

# Primjena visoko temperaturnih vodiča ACCC u prijenosnoj mreži

---

Matić, Ilija

Master's thesis / Diplomski rad

2016

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:718832>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-26**

*Repository / Repozitorij:*

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



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**

**Diplomski studij**

**Primjena visoko temperaturnih vodiča ACCC u  
prijenosnoj mreži**

**Diplomski rad**

**Ilija Matić**

**Osijek, 2016**

## SADRŽAJ

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 1.     | UVOD .....  | 1  |
| 1.1.   | Zadatak i struktura rada .....  | 1  |
| 2.     | OPĆENITO O VODIČIMA.....  | 3  |
| 2.1.   | Način izvedbe i dimezioniranje vodiča .....                                   | 4  |
| 2.2.   | Vodiči kroz povijest.....   | 7  |
| 2.3.   | Općenito o ACCC vodičima.....   | 8  |
| 2.4.   | Prednosti ACCC vodiča u odnosu na vodiče pravljene od drugih materijala ..... | 11 |
| 2.5.   | Presjeci ACCC vodiča .....  | 16 |
| 3.     | MEHANIČKI PRORAČUN VODIČA.....  | 20 |
| 3.1.   | Mehanička čvrstoća vodiča .....   | 21 |
| 3.2.   | Sile koje djeluju na vodiče dalekovoda .....                                  | 22 |
| 3.2.1. | Vertikalne sile .....   | 22 |
| 3.2.2. | Horizontalne sile .....   | 23 |
| 3.3.   | Proračun provjesa .....   | 25 |
| 3.4.   | Jednadžba stanja zategnutog vodiča .....                                      | 26 |
| 3.5.   | Određivanja mjerodavnih stanja pri postavljanju jednadžbe stanja .....        | 27 |
| 3.5.1. | Određivanje stanja najvećeg naprežanja po kriteriju kritičnog raspona .....   | 27 |
| 3.5.2. | Određivanje stanja najvećeg provjesa po kriteriju kritične temperature .....  | 28 |
| 3.6.   | Jednadžba stanja zateznog polja s nejednakim rasponima – idealni raspon.....  | 28 |
| 3.7.   | Strujna opteretivost vodova .....   | 30 |
| 3.7.1. | Toplinsko dimezioniranje vodiča.....  | 30 |
| 3.7.2. | Strujna opteretivost vodiča .....   | 30 |
| 4.     | PRORAČUN VODIČA DALEKOVODA SA CCP PROGRAMOM.....                              | 32 |
| 4.1.   | Proračun za dalekovod Slavonski Brod-Požega.....                              | 36 |
| 4.2.   | Proračun za dalekovod Đakovo - Gradačac .....                                 | 42 |
| 5.     | ZAKLJUČAK .....   | 46 |

LITERATURA

SAŽETAK

ABSTRACT

ŽIVOTOPIS

## 1. UVOD

Električna energija proizvodi se nerijetko u blizini nalazišta prirodnih izvora energije (fosilnih goriva, vodotoka) te se dalekovodima prenosi do potrošačkih centara. Nadzemni vodovi i kabeli koriste se za prijenos električne energije. Većina električne energije prenosi se nadzemnim vodovima zbog kraćeg i jednostavnijeg popravka. Po jedinici prenesene snage prijenos kabelima je (računajući ukupne troškove izgradnje i eksploatacije) nekoliko puta skuplji od prijenosa dalekovodima. Kabeli se koriste u nekim specifičnim situacijama, npr. u gradskim područjima, u blizini aerodroma, pri povezivanju otoka s kopnom i slično.

Potražnja za električnom energijom rasla je kroz povijest te i dalje raste. Upravo zbog tog porasta potrebno je povećati kapacitete prijenosa snage i raditi na povećanju učinkovitosti postojećih vodova. Nove vrste vodiča uvedene su tijekom posljednjih nekoliko desetljeća te omogućavaju prijenos više električne energije uz smanjene gubitke vodova. U većini nerazvijenih zemalja prisutna je pojava porasta broja stanovništva. Zbog siromaštva ne mogu pratiti svoje izazove te su ekonomski ovisne o razvijenijim zemljama. Svake godine svijet potroši preko 20 trilijuna kWh električne energije i 1,4 trilijuna kWh su izgubljeni zbog neučinkovitog prijenosa.[1] Ekonomski analitičari smatraju da je potrebno razmisliti o važnosti ulaganja da bi se postiglo smanjenje gubitaka, a ne samo o učinkovitosti čiste energije. Sve se više govori o učinkovitosti prijenosa električne energije zato što je po analizama jeftinije spasiti MWh električne energije nego ga proizvesti. Iz perspektive zaštite okoliša je potrebno smanjiti korištenje fosilnih goriva za proizvodnju električne energije te samim time smanjiti emisiju  $CO_2$ .

### 1.1. Zadatak i struktura rada

Zadatak ovog diplomskog rada je opisati karakteristike, materijale i vrste visoko temperaturnih vodiča u prijenosnoj mreži. Nadalje, u radu je potrebno napraviti usporednu analizu standardnih Al/Če vodiča i vodiča s novim materijalima. Potrebno je usporediti mehaničku i električnu karakteristiku standardnih i novih vodiča

U uvodnom odlomku dana je definirana proizvodnja i prijenosa električne energije. Također, rečeno je ponešto o današnjim potrebama za električnom energijom te je predstavljen zadatak i struktura diplomskog rada.

Drugo poglavlje sadrži općenite karakteristike vodiča. Kroz pet potpoglavlja je opisan razvitak vodiča kroz povijest te su prikazane osnovne izvedbe i dimenzije nadzemnih vodova.

Akcenat je postavljen na ACCC-e vodiče i prikazuju se prednosti visokotemperaturnih vodiča u odnosu na druge.

U trećem poglavlju je predstavljen mehanički proračun vodiča. Kroz jednadžbe i slike se prikazuje proračun mehaničke čvrstoće odnosno sila koje djeluju na vodiče. Prikazan je i proračun provjesa odnosno jednadžba stanja zategnutog vodiča te izvedenice iz te jednadžbe.

U četvrtom poglavlju je predstavljena analiza odnosno usporedba vodiča od različitih materijala pomoću CCP programa. Na primjeru dva stvarna dalekovoda je napravljena analiza za moguću rekonstrukciju odnosno zamjenu vodiča dalekovoda.

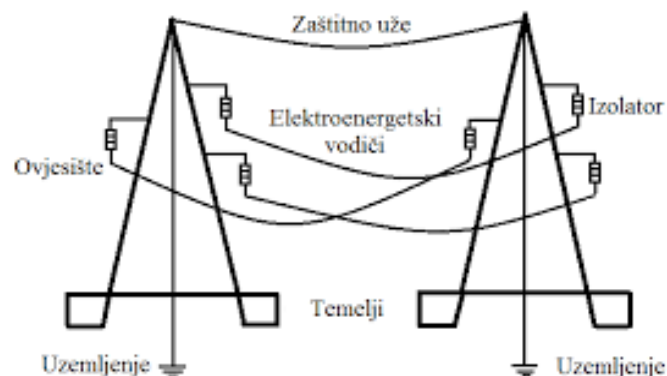
## 2. OPĆENITO O VODIČIMA

Za prijenos električne energije služe nam nadzemni vodovi i kabeli. Vodiči predstavljaju aktivni i najvažniji dio dalekovoda, zato što služe za vođenje struje. Prijenos kabelima je nekoliko puta skuplji nego dalekovodom kada se napravi usporedba po jedinici prenesene snage električne energije na neku udaljenost. Popravak nadzemnih vodova je puno jednostavniji i traje kraće nego kod kabela. Podjela nadzemnih vodova može se izvršiti po više kriterija, a to su:

- nazivni napon
- broju trofaznih sustava vođenih na istom stupu
- materijal i konstrukcija vodiča
- materijal i konstrukcija stupova, itd.

Sastavni elementi dalekovoda su:

- vodiči: za vođenje struje
- stupovi: za nošenje i zatezanje vodiča
- izolatori: spriječavaju da struja teče između vodiča ili kroz stupove u zemlju
- pribor: za pričvršćivanje izolatora na stupove, ovješene i spajanje vodiča, te za mehaničku i električnu zaštitu dalekovoda
- zaštitna užad: štite dalekovod od udara groma
- sustav za uzemljenje: zajedno sa zaštitnim užetom, u slučaju kvara dalekovoda trebaju opasnost po živa bića u okolini stupa svesti na minimum. [1]



**Slika 2.1.** Nadzemni vodovi

(Izvor: [www.olderiteh.com](http://www.olderiteh.com); Tehnički fakultet u rijeci; Preuzeto: travanj 2016god.)

Glavna karakteristika materijala za vodiče je električna vodljivost i dovoljna mehanička čvrstoća. Kroz povijest se najprije upotrebljavao bakar (Cu) odnosno tvrdo vučeni bakar. Zbog cijene odnosno uštede na bakru danas se upotrebljava čisti aluminij (Al) koji ima manju specifičnu težinu od bakra. Aluminij mora biti veoma čist (99,5 %) jer inače dolazi do

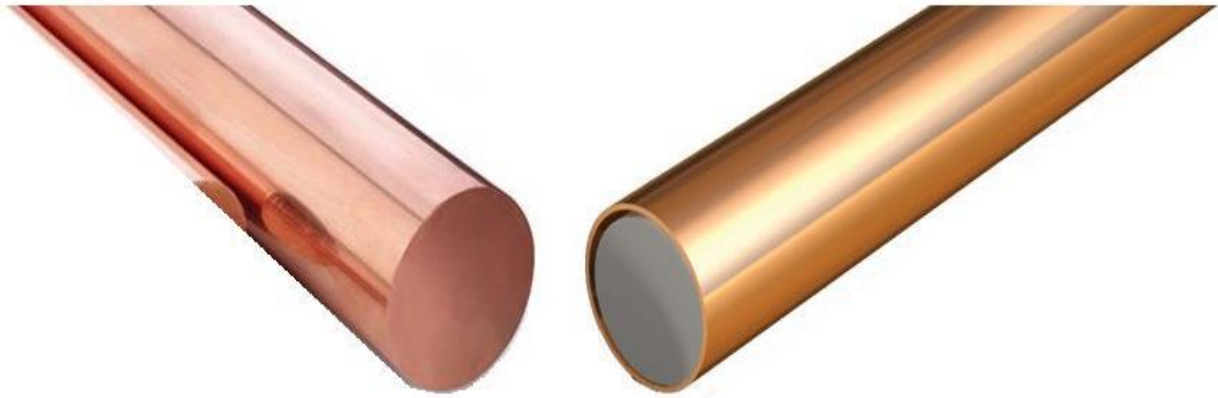
elektrolitičkog razaranja (opasne su sitne čestice bakra). Zbog relativno male mehaničke čvrstoće aluminij ne dolazi u obzir za veće raspone, niti za visokonaponske dalekovode. Zbog poboljšanja mehaničkih svojstava legiraju se bakar i aluminij s drugim metalima, pri čemu se vodljivost ne smije bitno smanjiti. Da se sjedine dobra električna svojstva bakra odnosno aluminija s dobrim mehaničkim svojstvima čelika, izrađuju se kombinirani vodiči od dva različita materijala. Najčešće se upotrebljava uža izrađeno od aluminija i čelika, alučel (AlČe). Tu mehanički teret u najvećem dijelu preuzima jezgra od čelika čvrstoće 120 daN/mm<sup>2</sup>, a vođenje struje se vrši aluminijским plaštem. Ova se užeta najviše koriste od srednjih do najviših napona, gdje se zbog visine napona ne može upotrijebiti obično aluminijско uža. Aluminij ima najveće provjese, pa se zato ni ne upotrebljava za velike raspone. Aluminij, a pogotovo aldrej i alučel, imaju veći promjer od bakra. Zbog toga su s obzirom na gubitke korone prikladniji za visoke napone. Nasuprot tome kod većih promjera vodiča je i tlak vjetrova veći, što zahtjeva jače stupove zbog većih sila, te veće razmake zbog većih otklona vodiča i izolatorskih lanaca. Ovo sve govori u prilog bakru.[2]

Za mehaničku sigurnost vodiča važan je stupanj sigurnosti protiv loma. Taj je stupanj dan višekratnikom normalnog zimskog dodatnog tereta, kod kojeg naprezanje u vodiču dosegne vrijednost trajne čvrstoće. U tom pogledu najbolja svojstva ima aldrej, zatim alučel, pa bakar, a najslabiji je aluminij. Težina užeta, a isto tako i težina užeta sa zimskim dodatnim teretom najveća je za bakar, zatim redom za alučel, aldrej i aluminij. To je važno s jedne strane za iznos investicija, a s druge strane za iznos investicija, a s druge strane za velika opterećenja stupova, izolatora i pribora. [3]

## **2.1. Način izvedbe i dimezioniranje vodiča**

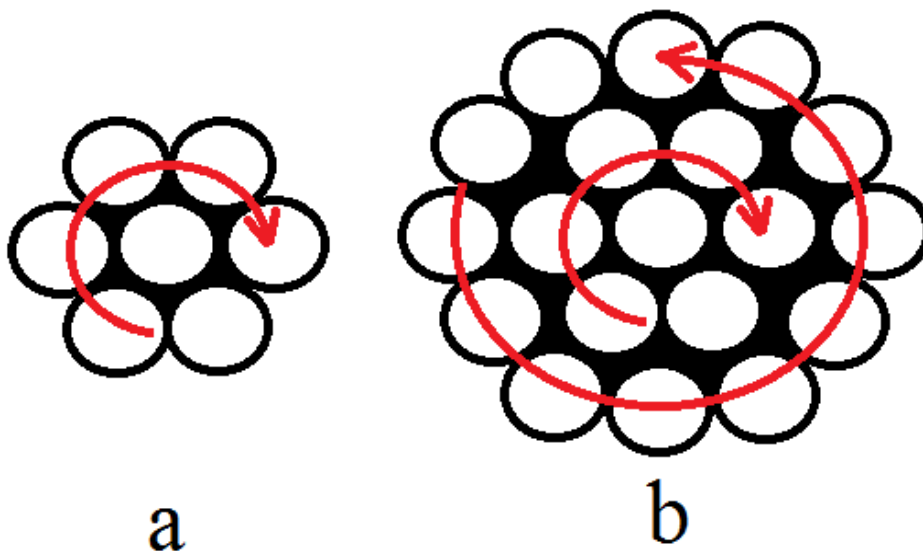
Vodiči mogu biti izvedeni od pune žice, sukanih vodiča, tj. užeta (homogenog ili kombiniranog), antivibracijske izvedbe, snopova, izoliranih vodiča te učinkovitih vodiča. U niskonaponskoj mreži se koriste takozvani puni vodiči, s malim presjekom i malog raspona. Upotrebljavaju se vodiči od bakra, presjeka 16 mm<sup>2</sup> i raspona do 80 m. Zbog slabih mehaničkih svojstava aluminij i aldrej se ne upotrebljavaju.[4]





**Slika 2.2.** Homogena bakrena žica i kombinirani Copperweld vodič  
(Izvor: [www.olderiteh.com](http://www.olderiteh.com); Tehnički fakultet u Rijeci ; Preuzeto: travanj 2016god.)

U izradi nadzemnih vodova koriste se sukani vodiči, a najčešće kombinirano uže napravljeno od alučelika u omjeru 6:1. Sukani vodiči imaju veću elastičnost i prekidnu čvrstoću te manju osjetljivost na utjecaje vjetrova od vodiča od pune žice. Homogeni sukani vodič izvodi se tako da se žice omotavaju u slojevima oko najčešće jedne žice napravljene od istog materijala. Kod normalne izvedbe sve su žice istog presjeka. Kako se žice spiralno sukaju u uže, žice su 2-3 % dulje od dužine užeta . Faktor punjenja je približno 75-79%. Standardni presjeci užeta su 10, 16, 25, 35, 70, 95, 120, 150, 185, 240, 300 mm<sup>2</sup>. Stvarni presjeci se nešto razlikuju od nazivnih.[2]



**Slika 2.3.** Homogeno uže s označenim smjerom sukanja žica: a) sa 7 žica, b) s 19 žica  
(Izvor: [www.olderiteh.com](http://www.olderiteh.com); Tehnički fakultet u Rijeci ; Preuzeto: travanj 2016god.)

Kombinirana užeta se rade tako da se oko jedne ili više žica sukaju žice koje će činiti jezgru, a zatim se na njih sukaju žice drugog presjeka i/ili različitog materijala. Zbog veće

mehaničke čvrstoće ne mogu se upotrebljavati žice istog promjera. Zbog smanjenja gubitaka vrtložnih struja i histereze u čeličnoj jezgri, izrađuje se aluminijski plašt po mogućnosti od dva sloja pletena u suprotnim smjerovima. Zbog sprječavanja vibracija vodiča zbog vjetra (kod velikih raspona i lakih vodiča), izrađuju se antivibracijska užeta, kod kojih je šupljina unutar aluminijskog plašta veća od promjera čelične jezgre. Tako kod vibracija nastaju međusobni udarci koji dovode do prigušenja.[2]

Prije su se za više napone upotrebljavali šuplji vodiči, koji su se razvili iz težnje da se uskladi ekonomski presjek bakrenog vodiča s vanjskim promjerom potrebnim zbog korone. Ovi vodiči se izrađuju samo od bakra i imaju različite konstrukcije, kojima je svrha da vodič bude gibljiv i da sačuva svoj oblik. Zbog upotrebe alučela (koji ima znatno veći promjer od ekvivalentnog bakrenog užeta) i zbog primjene snopova vodiča za jednu fazu, šuplji vodiči gube na značaju.[2]



**Slika 2.4.** Šuplji vodič

(Izvor: [www.olderiteh.com](http://www.olderiteh.com); Tehnički fakultet u Rijeci ; Preuzeto: travanj 2016god.)

Slika 2.4. prikazuje šuplji vodič tipa HH tvrtke General Cable promjera 3,55 cm koji je korišten za prijenos 287,5 kV preko pustinje Mohave.

