
            Res(i,g)=0;
        end
    end
    end
   for i=1:1:Nl;
    for g=1:1:Nl;
        if(rem(i,2)==0)
        SGN1=1;
        else
            SGN1=-1;
        end
        if(rem(g,2)==0)
        SGN2=1;
        else
        SGN2=-1;
        end
        Zp(i,g)=Res(i,g)+SGN1*SGN2*X(i,g)+Flux(i,g);
        Zp(g,i)=Res(g,i)+SGN1*SGN2*X(g,i)+Flux(g,i);
    end
   end
    Istaro=I0;
    I0=linsolve(Zp,deltaV');
    k12=Itop/abs(sum(I0));
    deltaV=deltaV*k12;
    err=max(abs(Istaro-I0));
  b=b+1;
end
Zep=(sum(deltaV)/Nl)/sum(I0);
Rac=real((sum(deltaV)/Nl)/sum(I0));
Bm=mi0*Huk*sqrt(2)*abs(mi(1));
Pm(bg)=12.5*f*7780*sqrt(dl(1))*10^-3*Asc*(Bm^1.82)*exp(-2.5*10^-3*80)*10^-6;
%Pm(bg)=160*f*Asc*sqrt(dl(1))*7.78*(Bm^1.82)*exp(-2.5*10^-3*75)*10^-6; %alternativa gornjem izrazu
kred(bg)=abs(Zep)/Rdcuk-1;%proračun uvećanja radi transformatorskog efekta
deltaR=Pm(bg)/((Itot*(1-Rdcuk/Rs))^2);
km(bg)=deltaR/Rdcuk;%proračun uvećanja uslijed magnetskih učinaka
kskin(bg)=Rvskin/Rdcuk-1;%proračun uvećanja uslijed skin efekta
Kacdc=km+kred+kskin+1; proračun ukupnog uvećanja istosmjernog otpora
Pred(bg)=Itot*Itot*kred(bg)*Rdcuk;
PM(bg)=Pred(bg)+Pm(bg);
bg=bg+1;
end
Racuk=Kacdc.*Rdcuk; %izračunati izmjenični otpor vodiča po jedinici duljine
```

PRILOG C

MATLAB KOD PRORAČUNA STACIONARNOG DTO-a METODA CIGRE 601 (ZA ACSR 240/40 mm^2)

```
clear all;
close all;
%ulazni podaci
D=21.9*10^-3;%vanjski promjer vodica
Rac=1.4875e-04;%izmjenični otpor pri 80 ºC
d=3.45*10^-3;%promjer žice vanjskog sloja
e=0.9;%koeficijent emisije
```

```
as=0.9;%koeficijent apsorpcije Sunčevog zračenja
beta=30;%kut inklinacije vodiča prema horizontalnoj ravnini
y=0;%nadmorska visina
Tc=80;%maksimalno dopuštena temperatura vodiča
v=0;%brzina vjetra
delta=90;%kut vjetra
Ta=-20;%temperatura okoline
S=0;%intenzitet Sunčeva zračenja
%proračun snage zagrijavanja uslijed Sunčevog zračenja po jedinici duljine
Ps=D*S*as;

Rf=d/(2*(D-d));%proračun hrapavosti
%određivanje konstanti kuta vjetra
if(delta>=0 && delta<=24)
   A1=0.42;
   B2=0.68;
   m1=1.08;
else
   A1=0.42;
   B2=0.58;
   m1=0.9;
end;
Tf=(Tc+Ta)/2;%definiranje temperature filma
ni=((17.239+4.635*10^-2*Tf-2.03*10^-5*(Tf^2))*10^-6)/((1.293-1.525*10^-4*y+6.379*10^-9*(y^2))/(1+0.00367*Tf));%definiranje
kinematske viskoznosti
Re=(v*D)/ni;%definiranje Reynoldsovog broja
Gr=(D^3*(Tc-Ta)*9.807)/((Tf+273)*(ni^2));%definiranje Grashofovog broja
Pr=0.715-2.5*10^-4*Tf;%definiranje Prandtlovog broj
c=Gr*Pr;
lambda=2.368*10^-2+(7.23*10^-5)*Tf-(2.763*10^-8)*Tf^2;%definiranje termalne vodljivosti
if(Rf<=0.05 && Re>2.65*10^3)
       B1=0.178;
       n=0.633;
     else if(Rf>0.05 && Re>(2.65*10^3))
     B1=0.048;
     n=0.8;
       else if (Re<=2.65*10^3)
       B1=0.641;
       n=0.471;
            end
         end
end
if(c<=10^2)
   A2=1.02;
   m2=0.148;
else if (c>100 && c<=10^4)
   A2=0.85;
   m2=0.188;
   else if (c>10^4 && c<=10^7)
         A2=0.48;
         m2=0.25;
       else if (c>10^7)
         A2=0.125;
         m2=0.333;
          end
       end
   end
end
Nu1=(B1*(Re^n))*(A1+B2*((sin(delta*(pi/180)))^m1));%Nusseltov broj prisilna konvekcija
Nu2=A2*(c^m2)*(1-1.76*10^-6*(beta^2.5));% Nusseltov broj prirodna konvekcija

if(imag(Nu1)~=0)%zaštita od kompleksnog broja
     Nu1=-10^99;
  end
    if(imag(Nu2)~=0)%zaštita od kompleksnog broja
      Nu2=-10^99;
    end
Nu=max([Nu1 Nu2]);
 %proračun snage odvođenja topline konvekcijom po jedinici duljine
Pkonv=pi*lambda*(Tc-Ta)*Nu;
%proračun snage odvođenja topline radijacijom po jedinici duljine
Prad=pi*D*e*5.6697*10^-8*((Tc+273)^4-(Ta+273)^4);
%proračun stacionarnog dopuštenog termičkog opterećenja
Ir=sqrt((Prad+Pkonv-Ps)/Rac);
```

PRILOG D

MATLAB KOD PRORAČUNA STACIONARNOG DTO-a METODA IEEE 738 (ZA ACSR 360/57 mm^2)

```
clear all;
close all;
D=26.6*10^-3;%vanjski promjer vodiča
Rac=1.0346e-04;%izmjenični otpor vodiča pri 80 ºC
e=0.9;%koeficijent emisije
as=0.9;%koeficijent apsorpcije Sunčevog zračenja
y=0;%nadmorska visina
Tc=80;%maksimalno dopuštena temperatura vodiča
v=0;%brzina vjetra
delta=90;%kut vjetra
Ta=-20;%temperatura okoline
S=0;%intenzitet Sunčeva zračenja
%definiranje ovisnosti prema IEEE 738 standardu
Kv=1.194-cos(delta*(pi/180))+0.194*cos(2*delta*(pi/180))+0.368*sin(2*delta*(pi/180));
Tf=(Tc+Ta)/2;
mif=(1.458*10^-6*((Tf+273)^1.5))/(Tf+383.4);
rof=(1.293-1.525*10^-4*y+6.379*10^-9*y^2)/(1+0.00367*Tf);
lambdaf=2.424*10^-2+7.477*10^-5*Tf-4.407*10^-9*(Tf^2);
Nu=(D*rof*v)/mif;
Pkonv1=Kv*(1.01+1.35*(Nu^0.52))*lambdaf*(Tc-Ta);
Pkonv2=Kv*0.754*(Nu^0.6)*lambdaf*(Tc-Ta);
Pkonv3=3.645*(D^0.75)*(rof^0.5)*((Tc-Ta)^1.25);
  if(imag(Pkonv1)~=0)%zaštita od kompleksnog broja
      Pkonv1=-10^99;
    end
    if(imag(Pkonv2)~=0)%zaštita od kompleksnog broja
      Pkonv2=-10^99;
    end
  if(imag(Pkonv3)~=0)%zaštita od kompleksnog broja
      Pkonv3=-10^99;
  end
%definiranje snage odvođenja topline konvekcijom po jedinici duljine
Pkonv=max([Pkonv1,Pkonv2,Pkonv3]);
%proračun snage zagrijavanja uslijed Sunčevog zračenja po jedinici duljine
Ps=as*S*D;
%definiranje snage odvođenja topline radijacijom po jedinici duljine
Prad=17.8*D*e*(((Tc+273)/100)^4-((Ta+273)/100)^4);
%definiranje stacionarnog dopuštenog termičkog opterećenja
Ir=sqrt((Prad+Pkonv-Ps)/Rac);
```

PRILOG E

MATLAB KOD PRORAČUNA STACIONARNOG DTO-a METODA CIGRE 601 (ZA ACSR 490/65 mm^2)

```
close all;
clear all;
load('matlab');%podaci ovisnosti AC otpora o struji
load('matlab1');%podaci ovisnosti AC otpora o struji
s=10:0.5:6500;%pomoćni vektor struje
D=30.6*10^-3;%vanjski promjer vodiča
d=3.4*10^-3;%promjer žice vanjskog sloja
e=0.9;%koeficijent emisije
as=0.9;%koeficijent apsorpcije Sunčevog zračenja
beta=0;%kut inklinacije vodiča prema horizontalnoj ravnini
y=0;%nadmorska visina
Tc=80;%maksimalno dopuštena temperatura vodiča
v=0;%brzina vjetra
delta=90;%kut vjetra
Ta=-20;%temperatura okoline
S=0;%intenzitet Sunčeva zračenja
I=1000;%početna vrijednost struje
eps=0.001; %dozvoljena pogreška
maxiter=200;%maksimalni broj iteracija
iter=1; %postavljanje brojača na 1
err=eps+1;%da bi se petlja jednom izvršila
```

```
%Newton - Raphsonova metoda
while(iter<maxiter && err>eps)
 if(I>10)
loc=find(I<s,1);
k1=Racuk(loc);
k2=Racuk(loc-1);
k3=s(loc);
k4=s(loc-1);
else
k1=7.50935449046298e-05;
k2=7.50935449046298e-05;
k3=10.5;
k4=10;
end
%proračun snage zagrijavanja uslijed Sunčevog zračenja po jedinici duljine
Ps=D*S*as;
Rf=d/(2*(D-d));%proračun hrapavosti
%određivanje konstanti kuta vjetra
if(delta>=0 && delta<=24)
   A1=0.42;
   B2=0.68;
   m1=1.08;
else
   A1=0.42;
   B2=0.58;
   m1=0.9;
end;
 Tf=(Tc+Ta)/2;%definiranje temperature filma
ni=((17.239+4.635*10^-2*Tf-2.03*10^-5*(Tf^2))*10^-6)/((1.293-1.525*10^-4*y+6.379*10^-9*(y^2))/(1+0.00367*Tf));%definiranje
kinematske viskoznosti
Re=(v*D)/ni;%definiranje Reynoldsovog broja
Gr=(D^3*(Tc-Ta)*9.807)/((Tf+273)*(ni^2));%definiranje Grashofovog broja
Pr=0.715-2.5*10^-4*Tf;%definiranje Prandtlovog broj
c=Gr*Pr;
lambda=2.368*10^-2+(7.23*10^-5)*Tf-(2.763*10^-8)*Tf^2;%definiranje termalne vodljivosti
if(Rf<=0.05 && Re>2.65*10^3)
       B1=0.178;
       n=0.633;
     else if(Rf>0.05 && Re>(2.65*10^3))
     B1=0.048;
     n=0.8;

       else if (Re<=2.65*10^3)
       B1=0.641;
       n=0.471;
            end
        end
end
if(c<=10^2)
   A2=1.02;
   m2=0.148;
else if (c>100 && c<=10^4)
   A2=0.85;
   m2=0.188;
   else if (c>10^4 && c<=10^7)
         A2=0.48;
         m2=0.25;
       else if (c>10^7)
         A2=0.125;
         m2=0.333;
          end
       end
   end
end
Nu1=(B1*(Re^n))*(A1+B2*((sin(delta*(pi/180)))^m1));%prisilna konvekcija
Nu2=A2*(c^m2)*(1-1.76*10^-6*(beta^2.5));%prirodno za inklinaciju < 80 stupnjeva
if(imag(Nu1)~=0)%zaštita od kompleksnog broja
     Nu1=-10^99;
  end
    if(imag(Nu2)~=0)%zaštita od kompleksnog broja
      Nu2=-10^99;
    end


if(Nu1>=Nu2)
```

```
f1=I^2*(k1 + ((I - k3)*(k1 - k2))/(k3 - k4)) + D*S*as + (56697*D*pi*e*((Ta + 273)^4 - (Tc + 273)^4))/1000000000000 + B1*pi*(Ta -
Tc)*(A1 + B2*sin((pi*delta)/180)^m1)*((2667399193058401*Ta)/73786976294838206464 +
(2667399193058401*Tc)/73786976294838206464 - (8350655098988051*(Ta/2 + Tc/2)^2)/3022314549036572936765 44 +
74/3125)*(D*v*((7711737803321719*y^2)/1208925819614629174706176 - (5626256942481413*y)/36893488147419103232 +
1293/1000))/(((367*Ta)/200000 + (367*Tc)/200000 + 1)*((927*Ta)/40000000000 + (927*Tc)/40000000000 -
(5991502475140861*(Ta/2 + Tc/2)^2)/29514790517935282585600000 0 + 17239/10000000000)))^n;
df1=2*I*(k1 + ((I - k3)*(k1 - k2))/(k3 - k4)) + (I^2*(k1 - k2))/(k3 - k4);
Istaro=I;
I=I-f1/df1;
err=abs(Istaro-I);
else
f2=I^2*(k1 + ((I - k3)*(k1 - k2))/(k3 - k4)) + D*S*as + (56697*D*pi*e*((Ta + 273)^4 - (Tc + 273)^4))/1000000000000 - A2*pi*(Ta -
Tc)*((8311365009850575*beta^(5/2))/47223664828696452136 96 - 1)*((2667399193058401*Ta)/73786976294838206464 +
(2667399193058401*Tc)/73786976294838206464 - (8350655098988051*(Ta/2 + Tc/2)^2)/3022314549036572936765 44 +
74/3125)*((9807*D^3*(Ta - Tc)*((7711737803321719*y^2)/1208925819614629174706176 -
(5626256942481413*y)/36893488147419103232 + 1293/1000)^2*(Ta/8000 + Tc/8000 - 143/200))/(1000*(Ta/2 + Tc/2 +
273)*((367*Ta)/200000 + (367*Tc)/200000 + 1)^2*((927*Ta)/40000000000 + (927*Tc)/40000000000 -
(5991502475140861*(Ta/2 + Tc/2)^2)/29514790517935282585600000 0 + 17239/10000000000)^2))^m2;
df2=2*I*(k1 + ((I - k3)*(k1 - k2))/(k3 - k4)) + (I^2*(k1 - k2))/(k3 - k4);
Istaro=I;
I=I-f2/df2;
err=abs(Istaro-I);
end
end
%vrijednost stacionarnog DTO-a
Ir=I;
```

PRILOG F

MATLAB KOD PRORAČUNA STACIONARNOG DTO-a METODA IEEE 738 (ZA ACSR 490/65 mm^2)

```
clear all;
close all;
load('matlab');%podaci ovisnosti AC otpora o struji
load('matlab1');%podaci ovisnosti AC otpora o struji
D=30.6*10^-3;%promjer vodica
y=0;%nadmorska visina
e=0.9;%koeficijent emisije
as=0.9;%koeficijent apsorpcije Sunčevog zračenja
Tc=80;%maksimalno dopuštena temperatura vodiča
v=0;%brzina vjetra
delta=90;%kut vjetra
Ta=-20;%temperatura okoline
S=0;%intenzitet Sunčeva zračenja
I=1000;%početna vrijednost struje
eps=0.001;%dozvoljena pogreška
maxiter=200;%maksimalni broj iteracija
iter=1;%postavljanje brojača na 1
err=eps+1;%da bi se petlja jednom izvršila

%Newton - Raphsonova metoda
while(iter<maxiter && err>eps)
%linearna aproksimacija izmjeničnog otpora
if(I>10)
loc=find(I<s,1);
k1=Racuk(loc);
k2=Racuk(loc-1);
k3=s(loc);
k4=s(loc-1);
else
k1=7.50935449046298e-05;
k2=7.50935449046298e-05;
k3=10.5;
k4=10;
end

Kv=1.194-cos(delta*(pi/180))+0.194*cos(2*delta*(pi/180))+0.368*sin(2*delta*(pi/180));
Tf=(Tc+Ta)/2;
mif=(1.458*10^-6*((Tf+273)^1.5))/(Tf+383.4);
rof=(1.293-1.525*10^-4*y+6.379*10^-9*y^2)/(1+0.00367*Tf);
lambdaf=2.424*10^-2+7.477*10^-5*Tf-4.407*10^-9*(Tf^2);
Nu=(D*rof*v)/mif;
```

```
Pkonv1=Kv*(1.01+1.35*(Nu^0.52))*lambdaf*(Tc-Ta);
Pkonv2=Kv*0.754*(Nu^0.6)*lambdaf*(Tc-Ta);
Pkonv3=3.645*(D^0.75)*(rof^0.5)*((Tc-Ta)^1.25);

  if(imag(Pkonv1)~=0)%zaštita od kompleksnog broja
      Pkonv1=-10^99;
    end
    if(imag(Pkonv2)~=0)%zaštita od kompleksnog broja
      Pkonv2=-10^99;
    end
  if(imag(Pkonv3)~=0)%zaštita od kompleksnog broja
      Pkonv3=-10^99;
  end
if(Pkonv1>Pkonv2 && Pkonv1>Pkonv3)

f1=I^2*(k1 + ((I - k3)*(k1 - k2))/(k3 - k4)) + D*S*as + (89*D*e*((Ta/100 + 273/100)^4 - (Tc/100 + 273/100)^4))/5 + (Ta -
Tc)*((27*((236118324143482260684 8*D*v*((7711737803321719*y^2)/12089258196146291747061 76 -
(5626256942481413*y)/36893488147419103232 + 1293/1000)*(Ta/2 + Tc/2 + 1917/5))/(3442605166011971*(Ta/2 + Tc/2 +
273)^(3/2)*((367*Ta)/200000 + (367*Tc)/200000 + 1)))^(13/25))/20 +
101/100)*((1379263054391263*Ta)/36893488147419103232 + (1379263054391263*Tc)/36893488147419103232 -
(5327736087041671*(Ta/2 + Tc/2)^2)/12089258196146291747061 76 + 303/12500)*((97*cos((pi*delta)/90))/500 -
cos((pi*delta)/180) + (46*sin((pi*delta)/90))/125 + 597/500);
df1=2*I*(k1 + ((I - k3)*(k1 - k2))/(k3 - k4)) + (I^2*(k1 - k2))/(k3 - k4);
Istaro=I;
I=I-f1/df1;
err=abs(Istaro-I);


else if(Pkonv2>=Pkonv1 && Pkonv2>=Pkonv3)
f2=I^2*(k1 + ((I - k3)*(k1 - k2))/(k3 - k4)) + D*S*as + (89*D*e*((Ta/100 + 273/100)^4 - (Tc/100 + 273/100)^4))/5 + (Ta -
Tc)*((1379263054391263*Ta)/36893488147419103232 + (1379263054391263*Tc)/36893488147419103232 -
(5327736087041671*(Ta/2 + Tc/2)^2)/12089258196146291747061 76 + 303/12500)*((36569*cos((pi*delta)/90))/250000 -
(377*cos((pi*delta)/180))/500 + (8671*sin((pi*delta)/90))/31250 +
225069/250000)*((236118324143482260684 8*D*v*((7711737803321719*y^2)/12089258196146291747061 76 -
(5626256942481413*y)/36893488147419103232 + 1293/1000)*(Ta/2 + Tc/2 + 1917/5))/(3442605166011971*(Ta/2 + Tc/2 +
273)^(3/2)*((367*Ta)/200000 + (367*Tc)/200000 + 1)))^(3/5);
df2=2*I*(k1 + ((I - k3)*(k1 - k2))/(k3 - k4)) + (I^2*(k1 - k2))/(k3 - k4);
Istaro=I;
I=I-f2/df2;
err=abs(Istaro-I);
   else
f3=I^2*(k1 + ((I - k3)*(k1 - k2))/(k3 - k4)) - (729*D^(3/4)*(Tc -
Ta)^(5/4)*(((7711737803321719*y^2)/12089258196146291747061 76 - (5626256942481413*y)/36893488147419103232 +
1293/1000)/((367*Ta)/200000 + (367*Tc)/200000 + 1))^(1/2))/200 + D*S*as + (89*D*e*((Ta/100 + 273/100)^4 - (Tc/100 +
273/100)^4))/5;
df3=2*I*(k1 + ((I - k3)*(k1 - k2))/(k3 - k4)) + (I^2*(k1 - k2))/(k3 - k4);
Istaro=I;
I=I-f3/df3;
err=abs(Istaro-I);

   end
end
end
%vrijednost stacionarnog DTO-a
Ir=I;
```

PRILOG G

MATLAB KOD PRORAČUNA STACIONARNOG DTO-a METODA IEEE 738 UZ $T_j=T_{max}$ (ZA ACSR 360/57 mm^2)

