

# Odabir parametara HTLS vodiča za povećanje prijenosne moći postojećih vodova

---

**Kogej, Antonio**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2023**

*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:190:440855>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-03**



*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI

**TEHNIČKI FAKULTET**

Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Diplomski rad

**ODABIR PARAMETARA HTLS VODIČA ZA POVEĆANJE  
PRIJENOSNE MOĆI POSTOJEĆIH VODOVA**

Rijeka, siječanj 2023.

Antonio Kogej

0069067947

SVEUČILIŠTE U RIJECI

**TEHNIČKI FAKULTET**

Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Diplomski rad

**ODABIR PARAMETARA HTLS VODIČA ZA POVEĆANJE  
PRIJENOSNE MOĆI POSTOJEĆIH VODOVA**

Mentor: prof. dr. sc. Vitomir Komen, dipl. ing.

Rijeka, siječanj 2023.

Antonio Kogej

0069067947

Rijeka, 19. ožujka 2022.

Zavod: **Zavod za elektroenergetiku**  
Predmet: **Prijenos i distribucija električne energije**  
Grana: **2.03.01 elektroenergetika**

## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

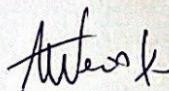
Pristupnik: **Antonio Kogej (0069067947)**  
Studij: **Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike**  
Modul: **Elektroenergetika**

Zadatak: **ODABIR PARAMETARA HTLS VODIČA ZA POVEĆANJE PRIJENOSNE MOĆI  
POSTOJEĆIH VODOVA / CRITERIA FOR SELECTING THE OPTIMAL  
CHARACTERISTICS OF THE HTLS CONDUCTORS TO INCREASE THE  
TRANSMISSION POWER OF EXISTING LINES**

### Opis zadatka:

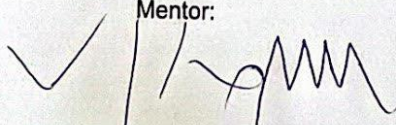
Pregled prijenosnih moći postojećih nadzemnih vodova sa ACSR vodičima. Tehničke mogućnosti povećanja prijenosne moći postojećih nadzemnih vodova. Pregled konstrukcija i parametara današnjih HTLS vodiča za nadzemne vodove. Kriteriji i zahtjevi pri planiranju zamjene postojećih vodiča sa HTLS vodičima. Odabir optimalnih parametara HTLS vodiča pri zamjeni postojećih vodiča. Prikaz odabira parametara HTLS vodiča na jednom realnom postojećem nadzemnom vodu.

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:



Prof. dr. sc. Vitomir Komen

Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit:



Prof. dr. sc. Viktor Sučić

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

## IZJAVA

Sukladno članku 9. stavka 1 „Pravilnika o diplomskom radu, diplomskom ispitu i završetku diplomskih sveučilišnih studija“ izjavljujem da sam samostalno izvršio ovaj diplomski rad pod nazivom „Odabir parametara HTLS vodiča za povećanje prijenosne moći postojećih vodova“.

Rijeka, siječanj 2023.

Antonio Kogej

---

## ZAHVALA

Prvenstveno se zahvaljujem svom mentoru prof. dr.sc Vitomiru Komenu, kako na stručnim savjetima tako i na nesebično dijeljenom znanju kroz, ne samo ovaj diplomski rad već i cjelokupni studij elektrotehnike.

Zahvaljujem se i svim svojim kolegama koje su mi na bilo koji način pomogli kroz studij te koji su mi na posljetku postali prijatelji za cijeli život.

Na kraju, najviše se zahvaljujem svojoj obitelji. Njima, koji su me bodrili i ohrabivali svaki put kada bih lošije napisao neki ispit a veselili se i slavili samnom svaki moj uspješno napisani ispit.

Njima, koji su imali najviše vjere u mene te sam neizmjereno ponosan što im napokon mogu donijeti ovaj diplomski rad kao „krunu“ svog studiranja.

# SADRŽAJ

1. UVOD .....	8
2. VODOVI ZA PRIENOS I DISTRIBUCIJU ELEKTRIČNE ENERGIJE.....	9
3. NADZEMNI VODOVI SA ALUČELIČNIM VODIČIMA .....	13
3.1. Tipovi Alučel vodiča .....	13
3.2. ACSR vodiči .....	13
3.3. Prednosti ACSR vodiča.....	14
3.4. Potrebe zamjene ACSR vodiča na postojećim vodovima .....	15
3.4.1. Zamjena Al/Č vodiča visokotemperaturnim niskoprovjesnim vodičima.....	15
3.4.2. Zadržavanje iste sile na postojećim stupovima .....	16
3.4.3. Povećanje prijenosne moći .....	18
3.4.4. Smanjenje gubitaka .....	19
4. VISOKOTEMPERATURNI NISKOPROVJESNI (HTLS) VODIČI .....	20
4.1. Najčešće korišteni HTLS vodiči .....	21
4.2. ACCR vodiči.....	21
4.3. ACCC vodiči .....	28
4.3.1. Prednosti ACCC vodiča .....	28
4.3.2. Nedostatci ACCC vodiča .....	28
4.4. ZTACIR vodiči .....	29
4.4.1. Prednosti ZTACIR vodiča.....	32
4.5. G(Z)TACSR vodiči .....	32
4.6. TACSR i TACSR/AW vodiči.....	34
4.7. ACSS i ACSS/TW vodiči.....	35
5. ACCC VODIČI ZA NADZEMNE VODOVE.....	37
5.1. Početak primjene.....	37
5.2. Razlozi primjene ACCC vodiča .....	37
5.3. Svojstva ACCC vodiča.....	42
5.4. Poteškoće u primjeni ACCC vodiča .....	45
6. IZBOR OPTIMALNIH PARAMETARA ACCC VODIČA ZA ZAMJENU POSTOJEĆIH .....	46
6.1. Karakteristike ACCC vodiča.....	47
6.2. Prednosti ACCC vodiča .....	49

6.3. Povećanje prijenosne moći.....	50
6.4. Smanjenje provjesa .....	52
6.5. Primjenjivost i esencijalnost određenih propisa za ACCC i ostale HTLS vodiče .....	55
6.5.1. Preporuke za optimalan izbor ACCC vodiča za zamjenu starih Alučel vodiča .....	56
6.6. Prikaz zamjene Alučel vodiča sa visokotemperaturnim niskoprovjesnim vodičem na realnom postojećem vodu .....	57
6.6.1 Ekonomska evaluacija revitalizacije postojećih nadzemnih vodova sa HTLS vodičima .....	61
7. ZAKLJUČAK.....	63
LITERATURA.....	64
POPIS OZNAKA I KRATICA.....	66
SAŽETAK.....	67



# 1. UVOD

Elektroenergetski sustav je najdinamičniji tehnički sustav koji se kontinuirano razvija i širi. Što zbog priključenja novih potrošača što zbog priključenja novih proizvođača pa sukladno s tim dolazi do potrebe za povećanjem prijenosne snage. Uslijed svih tih povećanja, prvenstveno je potrebno obratiti pozornost na maksimalno smanjenje gubitaka kod prijenosa energije. Prilikom širenja elektroenergetske mreže dodatno opterećuju elektroenergetski vodovi, koji su „žile“ elektroenergetskog sustava. Stariji vodovi svojom ograničenošću temperaturom i prijenosnom moći kao takvi predstavljaju izazov. Na gubitke voda utječu i duljina voda te faktor opterećenja. Dva glavna razloga koji su temelj za rješavanje problema preopteretivosti voda su prijenosna moć i temperatura. Kao idealno rješenje nameće se dalekovod koji bi mogao podnijeti veće opterećenje, samim time morao bi raditi na većim temperaturama a da se pritom provjes takvog dalekovoda održava u nominalnim vrijednostima. Pojavom HTLS (eng. High Temperature Low Sag) vodiča odnosno visokotemperaturnog niskoprovjesnog vodiča zadovoljili su se svi od navedenih uvjeta. Štoviše, kao dodatna prednost HTLS vodiča, u odnosu na neka druga rješenja, je što se oni mogu u većini slučajeva ugraditi na već postojeću infrastrukturu. Najbolji izbor HTLS vodiča sa zamjenu starih Alučel vodiča pokazao se ACCC vodič. Scenarij u kojem se povećava korištenje ACCC vodiča za sobom povlači mnoštvo benefita koji su kasnije reflektirani na globalnu razinu.

