

# Primjena visokotemperaturnih vodiča u elektroenergetskim mrežama

---

Novinc, Luka

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:974670>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

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



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski stručni studij elektrotehnike

Završni rad

**PRIMJENA VISOKOTEMPERATURNIH VODIČA U  
ELEKTROENERGETSKIM MREŽAMA**

Rijeka, srpanj 2022.

Luka Novinc

0069072468

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski stručni studij elektrotehnike

Završni rad

**PRIMJENA VISOKOTEMPERATURNIH VODIČA U  
ELEKTROENERGETSKIM MREŽAMA**

Mentor: Mr.sc. Marijana Živić Đurović, v. pred.

Rijeka, srpanj 2022.

Luka Novinc

0069072468

Rijeka, 15. ožujka 2022.

Zavod: **Zavod za elektroenergetiku**  
Predmet: **Elementi elektroenergetskih postrojenja**  
Grana: **2.03.01 elektroenergetika**

## ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Luka Novinc (0069072468)**  
Studij: **Preddiplomski stručni studij elektrotehnike**

Zadatak: **Primjena visokotemperaturnih vodiča u elektroenergetskim mrežama / High temperature conductors in electric power networks**

### Opis zadatka:

U radu je potrebno opisati visokotemperaturne vodiče te njihovu primjenu u prijenosnim i distribucijskim mrežama. Posebnu pažnju posvetiti prednostima i nedostacima visokotemperaturnih vodiča u odnosu na klasične nadzemne vodove od alučela.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

Zadatak uručen pristupniku: 21. ožujka 2022.

Mentor:



Mr. sc. Marijana Živić Đurović, v. pred.


Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:



Prof. dr. sc. Saša Vlahinić

## IZJAVA

Sukladno s člankom 8. Pravilnika o završnom radu, završnom ispitu i završetku stručnih studija Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, od siječnja 2020., izjavljujem da sam samostalno izradio završni rad naslova „Primjena visokotemperaturnih vodiča u elektroenergetskim mrežama“ prema zadatku za završni rad od 21.03.2022.



Luka Novinc



## SADRŽAJ

|  |    |
|--|----|
| 1. UVOD .....  | 1  |
| 2. OPĆENITO O NADZEMNIM VODOVIMA.....                        | 2  |
| 3. VISOKOTEMPERATURNI VODIČI (HTLS VODIČI).....              | 6  |
| 3.1. ACSS i ACSS/TW vodiči.....                              | 7  |
| 3.2. ACCR i ACCR/TW vodiči.....                              | 8  |
| 3.3. TACSR vodiči .....                                      | 9  |
| 3.4. ZTACIR(INVAR) i XTACIR vodiči .....                     | 12 |
| 3.5. ACCC vodiči .....                                       | 14 |
| 3.5.1. Prednosti ACCC vodiča.....                            | 14 |
| 3.5.2. Presjeci ACCC vodiča .....                            | 17 |
| 3.6. Materijali u sastavu visokotemperaturnih vodiča.....    | 20 |
| 3.7. Izgradnja novih dalekovoda i ugradnja vodiča.....       | 21 |
| 3.8. Tehnologija ACCC vodiča .....                           | 22 |
| 3.8.1 Električne karakteristike ACCC vodiča.....             | 22 |
| 3.8.2. Mehaničke karakteristike ACCC vodiča .....            | 24 |
| 4. HTLS VODIČI – PRIMJERI IZ PRAKSE.....                     | 25 |
| 4.1. Primjena HTLS vodiča u Hrvatskoj .....                  | 27 |
| 4.1.1. Analiza obnove postojećeg 35 kV DV Cres – Lošinj..... | 27 |
| 5. ZAKLJUČAK.....  | 29 |
| 6. LITERATURA .....  | 30 |
| 7. SAŽETAK .....   | 31 |

## 1. UVOD

Djelomično vođena čistom energijom i drugim političkim ciljevima, elektroindustrija prelazi na elektrane na vjetar, solarnu energiju i druge obnovljive izvore. Kako su neka postrojenja za proizvodnju električne energije građena blizu prirodnih obnovljivih izvora, tako je potrebno tu električnu energiju distribuirati preko veće udaljenosti dalekovodima do potrošača. Također i zbog sve većeg opterećenja na dalekovodima uzrokovano povećanjem potrošnje električne energije zbog stalnog širenja industrije.

Ispunjavanjem potrošačke potražnje, dalekovodima je potrebno povećati opterećenje koje bi mogli podnijeti, što je rezultiralo razvojem novih tehnologija nadzemnih vodiča koji mogu podnijeti veća opterećenja i naprezanja od konvencionalnih vodiča, te isto tako prenijeti veće kapacitete snage uz korištenje postojeće infrastrukture uz minimalna prilagođenja.

Jedan od novih vrsta nadzemnih vodiča je aluminijski vodič kompozitne jezgre (engl. Aluminium Conductor Composite Core, ACCC) koji se sve češće upotrebljava zbog svoje mogućnosti prenošenja većeg kapaciteta energije u odnosu na klasični Al/Fe vodič, s tim da ostane unutar fizičkih granica pri većim radnim temperaturama i višim strujama. Provjes je jedan od glavnih fizikalnih ograničenja za nadzemne vodove. Zbog njega moramo zadovoljiti dovoljan potreban razmak, između linije i tla, te između vodiča, uz uvjete da djeluju maksimalna opterećenja.

U prvom dijelu rada govori se općenito o nadzemnim vodovima, njihovim dijelovima, te je ukratko opisan klasičan alučelni vodič. Nadalje rad opisuje visokotemperaturne (HTLS) vodiče općenito, navode se vrste visokotemperaturnih vodiča, te njihova svojstva, prednosti i nedostaci. Poseban naglasak se daje ACCC vodiču kao najzastupljenijem vodiču za zamjenu postojećih vodiča. Naposljetku, navode se primjeri iz prakse uporabe i usporedbe HTLS vodiča s konvencionalnim ACCR vodičem.



## 2. OPĆENITO O NADZEMNIM VODOVIMA

Električni energetska vod je neizostavan dio električnih energetskih mreža koji omogućuje prijenos električne energije od jedne točke do druge unutar mreže. Vod se može graditi nadzemno (nadzemni vod) ili podzemno (kabel). Visokonaponske nadzemne vodove za prijenos energije na veće udaljenosti nazivamo dalekovodi. Vodovi se sastoje najčešće od jednog ili više vodiča (uglavnom su višekratnici broja tri) koji se zatim vješaju na tornjeve ili stupove. Kako je većina vodova osigurana zračnom izolacijom, nadzemni vodovi su jedan od najjeftinijih načina prijenosa veće količine energije na dužim trasama. Također električnu energiju možemo prenositi i podzemnim vodovima, odnosno kabelima, no zbog njihove veće cijene u usporedbi s nadzemnim vodovima, koristimo ih tamo gdje nemamo mogućnosti upotrebe nadzemnih kabela (urbana područja, zračne luke, itd.).

Stupovi za dalekovode se najčešće grade od metala, drveta ili armiranog betona. Grade se kao rešetkaste konstrukcije od čeličnih kutnih profila. Nedostatak čelične konstrukcije je korozija koja se izbjegava upotrebom nehrđajućih legura čelika ili se konstrukcija premazuje zaštitnim bojama.

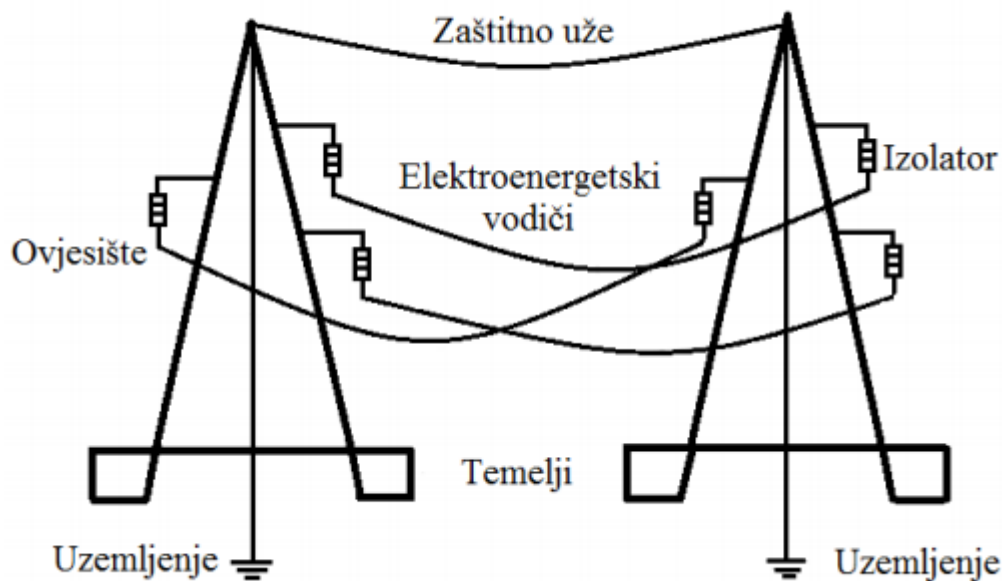
Drvo kao materijal je najčešći izbor za izradu stupova dalekovoda. U nekim zemljama (skandinavske zemlje, Kanada, Rusija, Amerika) se i dan danas koriste za napone sve do 220 kV, dok se u Hrvatskoj više upotrebljavaju za niskonaponske mreže. Njihova prednost je lagana i brza ugradnja i niska cijena, a nedostatak im je mala trajnost drveta koja se mora impregnirati različitim kemijskim svojstvima da bi vijek trajanja bio duži. Još možemo spomenuti i betonske stupove koji se rjeđe koriste zbog svoje glomaznosti i teškog transporta do lokacije gdje se ugrađuju. [5]

Nadzemne vodove možemo podijeliti po:

- Nazivnom naponu
- Broju strujnih krugova (trojki)
- Konstrukciji i materijalu za izradu stupova