```
clear all;
close all;
clc
D=26.6*10^-3;%vanjski promjer vodica
dc=9.8*10^-3;%promjer čelične jezgre
R75=1.0178e-04;%izmjenični otpor pri 75
R25=8.4963e-05;%izmjenični otpor pri 25
e=0.9;%koeficijent emisije
as=0.9;%koeficijent apsorpcije Sunčevog zračenja
beta=0;%kut inklinacije vodiča prema horizontalnoj ravnini
y=2000;%nadmorska visina
l=1;%efektivna termalna toplinska vodljivost
```

```
Tj=80;%ograničenje temperature u jezgri na Tmax
I=1000;%početni uvjet struje
eps=0.001; %dozvoljena pogreška
maxiter=200;%maksimalni broj iteracija
iter=1; %postavljanje brojača na 1
err=eps+1;%da bi se petlja jednom izvršila
v=0;%brzina vjetra
delta=90;%kut vjetra
Ta=-20;%temperatura okoline
S=0;%intenzitet Sunčeva zračenja
 %Newton - Raphsonova metoda
while(iter<maxiter && err>eps)
Ts=((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*l) + Tj)/(((R25/100 -
R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*l) + 1);
Kv=1.194-cos(delta*(pi/180))+0.194*cos(2*delta*(pi/180))+0.368*sin(2*delta*(pi/180));
Tf=(Ts+Ta)/2;
mif=(1.458*10^-6*((Tf+273)^1.5))/(Tf+383.4);
rof=(1.293-1.525*10^-4*y+6.379*10^-9*y^2)/(1+0.00367*Tf);
lambdaf=2.424*10^-2+7.477*10^-5*Tf-4.407*10^-9*(Tf^2);
Nu=(D*rof*v)/mif;
Pkonv1=Kv*(1.01+1.35*(Nu^0.52))*lambdaf*(Ts-Ta);
Pkonv2=Kv*0.754*(Nu^0.6)*lambdaf*(Ts-Ta);
Pkonv3=3.645*(D^0.75)*(rof^0.5)*((Ts-Ta)^1.25);

if(Pkonv1>Pkonv2 && Pkonv1>Pkonv3)
f1=I^2*(R25 - (R25/50 - R75/50)*(Tj/2 + ((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*l)
+ Tj)/(2*(((R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*l) + 1)) - 25)) + (89*D*e*((Ta/100 + 273/100)^4 -
(((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*l) + Tj)/(100*(((R25/100 -
R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*l) + 1)) + 273/100)^4))/5 + D*S*as +
((27*((2361183241434822606848*D*v*(Ta/2 + ((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 -
R75/50))*I^2)/(2*pi*l) + Tj)/(2*(((R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*l) + 1)) +
1917/5)*((7711737803321719*y^2)/120892581961462917470617 6 - (5626256942481413*y)/36893488147419103232 +
1293/1000))/(3442605166011971*(Ta/2 + (Tj + (I^2*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 -
R75/50))))/(2*pi*l))/(((I^2*(R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(pi*l) + 2) + 273)^(3/2)*((367*Ta)/200000 +
(367*((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*l) + Tj))/(200000*(((R25/100 -
R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*l) + 1)) + 1)))^(13/25))/20 + 101/100)*(Ta - ((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 -
dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*l) + Tj)/(((R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) -
1/2)*I^2)/(2*pi*l) + 1))*((97*cos((pi*delta)/90))/500 - cos((pi*delta)/180) + (46*sin((pi*delta)/90))/125 +
597/500)*((1379263054391263*Ta)/36893488147419103232 + (1379263054391263*((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) -
1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*l) + Tj))/(36893488147419103232*(((R25/100 -
R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*l) + 1)) - (5327736087041671*(Ta/2 + ((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) -
1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*l) + Tj)/(2*(((R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) -
1/2)*I^2)/(2*pi*l) + 1)))^2)/120892581961462917470617 6 + 303/12500);
df1=2*I*(R25 - (R25/50 - R75/50)*(Tj/2 + ((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*l)
+ Tj)/(2*(((R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*l) + 1)) - 25)) - I^2*(R25/50 -
R75/50)*((I*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50)))/(2*pi*I*(((R25/100 -
R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*l) + 1)) - (I*(R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) -
1/2)*((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*l) + Tj))/(2*pi*I*((I^2*(R25/100 -
R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(2*pi*l) + 1)^2)) - ((27*((2361183241434822606848*D*v*(Ta/2 +
((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*l) + Tj)/(2*(((R25/100 -
R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*l) + 1)) +
1917/5)*((7711737803321719*y^2)/120892581961462917470617 6 - (5626256942481413*y)/36893488147419103232 +
1293/1000))/(3442605166011971*(Ta/2 + (Tj + (I^2*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 -
R75/50))))/(2*pi*I))/(((I^2*(R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(pi*I) + 2) + 273)^(3/2)*((367*Ta)/200000 +
(367*((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*I) + Tj))/(200000*(((R25/100 -
R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*I) + 1)) + 1)))^(13/25))/20 + 101/100)*((I*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) -
1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50)))/(pi*I*(((R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*I) + 1)) -
(I*(R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 -
R75/50))*I^2)/(2*pi*I) + Tj))/(pi*I*((I^2*(R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(2*pi*I) +
1)^2))*((97*cos((pi*delta)/90))/500 - cos((pi*delta)/180) + (46*sin((pi*delta)/90))/125 +
597/500)*((1379263054391263*Ta)/36893488147419103232 + (1379263054391263*((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) -
1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*I) + Tj))/(36893488147419103232*(((R25/100 -
R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*I) + 1)) - (5327736087041671*(Ta/2 + ((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) -
1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*I) + Tj)/(2*(((R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) -
1/2)*I^2)/(2*pi*I) + 1)))^2)/120892581961462917470617 6 + 303/12500) - ((27*((2361183241434822606848*D*v*(Ta/2 +
((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*I) + Tj)/(2*(((R25/100 -
R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*I) + 1)) +
1917/5)*((7711737803321719*y^2)/120892581961462917470617 6 - (5626256942481413*y)/36893488147419103232 +
1293/1000))/(3442605166011971*(Ta/2 + (Tj + (I^2*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 -
R75/50))))/(2*pi*I))/(((I^2*(R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(pi*I) + 2) + 273)^(3/2)*((367*Ta)/200000 +
(367*((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*I) + Tj))/(200000*(((R25/100 -
R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*I) + 1)) + 1)))^(13/25))/20 + 101/100)*(Ta - ((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 -
dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*I) + Tj)/(((R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) -
1/2)*I^2)/(2*pi*I) + 1))*((5327736087041671*(Ta/2 + ((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 -
R75/50))*I^2)/(2*pi*I) + Tj)/(2*(((R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*I) +
```

```
1)))*((I*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))))/(2*pi*I*(((R25/100 -
R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*I) + 1)) - (I*(R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) -
1/2)*((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*I) + Tj))/(2*pi*I*((I^2*(R25/100 -
R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(2*pi*I) + 1)^2)))/60446290980731458735308 8 -
(1379263054391263*I*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 -
R75/50))))/(368934881474191032 32*pi*I*(((R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*I) + 1)) +
(1379263054391263*I*(R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 -
(Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*I) + Tj))/(368934881474191032 32*pi*I*((I^2*(R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2
- dc^2) - 1/2))/(2*pi*I) + 1)^2))*((97*cos((pi*delta)/90))/500 - cos((pi*delta)/180) + (46*sin((pi*delta)/90))/125 + 597/500) -
(356*D*e*(((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*I) + Tj)/(100*(((R25/100 -
R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*I) + 1)) + 273/100)^3*((I*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 -
(Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50)))/(100*pi*I*(((R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*I) + 1)) -
(I*(R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 -
R75/50))*I^2)/(2*pi*I) + Tj))/(100*pi*I*((I^2*(R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(2*pi*I) + 1)^2)))/5 -
(351*(Ta - ((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*I) + Tj)/(((R25/100 -
R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*I) + 1))*((3541774862152233910272*D*v*((I*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 -
dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50)))/(2*pi*I*(((R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*I)
+ 1)) - (I*(R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 -
25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*I) + Tj))/(2*pi*I*((I^2*(R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(2*pi*I) +
1)^2))*(Ta/2 + ((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*I) + Tj)/(2*(((R25/100 -
R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*I) + 1)) +
1917/5)*((7711737803321719*y^2)/120892581961462917470617 6 - (5626256942481413*y)/36893488147419103232 +
1293/1000))/(3442605166011971*(Ta/2 + (Tj + (I^2*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 -
R75/50))))/(2*pi*I))/(((I^2*(R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(pi*I) + 2) + 273)^(5/2)*((367*Ta)/200000 +
(367*((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*I) + Tj))/(200000*(((R25/100 -
R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*I) + 1)) + 1)) -
(2361183241434822606848*D*v*((I*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 -
R75/50))))/(2*pi*I*(((R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*I) + 1)) - (I*(R25/100 -
R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 -
R75/50))*I^2)/(2*pi*I) + Tj))/(2*pi*I*((I^2*(R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(2*pi*I) +
1)^2))*((7711737803321719*y^2)/120892581961462917470617 6 - (5626256942481413*y)/36893488147419103232 +
1293/1000))/(3442605166011971*(Ta/2 + (Tj + (I^2*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 -
R75/50))))/(2*pi*I))/(((I^2*(R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(pi*I) + 2) + 273)^(3/2)*((367*Ta)/200000 +
(367*((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*I) + Tj))/(200000*(((R25/100 -
R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*I) + 1)) + 1)) +
(2361183241434822606848*D*v*((367*I*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 -
R75/50))))/(200000*pi*I*(((R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*I) + 1)) - (367*I*(R25/100 -
R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 -
R75/50))*I^2)/(2*pi*I) + Tj))/(200000*pi*I*((I^2*(R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(2*pi*I) + 1)^2))*(Ta/2 +
((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*I) + Tj)/(2*(((R25/100 -
R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*I) + 1)) +
1917/5)*((7711737803321719*y^2)/120892581961462917470617 6 - (5626256942481413*y)/36893488147419103232 +
1293/1000))/(3442605166011971*(Ta/2 + (Tj + (I^2*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 -
R75/50))))/(2*pi*I))/(((I^2*(R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(pi*I) + 2) + 273)^(3/2)*((367*Ta)/200000 +
(367*Tj + (367*I^2*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50)))/(2*pi*I))/((100000*I^2*(R25/100 -
R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(pi*I) + 200000) + 1)^2))*((97*cos((pi*delta)/90))/500 - cos((pi*delta)/180) +
(46*sin((pi*delta)/90))/125 + 597/500)*((1379263054391263*Ta)/36893488147419103232 +
(1379263054391263*((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*I) +
Tj))/(368934881474191032 32*(((R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*I) + 1)) -
(5327736087041671*(Ta/2 + ((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*I) +
Tj)/(2*(((R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*I) + 1)))^2)/120892581961462917470617 6 +
303/12500))/(500*((2361183241434822606848*D*v*(Ta/2 + (Tj + (I^2*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 -
25)*(R25/50 - R75/50))))/(2*pi*I))/((I^2*(R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(pi*I) + 2) +
1917/5)*((7711737803321719*y^2)/120892581961462917470617 6 - (5626256942481413*y)/36893488147419103232 +
1293/1000))/(3442605166011971*(Ta/2 + (Tj + (I^2*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 -
R75/50))))/(2*pi*I*pi))/(((I^2*(R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(I*pi) + 2) + 273)^(3/2)*((367*Ta)/200000 +
(367*Tj + (367*I^2*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50)))/(2*pi*I))/((100000*I^2*(R25/100 -
R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(pi*I) + 200000) + 1)))^(12/25));
Istaro=I;
I=I-f1/df1;
err=abs(Istaro-I);
else if(Pkonv2>=Pkonv1 && Pkonv2>=Pkonv3)
f2=I^2*(R25 - (R25/50 - R75/50)*(Tj/2 + ((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*I)
+ Tj)/(2*(((R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*I) + 1)) - 25)) + (89*D*e*((Ta/100 + 273/100)^4 -
(((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*I) + Tj)/(100*(((R25/100 -
R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*I) + 1)) + 273/100)^4))/5 + D*S*as + (Ta - ((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 -
dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*I) + Tj)/(((R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) -
1/2)*I^2)/(2*pi*I) + 1))*((36569*cos((pi*delta)/90))/250000 - (377*cos((pi*delta)/180))/500 + (8671*sin((pi*delta)/90))/31250 +
225069/250000)*((1379263054391263*Ta)/36893488147419103232 + (1379263054391263*((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) -
1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*I) + Tj))/(368934881474191032*(((R25/100 -
R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*I) + 1)) - (5327736087041671*(Ta/2 + ((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) -
1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*I) + Tj)/(2*(((R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) -
1/2)*I^2)/(2*pi*I) + 1)))^2)/120892581961462917470617 6 + 303/12500)*((2361183241434822606848*D*v*(Ta/2 +
((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*I) + Tj)/(2*(((R25/100 -
R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*I) + 1)) +
```

1917/5)*((7711737803321719*y^2)/120892581961462917470617 6 - (5626256942481413*y)/36893488147419103232 + 1293/1000))/(3442605166011971*(Ta/2 + (Tj + (I^2*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50)))/(2*pi*l))/(((I^2*(R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(pi*l) + 2) + 273)^(3/2)*((367*Ta)/200000 + (367*((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*l) + Tj))/(200000*(((R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*l) + 1)) + 1)))^(3/5);
df2=2*I*(R25 - (R25/50 - R75/50)*(Tj/2 + ((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*l) + Tj)/(2*(((R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*l) + 1)) - 25)) - I^2*(R25/50 - R75/50)*((I*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50)))/(2*pi*I*(((R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*l) + 1)) - (I*(R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*l) + Tj))/(2*pi*I*((I^2*(R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(2*pi*l) + 1)^2)) - (((I*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50)))/(pi*I*(((R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*l) + 1)) - (I*(R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*l) + Tj))/(pi*I*((I^2*(R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(2*pi*l) + 1)^2))*((36569*cos((pi*delta)/90))/250000 - (377*cos((pi*delta)/180))/500 + (8671*sin((pi*delta)/90))/31250 + 225069/250000)*((1379263054391263*Ta)/36893488147419103232 + (1379263054391263*((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*l) + Tj))/(36893488147419103232*(((R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*l) + 1)) - (5327736087041671*(Ta/2 + ((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*l) + Tj)/(2*(((R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*l) + 1)))^2)/120892581961462917470617 6 + 303/12500)*((2361183241434822606848*D*v*(Ta/2 + ((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*l) + Tj)/(2*(((R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*l) + 1)) + 1917/5)*((7711737803321719*y^2)/120892581961462917470617 6 - (5626256942481413*y)/36893488147419103232 + 1293/1000))/(3442605166011971*(Ta/2 + (Tj + (I^2*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50)))/(2*pi*l))/(((I^2*(R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(pi*l) + 2) + 273)^(3/2)*((367*Ta)/200000 + (367*((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*l) + Tj))/(200000*(((R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*l) + 1)) + 1)))^(3/5) - (Ta - ((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*l) + Tj)/(((R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*l) + 1))*((5327736087041671*(Ta/2 + ((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*l) + Tj)/(2*(((R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*l) + 1)))*((I*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50)))/(2*pi*I*(((R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*l) + 1)) - (I*(R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*l) + Tj))/(2*pi*I*((I^2*(R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(2*pi*l) + 1)^2)))/(6044629098073145873530 88 - (1379263054391263*I*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50)))/(36893488147419103232*pi*I*(((R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*l) + 1)) + (1379263054391263*I*(R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*l) + Tj))/(36893488147419103232*pi*I*((I^2*(R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(2*pi*l) + 1)^2))*((36569*cos((pi*delta)/90))/250000 - (377*cos((pi*delta)/180))/500 + (8671*sin((pi*delta)/90))/31250 + 225069/250000)*((2361183241434822606848*D*v*(Ta/2 + ((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*l) + Tj)/(2*(((R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*l) + 1)) + 1917/5)*((7711737803321719*y^2)/120892581961462917470617 6 - (5626256942481413*y)/36893488147419103232 + 1293/1000))/(3442605166011971*(Ta/2 + (Tj + (I^2*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50)))/(2*pi*l))/(((I^2*(R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(pi*l) + 2) + 273)^(3/2)*((367*Ta)/200000 + (367*((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*l) + Tj))/(200000*(((R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*l) + 1)) + 1)))^(3/5) - (356*D*e*(((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*l) + Tj)/(100*(((R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*l) + 1)) + 273/100)^3*((I*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50)))/(100*pi*I*(((R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*l) + 1)) - (I*(R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*l) + Tj))/(100*pi*I*((I^2*(R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(2*pi*l) + 1)^2))))/5 - (3*(Ta - ((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*l) + Tj)/(((R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*l) + 1))*((3541774862152233910272*D*v*((I*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50)))/(2*pi*I*(((R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*l) + 1)) - (I*(R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*l) + Tj))/(2*pi*I*((I^2*(R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(2*pi*l) + 1)^2))*(Ta/2 + ((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*l) + Tj)/(2*(((R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*l) + 1)) + 1917/5)*((7711737803321719*y^2)/120892581961462917470617 6 - (5626256942481413*y)/36893488147419103232 + 1293/1000))/(3442605166011971*(Ta/2 + (Tj + (I^2*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50)))/(2*pi*l))/(((I^2*(R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(pi*l) + 2) + 273)^(5/2)*((367*Ta)/200000 + (367*((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*l) + Tj))/(200000*(((R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*l) + 1)) + 1)) - (2361183241434822606848*D*v*((I*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50)))/(2*pi*I*(((R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*l) + 1)) - (I*(R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*l) + Tj))/(2*pi*I*((I^2*(R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(2*pi*l) + 1)^2))*((7711737803321719*y^2)/120892581961462917470617 6 - (5626256942481413*y)/36893488147419103232 + 1293/1000))/(3442605166011971*(Ta/2 + (Tj + (I^2*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50)))/(2*pi*l))/(((I^2*(R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(pi*l) + 2) + 273)^(3/2)*((367*Ta)/200000 + (367*((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*l) + Tj))/(200000*(((R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*l) + 1)) + 1)) + (2361183241434822606848*D*v*((367*I*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50)))/(200000*pi*I*(((R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*l) + 1)) - (367*I*(R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*l) + Tj))/(200000*pi*I*((I^2*(R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(2*pi*l) + 1)^2))*(Ta/2 +