U ovom diplomskom radu obrađeni su parametri na koje je potrebno obratiti pozornost kod zamjene Alučel vodiča HTLS vodičima, odnosno kod povećanja prijenosne moći voda. Prvi dio rada općenito opisuje elektroenergetske vodove i osnovne tipove Alučel vodiča koji su do sada najčešće primijenjeni kao i razloge zbog kojih se postojeće vodiče zamjenjuje HTLS vodičima. Nakon toga, slijedi opis HTLS vodiča sa njihovim specifikacijama i najčešće korištenim HTLS vodičima. U posljednjem djelu detaljnije je opisan ACCC tip visokotemperaturnog niskoprovjesnog vodiča kao vodećeg predstavnika te skupine. Naposljetku je opisan realan primjer zamjene jednog Alučel vodiča sa HTLS vodičem gdje se mogu vidjeti elektroenergetske odnosno ekonomske prednosti takve zamjene.

## 2. VODOVI ZA PRIJENOS I DISTRIBUCIJU ELEKTRIČNE ENERGIJE

Električni vodovi su jedan od najbitnijih dijelova elektroenergetskog sustava. Oni prenose električnu energiju od jedne, početne točke do druge, krajnje točke. Dije se na nadzemne i podzemne vodove, odnosno kabele. Češće se koriste nadzemni vodovi, zbog toga što se u tom slučaju zrak ponaša kao izolator pa su onda ekonomski pogodniji, osim kada je nužno korištenje kabela, primjerice u gradovima ili u zrakoplovnim lukama. Elektroenergetski nadzemni vod još nazivamo i dalekovod a njegova je zadaća prijenos električne energije na velike udaljenosti.

Važan dio, srž dalekovoda, jesu sami vodiči, koji se izrađuju od različitih materijala, ovisno o potrebi. Često su, zbog svojstava, vodiči napravljeni od kombinacije dvaju različitih materijala. Recimo, bakar je bolji vodič od aluminijsa, međutim bakar je i skuplji, pa se tako češće odabire aluminij. Aluminijska mehanička svojstva su dosta loša, upravo zbog toga se aluminij najčešće koristi u kombinaciji sa čelikom, i to čeličnom jezgrom i plaštom od aluminijsa, pa se tako dobiva Alučel vodič.

Postoji nekoliko kriterija za podjelu nadzemnih vodova:

- Nazivni napon voda
- Broj trojki (strujnih krugova)
- Konstrukcija i materijal vodiča
- Konstrukcija i materijal stupova

Dijelove nadzemnog voda čine:

- Zaštitno uže i uzemljenje
- Vodiči
- Izolatori
- Stup
- Temelj
- Ovjesni, spojni i zaštitni pribor

Na slici 2.1. prikazan je stvarni presjek Alučel vodiča.



*Slika 2.1. Prikaz Alučel vodiča [9]*

Nakon odabira materijala vodiča, koji je od velike važnosti, vodiči se vješaju na stupove. Najčešće je cijeli stup sagrađen od istog materijala, no materijali se mogu i kombinirati. Kada je riječ o metalu, onda se najčešće radi o čeliku. Zbog zaštite od korozije, potrebno je stupove premazati zaštitnim slojem ili pocinčati, barem jedan dio. Čelični rešetkasti stupovi, lako su prilagodljivi svim potrebama pa se upravo zbog toga često upotrebljavaju.

Prvi materijal koji se počeo koristiti za stupove bilo je drvo. Drveni stupovi su u upotrebi još i danas, najčešće za niže napone. Drvo nema problem s korozijom, međutim ima problem sa truljenjem pa se zbog toga treba impregnirati drvo kako bi se produjila trajnost takvog stupa. Jela se najčešće upotrebljava zbog pravilnog oblika i dobre impregnacije. Kesten je dobar izbor zbog toga što ne treba puno impregnacije ali ima nepravilan oblik pa je zahtjevno izrađivanje takvog stupa. Drvo ima prednost i zbog toga što služi kao dodatna izolacija.

Ukoliko se želi postići ušteda na čeliku, koristi se armirani beton. Koristeći kalupe u koje se lijeva beton, mogu se postići razni željeni oblici koji su potrebni za određene situacije. Nedostatak takvih stupova je što su glomazni i što je potrebno puno materijala za izradu u tvornici, pa predstavljaju izazov kod transporta do mjesta ugradnje.

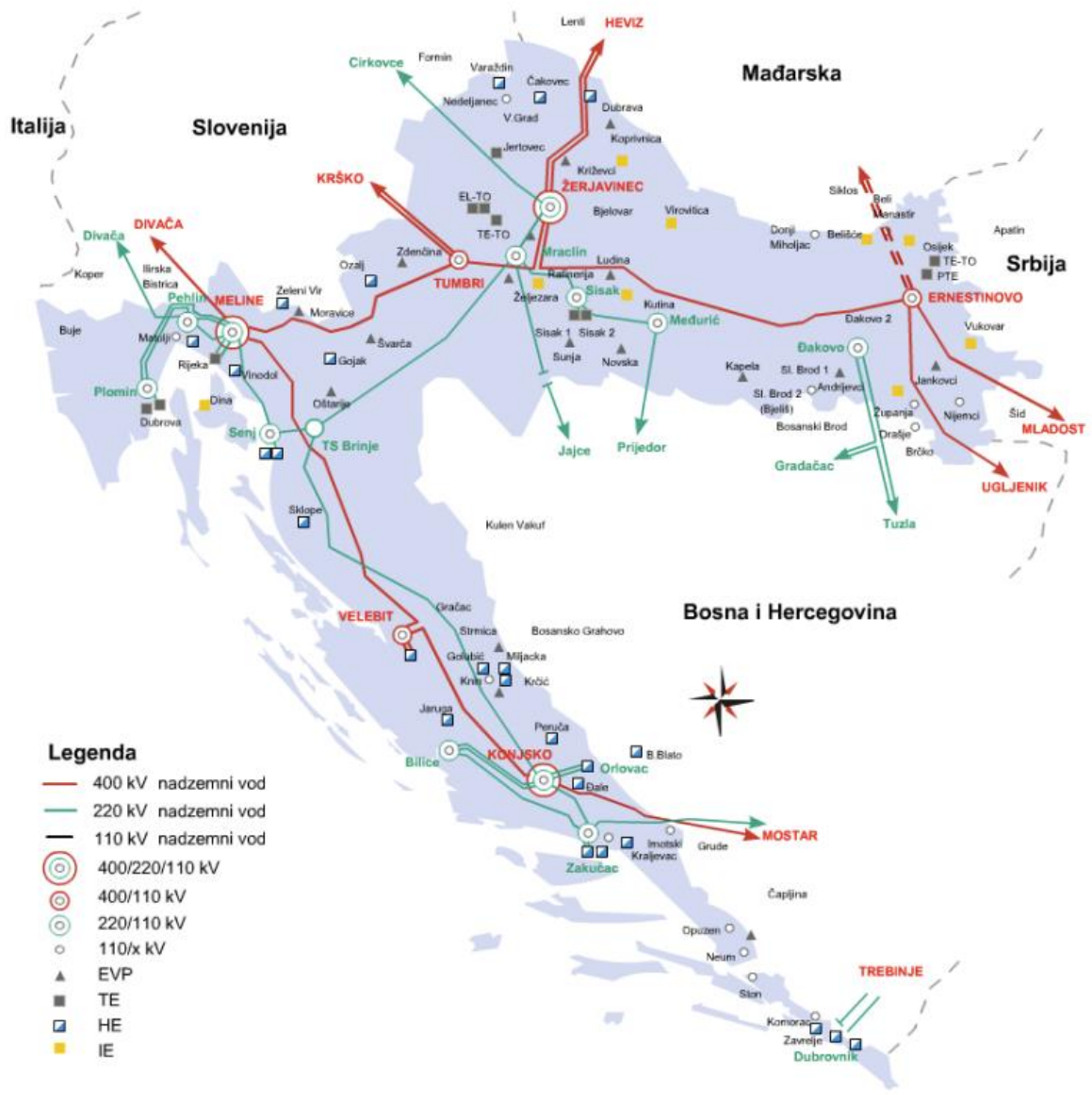
Stupove je potrebno dobro ukopati u zemlju prilikom ugradnje. Drveni stupovi mogu se ukopati direktno ili se ukop pojača nogarima od drveta ili armiranog betona. Za betonske i metalne stupove, najčešće se koristi betonski temelj u obliku bloka. Temelj se izlije u iskopanom tlu te se u njih ubetonira donji dio stupa.