Osnovni dijelovi nadzemnih vodova su:

- Stupovi
- Izolatori
- Vodiči
- Zaštitni vodiči
- Ovjesni, spojni i zaštitni pribor
- Temelji
- Uzemljenje



*Slika 2.1. Dijelovi nadzemnih vodova*

Vodič je jedna od najvažnijih komponenti nadzemnih vodova. Odabrati ispravnu vrstu vodiča isto je važno kao i odabrati vodiče koji su ekonomski isplativi. U izradi nadzemnih vodiča koriste se materijali koji moraju zadovoljiti neke od uvjeta, a to su: mehanička čvrstoća, dovoljna električna vodljivost, otpornost na koroziju i kao što smo naveli prije, moraju biti ekonomski prihvatljivi. Kako se ti uvjeti odnosno svojstva ne mogu naći u samo jednom materijalu, pri izradi vodiča vrši se kombiniranje materijala. Iako bakar ima bolju električnu vodljivost i vlačnu čvrstoću od aluminija, manje se koristi pri izradi nadzemnih vodova zbog svoje visoke cijene, pa je zato aluminij bolji izbor. Budući da aluminij ima slične nedostatke kao i bakar najčešće se koristi u kombinaciji s drugim materijalima, kao npr. alučel vodič koji je jedan od najrasprostranjenijih nadzemnih vodiča, a njegov plašt je sačinjen od aluminija, a jezgra od čelika. [5]

Alučel vodič uključuje dijelove od aluminijskog plašta i čelične jezgre. Kako je aluminij i do tri puta lakši od bakra, ima slabija mehanička svojstva, osjetljiv je na mehanička oštećenja i koroziju stoga se kombinira s čelikom koji ima loša električna svojstva, ali jako dobra mehanička.

Kako bi smanjili gubitke vrtložnih struja i gubitke histereze u čeličnoj jezgri, obično se izrađuje plašt od aluminija koji je dvoslojno pleten u suprotnom smjeru. [5]



*Slika 2.2. Kombinirani sukani vodič (Al/Fe)*

Normalna izvedba použenog vodiča ima glavnu žicu i oko nje sukane slojeve, od kojih je svaki novi sloj sukani na više, to jest svaki daljnji sloj će imati po 6 žica više. Zbog spiralnog sukanja žice u užu, ono mora biti 2-3% veće duljine od dužine užeta. Pri označavanju se koriste standardni, odnosno nazivni presjeci, a to su 10, 16, 25, 35, 70, 95, 120, 150, 185, 240, 300 mm<sup>2</sup>. Ako su presjeci oba vodiča istog presjeka, tada se ukupni broj žica računa po sljedećoj formuli:

$$n = 3x^2 - 3x + 1 \quad (2.1)$$

Gdje je:

x - broj slojeva

n = 1, 7, 19, 37, 41... (broj žica)

Tablica 2.1. Izvedbe kombiniranih sukanih vodiča

| Vodič    | Jezgra     |
|----------|------------|
| Aluminij | Čelik      |
| Aluminij | Alumoweld  |
| Aldrey   | Čelik      |
| Bakar    | Čelik      |
| Bakar    | Bronca     |
| Bakar    | Copperweld |

Prije projektiranja voda i provjesa moramo definirati stanja voda:

- 1) za temperaturu  $-20^{\circ}\text{C}$  bez leda
- 2) za temperaturu  $-5^{\circ}\text{C}$  s ledom
- 3) za temperaturu  $+40^{\circ}\text{C}$

Pri svakom od navedenih stanja ne smijemo dovesti u pitanje mehaničke čvrstoće, kod stanja 1 i 2 ne smije doći do pucanja vodiča, a kod trećeg stanja vodič se ne smije približiti preblizu zemlje.

### 3. VISOKOTEMPERATURNI VODIČI (HTLS VODIČI)

Zadnjih trideset godina dolazi do značajnog razvoja tehnologije i materijala izrade vodiča. Promjene se prvenstveno odnose na materijale plašta vodiča i jezgre, pružavanje te oblik žica vodiča. Taj razvoj omogućuje znatno poboljšanje električnih i mehaničkih karakteristika i ponašanja vodiča u eksploataciji. Optimizacijom navedenih parametara omogućuje se skladnije ponašanje vodiča kod promjene temperature, prvenstveno u smislu međuzavisnosti naprezanja i provjesa. Prema definiciji, visokotemperaturni vodiči imaju dopuštenu trajnu temperaturu u pogonu iznad 100 °C, odnosno u izvanrednim situacijama je dopuštena temperatura od 150 °C.

Premda široku primjenu visokotemperaturnih vodiča nalazimo u prijenosnim elektroenergetskim sustavima, u distribucijskim sustavima ovakva rješenja se tek počinju primjenjivati. Razlog tome jest činjenica da distributeri HTLS vodiča prilagođavaju svoje karakteristike vodiča zahtjevima prijenosnih mreža. Uostalom, proteklih godina dolazi do proizvodnje visokotemperaturnih vodiča s manjim poprečnim presjecima i promjerima kako bi se zadovoljile potrebe distribucijske mreže. Nadalje, u nastavku će se nabrojiti najčešće korišteni tipovi visokotemperaturnih vodiča uz pripadne kratice uvriježenih od strane struke:

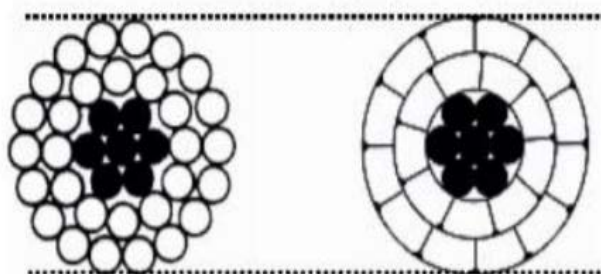
- **ACCR** – „Aluminium Conductor, Composite Reinforced“
- **ACCC** – „Aluminium Conductor Composite Core“
- **ZTACIR** – „Ultra Thermal Resistant Aluminium Alloy Conductor, Invar Reinforced“
- **GZTACSR** – „Gap Type Ultra Thermal Resistant Aluminium Alloy, Steel Reinforced“
- **(Z)TACSR** – „(Ultra) Thermal Resistant Aluminium Alloy Conductor, Steel Reinforced“
- **ACSS i ACSS/TW** – „Aluminium Conductor, Steel Supported, za /TW dodatno: trapezoidal wire“

Od spomenutih vrsta vodiča, trenutno se samo tri vrste HTLS vodiča primjenjuje u distribucijskoj mreži, a to su: ACCC, ACCR i ZTACIR. [1]

### 3.1. ACSS i ACSS/TW vodiči

ACSS (eng. „Aluminium conductor steel supported“) vodič je projektiran od užarenog aluminijskog plašta čije žice mogu biti trapezoidalnog ili okruglog oblika. Radi se o vodiču koji je jedan od najjeftinijih HTLS vodiča čija je cijena veća od Al/Fe vodiča za oko 1,5 do 2 puta. U izradi ACSS vodiča približno se koriste identični materijali kao i kod izrade Al/Fe vodiča zbog čega je ovaj vodič najčešći odabir za zamjenu Al/Fe vodiča. Pri temperaturama koje su definirane kao temperature koljena ACSS vodič se ponaša isto kao i ACSR vodič. To znači da aluminijski plašt i jezgra jednakopravno sudjeluju pri izduženju kao posljedica opterećenja ili promjene temperature. Naime, pri zagrijavanju ACSS vodiča iznad temperature koljena, aluminijske žice se osjetno više izduže od čeličnih žica u jezgri pa se zato ukupno opterećenje prenosi na čeličnu jezgru. Ovim fenomenom vodiču se omogućuje da u velikoj mjeri iskoristi svojstva čelične jezgre odnosno njezinu čvrstoću, mali iznos neelastičnog izduženja (engl. creep) i niski koeficijent linearnog istezanja.

Temperaturne granice ACSS vodiča su uvjetovana jezgrom koja ima ograničeno temperaturno žarenje u iznosu od 240°C, no temperatura površine zna biti i manja. U odnosu na Al/Fe vodič, ACSS vodič identičnog presjeka može prenijeti puno veću struju jer uspijeva biti u pogonu pri 200°C. Ako je čelična jezgra premazana „mischmetalom“ (Zn-5% Aluminijski premaz), tada vodič može biti i u pogonu na 250°C, odnosno 300°C, ako je jezgra premazana aluminijem. ACSS vodič ima mogućnost izvedbe kao kompaktan vodič zbog toga što jer se sastoji od plašta žica trapezoidalnog presjeka (engl. „Trapezoidal Wire, WR“) čime se smanjuje ukupan promjer za približno 10% u usporedbi sa standardnim ACSR vodičem identičnog promjera sastavljenog od okruglih žica. Prednost trapezoidne izvedbe plašta je u tome što se smanjuje i otpor po kilometru zbog toga što se povećanjem površine kojom prolazi električna struja, a otpor vodiča je manji što je površina veća. [1]

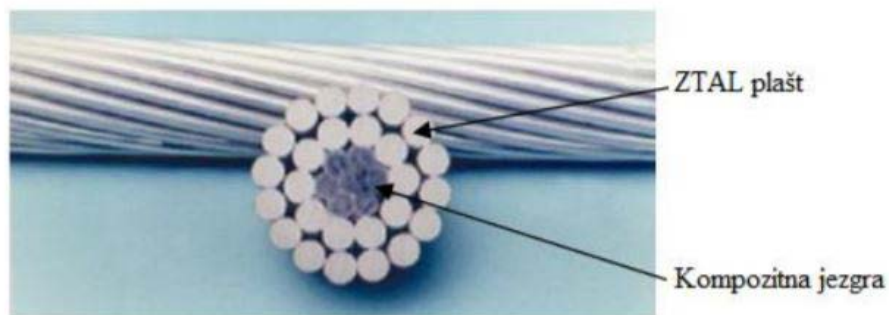


Slika 3.1. Presjek vodiča ACSS i ACSS/TW. [7]

Usljed djelovanja vjetra, manji promjer će rezultirati i manjim opterećenjem, a pogotovo na vodiče koji mogu biti zaleđeni, što ima pozitivan utjecaj na opterećenje stupova.