```
((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*l) + Tj)/(2*(((R25/100 -
R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*l) + 1)) +
1917/5)*((7711737803321719*y^2)/120892581961462917470617 6 - (5626256942481413*y)/36893488147419103232 +
1293/1000))/(3442605166011971*(Ta/2 + (Tj + (I^2*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 -
R75/50))))/(2*pi*l))/(((I^2*(R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(pi*l) + 2) + 273)^(3/2)*((367*Ta)/200000 +
(367*Tj + (367*I^2*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))))/(2*pi*l))/((100000*I^2*(R25/100 -
R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(pi*l) + 200000) + 1)^2))*((36569*cos((pi*delta)/90))/250000 -
(377*cos((pi*delta)/180))/500 + (8671*sin((pi*delta)/90))/31250 +
225069/250000)*((1379263054391263*Ta)/36893488147419103232 + (1379263054391263*((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) -
1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*l) + Tj))/(36893488147419103232*(((R25/100 -
R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*l) + 1)) - (5327736087041671*(Ta/2 + ((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) -
1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*l) + Tj)/(2*(((R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) -
1/2)*I^2)/(2*pi*l) + 1)))^2)/(120892581961462917470617 6 + 303/12500))/(5*((2361183241434822606848*D*v*(Ta/2 + (Tj +
(I^2*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))))/(2*pi*l))/(((I^2*(R25/100 -
R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(pi*l) + 2) + 1917/5)*((7711737803321719*y^2)/120892581961462917470617 6 -
(5626256942481413*y)/36893488147419103232 + 1293/1000))/(3442605166011971*(Ta/2 + (Tj + (I^2*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 -
dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))))/(2*I*pi))/(((I^2*(R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(I*pi)
+ 2) + 273)^(3/2)*((367*Ta)/200000 + (367*Tj + (367*I^2*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 -
R75/50))))/(2*pi*l))/((100000*I^2*(R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(pi*l) + 200000) + 1)))^(2/5));
Istaro=I;
I=I-f2/df2;
err=abs(Istaro-I);
   else
f3=I^2*(R25 - (R25/50 - R75/50)*(Tj/2 + ((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*I)
+ Tj)/(2*(((R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*I) + 1)) - 25)) + (89*D*e*((Ta/100 + 273/100)^4 -
(((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*I) + Tj)/(100*(((R25/100 -
R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*I) + 1)) + 273/100)^4))/5 + D*S*as -
(729*D^(3/4)*(((7711737803321719*y^2)/120892581961462917470617 6 - (5626256942481413*y)/36893488147419103232 +
1293/1000)/((367*Ta)/200000 + (367*((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*I) +
Tj))/(200000*(((R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*I) + 1)) + 1))^(1/2)*((((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 -
dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*I) + Tj)/(((R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) -
1/2)*I^2)/(2*pi*I) + 1) - Ta)^(5/4))/200;
df3=2*I*(R25 - (R25/50 - R75/50)*(Tj/2 + ((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*I)
+ Tj)/(2*(((R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*I) + 1)) - 25)) - I^2*(R25/50 -
R75/50)*((I*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50)))/(2*pi*I*(((R25/100 -
R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*I) + 1)) - (I*(R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 -
1/2)*((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*I) + Tj))/(2*pi*I*((I^2*(R25/100 -
R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(2*pi*I) + 1)^2)) -
(729*D^(3/4)*(((7711737803321719*y^2)/120892581961462917470617 6 - (5626256942481413*y)/36893488147419103232 +
1293/1000)/((367*Ta)/200000 + (367*((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*I) +
Tj))/(200000*(((R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*I) + 1)) + 1))^(1/2)*((I*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 -
dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50)))/(pi*I*(((R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*I) +
1)) - (I*(R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 -
25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*I) + Tj))/(pi*I*((I^2*(R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(2*pi*I) +
1)^2))*(((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*I) + Tj)/(((R25/100 -
R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*I) + 1) - Ta)^(1/4))/160 - (356*D*e*(((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) -
1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*I) + Tj)/(100*(((R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) -
1/2)*I^2)/(2*pi*I) + 1)) + 273/100)^3*((I*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 -
R75/50)))/(100*pi*I*(((R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*I) + 1)) - (I*(R25/100 -
R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 -
R75/50))*I^2)/(2*pi*I) + Tj))/(100*pi*I*((I^2*(R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(2*pi*I) + 1)^2)))/5 +
(729*D^(3/4)*((367*I*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50)))/(200000*pi*I*(((R25/100 -
R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*I) + 1)) - (367*I*(R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) -
1/2)*((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))*I^2)/(2*pi*I) + Tj))/(200000*pi*I*((I^2*(R25/100 -
R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(2*pi*I) + 1)^2))*(((((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50
- R75/50))*I^2)/(2*pi*I) + Tj)/(((R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(2*pi*I) + 1) -
Ta)^(5/4)*((7711737803321719*y^2)/120892581961462917470617 6 - (5626256942481413*y)/36893488147419103232 +
1293/1000))/(400*(((7711737803321719*y^2)/120892581961462917470617 6 -
(5626256942481413*y)/36893488147419103232 + 1293/1000)/((367*Ta)/200000 + (367*Tj + (367*I^2*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 -
dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 - 25)*(R25/50 - R75/50))))/(2*pi*I))/(((100000*I^2*(R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) -
1/2))/(pi*I) + 200000) + 1))^(1/2)*((367*Ta)/200000 + (367*Tj + (367*I^2*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*(R25 - (Tj/2 -
25)*(R25/50 - R75/50))))/(2*pi*I))/((100000*I^2*(R25/100 - R75/100)*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(pi*I) + 200000) +
1)^2);
Istaro=I;
I=I-f3/df3;
err=abs(Istaro-I);
   end
end

end
%vrijednost stacionarnog DTO-a
Ir=I;
```

PRILOG H

MATLAB KOD PRORAČUNA DINAMIČKOG DTO-a METODA RUNGE-KUTTA ČETVRTOG REDA CIGRE 601 (ZA ACSR 240/40 mm^2)

```
clear all;
close all;
clc;
R2=1.4633e-04; %izmjenični otpor vodiča pri 25C
R1=1.2216e-04; %izmjenični otpor vodiča pri 75C
e=0.9;%koeficijent emisije
as=0.9;%koeficijent apsorpcije Sunčevog zračenja
beta=0;%kut inklinacije vodiča prema horizontalnoj ravnini
y=0;%nadmorska visina
d=3.45*10^-3;%promjer žice vanjskog sloja
D=21.9*10^-3;%promjer vodiča
Aa=243.1*10^-6;%presjek aluminijskog dijela alučeličnog vodiča
As=39.5*10^-6;%presjek čeličnog dijela alučeličnog vodiča
roa=2703;%gustoća aluminija
ros=7780;%gustoća čelika
ca0=897;%specifični toplinski kapacitet aluminijskog dijela alučeličnog vodiča pri 20°C
cs0=481;%specifični toplinski kapacitet čeličnog dijela alučeličnog vodiča pri 20°C
betaa=3.8*10^-4;%temperaturni koeficijent promjene specifičnog toplinskog kapaciteta aluminija
betas=1*10^-4;%temperaturni koeficijent promjene specifičnog toplinskog kapaciteta čelika
Rf=d/(2*(D-d));%proračun hrapavosti
dt=90;%korak vremena
s=5;%koeficijent radi proračuna greške
gg=1800;%dužina vremenskog intervala tf
Tcin=0;%početna temperatura vodiča
v=0;%brzina vjetra
delta=90;%kut vjetra
Ta=-20;%temperatura okoline
S=0;%intenzitet Sunčeva zračenja
I=1000;%početna vrijednost struje
err1=2;%da pi se petlja izvršila
%metoda Runge-Kutta četvrtog reda
while(err1>0.1)
   Tc=Tcin;
for t1=dt:dt:gg;
if(delta>=0 && delta<=24)
   A1=0.42;
   B2=0.68;
   m1=1.08;
else
   A1=0.42;
   B2=0.58;
   m1=0.9;
end;

Tf=(Tc+Ta)/2;%definiranje temperature filma
ni=((17.239+4.635*10^-2*Tf-2.03*10^-5*(Tf^2))*10^-6)/((1.293-1.525*10^-4*y+6.379*10^-9*(y^2))/(1+0.00367*Tf));%definiranje
kinematske viskoznosti
Re=(v*D)/ni;%definiranje Reynoldsovog broja
Gr=(D^3*(Tc-Ta)*9.807)/((Tf+273)*(ni^2));%definiranje Grashofovog broja
Pr=0.715-2.5*10^-4*Tf;%definiranje Prandtlovog broj
c=Gr*Pr;
lambda=2.368*10^-2+(7.23*10^-5)*Tf-(2.763*10^-8)*Tf^2;%definiranje termalne vodljivosti
if(Rf<=0.05 && Re>2.65*10^3)
       B1=0.178;
       n=0.633;
     else if(Rf>0.05 && Re>(2.65*10^3))
     B1=0.048;
     n=0.8;

       else if (Re<=2.65*10^3)
       B1=0.641;
       n=0.471;
            end
         end
end
if(c<=10^2)
   A2=1.02;
   m2=0.148;
else if (c>100 && c<=10^4)
```

```
   A2=0.85;
   m2=0.188;
   else if (c>10^4 && c<=10^7)
        A2=0.48;
        m2=0.25;
      else if (c>10^7)
        A2=0.125;
        m2=0.333;
         end
      end
   end
end

Nu1=(B1*(Re^n))*(A1+B2*((sin(delta*(pi/180)))^m1));%prisilno za kut vjetra <=90 stupnjeva
Nu2=A2*(c^m2)*(1-1.76*10^-6*(beta^2.5));%prirodno za inklinaciju < 80 stupnjeva

if(imag(Nu1)~=0)%zaštita od kompleksnog broja
     Nu1=-10^99;
  end
    if(imag(Nu2)~=0)%zaštita od kompleksnog broja
      Nu2=-10^99;
    end
if(Nu1>=Nu2)
k1=dt*(I^2*(R1 - (Tc - 25)*(R1/50 - R2/50)) + D*S*as + (56697*D*pi*e*((Ta + 273)^4 - (Tc + 273)^4))/1000000000000 +
B1*pi*(Ta - Tc)*(A1 + B2*sin((pi*delta)/180)^m1)*((2667399193058401*Ta)/73786976294838206464 +
(2667399193058401*Tc)/73786976294838206464 - (8350655098988051*(Ta/2 + Tc/2)^2)/302231454903657293676544 +
74/3125)*((D*v*((7711737803321719*y^2)/120892581961462917470617 6 - (5626256942481413*y)/36893488147419103232 +
1293/1000))/(((367*Ta)/200000 + (367*Tc)/200000 + 1)*((927*Ta)/40000000000 + (927*Tc)/40000000000 -
(5991502475140861*(Ta/2 + Tc/2)^2)/2951479051793528258560000 00 + 17239/10000000000)))^n)/(Aa*ca0*roa*(betaa*(Tc -
20) + 1) + As*cs0*ros*(betas*(Tc - 20) + 1));
k2=dt*((I^2*(R1 - ((Tc+k1/2) - 25)*(R1/50 - R2/50)) + D*S*as + (56697*D*pi*e*((Ta + 273)^4 - ((Tc+k1/2) +
273)^4))/1000000000000 + B1*pi*(Ta - (Tc+k1/2))*(A1 +
B2*sin((pi*delta)/180)^m1)*((2667399193058401*Ta)/73786976294838206464 +
(2667399193058401*(Tc+k1/2))/73786976294838206464 - (8350655098988051*(Ta/2 +
(Tc+k1/2)/2)^2)/302231454903657293676544 + 74/3125)*((D*v*((7711737803321719*y^2)/120892581961462917470617 6 -
(5626256942481413*y)/36893488147419103232 + 1293/1000))/(((367*Ta)/200000 + (367*(Tc+k1/2))/200000 +
1)*((927*Ta)/40000000000 + (927*(Tc+k1/2))/40000000000 - (5991502475140861*(Ta/2 +
(Tc+k1/2)/2)^2)/2951479051793528258560000 00 + 17239/10000000000)))^n)/(Aa*ca0*roa*(betaa*((Tc+k1/2) - 20) + 1) +
As*cs0*ros*(betas*((Tc+k1/2) - 20) + 1)));
k3=dt*((I^2*(R1 - ((Tc+k2/2) - 25)*(R1/50 - R2/50)) + D*S*as + (56697*D*pi*e*((Ta + 273)^4 - ((Tc+k2/2) +
273)^4))/1000000000000 + B1*pi*(Ta - (Tc+k2/2))*(A1 +
B2*sin((pi*delta)/180)^m1)*((2667399193058401*Ta)/73786976294838206464 +
(2667399193058401*(Tc+k2/2))/73786976294838206464 - (8350655098988051*(Ta/2 +
(Tc+k2/2)/2)^2)/302231454903657293676544 + 74/3125)*((D*v*((7711737803321719*y^2)/120892581961462917470617 6 -
(5626256942481413*y)/36893488147419103232 + 1293/1000))/(((367*Ta)/200000 + (367*(Tc+k2/2))/200000 +
1)*((927*Ta)/40000000000 + (927*(Tc+k2/2))/40000000000 - (5991502475140861*(Ta/2 +
(Tc+k2/2)/2)^2)/2951479051793528258560000 00 + 17239/10000000000)))^n)/(Aa*ca0*roa*(betaa*((Tc+k2/2) - 20) + 1) +
As*cs0*ros*(betas*((Tc+k2/2) - 20) + 1)));
k4=dt*((I^2*(R1 - ((Tc+k3) - 25)*(R1/50 - R2/50)) + D*S*as + (56697*D*pi*e*((Ta + 273)^4 - ((Tc+k3) + 273)^4))/1000000000000
+ B1*pi*(Ta - (Tc+k3))*(A1 + B2*sin((pi*delta)/180)^m1)*((2667399193058401*Ta)/73786976294838206464 +
(2667399193058401*(Tc+k3))/73786976294838206464 - (8350655098988051*(Ta/2 +
(Tc+k3)/2)^2)/302231454903657293676544 + 74/3125)*((D*v*((7711737803321719*y^2)/120892581961462917470617 6 -
(5626256942481413*y)/36893488147419103232 + 1293/1000))/(((367*Ta)/200000 + (367*(Tc+k3))/200000 +
1)*((927*Ta)/40000000000 + (927*(Tc+k3))/40000000000 - (5991502475140861*(Ta/2 +
(Tc+k3)/2)^2)/2951479051793528258560000 00 + 17239/10000000000)))^n)/(Aa*ca0*roa*(betaa*((Tc+k3) - 20) + 1) +
As*cs0*ros*(betas*((Tc+k3) - 20) + 1)));
Tc=Tc+(1/6)*(k1+2*k2+2*k3+k4);
%Tc=Tc+k1;
else
k1=dt*(I^2*(R1 - (Tc - 25)*(R1/50 - R2/50)) + D*S*as + (56697*D*pi*e*((Ta + 273)^4 - (Tc + 273)^4))/1000000000000 -
A2*pi*(Ta - Tc)*((8311365009850575*beta^(5/2))/47223666482869645213696 -
1)*((2667399193058401*Ta)/73786976294838206464 + (2667399193058401*Tc)/73786976294838206464 -
(8350655098988051*(Ta/2 + Tc/2)^2)/302231454903657293676544 + 74/3125)*((9807*D^3*(Ta -
Tc)*((7711737803321719*y^2)/120892581961462917470617 6 - (5626256942481413*y)/36893488147419103232 +
1293/1000)^2*(Ta/8000 + Tc/8000 - 143/200))/(1000*(Ta/2 + Tc/2 + 273)*((367*Ta)/200000 + (367*Tc)/200000 +
1)^2*((927*Ta)/40000000000 + (927*Tc)/40000000000 - (5991502475140861*(Ta/2 +
Tc/2)^2)/2951479051793528258560000 00 + 17239/10000000000)^2))^m2)/(Aa*ca0*roa*(betaa*(Tc - 20) + 1) +
As*cs0*ros*(betas*(Tc - 20) + 1));
k2=dt*((I^2*(R1 - ((Tc+k1/2) - 25)*(R1/50 - R2/50)) + D*S*as + (56697*D*pi*e*((Ta + 273)^4 - ((Tc+k1/2) +
273)^4))/1000000000000 - A2*pi*(Ta - (Tc+k1/2))*((8311365009850575*beta^(5/2))/47223666482869645213696 -
1)*((2667399193058401*Ta)/73786976294838206464 + (2667399193058401*(Tc+k1/2))/73786976294838206464 -
(8350655098988051*(Ta/2 + (Tc+k1/2)/2)^2)/302231454903657293676544 + 74/3125)*((9807*D^3*(Ta -
(Tc+k1/2))*((7711737803321719*y^2)/120892581961462917470617 6 - (5626256942481413*y)/36893488147419103232 +
1293/1000)^2*(Ta/8000 + (Tc+k1/2)/8000 - 143/200))/(1000*(Ta/2 + (Tc+k1/2)/2 + 273)*((367*Ta)/200000 +
(367*(Tc+k1/2))/200000 + 1)^2*((927*Ta)/40000000000 + (927*(Tc+k1/2))/40000000000 - (5991502475140861*(Ta/2 +
```

```
(Tc+k1/2)/2)^2)/29514790517935282585600000 + 17239/1000000000)^2))^m2)/(Aa*ca0*roa*(betaa*((Tc+k1/2) - 20) + 1) +
As*cs0*ros*(betas*((Tc+k1/2) - 20) + 1)));
k3=dt*((I^2*(R1 - ((Tc+k2/2) - 25)*(R1/50 - R2/50)) + D*S*as + (56697*D*pi*e*((Ta + 273)^4 - ((Tc+k2/2) +
273)^4))/1000000000000 - A2*pi*(Ta - (Tc+k2/2))*((8311365009850575*beta^(5/2))/472236648286964521369 6 -
1)*((2667399193058401*Ta)/73786976294838206464 + (2667399193058401*(Tc+k2/2))/73786976294838206464 -
(8350655098988051*(Ta/2 + (Tc+k2/2)/2)^2)/302231454903657293676544 + 74/3125)*((9807*D^3*(Ta -
(Tc+k2/2))*((7711737803321719*y^2)/12089258196146291747061 76 - (5626256942481413*y)/36893488147419103232 +
1293/1000)^2*(Ta/8000 + (Tc+k2/2)/8000 - 143/200))/(1000*(Ta/2 + (Tc+k2/2)/2 + 273)*((367*Ta)/200000 +
(367*(Tc+k2/2))/200000 + 1)^2*((927*Ta)/40000000000 + (927*(Tc+k2/2))/40000000000 - (5991502475140861*(Ta/2 +
(Tc+k2/2)/2)^2)/29514790517935282585600000 + 17239/1000000000)^2))^m2)/(Aa*ca0*roa*(betaa*((Tc+k2/2) - 20) + 1) +
As*cs0*ros*(betas*((Tc+k2/2) - 20) + 1)));
k4=dt*(((I^2*(R1 - ((Tc+k3) - 25)*(R1/50 - R2/50)) + D*S*as + (56697*D*pi*e*((Ta + 273)^4 - ((Tc+k3) + 273)^4))/1000000000000
- A2*pi*(Ta - (Tc+k3))*((8311365009850575*beta^(5/2))/472236648286964521369 6 -
1)*((2667399193058401*Ta)/73786976294838206464 + (2667399193058401*(Tc+k3))/73786976294838206464 -
(8350655098988051*(Ta/2 + (Tc+k3)/2)^2)/302231454903657293676544 + 74/3125)*((9807*D^3*(Ta -
(Tc+k3))*((7711737803321719*y^2)/12089258196146291747061 76 - (5626256942481413*y)/36893488147419103232 +
1293/1000)^2*(Ta/8000 + (Tc+k3)/8000 - 143/200))/(1000*(Ta/2 + (Tc+k3)/2 + 273)*((367*Ta)/200000 + (367*(Tc+k3))/200000
+ 1)^2*((927*Ta)/40000000000 + (927*(Tc+k3))/40000000000 - (5991502475140861*(Ta/2 +
(Tc+k3)/2)^2)/29514790517935282585600000 + 17239/1000000000)^2))^m2)/(Aa*ca0*roa*(betaa*((Tc+k3) - 20) + 1) +
As*cs0*ros*(betas*((Tc+k3) - 20) + 1)));
Tc=Tc+(1/6)*(k1+2*k2+2*k3+k4);
end
end
err=80-Tc;
I=I+s.*err;
err1=abs(80-Tc);

end
%proračunati dinamički DTO
Ir=I;
```

PRILOG I

MATLAB KOD PRORAČUNA DINAMIČKOG DTO-a METODA RUNGE-KUTTA ČETVRTOG REDA IEEE 738 (ZA ACSR 490/65 mm^2)

```
clear all;
close all;
clc;
R2=7.6745e-05; %izmjenični otpor vodiča pri 75 ºC
R1=6.4076e-05; %izmjenični otpor vodiča pri 25 ºC
e=0.9;%koeficijent emisije
as=0.9;%koeficijent apsorpcije Sunčevog zračenja
beta=0;%kut inklinacije vodiča prema horizontalnoj ravnini
y=0;%nadmorska visina
D=30.6*10^-3;%vanjski promjer vodiča
Aa=490.2769*10^-6;%presjek aluminijskog dijela alučeličnog vodiča
As=63.5544*10^-6;%presjek čeličnog dijela alučeličnog vodiča
roa=2703;%gustoća aluminija
ros=7780;%gustoća čelika
ca0=897;%specifični toplinski kapacitet aluminijskog dijela alučeličnog vodiča pri 20°C
cs0=481;%specifični toplinski kapacitet čeličnog dijela alučeličnog vodiča pri 20°C
betaa=3.8*10^-4;%temperaturni koeficijent promjene specifičnog toplinskog kapaciteta aluminija
betas=1*10^-4;%temperaturni koeficijent promjene specifičnog toplinskog kapaciteta čelika
dt=90;%korak vremena
s=5;%koeficijent radi proračuna greške
gg=1800;%dužina vremenskog intervala tf
Tcin=0;%početna temperatura vodiča
v=0;%brzina vjetra
delta=90;%kut vjetra
Ta=-20;%temperatura okoline
S=0;%intenzitet Sunčeva zračenja
I=1000;%početna vrijednost struje
err1=2;%da pi se petlja izvršila
%metoda Runge-Kutta četvrtog reda
while(err1>0.1)
   Tc=Tcin;
for t1=dt:dt:gg;
Kv=1.194-cos(delta*(pi/180))+0.194*cos(2*delta*(pi/180))+0.368*sin(2*delta*(pi/180));
Tf=(Tc+Ta)/2;
mif=(1.458*10^-6*((Tf+273)^1.5))/(Tf+383.4);
rof=(1.293-1.525*10^-4*y+6.379*10^-9*y^2)/(1+0.00367*Tf);
lambdaf=2.424*10^-2+7.477*10^-5*Tf-4.407*10^-9*(Tf^2);
```