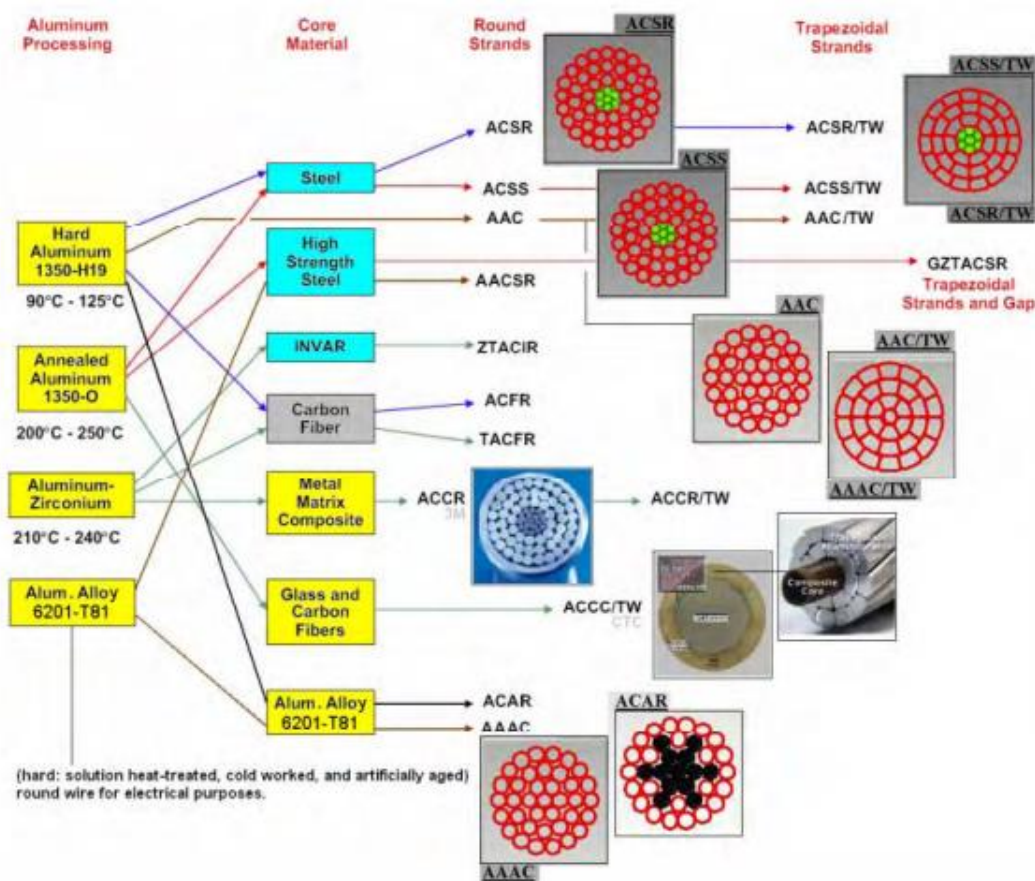
Dimenzioniranje vodiča vrši se u električnom i mehaničkom pogledu, ali treba uzeti u obzir i ekonomski aspekt. U električnom pogledu dimenzioniraju se vodiči s obzirom na struju koja u njima teče i s obzirom na njihov napon. Joule-ovi gubici u otporu vodiča moraju ostati u granicama ekonomičnosti, a nadtemperatura vodiča koja se pojavljuje zbog tih gubitaka ne smije

prekoračiti određenu granicu. Jakost električnog polja ne smije prekoračiti električnu čvrstoću, da ne dođe do gubitaka korone. Promjer vodiča u milimetrima mora iznositi barem jednu devetinu linijskog napona voda u kilovatima. Određeni su i dozvoljeni padovi napona koje vodič ne smije izazvati. U mehaničkom pogledu prilikom dimenzioniranja vrši se usklađivanje mehaničkog naprezanja vodiča i njegova provjesa. Provjesi i naprezanja ne smiju prekoračiti dozvoljenu granicu kod ekstremnih klimatskih uvjeta. Izabrani vodiči moraju zadovoljiti i u ekonomskom pogledu, što znači da ukupni godišnji troškovi prijenosa moraju biti minimalni. [3]

## **2.2. Vodiči kroz povijest**

Prije prvog svjetskog rata koristio se bakar za nadzemne vodove zbog svoje odlične vodljivosti. Zbog ratnih zbivanja, te pripadajuće potražnje za bakrom, bakar je zamijenjen aluminijem koji ima manju specifičnu težinu. Uvedene su s vremenom razne legure aluminija kako bi se poboljšala električna svojstva vodova. Čelik se počeo upotrebljavati zbog velike mehaničke čvrstoće. Mala vodljivost i pojava skin efekta je izbacila čelik iz svakodnevne upotrebe. Tijekom Drugog svjetskog rata, proizvodnja aluminija je bila usmjerena na proizvodnju zrakoplova, a dalekovodi su vraćeni na bakrene vodiče od kojih su neki proizvedeni s čeličnom jezgrom. Razvitkom industrije i povećanjem broja stanovništva pojavljuje se problem premalih kapaciteta odnosno postojeći vodovi ne mogu prenijeti potrebnu snagu električne energije. Potražnja za električnom energijom je rasla i postalo je teško osigurati električnu energiju za cjelokupnu populaciju. Pojavila se potreba za povećanjem kapaciteta postojeće električne mreže.[1]

Upotreba novih materijala pri proizvodnji vodiča rješava postojeće probleme. Trapezasto lijevani vodiči aluminija omogućavaju bolju popunjenost aluminija u promjeru vodiča kako bi se smanjilo mehaničko opterećenje jezgre i ponudila potrebna strujna opteretivost. Pojava ACSS vodiča je dovela do povećanja kapaciteta prijenosa, ali su loša toplinska svojstva ograničila njihovu upotrebu. To je povećalo gubitke vodova što je rezultiralo povećanjem potrošnje goriva (ili osiromašenjem hidro resursa). Danas je dostupan velik broj različitih vrsta i veličina vodiča. Duž sto godina se nije promijenila osnovna misao oko mehaničkih i električnih svojstava vodiča. Koriste se aluminijski vodiči (kao što su AAC, AAAC i ACAR) u određenim aplikacijama i ACSR (Al/Če). Alučel je općenito najkorišteniji vodič. Osim ACSS razvijeni su i drugi visoko temperaturni vodiči pomoću kojih su smanjeni gubitci. Upotreba visoko temperaturnih vodiča je omogućila ekonomičniji prijenos električne energije.[1]



**Slika 2.5.** Pregledna shema različitih vrsta vodiča  
(Izvor: [www.ieee.hr](http://www.ieee.hr) ; Preuzeto: listopad 2016 god.)

### 2.3. Općenito o ACCC vodičima

ACCC vodiči imaju kompozitnu jezgru od ugljičnih i staklenih vlakana. Plašt je najčešće načinjen sukanjem trapezasto lijevanih aluminijskih vodiča. Visoko temperaturni ACCC vodiči imaju određene prednosti u odnosu na aluminijske ili konvencionalne vodiče sa čeličnom jezgrom. Maksimalna prijenosna snaga se udvostručava, dok su gubitci vodova reducirani za 25-40% pod jednakim uvjetima opterećenja. Kombinacija visoke vlačne čvrstoće i malih toplinskih gubitaka omogućuje dulji vijek, tako da se nove trase mogu graditi uz manje strukture. Analiziranjem ulaganja u projekt, dolazi se do zaključka da primjena ACCC vodiča smanjuje inicijalne kapitalne izdatke. [1]

ACCC vodič je dostupan u svim veličinama koje su potrebne za prijenosnu mrežu globalnih prijenosnih kompanija. ACCC vodič ("Aluminijski vodič kompozitne jezgre") je predstavljen 2005. godine. Novi vodič je postigao zacrtani cilj visokog prijenosnog kapaciteta i zbog niskog koeficijenta toplinskog širenja je ponudio značajno smanjenje provjesa uslijed promjena temperature. Kompozitna jezgre je smanjila težinu u odnosu na čelik. Pojedina veličina

vodiča može sadržavati 28% više aluminija zbog kompaktnih niti u trapezastog oblika. Dodatni sadržaj aluminija poboljšava vodljivost te povećava učinkovitost u odnosu na bilo koji drugi komercijalno dostupan vodič istog promjera i slične težina. ACCC vodič postiže najveća dozvoljena strujna opterećenja u odnosu na radnu temperaturu. [1]



**Slika 2.6.** Prikaz vodiča: a) ACSR b) ACCC  
(Izvor: [www.ctcglobal.com](http://www.ctcglobal.com); Preuzeto: travanj 2016.god)

Zbog širokog velikog broja različitih veličina vodiča i zbog specijaliziranog dizajna moguće je proizvesti vodiče vrlo dugih raspona. Mehanička čvrstoća, modul elastičnosti i ostale karakteristike mogu se mijenjati na razne načine. Kompanije koje proizvode vodiče su razvile mnoge prilagođene verzije. Počelo se sa deset različitih presjeka vodiča, koristeći deset različitih presjeka jezgre. Tijekom posljednjih desetak godina, kao odgovor na zahtjeve kupaca diljem svijeta, CTC Global je nastavio razvijati nove veličine vodiča. Trenutno je u ponudi više od šezdeset veličine ACCC vodiča, a popis nastavlja rasti. U suradnji s kompanijom je moguće raditi na novoj vrsti vodiča koji zadovoljava određene potrebe. Kroz suradnju sa klijentima, kompanija je pronašla rješenje za slučajeve jako dugih raspona riječnih prijelaza i pri povećanim opterećenjima zbog dodatne težine zbog leda. Na temelju regionalnih zahtjeva kupaca, CTC Global posluje s deset partnera od kojih svaki proizvodi niz ACCC vodiča različitih veličina. Velika pozornost je usmjerena na geografske regije zbog različitih reljefnih i klimatskih karakteristika. Uz gotovo 60 standardnih promjera ACCC vodiča u rasponu od 150 do 1400

mm<sup>2</sup>( 300 do 2700 kcmils), CTC Global trenutno nudi posebne vodiče koji su projektirani za smještaj na trasama s dodatnim ledenim opterećenjima ili vrlo dugim rasponima. Standardni ACCC vodiči su obično 25% jači od ACSR (Al/Če) vodiča. Iako ACCC vodiči u svakom presjeku nude više ukupne čvrstoće rastezanja u odnosu na druge vrste vodiče, u ACCC vodovima je jezgra elastičnija od čelika. Njihova elastičnost dopušta povećani provjes vodiča uz uvjet teških ledenih opterećenja. [1]

ACCC vodič je iznimno imun na povećanje provjesa zbog velikih opterećenja. Dodatno opterećenje s ledom je često glavni problem pri dizajniranju vodiča. Vodiči sa prisutnim dodatnim teretom zbog leda su smješteni u hladnijim podnebljima. CTC Global je razvio novi dizajn vodiča koji povećavaju osnovni modul elastičnosti od 112,3 GPa na 146,7 GPa (16.3 MSI na 21,3 MSI). To trideset postotno poboljšanje može se obaviti ugradnjom većeg presjeka jezgre s vrlo minimalan utjecajem na količinu aluminija ili električnu izvedbu. Na isti način se koristi za smještaj na vrlo dugačke trase, gdje je jak vjetar najbitniji čimbenik pri dizajnu vodiča.[1]

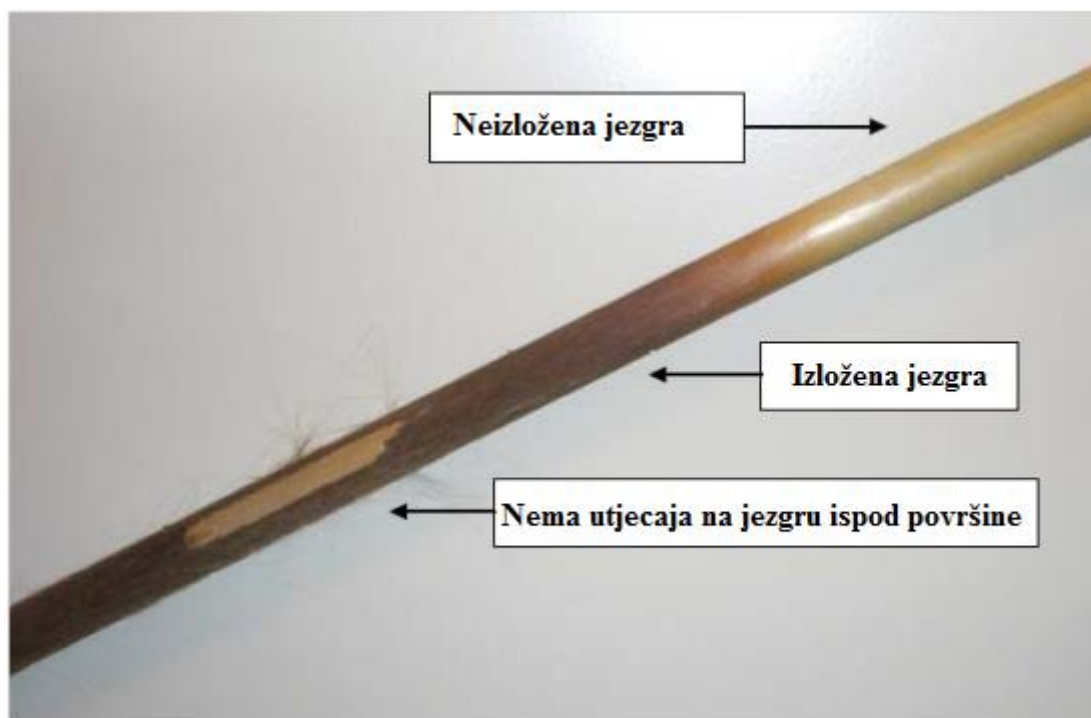
Veliki dio prezentiranih informacija je usporedne prirode: ekonomsko gledište, učinkovitost i smanjenje gubitaka, ali aluminijski vodič kompozitne jezgre je sposoban prenositi dvostruko više struje od konvencionalnog aluminija ili sve prisutnog čelično ojačanog ACSR.



Slika 2.7. Usporedba gubitaka na vodovima (i radnih temperaturama) različitih materijala uz faktor opterećenja 50% i dužina voda 160 km. (Izvor: [www.ctcglobal.com](http://www.ctcglobal.com); Preuzeto: travanj 2016.god)

Slika 2.7. prikazuje usporedbu gubitaka na vodovima (i radnih temperaturama) različitih materijala uz faktor opterećenja 50% i dužina voda 160 km. Kao i svaki vodič ACCC ima termičke granice kojih se treba pridržavati. Upotrebljava se aluminij kojem je granica 250 stupnjeva celzijusevih. Nakon testiranja CTC Global je uspostavio maksimalnu kontinuiranu

radnu temperaturu od 180 °C. Tijekom duljeg vremenskog perioda na ovoj temperaturi se može opaziti minimalna količina površinskog oksidiranja. Ova reakcija oksidiranja naknadno formira gusti sloj približno debel sto mikrona što usporava daljnje oksidiranje. Slika 2.8. prikazuje temeljni uzorak ostavljen da stoji na 220 °C na vremenski period od 52 tjedana. U ovom slučaju je oksidacijski proces ubrzan. Usporava se daljnja oksidacija te se ograničava ukupni učinak toplinske izloženosti. Temperatura od 200 °C se ne preporučuje za ACCC vodiče, ali se može tolerirati za kratka razdoblja. Ispitivanje sustava je pokazalo da je moguće ACCC vodič podvrgnuti najmanje jednom godišnje na osam satni ciklus na temperaturu od 215 °C s malo posljedica.[1]



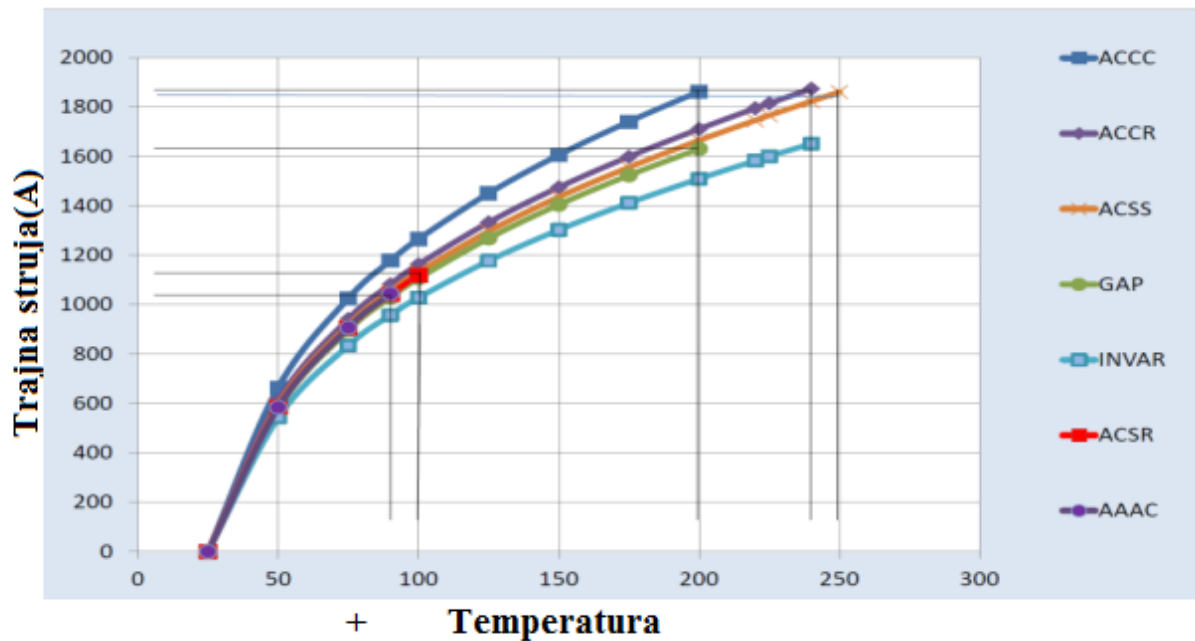
**Slika 2.8.** Uzorak jezgre ACCC vodiča nakon 52 tjedana izlaganja na 220 °C  
(Izvor: [www.ctcglobal.com](http://www.ctcglobal.com); Preuzeto: travanj 2016. god)

## 2.4. Prednosti ACCC vodiča u odnosu na vodiče pravljenе od drugih materijala

### ○ Povećani kapacitet prijenos

U odnosu na okrugli ACSR (Al/Če) vodič u svakom presjeku ACCC vodiča je oko 28% više aluminija u konfiguraciji trapeza, što daje značajno povećanje vodljivosti. Jezgra ugljika uzrokuje bolja mehanička svojstva i praktički eliminira visoki temperaturni koeficijent. ACCC vodič je razvijen za prijenos dvostruko većih vrijednosti struja u odnosu na konvencionalne

aluminijске ili čelikom ojačanog vodiča. Klasični AAC, AAAC i ACSR vodovi su ograničeni na radnoj temperaturi od 90 °C. [1]

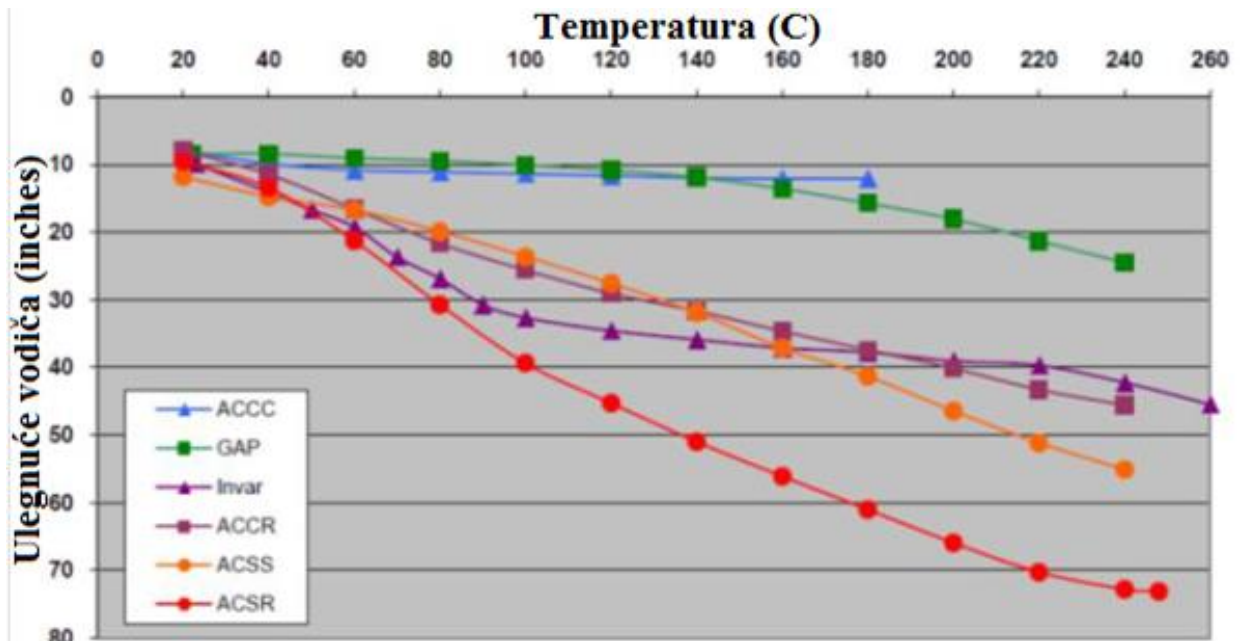


**Slika 2.9.** Odnos trajno dopuštene struje vodiča i temperature  
(Izvor: [www.ctcglobal.com](http://www.ctcglobal.com); Preuzeto: travanj 2016.god)