### 3.2. ACCR i ACCR/TW vodiči

Čelična jezgra od ACCR (engl. „Aluminium conductor, composite reinforced“) vodiča je zamijenjena karbonsko/aluminijskom matricom (žicom). Toplinska rastezljivost kompozitnih materijala imaju niski koeficijent, dok čvrstoću kompozitne jezgre možemo usporediti s čeličnom. Prilikom izduženja aluminijskog plašta, kompletno opterećenje će se prenijeti na matricu jezgre koje neće imati osjetno izduženje pri porastu temperature. ACCR vodič će imati puno manji provjes od ACSR i ACSS vodiča sličnog presjeka, pri visokim temperaturama. Najvažnija obilježja ACCR vodiča su: visok omjer čvrstoće na težinu užeta, velika čvrstoća, vodljivost i zadržavanje čvrstoće na visokim temperaturama.



*Slika 3.2. Presjek ACCR vodiča. [8]*

Plašt vodiča je izrađen od ojačane legure aluminijske koja je otporna na visoke temperature (Al-Zr). Ono što proizvođači naglašavaju jest da ACCR vodiči mogu neprestano biti opterećeni u pogonu na 210 °C, te u posebnim situacijama čak mogu podnijeti i temperaturu od 240°C. [1]

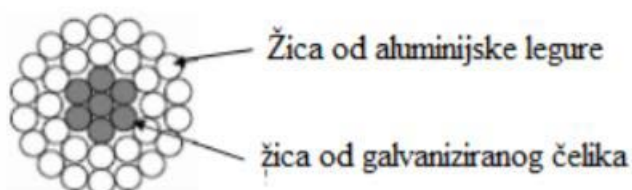
Tablica 3.1. Svojstva materijala jezgri ACCR i ACSR/ACSS vodiča

| Materijal jezgre  | Aluminijska matrica | Čelik |
|---|---------------------|-------|
| Čvrstoća (MPa)  | 1378                | 1275  |
| Gustoća(g/cm <sup>3</sup> )                             | 3,29                | 7,8   |
| Čvrstoća/gustoća  | 419                 | 163   |
| Koeficijent toplinskog istezanja (10 <sup>-6</sup> /°C) | 6,3                 | 12,1  |

Montaža ACCR tipa vodiča se vrlo malo razlikuje od montaže klasičnog Al/Fe vodiča. Mehanizacija i oprema namijenjena montaži Al/Fe vodiča se može primijeniti i za ACCDR vodič uz neke promjene. Spojna i ovjesna oprema se prilagođava vrsti materijala i radnim temperaturama vodiča. ACCR vodiči se poput ACSS vodiča prodaju s trapezoidalnim presjekom žica plašta (ACCR/TW). U odnosu na Al/Fe ili ACSS vodiče, ovi vodiči su skuplji zbog složenosti kompozitnih jezgri. [2]

### 3.3.TACSR vodiči

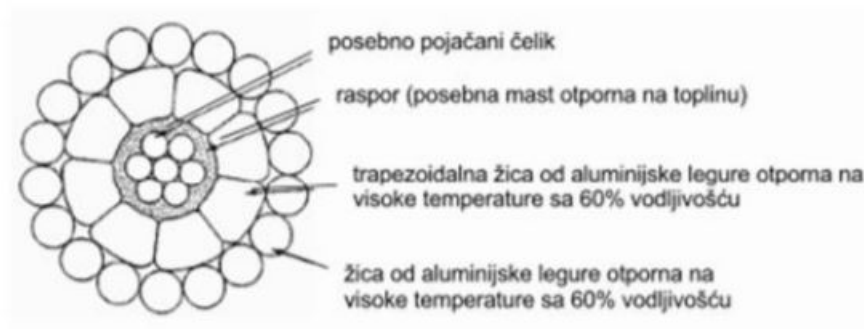
TACSR vodič ima jezgru od galvaniziranog čelika i plašt izrađen iz TAL žica. Iste je građe poput standardnog Al/Fe vodiča, no jedina razlika je ta što mu je u aluminijsku leguru dodan cirkonij ((Z)TACSR) koji mu osigurava bolju otpornost plašta na veće temperature. Toplinska rastezljivost (Z)TACSR vodiča je ista kao i kod Al/Fe vodiča, ali nema smanjenje provjesa na višim temperaturama. Glavna prednost TACSR vodiča je visoka tolerancija legure aluminijske žice na žarišnu temperatura, to jest žice od TAL-a ne žare do temperature od 150 °C, a ZTAL-a ne žare do temperature od 210 °C. Zato se (Z)TACSR vodiči upotrebljavaju za povećanje prijenosne moći tamo gdje su potrebne dodatne sigurnosne udaljenosti i visine. [1]



Slika 3.3. Presjek TACSR vodiča. [8]

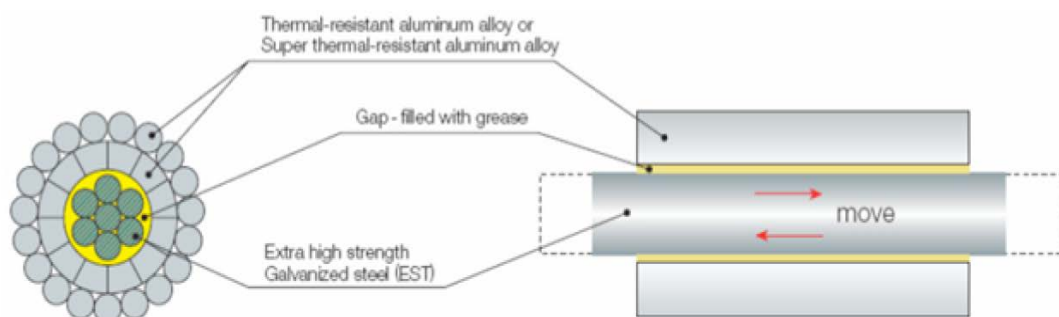


Al/Fe vodič u usporedbi s (Z)TACSR-om gotovo je identičan, jedina njihova razlika je u višem specifičnom električnom otporu legure (Z)TACSR vodiča. (Z)TACSR ili poznatiji kao „black conductor“ u komercijalnoj upotrebi. Ime je dobio po svojoj premazanoj vanjskoj površini što mu omogućuje povećanje kapaciteta prijenosa električne energije za 5% do 10% uz veću emisije topline. Montaža TACSR vodiča je vrlo jednostavna zbog svoje sličnosti Al/Fe vodičem, pa je ujedno i oprema za spajanje ista, no treba je prilagoditi višoj radnoj temperaturi vodiča.



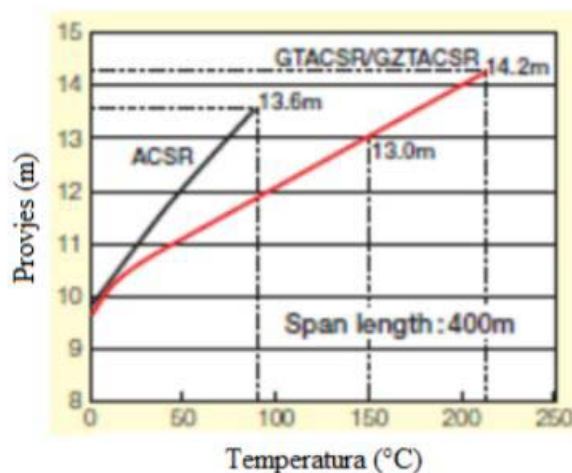
Slika 3.4. Presjek GTACSR vodiča. [8]

Osim „crnog vodiča“, koristi se i GTACSR vodič, (GT „gap type“). GTACSR vodič sastavljen od čelične jezgre i termički otpornim mazivom koji odvaja jezgru od plašta. Taj raspor je ispunjen specijalnom ispunom, odnosno mašću koja je otporna na toplinu kako bi se smanjilo trenje između sloja aluminijske legure i čelične jezgre, te sprečavanje prodora vlage. Kada je užo napeto, kod prenošenja opterećenja na jezgru koriste se posebne tehnike. Zbog toga se jezgra promatra kao zasebno tijelo odnosno nosivi element koji se može kontrolirati. [1]



Slika 3.5. Prikaz GTACSR konstrukcije vodiča. [9]

Premda su „gap type“ poprilično jeftiniji vodiči od ostalih visokotemperaturnih vodiča, način na koji se razvlači i montira vodič vrlo je kompleksan. Kompleksnost se odnosi na to da se dio procesa montaže mora odraditi na samome stupu što može predstavljati dodatne sigurnosne rizike zbog montaže vodiča na visini. Jedan od glavnih nedostataka prilikom montaže vodiča na nosivi stup je izvođenje „nosivo-zateznog“ zavješnja koje se mora izvoditi svakih pet do najviše šest raspona u zateznom polju. Zbog svoje pristupačne cijene, u Velikoj Britaniji ovaj tip vodiča se postavlja često usprkos kompliciranoj montaži. [1,2]



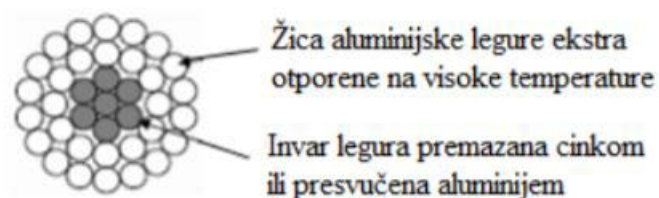
Slika 3.6. Usporedba provjesa ACSR vodiča s GTACSR/GZTACSR vodiča. [8]

Trenutno imamo dva poznata „gap“ tipa vodiča:

- GTACSR (alumijska legura otporna na visoke temperature) vodič koji može prenijeti 1,6 puta veću struju.
- GZTACSR („super“ alumijska legura otporna na izrazito velike temperature) vodič koji može prenijeti 2 puta veću struju od ACSR vodiča.