```
Nu=(D*rof*v)/mif;
Pkonv1=Kv*(1.01+1.35*(Nu^0.52))*lambdaf*(Tc-Ta);
Pkonv2=Kv*0.754*(Nu^0.6)*lambdaf*(Tc-Ta);
Pkonv3=3.645*(D^0.75)*(rof^0.5)*((Tc-Ta)^1.25);
  if(imag(Pkonv1)~=0)%zaštita od kompleksnog broja
      Pkonv1=-10^99;
    end
    if(imag(Pkonv2)~=0)%zaštita od kompleksnog broja
      Pkonv2=-10^99;
    end
  if(imag(Pkonv3)~=0)%zaštita od kompleksnog broja
      Pkonv3=-10^99;
  end
if(Pkonv1>Pkonv2 && Pkonv1>Pkonv3)
k1=dt*(((R1 - (Tc - 25)*(R1/50 - R2/50))*I^2 + D*S*as + (89*D*e*((Ta/100 + 273/100)^4 - (Tc/100 + 273/100)^4))/5 + (Ta -
Tc)*((27*((2361183241434822606848*D*v*((7711737803321719*y^2)/12089258196146291747061 76 -
(5626256942481413*y)/36893488147419103232 + 1293/1000)*(Ta/2 + Tc/2 + 1917/5))/(3442605166011971*(Ta/2 + Tc/2 +
273)^(3/2)*((367*Ta)/200000 + (367*Tc)/200000 + 1)))^(13/25))/20 +
101/100)*((1379263054391263*Ta)/36893488147419103232 + (1379263054391263*Tc)/36893488147419103232 -
(5327736087041671*(Ta/2 + Tc/2)^2)/12089258196146291747061 76 + 303/12500)*((97*cos((pi*delta)/90))/500 -
cos((pi*delta)/180) + (46*sin((pi*delta)/90))/125 + 597/500))/(Aa*ca0*roa*(betaa*(Tc - 20) + 1) + As*cs0*ros*(betas*(Tc - 20) +
1)));
k2=dt*(((R1 - ((Tc+k1/2) - 25)*(R1/50 - R2/50))*I^2 + D*S*as + (89*D*e*((Ta/100 + 273/100)^4 - ((Tc+k1/2)/100 + 273/100)^4))/5
+ (Ta - (Tc+k1/2))*((27*((2361183241434822606848*D*v*((7711737803321719*y^2)/12089258196146291747061 76 -
(5626256942481413*y)/36893488147419103232 + 1293/1000)*(Ta/2 + (Tc+k1/2)/2 + 1917/5))/(3442605166011971*(Ta/2 +
(Tc+k1/2)/2 + 273)^(3/2)*((367*Ta)/200000 + (367*(Tc+k1/2))/200000 + 1)))^(13/25))/20 +
101/100)*((1379263054391263*Ta)/36893488147419103232 + (1379263054391263*(Tc+k1/2))/36893488147419103232 -
(5327736087041671*(Ta/2 + (Tc+k1/2)/2)^2)/12089258196146291747061 76 + 303/12500)*((97*cos((pi*delta)/90))/500 -
cos((pi*delta)/180) + (46*sin((pi*delta)/90))/125 + 597/500))/(Aa*ca0*roa*(betaa*((Tc+k1/2) - 20) + 1) +
As*cs0*ros*(betas*((Tc+k1/2) - 20) + 1)));
k3=dt*(((R1 - ((Tc+k2/2) - 25)*(R1/50 - R2/50))*I^2 + D*S*as + (89*D*e*((Ta/100 + 273/100)^4 - ((Tc+k2/2)/100 + 273/100)^4))/5
+ (Ta - (Tc+k2/2))*((27*((2361183241434822606848*D*v*((7711737803321719*y^2)/12089258196146291747061 76 -
(5626256942481413*y)/36893488147419103232 + 1293/1000)*(Ta/2 + (Tc+k2/2)/2 + 1917/5))/(3442605166011971*(Ta/2 +
(Tc+k2/2)/2 + 273)^(3/2)*((367*Ta)/200000 + (367*(Tc+k2/2))/200000 + 1)))^(13/25))/20 +
101/100)*((1379263054391263*Ta)/36893488147419103232 + (1379263054391263*(Tc+k2/2))/36893488147419103232 -
(5327736087041671*(Ta/2 + (Tc+k2/2)/2)^2)/12089258196146291747061 76 + 303/12500)*((97*cos((pi*delta)/90))/500 -
cos((pi*delta)/180) + (46*sin((pi*delta)/90))/125 + 597/500))/(Aa*ca0*roa*(betaa*((Tc+k2/2) - 20) + 1) +
As*cs0*ros*(betas*((Tc+k2/2) - 20) + 1)));
k4=dt*(((R1 - ((Tc+k3) - 25)*(R1/50 - R2/50))*I^2 + D*S*as + (89*D*e*((Ta/100 + 273/100)^4 - ((Tc+k3)/100 + 273/100)^4))/5 +
(Ta - (Tc+k3))*((27*((2361183241434822606848*D*v*((7711737803321719*y^2)/12089258196146291747061 76 -
(5626256942481413*y)/36893488147419103232 + 1293/1000)*(Ta/2 + (Tc+k3)/2 + 1917/5))/(3442605166011971*(Ta/2 +
(Tc+k3)/2 + 273)^(3/2)*((367*Ta)/200000 + (367*(Tc+k3))/200000 + 1)))^(13/25))/20 +
101/100)*((1379263054391263*Ta)/36893488147419103232 + (1379263054391263*(Tc+k3))/36893488147419103232 -
(5327736087041671*(Ta/2 + (Tc+k3)/2)^2)/12089258196146291747061 76 + 303/12500)*((97*cos((pi*delta)/90))/500 -
cos((pi*delta)/180) + (46*sin((pi*delta)/90))/125 + 597/500))/(Aa*ca0*roa*(betaa*((Tc+k3) - 20) + 1) +
As*cs0*ros*(betas*((Tc+k3) - 20) + 1)));
Tc=Tc+(1/6)*(k1+2*k2+2*k3+k4);
else if(Pkonv2>=Pkonv1 && Pkonv2>=Pkonv3)
k1=dt*((I^2*(R1 - (Tc - 25)*(R1/50 - R2/50)) + D*S*as + (89*D*e*((Ta/100 + 273/100)^4 - (Tc/100 + 273/100)^4))/5 + (Ta -
Tc)*((1379263054391263*Ta)/36893488147419103232 + (1379263054391263*Tc)/36893488147419103232 -
(5327736087041671*(Ta/2 + Tc/2)^2)/12089258196146291747061 76 + 303/12500)*((36569*cos((pi*delta)/90))/250000 -
(377*cos((pi*delta)/180))/500 + (8671*sin((pi*delta)/90))/31250 +
225069/250000)*((2361183241434822606848*D*v*((7711737803321719*y^2)/12089258196146291747061 76 -
(5626256942481413*y)/36893488147419103232 + 1293/1000)*(Ta/2 + Tc/2 + 1917/5))/(3442605166011971*(Ta/2 + Tc/2 +
273)^(3/2)*((367*Ta)/200000 + (367*Tc)/200000 + 1)))^(3/5))/(Aa*ca0*roa*(betaa*(Tc - 20) + 1) + As*cs0*ros*(betas*(Tc - 20) +
1)));
k2=dt*((I^2*(R1 - ((Tc+k1/2) - 25)*(R1/50 - R2/50)) + D*S*as + (89*D*e*((Ta/100 + 273/100)^4 - ((Tc+k1/2)/100 + 273/100)^4))/5
+ (Ta - (Tc+k1/2))*((1379263054391263*Ta)/36893488147419103232 +
(1379263054391263*(Tc+k1/2))/36893488147419103232 - (5327736087041671*(Ta/2 +
(Tc+k1/2)/2)^2)/12089258196146291747061 76 + 303/12500)*((36569*cos((pi*delta)/90))/250000 - (377*cos((pi*delta)/180))/500
+ (8671*sin((pi*delta)/90))/31250 +
225069/250000)*((2361183241434822606848*D*v*((7711737803321719*y^2)/12089258196146291747061 76 -
(5626256942481413*y)/36893488147419103232 + 1293/1000)*(Ta/2 + (Tc+k1/2)/2 + 1917/5))/(3442605166011971*(Ta/2 +
(Tc+k1/2)/2 + 273)^(3/2)*((367*Ta)/200000 + (367*(Tc+k1/2))/200000 + 1)))^(3/5))/(Aa*ca0*roa*(betaa*((Tc+k1/2) - 20) + 1) +
As*cs0*ros*(betas*((Tc+k1/2) - 20) + 1)));
k3=dt*((I^2*(R1 - ((Tc+k2/2) - 25)*(R1/50 - R2/50)) + D*S*as + (89*D*e*((Ta/100 + 273/100)^4 - ((Tc+k2/2)/100 + 273/100)^4))/5
+ (Ta - (Tc+k2/2))*((1379263054391263*Ta)/36893488147419103232 +
(1379263054391263*(Tc+k2/2))/36893488147419103232 - (5327736087041671*(Ta/2 +
(Tc+k2/2)/2)^2)/12089258196146291747061 76 + 303/12500)*((36569*cos((pi*delta)/90))/250000 - (377*cos((pi*delta)/180))/500
+ (8671*sin((pi*delta)/90))/31250 +
225069/250000)*((2361183241434822606848*D*v*((7711737803321719*y^2)/12089258196146291747061 76 -
(5626256942481413*y)/36893488147419103232 + 1293/1000)*(Ta/2 + (Tc+k2/2)/2 + 1917/5))/(3442605166011971*(Ta/2 +
(Tc+k2/2)/2 + 273)^(3/2)*((367*Ta)/200000 + (367*(Tc+k2/2))/200000 + 1)))^(3/5))/(Aa*ca0*roa*(betaa*((Tc+k2/2) - 20) + 1) +
As*cs0*ros*(betas*((Tc+k2/2) - 20) + 1)));
```

```
k4=dt*((I^2*(R1 - ((Tc+k3) - 25)*(R1/50 - R2/50)) + D*S*as + (89*D*e*((Ta/100 + 273/100)^4 - ((Tc+k3)/100 + 273/100)^4))/5 +
(Ta - (Tc+k3))*((1379263054391263*Ta)/36893488147419103232 + (1379263054391263*(Tc+k3))/36893488147419103232 -
(5327736087041671*(Ta/2 + (Tc+k3)/2)^2)/1208925819614629174706176 + 303/12500)*((36569*cos((pi*delta)/90))/250000 -
(377*cos((pi*delta)/180))/500 + (8671*sin((pi*delta)/90))/31250 +
225069/250000)*((2361183241434822606848*D*v*((7711737803321719*y^2)/1208925819614629174706176 -
(5626256942481413*y)/36893488147419103232 + 1293/1000)*(Ta/2 + (Tc+k3)/2 + 1917/5))/(3442605166011971*(Ta/2 +
(Tc+k3)/2 + 273)^(3/2)*((367*Ta)/200000 + (367*(Tc+k3))/200000 + 1)))^(3/5))/(Aa*ca0*roa*(betaa*((Tc+k3) - 20) + 1) +
As*cs0*ros*(betas*((Tc+k3) - 20) + 1)));
Tc=Tc+(1/6)*(k1+2*k2+2*k3+k4);
else
k1=dt*(((R1 - (Tc - 25)*(R1/50 - R2/50))*I^2 - (729*D^(3/4)*(Tc -
Ta)^(5/4)*(((7711737803321719*y^2)/1208925819614629174706176 - (5626256942481413*y)/36893488147419103232 +
1293/1000)/((367*Ta)/200000 + (367*Tc)/200000 + 1))^(1/2))/200 + D*S*as + (89*D*e*((Ta/100 + 273/100)^4 - (Tc/100 +
273/100)^4))/5)/(Aa*ca0*roa*(betaa*(Tc - 20) + 1) + As*cs0*ros*(betas*(Tc - 20) + 1)));
k2=dt*(((R1 - ((Tc+k1/2) - 25)*(R1/50 - R2/50))*I^2 - (729*D^(3/4)*((Tc+k1/2) -
Ta)^(5/4)*(((7711737803321719*y^2)/1208925819614629174706176 - (5626256942481413*y)/36893488147419103232 +
1293/1000)/((367*Ta)/200000 + (367*(Tc+k1/2))/200000 + 1))^(1/2))/200 + D*S*as + (89*D*e*((Ta/100 + 273/100)^4 -
((Tc+k1/2)/100 + 273/100)^4))/5)/(Aa*ca0*roa*(betaa*((Tc+k1/2) - 20) + 1) + As*cs0*ros*(betas*((Tc+k1/2) - 20) + 1)));
k3=dt*(((R1 - ((Tc+k2/2) - 25)*(R1/50 - R2/50))*I^2 - (729*D^(3/4)*((Tc+k2/2) -
Ta)^(5/4)*(((7711737803321719*y^2)/1208925819614629174706176 - (5626256942481413*y)/36893488147419103232 +
1293/1000)/((367*Ta)/200000 + (367*(Tc+k2/2))/200000 + 1))^(1/2))/200 + D*S*as + (89*D*e*((Ta/100 + 273/100)^4 -
((Tc+k2/2)/100 + 273/100)^4))/5)/(Aa*ca0*roa*(betaa*((Tc+k2/2) - 20) + 1) + As*cs0*ros*(betas*((Tc+k2/2) - 20) + 1)));
k4=dt*(((R1 - ((Tc+k3) - 25)*(R1/50 - R2/50))*I^2 - (729*D^(3/4)*((Tc+k3) -
Ta)^(5/4)*(((7711737803321719*y^2)/1208925819614629174706176 - (5626256942481413*y)/36893488147419103232 +
1293/1000)/((367*Ta)/200000 + (367*(Tc+k3))/200000 + 1))^(1/2))/200 + D*S*as + (89*D*e*((Ta/100 + 273/100)^4 -
((Tc+k3)/100 + 273/100)^4))/5)/(Aa*ca0*roa*(betaa*((Tc+k3) - 20) + 1) + As*cs0*ros*(betas*((Tc+k3) - 20) + 1)));
Tc=Tc+(1/6)*(k1+2*k2+2*k3+k4);
   end
end
end
err=80-Tc;
I=I+s.*err;
err1=abs(80-Tc);
end
%proračunati dinamički DTO
Ir=I;
```

PRILOG J

MATLAB KOD PRORAČUNA DINAMIČKOG DTO-a LINEARIZIRANA METODA CIGRE 601 (ZA ACSR 490/65 mm^2)

```
clear all;
close all;
R2=7.6745e-05; %izmjenični otpor vodiča pri 75C
R1=6.4076e-05; %izmjenični otpor vodiča pri 25C
Rac2=6.3726e-05;%izmjenični otpor pri 20
alfa=0.00402;%temperaturni koeficijent promjene aluminija
e=0.9;%koeficijent emisije
as=0.9;%koeficijent apsorpcije Sunčevog zračenja
beta=0;%kut inklinacije vodiča prema horizontalnoj ravnini
y=0;%nadmorska visina
d=3.4*10^-3;%promjer žice vanjskog sloja
D=30.6*10^-3;%vanjski promjer vodiča
Aa=490.2769*10^-6;%presjek aluminijskog dijela alučeličnog vodiča
As=63.5544*10^-6;%presjek čeličnog dijela alučeličnog vodiča
Tmax=80;%maksimalno dopuštena temperatura vodiča
Tr=20;%referentna temperatura
roa=2703;%gustoća aluminija
ros=7780;%gustoća čelika
ca0=897;%specifični toplinski kapacitet aluminijskog dijela alučeličnog vodiča pri 20°C
cs0=481;%specifični toplinski kapacitet čeličnog dijela alučeličnog vodiča pri 20°C(cs0)
betaa=3.8*10^-4;%temperaturni koeficijent promjene specifičnog toplinskog kapaciteta aluminijskog dijela alučeličnog vodiča
betas=1*10^-4;%temperaturni koeficijent promjene specifičnog toplinskog kapaciteta čeličnog dijela alučeličnog vodiča
s=8;%koeficijent radi proračuna greške
p=1800;%dužina vremenskog intervala tf
Tcin=0;%početna temperatura vodiča
v=0;%brzina vjetra
delta=90;%kut vjetra
Ta=-20;%temperatura okoline
S=0;%intenzitet Sunčeva zračenja
I=1000;%početna vrijednost struje
err1=2;%da se petlja jednom izvrši
```

```
while(err1>0.001)
Ps=D*S*as;
Rf=d/(2*(D-d));%proračun hrapavosti
%određivanje konstanti kuta vjetra
if(delta>=0 && delta<=24)
   A1=0.42;
   B2=0.68;
   m1=1.08;
else
   A1=0.42;
   B2=0.58;
   m1=0.9;
end;
Tf=(Tcin+Ta)/2;%definiranje temperature filma
ni=((17.239+4.635*10^-2*Tf-2.03*10^-5*(Tf^2))*10^-6)/((1.293-1.525*10^-4*y+6.379*10^-9*(y^2))/(1+0.00367*Tf));%definiranje
kinematske viskoznosti
Re=(v*D)/ni;%definiranje Reynoldsovog broja
Gr=(D^3*(Tcin-Ta)*9.807)/((Tf+273)*(ni^2));%definiranje Grashofovog broja
Pr=0.715-2.5*10^-4*Tf;%definiranje Prandtlovog broj
c=Gr*Pr;
lambda=2.368*10^-2+(7.23*10^-5)*Tf-(2.763*10^-8)*Tf^2;%definiranje termalne vodljivosti
if(Rf<=0.05 && Re>2.65*10^3)
       B1=0.178;
       n=0.633;
     else if(Rf>0.05 && Re>(2.65*10^3))
     B1=0.048;
     n=0.8;

       else if (Re<=2.65*10^3)
       B1=0.641;
       n=0.471;
            end
        end
end
if(c<=10^2)
   A2=1.02;
   m2=0.148;
else if (c>100 && c<=10^4)
   A2=0.85;
   m2=0.188;
   else if (c>10^4 && c<=10^7)
         A2=0.48;
         m2=0.25;
       else if (c>10^7)
         A2=0.125;
         m2=0.333;
          end
       end
   end
end
Nu1=(B1*(Re^n))*(A1+B2*((sin(delta*(pi/180)))^m1));%prisilno za kut vjetra <=90 stupnjeva
Nu2=A2*(c^m2)*(1-1.76*10^-6*(beta^2.5));%prirodno za inklinaciju < 80 stupnjeva

if(imag(Nu1)~=0)%zaštita od kompleksnog broja
     Nu1=-10^99;
  end
    if(imag(Nu2)~=0)%zaštita od kompleksnog broja
      Nu2=-10^99;
    end
Nu=max([Nu1 Nu2]);
Rac1=((R2-R1)/(75-25))*(Tcin-25)+R1;%proračun otpora vodiča pri temperaturi Tc
%definiranje snage odvođenja topline konvekcijom po jedinici duljine
Pkonv=pi*lambda*(Tcin-Ta)*Nu;
%definiranje snage odvođenja topline radijacijom po jedinici duljine
Prad=pi*D*e*5.6697*10^-8*((Tcin+273)^4-(Ta+273)^4);
%definiranje početne struje
Iin=sqrt((Prad+Pkonv-Ps)/Rac1);
h0=(Iin*Iin*Rac1+as*D*S)/(pi*D*(Tcin-Ta));%definiranje ukupnog koeficijenta prijenosa topline
Tcx=(Rac2*I*I*(1-alfa*Tr)+D*(as*S+pi*h0*Ta))/(pi*D*h0-alfa*Rac2*I*I);%definiranje granične temperature
mcp=Aa*roa*ca0*(1+betaa*(Tcin-20))+As*ros*cs0*(1+betas*(Tcin-20));%toplinski kapacitet vodiča
tau=mcp/(pi*D*h0-alfa*Rac2*I*I);%definiranje toplinske konstante vodiča
k=exp(-p/tau);
Ttime=Tcx-(Tcx-Tcin)*k;
err=Tmax-max(Ttime);
I=I+s.*err;
```

```
err1=abs(Tmax-max(Ttime));
end
%proračunati dinamički DTO
Ir=I;
```

PRILOG K

MATLAB KOD PRORAČUNA DINAMIČKOG DTO-a LINEARIZIRANA METODA IEEE 738 (ZA ACSR 360/57 mm^2)