- Smanjen temperaturni koeficijent

Koeficijent toplinskog širenja ACCC vodiča je oko devet puta manje od tipičnog ACSR, AAC ili ACSS vodiča. To praktički eliminira toplinske gubitke i značajno poboljšava vođenje pod uvjetima visokog opterećenja. Proizlazi da ti vodovi mogu raditi na većim temperaturama odnosno prenositi veće vrijednosti struje. To ga čini izvanrednim pri izboru za povećanje opterećenja postojećih prijenosnih dalekovoda bez potrebe za zamjenom ili ojačanjem postojeće strukture.[1]





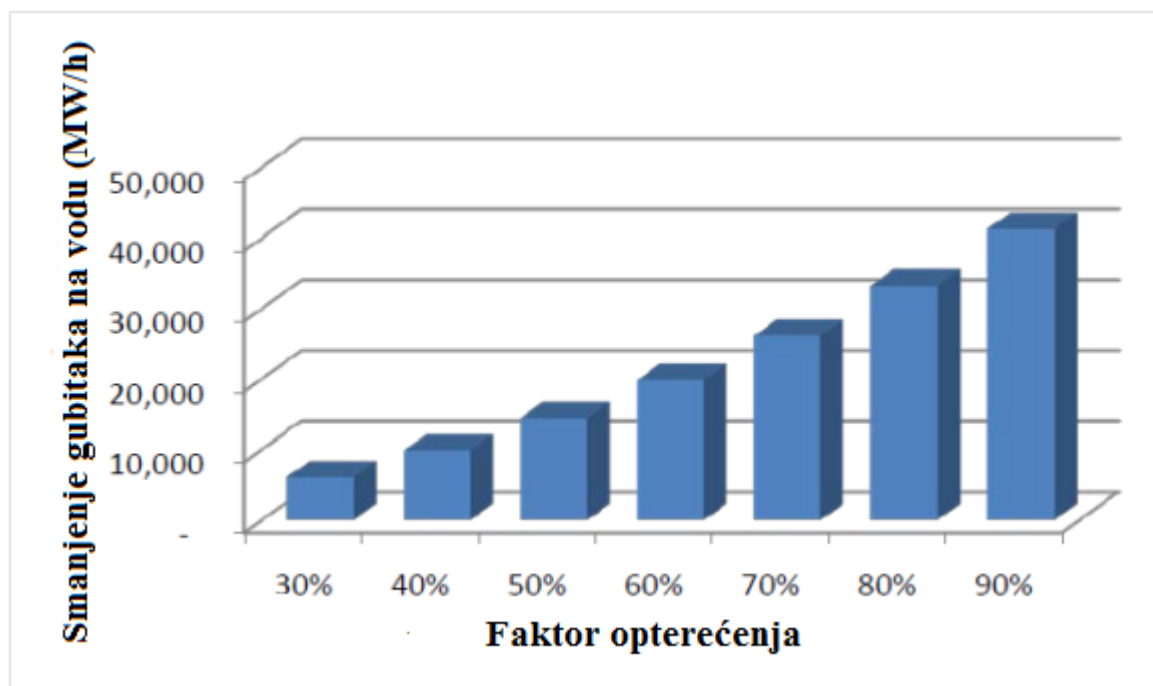
**Slika 2.10.** Usporedba temperature i provjesa vodiča  
(Izvor: [www.ctcglobal.com](http://www.ctcglobal.com); Preuzeto: travanj 2016.god)

- Energetska učinkovitost

Korištenjem više aluminija je bolja vodljivost što smanjuje gubitke na vodovima na određenoj temperaturi. To rezultira isporučivanjem više snage uz smanjen trošak proizvodnje. Učinkovitost vodiča može znatno smanjiti emisije  $CO_2$ . [1]

Pri proizvodnji i prodaji vodiča učinkovitost se ne nalazi visoko na listi prioriteta. Izbor vodiča se uglavnom temelji na proračunima opterećenja. Gledajući unatrag nekoliko godina, mnogo se ulaže u poboljšanje učinkovitosti generatora kako bi se smanjila potrošnja goriva i poboljšala ekonomska održivost konkurentnih proizvodnih tehnologija, kao što su sunce i vjetar. Poboljšanje transformatorske tehnologije je skuplje, ali je također lako opravdano zato što se smanjuju troškovi zbog kratkog životnog ciklusa i poboljšava učinkovitost. Sa gledišta potražnje smatra se da su milijarde dolara potrošene za poboljšanje učinkovitosti potrošnje aparata kao što su hladnjaci, klima uređaji, pa čak i žarulje. U mnogim slučajevima izvršne vlasti i energetske distributeri subvencioniraju kupovinu tih aparata zbog smanjenja udara na mrežu i samim time odgađa se izgradnja novih prijenosnih dalekovoda i elemenata mreže. Kroz povijest se vrlo malo ulagalo u poboljšanje efikasnosti mreže zato što su gubitci išli na teret potrošača. U novije vrijeme su stručnjaci i političari prepoznali problem klimatskih promjena i okoliša, te se više raspravlja o poboljšanju učinkovitosti vodiča. Kao primjer može poslužiti novoizgrađeni dio dalekovoda u dužini 160,9 kilometara i vrijednosti nazivnog napona od 345 kV u SAD-u. Zamijenjeno je Al/Če uže sa ACCC vodičem. Na temelju vremenski uvjeta i drugih operativnih pretpostavki sa faktorom opterećenja od 62%, IEEE 738 izračuni sugeriraju da će ACCC vodič

uštedjeti više od 300.000 MWh električne energije godišnje na 160,9 km dalekovoda. To možemo usporediti s uštedom energije dobivene zamjenom žarulje (100 W) ekvivalentnom LED žaruljom. LED smanjuje potrošnju električne energije za oko 80% u odnosu na standardne žarulje sa žarnom niti. Upotreba 12 LED žarulja će uštedjeti 1 kW električne energije po satu. Ako pretpostavimo 4 sata dnevno te 365 dana u godini korištenja žarulja, to će donijeti uštedu od 300.000 MWh električne energije. Po cijeni od 20 \$ za LED žarulju, ušteda energije će proizaći u trošak kapitala 51.369.863 \$. U usporedbi s tim CTC Global ACCC vod (3 faze) će koštati oko 14 milijuna \$ za 600 milja (960 km) voda (ne uključujući hardver i troškove instalacije). Treba pretpostaviti i ove troškove, ali i naznačiti da se vod neće morati mijenjati svakih 5 god kao žarulje. LED će morati biti zamijenjen svakih pet godina, trošak ušteda energije će se popeti na više od \$ 400,000,000. S gledišta zaštite okoliša, na temelju prosječne emisije  $CO_2$  iz svih kombiniranih izvora električne energije u SAD-u, ulaganje u efikasnost elementa mreže će smanjiti emisiju za oko 200.000 tona  $CO_2$  godišnje. Zaključak je da je zamjena vodova značajno jeftiniji alternativa u usporedbi s ulaganjem na smanjenje emisije automobila u Sjevernoj Americi. [1]



**Slika 2.11.** Smanjene gubitaka dalekovoda  
(Izvor: [www.ctcglobal.com](http://www.ctcglobal.com); Preuzeto: travanj 2016.god)

Slika 2.11. prikazuje smanjenje gubitaka dalekovoda od ACCC vodiča u odnosu na ACSR vodič kao funkciju faktora opterećenja na vodu duljine 32 kilometara.

- Smanjena težina vodiča

Toplinska stabilnost i smanjen toplinski koeficijent u ACCC vodiču omogućuje vodičima manje naprezanje, čime se smanjuje djelovanje na stupove dalekovoda. ACCC vodič ima manje vrijednosti težine po metru u odnosu na druge vodiče koji se danas koriste u električnim mrežama.[1]

- Pouzdanost

Pouzdanost je najvažnija stavka kod mrežnih operatera, a tu je apsolutno najvažniji element vod. Propad linije može uzrokovati velike ekonomske gubitke te ugroziti ljudske živote i imovinu. CTC Global ACCC vodič nudi novu razinu performansi i pouzdanosti koja prethodno nije bila dostižna. Dugovječnost je također važna. Kompozitna jezgra u ACCC vodiču povisuje učinkovitost na vrlo veliku razinu. U ACCC vodičima jezgra od ugljičnih vlakana nije samo otporna na teške uvjete iz okoliša i koroziju nego opire se i dugotrajnim velikim opterećenjima. Sve je ciklički u svijetu vodiča, uključujući napetosti, temperature, vibracije. To su samo neki od razloga zašto su vodiči kompozitnih jezgri pronašli primjenu u vrlo zahtjevnim situacijama. Proizvođač aviona Boeing je proizveo 787 Dreamliner pomoću tehnologije ugljičnih vlakana, ne samo zbog poboljšanja učinkovitosti i performansi nego su produžili radni vijek tog proizvoda upravo zbog otpornosti tog materijala na dugotrajna opterećenja.[1]

Primjer je 2003.god godina kada je elektroenergetska mreža na sjeveroistoku Sjedinjenih Država i Kanade doživjela je veliki raspad uzrokovan nizom prekida vodova poslije niza događaja koji su uključivali netočne telemetrijskih podataka i računalne propuste. CTC Global ACCC vodovi bi zasigurno spriječili ili znatno minimizirali taj događaj upravo zbog velike izdržljivosti pod pritiskom izuzetno nepovoljnih opterećenja. [1]

- Izgradnja novih trasa dalekovoda

Mogu se rekonstruirati postojeće trase dalekovoda sa smanjenim strukturnim modifikacija ili modifikacije uopće nisu potrebne. To smanjuje troškove kapitalnih ulaganja i vrijeme do završetka izgradnje nove trase. Nove dalekovodne linije mogu biti izgrađene sa smanjenim brojem stupova iskorištavanjem ACCC vodiča u donjem profilu provjesa što značajno smanjuje troškove potrebne za postavljanje stupova.[1]

- Jednostavnost instalacije

Za ugradnju ACCC vodiča koriste se uobičajeni načini ugradnje, alati i oprema. Nisu potrebni posebni alati za postavljanje vodova. U nekim slučajevima teži ACCC vodič se može instalirati na postojeće stupove što omogućava daljnje povećanje kapaciteta prijenosa snage i smanjenje gubitaka na vodovima.[1]

- Otpornost na koroziju i vremenske poremećaje

ACCC vodič odupire se djelovanju okoliša. Hrđa, trulež, nagrizanja neće uzrokovati degradaciju aluminijskih vodova ili pomoćnih dijelova. Nakon uragana Katrina, Sandy, Haiyan i mnogih drugih postalo je jasno da klimatske promjene uzrokuje učestalost i ozbiljnost vremenskih poremećaja te je time otežan prijenos energetskim mrežama. Klimatske promjene su također povećale opasnost od požara u određenim područjima. CTC Global ACCC vodič ima dokazane izvještaje na otpornost od nepovoljnih vremenskih uvjeta ali i preživljavanje kada su spaljene ili popucale drvene, betonske ili aluminijske konstrukcije. Kompozitna jezgra je dva puta jača od čelika te je zbog toga manja mogućnost oštećenja i lomljenje vodova.[1]

Kao primjer može poslužiti tornado koji je pogodio Moore u saveznoj državi Oklahoma. Krhotine su pogodile 50 metara visok stup koji je podržavao ACCC vod. Stup se srušio pod kutem od 45 stupnjeva i nije dodirivao tlo. Iako je udarni val uzrokovao pucanje aluminijskih vlakana, kompozitnu jezgru nije uspio slomiti. Popravak dalekovoda je uvelike bio olakšan zbog očuvanja jezgre. Godinu dana ranije u saveznoj državi Nevadi je drvo H-okvirne konstrukcije podržavalo ACCC vodič te je zbog požara čitava konstrukcija spaljena. ACCC vod nije bio oštećen. Nakon što je zamijenjena drvene konstrukcija, ACCC vod je podignut natrag na mjesto i stavljen u pogon.[1]

**Tablica 2.1.** Karakteristike osnovnih materijala koji se koriste u nadzemnih vodova .

| MATERIJALI JEZGRE                              |                                     |  |                        |                                    |
|--|-------------------------------------|--|------------------------|------------------------------------|
| MATERIJAL                                      | Težina<br>(daN/m, mm <sup>2</sup> ) | Modul elastičnosti<br>(daN/mm <sup>2</sup> ) | Prekidna sila<br>(daN) | Temperaturni koeficijent<br>(1/°C) |
| Čelik (eng. <i>HS steel</i> )                  | 7,80E-03                            | 18000  | 1380                   | 1,50E-05                           |
| Oplemenjeni čelik<br>(eng. <i>EXHS steel</i> ) | 7,80E-03                            | 18000  | 1965                   | 1,50E-05                           |
| Aluminij                                       | 2,70E-03                            | 6000   | 1100-1350              | 2,30E-05                           |
| Bakar  | 8,90E-03                            | 11300  | 900                    | 1,70E-05                           |
| Primjese Al/Mg/Če                              | 4,60E-03                            | 10700  | 1300                   | 1,53E-05                           |
| Kompozitni čelik                               | 1,90E-03                            | 15000  | 2300-2600              | 1,45E-06                           |

(Izvor: [www.ctcglobal.com](http://www.ctcglobal.com); Preuzeto: travanj 2016.god)

## 2.5. Presjeci ACCC vodiča

Trenutno postoji devet standardnih veličina jezgri ACCC vodiča koje su uključene u približno 40 konstruiranih vodiča u rasponu od 300 kcmil (150 mm<sup>2</sup>) do 2.800 kcmil (1400

$mm^2$ ). Tablica 2.2. prikazuje pojedinačno svojstva pojedinih jezgri. Tablica 2.3. i Tablica 2.4. sažeto prikazuju korištene vodiče i njihova svojstva po IEC normi. Dok tablica 2.2 prikazuje određene specifikacije visokotemperaturnih vodiča izražene u metričkim jedinicama.

**Tablica 2.2.** *Specifikacije za ACCC vodiče u metričkim jedinicama*

| <b>Specifikacije ACCC kompozitnih jezgri u metričkim jedinicama</b> |                                |         |         |         |         |         |         |         |         |
|---|--------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| <b>CTC naziv</b>  |                                | 200-003 | 200-004 | 200-005 | 200-006 | 200-007 | 200-008 | 200-009 | 200-010 |
| <b>Metrička oznaka jezgre</b>                                       | (mm)                           | 5,97    | 7,11    | 7,75    | 8,13    | 9,53    | 8,76    | 9,78    | 10,03   |
| <b>Nazivni promjer kompozitne jezgre</b>                            | (mm)                           | 5,97    | 7,11    | 7,75    | 8,13    | 9,53    | 8,76    | 9,78    | 10,03   |
| <b>Dopušteno odstupanje promjera</b>                                | (mm)                           | +0,05   | +0,05   | +0,05   | +0,05   | +0,05   | +0,05   | +0,05   | +0,05   |
| <b>Nazivni presjek jezgre</b>                                       | (mm <sup>2</sup> )             | 28      | 39,7    | 47,1    | 51,9    | 71,3    | 60,3    | 75,1    | 79,1    |
| <b>Procijenjena snaga jezgre</b>                                    | (MPa)                          | 2158    | 2158    | 2158    | 2158    | 2158    | 2158    | 2158    | 2158    |
| <b>Prekidna sila</b>  | (kN)                           | 60,4    | 85,7    | 101,7   | 112     | 153,8   | 130,2   | 162,1   | 170,6   |
| <b>Nazivna masa jezgre</b>  | (kg/km)                        | 54      | 76      | 86      | 98      | 132     | 113     | 143     | 147     |
| <b>Konačni modul elastičnosti</b>                                   | (Gpa)                          | 112,3   | 112,3   | 112,3   | 112,3   | 112,3   | 112,3   | 112,3   | 112,3   |
| <b>Temperaturni koeficijent</b>                                     | ( $\times 10^{-6}/^{\circ}C$ ) | 1,61    | 1,61    | 1,61    | 1,61    | 1,61    | 1,61    | 1,61    | 1,61    |
| <b>Specifični toplinski kapacitet jezgre</b>                        | (J/g <sup>°C</sup> )           | 0,813   | 0,813   | 0,813   | 0,813   | 0,813   | 0,813   | 0,813   | 0,813   |
| <b>Preporučena radna temperaturta</b>                               | (°C)                           | 180     | 180     | 180     | 180     | 180     | 180     | 180     | 180     |
| <b>Kritična temperatura jezgre</b>                                  | (°C)                           | 200     | 200     | 200     | 200     | 200     | 200     | 200     | 200     |
|   |                                |         |         |         |         |         |         |         |         |

(Izvor: [www.ctcglobal.com](http://www.ctcglobal.com); Preuzeto: travanj 2016.god)

Svaki projekt ima svoje jedinstvene zahtjeve. Teren, električna struja, kapacitet voda, ekološki uvjeti i stanje postojećih objekata su neki od svakodnevnih čimbenika pri dizajniranju vodiča. Proizvođači su dizajnirali toliko presjeka vodiča da je moguće za veliku većinu projekata iskoristiti standardne dizajnirane vodiče. Povremeno nije moguće naći optimalno rješenje koristeći standardne vodiče te se stoga poseže za dizajniranjem novih vodova.