### 3.4. ZTACIR(INVAR) i XTACIR vodiči

XTACIR su vodiči kojima je glavna različita karakteristika u odnosu na konvencionalni ACSR vodič ta, da mu je vlastita jezgra izrađena od okruglih žica od INVAR-a. Plašt sadrži žice od aluminijske legure koje su ekstra otporne na visoke temperature. INVAR je vrsta legure željeza i od 36% do 38% nikla, čije najvažnije svojstvo leži u činjenici da ima koeficijent linearne ekspanzije praktički nepromjenjiv s toplinom. Ovi vodiči mogu biti trajno u pogonu na temperaturi od 230 °C. INVAR vodiče karakterizira prijelazna temperatura koja iznosi između 85°C i 100°C, te nakon koje svu mehaničku čvrstoću vodiča preuzima INVAR jezgra. Po ovim karakteristikama primjećuje se da je konvencionalni ACSR vodič vrlo sličan ZTACIR vodičima do prijelazne temperature. Prednosti ZTACIR vodiča postaju očite nakon prelaska temperature od oko 85°C - 100°C. Pribor i metode za montažu XTACIR vodiča je također identičan kao i za Al/Fe vodiče uz određene prilagodbe na višim radnim temperaturama. Slično kao i XTACIR vodič, ZTACIR vodič ima jezgru od galvaniziranih žica od Invara (Fe -36% -38% Ni) koje su okružene plaštom ZTAL žice koje mogu trajno podnositi temperature do 210 °C. [1]



Slika 3.7. Presjek ZTACIR vodiča. [8]

Tablica 3.2. Prednosti i nedostaci visokotemperaturnih vodiča

| Vodič         | Prednosti   | Nedostaci  |
|---------------|---|--|
| <b>ACSS</b>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Radna temperatura do 250°C</li> <li>- Manje povećanje provjesa pri visokim temperaturama</li> <li>- Veća sposobnost samopriгуšivanja</li> <li>- Smanjeno „puzanje“ materijala</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Manja vlačna čvrstoća</li> <li>- Veća cijena</li> </ul>   |
| <b>ZTACIR</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Radna temperatura do 210°C</li> <li>- Niže povećanje provjesa za temperature iznad prijelazne točke</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Manja vlačna čvrstoća</li> <li>- Za temperature ispod prijelazne točke provjes u odnosu na temperaturu sličnih je karakteristika kao i ACSR vodič</li> <li>- Veća cijena</li> </ul> |
| <b>GTACSR</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Radna temperatura do 150°C</li> <li>- Niže povećanje provjesa za cijeli temperaturni raspon</li> <li>- Veća vlačna čvrstoća</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Kompliciraniji postupak razvlačenja</li> <li>- Veća cijena</li> </ul>   |

### 3.5. ACCC vodiči

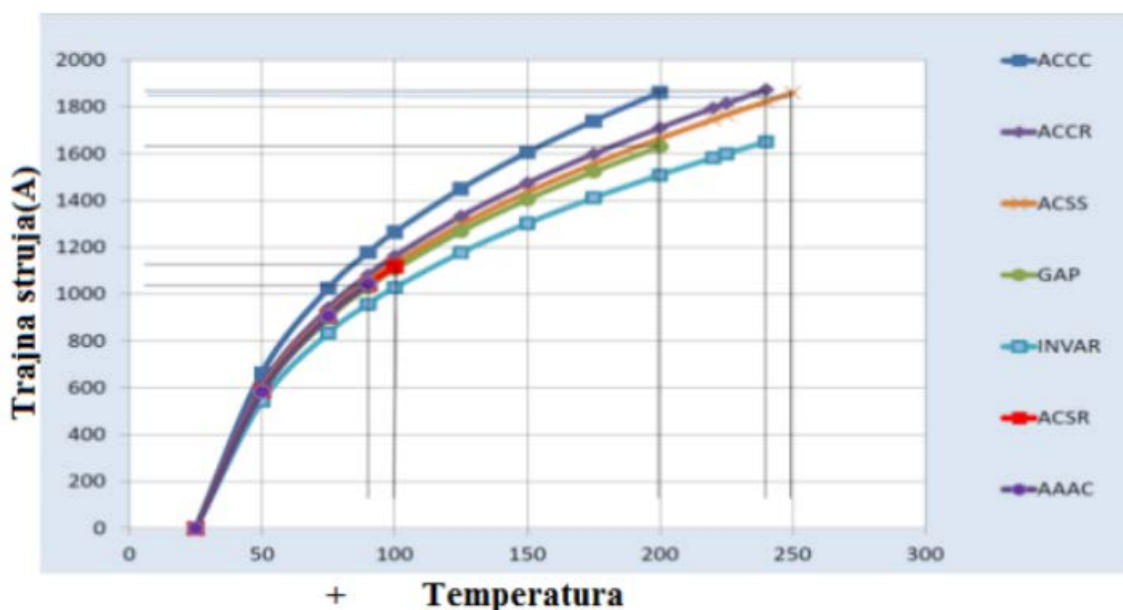
Visokotemperaturni, odnosno ACCC vodiči imaju jezgru od kompozitno karbonskih materijala to jest staklenih vlakana koje su od organskih materijala epoksidne matrice, te višestrukih niti aluminijske legure koje tvore plašt. Aluminijske niti koje tvore plašt trapezastog su oblika što je posljedica povećanog presjeka aluminijske niti koja povećava vodljivost i strujno opterećenje vodiča u odnosu na ACSR vodič. Staklene niti omogućuju poboljšanje žilavosti i fleksibilnosti vodiča dok se istovremeno ponaša kao i dielektrik kojim se sprječava galvanska korozija između aluminijskih niti i karbonskih vlakana. Prednost konstrukcije kompozitne jezgre je ta što doprinosi većem omjer čvrstoće i male mase. Područje radne temperature ACCC vodiča je do 180 °C (kratkotrajno i do 200 °C) a poseban je po tome što je znatno hladniji od vodiča okruglog presjeka sličnog promjera i mase pri sličnoj radnoj temperaturi. Razlog tome jest što ACCC vodič ima plašt koji je izveden od kaljenog aluminija 1350-O. [1]



*Slika 3.8. Visokotemperaturni vodiči s kompozitnim jezgrama: lijevo ACCR, desno ACCC. [1]*

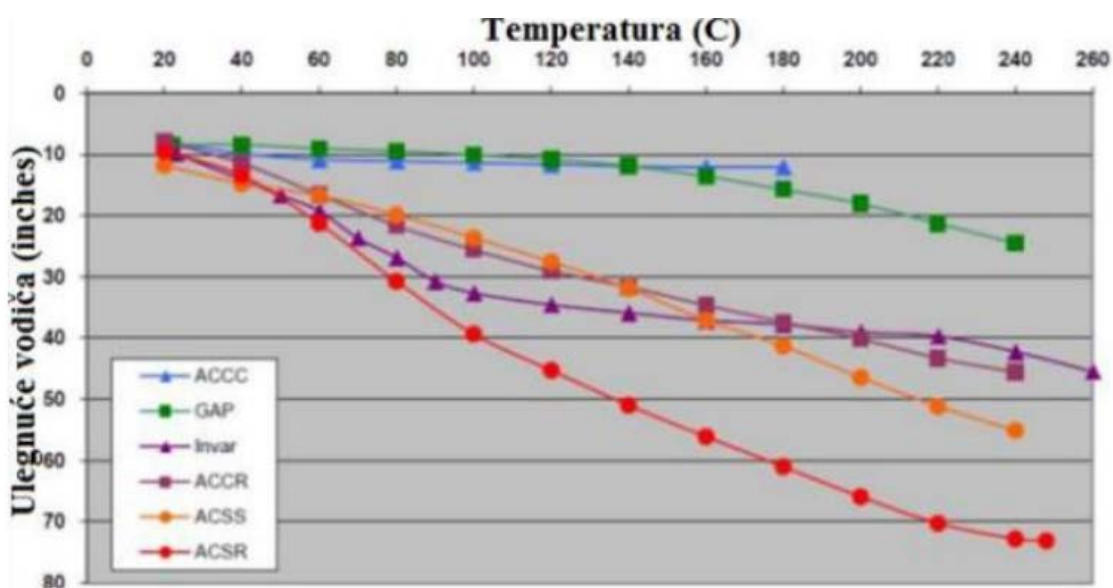
#### 3.5.1. Prednosti ACCC vodiča

Za veliku vodljivost ACCC vodiča u odnosu na konvencionalne ACSR vodiče odnosno Al/Fe vodiče zaslužna je veća količina aluminija u nitima trapezoidalnog oblika prilikom izrade plašta vodiča, točnije oko 28% više. Jezgra koja se sastoji od kompozitno karbonskih vlakana doprinosi malom koeficijentu toplinskog širenja jezgre, te boljih mehaničkih svojstava samog vodiča, kao što su velika čvrstoća i mali provjes pri visokim temperaturama. Glavna zadaća pri razvijanju ACCC vodiča je dvostruko povećanje prijenosa električne energije odnosno struje.



Slika 3.9. Maksimalna pogonska struja vodiča u ovisnosti o temperaturi. [1]

Koeficijent toplinskog širenja koji je otprilike 9 puta veći od tipičnih ACSS, AAAC ili ACSR vodiča omogućuje ACCC vodičima rad na većim temperaturama zbog čega ima mogućnost većeg prijenosa električne energije u odnosu na navedene vodiče. Zbog svojih kvalitetnih svojstava ACCC vodič je dobar odabir pri zamjeni konvencionalnih vodiča na dalekovodima s time da nije potrebno dodatno pojačavanje strukture.