```
clear all;
close all;
R2=7.6745e-05; %izmjenični otpor vodiča pri 75 ºC
R1=6.4076e-05; %izmjenični otpor vodiča pri 25 ºC
Rac2=6.3726e-05;%izmjenični otpor pri 20 ºC
alfa=0.00402;%temperaturni koeficijent promjene otpora
e=0.9;%koeficijent emisije
as=0.9;%koeficijent apsorpcije Sunčevog zračenja
beta=0;%kut inklinacije vodiča prema horizontalnoj ravnini
y=0;%nadmorska visina
d=3.4*10^-3;%promjer žice vanjskog sloja
D=30.6*10^-3;%vanjski promjer vodiča
Aa=490.2769*10^-6;%presjek aluminijskog dijela alučeličnog vodiča
As=63.5544*10^-6;%presjek čeličnog dijela alučeličnog vodiča
Tmax=80;%maksimalno dopuštena temperatura vodiča
Tr=20;%referentna temperatura
roa=2703;%gustoća aluminija
ros=7780;%gustoća čelika
ca0=897;%specifični toplinski kapacitet aluminijskog dijela alučeličnog vodiča pri 20°C
cs0=481;%specifični toplinski kapacitet čeličnog dijela alučeličnog vodiča pri 20°C
betaa=3.8*10^-4;%temperaturni koeficijent promjene specifičnog toplinskog kapaciteta aluminijskog dijela alučeličnog vodiča
betas=1*10^-4;%temperaturni koeficijent promjene specifičnog toplinskog kapaciteta čeličnog dijela alučeličnog vodiča
s=8;%koeficijent radi proračuna greške
p=1800;%dužina vremenskog intervala tf
Tcin=0;%početna temperatura vodiča
v=0;%brzina vjetra
delta=90;%kut vjetra
Ta=-20;%temperatura okoline
S=0;%intenzitet Sunčeva zračenja
I=1000;%početna vrijednost struje
err1=2;%da se petlja jednom izvrši
while(err1>0.001)
Ps=D*S*as;
Rf=d/(2*(D-d));%proračun hrapavosti
%određivanje konstanti kuta vjetra
if(delta>=0 && delta<=24)
   A1=0.42;
   B2=0.68;
   m1=1.08;
else
   A1=0.42;
   B2=0.58;
   m1=0.9;
end;
Tf=(Tcin+Ta)/2;%definiranje temperature filma
ni=((17.239+4.635*10^-2*Tf-2.03*10^-5*(Tf^2))*10^-6)/((1.293-1.525*10^-4*y+6.379*10^-9*(y^2))/(1+0.00367*Tf));%definiranje
kinematske viskoznosti
Re=(v*D)/ni;%definiranje Reynoldsovog broja
Gr=(D^3*(Tcin-Ta)*9.807)/((Tf+273)*(ni^2));%definiranje Grashofovog broja
Pr=0.715-2.5*10^-4*Tf;%definiranje Prandtlovog broj
c=Gr*Pr;
lambda=2.368*10^-2+(7.23*10^-5)*Tf-(2.763*10^-8)*Tf^2;%definiranje termalne vodljivosti
if(Rf<=0.05 && Re>2.65*10^3)
      B1=0.178;
      n=0.633;
    else if(Rf>0.05 && Re>(2.65*10^3))
    B1=0.048;
    n=0.8;

      else if (Re<=2.65*10^3)
      B1=0.641;
      n=0.471;
```

```
            end
         end
end
if(c<=10^2)
   A2=1.02;
   m2=0.148;
else if (c>100 && c<=10^4)
   A2=0.85;
   m2=0.188;
   else if (c>10^4 && c<=10^7)
         A2=0.48;
         m2=0.25;
       else if (c>10^7)
         A2=0.125;
         m2=0.333;
          end
       end
   end
end
Nu1=(B1*(Re^n))*(A1+B2*((sin(delta*(pi/180)))^m1));%prisilno za kut vjetra <=90 stupnjeva
Nu2=A2*(c^m2)*(1-1.76*10^-6*(beta^2.5));%prirodno za inklinaciju < 80 stupnjeva

if(imag(Nu1)~=0)%zaštita od kompleksnog broja
     Nu1=-10^99;
  end
    if(imag(Nu2)~=0)%zaštita od kompleksnog broja
      Nu2=-10^99;
    end
Nu=max([Nu1 Nu2]);
Rac1=((R2-R1)/(75-25))*(Tcin-25)+R1;%proračun otpora vodiča pri temperaturi Tc
%definiranje snage odvođenja topline konvekcijom po jedinici duljine
Pkonv=pi*lambda*(Tcin-Ta)*Nu;
%definiranje snage odvođenja topline radijacijom po jedinici duljine
Prad=pi*D*e*5.6697*10^-8*((Tcin+273)^4-(Ta+273)^4);
%definiranje početne struje
Iin=sqrt((Prad+Pkonv-Ps)/Rac1);
h0=(Iin*Iin*Rac1+as*D*S)/(pi*D*(Tcin-Ta));%definiranje ukupnog koeficijenta prijenosa topline
Tcx=(Rac2*I*I*(1-alfa*Tr)+D*(as*S+pi*h0*Ta))/(pi*D*h0-alfa*Rac2*I*I);%definiranje granične temperature
mcp=Aa*roa*ca0*(1+betaa*(Tcin-20))+As*ros*cs0*(1+betas*(Tcin-20));%toplinski kapacitet vodiča
tau=mcp/(pi*D*h0-alfa*Rac2*I*I);%definiranje toplinske konstante vodiča
k=exp(-p/tau);
Ttime=Tcx-(Tcx-Tcin)*k;
err=Tmax-max(Ttime);
I=I+s.*err;
err1=abs(Tmax-max(Ttime));
end
%proračunati dinamički DTO
Ir=I;
```

PRILOG L

MATLAB KOD PRORAČUNA DINAMIČKOG DTO-a METODA DIREKTNE KOLOKACIJE CIGRE 601 (ZA ACSR 490/60 mm^2)

Glavni program:

```
clear all;
close all;
clc;
R75=7.6745e-05; %izmjenični otpor vodiča pri 75 ºC
R25=6.4076e-05; %izmjenični otpor vodiča pri 25 ºC
e=0.9;%koeficijent emisije
as=0.9;%koeficijent apsorpcije Sunčevog zračenja
beta=0;%kut inklinacije vodiča prema horizontalnoj ravnini
y=0;%nadmorska visina
d=3.4*10^-3;%promjer žice vanjskog sloja
D=30.6*10^-3;
Aa=490.2769*10^-6;%presjek aluminijskog dijela alučeličnog vodiča
As=63.5544*10^-6;%presjek čeličnog dijela alučeličnog vodiča
roa=2703;%gustoća aluminija
ros=7780;%gustoća čelika
ca0=897;%specifični toplinski kapacitet aluminijskog dijela alučeličnog vodiča pri 20°C
cs0=481;%specifični toplinski kapacitet čeličnog dijela alučeličnog vodiča pri 20°C(cs0)
betaa=3.8*10^-4;%temperaturni koeficijent promjene specifičnog toplinskog kapaciteta aluminijskog dijela alučeličnog vodiča
betas=1*10^-4;% temperaturni koeficijent promjene specifičnog toplinskog kapaciteta čeličnog dijela alučeličnog vodiča
%promjenjivi uvjeti
Tcin=0;%početna temperatura vodiča
v=0;%brzina vjetra
delta=90;%kut vjetra
Ta=-20;%temperatura okoline
S=0;%intenzitet Sunčeva zračenja
dt=30;%korak vremena
gg=600;%vrijeme simulacije tf
vt=0:dt:gg;%vektor vremena
%definiranje vektora ulaznih podataka za druge funkcije
ul=[R25 R75 e as D Aa As roa ros ca0 cs0 betaa betas y S Ta Tcin dt gg delta v d beta];%ulaz za funkciju ograničenja
l=[dt gg];%ulaz za funkciju cilja
%pretpostavljanje početnog uvjeta u optimizacijskog procesu nelinearnog programiranja
n=length(vt); %broj točaka u diskretizaciji vremena
x0=Tcin*ones(n+1,1);%pretpostavaka temperature vodiča u stanjima od 1 do N
x0(n+1)=3000;%pretpostavka vrijednosti struje I
%rješavanje problema optimalnog upravljanja (nelinearnog programiranja)
options = optimoptions(@fmincon,'Algorithm','sqp');%aktivacija SQP algoritma
[x,fval]=fmincon(@(x)fcilja(x,l),x0,[],[],[],[],[],[],@(x)ogranicenja_novo(x,ul),options);%rješavanje problema nelinearnog
programiranja
```

Funkcija ograničenja:

```
function [c, ceq] = ogranicenja(x,ul)
R25=ul(1);R75=ul(2);e=ul(3);as=ul(4);D=ul(5);Aa=ul(6);As=ul(7);roa=ul(8);ros=ul(9);ca0=ul(10);cs0=ul(11);betaa=ul(12);betas=u
l(13);y=ul(14);S=ul(15);Ta=ul(16);Tcin=ul(17);dt=ul(18);gg=ul(19);delta=ul(20);v=ul(21);d=ul(22);beta=ul(23);
vt=0:dt:gg;%vektor vremena
nu=length(vt);%veličina vektora vremena
Pkonv=1:1:nu-1;
Ps=1:1:nu-1;
%definiranje ograničenja tipa jednakosti (ceq) i nejednakosti(c)
ceq=ones(nu,1);%broj ograničenja tipa jednakosti
%pomoćna definiranja
Tc=(x(1:nu-1));
Tnov=x(2:nu);
I=x(nu+1);
Prad=17.8.*D.*e.*(((Tnov+273)/100).^4-((Ta+273)/100).^4);
for i=1:1:nu-1;
Tx=Tnov(i);
if(delta>=0 && delta<=24)
   A1=0.42;
   B2=0.68;
   m1=1.08;
else
   A1=0.42;
   B2=0.58;
   m1=0.9;
end;
Rf=d/(2*(D-d));%proračun hrapavosti
```

```
Tf=(Tx+Ta)/2;%definiranje temperature filma
ni=((17.239+4.635*10^-2*Tf-2.03*10^-5*(Tf^2))*10^-6)/((1.293-1.525*10^-4*y+6.379*10^-9*(y^2))/(1+0.00367*Tf));%definiranje
kinematske viskoznosti
Re=(v*D)/ni;%definiranje Reynoldsovog broja
Gr=(D^3*(Tx-Ta)*9.807)/((Tf+273)*(ni^2));%definiranje Grashofovog broja
Pr=0.715-2.5*10^-4*Tf;%definiranje Prandtlovog broj
c=Gr*Pr;
lambda=2.368*10^-2+(7.23*10^-5)*Tf-(2.763*10^-8)*Tf^2;%definiranje termalne vodljivosti
if(Rf<=0.05 && Re>2.65*10^3)
       B1=0.178;
       n=0.633;
      else if(Rf>0.05 && Re>(2.65*10^3))
      B1=0.048;
      n=0.8;

        else if (Re<=2.65*10^3)
        B1=0.641;
        n=0.471;
             end
          end
end
if(c<=10^2)
    A2=1.02;
    m2=0.148;
else if (c>100 && c<=10^4)
    A2=0.85;
    m2=0.188;
    else if (c>10^4 && c<=10^7)
          A2=0.48;
          m2=0.25;
        else if (c>10^7)
          A2=0.125;
          m2=0.333;
           end
        end
    end
end
Nu1=(B1*(Re^n))*(A1+B2*((sin(delta*(pi/180)))^m1));%prisilno za kut vjetra <=90 stupnjeva
Nu2=A2*(c^m2)*(1-1.76*10^-6*(beta^2.5));%prirodno za inklinaciju < 80 stupnjeva
if(imag(Nu1)~=0)%zaštita od kompleksnog broja
      Nu1=-10^99;
  end
     if(imag(Nu2)~=0)%zaštita od kompleksnog broja
       Nu2=-10^99;
end
if(Nu1>=Nu2)
Pkonv(i)=pi*lambda*(Tx-Ta)*Nu1;
else
Pkonv(i)=pi*lambda*(Tx-Ta)*Nu2;
end
Ps(i)=D.*S.*as;
end
Pkonv=Pkonv';
Rac=((R75-R25)./(75-25)).*(Tnov-25)+R25;
PJ=I.*I.*Rac;
mcp=Aa.*roa.*ca0.*(1+betaa.*(Tnov-20))+As.*ros.*cs0.*(1+betas.*(Tnov-20)); %toplinski kapacitet vodiča
%ograničenja diferencijalne jednadžbe
a=(Ps'+PJ-Pkonv-Prad)./mcp-((Tnov-Tc)./dt);
ceq(1)=x(1)-Tcin;%ograničenje početnog uvjeta
ceq(2:nu)=a;
%definiranje ograničenja tipa nejednakosti
c(1:nu)=x(1:nu)-80;
c(nu+1)=-x(nu+1);
end
```

Funkcija cilja:

```
function f = fcilja(x,vri)
%pridruživanje ulaznih podataka dobivenih iz glavnog programa
dt=vri(1);%korak vremena
gg=vri(2);%vrijeme simulacije
vt=0:dt:gg;%vektor vremena
n=length(vt);
%definiranje funkcije cilja
f=(x(n)-80)^2;
end
```

PRILOG M

MATLAB KOD PRORAČUNA DINAMIČKOG DTO-a METODA DIREKTNE KOLOKACIJE IEEE 738 (ZA ACSR 490/60 mm^2)

Glavni program:

```
R75=7.6745e-05; %izmjenični otpor vodiča pri 75 ºC
R25=6.4076e-05; %izmjenični otpor vodiča pri 25 ºC
e=0.9;%koeficijent emisije
as=0.9;%koeficijent apsorpcije Sunčevog zračenja
beta=0;%kut inklinacije vodiča prema horizontalnoj ravnini
y=0;%nadmorska visina
D=30.6*10^-3;%vanjski promjer vodiča
Aa=490.2769*10^-6;%presjek aluminijskog dijela alučeličnog vodiča
As=63.5544*10^-6;%presjek čeličnog dijela alučeličnog vodiča
roa=2703;%gustoća aluminija
ros=7780;%gustoća čelika
ca0=897;%specifični toplinski kapacitet aluminijskog dijela alučeličnog vodiča pri 20°C
cs0=481;%specifični toplinski kapacitet čeličnog dijela alučeličnog vodiča pri 20°C(cs0)
betaa=3.8*10^-4;%temperaturni koeficijent promjene specifičnog toplinskog kapaciteta aluminijskog dijela
betas=1*10^-4;%tem0^-4;% temperaturni koeficijent promjene specifičnog toplinskog kapaciteta čeličnog dijela
y=0;%nadmorska visina
Tcin=0;%početna temperatura vodiča
v=0;%brzina vjetra
delta=90;%kut vjetra
Ta=-20;%temperatura okoline
S=0;%intenzitet Sunčeva zračenja
dt=90;%korak vremena
gg=1800;%vrijeme simulacije
vt=0:dt:gg;%vektor vremena
%definiranje vektora ulaznih podataka za druge funkcije
ul=[R25 R75 e as D Aa As roa ros ca0 cs0 betaa betas y v delta S Ta Tcin dt gg];%ulaz za funkciju ogranicenja
l=[dt gg];%ulaz za funkciju cilja
%pretpostavljanje početnog uvjeta u optimizacijskog procesu nelinearnog programiranja
n=length(vt); %broj točaka u diskretizaciji vremena
x0=Tcin*ones(n+1,1);%pretpostavaka temperature vodiča u stanjima od 1 do N
x0(n+1)=100;%pretpostavka vrijednosti struje I
%rješavanje problema optimalnog upravljanja (nelinearnog programiranja)
options = optimoptions(@fmincon,'Algorithm','sqp');%aktivacija SQP algoritma
[x,fval]=fmincon(@(x)fcilja(x,l),x0,[],[],[],[],[],[],@(x)ogranicenja_novo(x,ul),options);%rješavanje problema nelinearnog
programiranja
```

Funkcija ograničenja:

```
function [c, ceq] = ogranicenja(x,ul)
R25=ul(1);R75=ul(2);e=ul(3);as=ul(4);D=ul(5);Aa=ul(6);As=ul(7);roa=ul(8);ros=ul(9);ca0=ul(10);cs0=ul(11);betaa=ul(12);
betas=ul(13);y=ul(14);v=ul(15);delta=ul(16);S=ul(17);Ta=ul(18);Tcin=ul(19);
dt=ul(20);gg=ul(21);
%definiranje vektora vremena i veličine problema
vt=0:dt:gg;%vektor vremena
nu=length(vt);%veličina vektora vremena
%pomoćna definiranja
Tc=(x(1:nu-1));
Tnov=x(2:nu);
I=x(nu+1);
Pkonv=1:1:nu-1;
Ps=1:1:nu-1;
for i=1:1:nu-1;
Tx=Tnov(i);
Kv=1.194-cos(delta*(pi/180))+0.194*cos(2*delta*(pi/180))+0.368*sin(2*delta*(pi/180));
Tf=(Tx+Ta)/2;
mif=(1.458*10^-6*((Tf+273)^1.5))/(Tf+383.4);
rof=(1.293-1.525*10^-4*y+6.379*10^-9*y^2)/(1+0.00367*Tf);
lambdaf=2.424*10^-2+7.477*10^-5*Tf-4.407*10^-9*(Tf^2);
Nu=(D*rof*v)/mif;
Pkonv1=Kv*(1.01+1.35*(Nu^0.52))*lambdaf*(Tx-Ta);
Pkonv2=Kv*0.754*(Nu^0.6)*lambdaf*(Tx-Ta);
Pkonv3=3.645*(D^0.75)*(rof^0.5)*((Tx-Ta)^1.25);
  if(imag(Pkonv1)~=0)%zaštita od kompleksnog broja
      Pkonv1=-10^99;
    end
    if(imag(Pkonv2)~=0)%zaštita od kompleksnog broja
      Pkonv2=-10^99;
    end
```

```
  if(imag(Pkonv3)~=0)%zaštita od kompleksnog broja
     Pkonv3=-10^99;
  end
if(Pkonv1>Pkonv2 && Pkonv1>Pkonv3)
 Pkonv(i)=Pkonv1;
else if(Pkonv2>=Pkonv1 && Pkonv2>=Pkonv3)
 Pkonv(i)=Pkonv2;
   else
 Pkonv(i)=Pkonv3;
   end
end
  Ps(i)=D.*S.*as;
end
Pkonv=Pkonv';
%definiranje ograničenja tipa jednakosti (ceq) i nejednakosti(c)
ceq=ones(nu,1);%broj ograničenja tipa jednakosti
ceq(1)=x(1)-Tcin;%ograničenje početnog uvjeta
Ps=D.*S.*as;
Prad=17.8.*D.*e.*(((Tnov+273)/100).^4-((Ta+273)/100).^4);
Rac=((R75-R25)./(75-25)).*(Tnov-25)+R25;
PJ=I.*I.*Rac;
mcp=Aa.*roa.*ca0.*(1+betaa.*(Tnov-20))+As.*ros.*cs0.*(1+betas.*(Tnov-20));%toplinski kapacitet vodiča
%ograničenja diferencijalne jednadžbe
ceq(2:nu)=(Ps'+PJ-Pkonv-Prad)./mcp-((Tnov-Tc)./dt);
%definiranje ograničenja tipa nejednakosti
c(1:nu)=x(1:nu)-80;
c(nu+1)=-x(nu+1);
end
```

Funkcija cilja:

```
function f = fcilja(x,vri)
%pridruživanje ulaznih podataka dobivenih iz glavnog programa
dt=vri(1);%korak vremena
gg=vri(2);%vrijeme simulacije
vt=0:dt:gg;%vektor vremena
n=length(vt);
%definiranje funkcije cilja
f=(x(n)-80)^2;
end
```

PRILOG N

MATLAB KOD PRORAČUNA DINAMIČKOG DTO-a METODA RUNGE-KUTTA ČETVRTOG REDA UZ $T_j=T_{MAX}$ CIGRE 601 (ZA ACSR 240/40 mm^2)

```
R75=1.4633e-04; %izmjenični otpor vodiča pri 25 ºC
R25=1.2216e-04; %izmjenični otpor vodiča pri 75 ºC
e=0.9;%koeficijent emisije
as=0.9;%koeficijent apsorpcije Sunčevog zračenja
beta=0;%kut inklinacije vodiča prema horizontalnoj ravnini
y=0;%nadmorska visina
d=3.45*10^-3;%promjer žice vanjskog sloja
D=21.9*10^-3;%vanjski promjer vodiča
Aa=243.1*10^-6;%presjek aluminijskog dijela alučeličnog vodiča
As=39.5*10^-6;%presjek čeličnog dijela alučeličnog vodiča
roa=2703;%gustoća aluminija
ros=7780;%gustoća čelika
ca0=897;%specifični toplinski kapacitet aluminijskog dijela alučeličnog vodiča pri 20°C
cs0=481;%specifični toplinski kapacitet čeličnog dijela alučeličnog vodiča pri 20°C(cs0)
betaa=3.8*10^-4;%temperaturni koeficijent promjene specifičnog toplinskog kapaciteta aluminijskog dijela alučeličnog vodiča
betas=1*10^-4;%temperaturni koeficijent promjene specifičnog toplinskog kapaciteta čeličnog dijela alučeličnog vodiča
Rf=d/(2*(D-d));%proračun hrapavosti
dt=30;%korak vremena
s=5;%koeficijent radi proračuna greške
l=1;%efektivna termalna radijalna vodljivost
dc=8.04*10^-3;%promjer čelične jezgre
gg=600;%vremenski interval tf
Tcin=0;%početna temperatura vodiča
v=0;%brzina vjetra
delta=90;%kut vjetra
Ta=-20;%temperatura okoline
S=0;%intenzitet Sunčeva zračenja
```