**Tablica 2.3. Prikaz specifikacija ACCC korištenih u SAD-u**

| ASTM SIZES     |               |         |                 |              |            |                      |                      |           |           |           |                    |       |
|----------------|---------------|---------|-----------------|--------------|------------|----------------------|----------------------|-----------|-----------|-----------|--------------------|-------|
| ACCC           | Presjek       |         | Vanjski promjer | Promjer žica | Masa užeta | Prekidna sila plašta | Prekidna sila vodiča | DC @ 20°C | AC @ 25°C | AC @ 75°C | AC Ampacity        |       |
|                | ATSM veličina | (kcmil) |                 |              |            |                      |                      |           |           |           | (mm <sup>2</sup> ) | (mm)  |
| PASADENA       | 305           | 154,4   | 15,65           | 5,97         | 478        | 60,4                 | 68,9                 | 0,2885    | 0,2944    | 0,3535    | 528                | 778   |
| LINNET         | 430           | 218,1   | 18,29           | 5,97         | 655        | 60,4                 | 72,5                 | 0,2055    | 0,2103    | 0,2517    | 654                | 968   |
| ORIOLE         | 439           | 222,3   | 18,82           | 7,11         | 689        | 85,7                 | 98,3                 | 0,2019    | 0,2065    | 0,2471    | 665                | 986   |
| WACO           | 454           | 230,1   | 19,56           | 7,75         | 721        | 101,7                | 114,8                | 0,1951    | 0,1996    | 0,2395    | 683                | 1,012 |
| LAREDO         | 530           | 268,4   | 20,50           | 7,11         | 816        | 85,7                 | 101,0                | 0,1671    | 0,1712    | 0,2053    | 747                | 1,109 |
| IRVING         | 609           | 308,8   | 22,40           | 8,76         | 965        | 130,2                | 147,7                | 0,1454    | 0,1491    | 0,1788    | 820                | 1,222 |
| HAWK           | 611           | 309,7   | 21,79           | 7,11         | 930        | 85,7                 | 103,2                | 0,1448    | 0,1485    | 0,1760    | 823                | 1,231 |
| DOVE           | 714           | 361,5   | 23,55           | 7,75         | 1083       | 101,7                | 122,3                | 0,1240    | 0,1274    | 0,1524    | 902                | 1,346 |
| GROBEAK        | 821           | 416,2   | 25,15           | 8,13         | 1245       | 112,0                | 135,2                | 0,1081    | 0,1114    | 0,1334    | 981                | 1,468 |
| LUBBOCK        | 904           | 458,0   | 26,42           | 8,76         | 1376       | 130,2                | 156,1                | 0,0979    | 0,1011    | 0,1210    | 1,045              | 1,566 |
| GALVESTON      | 1011          | 512,4   | 27,69           | 8,76         | 1526       | 130,2                | 158,8                | 0,0875    | 0,0907    | 0,1084    | 1,119              | 1,681 |
| DRAKE          | 1026          | 519,7   | 28,14           | 9,53         | 1565       | 153,8                | 183,3                | 0,0863    | 0,0892    | 0,1065    | 1,134              | 1,706 |
| CURLEW         | 1033          | 523,4   | 28,96           | 10,54        | 1610       | 188,3                | 218,0                | 0,0862    | 0,0898    | 0,1069    | 1,142              | 1,722 |
| PLANO          | 1059          | 536,8   | 28,63           | 8,76         | 1597       | 130,2                | 160,1                | 0,0840    | 0,0876    | 0,1045    | 1,150              | 1,733 |
| CORPUS CHRISTI | 1103          | 558,9   | 29,11           | 8,76         | 1657       | 130,2                | 161,5                | 0,0806    | 0,0843    | 0,1005    | 1,179              | 1,777 |
| ARLINGTON      | 1151          | 583,2   | 29,90           | 9,53         | 1745       | 153,8                | 186,4                | 0,0773    | 0,0809    | 0,0964    | 1,213              | 1,830 |
| CARDINAL       | 1222          | 619,1   | 30,43           | 8,76         | 1823       | 130,2                | 165,0                | 0,0728    | 0,0762    | 0,0906    | 1,258              | 1,902 |
| FORT WORTH     | 1300          | 658,9   | 31,50           | 9,53         | 1952       | 153,8                | 190,8                | 0,0684    | 0,0721    | 0,0858    | 1,305              | 1,975 |
| EL PASO        | 1350          | 684,0   | 31,80           | 8,76         | 2002       | 130,2                | 168,6                | 0,0659    | 0,0698    | 0,0829    | 1,332              | 2,018 |
| BEAUMONT       | 1429          | 723,9   | 32,87           | 9,53         | 2136       | 153,8                | 194,4                | 0,0623    | 0,0661    | 0,0785    | 1,381              | 2,096 |
| SAN ANTONIO    | 1475          | 747,3   | 33,40           | 9,78         | 2212       | 162,1                | 204,2                | 0,0603    | 0,0623    | 0,0738    | 1,432              | 2,176 |
| BITTERN        | 1582          | 801,4   | 34,16           | 8,76         | 2331       | 130,2                | 175,3                | 0,0566    | 0,0603    | 0,0714    | 1,465              | 2,229 |
| DALLAS         | 1795          | 909,5   | 36,88           | 9,78         | 2671       | 162,1                | 213,1                | 0,0497    | 0,0546    | 0,0640    | 1,585              | 2,430 |
| HOUSTON        | 1927          | 976,6   | 38,25           | 10,54        | 2878       | 188,3                | 243,3                | 0,0459    | 0,0510    | 0,0596    | 1,660              | 2,554 |
| LAPWING        | 1949          | 987,5   | 38,20           | 9,78         | 2887       | 162,1                | 217,5                | 0,0458    | 0,0507    | 0,0595    | 1,660              | 2,547 |
| FALCON         | 2045          | 1036,2  | 39,24           | 10,54        | 3044       | 188,3                | 246,4                | 0,0436    | 0,0479    | 0,0563    | 1,719              | 2,639 |
| CHUKAR         | 2242          | 1135,8  | 40,74           | 10,03        | 3303       | 170,6                | 234,4                | 0,0398    | 0,0445    | 0,0521    | 1,808              | 2,785 |
| BLUEBIRD       | 2741          | 1388,7  | 44,75           | 10,54        | 4022       | 188,3                | 266,4                | 0,0326    | 0,0387    | 0,0447    | 2,010              | 3,130 |

(Izvor: [www.ctcglobal.com](http://www.ctcglobal.com); Preuzeto i prevedeno: travanj 2016. god)

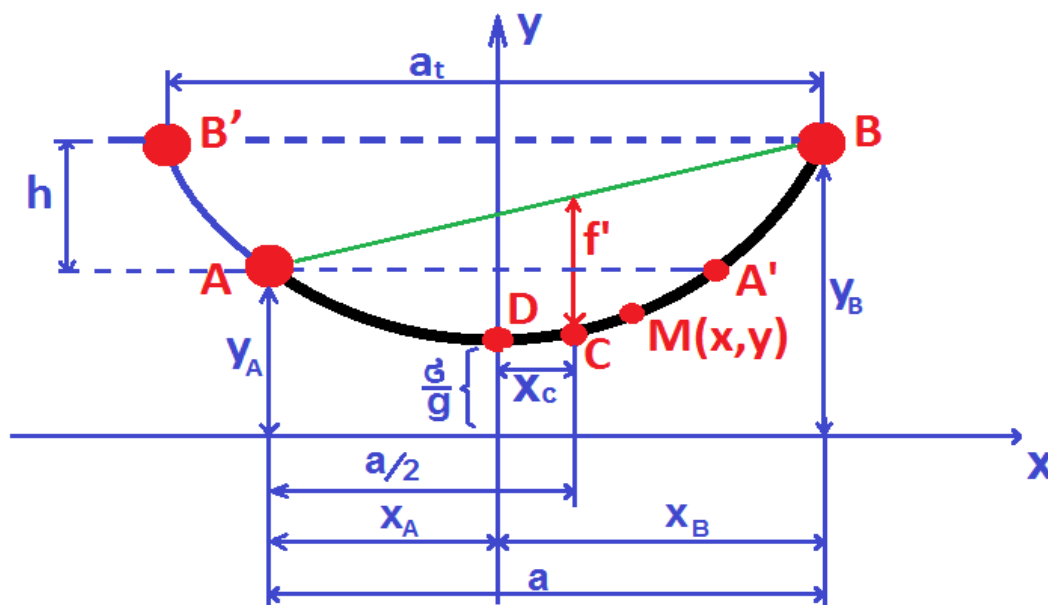
**Tablica 2.4. Prikaz specifikacija ACCC korištenih u Europi**

| INTERNACIONALNA VELIČINA |                          |         |                 |              |            |                      |                      |           |           |           |                    |       |
|--------------------------|--------------------------|---------|-----------------|--------------|------------|----------------------|----------------------|-----------|-----------|-----------|--------------------|-------|
| ACCC                     | Presjek                  |         | Vanjski promjer | Promjer žica | Masa užeta | Prekidna sila plašta | Prekidna sila vodiča | DC @ 20°C | AC @ 25°C | AC @ 75°C | AC Ampacity        |       |
|                          | Internacionalna veličina | (kcmil) |                 |              |            |                      |                      |           |           |           | (mm <sup>2</sup> ) | (mm)  |
| HELSINKI                 | 297                      | 150,6   | 15,65           | 5,97         | 471        | 60,4                 | 68,9                 | 0,1862    | 0,1902    | 0,2277    | 519                | 765   |
| COPENHAGEN               | 434                      | 219,9   | 18,29           | 5,97         | 661        | 60,4                 | 72,8                 | 0,1272    | 0,1301    | 0,1557    | 656                | 971   |
| REYKJAVIK                | 440                      | 223,1   | 18,82           | 7,11         | 694        | 85,7                 | 98,3                 | 0,1256    | 0,1285    | 0,1537    | 665                | 986   |
| MONTE CARLO              | 451                      | 228,5   | 20,78           | 10,54        | 799        | 188,3                | 201,2                | 0,1230    | 0,1257    | 0,1504    | 691                | 1,027 |
| GLASGOW                  | 467                      | 236,7   | 19,53           | 7,75         | 732        | 101,7                | 115,0                | 0,1184    | 0,1211    | 0,1449    | 692                | 1,027 |
| CASABLANCA               | 540                      | 273,6   | 20,50           | 7,11         | 834        | 85,7                 | 101,1                | 0,1024    | 0,1049    | 0,1255    | 754                | 1,120 |
| OSLO                     | 619                      | 313,8   | 22,40           | 8,76         | 981        | 130,2                | 147,8                | 0,0893    | 0,0911    | 0,1091    | 828                | 1,234 |
| LISBON                   | 623                      | 315,5   | 21,79           | 7,11         | 948        | 85,7                 | 103,5                | 0,0887    | 0,0910    | 0,1088    | 823                | 1,227 |
| AMSTERDAM                | 725                      | 367,4   | 23,55           | 7,75         | 1101       | 101,7                | 122,4                | 0,0762    | 0,0784    | 0,0936    | 907                | 1,355 |
| BRUSSELS                 | 832                      | 421,4   | 25,15           | 8,13         | 1265       | 112,0                | 135,7                | 0,0666    | 0,0687    | 0,0820    | 987                | 1,479 |
| STOCKHOLM2L              | 914                      | 463,3   | 26,39           | 8,76         | 1395       | 130,2                | 156,2                | 0,0605    | 0,0625    | 0,0746    | 1,049              | 1,576 |
| STOCKHOLM3L              | 895                      | 453,7   | 26,39           | 8,76         | 1368       | 130,2                | 155,7                | 0,0617    | 0,0637    | 0,0760    | 1,039              | 1,560 |
| WARSAW                   | 1002                     | 507,5   | 27,71           | 8,76         | 1520       | 130,2                | 158,7                | 0,0553    | 0,0573    | 0,0683    | 1,112              | 1,673 |
| DUBLIN                   | 1035                     | 524,5   | 28,14           | 9,53         | 1583       | 153,8                | 183,3                | 0,0534    | 0,0553    | 0,0660    | 1,136              | 1,711 |
| HAMBURG                  | 1078                     | 546,4   | 28,63           | 8,76         | 1627       | 130,2                | 160,9                | 0,0514    | 0,0534    | 0,0636    | 1,163              | 1,752 |
| KOLKATA                  | 1073                     | 543,5   | 28,63           | 9,53         | 1643       | 153,8                | 184,0                | 0,0517    | 0,0536    | 0,0639    | 1,160              | 1,748 |
| MILAN                    | 1120                     | 567,7   | 29,11           | 8,76         | 1686       | 130,2                | 162,1                | 0,0494    | 0,0514    | 0,0612    | 1,191              | 1,797 |
| ROME                     | 1169                     | 592,5   | 29,90           | 9,53         | 1774       | 153,8                | 187,1                | 0,0474    | 0,0494    | 0,0588    | 1,225              | 1,850 |
| VIENNA                   | 1242                     | 629,2   | 30,43           | 8,76         | 1853       | 130,2                | 165,5                | 0,0445    | 0,0466    | 0,0554    | 1,269              | 1,918 |
| BUDAPEST                 | 1319                     | 668,3   | 31,50           | 9,53         | 1984       | 153,8                | 191,4                | 0,0420    | 0,0440    | 0,0523    | 1,318              | 1,996 |
| PRAGUE                   | 1363                     | 690,7   | 31,78           | 8,76         | 2031       | 130,2                | 169,0                | 0,0407    | 0,0428    | 0,0508    | 1,340              | 2,032 |
| MUMBAI                   | 1353                     | 685,4   | 31,78           | 9,53         | 2035       | 153,8                | 192,0                | 0,0410    | 0,0431    | 0,0511    | 1,336              | 2,025 |
| MUNICH                   | 1447                     | 733,1   | 32,84           | 9,53         | 2170       | 153,8                | 195,0                | 0,0384    | 0,0405    | 0,0480    | 1,392              | 2,113 |
| LONDON                   | 1498                     | 759,0   | 33,40           | 9,78         | 2248       | 162,1                | 204,8                | 0,0370    | 0,0391    | 0,0464    | 1,424              | 2,164 |
| PARIS                    | 1606                     | 813,7   | 34,16           | 8,76         | 2366       | 130,2                | 175,9                | 0,0345    | 0,0368    | 0,0435    | 1,480              | 2,254 |
| BORDEAUX                 | 1738                     | 880,8   | 35,76           | 10,54        | 2766       | 188,3                | 237,9                | 0,0318    | 0,0340    | 0,0402    | 1,560              | 2,381 |
| ANTWERP                  | 1865                     | 944,8   | 36,86           | 9,78         | 2760       | 162,1                | 215,2                | 0,0297    | 0,0321    | 0,0378    | 1,623              | 2,483 |
| MADRID-ICE               | 1986                     | 1006,5  | 38,20           | 10,54        | 2949       | 188,3                | 245,0                | 0,0278    | 0,0303    | 0,0356    | 1,692              | 2,594 |
| MADRID                   | 1999                     | 1013,0  | 38,20           | 10,54        | 2948       | 188,3                | 219,1                | 0,0276    | 0,0302    | 0,0354    | 1,696              | 2,602 |
| ATHENS                   | 2782                     | 1409,6  | 44,75           | 10,54        | 4066       | 188,3                | 267,6                | 0,0199    | 0,0231    | 0,0267    | 2,050              | 3,189 |

(Izvor: [www.ctcglobal.com](http://www.ctcglobal.com); Preuzeto i prevedeno: travanj 2016.god)

### 3. MEHANIČKI PRORAČUN VODIČA

Pri mehaničkom proračunu vršimo usklađivanje mehaničkog naprezanja u vodičima i njegova provjesa. Pri tome provjesi i naprezanja u vodičima ne smiju prekoračiti dozvoljenu granicu kod ekstremnih klimatskih uvjeta.[1]



**Slika 3.1.** Vodič u kosom rasponu  
(Izvor: [www.oldriteh.com](http://www.oldriteh.com); Preuzeto: travanj 2016god.)

Pretpostavke koje se uzimaju pri mehaničkom proračunu vodiča:

- 1) Točke ovjesišta i duljina raspona je točno definirana;
- 2) Vodič je homogen;
- 3) Vodič je potpuno gibak;
- 4) Dodatno opterećenje je cijelom duljinom voda jednolično;
- 5) Vlastita težina voda i dodatno opterećenje je orijentirano vertikalno prema dolje, a smjer vjetra je vodoravan, odnosno sila vjetra je okomita na smjer težine voda.

Točnost mehaničkog proračuna vodiča:

- 1) Vrlo točni proračun – krivulja provjesa se nadomješta elastičnom lančanicom;
- 2) Točni proračun – krivulja provjesa se nadomješta lančanicom;



### 3) **Približni proračun** – krivulja provjesa se nadomješta parabolom.

U inženjerskom projektiranju nadzemnog voda koristi se približni proračun jer je mnogo jednostavniji, a dovoljno točan za sigurnu izgradnju voda. Obično se računa s horizontalnim naprežanjem (naprežanje u najnižoj točki vodiča), ali se mora voditi računa i o naprežanju u ovjesištu, koje je veće. U proračunu veliku ulogu ima temperatura vodiča i zaštitne užadi. Pri mehaničkom proračunu vrijede temperaturni opsezi koji su između  $-20^{\circ}\text{C}$  i  $+40^{\circ}\text{C}$ , a smatra se da se dodatni zimski teret stvara pri  $-5^{\circ}\text{C}$ . [2]

U električnom pogledu dimenzioniraju se vodiči s obzirom na struju koja u njima teče i s obzirom na njihov napon. Jouleovi gubici u otporu vodiča moraju ostati u granicama ekonomičnosti, a nadtemperatura vodiča zbog tih gubitaka ne smije prekoračiti dozvoljenu granicu koja je obično  $40^{\circ}\text{C}$ . Jakost električnog polja oko vodiča ne smije prekoračiti električnu čvrstoću zraka, da ne dođe do gubitaka korone. Grubo se može uzeti da promjer vodiča u milimetrima mora iznositi barem  $\frac{1}{9}$  linijskog napona u kilovoltima. Treba voditi i računa o prijenosu električne energije u cjelini. Tako npr. ne smije nastati prevelik fazni pomak napona na početku voda prema naponu na kraju voda, koji bi mogao spriječiti stabilni prijenos. [2]

Raspon je horizontalni razmak između dvaju susjednih stupova. Osim horizontalnog razmaka, razlikujemo još i kosi razmak. Kosi razmak je najkraći razmak između ovjesišta stupova između kojih postoji denivelacija. Denivelacija je visinska razlika između dva susjedna stupa postavljena na neravnom terenu. Točke ovjesišta su mjesta na kojima je vodič učvršćen za stup. Provjes vodiča je vertikalni razmak između sredine dužine koja spaja točke ovjesišta i vodiča. Isto vrijedi i za provjes zaštitnog užeta. Sigurnosna visina je najmanja dozvoljena visina između najnižeg vodiča nadzemnog voda pod naponom i zemlje pri maksimalnom provjesu. [2]

### **3.1. Mehanička čvrstoća vodiča**

Pri računanju mehaničkog proračuna vrlo važan čimbenik je mehanička čvrstoća vodiča koja se računa prema relaciji:

$$G_0 = m_1 \cdot g \text{ (N/m)} \quad (3-1)$$

gdje je:

$m_1$  – jedinična masa vodiča (kg/m);

$g$  - gravitacija, za čiju vrijednost se uzima  $g=9.81$  (m/s) .

Često se u proračunima koriste reducirane vrijednosti. Reducirana vrijednost vlastite težine vodiča se računa prema relaciji:

$$g_0 = \frac{G_0}{A} \left[ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2\text{m}} \right] \quad (3-2)$$

gdje je  $A$  [ $\text{mm}^2$ ] stvarni presjek vodiča.