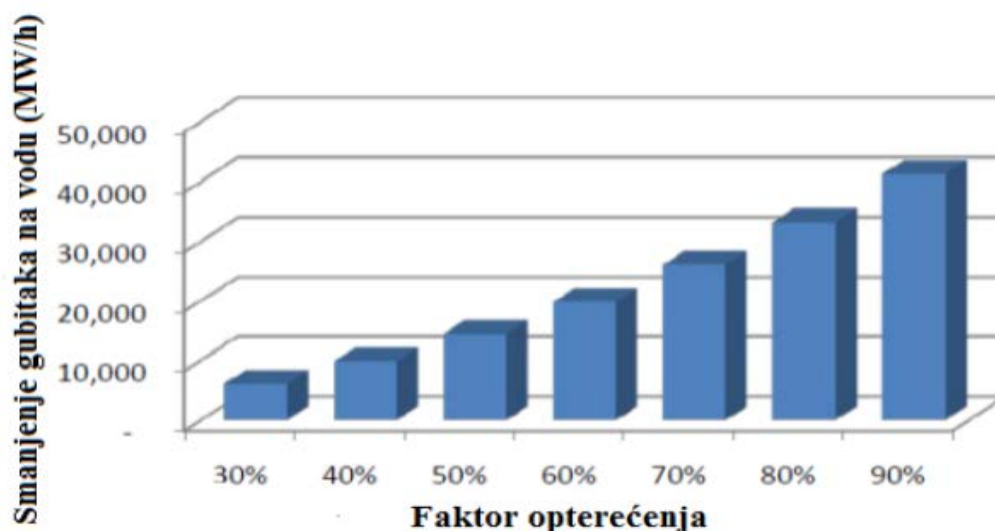


Slika 3.10. Usporedba provjesa i temperature vodiča. [1]

Veća količina aluminija pri izradi vodiča omogućuje bolju vodljivost, smanjenje gubitaka i emisija CO<sub>2</sub>, te manji trošak proizvodnje.

Slika 3.10. prikazuje smanjenje gubitaka na dalekovodu zamjenom Al/Fe vodiča s ACCC vodičem.

Zbog visokog omjera čvrstoće na težinu użeta i odličnoj karakteristici provjesa na visokim temperaturama smanjeno je opterećenje samog stupa dalekovoda, koje je pri distribuciji električne energije veoma važno i korisno kako bi se izbjegli neželjeni kvarovi koji mogu dovesti do velikih ekonomskih gubitaka. Pri odabiru vodiča najveća važnost se pridaje proračunu opterećenja koji detaljnije opisuje najbolji izbor vodiča za određenu trasu dalekovoda. U prošlosti prednost unapređenja su imali transformatorske tehnologije i generatori. Iako su investicije za takva unapređenja bila vrlo skupa, takvi troškovi su opravdani poboljšanom učinkovitošću i kraćim životnim ciklusom. Danas, zbog klimatskih promjena i sve viših temperatura zraka, struka se zalaže za veće unapređenje učinkovitosti prijenosa i distribucije električne energije odnosno novom izgradnjom ili zamjenom postojećih vodiča dalekovoda. Za primjer se može navesti novoizgrađeni dio dalekovoda u SAD-u duţine 160,9 km i nazivnog napona 345 kV. Postojeći dalekovod je imao Al/Fe vodič koji je zamijenjen s novim ACCC vodičem, koji bi prema izračunu trebao napraviti uštedu veću od 300000 MWh električne energije u godini.



Slika 3.11. Smanjenje gubitaka na dalekovodu. [2]

### 3.5.2. Presjeci ACCC vodiča

Postoji devet osnovnih veličina ACCC jezgri koje se pojavljuju kod 40 vrsta konstruiranih vodiča u rasponu  $150 \text{ mm}^2 - 1400 \text{ mm}^2$ . Tablica 3.3. prikazuje svojstva svake jezgre, odnosno preciznije specifikacije ACCC vodiča navedenih u metričkim jedinicama. Tablica 3.4. i Tablica 3.5. opširno prikazuje do sada korištene vodiče i njihova svojstva prema IEC normi.

Kako je svaki projekt drugačiji odnosno zahtjevi su različiti, potrebno je prilagoditi dizajn vodiča određenim zahtjevima projekta kao što su teren, struja vodiča, ekološki uvjeti, kapacitet voda i stanje postavljenih objekata. Zbog navedenih razloga ponekad je potrebno proizvesti novu vrstu vodiča ukoliko je takav zahtjev projekta.

Tablica 3.3. Specifikacije ACCC vodiča.

| Specifikacija ACCC kompozitnih jezgri u metričkim jedinicama |                                       |         |         |         |         |         |         |         |         |
|--|---------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| CTC naziv  |                                       | 200-003 | 200-004 | 200-005 | 200-006 | 200-007 | 200-008 | 200-009 | 200-010 |
| Metrička oznaka jezgre                                       | (mm)                                  | 5,97    | 7,11    | 7,75    | 8,13    | 9,53    | 8,66    | 9,78    | 10,03   |
| Nazivni promjer kompozitne jezgre                            | (mm)                                  | 5,97    | 7,17    | 7,75    | 8,13    | 9,53    | 8,66    | 9,78    | 10,03   |
| Dopušteno odstupanje promjera                                | (mm)                                  | ± 0,05  | ± 0,05  | ± 0,05  | ± 0,05  | ± 0,05  | ± 0,05  | ± 0,05  | ± 0,05  |
| Nazivni presjek jezgre                                       | (mm <sup>2</sup> )                    | 28      | 39,7    | 47,1    | 51,9    | 71,3    | 60,3    | 75,1    | 79,1    |
| Procijenjena snaga jezgre                                    | (Mpa)                                 | 2158    | 2158    | 2158    | 2158    | 2158    | 2158    | 2158    | 2158    |
| Prekidna sila  | (kN)                                  | 60,4    | 84,7    | 101,7   | 112     | 153,8   | 130,2   | 162,1   | 170,6   |
| Nazivna masa jezgre  | (kg/km)                               | 54      | 76      | 86      | 98      | 132     | 113     | 143     | 147     |
| Konačni modul elastičnosti                                   | (Gpa)                                 | 112,3   | 112,3   | 112,3   | 112,3   | 112,3   | 112,3   | 112,3   | 112,3   |
| Temperaturni koeficijent                                     | ( $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ) | 1,61    | 1,61    | 1,61    | 1,61    | 1,61    | 1,61    | 1,61    | 1,61    |
| Specifični toplinski kapacitet jezgre                        | (J/g °C)                              | 0,813   | 0,813   | 0,813   | 0,813   | 0,813   | 0,813   | 0,813   | 0,813   |
| Preporučena radna temperatura                                | (°C)                                  | 180     | 180     | 180     | 180     | 180     | 180     | 180     | 180     |
| Kritična temperatura jezgre                                  | (°C)                                  | 200     | 200     | 200     | 200     | 200     | 200     | 200     | 200     |



Tablica 3.4. Specifikacije pojedinih vodiča 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 |       |
|                          | (kcmil) | (mm <sup>2</sup> ) |                 |              |            |                      |                      |           |           |           | (mm)        | (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 |

Tablica 3.5. Specifikacije pojedinih vodiča 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 |       |
|                | (kcmil) | (mm <sup>2</sup> ) |                 |              |            |                      |                      |           |           |           | (mm)        | (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 |
| GROSBEAK       | 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 |

### 3.6. Materijali u sastavu visokotemperaturnih vodiča

Visokotemperaturni vodiči sastavljeni su od raznih legura i vrsta žica aluminija koji su korišteni pri izradi plašta vodiča, te sastavu njegove jezgre, koje su opisane u Tablici 3.6. i Tablici 3.7.

Tablica 3.6. Karakteristike aluminija i visokotemperaturnih legura.

| OPIS   | IME       | ASTM specifikacija | (% IACS *) | Min. prekidna sila (Mpa) | Termička ograničenja |                       |
|--|-----------|--------------------|------------|--------------------------|----------------------|-----------------------|
|  |           |                    |            |                          | Trajno               | Izvanredno (<10 sati) |
| Tvrdo vučeni                                       | 1350-H19  | B230               | 61.2       | 162-172                  | 90                   | 120                   |
| Ekstra čvrsta aluminijaska legura                  | 5005-H19  |                    | 53.3       | 248                      | 90                   | 120                   |
| Aluminijaska legura visoke čvrstoće                | 6201b-T81 | B398               |            | 317-331                  | 90                   | 120                   |
| Žareni   | 1350-0    | B609               | 63         | 55-96                    | 250                  | 250                   |
| Toplinski otporna legura                           | TAL       |                    | 60         | 165-186                  | 150                  | 180                   |
| Toplinski otporna legura aluminija visoke čvrstoće | KTAL      |                    | 55         | 186-252                  | 150                  | 180                   |
| Toplinski ultra otporna legura aluminija           | ZTAL&UTAL |                    | 60         | 165-186                  | 200                  | 240                   |
| Toplinski ekstra otporna legura aluminija          | XTAL      |                    | 58         | 165-186                  | 230                  | 260                   |

\*%IACS (engl. International Annealed Copper Standard) označava postotnu vodljivost materijala u odnosu na električnu vodljivost tržišnog čistog žarenog bakra čija je vodljivost jednaka  $5.8001 \times 10^7$  S/m

Tablica 3.7. Karakteristike materijala koji se koriste u jezgrama vodiča.

| OPIS   | ASTM specifikacija | Modul elastičnosti (GPa) | Min. prekidna sila (MPa) | Koeficijent temperaturnog izduženja ( $\times 10^{-8}/^{\circ}\text{C}$ ) | Uzdužna masa ( $\text{mg}/\text{mm}^3$ ) |
|--|--------------------|--------------------------|--------------------------|---|--|
| Čelik visoke čvrstoće (HS)                             | B498               | 200                      | 1379-1448                | 11.5  | 7.778                                    |
| Čelik ekstra visoke čvrstoće (EHS)                     | B606               | 200                      | 1517                     | 11.5  | 7.778                                    |
| Čelik ekstra visoke čvrstoće presvučen galfanom (EXHS) |                    | 200                      | 1965                     | 11.5  | 7.778                                    |
| Čelik presvučen aluminijem (20.3%IACS)                 | B502               | 162                      | 1103-1345                | 13.0  | 6.588                                    |
| Galvanizirani Invar                                    | B388, B753         | 162                      | 1034-1069                | 1.5 – 3.0   | 7.778                                    |
| Čelik visoke čvrstoće (HS) presvučen mischmetalom      | A856, A857         | 200(I)-186(F)            | 1379-1448<br>1517-1620   | 11.5  | 7.778                                    |
| Aluminij-oksidsna matrica                              |                    | 215                      | 1310                     | 6   | 3.332                                    |
| Ugljična vlakna  |                    | 124                      | 4295                     | 1.61  | 1.938                                    |

### 3.7. Izgradnja novih dalekovoda i ugradnja vodiča

Ponekad izgradnja novih dalekovoda nije moguća niti ekonomski isplativa, stoga se povećanje kapaciteta prijenosne mreže unapređuje na postojećim dalekovodima. Ukoliko se vrši zamjena postojeće trase ACCC vodičem, velika je prednost u tome što nisu potrebne dodatne modifikacije stupa. Pri izradi novog dalekovoda postoji mogućnost smanjenja izgradnje broja stupova u donjem profilu provjesa.