```
I=1000;%početna vrijednost struje
err=2;
while(err>0.001)
   Tav=Tcin;
for t1=dt:dt:gg;
if(delta>=0 && delta<=24)
   A1=0.42;
   B2=0.68;
   m1=1.08;
else
   A1=0.42;
   B2=0.58;
   m1=0.9;
end;
Ts=((R25 - (Tav - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(4*pi*l) + Tav;% Tj=2*Tav-Ts;
Tf=(Ts+Ta)/2;%definiranje temperature filma
ni=((17.239+4.635*10^-2*Tf-2.03*10^-5*(Tf^2))*10^-6)/((1.293-1.525*10^-4*y+6.379*10^-9*(y^2))/(1+0.00367*Tf));%definiranje
kinematske viskoznosti
Re=(v*D)/ni;%definiranje Reynoldsovog broja
Gr=(D^3*(Ts-Ta)*9.807)/((Tf+273)*(ni^2));%definiranje Grashofovog broja
Pr=0.715-2.5*10^-4*Tf;%definiranje Prandtlovog broj
c=Gr*Pr;
lambda=2.368*10^-2+(7.23*10^-5)*Tf-(2.763*10^-8)*Tf^2;%definiranje termalne vodljivosti
if(Rf<=0.05 && Re>2.65*10^3)
       B1=0.178;
       n=0.633;
     else if(Rf>0.05 && Re>(2.65*10^3))
     B1=0.048;
     n=0.8;

       else if (Re<=2.65*10^3)
       B1=0.641;
       n=0.471;
            end
        end
end
if(c<=10^2)
   A2=1.02;
   m2=0.148;
else if (c>100 && c<=10^4)
   A2=0.85;
   m2=0.188;
   else if (c>10^4 && c<=10^7)
         A2=0.48;
         m2=0.25;
       else if (c>10^7)
         A2=0.125;
         m2=0.333;
          end
       end
   end
end
Nu1=(B1*(Re^n))*(A1+B2*((sin(delta*(pi/180)))^m1));%prisilno za kut vjetra <=90 stupnjeva
Nu2=A2*(c^m2)*(1-1.76*10^-6*(beta^2.5));%prirodno za inklinaciju < 80 stupnjeva
if(imag(Nu1)~=0)%zaštita od kompleksnog broja
     Nu1=-10^99;
  end
    if(imag(Nu2)~=0)%zaštita od kompleksnog broja
      Nu2=-10^99;
    end
if(Nu1>=Nu2)
k1=dt*((I^2*(R25 - (Tav - 25)*(R25/50 - R75/50)) + D*S*as + (56697*D*pi*e*((Ta + 273)^4 - (((R25 - (Tav - 25)*(R25/50 -
R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(4*pi*l) + Tav + 273)^4))/1000000000000 - B1*pi*(A1 +
B2*sin((pi*delta)/180)^m1)*(((R25 - (Tav - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(4*pi*l) - Ta +
Tav)*((2667399193058401*Ta)/73786976294838206464 + (2667399193058401*Tav)/73786976294838206464 -
(8350655098988051*(((R25 - (Tav - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(8*pi*l) + Ta/2 +
Tav/2)^2)/3022314549036572936765 44 + (2667399193058401*I^2*(R25 - (Tav - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2
- dc^2) - 1/2))/(29514790517935282585 6*pi*l) + 74/3125)*((D*v*((7711737803321719*y^2)/12089258196146291747061 76 -
(5626256942481413*y)/36893488147419103232 + 1293/1000))/(((367*(R25 - (Tav - 25)*(R25/50 -
R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(800000*pi*l) + (367*Ta)/200000 + (367*Tav)/200000 +
1)*((927*Ta)/40000000000 + (927*Tav)/40000000000 - (5991502475140861*(((R25 - (Tav - 25)*(R25/50 -
R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(8*pi*l) + Ta/2 + Tav/2)^2)/29514790517935282585 6000000 + (927*I^2*(R25
- (Tav - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(160000000000*pi*l) +
17239/1000000000)))^n)/(Aa*ca0*roa*(betaa*(Tav - 20) + 1) - As*cs0*ros*(betas*(((R25 - (Tav - 25)*(R25/50 -
R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(4*pi*l) - Tav + 20) - 1)));
```

```
k2=dt*((I^2*(R25 - ((Tav+k1/2) - 25)*(R25/50 - R75/50)) + D*S*as + (56697*D*pi*e*((Ta + 273)^4 - (((R25 - ((Tav+k1/2) -
25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(4*pi*l) + (Tav+k1/2) + 273)^4))/1000000000000 - B1*pi*(A1 +
B2*sin((pi*delta)/180)^m1)*(((R25 - ((Tav+k1/2) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(4*pi*l) - Ta +
(Tav+k1/2))*((2667399193058401*Ta)/73786976294838206464 + (2667399193058401*(Tav+k1/2))/73786976294838206464 -
(8350655098988051*(((R25 - ((Tav+k1/2) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(8*pi*l) + Ta/2 +
(Tav+k1/2)/2)^2)/302231454903657293676544 + (2667399193058401*I^2*(R25 - ((Tav+k1/2) - 25)*(R25/50 -
R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(295147905179352825856*pi*l) +
74/3125)*((D*v*((7711737803321719*y^2)/120892581961462917470617 6 - (5626256942481413*y)/36893488147419103232 +
1293/1000))/(((367*(R25 - ((Tav+k1/2) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(800000*pi*l) +
(367*Ta)/200000 + (367*(Tav+k1/2))/200000 + 1)*((927*Ta)/40000000000 + (927*(Tav+k1/2))/40000000000 -
(5991502475140861*(((R25 - ((Tav+k1/2) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(8*pi*l) + Ta/2 +
(Tav+k1/2)/2)^2)/29514790517935282585600000 0 + (927*I^2*(R25 - ((Tav+k1/2) - 25)*(R25/50 -
R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(160000000000*pi*l) + 17239/1000000000))^n)/(Aa*ca0*roa*(betaa*((Tav+k1/2)
- 20) + 1) - As*cs0*ros*(betas*(((R25 - ((Tav+k1/2) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(4*pi*l) -
(Tav+k1/2) + 20) - 1)));
k3=dt*((I^2*(R25 - ((Tav+k2/2) - 25)*(R25/50 - R75/50)) + D*S*as + (56697*D*pi*e*((Ta + 273)^4 - (((R25 - ((Tav+k2/2) -
25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(4*pi*l) + (Tav+k2/2) + 273)^4))/1000000000000 - B1*pi*(A1 +
B2*sin((pi*delta)/180)^m1)*(((R25 - ((Tav+k2/2) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(4*pi*l) - Ta +
(Tav+k2/2))*((2667399193058401*Ta)/73786976294838206464 + (2667399193058401*(Tav+k2/2))/73786976294838206464 -
(8350655098988051*(((R25 - ((Tav+k2/2) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(8*pi*l) + Ta/2 +
(Tav+k2/2)/2)^2)/302231454903657293676544 + (2667399193058401*I^2*(R25 - ((Tav+k2/2) - 25)*(R25/50 -
R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(295147905179352825856*pi*l) +
74/3125)*((D*v*((7711737803321719*y^2)/120892581961462917470617 6 - (5626256942481413*y)/36893488147419103232 +
1293/1000))/(((367*(R25 - ((Tav+k2/2) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(800000*pi*l) +
(367*Ta)/200000 + (367*(Tav+k2/2))/200000 + 1)*((927*Ta)/40000000000 + (927*(Tav+k2/2))/40000000000 -
(5991502475140861*(((R25 - ((Tav+k2/2) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(8*pi*l) + Ta/2 +
(Tav+k2/2)/2)^2)/29514790517935282585600000 0 + (927*I^2*(R25 - ((Tav+k2/2) - 25)*(R25/50 -
R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(160000000000*pi*l) + 17239/1000000000))^n)/(Aa*ca0*roa*(betaa*((Tav+k2/2)
- 20) + 1) - As*cs0*ros*(betas*(((R25 - ((Tav+k2/2) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(4*pi*l) -
(Tav+k2/2) + 20) - 1)));
k4=dt*((I^2*(R25 - ((Tav+k3) - 25)*(R25/50 - R75/50)) + D*S*as + (56697*D*pi*e*((Ta + 273)^4 - (((R25 - ((Tav+k3) -
25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(4*pi*l) + (Tav+k3) + 273)^4))/1000000000000 - B1*pi*(A1 +
B2*sin((pi*delta)/180)^m1)*(((R25 - ((Tav+k3) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(4*pi*l) - Ta +
(Tav+k3))*((2667399193058401*Ta)/73786976294838206464 + (2667399193058401*(Tav+k3))/73786976294838206464 -
(8350655098988051*(((R25 - ((Tav+k3) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(8*pi*l) + Ta/2 +
(Tav+k3)/2)^2)/302231454903657293676544 + (2667399193058401*I^2*(R25 - ((Tav+k3) - 25)*(R25/50 -
R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(295147905179352825856*pi*l) +
74/3125)*((D*v*((7711737803321719*y^2)/120892581961462917470617 6 - (5626256942481413*y)/36893488147419103232 +
1293/1000))/(((367*(R25 - ((Tav+k3) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(800000*pi*l) +
(367*Ta)/200000 + (367*(Tav+k3))/200000 + 1)*((927*Ta)/40000000000 + (927*(Tav+k3))/40000000000 -
(5991502475140861*(((R25 - ((Tav+k3) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(8*pi*l) + Ta/2 +
(Tav+k3)/2)^2)/29514790517935282585600000 0 + (927*I^2*(R25 - ((Tav+k3) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 -
dc^2) - 1/2))/(160000000000*pi*l) + 17239/1000000000))^n)/(Aa*ca0*roa*(betaa*((Tav+k3) - 20) + 1) -
As*cs0*ros*(betas*(((R25 - ((Tav+k3) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(4*pi*l) - (Tav+k3) + 20)
- 1)));
Tav=Tav+(1/6)*(k1+2*k2+2*k3+k4);
else
k1=dt*((I^2*(R25 - (Tav - 25)*(R25/50 - R75/50)) + D*S*as + (56697*D*pi*e*((Ta + 273)^4 - (((R25 - (Tav - 25)*(R25/50 -
R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(4*pi*l) + Tav + 273)^4))/1000000000000 +
A2*pi*((831136500985 0575*beta^(5/2))/47223664828696 45213696 - 1)*(((R25 - (Tav - 25)*(R25/50 -
R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(4*pi*l) - Ta + Tav)*((2667399193058401*Ta)/73786976294838206464 +
(2667399193058401*Tav)/73786976294838206464 - (8350655098988051*(((R25 - (Tav - 25)*(R25/50 -
R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(8*pi*l) + Ta/2 + Tav/2)^2)/302231454903657293676544 +
(2667399193058401*I^2*(R25 - (Tav - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) -
1/2))/(295147905179352825856*pi*l) + 74/3125)*(-(9807*D^3*(((R25 - (Tav - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 -
dc^2) - 1/2)*I^2)/(4*pi*l) - Ta + Tav)*((7711737803321719*y^2)/120892581961462917470617 6 -
(5626256942481413*y)/36893488147419103232 + 1293/1000)^2*(((R25 - (Tav - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2
- dc^2) - 1/2)*I^2)/(32000*pi*l) + Ta/8000 + Tav/8000 - 143/200))/(1000*(((R25 - (Tav - 25)*(R25/50 -
R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(8*pi*l) + Ta/2 + Tav/2 + 273)*((367*Ta)/200000 + (367*Tav)/200000 +
(367*I^2*(R25 - (Tav - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(800000*pi*l) +
1)^2*((927*Ta)/40000000000 + (927*Tav)/40000000000 - (5991502475140861*(Ta/2 + Tav/2 + (I^2*(R25 - (Tav - 25)*(R25/50 -
R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(8*pi*l))^2)/29514790517935282585600000 0 + (927*I^2*(R25 - (Tav -
25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(160000000000*pi*l) +
17239/1000000000)^2))^m2)/(Aa*ca0*roa*(betaa*(Tav - 20) + 1) - As*cs0*ros*(betas*(((R25 - (Tav - 25)*(R25/50 -
R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(4*pi*l) - Tav + 20) - 1)));
k2=dt*((I^2*(R25 - ((Tav+k1/2) - 25)*(R25/50 - R75/50)) + D*S*as + (56697*D*pi*e*((Ta + 273)^4 - (((R25 - ((Tav+k1/2) -
25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(4*pi*l) + (Tav+k1/2) + 273)^4))/1000000000000 +
A2*pi*((831136500985 0575*beta^(5/2))/47223664828696 45213696 - 1)*(((R25 - ((Tav+k1/2) - 25)*(R25/50 -
R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(4*pi*l) - Ta +
(Tav+k1/2))*((2667399193058401*Ta)/73786976294838206464 + (2667399193058401*(Tav+k1/2))/73786976294838206464 -
(8350655098988051*(((R25 - ((Tav+k1/2) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(8*pi*l) + Ta/2 +
(Tav+k1/2)/2)^2)/302231454903657293676544 + (2667399193058401*I^2*(R25 - ((Tav+k1/2) - 25)*(R25/50 -
R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(295147905179352825856*pi*l) + 74/3125)*(-(9807*D^3*(((R25 - ((Tav+k1/2) -
25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(4*pi*l) - Ta +
(Tav+k1/2))*((7711737803321719*y^2)/120892581961462917470617 6 - (5626256942481413*y)/36893488147419103232 +
```

```
1293/1000)^2*(((R25 - ((Tav+k1/2) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(32000*pi*l) + Ta/8000 +
(Tav+k1/2)/8000 - 143/200))/(1000*(((R25 - ((Tav+k1/2) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) -
1/2)*I^2)/(8*pi*l) + Ta/2 + (Tav+k1/2)/2 + 273)*((367*Ta)/200000 + (367*(Tav+k1/2))/200000 + (367*I^2*(R25 - ((Tav+k1/2) -
25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(800000*pi*l) + 1)^2*((927*Ta)/40000000000 +
(927*(Tav+k1/2))/40000000000 - (5991502475140861*(Ta/2 + (Tav+k1/2)/2 + (I^2*(R25 - ((Tav+k1/2) - 25)*(R25/50 -
R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(8*pi*l))^2)/(29514790517935282585600000 + (927*I^2*(R25 - ((Tav+k1/2) -
25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(160000000000*pi*l) +
17239/1000000000)^2))^m2)/(Aa*ca0*roa*(betaa*((Tav+k1/2) - 20) + 1) - As*cs0*ros*(betas*(((R25 - ((Tav+k1/2) - 25)*(R25/50
- R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(4*pi*l) - (Tav+k1/2) + 20) - 1)));
k3=dt*((I^2*(R25 - ((Tav+k2/2) - 25)*(R25/50 - R75/50)) + D*S*as + (56697*D*pi*e*((Ta + 273)^4 - (((R25 - ((Tav+k2/2) -
25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(4*pi*l) + (Tav+k2/2) + 273)^4))/1000000000000 +
A2*pi*((8311365009850575*beta^(5/2))/4722366482869645213696 - 1)*(((R25 - ((Tav+k2/2) - 25)*(R25/50 -
R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(4*pi*l) - Ta +
(Tav+k2/2))*((2667399193058401*Ta)/73786976294838206464 + (2667399193058401*(Tav+k2/2))/73786976294838206464 -
(8350655098988051*(((R25 - ((Tav+k2/2) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(8*pi*l) + Ta/2 +
(Tav+k2/2)/2)^2)/(302231454903657293676544 + (2667399193058401*I^2*(R25 - ((Tav+k2/2) - 25)*(R25/50 -
R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(29514790517935282585600000*pi*l) + 74/3125)*(-(9807*D^3*(((R25 - ((Tav+k2/2) -
25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(4*pi*l) - Ta +
(Tav+k2/2))*((7711737803321719*y^2)/120892581961462917470617 6 - (5626256942481413*y)/36893488147419103232 +
1293/1000)^2*(((R25 - ((Tav+k2/2) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(32000*pi*l) + Ta/8000 +
(Tav+k2/2)/8000 - 143/200))/(1000*(((R25 - ((Tav+k2/2) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) -
1/2)*I^2)/(8*pi*l) + Ta/2 + (Tav+k2/2)/2 + 273)*((367*Ta)/200000 + (367*(Tav+k2/2))/200000 + (367*I^2*(R25 - ((Tav+k2/2) -
25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(800000*pi*l) + 1)^2*((927*Ta)/40000000000 +
(927*(Tav+k2/2))/40000000000 - (5991502475140861*(Ta/2 + (Tav+k2/2)/2 + (I^2*(R25 - ((Tav+k2/2) - 25)*(R25/50 -
R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(8*pi*l))^2)/(29514790517935282585600000 + (927*I^2*(R25 - ((Tav+k2/2) -
25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(160000000000*pi*l) +
17239/1000000000)^2))^m2)/(Aa*ca0*roa*(betaa*((Tav+k2/2) - 20) + 1) - As*cs0*ros*(betas*(((R25 - ((Tav+k2/2) - 25)*(R25/50
- R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(4*pi*l) - (Tav+k2/2) + 20) - 1)));
k4=dt*((I^2*(R25 - ((Tav+k3) - 25)*(R25/50 - R75/50)) + D*S*as + (56697*D*pi*e*((Ta + 273)^4 - (((R25 - ((Tav+k3) -
25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(4*pi*l) + (Tav+k3) + 273)^4))/1000000000000 +
A2*pi*((8311365009850575*beta^(5/2))/4722366482869645213696 - 1)*(((R25 - ((Tav+k3) - 25)*(R25/50 -
R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(4*pi*l) - Ta + (Tav+k3))*((2667399193058401*Ta)/73786976294838206464
+ (2667399193058401*(Tav+k3))/73786976294838206464 - (8350655098988051*(((R25 - ((Tav+k3) - 25)*(R25/50 -
R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(8*pi*l) + Ta/2 + (Tav+k3)/2)^2)/(302231454903657293676544 +
(2667399193058401*I^2*(R25 - ((Tav+k3) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) -
1/2))/(29514790517935282585600000*pi*l) + 74/3125)*(-(9807*D^3*(((R25 - ((Tav+k3) - 25)*(R25/50 -
R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(4*pi*l) - Ta +
(Tav+k3))*((7711737803321719*y^2)/120892581961462917470617 6 - (5626256942481413*y)/36893488147419103232 +
1293/1000)^2*(((R25 - ((Tav+k3) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(32000*pi*l) + Ta/8000 +
(Tav+k3)/8000 - 143/200))/(1000*(((R25 - ((Tav+k3) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(8*pi*l) +
Ta/2 + (Tav+k3)/2 + 273)*((367*Ta)/200000 + (367*(Tav+k3))/200000 + (367*I^2*(R25 - ((Tav+k3) - 25)*(R25/50 -
R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(800000*pi*l) + 1)^2*((927*Ta)/40000000000 + (927*(Tav+k3))/40000000000 -
(5991502475140861*(Ta/2 + (Tav+k3)/2 + (I^2*(R25 - ((Tav+k3) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) -
1/2))/(8*pi*l))^2)/(29514790517935282585600000 + (927*I^2*(R25 - ((Tav+k3) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2
- dc^2) - 1/2))/(160000000000*pi*l) + 17239/1000000000)^2))^m2)/(Aa*ca0*roa*(betaa*((Tav+k3) - 20) + 1) -
As*cs0*ros*(betas*(((R25 - ((Tav+k3) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(4*pi*l) - (Tav+k3) + 20)
- 1)));
Tav=Tav+(1/6)*(k1+2*k2+2*k3+k4);
end
end
Ts=((R25 - (Tav - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(4*pi*l) + Tav;
Tj=2*Tav-Ts;
err=80-Tj;
I=I+s.*err;
err=abs(80-Tj);

end
%proračunati dinamički DTO
Ir=I;
```

PRILOG O

MATLAB KOD PRORAČUNA DINAMIČKOG DTO-a METODA RUNGE-KUTTA ČETVRTOG REDA UZ $T_j=T_{MAX}$ IEEE 738 (ZA ACSR 240/40 mm^2)