Zatezna sila  $F$  svedena na prvobitni presjek  $A$  naziva se zateznim naprežanjem  $\sigma$  ( $\text{daN/mm}^2$ ):

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3-3)$$

Rastezanje  $\lambda$  je u postocima izraženo produženje vodiča  $\Delta l$ , svedeno na prvobitnu dužinu vodiča  $l$ :

$$\lambda\% = \frac{\Delta l}{l} \cdot 100 \quad (3-4)$$

Elastično naprežanje  $\lambda_e$  nastaje nakon prestanka opterećivanja za razliku od trajnog rastezanja koje ostaje i nakon opterećivanja ( $\lambda_t$ ). Zbroj ta dva rastezanja je rastezanje  $\lambda$  zbog opterećenja koje je se prilikom opterećivanja može izmjeriti. Omjer naprežanja i rastezanja kada nema trajnog rastezanja naziva se modulom elastičnosti  $E$  ( $\text{daN/mm}^2$ ):

$$E = \frac{\sigma}{\lambda} \quad (3-5)$$

Prekidna čvrstoća  $\sigma_p$  ( $\text{daN/mm}^2$ ) je najveće naprežanje koje nastupa pri ispitivanju na kidanje i koje uže može izdržati tokom jedne minute. Trajno naprežanje  $\sigma_t$  ( $\text{daN/mm}^2$ ) je ona vrijednost naprežanja za zatezanje koja ne smije biti prekoračena kod iznimnih prilika, kod  $-5^\circ\text{C}$  uz dodatni zimski teret, koja bi naprežući uže konstantno prouzrokovala njegovo kidanje nakon godinu dana. Dozvoljeno naprežanje  $\sigma_d$  ( $\text{daN/mm}^2$ ) je vrijednost čvrstoće određena iz praktičnih iskustava za različite materijale vodiča, koje uže podnosi u neograničenom trajanju bez promjene oblika. Kod zategnutih užeta horizontalna komponenta naprežanja dostiže dozvoljeno naprežanje bilo kod  $-5^\circ\text{C}$  uz dodatni zimski teret, bilo kod  $-20^\circ\text{C}$  bez dodatnog tereta.[2]

## 3.2 Sile koje djeluju na vodiče dalekovoda

### 3.2.1 Vertikalne sile

#### a) Vlastita težina vodiča

Svedena na vodič dužine  $l$  m i presjeka  $1\text{mm}^2$ , za vlastitu težinu vodiča  $G$  ( $\text{daN}$ ) vrijedi izraz:

$$G = g \cdot l = \gamma \cdot A \cdot l \quad (3-6)$$

gdje je:

$g$  – težina vodiča po jedinici dužine ( $\text{daN/m}$ )

$l$  – dužina vodiča (m)

$A$  – stvarni presjek vodiča ( $\text{mm}^2$ )

$\gamma$  – specifična težina vodiča ( $\text{daN/m,mm}^2$ )

Reducirana vlastita težina vodiča:

$$\gamma = \frac{g}{A} \quad (3-7)$$

### Dodatni teret

Nastupa u pravilu zbog zaleđenja. Razlikuju se normalni i iznimni dodatni teret. Normalni dodatni teret označava se prema propisima kao najveći teret zbog zaleđenja koji se na dotičnom mjestu pojavljuje prosječno svakih 5 godina, ali se ne smije uzeti vrijednost manja od:

$$\Delta g = 0.18\sqrt{d} \text{ [daN/m]} \quad (3-8)$$

gdje je  $d$  promjer vodiča u mm.

Po pravilu kao normalni teret uzimaju se samo vrijednosti koje se dobiju ako se najmanja vrijednost gornjeg izraza pomnoži sa  $k=1.0; 1.6; 2.5; 4.0$ .

Pri mehaničkim proračunima uže opterećeno dodatnim teretom tretira se kao da mu se specifična težina povećala za taj dodatni teret. Specifična težina sa zimskim dodatnim teretom  $\gamma_z$  je:

$$\gamma_z = \gamma + \Delta\gamma = \gamma + \frac{\Delta g}{A} \quad (3-9)$$

Kao iznimni dodatni teret uzima se najveće dodatno opterećenje koje se na dotičnom mjestu pojavljuje prosječno svakih 20 godina, ali ne manje od dvostrukog normalnog tereta.

### **3.2.2 Horizontalne sile**

Horizontalne sile nastupaju zbog pritiska vjetra duž dalekovoda. Vjetar predstavlja opterećenje promjenjive vrijednosti, koje se povremeno pojavljuje, a u proračunima se uzima u obzir putem sile čije je djelovanje ravnomjerno raspodijeljeno i horizontalnog je smjera. Sila vjetra  $F_v$  (daN) koja djeluje na ravnu površinu okomitu na smjer vjetra iznosi:

$$F_v = cpA \quad (3-10)$$

ili svedena na jedinicu dužine vodiča ( uz  $A=d \cdot l$  )

$$f_v = cpd \cdot 10^{-3} \quad (3-11)$$

gdje su:

$f_v$  - sila vjetra po jedinici dužine voda (daN/m);

$c$  - koeficijent aerodinamičnosti djelovanja vjetra;

$p$  - specifični pritisak vjetra (daN/m<sup>2</sup>);

$A$  – stvarna nezaleđena površina napadnuta vjetrom – ako se radi o stupu, ili projekcija nezaleđene površine vodiča okomita na smjer vjetra (m<sup>2</sup>);

$d$  – promjer vodiča (mm).

Specifični pritisak vjetra (daN/m<sup>2</sup>) računa se iz izraza koji ukazuje na kvadratičnu ovisnost o brzini vjetra:

$$p = \frac{v^2}{16} \quad (3-12)$$

gdje je  $v$  maksimalna brzina vjetra u m/s, koja se na promatranom odsjeku voda pojavljuje prosječno svakih pet godina, a za dalekovode 400 kV i u dužem razdoblju. Brzina vjetra je na manjim visinama od zemlje zbog otpora objekta blizu tla manja i raste prema gore.

**Tablica 3.1.** *Specifični pritisak vjetra*

| Visina voza voda                                 | Specifični pritisak vjetra $p$ (daN/m <sup>2</sup> ) |    |     |     |     |
|--|--|----|-----|-----|-----|
| Vodovi do najviše 15 m iznad zemlje              | 50   | 60 | 75  | 90  | 110 |
| Osnovna visinaska zona od 0 do 40 m iznad zemlje | 60   | 75 | 90  | 110 | 130 |
| Djelovi voda u zoni između 40 i 80 iznad zemlje  | 75   | 90 | 110 | 130 | 150 |

(Izvor: [www.etfos.unios.hr](http://www.etfos.unios.hr); Elettrotehnički fakultet Osijek; Preuzeto: svibanj 2016god.)

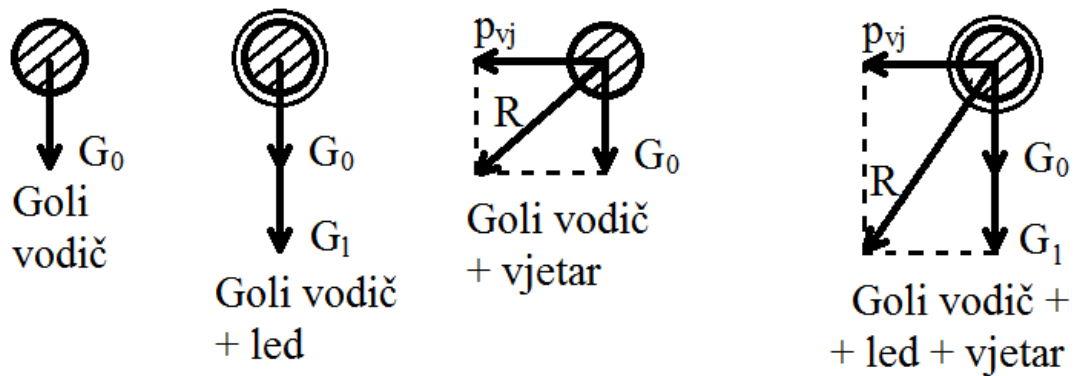
Zbog vjetra se povećava opterećenje otklonjenog vodiča. Rezultantsko opterećenje  $f_r$  dobiva se kao vektorski zbroj sila koje djeluju na vodič:

$$f_r = \sqrt{g^2 + f_v^2} = \frac{g}{\cos\alpha} \quad (3-13)$$

Odavde je rezultantska sila po jedinici dužine svedena na 1 mm<sup>2</sup> presjeka vodiča:

$$\frac{f_r}{A} = \frac{g}{A \cos\alpha} = \frac{\gamma}{\cos\alpha} = \gamma_r \quad (3-14)$$

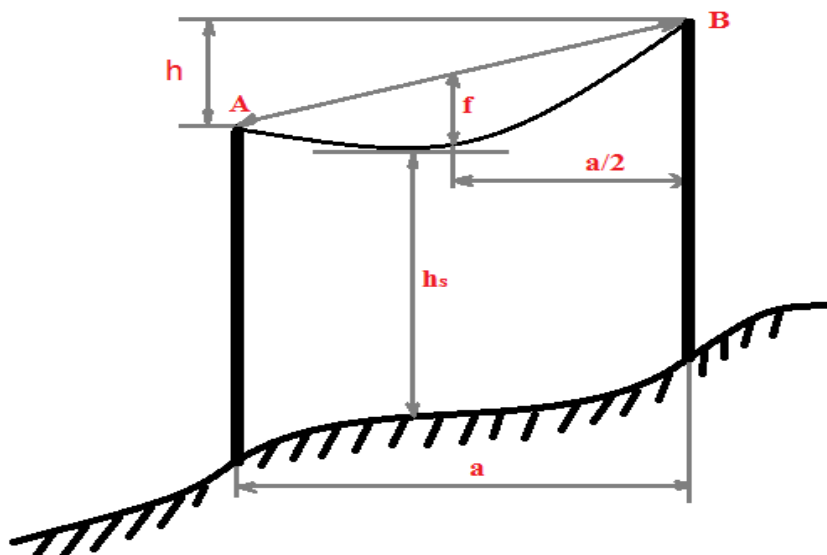
Vjetar djeluje na vodič tako kao da mu se specifična težina povećala  $1/\cos \alpha$  puta.



**Slika 3.2.** Sile na vodič uslijed djelovanja leda i/ili vjetra  
 (Izvor: [www.etfos.unios.hr](http://www.etfos.unios.hr); Elektrotehnički fakultet Osijek; Preuzeto: svibanj 2016god.)

### 3.3. Proračun provjesa

Prilikom promjene stanja vodič se u čitavoj svojoj dužini rasteže ravnomjerno bez promjene presjeka, a modul elastičnosti i temperaturni koeficijent rastezanja ostaju konstantni za određeni materijal vodiča. Zategnuti vodič poprima oblik lančanice, jer je to krivulja koja uz gornje pretpostavke i pod djelovanjem vertikalne sile težine osigurava položaj s najmanjom potencijalnom energijom. Točna vrijednost provjesa računa se pomoću jednadžbe lančanice. Jednostavniji je postupak aproksimiranja lančanice parabolom, što osim za velike raspone daje prihvatljive rezultate. [2]



**Slika 3.3.** Vodič u rasponu  
 (Izvor: [www.olderiteh.com](http://www.olderiteh.com); Tehnički fakultet u Rijeci; Preuzeto: travanj 2016god.)

Na prethodnoj slici s  $a$  je označen raspon, a najveći mogući provjes s  $f$ . Težina užeta po metru duljine se označava s  $g$ . Iz simetrije krivulje užeta u odnosu na okomicu koja prolazi njegovom najnižom točnom slijedi da se uže na sredini može u mislima presjeći, te se druga polovica može nadomjestiti zateznom silom  $F$ . Jednadžba momenta koji djeluje na točku ovješnja glasi:

$$F \cdot f = \left(g \cdot \frac{a}{2}\right) \cdot \frac{a}{4} \quad (3-15)$$

provjes je izveden odavde:

$$f = \frac{a^2 g}{8F} \text{ (m)} \quad (3-16)$$

uzimajući u obzir ovisnosti  $g=\gamma \cdot A$ , i  $F=\sigma \cdot A$  dobiva se:

$$f = \frac{a^2 \gamma}{8\sigma} \text{ (m)} \quad (3-17)$$

Provjes uz dodatni zimski teret  $f_z$  je:

$$f_z = \frac{a^2 \gamma_z}{8\sigma_z} \quad (3-18)$$

gdje je  $\gamma_z$  specifična težina zaleđenog užeta, a  $\sigma_z$  naprezanje kod  $-5^\circ\text{C}$  uz dodatni teret.

### 3.4. Jednadžba stanja zategnutog vodiča

Porastom temperature vodič se rasteže, a provjes povećava. Zbog toga se njegovo naprezanje smanjuje. Time se smanjuje elastično naprezanje, što rezultira smanjenjem provjesa prouzrokovanog promjenom temperature. Pri smanjivanju temperature vodič se steže, provjes postaje sve manji, naprezanje veće, ali povećana zatezna sila povećava elastično rastezanje, a time ublažava smanjenje provjesa prouzrokovanog promjenom temperature. Ovisnost između temperature i naprezanja, odnosno temperature i provjesa naziva se jednadžbom stanja zategnutog vodiča.[2]

Propisima određene temperaturne granice su  $-20^\circ\text{C}$  i  $40^\circ\text{C}$ , a temperatura mjerodavna za stvaranje zimskog dodatnog tereta je  $-5^\circ\text{C}$ . Vodič treba montirati tako da najveće radno naprezanje u njemu ( $\sigma_{max}$ ) na temperaturi od  $-20^\circ\text{C}$  bez dodatnog tereta u mirnom vremenu ili na temperaturi  $-5^\circ\text{C}$  uz dodatni teret u mirnom vremenu ne bude veće od dozvoljenog naprezanja koje je propisano za taj vodič. Također se kontrolira najveći provjes koji ovisno o parametrima vodiča nastupa ili na  $+40^\circ\text{C}$  ili na  $-5^\circ\text{C}$  uz dodatni teret. Weil-ova jednadžba (jednadžba stanja vodiča) glasi:

$$t - t_0 = \frac{\alpha^2}{24\alpha} \left[ \left(\frac{\gamma}{\sigma}\right)^2 - \left(\frac{\gamma_0}{\sigma_0}\right)^2 \right] - \frac{\sigma - \sigma_0}{\alpha E} \quad (3-19)$$

Dobivena jednadžba daje ovisnost između naprezanja i temperature prilikom promjene stanja vodiča. Polazeći od vrijednosti  $t_0$  i  $\sigma_0$  za početno stanje, pomoću jednadžbe izračunava se

naprezanje  $\sigma$  za neku drugu temperaturu  $t$ , te se na osnovu novih parametara može izračunati provjes za tu temperaturu. [2]

Familija krivulje  $H = f(t)$  umjesto krivulja  $\sigma = f(t)$  dobiva se koristeći izraz:

$$H = A \cdot \sigma = A \cdot \frac{a^2 \gamma}{8f} \quad (3-20)$$

Pomoću prethodne jednadžbe je moguće dobiti mentažne krivulje, ali je potrebno napomenuti da je naprezanje  $\sigma$  zamijenjeno s vlačnom silom  $H$  (daN) koja se mjeri dinamometrom, što je prikladnije za montažu voda.[2]

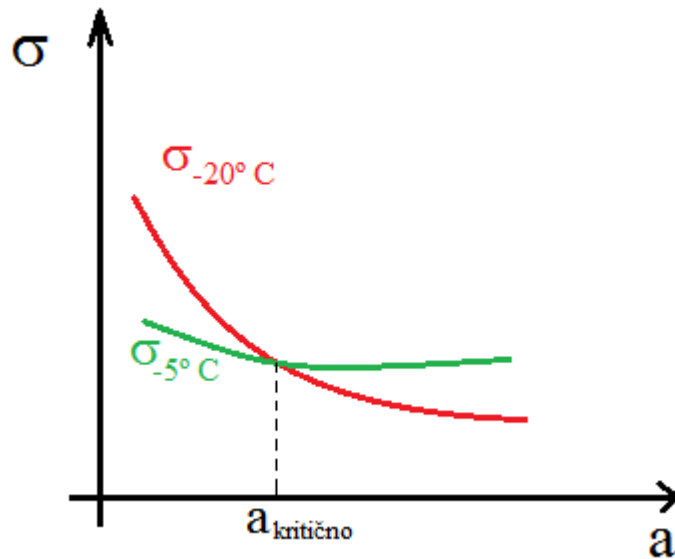
### 3.5. Određivanja mjerodavnih stanja pri postavljanju jednadžbe stanja

Zbog stanja s dodatnim teretom potrebno je vodič kontrolirati i izvan određenih granica temperature. Najveći provjes nastupio bi na 40°C a najveće naprezanje na - 20°C. Propisi predviđaju i ispitivanje stanja na – 5°C uz dodatni teret. Ovu točku je nemoguće uklopiti u jednadžbu stanja, jer na mjesto specifične težine golog vodiča dolazi specifična težina uz dodatni teret. Kod golog vodiča najveće naprezanje na -20°C znači i najmanji provjes, kod vodiča s dodatnim teretom veliko naprezanje ide uz veliki provjes. Uvrštenjem ovog singulatnog stanja rješava se na taj način što se stanje s dodatnim teretom svodi na stanje golog vodiča.[2]

#### 3.5.1. Određivanje stanja najvećeg naprezanja po kriteriju kritičnog raspona

Pri dimenzioniranju treba poći od najnepovoljnijeg stanja u kojemu u vodiču nastupa najveće naprezanje. Ono će nastupiti kod golog vodiča na -20 °C ili kod vodiča s dodatnim teretom na -5 °C. Raspon pri kojem je naprezanje vodiča na -5 °C uz dodatno opterećenje jednako opterećenju na -20° C zovemo kritični raspon  $a_k$ . [2]

$$\sigma_{-20} = \sigma_z = \sigma_{max} \leq \sigma_d$$



**Slika 3.4. Kritični raspon**  
(Izvor: [www.oldriteh.com](http://www.oldriteh.com); Preuzeto: travanj 2016god.)

Ako uvrstimo uvjet kritičnog raspona u jednadžbu stanja dobijemo formulu za kritični raspon:

$$a_{kr} = \sigma_{max} \cdot \sqrt{\frac{360 \alpha}{\gamma^2 - \gamma_z^2}} \quad (3-21)$$

Veličina pod korijenom je u gornjoj jednadžbi konstantna za dani vodič, te kritični raspon ovisi isključivo o najvećem radnom naprežanju  $\sigma_{max} \leq \sigma_d$ . [2]

### 3.5.2. Određivanje stanja najvećeg provjesa po kriteriju kritične temperature

Propisi ne sadržavaju posebna ograničenja u vezi s najvećim provjesom vodiča ali zbog sigurnosnih razloga propisuju se minimalne visine iznad tla odnosno objekta. Najveći provjes  $f_{max}$  vodiča događa se pri temperaturi od + 40 °C ili pri temperaturi od – 5 °C uz dodatno opterećenje zbog leda ili snijega. Temperatura pri kojoj se događa maksimalni provjes se naziva kritična temperatura. [2G]

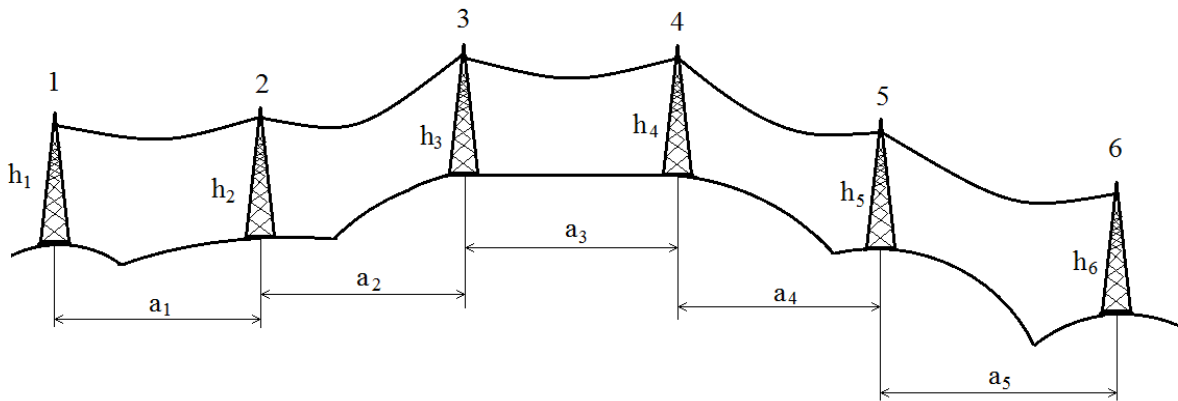
$$t_{kr} = \frac{\sigma_z}{\alpha E} \left( 1 - \frac{\gamma}{\gamma_z} \right) - t_z \quad (3-22)$$