Ugradnja ACCC vodiča ne zahtijeva novu ili dodatnu opremu, već se koriste uobičajena oprema i način ugradnje, te zbog svojih svojstava ACCC vodič tako povećava kapacitet prijenosa snage na postojećim stupovima dalekovoda

### 3.8. Tehnologija ACCC vodiča

Brojna su električna svojstva i mehanička svojstva čija je velika važnost u izvedbi vodiča, njegove dugovječnosti i učinkovitosti zato što navedene karakteristike imaju utjecaj na troškove životnog ciklusa i na početne troškove. Pod karakteristike se ubrajaju prijenos struje, masa, čvrstoća, brzina puzanja, promjer, raspon radne temperature, samokontrola, toplinska stabilnost, otpornost na zamor, koeficijent toplinskog širenja te sposobnost kratkog spoja. Važno je napomenuti kako ACCC vodiči pružaju približno dvostruko veći kapacitet od konvencionalnog ACSR vodiča(Al/Fe) istog promjera što rezultira manjim strukturnim opterećenjima.

CTC Global je tvrtka koja je specijalizirana za izradu, razvijanje i istraživanje novih HTLS visokotemperaturnih vodiča, te je njihov primarni proizvod „CTC Global ACCC® Conductor“. CTC Global je sa svojim partnerima izradila nekoliko ACCC vodiča istih presjeka u odnosu na ACSR i ACSS vodiče. Primjerice, Drake ACCC vodič ima isti presjek kao i ACSR Drake vodič. Kako su se HTLS vodiči počeli primjenjivati i izvan SAD-a, dogovoreno je da se nazivi odabiru po imenima grada u kojem se izvršava montaža da bi se lakše razlikovali od drugih standardnih vodiča čije su dimenzije propisane od strane IEC-a („International Electrotechnical Commission“).

[1]

#### 3.8.1 Električne karakteristike ACCC vodiča

Za provedbu bilo kojeg projekta, primarno je odrediti električno opterećenje koje će distribucijska ili prijenosna mreža prenositi do krajnjeg potrošača. Neke trase su poprilično lako izvedive, međutim druge trase unutar mreže mogu biti utjecane pozitivno ili negativno ovisno o tome kako su nadograđene ili nove trase povezane. Prilikom planiranja ili nadogradnje postojećih dalekovoda važno je uzeti u obzir faktore poput: duljine trase, napona, struje, gubitaka, pada napona te stabilnosti. Veća razmatranja postaju složenija što je napon veći i duljina trase veća. Kod projektiranja vodiča primarno je izolirati vodič od bilo kakvog oblika uzemljenja. U tablici 3.8. navedene su i opisane neke električne karakteristike ACCC vodiča.

Tablica 3.8. Električne karakteristike ACCC vodiča.

| Električne karakteristike ACCC vodiča   |   |   |  |  |
|---|---|---|--|--|
| Pad napona  | Impedancija   | Prividna, radna i jalova snaga  | Strujna opteretivost   | Korona   |
| <p>- Pad napona je obično ograničen na 5-10%.</p> <p>- Pad napona utječe na tok snage na vodovima duljine između 100 i 300km.</p> <p>- Odgovarajućim odabirom vodiča se može smanjiti pad napona i smanjiti potrebu za transformatorskim stanicama.</p> <p>- Prisutnost čelika u vodičima dovodi do gubitaka petlje histereze, vrtložnih struja i preraspodjele gustoće struja.</p> <p>- ACCC vodič može smanjiti ograničenja uzrokovana padom napona jer ne sadrži magnetnu jezgru.</p> <p>- Ugradnjom ACCC vodiča se poboljšava učinkovitost smanjenja gubitaka za 35%.</p> | <p>- Ukupna induktivna reaktancija ovisna je o ukupnoj indukciji.</p> <p>- Ukupna indukcija jednaka je zbroju unutarnje i vanjske indukcije.</p> <p>- Unutarnja indukcija ovisi o magnetskoj permeabilnosti materijala od kojeg je vodič izrađen i dužini vodiča.</p> <p>- Vanjska indukcija ovisi o promjeru vodiča i udaljenosti točke na kojoj se mjeri indukcija.</p> <p>- Vanjska indukcija je dominantna oko jednog reda veličine više od unutarnje ako je jezgra vodiča izvedena s nemagnetskim materijalom kao kod ACCC vodiča.</p> | <p>- Vodič manjim otporom smanjuje gubitke i radne i prividne snage.</p> <p>- Vodič obično sadrži 25% više aluminija zbog kompaktnih, trapezoidalno oblikovanih niti plašta.</p> <p>- Vodič koristi žareni aluminij koji nudi najnižu otpornost u usporedbi s ostalim aluminijским legurama.</p> <p>- Vodič radi na hladnijim temperaturama u usporedbi s drugim vodičima pod jednakim opterećenjem što dodatno povećava učinkovitost jer se niže temperature odražavaju na smanjenje otpora vodiča.</p> <p>- Vodič uklanja gubitke zbog histereze jer je kompozitna jezgra ne magnetska i ne vodljiva.</p> | <p>- Vodovi manjeg napona mogu biti termički ograničeni zbog sigurnosnih razmaka ili svojstava materijala vodiča.</p> <p>- Aluminij tipa 1350 H-9, koji se često koristi za izradu Al/Č vodiča počinje se žariti na 93c.</p> <p>- Žarenjem se može uzrokovati smanjenje čvrstoće.</p> <p>- Spojni, zatezni i ovjesni pribor ACCC vodiča treba biti dizajniran za visoke temperature.</p> <p>- Promjena temp. zraka od 10 °C ima utjecaj na strujno opterećenje vodiča za gotovo 10%.</p> <p>- Relativno malo povećanje brzine vjetra može povećati opteretivost od 10% do 15%.</p> <p>- Osim navedenog sam kut vjetra može imati značajan utjecaj.</p> | <p>- Parcijalna izbijanja ili korona je pojava u kojoj lokalizirano električno polje blizu opterećenog vodiča može biti dovoljno jako da uzrokuje ionizaciju okolnog zraka i pražnjenje koje stvara plazmu.</p> <p>- Problem korone pogoršava se površinskim nepravilnostima koje mogu biti uzrokovane kapljicama vode, ogrebotinama ili krhotinama.</p> <p>- Izolacijska svojstva zraka smanjuju se padom gustoće zraka.</p> <p>- Zbog trapezoidalnih niti plašta, utjecaj se može dodatno ublažiti u usporedbi s okruglim žicama.</p> <p>- Kod ACCC vodiča koriste se alu. žice visoke čistoće tako da se koriste maziva na bazi biljaka ili vode radi manjeg nakupljanja nečistoća.</p> |

### 3.8.2. Mehaničke karakteristike ACCC vodiča

Mehaničke karakteristike nadzemnih vodiča definiraju provjes i sile koje djeluju na njega prema točkama zavješanja, ledu, vjetru, promjeni temperature i vremena.

Kako bi se razumjele razlike između ACCC vodiča u odnosu na ostale, u tablici u nastavku se opisuju karakteristike općenito te se ACCC vodič stavlja u kontekst tih karakteristika.

Tablica 3.9. Električne karakteristike ACCC vodiča.