```
clear all;
close all;
R75=1.4633e-04; %izmjenični otpor vodiča pri 25 ºC
R25=1.2216e-04; %izmjenični otpor vodiča pri 75 ºC
e=0.9;%koeficijent emisije
as=0.9;%koeficijent apsorpcije Sunčevog zračenja
beta=0;%kut inklinacije vodiča prema horizontalnoj ravnini
y=0;%nadmorska visina
d=3.45*10^-3;%promjer žice vanjskog sloja
D=21.9*10^-3;%vanjski promjer vodiča
Aa=243.1*10^-6;%presjek aluminijskog dijela alučeličnog vodiča
As=39.5*10^-6;%presjek čeličnog dijela alučeličnog vodiča
roa=2703;%gustoća aluminija
ros=7780;%gustoća čelika
ca0=897;%specifični toplinski kapacitet aluminijskog dijela alučeličnog vodiča pri 20°C
cs0=481;%specifični toplinski kapacitet čeličnog dijela alučeličnog vodiča pri 20°C(cs0)
betaa=3.8*10^-4;%temperaturni koeficijent promjene specifičnog toplinskog kapaciteta aluminijskog dijela alučeličnog vodiča
betas=1*10^-4;%temperaturni koeficijent promjene specifičnog toplinskog kapaciteta čeličnog dijela alučeličnog vodiča
Rf=d/(2*(D-d));%proračun hrapavosti
dt=30;%korak vremena
s=5;%koeficijent radi proračuna greške
l=1;%efektivna termalna radijalna vodljivost
dc=8.04*10^-3;%promjer čelične jezgre
gg=600;%vremenski interval tf
Tcin=0;%početna temperatura vodiča
v=0;%brzina vjetra
delta=90;%kut vjetra
Ta=-20;%temperatura okoline
S=0;%intenzitet Sunčeva zračenja
I=1000;%početna vrijednost struje
while(err1>0.0001)
    Tav=Tcin;
for t1=dt:dt:gg;
Ts=((R25 - (Tav - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(4*pi*l) + Tav;
Kv=1.194-cos(delta*(pi/180))+0.194*cos(2*delta*(pi/180))+0.368*sin(2*delta*(pi/180));
Tf=(Ts+Ta)/2;
mif=(1.458*10^-6*((Tf+273)^1.5))/(Tf+383.4);
rof=(1.293-1.525*10^-4*y+6.379*10^-9*y^2)/(1+0.00367*Tf);
lambdaf=2.424*10^-2+7.477*10^-5*Tf-4.407*10^-9*(Tf^2);
Nu=(D*rof*v)/mif;
Pkonv1=Kv*(1.01+1.35*(Nu^0.52))*lambdaf*(Ts-Ta);
Pkonv2=Kv*0.754*(Nu^0.6)*lambdaf*(Ts-Ta);
Pkonv3=3.645*(D^0.75)*(rof^0.5)*((Ts-Ta)^1.25);
  if(imag(Pkonv1)~=0)%zaštita od kompleksnog broja
      Pkonv1=-10^99;
    end
    if(imag(Pkonv2)~=0)%zaštita od kompleksnog broja
      Pkonv2=-10^99;
    end
  if(imag(Pkonv3)~=0)%zaštita od kompleksnog broja
      Pkonv3=-10^99;
  end
if(Pkonv1>Pkonv2 && Pkonv1>Pkonv3)
k1=dt*((I^2*(R25 - (Tav - 25)*(R25/50 - R75/50)) + D*S*as - (89*D*e*((((R25 - (Tav - 25)*(R25/50 -
R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(400*pi*l) + Tav/100 + 273/100)^4 - (Ta/100 + 273/100)^4))/5 -
((27*((2361183241434822606848*D*v*((7711737803321719*y^2)/120892581961462917470617 6 -
(5626256942481413*y)/36893488147419103232 + 1293/1000)*(((R25 - (Tav - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 -
dc^2) - 1/2)*I^2)/(8*pi*l) + Ta/2 + Tav/2 + 1917/5))/(3442605166011971*(Ta/2 + Tav/2 + (I^2*(R25 - (Tav - 25)*(R25/50 -
R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(8*pi*l) + 273)^(3/2)*((367*(R25 - (Tav - 25)*(R25/50 -
R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(800000*pi*l) + (367*Ta)/200000 + (367*Tav)/200000 + 1)))^(13/25))/20 +
101/100)*(((R25 - (Tav - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(4*pi*l) - Ta +
Tav)*((97*cos((pi*delta)/90))/500 - cos((pi*delta)/180) + (46*sin((pi*delta)/90))/125 +
597/500)*((1379263054391263*Ta)/36893488147419103232 + (1379263054391263*Tav)/36893488147419103232 -
(5327736087041671*(((R25 - (Tav - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(8*pi*l) + Ta/2 +
Tav/2)^2)/120892581961462917470617 6 + (1379263054391263*I^2*(R25 - (Tav - 25)*(R25/50 -
R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(1475739525896764129 28*pi*l) + 303/12500))/(Aa*ca0*roa*(betaa*(Tav - 20) +
1) - As*cs0*ros*(betas*(((R25 - (Tav - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(4*pi*l) - Tav + 20) - 1)));
```

k2=dt*((I^2*(R25 - ((Tav+1/2*k1) - 25)*(R25/50 - R75/50)) + D*S*as - (89*D*e*((((R25 - ((Tav+1/2*k1) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(400*pi*l) + (Tav+1/2*k1)/100 + 273/100)^4 - (Ta/100 + 273/100)^4))/5 - ((27*((2361183241434822606848*D*v*((7711737803321719*y^2)/120892581961462917470617 6 - (5626256942481413*y)/36893488147419103232 + 1293/1000)*(((R25 - ((Tav+1/2*k1) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(8*pi*l) + Ta/2 + (Tav+1/2*k1)/2 + 1917/5))/(3442605166011971*(Ta/2 + (Tav+1/2*k1)/2 + (I^2*(R25 - ((Tav+1/2*k1) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(8*pi*l) + 273)^(3/2)*((367*(R25 - ((Tav+1/2*k1) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(800000*pi*l) + (367*Ta)/200000 + (367*(Tav+1/2*k1))/200000 + 1)))^(13/25))/20 + 101/100)*(((R25 - ((Tav+1/2*k1) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(4*pi*l) - Ta + (Tav+1/2*k1))*((97*cos((pi*delta)/90))/500 - cos((pi*delta)/180) + (46*sin((pi*delta)/90))/125 + 597/500)*((1379263054391263*Ta)/36893488147419103232 + (1379263054391263*(Tav+1/2*k1))/36893488147419103232 - (5327736087041671*(((R25 - ((Tav+1/2*k1) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(8*pi*l) + Ta/2 + (Tav+1/2*k1)/2)^2)/1208925819614629174706176 + (1379263054391263*I^2*(R25 - ((Tav+1/2*k1) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(1475739525896764129 28*pi*l) + 303/12500))/(Aa*ca0*roa*(betaa*((Tav+1/2*k1) - 20) + 1) - As*cs0*ros*(betas*(((R25 - ((Tav+1/2*k1) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(4*pi*l) - (Tav+1/2*k1) + 20) - 1)));
k3=dt*((I^2*(R25 - ((Tav+1/2*k2) - 25)*(R25/50 - R75/50)) + D*S*as - (89*D*e*((((R25 - ((Tav+1/2*k2) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(400*pi*l) + (Tav+1/2*k2)/100 + 273/100)^4 - (Ta/100 + 273/100)^4))/5 - ((27*((2361183241434822606848*D*v*((7711737803321719*y^2)/120892581961462917470617 6 - (5626256942481413*y)/36893488147419103232 + 1293/1000)*(((R25 - ((Tav+1/2*k2) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(8*pi*l) + Ta/2 + (Tav+1/2*k2)/2 + 1917/5))/(3442605166011971*(Ta/2 + (Tav+1/2*k2)/2 + (I^2*(R25 - ((Tav+1/2*k2) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(8*pi*l) + 273)^(3/2)*((367*(R25 - ((Tav+1/2*k2) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(800000*pi*l) + (367*Ta)/200000 + (367*(Tav+1/2*k2))/200000 + 1)))^(13/25))/20 + 101/100)*(((R25 - ((Tav+1/2*k2) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(4*pi*l) - Ta + (Tav+1/2*k2))*((97*cos((pi*delta)/90))/500 - cos((pi*delta)/180) + (46*sin((pi*delta)/90))/125 + 597/500)*((1379263054391263*Ta)/36893488147419103232 + (1379263054391263*(Tav+1/2*k2))/36893488147419103232 - (5327736087041671*(((R25 - ((Tav+1/2*k2) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(8*pi*l) + Ta/2 + (Tav+1/2*k2)/2)^2)/1208925819614629174706176 + (1379263054391263*I^2*(R25 - ((Tav+1/2*k2) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(1475739525896764129 28*pi*l) + 303/12500))/(Aa*ca0*roa*(betaa*((Tav+1/2*k2) - 20) + 1) - As*cs0*ros*(betas*(((R25 - ((Tav+1/2*k2) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(4*pi*l) - (Tav+1/2*k2) + 20) - 1)));
k4=dt*((I^2*(R25 - ((Tav+k3) - 25)*(R25/50 - R75/50)) + D*S*as - (89*D*e*((((R25 - ((Tav+k3) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(400*pi*l) + (Tav+k3)/100 + 273/100)^4 - (Ta/100 + 273/100)^4))/5 - ((27*((2361183241434822606848*D*v*((7711737803321719*y^2)/120892581961462917470617 6 - (5626256942481413*y)/36893488147419103232 + 1293/1000)*(((R25 - ((Tav+k3) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(8*pi*l) + Ta/2 + (Tav+k3)/2 + 1917/5))/(3442605166011971*(Ta/2 + (Tav+k3)/2 + (I^2*(R25 - ((Tav+k3) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(8*pi*l) + 273)^(3/2)*((367*(R25 - ((Tav+k3) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(800000*pi*l) + (367*Ta)/200000 + (367*(Tav+k3))/200000 + 1)))^(13/25))/20 + 101/100)*(((R25 - ((Tav+k3) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(4*pi*l) - Ta + (Tav+k3))*((97*cos((pi*delta)/90))/500 - cos((pi*delta)/180) + (46*sin((pi*delta)/90))/125 + 597/500)*((1379263054391263*Ta)/36893488147419103232 + (1379263054391263*(Tav+k3))/36893488147419103232 - (5327736087041671*(((R25 - ((Tav+k3) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(8*pi*l) + Ta/2 + (Tav+k3)/2)^2)/1208925819614629174706176 + (1379263054391263*I^2*(R25 - ((Tav+k3) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(1475739525896764129 28*pi*l) + 303/12500))/(Aa*ca0*roa*(betaa*((Tav+k3) - 20) + 1) - As*cs0*ros*(betas*(((R25 - ((Tav+k3) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(4*pi*l) - (Tav+k3) + 20) - 1)));
Tav=Tav+(1/6)*(k1+2*k2+2*k3+k4);
else if(Pkonv2>=Pkonv1 && Pkonv2>=Pkonv3)
k1=dt*((I^2*(R25 - (Tav - 25)*(R25/50 - R75/50)) + D*S*as - (89*D*e*((((R25 - (Tav - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(400*pi*l) + Tav/100 + 273/100)^4 - (Ta/100 + 273/100)^4))/5 - (((R25 - (Tav - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(4*pi*l) - Ta + Tav)*((36569*cos((pi*delta)/90))/250000 - (377*cos((pi*delta)/180))/500 + (8671*sin((pi*delta)/90))/31250 + 225069/250000)*((1379263054391263*Ta)/36893488147419103232 + (1379263054391263*Tav)/36893488147419103232 - (5327736087041671*(((R25 - (Tav - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(8*pi*l) + Ta/2 + Tav/2)^2)/1208925819614629174706176 + (1379263054391263*I^2*(R25 - (Tav - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(1475739525896764129 28*pi*l) + 303/12500)*((2361183241434822606848*D*v*((7711737803321719*y^2)/120892581961462917470617 6 - (5626256942481413*y)/36893488147419103232 + 1293/1000)*(((R25 - (Tav - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(8*pi*l) + Ta/2 + Tav/2 + 1917/5))/(3442605166011971*(Ta/2 + Tav/2 + (I^2*(R25 - (Tav - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(8*pi*l) + 273)^(3/2)*((367*(R25 - (Tav - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(800000*pi*l) + (367*Ta)/200000 + (367*Tav)/200000 + 1)))^(3/5))/(Aa*ca0*roa*(betaa*(Tav - 20) + 1) - As*cs0*ros*(betas*(((R25 - (Tav - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(4*pi*l) - Tav + 20) - 1)));
k2=dt*((I^2*(R25 - ((Tav+1/2*k1) - 25)*(R25/50 - R75/50)) + D*S*as - (89*D*e*((((R25 - ((Tav+1/2*k1) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(400*pi*l) + (Tav+1/2*k1)/100 + 273/100)^4 - (Ta/100 + 273/100)^4))/5 - (((R25 - ((Tav+1/2*k1) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(4*pi*l) - Ta + (Tav+1/2*k1))*((36569*cos((pi*delta)/90))/250000 - (377*cos((pi*delta)/180))/500 + (8671*sin((pi*delta)/90))/31250 + 225069/250000)*((1379263054391263*Ta)/36893488147419103232 + (1379263054391263*(Tav+1/2*k1))/36893488147419103232 - (5327736087041671*(((R25 - ((Tav+1/2*k1) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(8*pi*l) + Ta/2 + (Tav+1/2*k1)/2)^2)/1208925819614629174706176 + (1379263054391263*I^2*(R25 - ((Tav+1/2*k1) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(1475739525896764129 28*pi*l) + 303/12500)*((2361183241434822606848*D*v*((7711737803321719*y^2)/120892581961462917470617 6 - (5626256942481413*y)/36893488147419103232 + 1293/1000)*(((R25 - ((Tav+1/2*k1) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(8*pi*l) + Ta/2 + (Tav+1/2*k1)/2 + 1917/5))/(3442605166011971*(Ta/2 + (Tav+1/2*k1)/2 + (I^2*(R25 - ((Tav+1/2*k1) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(8*pi*l) +

```
273)^(3/2)*((367*(R25 - ((Tav+1/2*k1) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(800000*pi*l) +
(367*Ta)/200000 + (367*(Tav+1/2*k1))/200000 + 1)))^(3/5))/(Aa*ca0*roa*(betaa*((Tav+1/2*k1) - 20) + 1) -
As*cs0*ros*(betas*(((R25 - ((Tav+1/2*k1) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(4*pi*l) -
(Tav+1/2*k1) + 20) - 1)));
k3=dt*((I^2*(R25 - ((Tav+1/2*k2) - 25)*(R25/50 - R75/50)) + D*S*as - (89*D*e*((((R25 - ((Tav+1/2*k2) - 25)*(R25/50 -
R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(400*pi*l) + (Tav+1/2*k2)/100 + 273/100)^4 - (Ta/100 + 273/100)^4))/5 -
(((R25 - ((Tav+1/2*k2) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(4*pi*l) - Ta +
(Tav+1/2*k2))*((36569*cos((pi*delta)/90))/250000 - (377*cos((pi*delta)/180))/500 + (8671*sin((pi*delta)/90))/31250 +
225069/250000)*((1379263054391263*Ta)/36893488147419103232 +
(1379263054391263*(Tav+1/2*k2))/36893488147419103232 - (5327736087041671*(((R25 - ((Tav+1/2*k2) - 25)*(R25/50 -
R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(8*pi*l) + Ta/2 + (Tav+1/2*k2)/2)^2)/12089258196146291747061 76 +
(1379263054391263*I^2*(R25 - ((Tav+1/2*k2) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) -
1/2))/(1475739525896764129 28*pi*l) +
303/12500)*((2361183241434822606848*D*v*((7711737803321719*y^2)/12089258196146291747061 76 -
(5626256942481413*y)/36893488147419103232 + 1293/1000)*(((R25 - ((Tav+1/2*k2) - 25)*(R25/50 -
R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(8*pi*l) + Ta/2 + (Tav+1/2*k2)/2 + 1917/5))/(3442605166011971*(Ta/2 +
(Tav+1/2*k2)/2 + (I^2*(R25 - ((Tav+1/2*k2) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(8*pi*l) +
273)^(3/2)*((367*(R25 - ((Tav+1/2*k2) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(800000*pi*l) +
(367*Ta)/200000 + (367*(Tav+1/2*k2))/200000 + 1)))^(3/5))/(Aa*ca0*roa*(betaa*((Tav+1/2*k2) - 20) + 1) -
As*cs0*ros*(betas*(((R25 - ((Tav+1/2*k2) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(4*pi*l) -
(Tav+1/2*k2) + 20) - 1)));
k4=dt*((I^2*(R25 - ((Tav+k3) - 25)*(R25/50 - R75/50)) + D*S*as - (89*D*e*((((R25 - ((Tav+k3) - 25)*(R25/50 -
R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(400*pi*l) + (Tav+k3)/100 + 273/100)^4 - (Ta/100 + 273/100)^4))/5 - (((R25 -
((Tav+k3) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(4*pi*l) - Ta +
(Tav+k3))*((36569*cos((pi*delta)/90))/250000 - (377*cos((pi*delta)/180))/500 + (8671*sin((pi*delta)/90))/31250 +
225069/250000)*((1379263054391263*Ta)/36893488147419103232 +
(1379263054391263*(Tav+k3))/36893488147419103232 - (5327736087041671*(((R25 - ((Tav+k3) - 25)*(R25/50 -
R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(8*pi*l) + Ta/2 + (Tav+k3)/2)^2)/12089258196146291747061 76 +
(1379263054391263*I^2*(R25 - ((Tav+k3) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) -
1/2))/(1475739525896764129 28*pi*l) +
303/12500)*((2361183241434822606848*D*v*((7711737803321719*y^2)/12089258196146291747061 76 -
(5626256942481413*y)/36893488147419103232 + 1293/1000)*(((R25 - ((Tav+k3) - 25)*(R25/50 -
R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(8*pi*l) + Ta/2 + (Tav+k3)/2 + 1917/5))/(3442605166011971*(Ta/2 +
(Tav+k3)/2 + (I^2*(R25 - ((Tav+k3) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(8*pi*l) +
273)^(3/2)*((367*(R25 - ((Tav+k3) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(800000*pi*l) +
(367*Ta)/200000 + (367*(Tav+k3))/200000 + 1)))^(3/5))/(Aa*ca0*roa*(betaa*((Tav+k3) - 20) + 1) - As*cs0*ros*(betas*(((R25 -
((Tav+k3) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(4*pi*l) - (Tav+k3) + 20) - 1)));
Tav=Tav+(1/6)*(k1+2*k2+2*k3+k4);
else
k1=dt*((I^2*(R25 - (Tav - 25)*(R25/50 - R75/50)) + D*S*as - (89*D*e*((((R25 - (Tav - 25)*(R25/50 -
R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(400*pi*l) + Tav/100 + 273/100)^4 - (Ta/100 + 273/100)^4))/5 -
(729*D^(3/4)*(((7711737803321719*y^2)/12089258196146291747061 76 - (5626256942481413*y)/36893488147419103232 +
1293/1000)/((367*(R25 - (Tav - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(800000*pi*l) +
(367*Ta)/200000 + (367*Tav)/200000 + 1))^(1/2)*(((R25 - (Tav - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) -
1/2)*I^2)/(4*pi*l) - Ta + Tav)^(5/4))/200)/(Aa*ca0*roa*(betaa*(Tav - 20) + 1) - As*cs0*ros*(betas*(((R25 - (Tav - 25)*(R25/50 -
R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(4*pi*l) - Tav + 20) - 1)));
k2=dt*((I^2*(R25 - ((Tav+1/2*k1) - 25)*(R25/50 - R75/50)) + D*S*as - (89*D*e*((((R25 - ((Tav+1/2*k1) - 25)*(R25/50 -
R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(400*pi*l) + (Tav+1/2*k1)/100 + 273/100)^4 - (Ta/100 + 273/100)^4))/5 -
(729*D^(3/4)*(((7711737803321719*y^2)/12089258196146291747061 76 - (5626256942481413*y)/36893488147419103232 +
1293/1000)/((367*(R25 - ((Tav+1/2*k1) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(800000*pi*l) +
(367*Ta)/200000 + (367*(Tav+1/2*k1))/200000 + 1))^(1/2)*(((R25 - ((Tav+1/2*k1) - 25)*(R25/50 -
R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(4*pi*l) - Ta + (Tav+1/2*k1))^(5/4))/200)/(Aa*ca0*roa*(betaa*((Tav+1/2*k1) -
20) + 1) - As*cs0*ros*(betas*(((R25 - ((Tav+1/2*k1) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(4*pi*l) -
(Tav+1/2*k1) + 20) - 1)));
k3=dt*(I^2*(R25 - ((Tav+1/2*k2) - 25)*(R25/50 - R75/50)) + D*S*as - (89*D*e*((((R25 - ((Tav+1/2*k2) - 25)*(R25/50 -
R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(400*pi*l) + (Tav+1/2*k2)/100 + 273/100)^4 - (Ta/100 + 273/100)^4))/5 -
(729*D^(3/4)*(((7711737803321719*y^2)/12089258196146291747061 76 - (5626256942481413*y)/36893488147419103232 +
1293/1000)/((367*(R25 - ((Tav+1/2*k2) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(800000*pi*l) +
(367*Ta)/200000 + (367*(Tav+1/2*k2))/200000 + 1))^(1/2)*(((R25 - ((Tav+1/2*k2) - 25)*(R25/50 -
R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(4*pi*l) - Ta + (Tav+1/2*k2))^(5/4))/200)/(Aa*ca0*roa*(betaa*((Tav+1/2*k2) -
20) + 1) - As*cs0*ros*(betas*(((R25 - ((Tav+1/2*k2) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(4*pi*l) -
(Tav+1/2*k2) + 20) - 1));
k4=dt*((I^2*(R25 - ((Tav+k3) - 25)*(R25/50 - R75/50)) + D*S*as - (89*D*e*((((R25 - ((Tav+k3) - 25)*(R25/50 -
R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(400*pi*l) + (Tav+k3)/100 + 273/100)^4 - (Ta/100 + 273/100)^4))/5 -
(729*D^(3/4)*(((7711737803321719*y^2)/12089258196146291747061 76 - (5626256942481413*y)/36893488147419103232 +
1293/1000)/((367*(R25 - ((Tav+k3) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(800000*pi*l) +
(367*Ta)/200000 + (367*(Tav+k3))/200000 + 1))^(1/2)*(((R25 - ((Tav+k3) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 -
dc^2) - 1/2)*I^2)/(4*pi*l) - Ta + (Tav+k3))^(5/4))/200)/(Aa*ca0*roa*(betaa*((Tav+k3) - 20) + 1) - As*cs0*ros*(betas*(((R25 -
((Tav+k3) - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(4*pi*l) - (Tav+k3) + 20) - 1)));
Tav=Tav+(1/6)*(k1+2*k2+2*k3+k4);
end
end
end
Tj=Tav - (I^2*(R25 - (Tav - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(4*pi*l);
err=80-Tj;
```