Izolatori su na stupu pasivni električni dio. To su dijelovi sustava koji sprečavaju da struja potekne kratkim putem između vodiča ili kroz stup u zemlju. Izolatori moraju mehanički biti jako čvrsti, iz razloga što su vodiči na taj način pričvršćeni na stup. Materijal od kojih se izrađuju izolatori su danas pretežito keramički i umjetni izolacioni materijali.

Postoji i podjela elektroenergetskih vodova prema naponskoj razini, nazivnom naponu te se prema tome pridjeljuje električna oprema dijelovima sustava koja služi za označavanje te naponske klase. Norme definiraju nazivne napone a podjela koja je danas primijenjena u Hrvatskoj jest:

- Niski nazivni napon (0,4 kV)
- Srednji nazivni napon (10, 20, 35(30) kV)
- Visoki nazivni napon (110, 220, 400 kV)

Kada se dimenzionira oprema za određeni napon, potrebno je predvidjeti opterećenje od 10% više od nazivnog napona iz sigurnosnih razloga. Na slici 2.2. prikazan je elektroenergetski sustav Republike Hrvatske sa izlazima prema susjednim zemljama.



Slika 2.2. Prikaz elektroenergetske mreže Republike Hrvatske [10]

### **3. NADZEMNI VODOVI SA ALUČELIČNIM VODIČIMA**

#### **3.1. Tipovi Alučel vodiča**

U prijenosu energije, bakar je dugo godina bio najbolji izbor kao materijal za vodiče. No, aluminijski vodiči pokazali su se kao odlična alternativa a to prvenstveno zbog toga što su jeftiniji. Postoji nekoliko vrsta Alučel vodiča:

- AAC – All Aluminium Conductor
- ACAR – Aluminium Conductor Aluminium Reinforced
- AAAC – All Aluminium Alloy Conductors
- ACSR – Aluminium Conductor Steel Reinforced

#### **3.2. ACSR vodiči**

ACSR (Aluminium Conductor Steel Reinforced) vodič je vrsta visokokapacitetnih, višezičnih vodiča koja ima visoku čvrstoću te se on do nedavno standardno primjenjivao za nadzemne vodove. Jezgra od čelika stvara čvrstoću i otpornost kojom se povećava izdržljivost vodiča s obzirom na svoju težinu i naprezanja dok su vanjski vodiči izrađeni od aluminijske, također visoke čvrstoće. Takav vodič rezultira s manjom težinom i cijenom dok je vrlo otporan na koroziju i mehanička naprezanja. Dobro se ponaša i usred mehaničkih opterećenja (vjetar, led...) zbog manje elastične i neelastične deformacije kao i zbog niskog koeficijenta toplinskog rastezanja pod opterećenjem.

Svojstva ACSR vodiča značajno određuju slijedeći učinci:

- Skin efekt
- Efekt blizine
- Gubitak histereze

## Skin efekt

Kada struja teče kroz vodič, efektivna površina poprečnog presjeka vodiča može se smanjiti uslijed skin efekta. Kod izmjenične struje, nastaje potiskivanje protoka struje prema vanjskoj površini, tako da je gustoća struje veća uz vanjsku površinu u odnosu na srednji dio vodiča. To uvelike ovisi o frekvenciji protoka struje i o svojstvima vodiča. Ovo reducirano područje vodiča će također povećati otpor zbog obrnuto proporcionalne veze između poprečnog presjeka vodiča i otpora. Skin efekt kod ACSR vodiča ima pozitivan učinak jer gustoću struje povećava u sloju aluminijske jezgre.

## Efekt blizine

Kod nadzemnih vodova sa tri fazna vodiča, dolazi do potiskivanja protoka struje na manja područja u poprečnom presjeku uslijed magnetskog djelovanja ostalih vodiča. Taj potisak struje se naziva efektom blizine. Ova pojava je produkt promjenjivog magnetskog polja koje stvara protok struje kroz vodič. Tada također stvara i promjenjivo magnetsko polje oko njega. To će magnetsko polje inducirati vrtložne struje unutar susjednih vodiča te promijeniti ukupnu gustoću struje kroz njih.

## Gubitci histereze

Kod ACSR vodiča, gubitci histereze nastaju zbog atomskih dipola unutar čelične jezgre. Gubitci se smanjuju uz pomoć aluminijskih slojeva koji su u ravnomjerno raspodijeljeni unutar vodiča. Zbog gubitaka histereze mora se koristiti neparan broj slojeva aluminijske jezgre kod izrade ovakvih vodiča. ACSR vodiči su malih dimenzija pa se gubitci histereze ne mogu u potpunosti izbjeći.

### **3.3. Prednosti ACSR vodiča**

Prednosti ACSR vodiča su sljedeće:

- Ravna struktura

- Visok kapacitet prijenosa
- Dobra vlačna snaga
- Izvrsna izvedba
- Dugovječnost
- Velika fleksibilnost

### 3.4. Potrebe zamjene ACSR vodiča na postojećim vodovima

Iznenadno i neplanirano povećanje vršnog opterećenja na određenim područjima, na godišnjoj razini znatno većoj od one planirane i očekivane, kao rezultat daje povećanje vršne snage te uvjetuje da se poveća prijenosna moć vodova. Kao jedno od rješenja nameće se zamjena postojećih Alučel vodiča sa visokotemperaturnim niskoprovjesnim vodičima na nadzemnim vodovima, njima se značajno poveća prijenosna moć voda, a s druge strane zadržavaju se svi važni mehanički i lokacijski parametri voda (trasa, lokacije stupova, provjesi, sigurnosne visine i udaljenosti, mehanička naprezanja i dr.). Ekonomski aspekt kod takvih zahvata je u pravilu značajno bolji od gradnje novog nadzemnog voda većeg presjeka vodiča, te su rokovi izvedbe, od početne ideje do realizacije, znatno kraći.

#### 3.4.1. Zamjena Al/Č vodiča visokotemperaturnim niskoprovjesnim vodičima

Kod zamjene vodiča na dalekovodima, radi obnove i povećanja prijenosne moći, a da se pritom zadrže postojeći stupovi i oprema, moraju se postaviti slijedeći uvjeti:

- Sile koje djeluju na stupove moraju biti **jednake ili manje** silama za koje su ti stupovi projektirani
- Novi vodiči moraju imati **provjes** takav da zadovolji uvjete najmanjih dopuštenih međusobnih udaljenosti i sigurnosnih visina
- Najveća **vrijednost temperature** zamjenskog vodiča mora zadovoljavati zahtjeve za povećanjem nazivne struje voda
- Za isti režim rada, gubitci snage i energije bi trebali biti **manji**



Električne i mehaničke značajke se uspoređuju sa istovjetnim značajkama postojećeg vodiča te se zadovoljavanje uvjeta također provjerava i proračunom odabranog vodiča.

### 3.4.2. Zadržavanje iste sile na postojećim stupovima

Zadržavanje istih sila znači da treba paziti na sile u svim smjerovima koordinatnog sustava.

1. Sila koja djeluje okomito na vod ( x smjer) –  $\mathbf{F}_x$  – Kod najnepovoljnijih uvjeta, sila na vodič uzrokovana vjetrom
2. Sila koja djeluje vertikalno (z smjer) –  $\mathbf{F}_z = \mathbf{F}_v + \mathbf{F}_{led}$  = Sila vlastite težine vodiča + dodatna težina nastala ledom
3. Sila koja djeluje uzdužno s vodom (y smjer) –  $\mathbf{F}_y = \mathbf{H}$  = Horizontalna zatezna sila koja djeluje kod najtežeg opterećenja

Sila koja djeluje na vodič pod utjecajem vjetra, i to okomito, dana je u izrazu (3.1):

$$\mathbf{F}_x = \mathbf{P} \cdot \mathbf{d}_v \cdot \mathbf{L}_{vef} \cdot \sin \alpha \quad (3.1)$$

$\mathbf{P}$  – Pritisak, tlak vjetra ( $\text{N/m}^2$  ili Pa)

$\mathbf{L}_{vef}$  - Efektivna duljina vodiča u rasponu (m)

$\alpha$  - kut pod kojim djeluje vjetar s obzirom na vod

$\mathbf{d}_v$  – Promjer vodiča (m)