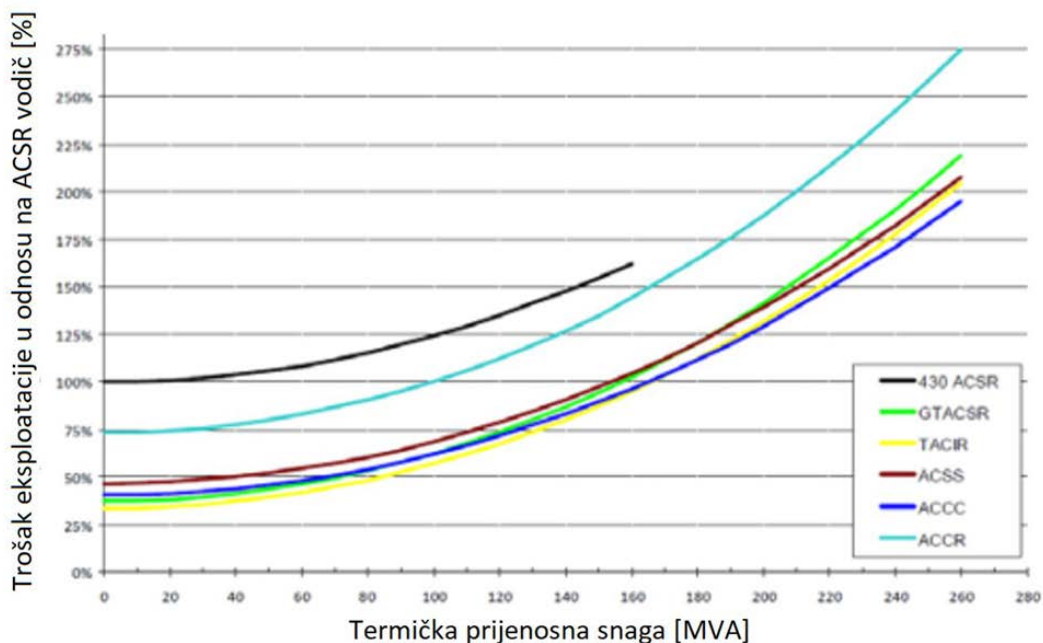
| <b>Mehaničke karakteristike ACCC vodiča</b>   |  |  |   |   |
|---|--|--|---|---|
| Čvrstoća  | Eolske vibracije   | Opterećenja uzrokovana ledom   | Njihanje  | Toplinska svojstva  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- ASTM standardom iz SAD-a je definirana nazivna vlačna čvrstoća ACCC vodiča.</li> <li>- Mora se voditi računa kako se određuje čvrstoća ovisno o regiji u kojoj se vodič primjenjuje.</li> <li>- Čvrstoća čelične jezgre najviša je na 3 do 4% opterećenja.</li> <li>- Kod ACCC vodiča kompozitna jezgra određuje nazivnu vlačnu čvrstoću.</li> <li>- Jezgra ACCC vodiča je potpuno elastična i ne pokazuje nikakvo trajno izduženje sve do njenog pucanja pri otprilike 2% opterećenja.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Vibracije vodiča su rezonantan efekt koji je uzrokovan vjetrom.</li> <li>- Vibracije uzrokovane vjetrom obično iznose između 8 i 60 Hz.</li> <li>- Energija koju donosi vjetar raste proporcionalno s promjerom i dužinom vodiča.</li> <li>- Vjetrom izazvane vibracije dolazi do zamora materijala.</li> <li>- Komprimirane niti pogoršavaju utjecaj međusobnog trljanja unutarnjih slojeva što je slučaj kod vodiča s okruglim nitima.</li> <li>- Preporuča se korištenje AGS stezaljki i čeličnog užeta</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- U ledom opterećenom vodiču, porast naprezanja za duže raspone usko je povezana s promjenom mase.</li> <li>- Kod manjih raspona, promjene provjesa između dalekovoda su drastičnije od promjene naprezanja.</li> <li>- Manji vodiči mogu bolje podnijeti opterećenje ledom na manjim rasponima, ali zbog toga razvijaju i veći provjes.</li> <li>- Vanjska opterećenja vodiča poput leda i vjetra su glavni razlog zašto vodiči na većim rasponima bi trebali biti čvršći.</li> <li>- Zbog elastičnije jezgre, provjes ACCC vodiča raste brže nego provjesi vodiča s čeličnom jezgrom.</li> <li>- Primjerice, za raspon vodiča od 762 m, naprezanje od 22,2 kN (bez leda) će se povećati na 44,5 kN ako se na vodiču nakupi 1,5 kg/m leda.</li> <li>- Općenito je puno važnije voditi računa o sigurnim udaljenostima nego o strukturiranim promjenama jer većina leda otpada u manjim duljinama tokom vremena.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tijekom umjerenog vjetra javlja se tzv. njihanje vodiča.</li> <li>- Gledajući kroz povijest, dosada je zabilježena samo jedna pojava njihanja kod ACCC vodiča.</li> <li>- Njihanje je više vertikalno nego bočno.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Većina dalekovoda duljine od oko 100 km ima ograničeni kapacitet termičkim ograničenjima.</li> <li>- Toplinska ograničenja su uvjetovana najvećom dopuštenom radnom temperaturom vodiča ili maksimalnim toplinskim izduženjem obzirom na visinu, čvrstoću i položaj konstrukcije.</li> <li>- ACCC-ov niski koeficijent toplinske ekspanzije ima izvrsne karakteristike provjesa i kapaciteta.</li> </ul> |



## 4. HTLS VODIČI – PRIMJERI IZ PRAKSE

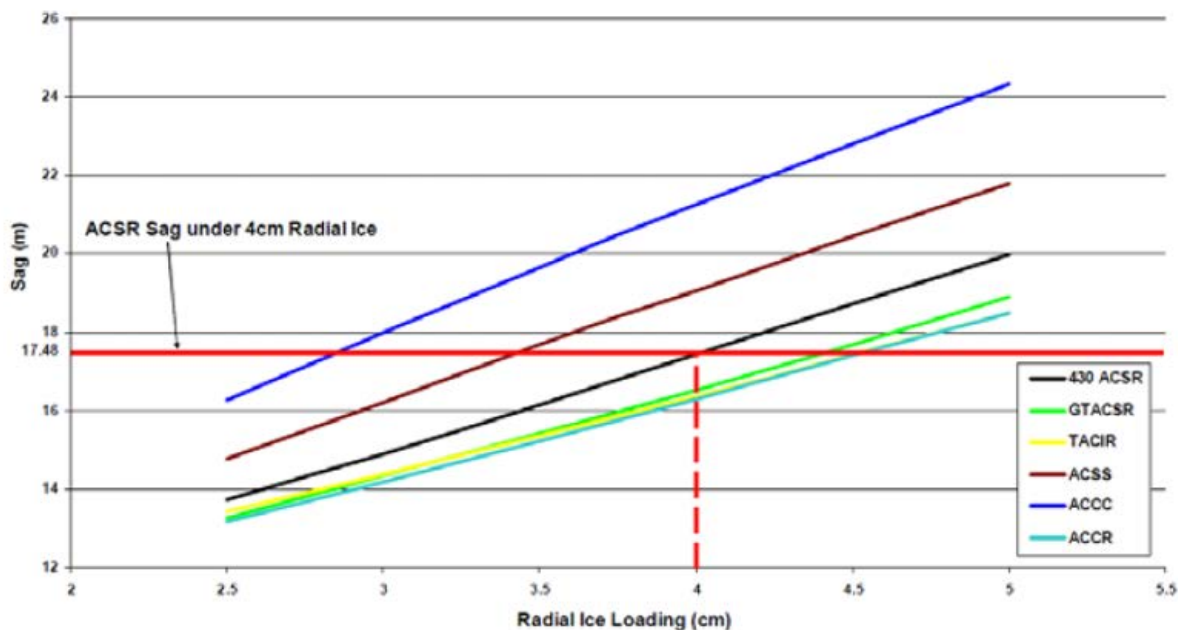
Ugradnja i izbor novih vodiča zasniva se najčešće na tehnološko ekonomskoj odluci. Glavni razlozi zamjene postojećih ili ugradnja novih vodiča je povećanje kapaciteta dalekovoda, gotovo 48% više te se za svaki šesti novoizgrađeni dalekovod koriste HTLS vodiči. No ne primjenjuju se HTLS vodiči isključivo samo radi povećanja kapaciteta nego i zbog drugih okolnosti kao što su npr. dionice dalekovoda koje su izložene teškim klimatskim uvjetima (teret leda i vjetar), velikim rasponima (prelazima preko jezera, kanjona, planina i sl.). Također njihovom ugradnjom primjeri pokazuju uštedu od 20 do 50 % u odnosu na novoizgrađeni dalekovod. Prednosti zamjene vodiča odražavaju se većim sigurnosnim visinama, smanjenju gubitaka te kraćem vremenu potrebnom za ugradnju vodiča u odnosu na izgradnju novoga dalekovoda za 1 – 5 god. Po pitanju pogona, ugradnje, očekivanih ušteda i pouzdanosti utvrđena su vrlo pozitivna iskustva kod korisnika HTLS vodiča. [2]

Povećanje kapaciteta dalekovoda predstavlja financijski trošak u bilo kojem pogledu, no u usporedbi s konvencionalnim rješenjima to jest ugradnjom ACSR vodiča većeg presjeka i pojačanje stupnih mjesta, HTLS vodiči se pokazuju kao isplativo rješenje. Svaka vrsta HTLS vodiča skuplja je u odnosu na ACSR vodič posebno, pa je tako ACCC vodič skuplji 2 – 3 puta, ACCR 3 – 6 puta, ACSS 1,5 – 2 puta. Na slici 4.1. je prikazan omjer cijene i povećanja kapaciteta u odnosu na ACSR vodič.



Slika 4.1. Usporedba troškova kroz životni ciklus različitih tipova vodiča. [6]





Slika 4.2. Ovisnost provjesa o dodatnom teretu (led). [6]

Slika 4.2. prikazuje da ponekad visokotemperaturni vodiči odnosno HTLS vodiči nisu prikladni za određena geografska područja gdje je mogućnost nakupljanja leda na vodičima dalekovoda. Studij u Irskoj je posebice razmatrala upotrebu određenih HTLS vodiča kako bi se odabrao najprikladniji vodič pri zamjeni užadi na postojećem 220 kV dalekovodu. ACCC i ACSS vodiči u usporedbi s ACSR vodičem imaju lošije rezultate provjesa. Iako njihova jezgra preuzima sav teret pri opterećenju zbog malog presjeka i malog modula elastičnosti, te je rezultat toga manji provjes pri visokim temperaturama, pojavljuje se nedostatak većeg provjesa u odnosu na ACSR vodič, kada je opterećen dodatnim teretom odnosno ledom. Navedene usporedbe HTLS vodiča ne uključuju probleme s pouzdanošću, instalacijom ili troškovima, već ukazuju na neke od tehničkih problema pri odabiru najboljeg vodiča prije izvođenja i projektiranja povećanja kapaciteta dalekovoda.