### 3.6. Jednadžba stanja zateznog polja s nejednakim rasponima – idealni raspon

Pri izboru mjesta stupova na neravnom terenu treba se prilagoditi uvjetima terena, zato što je zatezno polje sastavljeno od raspona različite dužine. U svakom rasponu trebalo bi ostvariti drugu zateznu silu što je praktično nemoguće zato što se u vodiču smještenom na



koturima može ostvariti samo jedna određena zatezna sila. Izjednačavajuće naprezanje zateznog polja u bilo kojem stanju određuje se uz pretpostavku da je u početnom stanju ukupna dužina vodiča poznata i jednaka zbroju dužina lukova lančanica, odnosno parabola u pojedinim rasponima.[2]



**Slika 3.5.** Zatezno polje od 5 raspona  
(Izvor: [www.ieee.hr](http://www.ieee.hr) ; Preuzeto: rujan 2016god. )

Zajedničko izjednačavajuće naprezanje zateznog polja s horizontalnim rasponima različitih dužina prilikom promjene stanja formira se kao naprezanje jednog jedinog idealnog raspona čija se dužina može izraziti kao:

$$a_i = \sqrt{\frac{\sum_{r=1}^n a_r^3}{\sum_{r=1}^n a_r}} \quad (3-23)$$

Nakon izračunavanja idealnog raspona potrebno je izračunati zajedničko naprezanje pri različitim temperaturama, a zatim i provjesi iz izraza:

$$f_r = \left(\frac{\gamma}{8\sigma}\right) a_r^2 \quad (3-24)$$

gdje je član u zagradi za pojedine temperature konstanta koja vrijedi za sve raspone. Idealnom rasponu pripada idealni provjes:

$$f_i = \left(\frac{\gamma}{8\sigma}\right) a_i^2 \quad (3-25)$$

kombiniranjem posljednjih dvaju izraza može se bilo koji provjes  $f_r$  u zateznom polju izraziti u funkciji idealnog raspona i idealnog provjesa:

$$f_r = f_i \left(\frac{a_r}{a_i}\right)^2 \quad (3-26)$$

Određivanje mjerodavnog stanja s obzirom na najveće naprezanje u slučaju promatranja čitavog zateznog polja vrši se također na osnovi kritičnog raspona, koji se naravno uspoređuje s idealnim rasponom.[2]

### **3.7. Strujna opteretivost vodova**

Električni vodovi u pogonskom stanju su stalni izvori topline. Prije puštanja u pogon oni imaju temperaturu jednaku temperaturi svoga okoliša. Nakon puštanja u pogon, temperatura vodiča se povećava te nakon toga slijedi prijenos topline na okoliš. Prijenos topline je intenzivniji što je veća temperaturna razlika između okoliša i vodiča. To prijelazno stanje traje sve dok se ne postigne tako visoka temperatura vodiča u vodu da novoproducirana toplina postane jednaka toplini koja se prenese na okoliš. Ravnoteža se mijenja dok se ne promijeni struja u vodu. Dopuštenu temperaturu proizvođač je dužan naglasiti zato što je to bitan element voda. Toplina koja je bila potrebna da se vod zagrije s temperature okoliša na dopuštenu temperaturu određena je toplinskim kapacitetom voda, a on određuje ponašanje voda u prijelaznim režimima rada. Kako stvarne prilike rijetko odgovaraju uvjetima koje je proizvođač definirao, ostaje zadatak izračunati potrebne korekcije i izbjegavati temperature iznad dopuštene. Iako se toplina proizvodi po cijelom presjeku vodiča, radi njegove dobre toplinske vodljivosti zanemarujemo otpor prijenosu topline unutar samog vodiča i računamo kao da se ukupna toplina izvorno pojavljuje na površini vodiča.[2]

#### **3.7.1. Toplinsko dimenzioniranje vodiča**

Toplinski otpor samog vodiča ovisi prije svega o njegovoj konstrukciji i ostalim svojstvima materijalima. Najjednostavniji je slučaj golog vodiča u zraku gdje se toplina neposredno odvodi s površine vodiča na okolni zrak putem konvekcije i emisije. Tu je odlučujuća (veličinom oblikom) površina vodiča i postignuta nadtemperatura (razlika temperature vodiča i dovoljno dalekog okoliša). Posljedica preopterećenja je pretjerano izduživanje vodiča (povećanje provjesa i smanjenje sigurnosnih razmaka). Prikladno je uzimati u računu samo razlike u temperaturi (nadtemperaturu) prema okolišu bez topline koju donosi vodič. Kako je tu također mali utjecaj temperaturne promjene otpora vodiča, može se toplina proizvedena u vodu promatrati kao da ovisi samo o kvadratu struje.[2]

#### **3.7.2. Strujna opteretivost vodiča**

Tehnički propisi u raznim europskim zemljama nisu ujednačeni glede strujnih opterećenja standardnih presjeka. Logično bi bilo očekivati da je dopuštena jednaka gustoća struje za bliske presjeke. Ako opterećenje dalekovoda varira tijekom vremena, mijenjat će se i zagrijavanje vodiča. Ako su te promjene opterećenja dovoljno spore u odnosu na toplinski kapacitet voda, njegova temperatura će pratiti trenutno proizvedenu toplinu. Ako su pak promjene brze, onda će opterećenje voda moći biti i iznad trajno dopuštenoga, a da se ne

prekorači maksimalna dopuštena temperatura vodiča. Toplinsku vremensku konstantu možemo odrediti prema relaciji:

$$\tau = \frac{\kappa c \gamma \Delta \vartheta_n}{1 + \alpha \Delta \vartheta_n} \cdot \left( \frac{A}{I_n} \right)^2 \quad (3-27)$$

gdje je  $\kappa$  specifična električna vodljivost,  $c$  specifična toplina,  $\gamma$  specifična gustoća,  $\alpha$  koeficijent temperaturene promjene električnog otpora,  $\Delta \vartheta_n$  dopušteno povišenje temperature kod normalnih uvjeta,  $A$  presjek vodiča i  $I_n$  nazivna struja. Uobičajeno uzimamo  $c\gamma$  za bakar  $3.5 \frac{Ws}{cm^2}$ , a za aluminij  $2.5 \frac{Ws}{cm^2}$ . [2]

Kratkotrajno opterećenje može biti intermitirano (ciklusi trajanja  $t_c$  s trajanjem opterećenja  $t_0$ ) ili vršno (primjerice iz dnevnog dijagrama opterećenja). Korekcijski faktor za intermitirano opterećenje moguće je odrediti iz relacije:

$$K = \sqrt{\frac{1 - e^{-\frac{t_c}{\tau}}}{1 - e^{-\frac{t_0}{\tau}}} \approx \sqrt{\frac{t_c}{t_0}} \quad (3-28)$$

Ovaj korekcijski faktor treba uzimati kumulativno korekcijskim faktorima koji opisuju toplinske uvjete voda u pogonu. [2]

## 4. PRORAČUN VODIČA DALEKOVODA SA CCP PROGRAMOM

Odluka o revitalizaciji pojedinog dalekovoda ovisi o stanju njegovih elemenata (vodiči, zaštitno uže, izolacija, ovjesna i spojna oprema, stupovi, temelji i drugo) i ulozi koju on ima u elektroenergetskom sustavu. Uvažavajući ekonomske kriterije obnovu pojedinog dalekovoda nije potrebno obavljati ukoliko njegova pouzdanost i pogonska sigurnost nisu ozbiljnije ugroženi. Ocjenu pogonske sigurnosti pojedinih dalekovoda moguće je donijeti tek nakon detaljnog pregleda i istraživanja dotrajalosti i oštećenja pojedinih dijelova opreme. Osnovni uzrok propadanja električkih komponenata nadzemnih vodova je starenje uzrokovano različitim procesima, posebno u uvjetima značajnijeg opterećivanja vodiča i zagađenja okoline i saliniteta u blizini mora, te zamora materijala. Osnovni proces koji ugrožava vodiče i zaštitnu užad, kao i spojnu i ovjesnu opremu, je korozija. Radi korozije smanjuje se vlačna čvrstoća vodiča i zaštitne užadi. Neka iskustva pokazuju da se veliki broj kvarova na nadzemnim vodovima događa radi korozije zaštitne užadi pri čemu njeni vodiči pucaju nakon što su im znatno pogoršana mehanička svojstva.[6] U [1] definirana je prosječna vrijednost očekivane životne dobi Al/Če vodiča od 54 godine, sa standardnom devijacijom od  $\pm 14$  godina. Pravi se razlika između vodova koji se nalaze unutar normalnog okruženja, te vodova koji se nalaze unutar izrazito zagađenog područja čija očekivana životna dob električkih komponenata iznosi  $46 \pm 15$  godina. Ističu se sljedeći faktori koji značajno utječu na životnu dob električkih komponenata nadzemnih vodova:

- klimatski uvjeti,
- okoliš,
- korozija,
- razina zamašćivanja vodiča,
- mehanički zamor materijala,
- oštećenja materijala,
- greške izolacije,
- vjetar,
- oborine,
- opterećenje ledom,
- razina zagađenja,
- kvaliteta materijala,
- visoke temperature radi opterećenja vodiča,
- spojke.

Kod operativnog planiranja revitalizacije (unutar nekoliko godina) dalekovode je potrebno podijeliti u različite grupe s obzirom na važnost za ispravno funkcioniranje elektroenergetskog sustava. Prema godinama izgradnje i raspoloživim podacima o stanju dalekovodne opreme odluku o revitalizaciji dalekovoda treba uskladiti s popisom prioriteta određenih prema ispitivanjima očekivanog opterećenja dalekovoda u budućnosti. Izuzetak od tog pravila trebali bi biti samo oni dalekovodi čija je revitalizacija neophodna zbog zastarjelosti ili većih oštećenja opreme (drveni i betonski stupovi, stara užad, oštećeni temelji i drugo). Ako ispitivanja tokova snaga pokažu da prijenosna moć pojedinih dalekovoda nije dovoljna za preuzimanje očekivanog opterećenja u budućnosti opravdano je izvršiti zamjenu vodiča novijim veće prijenosne moći, ukoliko je taj zahvat moguć. Ako se pojavi potreba moguća je i zamjena dodatne opreme. Ispitivanjima je ustanovljeno da zatezna čvrstoća aluminijskih žica Al/Če vodiča da već nakon nekoliko desetaka godina i prije isteka očekivane životne dobi, biva znatno smanjena. [6] Može se izvući zaključak da na korozivne promjene ne utječe samo starost vodiča već i uvjeti u kojima se on nalazi kao što su zagađenje zraka duž trase dalekovoda. Za zateznu čvrstoću aluminijskih žica je bitna i kvaliteta zamašćivanja čelične jezgre. Čeličnu jezgru Al/Če vodiča napada korozija na pojedinim dijelovima, te zbog toga dolazi do smanjenja mehaničkih svojstava istih. Na starenje vodiča utječu i strujna opterećenja kojima su vodiči izloženi tijekom eksploatacije, odnosno toplina koja se unutar vodiča razvija prolaskom struje. Ispitivanja pokazuju da je stanje čelične jezgre vodiča konstruirane za maksimalne temperature od 500 °C te prosječne temperature od 200 °C, bitno lošije ukoliko se unutar jezgre razvijaju temperature od maksimalno 1000 °C, odnosno prosječno 700 °C.[4] Visoke temperature mogu dovesti i do taljenja aluminijskih žica koje se događa pri dugotrajnim temperaturama od 1000 °C - 1200 °C, odnosno do smanjenja njihovih električnih i mehaničkih svojstava pri dugotrajno nižim ili kratkotrajno povišenim temperaturama. Isto se događa i s bakrenim žicama, s time što mehanizam taljenja bakra i utjecaja temperature na svojstva bakra nije tako dobro ispitan kao za aluminij. [4] U uvjetima otvorenog tržišta električnom energijom te bitno promijenjenih tokova snaga u mreži i opterećenja pojedinih jedinica mreže dolazi do znatnih razlika između očekivanih opterećenja pojedinih vodiča za koja su isti konstruirani i ostvarenih opterećenja, što ubrzava starenje pojedinih vodova u mreži, dodatno potencirano povećanim ekonomskim zahtjevima u poslovanju operatora prijenosnih sustava koji ponegdje smanjuju ulaganja u održavanje i revitalizaciju opreme. Radi razvijanja visokih temperatura unutar vodiča ugrožena je i spojna oprema. Stvarno stanje vodiča i zaštitne užadi nadzemnih vodova moguće je ispitivati tijekom pogona dalekovoda ili laboratorijskim pretragama. Stanje vodiča moguće je grubo procijeniti vizualnim pregledom. Nedostatak vizualnog pregleda je što se koroziju čelične jezgre

zamjećuje tek u visokom stadiju, dok je koroziju aluminijskih žica teže vizualno primijetiti, a posebno procijeniti njenu debljinu. Koristeći posebne instrumente koji putuju “duž vodiča“, pri čemu jedan mjeri preostali cink na čeličnoj jezgri, a drugi mjeri preostali presjek čelika u jezgri, moguće je detaljnije ocijeniti stanje vodiča. U beznaponskom je stanju moguće vodiče pregledati radiografijom. Za detaljnije ocjene stanja koristi se više vrsta laboratorijskih ispitivanja koja svaka daju korisne informacije o stanju vodiča i zaštitne užadi čiji se uzorci testiraju. Neki od tih testova su sljedeći [6]:

- test vibracijske izdržljivosti (*eng. aeolian vibration endurance test*),
- test oscilacijske izdržljivosti (*eng. galloping endurance test*),
- test prolaznosti na koloturu (*eng. sheave passing test*),
- test torzionalne rastezljivosti (*eng. torsional ductility test*),
- test napetosti i istezanja (*eng. tension and elongation at failure test*),
- test izdržljivosti materijala (*eng. creep test*),
- test preostalog cinka (*eng. remaining zinc test*),
- test prekrivenosti cinkom (*eng. wrap test*),
- vizualni pregled,
- test električne otpornosti,
- metalurgijsko ispitivanje,
- kemijska analiza,
- test ubrzane korozije.

Po otkrivanju određenih posljedica starenja električkih komponenata nadzemnih vodova iste se parcijalno zamjenjuje ili promatra njihov rad. Probijene izolatorske članke mijenja se negdje na polovici eksploatacije dalekovoda, korodirane dijelove vodiča ili zaštitne užadi također se zamjenjuje duž trase gdje je korozija uznapredovala i ugrožava pogon čitavog voda. Ovjerna se oprema također mijenja posebno na osjetljivim mjestima duž trase dalekovoda (prelazi preko cesta, blizina stambenih objekata, prijelaz preko rijeka i drugo). U trenutku kada su oštećenja i starost dalekovoda takvi da su financijska sredstva i aktivnosti održavanja toliko veliki da su ekonomski neisplativi, a pouzdanost voda bitno smanjena, potrebno je izvršiti cjelokupnu zamjenu električkih komponenata voda.

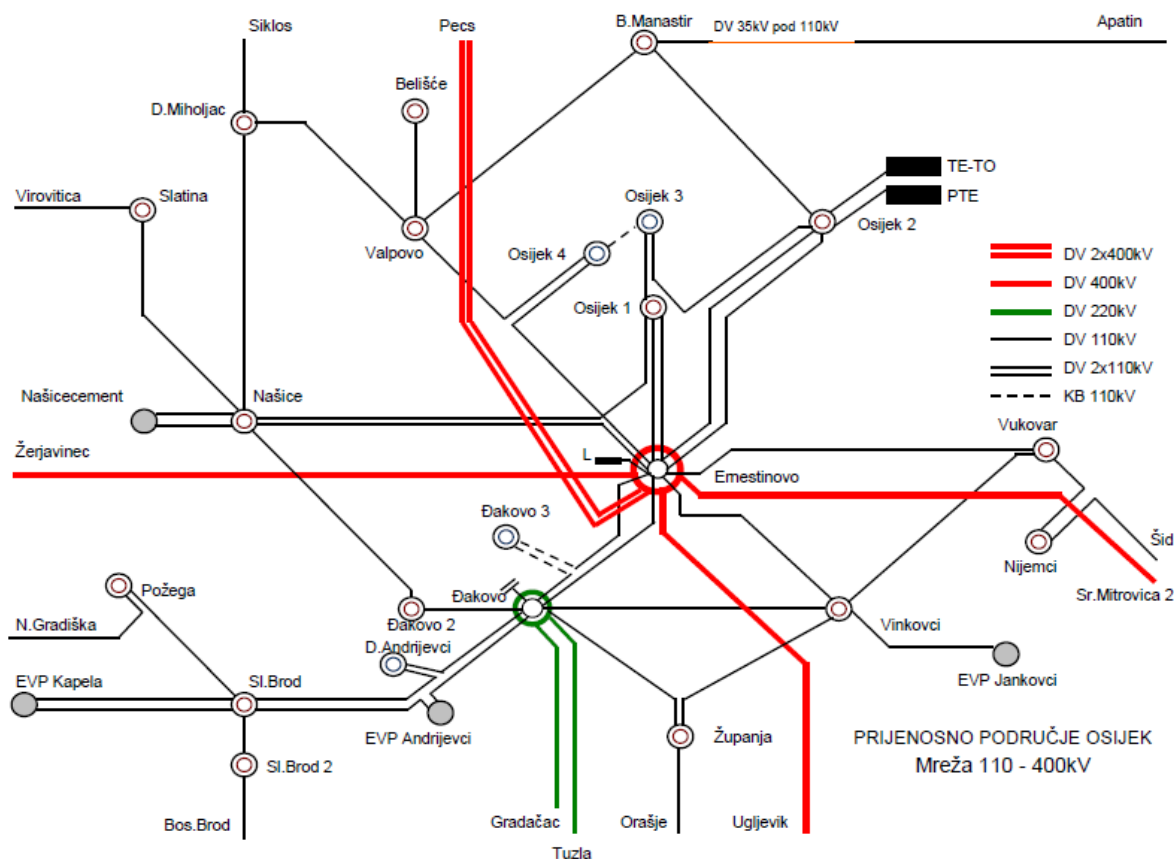
Stanje stupova i temelja trebalo bi ocijeniti koristeći raspoložive podatke koji bi omogućili procjenu njihovog preostalog životnog vijeka na osnovu materijala od kojih su izgrađeni, prisutne korozije i oštećenja, meteoroloških prilika u kojima se nalaze, opterećenju i dosadašnjem održavanju. Na životnu dob građevinskih dijelova nadzemnih vodova utječu različite klimatske okolnosti, stanje okoliša, aktivnosti na održavanju te kvaliteta galvaniziranja i

kasnije premazivanje stupova antikorozivnim sredstvima. Općenito se može konstatirati da je u životnom vijeku pojedinačnog dalekovoda jednom potrebno zamijeniti električne komponente ukoliko se građevinski dijelovi redovito održavaju i saniraju, što znači da građevinski dijelovi imaju dvaput veću životnu dob od električkih komponenata dalekovoda. Glavni proces koji ograničava funkcionalnost čelično-rešetkastih stupova je korozija. Koroziji su znatno izloženi vijci [5]. Korozivni procesi napadaju i čelične armature betonskih stupova, naročito na mjestima gdje je beton popucao čime je omogućen prodor vlage do čelične armature. Na stanje temelja znatan utjecaj imaju karakteristike zemljišta i erozija istog.