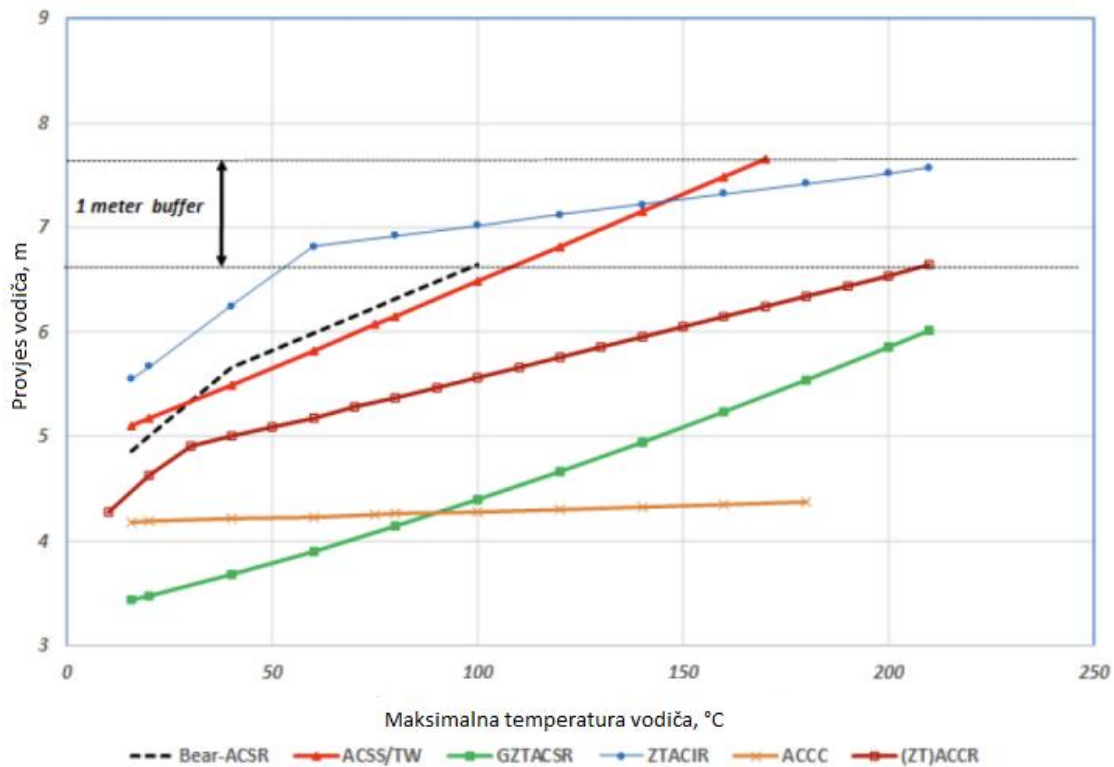
Sukladno pravilniku o tehničkim normativima za izgradnju nadzemnih elektroenergetskih vodova od 1 kV do 400 kV, najveća sila koja je mjerodavna za opterećenje stupa je sila od vjetra na temperaturi od  $-20^\circ\text{C}$ . Vidljivo je da su sila  $\mathbf{F}_x$  i promjer vodiča  $\mathbf{d}_v$  međusobno proporcionalni. Ukoliko se želi zadržati jednaka vrijednost sile, potreban je manji ili jednak promjer novog vodiča u odnosu na stari vodič.

Može se također primijetiti da masa novog vodiča mora biti manja ili jednaka masi starog vodiča.

Maksimalna horizontalna zatezna sila mora biti također manja ili jednaka s obzirom na postojeći vodič. Ta sila direktno ne ovisi o promjeru vodiča. Na temelju iskustva, dolazi se do zaključka da je ovu silu najčešće moguće smanjiti.

U općenitom stanju, dolazi se do zaključka da, ukoliko se žele zadržati postojeći stupovi, moraju se zadržati manje ili jednake sile vodiča na stupove. Od tuda proizlazi **prvi temeljni tehnički kriterij** za zamjenu postojećih vodiča sa novim visokotemperaturnim niskoprovjesnim vodičima.

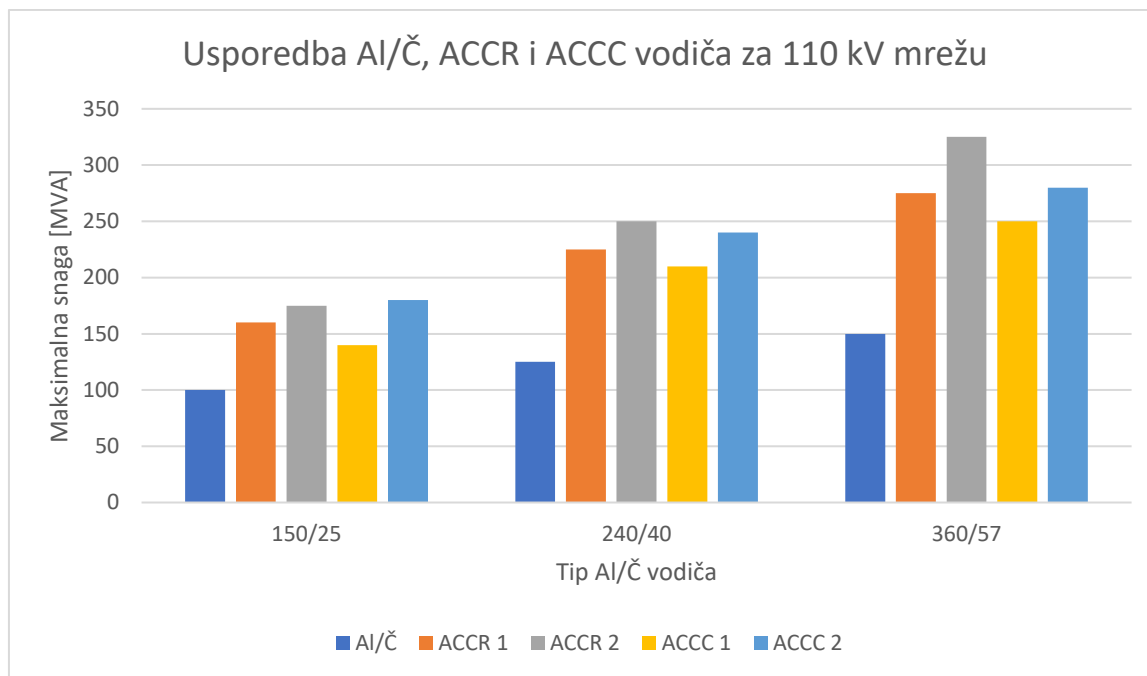
Još jedna pogodnost kod zamjene starih vodiča novim je ta da se smanjuje provjes, odnosno povećava se sigurnosna visina. To proizlazi iz svojstava visokotemperaturnog niskoprovjesnog vodiča i njegove jezgre. Na slici 3.1. Prikazano je ponašanje provjesa na različitim temperaturama gdje se lako može uočiti prednost HTLS vodiča u odnosu na druge vodiče.



Slika 3.1. Usporedba provjesa jednog Alučel vodiča i najčešćih HTLS vodiča [2]

### 3.4.3. Povećanje prijenosne moći

Povećanje prijenosne moći je temeljni zahtjev upotrebe HTLS vodiča. Posljedica je to upotrebe odžarenog aluminija i/ili specifičnih legura aluminija. Tada se omogućuje trajna radna temperatura vodiča čak i iznad granice koja je određena trajnom radnom temperaturom kompozitne jezgre. Najčešće povećanje iznosi oko 80%, u nekim slučajevima čak dva puta više od postojećeg vodiča. Sa slici 3.2. prikazana je usporedba povećanja prijenosne moći kod HTLS vodiča u odnosu na „stare“ vodiče. Vidi se da Alučel vodič zaostaje sa prijenosnom moći u odnosu na ACCR i ACCC vodiče.



*Slika 3.2. Usporedba povećanja prijenosne moći [2]*

#### 3.4.4. Smanjenje gubitaka

S obzirom da odžareni aluminij koji se najčešće koristi kod HTLS vodiča ima bolju vodljivost, krajnji rezultat daje smanjenje radnih gubitaka. Ova prednost može biti vrlo bitan ekonomski kriterij. Vrlo je važno ukoliko postoji financijska korist dobrog izbora ili financijska šteta lošijeg izbora vodiča kada se gledaju gubici. Često se pravilnim odabirom može dugoročno, ili čak srednjeročno, otplatiti investicija.

S druge strane mogu se nagomilati nepotrebni troškovi koji su se u startu mogli izbjeći. Činjenica je da se ne pridaje dovoljno pažnje tim financijskim aspektima.