Uz sve navedene prednosti i mane HTLS vodiča, ne postoji jedan vodič koji je značajno bolji od drugog, osim ako se uzima cijena kao glavna prednost. Svi spomenuti HTLS vodiči međusobno imaju različite prednosti, no sljedeće karakteristike su im zajedničke i poželjne pri izboru prilikom zamjene vodiča na postojećim dalekovodima: kontinuirani rad na visokim temperaturama (iznad 100 °C) bez gubitka mehaničkih i električnih svojstava, niži otpor u usporedbi s klasičnim ACSR vodičima istog promjera i mali koeficijent toplinskog istezanja. [2]

Kao jedna od mogućnosti povećanja kapaciteta dalekovoda jest uporaba HTLS vodiča. Implementacijom HTLS vodiča je tako moguća u sljedećim situacijama ukoliko su stupovi i temelji dalekovoda u dobrom stanju: Vodiči na postojećem dalekovodu su u lošem stanju, potrebne sigurnosne visine i udaljenosti od susjednih objekata ne zadovoljavaju, potrebno je povećanje kapaciteta dalekovoda za 30% ili više od nazivnog kapaciteta.

#### **4.1. Primjena HTLS vodiča u Hrvatskoj**

Republika Hrvatska doživljava znatne promjene vezano za elektroenergetsku mrežu u dnevnim i sezonskim opterećenjima. Takve promjene su posljedica utjecaja faktora poput mikrolokacijskog razvoja industrije, turizma, urbanistički razvoj i proizvođači i distributeri električne energije. Na temelju navedenog, potrebno je istražiti nova tehnološka rješenja kako bi se zadovoljila povećana sezonska i dnevna potražnja kao što je zamjena konvencionalnih vodiča s modernijim HTLS vodičima.

##### **4.1.1. Analiza obnove postojećeg 35 kV DV Cres – Lošinj**

Stalnim povećanjem potražnje za električnom energijom dolazi do sve češće primjene visokotemperaturnih vodiča. Nadalje će se opisati primjer problematike primjene ACCC vodiča pri zamjeni vodiča 35kV dalekovoda na području Cresa i Lošinja. Godine 1965., na dionicama između trafostanice Lošinj i trafostanice Cres ugrađen je vodič Cu 50 mm. Zamjena istog vodiča nije se vršila od izgradnje samog dalekovoda. Napretkom turizma, urbana područja su vršila napajanje pomoću navedenog 35 kV dalekovoda, te je došlo do povećanja prosječne i vršne potrošnje električne energije. Navedeni dalekovod je povećavao gubitke kod prijenosa električne energije, često je preopterećen, pokazala se elektromontažna i konstruktivna dotrajalost te je postojala prijetnja minimalno propisanih sigurnosnih udaljenosti i visina. Svi navedeni nedostaci su se definirali u desetogodišnjem planu razvoja prijenosne mreže 2016-2025 kojim je utvrđeno da ispadom paralelnog 110 kV dalekovoda u periodima vršnih opterećenja dolazi do redukcije dijela potrošnje radi ograničenja koja ima predmetni 35 kV vodiči 3 x Cu mm<sup>2</sup>, koji omogućuju trajno fazno strujno opterećenje od 231 A. Prijenosna moć dalekovoda Cres – Lošinj, zaključno time je 14 MVA. Slijedom okolnosti, planirana je nadogradnja postojećeg vodiča, novim visokotemperaturnim vodičem oznake ACCC-115 presjeka 140,8 mm i promjera 13,6 mm. Tehnički podaci ACCC 15 vodiča su opisani u Tablici 4.1. [3,4]

Tablica 4.1. Tehnički podaci ACCC 115 vodiča.

|   |                 |                                |
|---|-----------------|--------------------------------|
| Računski presjek  |                 | 140,8 mm <sup>2</sup>          |
| Promjer   |                 | 13,6 mm                        |
| Konstrukcija vodiča   | Žica plašta     | 6 x 4,89 mm                    |
|   | Žica jezgre     | 1 x 5,97 mm                    |
| Uzdužna masa  |                 | 0,3642 kg/m                    |
| Prekidna sila   |                 | 66,6 kN                        |
| Modul elastičnosti jezgre   |                 | 112300 N/mm <sup>2</sup>       |
| Modul elastičnosti iznad „koljena“  |                 | 68000 N/mm <sup>2</sup>        |
| Koeficijent linearnog toplinskog širenja  | Ispod „koljena“ | 15,97 x 10 <sup>-6</sup> 1/ °C |
|   | Iznad „koljena“ | 1,61 x 10 <sup>-6</sup> 1/ °C  |
| Normalno dozvoljeno naprezanje (40% prekidne sile)                                  |                 | 189 N/mm <sup>2</sup>          |
| Iznimno dozvoljeno naprezanje (75% prekidne sile)                                   |                 | 354 N/mm <sup>2</sup>          |
| Srednje dnevno naprezanje(20% prekidne sile)  |                 | 94 N/mm <sup>2</sup>           |
| Uzdužni srednji djelatni otpor na 20 °C   |                 | 0,2468 Ω/km                    |
| Razmatrano najveće struno opterećenje(za kontrole sigurnosnih visina i udaljenosti) |                 | 500 A                          |
| Temperatura vodiča pri najvećem strujnom opterećenju vodiča (500A)                  |                 | 121 °C                         |

## 5. ZAKLJUČAK

U današnje doba kako je sve više opterećen elektroenergetski sustav, što korisničkom potražnjom, klimatskim promjenama (više dnevne temperature) i sl. sve više se radi na povećanju kapaciteta na postojećim dalekovodima implementacijom suvremenih rješenja. Jedno od najzastupljenijih rješenja je primjena HTLS vodiča koji su pogodni za postojeće dalekovode kako u svijetu tako i kod nas.

U radu su ukratko navedene i opisane vrste i karakteristike HTLS vodiča. Opširnije je opisan ACCC vodič koji je ujedno i najzastupljeniji zbog svojih pogodnih karakteristika kao što su jezgra od kompozitno karbonskih vlakana, bolja vodljivost i veći kapacitet u odnosu na konvencionalne vodiče (ACSR vodiči), te ima osobinu zadržavanja elektromehaničkih svojstava pri visokim temperaturama.

Glavni razlozi zamijene postojećih ili ugradnja novih vodiča je povećanje kapaciteta dalekovoda, gotovo 48% više, te je jedno od najjednostavnijih i najbržih principa za povećanje prijenosnog kapaciteta dalekovoda. Iako su HTLS vodiči financijski veći trošak u odnosu na konvencionalne vodiče, usporedbom ušteda troškova koja je opisana u radu ukazuje na to da dugoročno gledano HTLS vodiči uštede veću količinu investicijskog troška svoje ugradnje. Kako se HTLS vodiči konstantno unaprjeđuju tako se očekuje da bi u budućnosti mogli biti još isplativiji i pristupačniji svim operaterima kako prijenosnih tako i distribucijskih sustava, te ujedno i olakšati unapređenje elektroenergetskih sustava.

## 6. LITERATURA

- [1] „Engineering Transmission Lines with High Capacity Low Sag ACCC® Conductors, CTC Global“, s Interneta, [www.ctcglobal.com](http://www.ctcglobal.com), 6.6.2022.
- [2] CTC Global: „ACCC conductor installation guidelines“, CTC Global, 2017
- [3] Desetogodišnji plan razvoja prijenosne mreže 2016.-2025., s detaljnom razradom za početno trogodišnje i jednogodišnje razdoblje, HOPS, ožujak 2016.
- [4] Dalekovod projekt d.o.o.: „DV 35 kV Krk – Cres i DV 35 kV Cres – Lošinj Izvedbeni projekt revitalizacije“, Zagreb, 2017.
- [5] L.Jozsa, Nadzemni vodovi, Elektrotehnički fakultet, Osijek, 2011.
- [6] Geary R., Condon T., Kavanagh T., Armstrong O., Doyle J., „Introduction of high temperature low sag conductors to the Irish transmission grid“, CIGRE 2012
- [7] Slegers J.: „Sag Calculations and High-Temperature Conductor Technologies“, Iowa State University, 2011
- [8] Rubinić Z. „i dr.“: „Analiza opravdanosti primjene visokotemperaturnih vodiča“, Dalekovod projekt d.o.o., Zagreb, 2011.
- [9] J-Power Systems, “GTACSR (Gap-type thermal-resistant aluminum alloy steel reinforced) & GZTACSR (Gap-type super-thermal-resistant aluminum alloy steel reinforced)” Specifications," J-Power Systems Corp., 2005.

## 7. SAŽETAK

U prvom dijelu završnog rada općenito su opisani nadzemni vodovi, njihovi dijelovi, te je ukratko opisan klasičan Al/Fe vodič(ACSR). Nadalje u radu su opisane karakteristike visokotemperaturnih (HTLS) vodiča. Navode se vrste visokotemperaturnih vodiča, te njihova svojstva, prednosti i nedostaci. Jedan od novih vrsta nadzemnih vodiča je aluminijski vodič kompozitne jezgre (engl. Aluminium Conductor Composite Core, ACCC) koji se sve češće upotrebljava zbog svoje mogućnosti prenošenja većeg kapaciteta energije u odnosu na klasični Al/Fe vodič, s tim da ostane unutar fizičkih granica pri većim radnim temperaturama i višim strujama. Naposljetku, navode se primjeri iz prakse uporabe i usporedbe HTLS vodiča s konvencionalnim ACSR vodičem.

Ključne riječi: Alučel, ACCC vodič, provjes, HTLS vodiči, dalekovod, primjena.

## SUMMARY

In the first part of the final paper, overhead lines and their parts are described in general, and the classical conductor (ACSR) is briefly described. Furthermore, the characteristics of high-temperature (HTLS) conductors are described in the paper. The types of high-temperature conductors are listed, as well as their properties, advantages and disadvantages. One of the new types of overhead conductors is the Aluminum Conductor Composite Core (ACCC), which is being used more and more frequently due to its ability to transmit a higher energy capacity compared to the classic ACSR conductor, while remaining within the physical limits at higher operating temperatures and higher currents. Finally, practical examples of the use and comparison of the HTLS conductor with the conventional ACSR conductor are given.

Key words: Aluminum conductor steel reinforced (ACSR), Aluminum Conductor Composite Core(ACCC), sag, HTLS conductors(High temperature Low sag), overhead powerline, application.