Prema [7], uz sanaciju oštećenja i primjenu antikorozivnih zaštitnih sredstava očekivanu životna dob čelično-rešetkastih stupova dalekovoda moguće je produžiti na oko 80 godina, što je dvostruko duže od očekivane životne dobi vodiča i užadi koja iznosi oko 40 godina. Lit. [7] daje procjenu očekivane životne dobi čelično-rešetkastih stupova od  $63 \pm 21$  godinu, a kao glavne uzroke razlika u očekivanoj životnoj dobi navodi sljedeće faktore:

- klimatske uvjete,
- okoliš,
- korozija,
- održavanje,
- slabo galvaniziranje,
- stanje tla,
- lomovi betona,
- korozija temelja,
- spoj čelika i betona.

Očekivana životna dob drvenih stupova u [7] procjenjuje se na  $44 \pm 4$  godine, a ovisi o održavanju, truljenju drveta, pticama, insektima, vjetru i oborinama.



**Slika 4.1.** Prikaz prijenosne mreže u Slavoniji i Baranji i okolini (korišteni dalekovodi: Đakovo-Gradačac i Slavonski Brod-Požega) (Izvor: [www.hops.hr](http://www.hops.hr); Preuzeto: rujan 2016god.)

#### 4.1. Proračun za dalekovod Slavonski Brod-Požega

Na temelju konstantnog praćenja u prijenosnoj mreži uočeno je povećanje provjesa na određenim trasama dalekovoda Đakovo-Gradačac i Slavonski Brod-Požega. Provjes je posljedica zamora materijala uslijed starosti vodiča i 40-ogodišnjeg korištenje spomenutih dalekovoda. Za dalekovod Đakovo-Gradačac smo napravili usporedbu za tri vrste vodiča pomoću CCP programa.



**Tablica 4.1. Presjek vodiča i trajna struja**

| Presjek vodiča<br>(mm <sup>2</sup> ) | Presjek vodiča<br>(mm <sup>2</sup> ) | Trajna struja<br>(A) |
|--------------------------------------|--------------------------------------|----------------------|
| 16/2.5                               | 15.3/2.55                            | 90                   |
| 25/4                                 | 23.8/4.0                             | 125                  |
| 35/6                                 | 34.3/5.7                             | 145                  |
| 50/8                                 | 48.3/8.0                             | 170                  |
| 70/12                                | 69.9/11.4                            | 235                  |
| 95/15                                | 94.4/15.3                            | 290                  |
| 120/20                               | 121.6/19.5                           | 345                  |
| 150/25                               | 148.9/24.2                           | 400                  |
| 185/30                               | 183.8/29.8                           | 455                  |
| 210/35                               | 209.1/34.1                           | 490                  |
| 240/40                               | 243.0/39.5                           | 530                  |
| 360/57                               | 360.2/57.3                           | 780                  |
| 490/65                               | 490.3/63.6                           | 951                  |
| 170/40                               | 171.8/40.1                           | 440                  |
| 240/55                               | 241.3/56.3                           | 530                  |
| 350/80                               | 349.3/78.9                           | 780                  |
| 490/110                              | 487.8/111.2                          | 961                  |
| 50/30                                | 51.2/29.8                            | 187                  |
| 95/55                                | 96.5/56.3                            | 364                  |
| 120/70                               | 122.0/71.3                           | 404                  |
| 75/80                                | 74.8/78.9                            | 240                  |
| 1045/45                              | 1045/45                              | 1544                 |

(Izvor: Nadzemni vodovi, Lajos Josza, Osijek, 2011)

| SLAVONSKI BROD-POŽEGA                      |                  |               |             |
|--|------------------|---------------|-------------|
|  | Osnovni vodič    | Vodič #1      | Vodič #2    |
| Tip:                                       | ACSR             | ACSS          | ACCC®       |
| Velicina (mm <sup>2</sup> Al - Kodno ime): | 149 - LGJ-150/25 | 152 - OSTRICH | 180 - ZADAR |
| Presjek aluminija (mm <sup>2</sup> ):      | 148,9            | 152,0         | 180,3       |
| Promjer (mm):                              | 17,100           | 17,272        | 17,100      |
| Nazivna prekidna sila (RTS (kN):           | 53,7             | 44,5          | 96,1        |
| Tezina (kg/km):                            | 601,0            | 613,5         | 574,3       |
| DC Otpor na 20°C (ohm/km):                 | 0,19390          | 0,18077       | 0,15521     |
| AC Otpor na 25°C (ohm/km):                 | 0,19803          | 0,18481       | 0,15857     |
| AC Otpor na 75°C (ohm/km):                 | 0,23706          | 0,22215       | 0,18981     |

**Slika 4.2. Usporedba tri različita vodiča za dalekovod Slavonki Brod-Požega**

Usporedba je napravljena za dalekovod Slavonski Brod-Požega. Za ovaj dalekovod smo usporedili Al/Če vodič sa ACSS i ACCC vodičima. Kao primjer za ACCC vodič smo odabrali vodič već korišten u Hrvatskoj (ACCC-Zadar). Prethodna slika prikazuje tri postavljena vodiča te njihove osnovne parametre i karakteristike. Prema [2] max pogonska struja je izmjenična struja koja neće zagrijati vodič više od 40 °C iznad temperature okoline. Prema Tablici 4.1. struja za naš slučaj iznosi 400 A. Mi smo pomoći CCP programa postavili temperaturu okoline na 35 °C i očitali max pogonsku struju (424 A) za vrijednost nazivne pogonske temperature. U daljnjem proreačunu smo koristili očitane struju.

|       | Osnovni vodič    | Vodic #1      | Vodic #2    | Verzija                 | Jezik                                   | Vrsta napona |
|-------|------------------|---------------|-------------|-------------------------|---|--------------|
| Tip:  | ACSR             | ACSS          | ACCC®       | 2.7.4b                  | Croatian                                | AC           |
| ime): | 149 - LGJ-150/25 | 152 - OSTRICH | 180 - ZADAR | Upis parametara okoline |   |              |
| nm²): | 148,9            | 152,0         | 180,3       | 1020,7                  | Zracenje (radijacija) sunca (W/m²)      |              |
| mm):  | 17,100           | 17,272        | 17,100      | 35                      | Temperatura okoline (°C)                |              |
| (kN): | 53,7             | 44,5          | 96,1        | 0,60                    | Brzina vjetra (m/s)                     |              |
| √km): | 601,0            | 613,5         | 574,3       | 0                       | Nadmorska visina (m)                    |              |
| √km): | 0,19390          | 0,18077       | 0,15521     | 0,50                    | Koeficijent solarne apsorpcije          |              |
| √km): | 0,19803          | 0,18481       | 0,15857     | 0,50                    | Koeficijent emisije                     |              |
| √km): | 0,23706          | 0,22215       | 0,18981     | 90                      | Kut vjetra na dalekovod (deg.)          |              |
| fazi: | 1                | 1             | 1           | 0                       | Smjer (azimut) dalekovoda (NS=0, EW=90) |              |
| gova: | 1                | 1             | 1           | 32                      | Zemljopisna sirina (neg = Jug)          |              |
| 60    | 321              | 333           | 359         | Kolovoz                 | Mjesec                                  |              |
| 75    | 424              | 853           | 874         | 21                      | Dan u mjesecu                           |              |
| 100   | 545              | 953           | 923         | 12                      | Vrijeme (24 h.)                         |              |
|       |                  |               |             | Clear                   | Atmosfera                               |              |

Slika 4.3. Određivanje max pogonske struje

| Verzija   | Jezik   | Vrsta napona | Odaberi jedi                              |
|---|---|--------------|---|
| 2.7.4b  | Croatian  | AC           | Metric                                    |
| <b>Upis parametara okoline</b>                                      |   |              |   |
| 894,7   | Zracenje (radijacija) sunca (W/m <sup>2</sup> ) |              | Klikni za po<br>pocetnih vr<br>parametara |
| 15  | Temperatura okoline (°C)                        |              |   |
| 0,60  | Brzina vjetra (m/s)                             |              |   |
| 0   | Nadmorska visina (m)                            |              |   |
| 0,50  | Koeficijent solarne apsorpcije                  |              |   |
| 0,50  | Koeficijent emisije                             |              |   |
| 90  | Kut vjetra na dalekovod (deg.)                  |              |   |
| 0   | Smjer (azimut) dalekovoda (NS=0, EW=90)         |              |   |
| 32  | Zemljopisna sirina (neg = Jug)                  |              |   |
| Studen  | Mjesec  |              |   |
| 21  | Dan u mjesecu                                   |              |   |
| 12  | Vrijeme (24 h.)                                 |              |   |
| Clear   | Atmosfera                                       |              |   |
| <b>Pretpostavke za analizu troskova gubitaka (Load/Generation C</b> |   |              |   |
| 35,4  | Duljina voda (km)                               |              |   |
| 110000  | Napon (V)                                       |              |   |
| 424   | Max pogonska struja                             |              |   |
| 72%   | Faktor snage                                    |              |   |
| 55%   | Faktor gubitaka                                 |              |   |
| 80780   | Max snaga po strujnom krugu (MW)                |              |   |
| 3   | Broj faza po strujnom krugu                     |              |   |
| 60  | Cijena energije za pokrice gubitaka (\$/MWh)    |              |   |
| 0,590   | CO <sub>2</sub> (kg/kWh)                        |              |   |
| 0%  | Povecanje snage/godina                          |              |   |

**Slika 4.4.** Prikaz parametara okoline i pretpostavki za analizu troškova gubitaka

Slika 4.4. prikazuje upisane parametre okoline te određene pretpostavke koje su nužne za analizu troškova snaga. Dalekovod je dio 110 kV prijenosne mreže te se prostire na 35,4 kilometra dužine. Postavili smo mjesec studeni zbog zadanih normi o sunčevu zračenju. Također smo postavili brzinu vjetra, koeficijent apsorpcije i emisije.

| Gubici na vodu (bazirano na upisanoj vrijednosti max pogonske struje)                   |             |             |             |
|---|-------------|-------------|-------------|
| Trajna temperatura (°C) kod max pogonske struje:  | 72          | 70          | 65          |
| Otpor kod max pogonske struje (ohm/km):   | 0,23472     | 0,21807     | 0,18350     |
| Gubici na vodu u prvoj godini (MWh):  | 21.538      | 20.010      | 16.838      |
| ACSR 149 - LGJ-150/25 - Smanjenje proizvodnje CO <sub>2</sub> u prvoj godini (MT):      | -409        | -1.528      | -1.257      |
| ACSR 149 - LGJ-150/25 - Smanjenje gubitaka na vodu u prvoj godini (MWh):                | -8%         | -28%        | -4.700      |
| ACSR 149 - LGJ-150/25 - Smanjenje gubitaka na vodu u prvoj godini (%):                  | -91.682     | -281.994    | -281.994    |
| ACSR 149 - LGJ-150/25 - Smanjenje gubitaka na vodu u prvoj godini (\$/God):             | -0,86       | -2,66       | -2,66       |
| ACSR 149 - LGJ-150/25 - Usteda na gubicima na vodu po metru vodica (\$/m):              |             |             |             |
| ACSR 149 - LGJ-150/25 - Smanjenje 30 god. gubitaka na vodu (\$):                        | -2.750.448  | -8.459.809  | -8.459.809  |
| ACSR 149 - LGJ-150/25 - Smanjenje 30 god. proizvodnje CO <sub>2</sub> (MT):             | -27.031     | -83.142     | -83.142     |
| <b>Povrat kapitala raspoloziv za max strujno opterecenje (ograniceno max provjesom)</b> |             |             |             |
| Max snaga za isporuku (20 h) (MWh):   | 2.121.797   | 3.393.522   | 3.542.241   |
| Moguci povrat kapitala za isporucenu energiju (\$):                                     | 148.525.760 | 237.546.547 | 247.956.864 |

**Slika 4.5.** Prikaz usporedbe gubitaka na vodu i raspoloživog povrata kapitala

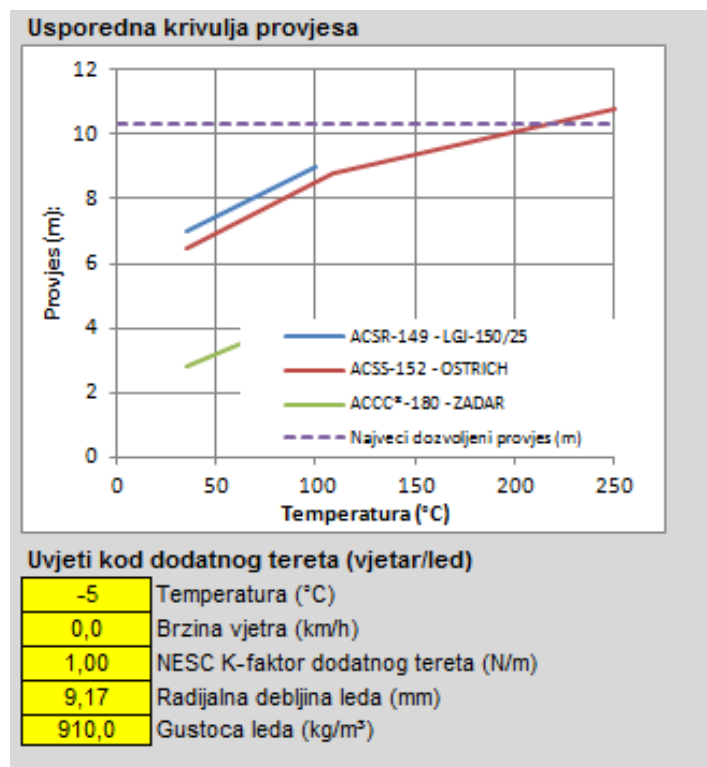
Iz slike 4.5. je moguće zeključiti da je ACCC vodič optimalan kada se govori o smanjenju gubitaka na vodu iz čega proizlazi materijalna ušteda na gubicima. Iz slike se vidi da je zbog smanjenja CO<sub>2</sub>. ACCC vodič je najpogodniji kada se govori iz ekološkog aspekta.

Visokotemperaturni vodič zbog svojih svojstava ima najveću maksimalnu snagu isporuke te je zbog toga i najveći mogući povrat kapitala za isporučenu električnu energiju.

| Pocetni provjes i zatezna sila  |  | % RTS:             | 15,0% | 20,0% | 20,0% |
|---|--|--------------------|-------|-------|-------|
| Provjes kod početne temperature montaže (m):                                  |  |                    | 7,03  | 6,49  | 2,81  |
| Početna zatezna sila kod temperaure montaže (kN):                             |  |                    | 8,1   | 8,9   | 19,2  |
| Provjes/Zatezna sila kod prikazane temperature vodica:                        |  | Temp (°C):         | 72    | 70    | 65    |
| Provjes kod max pogonske struje   |  | Provjes (m):       | 8,18  | 7,62  | 3,56  |
|   |  | Zatezna sila (kN): | 6,9   | 7,6   | 15,2  |
| Provjes kod nazivne pogonske temperature                                      |  | Temp (°C):         | 75    | 200   | 180   |
|   |  | Provjes (m):       | 8,27  | 10,09 | 3,72  |
|   |  | Zatezna sila (kN): | 6,8   | 5,7   | 14,5  |
| Provjes kod najveće dozvoljene temperature                                    |  | Temp (°C):         | 100   | 250   | 200   |
|   |  | Provjes (m):       | 8,99  | 10,78 | 3,75  |
|   |  | Zatezna sila (kN): | 6,3   | 5,4   | 14,4  |
| Temperatura kod najvećeg dozvoljenog provjesa                                 |  | Max temp (°C):     | 100   | 215   | 200   |
|   |  | Provjes (m):       | 8,99  | 10,30 | 3,75  |
|   |  | Zatezna sila (kN): | 6,3   | 5,6   | 14    |
| Celija strujne opteretivosti pokazuje CRVENO ako max kapacitet nije dostignut |  | Opteretivost (A):  | 557   | 891   | 930   |

**Slika 4.6.** Prikaz provjesa za različite temperature i opteretivosti

Slika 4.6. prikazuje proračunate provjese za zadane vodiče pri različitim temperaturama. Slika također prikazuje zateznu silu te je iz oba aspekta ACCC najpogodniji te nakon njega AL/Če i na kraju ACSS. Slika prikazuje i izračune kod uvjeta dodatnog terata i kod temperatura koljena. ACCC vodič je optimalan i što se tiče opteretivosti. Uočili smo da ACSS ne zadovoljava kriterij opteretivosti odnosno maksimalni kapacitet nije dostignut. Treba napomenuti da su moguća odstupanja zbog cijene MW/h električne energije i zbog odstupanja pri proračunu raspona i provjesa dalekovoda. Koristeći formule (3-9),(3-16) i (3-17) te na temelju idealnog raspona (277 m) smo izračunali najveći dozvoljeni provjes i uvrstili ga pri proračunu (10.3 m).



**Slika 4.7.** Prikaz postavljениh uvjeta kod dodatnog tereta

Postavljeni su parametri za uvjete dodatnog tereta. Dodatne uvjete smo postavili za temperaturu - 5 °C i dodatnim teretom leda. Sljedeća slika prikazuje provjese i zatezne sile pri uvjetima dodatnog tereta.

| Provjes/Zatezna sila kod uvjeta dodatnog tereta (vjetar/led): |       |      |      |
|---|-------|------|------|
| Provjes (m):  | 7,10  | 8,15 | 5,23 |
| Zatezna sila (kN):  | 18,5  | 16,3 | 24,6 |
| Provjes/Zatezna sila kod temperature koljena:                 |       |      |      |
| Temperatura koljena (°C):                                     | 261   | 109  | 63   |
| Provjes (m):  | 12,82 | 8,78 | 3,56 |
| Zatezna sila (kN):  | 4,4   | 6,6  | 15,2 |

**Slika 4.8.** Prikaz provjesa i zateznih sila kod uvjeta dodatnog tereta

Slika 4.8 prikazuje usporedbe provjesa i zateznih sila kod dodatnih zimskih uvjeta. Možemo vidjeti da se pojavljuju jako mali provjesi, a da su zatezne sile dosta velike.