## 4. VISOKOTEMPERATURNI NISKOPROVJESNI (HTLS) VODIČI

Aluminijski vodiči koji su pojačani jezgrom od čelika Al/Č, odnosno ACSR (Aluminium Conductor Steel Reinforced) dugo su vremena bili najjeftinija vrsta vodiča te su zato još uvijek najviše prisutni kod prijenosnih i distribucijskih vodova (nadzemnih), prvenstveno zbog svoje jednostavnosti, male težine i povoljne cijene. No, kako vrijeme prolazi do izražaja su došla ograničenja ovog tipa vodiča. Prvenstveno temperaturna ograničenja. Alučel vodiči izrađeni su kao užad koja ima tvrdo vučene aluminijske žice, s jezgrom od jedne ili više čeličnih pocinčanih žica. Za tvrdo vučeni aluminij postoji temperaturni limit radne temperature na max. 90 °C. Pravilnik o tehničkim normativima za izgradnju nadzemnih elektroenergetskih vodova nazivnog napona od 1 kV do 400 kV članak 16. navodi: „Presjek užadi mora biti dovoljno velik da ukupna temperatura užadi zbog zagrijavanja strujom ne bude viša od 80 °C, pri čemu se računa s temperaturom okoline od +40 °C.” Zbog toga se plašt visokotemperaturnog vodiča izrađuje od legure koja dobro podnosi povišene radne temperature, za neke i preko 200 °C. No, problem nije samo temperaturno ograničenje aluminijskog plašta.

Problem koji se pojavljuje na višim temperaturama je povećanje provjesa, uslijed temperaturnog istežanja. Visokotemperaturni niskoprovjesni (HTLS - High Temperature Low Sag) vodiči, uz to što posjeduju plašt koji vrlo dobro podnosi povišene temperature, također imaju i jezgru od materijala koji je otporan na visoke temperature, a pritom ima niski koeficijent linearnog toplinskog istežanja. Maksimalne dopuštene radne temperature takve vrste vodiča nalaze se u rasponu od 150 °C do preko 200 °C, ovisi o tipu. S obzirom da su predviđeni za visoke gustoće struja, takvi vodiči zahtijevaju i da im se smanji otpor sa svrhom smanjenja gubitaka.

#### 4.1. Najčešće korišteni HTLS vodiči

U nastavku slijedi pregled najčešće korištenih HTLS vodiča:

- **ACCR** – Aluminium Conductor, Composite Reinforced
- **ACCC** – Aluminium Conductor, Composite Core, trapezoidne žice
- **ZTACIR** – Ultra Thermal Resistant Aluminium Alloy Conductor, Invar Reinforced
- **G(Z)TACSR** – Gap Type Ultra Thermal Resistant Aluminium Alloy, Steel Reinforced
- **TACSR i TACSR/AW** – (Ultra) Thermal Resistant Aluminium Alloy Conductor, Steel Reinforced
- **ACSS i ACSS/TW** – Aluminium Conductor, Steel Supported, /TW – trapezoidal wire

#### 4.2. ACCR vodiči

Aluminijski vodič koji je kompozitno ojačan, odnosno ACCR, vodič je dizajniran tako da povećava prijenosni kapacitet za dvostruku vrijednost u usporedbi sa konvencionalnim vodičima čak i u izazovnim situacijama i na izazovnim terenima. To je prijenosni vodič velikog kapaciteta s aluminijskom matičnom jezgrom visoke čvrstoće. Dizajniran je da direktno zamjeni ACSR i ACSS vodiče na postojećim, „limitiranim“ vodovima. To znači da se može koristiti već postojeća infrastruktura a da se pritom prenese dva puta više snage, odnosno energije.

Prednosti ACCR vodiča su:

- Omogućuje maksimalan protok struje uz manje provjese
- Pruža dugotrajnu pouzdanost
- Brz i jednostavan za korištenje
- Rezultat je niži ukupni trošak projekta

ACCR vodič je u konstrukciji s okruglom žicom koja se sastoji od višežilne jezgre s aluminijskom matricom okružene vanjskim žicama od aluminija i cirkonija koje su okruglog

oblika. Okrugla žica, najčešće je korištena konstrukcija prijenosnog vodiča, često nudi najveće povećanje kapaciteta zbog male težine.

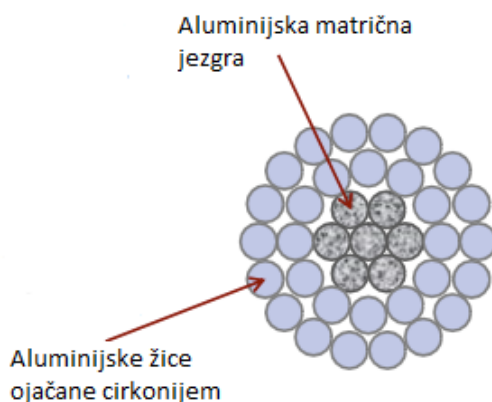
Karakteristika jezgre ACCR vodiča je da je svaki vodič unutar jezgre ojačan tisućama vlakana aluminijskog oksida koji ima vrlo visoku čvrstoću. Upravo je taj tip materijala, kompozitni matrični materijal, „srce“ ACCR vodiča. Ovaj tip materijala čini vodič vrlo laganim te mu daje jako mali provjes na vrlo visokim temperaturama.

Plast ACCR vodiča sastavljen je od aluminij-cirkonij legure te se izvodi u trapezoidnim ili u okruglim oblicima. Svaki aluminijski vodič ima minimalnu vodljivost od 60% vrijednosti IACS-a. Aluminij-cirkonij legura je zapravo tvrdo vučeni aluminij. Time se postiže aluminij koji ima jako slična svojstva 1350-H19 aluminiju. Također, aluminij-cirkonij legura daje mogućnost da se vodič zagrije na visoke temperature bez da omekša, to za rezultat daje hlađenje aluminija bez da izgubi čvrstoću. Tablica 4.1. prikazuje usporedbu ACSR vodiča i ACCR vodiča. Vidljivo je da ACCR vodič ima veće mehaničko naprezanje uz manju gustoću i manji koeficijent termičkog istežanja.

*Tablica 4.1. Usporedba ACSR i ACCR vodiča [12]*

<b>Vodič</b>	<b>ACSR</b>	<b>ACCR</b>
<b>Mehaničko naprezanje</b>	1275 MPa	1380 MPa
<b>Gustoća</b>	7.8 g/cm <sup>3</sup>	3.3 g/cm <sup>3</sup>
<b>Koeficijent termičkog istežanja</b>	12.0 x 10 <sup>-6</sup>	6.3 x 10 <sup>-6</sup>

Slika 4.1. prikazuje izgled poprečnog presjeka ACCR vodiča.



*Slika 4.1. Poprečni presjek ACCR vodiča [12]*

Sama konstrukcija ACCR vodiča je jako slična ACSR vodiču. Slojevi aluminij-cirkonij legure su spiralno namotani a pritom se koristi isti smjer i duljina kao kod ACSR vodiča. Jezgra je isto tako spiralno namotana.

ACCR predstavlja stabilne materijale konstrukcije, kao i robustan i provjeren materijal za vodiče. Testirani su u mnogim laboratorijima pa tako imaju stroge provjere koje moraju proći prije nego dođu na tržište. Postavljeni su u mnogim dijelovima svijeta, kao što su Minneapolis (SAD), Hawaii (vrlo korozivan okoliš) i Fargo, također i u Sjevernoj Dakoti gdje su vremenski uvjeti iznimno teški.

Tablice 4.2., 4.3., 4.4. i 4.5. prikazuju standardne vrste ACCR vodiča sa njihovim karakteristikama.