```
I=I+s.*err;
err1=abs(80-Tj);
i=i+1;
end
```

PRILOG P

MATLAB KOD PRORAČUNA DINAMIČKOG DTO-a METODA DIREKTNE KOLOKACIJE UZ $T_j=T_{MAX}$ CIGRE 601 (ZA ACSR 240/40 mm^2)

Glavni program

```
%ulazni podaci
R75=1.4633e-04; %izmjenični otpor vodiča pri 25 ºC
R25=1.2216e-04; %izmjenični otpor vodiča pri 75 ºC
e=0.9;%koeficijent emisije
as=0.9;%koeficijent apsorpcije Sunčevog zračenja
beta=0;%kut inklinacije vodiča prema horizontalnoj ravnini
y=0;%nadmorska visina
d=3.45*10^-3;%promjer žice vanjskog sloja
D=21.9*10^-3;%vanjski promjer vodiča
Aa=243.1*10^-6;%presjek aluminijskog dijela alučeličnog vodiča
As=39.5*10^-6;%presjek čeličnog dijela alučeličnog vodiča
roa=2703;%gustoća aluminija
ros=7780;%gustoća čelika
ca0=897;%specifični toplinski kapacitet aluminijskog dijela alučeličnog vodiča pri 20°C
cs0=481;%specifični toplinski kapacitet čeličnog dijela alučeličnog vodiča pri 20°C
betaa=3.8*10^-4;%temperaturni koeficijent promjene specifičnog toplinskog kapaciteta aluminijskog dijela alučeličnog vodiča
betas=1*10^-4;% temperaturni koeficijent promjene specifičnog toplinskog kapaciteta čeličnog dijela alučeličnog vodiča
l=1;%efektivna termalna radijalna vodljivost
dc=8.04*10^-3;%promjer čelične jezgre
gg=600;%vremenski interval tf
Tcin=0;%početna temperatura vodiča
v=0;%brzina vjetra
delta=90;%kut vjetra
Ta=-20;%temperatura okoline
S=0;%intenzitet Sunčeva zračenja
dt=30;%korak vremena
vt=0:dt:gg;%vektor vremena
%definiranje vektora ulaznih podataka za druge funkcije
ul=[R25 R75 e as D Aa As roa ros ca0 cs0 betaa betas y S Ta Tcin dt gg delta v d beta dc l];%ulaz za funkciju ogranicenja
l=[dt gg l dc D R25 R75];%ulaz za funkciju cilja
%pretpostavljanje početnog uvjeta u optimizacijskog procesu nelinearnog programiranja
n=length(vt); %broj točaka u diskretizaciji vremena
x0=Tcin*ones(n+1,1);%pretpostavaka temperature vodiča u stanjima od 1 do N
x0(n+1)=1800;%pretpostavka vrijednosti struje I
%rješavanje problema optimalnog upravljanja (nelinearnog programiranja)
options = optimoptions(@fmincon,'Algorithm','sqp');%aktivacija SQP algoritma
[x,fval]=fmincon(@(x)fcilja(x,l),x0,[],[],[],[],[],[],@(x)ogranicenja_novo(x,ul),options);%rješavanje problema nelinearnog
programiranja
```

Funkcija ograničenja

```
function [c, ceq] = ogranicenja(x,ul)
R25=ul(1);R75=ul(2);e=ul(3);as=ul(4);D=ul(5);Aa=ul(6);As=ul(7);roa=ul(8);ros=ul(9);ca0=ul(10);cs0=ul(11);betaa=ul(12);betas=u
l(13);y=ul(14);S=ul(15);Ta=ul(16);Tcin=ul(17);dt=ul(18);gg=ul(19);delta=ul(20);v=ul(21);d=ul(22);beta=ul(23);dc=ul(24);l=ul(25);
Rf=d/(2*(D-d));%proračun hrapavosti
vt=0:dt:gg;%vektor vremena
nu=length(vt);%veličina vektora vremena
Pkonv=1:1:nu-1;
Ps=1:1:nu-1;
Prad=1:1:nu-1;
mcp=1:1:nu-1;
%definiranje ograničenja tipa jednakosti (ceq) i nejednakosti(c)
ceq=ones(nu,1);%broj ograničenja tipa jednakosti
%pomoćna definiranja
Tav=(x(1:nu-1));
Tnov=x(2:nu);
I=x(nu+1);

for i=1:1:nu-1;
```

```
Tx=Tnov(i);
if(delta>=0 && delta<=24)
   A1=0.42;
   B2=0.68;
   m1=1.08;
else
   A1=0.42;
   B2=0.58;
   m1=0.9;
end;
Ts=((R25 - (Tx - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(4*pi*l) + Tx;
Tf=(Ts+Ta)/2;%definiranje temperature filma
ni=((17.239+4.635*10^-2*Tf-2.03*10^-5*(Tf^2))*10^-6)/((1.293-1.525*10^-4*y+6.379*10^-9*(y^2))/(1+0.00367*Tf));%definiranje
kinematske viskoznosti
Re=(v*D)/ni;%definiranje Reynoldsovog broja
Gr=(D^3*(Ts-Ta)*9.807)/((Tf+273)*(ni^2));%definiranje Grashofovog broja
Pr=0.715-2.5*10^-4*Tf;%definiranje Prandtlovog broj
c=Gr*Pr;
lambda=2.368*10^-2+(7.23*10^-5)*Tf-(2.763*10^-8)*Tf^2;%definiranje termalne vodljivosti
if(Rf<=0.05 && Re>2.65*10^3)
       B1=0.178;
       n=0.633;
     else if(Rf>0.05 && Re>(2.65*10^3))
     B1=0.048;
     n=0.8;

       else if (Re<=2.65*10^3)
       B1=0.641;
       n=0.471;
            end
        end
end
if(c<=10^2)
   A2=1.02;
   m2=0.148;
else if (c>100 && c<=10^4)
   A2=0.85;
   m2=0.188;
   else if (c>10^4 && c<=10^7)
         A2=0.48;
         m2=0.25;
       else if (c>10^7)
         A2=0.125;
         m2=0.333;
          end
       end
   end
end
Nu1=(B1*(Re^n))*(A1+B2*((sin(delta*(pi/180)))^m1));%prisilno za kut vjetra <=90 stupnjeva
Nu2=A2*(c^m2)*(1-1.76*10^-6*(beta^2.5));%prirodno za inklinaciju < 80 stupnjeva
if(imag(Nu1)~=0)%zaštita od kompleksnog broja
     Nu1=-10^99;
end
if(imag(Nu2)~=0)%zaštita od kompleksnog broja
      Nu2=-10^99;
end
if(Nu1>=Nu2)
Pkonv(i)=pi*lambda*(Ts-Ta)*Nu1;
else
Pkonv(i)=pi*lambda*(Ts-Ta)*Nu2;
end
Ps(i)=D.*S.*as;
Tj=Tx - (I^2*(R25 - (Tx - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(4*pi*l);
Prad(i)=17.8.*D.*e.*(((Ts+273)/100).^4-((Ta+273)/100).^4);
mcp(i)=Aa.*roa.*ca0.*(1+betaa.*(Tx-20))+As.*ros.*cs0.*(1+betas.*(Tj-20)); %toplinski kapacitet vodiča
end
Pkonv=Pkonv';
Prad=Prad';
mcp=mcp';
Rac=((R75-R25)./(75-25)).*(Tnov-25)+R25;
PJ=I.*I.*Rac;
%ograničenja diferencijalne jednadžbe
a=(Ps'+PJ-Pkonv-Prad)./mcp-((Tnov-Tav)./dt);
ceq(1)=x(1)-Tcin;%ograničenje početnog uvjeta
ceq(2:nu)=a;
```

```
%definiranje ograničenja tipa nejednakosti
c(1:nu)=x(1:nu)-(I^2*(R25-(x(1:nu)-25).*(R25/50 - R75/50)).*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))./(4*pi*I)-80;
c(nu+1)=-x(nu+1);
end
```

Funkcija cilja:

```
function f = fcilja(x,vri)
%pridruživanje ulaznih podataka dobivenih iz glavnog programa
dt=vri(1);gg=vri(2);I=vri(3);dc=vri(4);D=vri(5);R25=vri(6);R75=vri(7);
vt=0:dt:gg;%vektor vremena
n=length(vt);
I=x(n+1);
Tav=x(n);
a=Tav - (I^2*(R25 - (Tav - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(4*pi*I);
%definiranje funkcije cilja
f=(a-80)^2;
end
```

PRILOG R

MATLAB KOD PRORAČUNA DINAMIČKOG DTO-a METODA DIREKTNE KOLOKACIJE UZ $T_j=T_{MAX}$ IEEE 738 (ZA ACSR 240/40 mm^2)

Glavni program:

```
%ulazni podaci
R75=1.4633e-04; %izmjenični otpor vodiča pri 25ºC
R25=1.2216e-04; %izmjenični otpor vodiča pri 75ºC
e=0.9;%koeficijent emisije
as=0.9;%koeficijent apsorpcije Sunčevog zračenja
beta=0;%kut inklinacije vodiča prema horizontalnoj ravnini
y=0;%nadmorska visina
D=21.9*10^-3;%vanjski promjer vodiča
Aa=243.1*10^-6;%presjek aluminijskog dijela alučeličnog vodiča
As=39.5*10^-6;%presjek čeličnog dijela alučeličnog vodiča
roa=2703;%gustoća aluminija
ros=7780;%gustoća čelika
ca0=897;%specifični toplinski kapacitet aluminijskog dijela alučeličnog vodiča pri 20°C
cs0=481;%specifični toplinski kapacitet čeličnog dijela alučeličnog vodiča pri 20°C(cs0)
betaa=3.8*10^-4;%temperaturni koeficijent promjene specifičnog toplinskog kapaciteta aluminijskog dijela alučeličnog vodiča
betas=1*10^-4;% temperaturni koeficijent promjene specifičnog toplinskog kapaciteta čeličnog dijela alučeličnog vodiča
I=1;%efektivna termalna radijalna vodljivost
dc=8.04*10^-3;%promjer čelične jezgre
gg=600;%vremenski interval tf
Tcin=0;%početna temperatura vodiča
v=0;%brzina vjetra
delta=90;%kut vjetra
Ta=-20;%temperatura okoline
S=0;%intenzitet Sunčeva zračenja
dt=30;%korak vremena
vt=0:dt:gg;%vektor vremena
%definiranje vektora ulaznih podataka za druge funkcije
ul=[R25 R75 e as D Aa As roa ros ca0 cs0 betaa betas y v delta S Ta Tcin dt gg I dc];%ulaz za funkciju ogranicenja
I=[dt gg I dc D R25 R75];%ulaz za funkciju cilja
vt=0:dt:gg;%vektor vremena
%pretpostavljanje početnog uvjeta u optimizacijskog procesu nelinearnog programiranja
n=length(vt); %broj točaka u diskretizaciji vremena
x0=Tcin*ones(n+1,1);%pretpostavaka temperature vodiča u stanjima od 1 do N
x0(n+1)=100;%pretpostavka vrijednosti struje I
%rješavanje problema optimalnog upravljanja (nelinearnog programiranja)
options = optimoptions(@fmincon,'Algorithm','sqp');%aktivacija SQP algoritma
[x,fval]=fmincon(@(x)fcilja(x,I),x0,[],[],[],[],[],[],@(x)ogranicenja_novo(x,ul),options);%rješavanje problema nelinearnog
programiranja
```

Funkcija ograničenja:

```
function [c, ceq] = ogranicenja(x,ul)
R25=ul(1);R75=ul(2);e=ul(3);as=ul(4);D=ul(5);Aa=ul(6);As=ul(7);roa=ul(8);ros=ul(9);ca0=ul(10);cs0=ul(11);betaa=ul(12);betas=u
l(13);y=ul(14);v=ul(15);delta=ul(16);S=ul(17);Ta=ul(18);Tcin=ul(19);dt=ul(20);gg=ul(21);I=ul(22);dc=ul(23);
%definiranje vektora vremena i veličine problema
vt=0:dt:gg;%vektor vremena
nu=length(vt);%veličina vektora vremena
```

```
%pomoćna definiranja
Tc=(x(1:nu-1));
Tnov=x(2:nu);
I=x(nu+1);
Pkonv=1:1:nu-1;
Ps=1:1:nu-1;
Prad=1:1:nu-1;
mcp=1:1:nu-1;
for i=1:1:nu-1;
Tx=Tnov(i);
Ts=((R25 - (Tx - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2)*I^2)/(4*pi*l) + Tx;
Kv=1.194-cos(delta*(pi/180))+0.194*cos(2*delta*(pi/180))+0.368*sin(2*delta*(pi/180));
Tf=(Ts+Ta)/2;
mif=(1.458*10^-6*((Tf+273)^1.5))/(Tf+383.4);
rof=(1.293-1.525*10^-4*y+6.379*10^-9*y^2)/(1+0.00367*Tf);
lambdaf=2.424*10^-2+7.477*10^-5*Tf-4.407*10^-9*(Tf^2);
Nu=(D*rof*v)/mif;
Pkonv1=Kv*(1.01+1.35*(Nu^0.52))*lambdaf*(Ts-Ta);
Pkonv2=Kv*0.754*(Nu^0.6)*lambdaf*(Ts-Ta);
Pkonv3=3.645*(D^0.75)*(rof^0.5)*((Ts-Ta)^1.25);
  if(imag(Pkonv1)~=0)%zaštita od kompleksnog broja
      Pkonv1=-10^99;
     end
     if(imag(Pkonv2)~=0)%zaštita od kompleksnog broja
       Pkonv2=-10^99;
     end
   if(imag(Pkonv3)~=0)%zaštita od kompleksnog broja
      Pkonv3=-10^99;
   end
if(Pkonv1>Pkonv2 && Pkonv1>Pkonv3)
 Pkonv(i)=Pkonv1;
else if(Pkonv2>=Pkonv1 && Pkonv2>=Pkonv3)
 Pkonv(i)=Pkonv2;
    else
 Pkonv(i)=Pkonv3;
    end
end
Tj=Tx - (I^2*(R25 - (Tx - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(4*pi*l);
Prad(i)=17.8.*D.*e.*(((Ts+273)/100).^4-((Ta+273)/100).^4);
mcp(i)=Aa.*roa.*ca0.*(1+betaa.*(Tx-20))+As.*ros.*cs0.*(1+betas.*(Tj-20));%toplinski kapacitet vodiča
Ps(i)=D.*S.*as;
end
Pkonv=Pkonv';
Prad=Prad';
mcp=mcp';
%definiranje ograničenja tipa jednakosti (ceq) i nejednakosti(c)
ceq=ones(nu,1);%broj ograničenja tipa jednakosti
ceq(1)=x(1)-Tcin;%ograničenje početnog uvjeta
Ps=D.*S.*as;
Rac=((R75-R25)./(75-25)).*(Tnov-25)+R25;
PJ=I.*I.*Rac;
%ograničenja diferencijalne jednadžbe
ceq(2:nu)=(Ps'+PJ-Pkonv-Prad)./mcp-((Tnov-Tc)./dt);
%definiranje ograničenja tipa nejednakosti
c(1:nu)=x(1:nu)-(I^2*(R25-(x(1:nu)-25).*(R25/50 - R75/50)).*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))./(4*pi*l)-80;
c(nu+1)=-x(nu+1);
end
```

Funkcija cilja:

```
function f = fcilja(x,vri)
%pridruživanje ulaznih podataka dobivenih iz glavnog programa
dt=vri(1);gg=vri(2);l=vri(3);dc=vri(4);D=vri(5);R25=vri(6);R75=vri(7);
vt=0:dt:gg;
n=length(vt);
I=x(n+1);
Tav=x(n);
a=Tav - (I^2*(R25 - (Tav - 25)*(R25/50 - R75/50))*((dc^2*log(D/dc))/(D^2 - dc^2) - 1/2))/(4*pi*l);
%definiranje funkcije cilja
f=(a-80)^2;
end
```

ŽIVOTOPIS

Alen Pavlinić rođen je 8. veljače 1990. g. u Kopru. Nakon mature 2008. g. i stjecanja zvanja elektrotehničar upisuje se na Tehnički fakultet u Rijeci, gdje prvo 2011. stječe zvanje prvostupnika elektrotehnike, a potom 2013. g. magistara inženjera elektrotehnike. Nakon završetka studija 2014. g. zapošljava se u HEP ODS-u d.o.o. DP Elektroistra na poslovima radnog mjesta inženjer. Prilikom svog rada u HEP ODS-u d.o.o. DP Elektroistra radi na vrlo širokom spektru poslova koji uključuju: izradu elaborata zaštite električnih postrojenja SN mreža, izradu planova naponske regulacije napona SN mreža, izradu strategije optimalnih uklopnih stanja SN mreža, proračune podešenja preklopke za uzemljenje neutralne točke, izradu programa rada zaštite na radu, provođenje energetskih analiza i planiranje ključnih investicija prema tokovima snage u SN mrežama, vođenje aktivnosti oko EOTRP-a, vođenje aktivnosti oko elektrana, rad na tehničkim specifikacijama u postupcima javne nabave, rad na izradi tehničkih rješenja, rad na kontroli projekata, rad na izdavanju uvjeta priključenja te rad na poslovima održavanja distribucijskih postrojenja. Poslijediplomski doktorski studij iz tehničkih znanosti modul elektroenergetika i nove tehnologije upisuje 2014. godine. Za vrijeme trajanja studija aktivno surađuje s Energetskim institutom Hrvoje Požar te boravi na njemu u okviru rada na domaćim projektima vezanim uz temu doktorske disertacije. Ima više objavljenih radova u domaćim i stranim zbornicima i časopisima. Služi se hrvatskim, engleskim i talijanskim jezikom.

Objavljeni znanstveni i stručni radovi:

[1] A. Pavlinić, V. Komen, "Calculation and analysis of the steady-state line ampacity weather sensitivity coefficients," *Electric Power Systems Research*, vol. 180, pp. 1-10 April 2020.
[2] Alen Pavlinić, Vitomir Komen, Hrvoje Opačak, "Impact of Shunt Circuit Breaker Technology on the Single Pole-to-Earth Fault Currents in Distribution Networks," *ASRJETS*, vol. 51, no. 1, pp. 212-224, Jan. 2019.
[3] Alen Pavlinić, Vitomir Komen, Marin Uzelac: "Application of direct collocation method in short-term line ampacity calculation," *Electric Power Systems Research*, Volume 155, pp. 216-224, Feb. 2018.
[4] Alen Pavlinić, Vitomir Komen, "Direct monitoring methods of overhead line conductor temperature," *Engineering Review*, vol. 37, no. 2, pp. 134-146, May 2017.
[5] Hrvoje Opačak, Alen Pavlinić, "Analysis of affected phenomena on electronic oltc design for distribution transformers," *Journal of Electrical Engineering and Information*

Technologies, vol. 2, no. 2, pp. 121–128, Nov. 2017.
[6] Alen Pavlinić, Vitomir Komen, Edi Lorencin, "Sustavi dinamičkog monitoringa dopuštenog opterećenja," *MIPRO 2017/HEP*, Opatija, Hrvatska, 2017, pp. 21-28.
[7] Alen Pavlinić, Vitomir Komen, "Sag/Tension Dynamical Line Rating System Architecture," *MIPRO 2017/DEWCOM*, Opatija, Hrvatska, 2017, pp. 403-408.
[8] Alen Pavlinić, Branko Posedel, "Analiza standardnih metodologija proračuna dopuštenih strujnih termičkih opterećenja nadzemnih vodova," *Cigre 2017*, Šibenik, 2017, pp 1-10.
[9] Alen Pavlinić, Hrvoje Opačak, "Analiza utjecaja shunt prekidača na struju jednopolnog kratkog spoja," *Cired 2016*, Osijek, 2016, pp. 1-11.
[10] Alen Pavlinić, Damjan Ščulac, "Modeliranje parametra procesa primjenom IEC 61850," *Cired 2016*, Osijek, 2016, pp. 1-13.
[11] Alen Pavlinić, Emil Malagić, Vitomir Komen, "Smanjenje gubitaka optimizacijom paralelnog rada transformatora," *Cired 2016*, Osijek, 2016, pp. 1-10.