## 4.2. Proračun za dalekovod Đakovo - Gradačac

|  | Osnovni vodič         | Vodič #1    | Vodič #2   |
|--|-----------------------|-------------|------------|
| Tip:                                       | ACSR                  | ACSS        | ACCC®      |
| Velicina (mm <sup>2</sup> Al - Kodno ime): | 362 - 362-AL1/59-ST1A | 363 - STILT | 362 - DOVE |
| Presjek aluminija (mm <sup>2</sup> ):      | 361,9                 | 362,5       | 361,5      |
| Promjer (mm):                              | 26,700                | 22,839      | 23,546     |
| Nazivna prekidna sila (RTS (kN):           | 123,0                 | 86,7        | 122,3      |
| Tezina (kg/km):                            | 1.473,9               | 1.370,1     | 1.082,8    |
| DC Otpor na 20°C (ohm/km):                 | 0,07980               | 0,07798     | 0,07705    |
| AC Otpor na 25°C (ohm/km):                 | 0,08194               | 0,07854     | 0,07916    |
| AC Otpor na 75°C (ohm/km):                 | 0,09793               | 0,09420     | 0,09470    |

Slika 4.9. Usporedba 3 različite vrste vodiča

Slika 4.9. prikazuje tri odabrana vodiča te njihove osnovne parametre. Odabrali smo Al/Če vodič sličan stvarnom vodiču na dalekovodu te ACCC i ACSS vodiče sličnih poprečnih presjeka. Na slici je moguće vidjeti karakteristike kao što su: promjer, presjek, prekidna sila, težina po kilometru i otpori pri različitim temperaturama.

|  | Osnovni vodič         | Vodič #1    | Vodič #2   | Verzija                 | Jezik   | Vrsta napona |
|--|-----------------------|-------------|------------|-------------------------|---|--------------|
| Tip:                                       | ACSR                  | ACSS        | ACCC®      | 2.7.4b                  | Croatian  | AC           |
| Velicina (mm <sup>2</sup> Al - Kodno ime): | 362 - 362-AL1/59-ST1A | 363 - STILT | 362 - DOVE | Upis parametara okoline |   |              |
| Presjek aluminija (mm <sup>2</sup> ):      | 361,9                 | 362,5       | 361,5      | 894,7                   | Zracenje (radijacija sunca (W/m <sup>2</sup> )) |              |
| Promjer (mm):                              | 26,700                | 22,839      | 23,546     | 15                      | Temperatura okoline (°C)                        |              |
| Nazivna prekidna sila (RTS (kN):           | 123,0                 | 86,7        | 122,3      | 0,60                    | Brzina vjetra (m/s)                             |              |
| Tezina (kg/km):                            | 1.473,9               | 1.370,1     | 1.082,8    | 0                       | Nadmorska visina (m)                            |              |
| DC Otpor na 20°C (ohm/km):                 | 0,07980               | 0,07798     | 0,07705    | 0,50                    | Koeфицијent solarne apsorpcije                  |              |
| AC Otpor na 25°C (ohm/km):                 | 0,08194               | 0,07854     | 0,07916    | 0,50                    | Koeфицијent emisije                             |              |
| AC Otpor na 75°C (ohm/km):                 | 0,09793               | 0,09420     | 0,09470    | 90                      | Kut vjetra na dalekovod (deg.)                  |              |
| Vodiča po fazi:                            | 1                     | 1           | 1          | 0                       | Smjer (azimut) dalekovoda (NS=0, EW=90)         |              |
| Broj strujnih krugova:                     | 1                     | 1           | 1          | 32                      | Zemljopisna sirina (neg = Jug)                  |              |
| Strujna snaga (A) kod temperature (°C):    | 55                    | 789         | 40         | 603                     | Mjesec  |              |
| Nazivna pogonske temp. (°C):               | 75                    | 962         | 200        | 1.518                   | Dan u mjesecu                                   |              |
| Strujna snaga (A) kod max temp. (°C):      | 100                   | 1.128       | 250        | 1.676                   | Vrijeme (24 h.)                                 |              |
|  |                       |             |            | 200                     | Atmosfera                                       |              |

Slika 4.10. Postupak proračuna maksimalne pogonske struje

| Verzija   | Jezik   | Vrsta napona | Oc |
|---|---|--------------|----|
| 2.7.4b  | Croatian  | AC           |    |
| <b>Upis parametara okoline</b>                            |   |              |    |
| 894,7   | Zracenje (radijacija) sunca (W/m <sup>2</sup> ) |              |    |
| 15  | Temperatura okoline (°C)                        |              |    |
| 0,60  | Brzina vjetra (m/s)                             |              |    |
| 0   | Nadmorska visina (m)                            |              |    |
| 0,50  | Koeficijent solarne apsorpcije                  |              |    |
| 0,50  | Koeficijent emisije                             |              |    |
| 90  | Kut vjetra na dalekovod (deg.)                  |              |    |
| 0   | Smjer (azimut) dalekovoda (NS=0, EW=90)         |              |    |
| 32  | Zemljopisna sirina (neg = Jug)                  |              |    |
| Studeni   | Mjesec  |              |    |
| 21  | Dan u mjesecu                                   |              |    |
| 12  | Vrijeme (24 h.)                                 |              |    |
| Clear   | Atmosfera                                       |              |    |
| <b>Pretpostavke za analizu troškova gubitaka (Load/Ge</b> |   |              |    |
| 48,2  | Duljina voda (km)                               |              |    |
| 220000  | Napon (V)                                       |              |    |
| 789   | Max pogonska struja                             |              |    |
| 34%   | Faktor snage                                    |              |    |
| 15%   | Faktor gubitaka                                 |              |    |
| 300641  | Max snaga po strujnom krugu (MW)                |              |    |
| 3   | Broj faza po strujnom krugu                     |              |    |
| 60  | Cijena energije za pokrice gubitaka (\$/MWh)    |              |    |
| 0,590   | CO <sub>2</sub> (kg/kWh)                        |              |    |
| 0%  | Povecanje snage/godina                          |              |    |

Slika 4.11. Prikaz parametara okoline i pretpostavki za analizu troškova gubitaka

Slika 4.11. prikazuje određene parametre okoline koje je program sam postavio, odnosno to su prosječne vrijednosti za okolinu u kojoj se nalazi dalekovod. Također prikazuje parametre koje smo sami postavili za proračun analize troškova gubitaka. Postavljena je duljina voda, nazivni napon, pogonska struja, faktor snage.

| Gubici na vodu (bazirano na upisanoj vrijednosti max pogonske struje)                   |             |             |             |
|---|-------------|-------------|-------------|
| Trajna temperatura (°C) kod max pogonske struje:  | 80          | 78          | 73          |
| Otpor kod max pogonske struje (ohm/km):   | 0,24115     | 0,22422     | 0,18859     |
| Gubici na vodu u prvoj godini (MWh):  | 22.128      | 20.574      | 17.305      |
| ACSR 149 - LGJ-150/25 - Smanjenje proizvodnje CO <sub>2</sub> u prvoj godini (MT):      |             | -416        | -1.290      |
| ACSR 149 - LGJ-150/25 - Smanjenje gubitaka na vodu u prvoj godini (MWh):                |             | -1.554      | -4.823      |
| ACSR 149 - LGJ-150/25 - Smanjenje gubitaka na vodu u prvoj godini (%):                  |             | -8%         | -28%        |
| ACSR 149 - LGJ-150/25 - Smanjenje gubitaka na vodu u prvoj godini (\$/God):             |             | -93.224     | -289.369    |
| ACSR 149 - LGJ-150/25 - Usteda na gubicima na vodu po metru vodica (\$/m):              |             | -0,88       | -2,72       |
| ACSR 149 - LGJ-150/25 - Smanjenje 30 god. gubitaka na vodu (\$):                        |             | -2.796.716  | -8.681.078  |
| ACSR 149 - LGJ-150/25 - Smanjenje 30 god. proizvodnje CO <sub>2</sub> (MT):             |             | -27.486     | -85.317     |
| <b>Povrat kapitala raspoloziv za max strujno opterecenje (ograniceno max provjesom)</b> |             |             |             |
| Max snaga za isporuku (20 h) (MWh):   | 1.989.034   | 3.329.477   | 3.467.853   |
| Moguci povrat kapitala za isporucenu energiju (\$):                                     | 139.232.410 | 233.063.363 | 242.749.742 |

Slika 4.12. Prikaz izračunatih gubitaka na vodu i povrata kapitala

Slika 4.12. prikazuje usporedu gubitaka na vodu. Moguće je vidjeti da je varijanta s ACCC vodičem optimalno rješenje. Na tridesetogodišnjoj razini se pojavljuje ušteda na gubitcima od 242.749.742 \$. Varijanta sa ACSR vodom je najnepovoljnija što je proračunom i dokazano.

Također s ekološkog aspekta se primjećuje smanjenja na emisiji  $CO_2$ . Na 20 h je maksimalna snaga isporuke za 30 posto veća kada uspoređujemo ACCC i Al/Če. Kada promatramo povrat kapitala za isporučenu električnu energiju najbolje rješenje je ACCC.

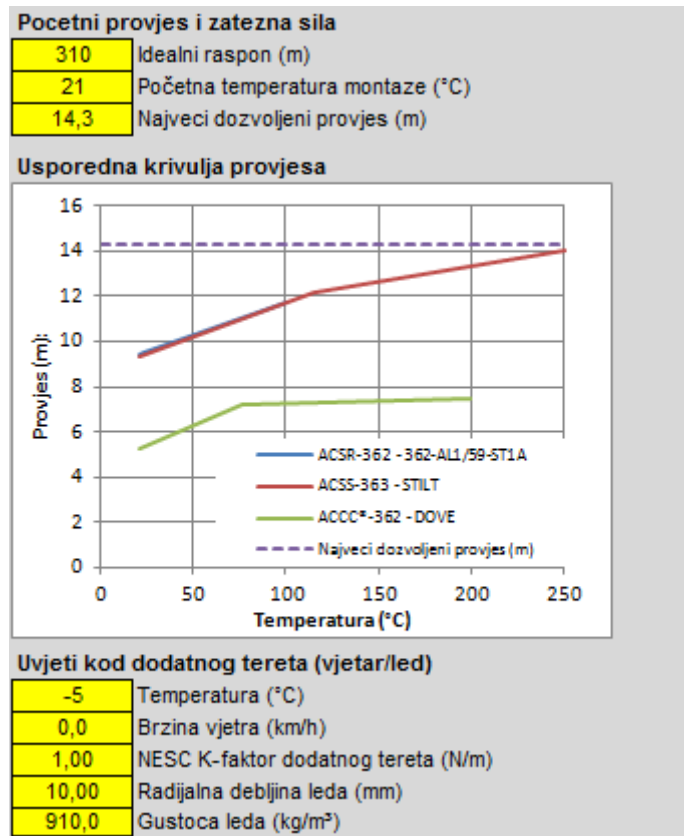
| Pocetni provjes i zatezna sila                                |  | % RTS:             | 15,0% | 20,0% | 20,0% |
|---|--|--------------------|-------|-------|-------|
| Provjes kod početne temperature montaže (m):                  |  |                    | 9,43  | 9,32  | 5,22  |
| Početna zatezna sila kod temperaure montaže (kN):             |  |                    | 18,4  | 17,3  | 24,5  |
| <b>Provjes/Zatezna sila kod prikazane temperature vodiča:</b> |  |                    |       |       |       |
| Provjes kod max pogonske struje                               |  | Temp (°C):         | 55    | 57    | 56    |
|   |  | Provjes (m):       | 9,90  | 9,87  | 5,85  |
|   |  | Zatezna sila (kN): | 17,6  | 16,4  | 21,8  |
| Provjes kod nazivne pogonske temperature                      |  | Temp (°C):         | 75    | 200   | 180   |
|   |  | Provjes (m):       | 10,51 | 12,97 | 7,20  |
|   |  | Zatezna sila (kN): | 16,5  | 12,5  | 17,7  |
| Provjes kod najveće dozvoljene temperature                    |  | Temp (°C):         | 100   | 250   | 200   |
|   |  | Provjes (m):       | 11,23 | 13,65 | 7,24  |
|   |  | Zatezna sila (kN): | 15,5  | 11,8  | 17,6  |
| Temperatura kod najvećeg dozvoljenog provjesa                 |  | Max temp (°C):     | 100   | 250   | 200   |
|   |  | Provjes (m):       | 11,23 | 13,65 | 7,24  |
|   |  | Zatezna sila (kN): | 15,5  | 11,8  | 18    |
|   |  | Opteretivost (A):  | 1.128 | 1.676 | 1.531 |

*Celija strujne opteretivosti pokazuje CRVENO ako max kapacitet nije dostignut*

**Slika 4.13.** Prikaz provjesa i zatezne sile za različite temperature vodiča

Slika 4.13. dokazuje tvrdnje iz teoretskog dijela da je ACCC vod optimalan kada se govori o provjesima i zateznim silama. Iz slike je moguće vidjeti da ACCC vod ima najmanje provjese pri svim temperaturama. U teoretskom dijelu je koeficijent temperature predstavljen kao jedan od pozitivnijih svojstava ACCC vodiča, što je sada i dokazano. Svi zadani vodiči zadovoljavaju postavljene kriterije. Treba napomenuti da su moguća odsupanja zbog različitih cijena električne energije te mogućeg odstupanja pri proračunu idealnog raspona i provjesa dalekovoda.





**Slika 4.14.** Zadani dodatni uvjeti na temelju vremenski prilika

Prethodna slika prikazuje dodatne uvjete postavljene u CCP-u pri vremenskim neprilikama. Dodatni uvjeti uslijed naleta vjetra i uslijed pojave leda na vodu. Također je moguće vidjeti na slici usporednu krivulju provjesa. Iz krivulje provjesa možemo zaključiti da su svi provjesi ispod razine maksimalnog zadanog provjesa.

| Provjes/Zatezna sila kod uvjeta dodatnog tereta (vjetar/led): |      | 9,37  | 10,12 | 7,52 |
|---|------|-------|-------|------|
| Provjes (m):  |      |       |       |      |
| Zatezna sila (kN):  | 33,0 | 28,1  | 33,6  |      |
| Provjes/Zatezna sila kod temperature koljena:                 |      |       |       |      |
| Temperatura koljena (°C):                                     | 23   | 115   | 76    |      |
| Provjes (m):  | 9,48 | 12,14 | 7,25  |      |
| Zatezna sila (kN):  | 18,3 | 13,3  | 17,6  |      |

**Slika 4.14.** Usporedba provjesa i zateznih sila kod dodatnog zimskog tereta

## 5. ZAKLJUČAK

Svaki pojedini dio opreme ili uređaj u električnoj mreži ima svoje vlastito životno vrijeme unutar kojega se očekuje da će raditi u skladu s postavljenim karakteristikama bez većeg broja zastoja i kvarova. Ako je u sustavu veći broj starih i dotrajalih jedinica čija je neraspoloživost povećana onda je narušena pouzdanost i smanjena sigurnost opskrbe potrošača električnom energijom što dovodi za posljedicu povećanje troškova elektroenergetskog sustava u cjelini. Očekivanu životnu dob pojedinih jedinica mreže nije moguće unaprijed odrediti pa se stoga određuju očekivane veličine na temelju što većeg broja uzoraka istovrsnih jedinica.

U radu je predstavljena teoretska slika o vodičima te je poseban akcenat stavljen na nove materijale u prijenosnoj mreži. Također jedan dio rada govori o mehaničkim svojstvima odnosno mehaničkom proračunu vodiča. Izvršena je međusobna usporedba za različite vrste vodiča pomoću CCP računalnog programa. Usporedba je vršena za dva prijenosna dalekovoda. Na samim tim dalekovodima je prije uočeno izduženje vodiča tj. povećanje provjesa koji su posljedica zamora materijala uslijed starosti vodiča i dugogodišnjeg korištenja (preko 40 god.). Analizom dobivenih rezultata je zaključeno da je primjena novih materijala kao što su kompozitne ACCC jezgre, potpuno opravdana te na kraju vrlo isplativa. Svi finacijski proračuni i proračuni smanjenja gubitaka električne energije govore u prilog novim materijalima u elektroenergetici.

Ukoliko to dopuštaju fizikalna svojstva stupova dalekovoda moguće je zamijeniti postojeći vodič s vodičem napravljenog od suvremenih materijala. To je nemoguće izvršiti bez posebne detaljne statičke analize.

## LITERATURA

- [1] Engineering Transmission Lines with High Capacity Low Sag ACCC® Conductors, CTC Global, [www.ctcglobal.com](http://www.ctcglobal.com), 2016
- [2] L.Jozsa, Nadzemni vodovi, Elektrotehnički fakultet, Osijek, 2011
- [3] L.Jozsa, Parametri nadzemnih vodova, Elektrotehnički fakultet, Osijek, 2006
- [4] I. Džubur, Ž. Timic, M. Dutina, *Problematika zamjene opreme na starijim dalekovodima*, Bled, 1989
- [5] T. O. Seppa, *End-of-life Phenomena of Splices and Conductors Including Copper Conductors*, 2002, Chicago, USA
- [6] C. J. Pon, *Laboratory Testing of Aged Conductors and Groundwire*, 2002, Chicago, USA
- [7] Comparison of overhead lines and underground cables for electricity transmission, Joint Working Group 21/22-01, Paris, 1996.

## **SAŽETAK**

U diplomskom radu su opisane vrste materijala vodiča za prijenosne dalekovode. Akcenat je stavljen na usporedbu dosadašnjih materijala za vodiče i novih kompozitnih visokotemperaturnih vodiča. Jedan od najvažnijih faktora koji utječe na normalno odvijanje EES-a kod prijenosa snage do krajnjeg korisnika električne energije jesu karakteristike prijenosne mreže i mogućnosti njezine operativnosti. Opisan je postupak proračuna dimenzioniranja dalekovoda s obzirom na mehaničke zahtjeve uz prisutnost promjenljivih atmosferskih prilika na postavljenom području. Uz primjenu teorijskog dijela, urađen je primjer proračuna za povećanje prijenosne moći za dva dalekovoda sa zamjenom vodiča i uz zadržavanje postojećih stupova. Napravljena je međusobna usporedba tri moguća rješenja različitih vrsta vodiča pomoću CCP programa za analizu tvrtke CTC Global. Analiza je vršena iz dobivenih rezultata.

Ključne riječi: dalekovod, materijali za vodiče, provjes, alučel uže, visokotemperaturni kompozitni vodič, aluminijski vodič s kompozitnom jezgrom- ACCC.

## **ABSTRACT**

In the final paper are described different material kinds of conductors for overhead power lines. Comparison between present materials for conductors and new high temperature low sag conductors is made. Factors that affect the normal operation of power system and power transmission to the end user of electricity are transmission network characteristics and capacity. In addition for planning and The process for calculating size of an overhead power line is described and it's made considering mechanic requirements with presence of changing atmospheric conditions and defined set of rules. With usage of theoretical part, calculation for increasing transmission power of power line with conductors replacement and with keeping present towers is done. Also, mutual comparison between three possible solutions of different kinds of conductors is made using CCP software from CTC Global. Results are commented.

Key words: Overhead Power Line, Materials for Conductors, Sag, Aluminum Conductor Steel Reinforced (ACSR), High Temperature Low Sag Conductor (HTLS), Aluminum Conductor Composite Core (ACCC).

## ŽIVOTOPIS

Ilija Matić rođen je 13.veljače 1993. u Đakovu. Odrastao i osnovnu školu završio u Domaljevcu (Bosna i Hercegovina) 2007.godine. Opću gimnaziju je završio u Županji 2011.godine. Iste godine upisuje Elektrotehnički fakultet Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku. Preddiplomski studij smjera elektroenergetike je završio 2014.godine. Završni rad je napisao na temu *Metodologija proračuna električnih parametara dalekovoda*. 2014.godine je upisao diplomski studij na kojem je diplomirao 2016.godine. Diplomski rad je napisao na temu *Primjena visoko temperaturnih ACCC vodiča u prijenosnoj mreži*.