Tablica 4.2. Prikaz standardnih vrsta ACCR vodiča[12]

		Ostrich 300	Linnet 336	Hawk 477	Dove 557
Svojstva	Mjerna jedinica				
Omjer žica u plaštu i jezgri		26/7	26/7	26/7	26/7
Promjer žice jezgre	mm	2,1	2,3	2,7	2,9
Promjer žice plašta	mm	2,7	2,9	3,4	3,8
Promjer jezgre	mm	6,3	6,8	8,0	8,8
Promjer vodiča	mm	17,2	18,4	21,6	23,9
Težina jezgre	N/m	0,835	0,954	1,314	1,599
Težina plašta	N/m	4,079	4,668	6,464	7,881
Ukupna težina	N/m	4,914	5,621	7,778	9,480
Vlačno opterećenje pri popuštanju	N	53,823	61,830	85,406	102,754
Toplinsko produljenje jezgre	$10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	6,3	6,3	6,3	6,3
Toplinsko produljenje plašta	$10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	23,0	23,0	23,0	23,0
Toplinsko produljenje vodiča	$10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	16,7	16,7	16,7	16,7
Toplinski kapacitet jezgre	$\text{J}/\text{m}^{\circ}\text{C}$	71	82	116	141
Toplinski kapacitet plašta	$\text{J}/\text{m}^{\circ}\text{C}$	398	455	629	767
Trajna radna temperatura	$^{\circ}\text{C}$	210	210	210	210
Privremena nadtemperatura	$^{\circ}\text{C}$	240	240	240	240

Tablica 4.3. Prikaz standardnih vrsta ACCR vodiča[12]

		Grosbeak 636	Drake 795	Curlew 1033	Bittern 1272	Martin 1351	Lapwing 1590
Svojstva	Mjerna jedinica						
Omjer žica u plaštu i jezgri		26/19	26/19	54/19	51/19	54/19	51/19
Promjer žice jezgre	mm	1,9	2,1	2,1	2,1	2,4	2,4
Promjer žice plašta	mm	4,0	4,5	3,5	4,0	4,0	4,5
Promjer jezgre	mm	9,4	10,6	10,6	10,6	12,0	12,0
Promjer vodiča	mm	25,5	28,6	31,7	34,3	35,9	38,9
Težina jezgre	N/m	1,784	2,239	2,239	2,239	2,876	2,876
Težina plašta	N/m	9,011	11,333	14,308	17,102	18,425	22,023
Ukupna težina	N/m	10,795	13,571	16,547	19,341	21,301	24,899
Vlačno opterećenje pri popuštanju	N	113,874	143,233	158,357	171,256	201,504	220,187
Toplinsko produljenje jezgre	$10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3
Toplinsko produljenje plašta	$10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0
Toplinsko produljenje vodiča	$10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	16,5	16,5	17,1	17,8	17,1	17,8
Toplinski kapacitet jezgre	J/m <sup>o</sup> C	157	198	199	199	256	256
Toplinski kapacitet plašta	J/m <sup>o</sup> C	877	1102	1391	1663	1791	2141
Trajna radna temperatura	<sup>o</sup> C	210	210	210	210	210	210
Privremena nadtemperatura	<sup>o</sup> C	240	240	240	240	240	240

Tablica 4.4. Prikaz standardnih vrsta ACCR vodiča[12]

		Hawk 477TW	Calumet	Oswego	Wabash
Svojstva	Mjerna jedinica				
Omjer žica u plaštu i jezgri		28/7	20/7	20/19	20/19
Promjer žice jezgre	mm	2,7	2,9	1,9	2,1
Promjer jezgre	mm	8,0	8,8	9,4	10,6
Promjer vodiča	mm	20,0	21,9	23,3	25,1
Težina jezgre	N/m	1,319	1,604	1,790	2,246
Težina plašta	N/m	6,533	7,738	9,107	10,449
Ukupna težina	N/m	7,851	9,342	10,898	12,696
Vlačno opterećenje pri popuštanju	N	85,148	102,535	115,017	139,090
Toplinsko produljenje jezgre	$10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	6,3	6,3	6,3	6,3
Toplinsko produljenje plašta	$10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	23,0	23,0	23,0	23,0
Toplinsko produljenje vodiča	$10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	16,8	16,6	16,5	16,2
Toplinski kapacitet jezgre	$\text{J}/\text{m}^{\circ}\text{C}$	115	141	157	198
Toplinski kapacitet plašta	$\text{J}/\text{m}^{\circ}\text{C}$	636	753	887	1017
Trajna radna temperatura	$^{\circ}\text{C}$	210	210	210	210
Privremena nadtemperatura	$^{\circ}\text{C}$	240	240	240	240

Tablica 4.5. Prikaz standardnih vrsta ACCR vodiča[12]

		Suwanee	Curlew 1033 TW	Hudson	Pecos	Cumberland
Svojstva	Mjerna jedinica					
Omjer žica u plaštu i jezgri		24/19	20/19	24/19	38/19	38/19
Promjer žice jezgre	mm	2,3	2,1	2,3	2,4	2,7
Promjer jezgre	mm	11,3	10,6	11,3	13,3	14,7
Promjer vodiča	mm	27,9	28,7	30,4	35,8	39,4
Težina jezgre	N/m	2,568	2,246	2,568	3,545	4,315
Težina plašta	N/m	13,120	14,147	15,859	22,344	26,545
Ukupna težina	N/m	15,687	16,393	18,426	25,889	30,861
Vlačno opterećenje pri popuštanju	N	164,947	158,706	179,658	247,420	296,904
Toplinsko produljenje jezgre	$10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3
Toplinsko produljenje plašta	$10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0
Toplinsko produljenje vodiča	$10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	16,5	17,3	17,3	17,1	17,0
Toplinski kapacitet jezgre	$\text{J}/\text{m}^{\circ}\text{C}$	226	198	226	314	383
Toplinski kapacitet plašta	$\text{J}/\text{m}^{\circ}\text{C}$	1,277	1,377	1,543	2,172	2,59
Trajna radna temperatura	$^{\circ}\text{C}$	210	210	210	210	210
Privremena nadtemperatura	$^{\circ}\text{C}$	240	240	240	240	240

### 4.3. ACCC vodiči

ACCC je vodič (kompozitna jezgra aluminijskog vodiča) velikog kapaciteta s niskim provjesom koji se sastoji od kompozitne jezgre od ugljičnih vlakana uvučene u zaštitni omotač od stakloplastike koji je spiralno omotan vodljivim aluminijskim nitima. ACCC vodič omogućava prijenos energije sa manje gubitaka u odnosu na ACSR vodič jednake veličine i težine. Razvio ga je i patentirao CTC Cable Corporation, sada CTC Global. Može prenijeti otprilike dvostruko veću struju od tradicionalnog vodiča ojačanog čelikom s aluminijskim vodičem (ACSR) iste veličine i težine, što ga čini idealnim za naknadnu ugradnju postojećeg dalekovoda za prijenos električne energije bez potrebe za promjenom postojećih stupova i izolatora. Detaljniji prikaz ACCC vodiča bili će prikazan u nastavku.

#### 4.3.1. Prednosti ACCC vodiča

Lagan je pa se uštedena težina može koristiti za više aluminijskih vodiča. ACCC vodič koristi trapezoidne niti za ugradnju više aluminija u isti promjer kabela.

Za vodiče se može koristiti mekši, potpuno žareni aluminij. ACSR vodič koristi jači nežareni komercijalno čisti aluminij koji doprinosi vlačnoj čvrstoći vodiča i poboljšava provjes i izvlačenje pod opterećenjem ledom, ali ima oko 3% manju električnu vodljivost i ograničava maksimalnu radnu temperaturu. Ima puno niži koeficijent toplinske ekspanzije od ACSR-a. To omogućuje da vodič radi na znatno višoj temperaturi bez pretjeranog provjesa.

#### 4.3.2. Nedostatci ACCC vodiča

Primarni nedostatak je trošak: ACCC košta 2,5-3 puta više od ACSR vodiča. Iako ACCC ima znatno manji toplinski provjes čak i od drugih dizajna HTLS vodiča, ima nižu aksijalnu krutost. Zbog toga se više spušta od drugih dizajna pod opterećenjem ledom, iako je verzija "ultra-low-sag" (viši modul) dostupna uz dodatnu cijenu. Također, druge aluminijske legure s povećanom

čvrstoćom nauštrb električne vodljivosti mogu se koristiti za poboljšanje provjesa opterećenja ledom. Opterećenje ledom također može dovesti do labavljenja niti vanjskog sloja zbog plastične deformacije. Žareni aluminij je izuzetno mekan i čini vodič sklonim površinskim oštećenjima. Vodič ima veći minimalni radijus savijanja, što zahtijeva dodatnu pažnju tijekom instalacije. Vodič zahtijeva posebne armature i opremu za vezivanje koja je skuplja.

#### 4.4. ZTACIR vodiči

Konstrukcija ZTACIR vodiča slična je standardnom ACSR-u, ali glavna razlika je materijal koji se koristi za jezgru, Invar legura. Invar legura sadrži 36% nikla i daje materijalu vrlo nizak koeficijent toplinskog širenja. Korištenjem ZTACIR vodiča izbjegavaju se tehnički problemi vezani uz odmotavanje i omatanje aluminijskih slojeva.

U trajnom pogonu, ZTACIR vodiči mogu biti zagrijani do 210 °C i to bez ikakvih posljedica. Pritom se prijenosna moć, pri istom poprečnom presjeku, povećava više nego dvostruko u odnosu na ACSR vodič. Nakon što se vodič zagrije, aluminijske žice plašta izduže se više od žica ivara u jezgri (ivar ima niski koeficijent toplinskog istezanja). Ovo svojstvo omogućava niski provjes na visokim temperaturama. Uz to, galvanizirane žice ivara dodatno su otporne na koroziju pa tako životni vijek ovakvog vodiča može doseći i preko 40 godina.

Tablica 4.6. prikazuje standardne karakteristike ZTACIR vodiča sa okruglom strukturom a tablica 4.7. prikazuje standardne karakteristike ZATCIR vodiča sa trapezoidnom strukturom.

Tablica 4.6. Standardne veličine okruglih ZTACIR vodiča[17]

Serijski br.	Površina (mm <sup>2</sup> )	Promjer (mm)	Vlačno opterećenje pri popuštanju (kN)	Otpor pri 20 °C (Ω/km)	Težina(Kg/km)	Strujna opteretivost (A)
135/30	164,61	16,66	53,97	0,2117	600	866
160/35	196,44	18,20	64,41	0,1774	716	974
210/40	207,26	20,38	73,78	0,1386	870	1135
200/45	244,39	20,30	78,81	0,1441	891	1135
230/45	275,51	21,51	82,19	0,1245	969	1231
255/40	297,48	22,41	82,83	0,1116	1015	1318
240/55	297,57	22,40	93,82	0,1171	1085	1165
220/55	270,33	21,35	85,23	0,1303	985	1088
290/55	347,67	24,16	101,53	0,0976	1226	1447
300/50	352,16	24,40	95,55	0,0944	1203	1476
340/65	403,36	26,03	117,90	0,0842	1423	1599
345/55	401,24	26,04	108,80	0,0828	1370	1612

Tablica 4.7. Standardne veličine trapezoidnih ZTACIR vodiča[17]

Serijski br.	Površina (mm <sup>2</sup> )	Promjer (mm)	Vlačno opterećenje pri popuštanju (kN)	Otpor pri 20 °C (Ω/km)	Težina(Kg/km)	Strujna opteretivost (A)
160/40	199,16	17,04	65,06	0,1759	730	957
200/45	244,62	18,87	76,87	0,1412	883	1105
200/50	247,81	19,01	80,39	0,1409	906	1110
250/45	294,04	20,64	82,64	0,1141	1019	1268
250/40	290,96	20,51	81,12	0,1143	996	1264
240/55	297,43	20,82	93,12	0,1169	1083	1138
240/50	290,62	20,55	88,13	0,1157	1032	1131
315/55	396,92	23,15	104,06	0,0907	1266	1479
315/50	363,10	22,91	97,20	0,0910	1232	1471
330/60	386,95	23,68	109,70	0,0869	1329	1522
350/55	404,77	24,19	109,33	0,0819	1379	1580



Slika 4.2. prikazuje poprečni presjek ZTACIR vodiča.



*Slika 4.2. Prikaz ZTACIR vodiča [13]*

#### 4.4.1. Prednosti ZTACIR vodiča

ZTACIR vodiči su se počeli proizvoditi kako bi se našla još bolja zamjena za stare Alučel vodiče, kojima su vrlo slični. Odnosno, kako bi se povećala prijenosna moć vodova a da se pritom pridržava svih normi vezanih za provjes vodiča. Tako su žice ZTACIR vodiča koje okružuju jezgru prekrivene slojem istisnutog aluminija, s ciljem postizanja još veće otpornosti na koroziju. Prijenosna moć se tako znatno povećava poštujući pritom niski provjes i laku instalaciju. To je zapravo ključ uspjeha ZTACIR vodiča. Mehanički kriteriji su kod ZTACIR vodiča zadržani i na temperaturi do 210 °C.

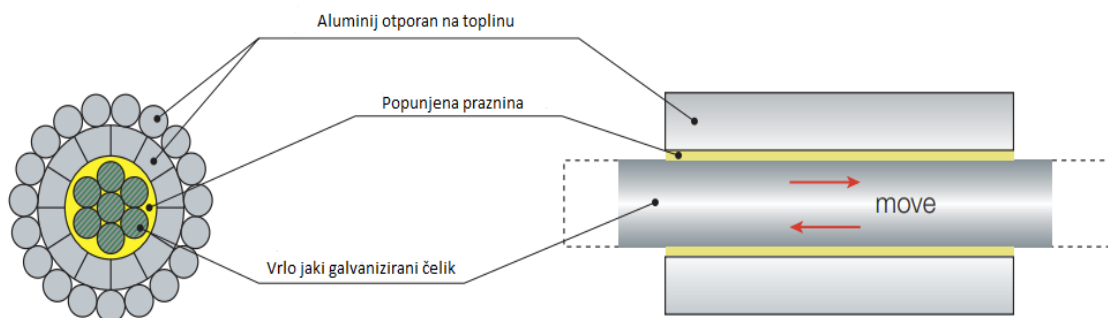
#### 4.5. G(Z)TACSR vodiči

G(Z)TACSR vodiči se izrađuju od aluminija otpornog na toplinu koji je postavljen preko čelične jezgre. Između jezgre od čvrstog čelika i prvog sloja aluminijske legure ( TAL ili ZTAL)

se održava malen prstenasti razmak. Ta praznina popunjena je mašću koja ima visoku toplinsku otpornost, te mu to svojstvo omogućuje neovisnost zatezanja jezgre i plašta.

Zahvaljujući radnim temperaturama do 210°C koje ovi vodiči mogu izdržati, GAP dizajn vodiča nudi mogućnost povećanja kapaciteta postojećih vodova za 50% do 100% za istu veličinu vodiča, uz pružanje izvrsnih karakteristika provjesa. Zamjena instaliranih vodiča G(Z)TACSR-om je vrlo isplativo rješenje za povećanje prijenosne moći postojećih dalekovoda u kratkom vremenskom roku. Modifikacija stupova vrlo je ograničena ili uopće nije potrebna što znači da se vrlo brzo mogu instalirati. Vrlo često je potrebna samo modifikacija zatezanja na krajnjim stupovima. Termičko koljeno je također jako nisko kod ovih vodiča, što ukazuje i na niski provjes. Također, vrlo su isplativi zbog toga što imaju nisku cijenu.

Slika 4.3. prikazuje jezgru G(Z)TACSR vodiča od jakog galvaniziranog čelika koju okružuje popunjena praznina i aluminij koji je otporan na toplinu.



Slika 4.3. Prikaz G(Z)TACSR vodiča [14]

Ovakav tip vodiča ima prednost veće nosivosti struje, s obzirom da vodič može funkcionirati na puno većim radnim temperaturama od ACSR vodiča. S obzirom da je provjes povezan sa koeficijentom toplinskog širenja, ACSR vodič ima puno veći provjes od G(Z)TACSR vodiča, zbog toga što koeficijent G(Z)TACR vodiča ovisi samo o širenju čelične jezgre, plašt u ovom slučaju nema nosivu funkciju.

#### 4.6. TACSR i TACSR/AW vodiči

TACSR i TACSR/AW vodiči su po konstrukciji vrlo slični konvencionalnim ACSR vodičima, ali su aluminijske žice razreda EC zamijenjene tvrdo vučenim aluminijskim žicama od aluminijske legure otporne na toplinu (općenito poznate kao TAL). TACSR može sigurno raditi kontinuirano iznad 150 °C što omogućuje prijenos veće struje kroz vodič. Sposobnost aluminijske legure dopirane cirkonijem da zadrži svoja električna i mehanička svojstva na povišenim temperaturama čini ove vodiče vrlo isplativim rješenjem za obnovu postojećih linija s povećanim kapacitetom. TACSR (/AW) se koristi kod nadzemnih vodova za prijenos električne energije. Primjer su veliki gradovi, primorska četvrt, vlažno područje itd.

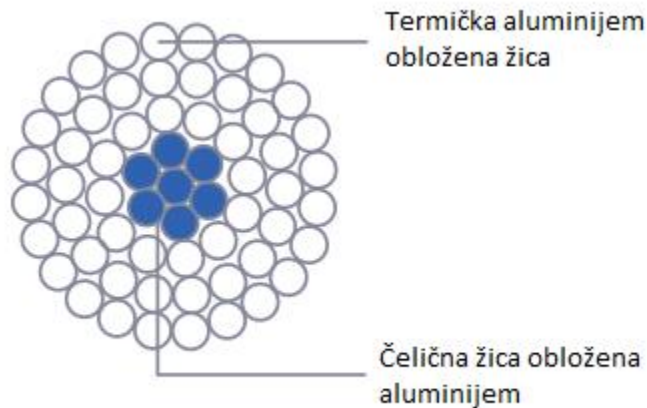
Nove aluminijske legure koje imaju visoku toplinsku otpornost mogu prenositi 50%-60% više struje od ACSR-a iste veličine, dok maksimalni provjes i maksimalno radno naprezanje ostaju gotovo isti kao kod ACSR-a.

Aluminijske legure ovakvog vodiča mogu prenositi do 50%-60% veću struju od ACSR vodiča dok pritom zadržavaju provjes i maksimalno radno naprezanje istim.

U konačnici, sva ova svojstva daju prednosti TACSR vodiča:

- Novi dalekovodi mogu bit izgrađeni za prijenos većeg kapaciteta
- Strujna opteretivost vodiča je 1,5 puta veća
- Mogućnost rada na većoj radnoj temperaturi
- Veća otpornost na koroziju

Na slici 4.4. prikazan je poprečni presjek TACSR vodiča.



Slika 4.4. Poprečni presjek TASCAR vodiča[18]

#### 4.7. ACSS i ACSS/TW vodiči

ACSS je koncentrični višežični vodič s jednim ili više slojeva tvrdo izvučenih i žarenih 1350-0 aluminijskih žica oko središnje čelične jezgre. U ACSS-u, pod normalnim radnim uvjetima, mehaničko opterećenje uglavnom proizlazi iz čelične jezgre budući da aluminij u potpuno žarenoj fazi ne doprinosi mnogo mehaničkoj čvrstoći. Žice s čeličnom jezgrom štite se od korozije odabirom odgovarajućeg premaza žice kao što je pocinčavanje, presvlačenje legurom mischmetala ili oblaganje aluminijem. Vrsta premaza odabire se tako da odgovara okolini kojoj je vodič izložen i radnoj temperaturi vodiča. ACSS vodiči su prikladni za rad na visokim temperaturama bez gubitka mehaničkih svojstava.

To su vodiči koji su korišteni za trajan rad na temperaturama do 250 °C bez gubitka snage. Provjes je pritom jako mali u usporedbi sa ACSR vodičima. Kako je napomenuto, na provjes ne utječe puzanje aluminija koje se pojavljuje poslije dugih perioda rada.

Žice su kod ovakvog vodiča žarene na način da uštede oko 2% energije te mogu smanjiti gubitke za oko 3%. Nosivost struje se na taj način povećava za 1,5 puta u odnosu na ACSR vodič.

Prednosti:

- Poboljšana vodljivost
- Bolje svojstvo samoprigušenja
- Vrlo malo propadanje pri visokoj temperaturi
- Velika nosivost struje
- Izvrsna otpornost na zamor od vibracija
- Dugotrajno puzanje aluminija ne utječe na konačan provjes

Ove prednosti čine vodiče vrlo pogodnima kod zamjena starih vodova gdje strukture mogu biti optimizirane s obzirom na reducirani provjes ili gdje je povećana potreba za izvanredne slučajeve gdje se naglo poveća teret.

Slika 4.5. prikazuje konstrukciju ACSS i ACSS/TW vodiča.



*Slika 4.5. Presjek ACSS i ACSS/TW vodiča [19]*

## **5. ACCC VODIČI ZA NADZEMNE VODOVE**

ACCC (Aluminum Conductor Composite Core) je registrirani naziv za tip visokotemperaturnog niskoprovjesnog vodiča za dalekovode kojeg proizvodi više od 34 internacionalna priznata proizvođača vodiča a distribuiran je u više od 60 zemalja svijeta.

### **5.1. Početak primjene**

CTC Global (prije Composite Technology Corporation) razvio je 2005. godine patentiranu tehnologiju kompozitne jezgre. Kompozitna jezgra koja je proizvedena u skladu sa ASTM B987 / B987M standardima te je odobrena za upotrebu u nadzemnim električnim vodovima. Proizvodi se sa partnerima u Kini i Indoneziji a završen ACCC vodič proizvodi preko 34 proizvođača diljem cijelog svijeta i to po odobrenoj licenci. U 2021. ACCC vodič je odabralo više od 250 poduzeća u više od 60 zemalja svijeta za više od 1000 svojih projekata u rasponu napona od 11kV(AC) pa sve do 1100 kV (DC). Sami podatci koji govore o tome kako se ACCC vodič sve više primjenjuje u praski.

### **5.2. Razlozi primjene ACCC vodiča**

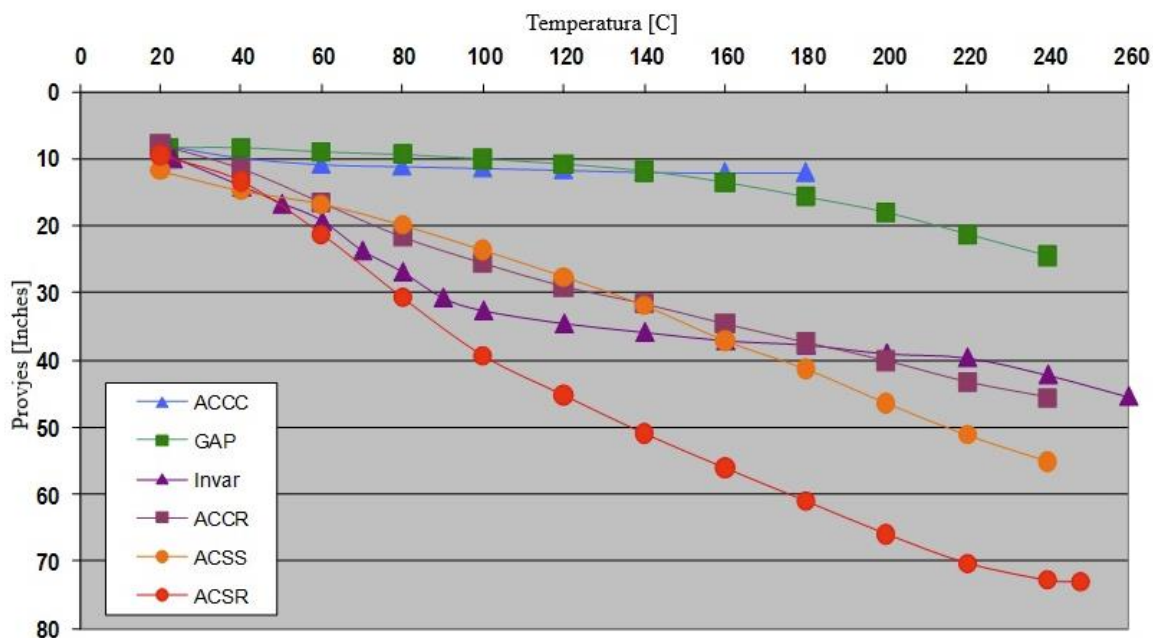
Jedan od glavnih razloga široke primjene ACCC vodiča je taj da je prijenosni kapacitet približno dvostruko veći od običnog Alučel vodiča iste težine i veličine, što ga samim time čini idealnim odabirom za zamjenu starih vodiča bez potrebe za promjenom trenutne infrastrukture vezane za prijenos električne energije. S obzirom da nema potrebe za promjenom infrastrukture dolazi do velike uštede rada, materijala i novaca te se takva operacija može izvesti kao obična operacija „održavanja i popravka“ određenog voda. Također, velika prednost je što takav proces ne iziskuje nikakve dodatne dozvole koje bi se morale čekati za novogradnju.

Sve to postignuto je zamjenom čelične jezgre Alučel vodiča sa staklenim i karbonskim vlaknima, što se dobiva vučnom trizijom. Time se dobiva da je takav vodič lakši od svog

prethodnika, pa se ta razlika u težini može iskoristiti tako da se stavi više aluminija za prijenos energije. ACCC vodič koristi trapezoidne niti kako bi ih više stalo u jedan vodič. Za ovakve vodiče se može koristiti i mekši aluminij, potpuno žareni. Kod Alučel vodiča koristi se nežareni komercijalno čišći aluminij koji doprinosi vlačnoj čvrstoći i poboljšava provjes i izvlačenje pod opterećenjem. Međutim, takav vodič ima oko 3% manju vodljivost te ograničava maksimalnu radnu temperaturu. Prednost ACCC vodiča je i puno niži temperaturni koeficijent toplinske ekspanzije što omogućuje vodiču rad na puno većoj temperaturi bez pretjeranog provjesa.

Svaki pojedini projekt ugradnje ACCC vodiča ima svoje posebne zahtjeve, shodno tome nije svaki projekt isti. Zahtjevi ovise o terenu, električnoj energiji, kapacitetu voda, ekološkim uvjetima i stanju već postojećih objekata. Može se desiti slučaj da trenutno stanje ne zadovoljava uvjete za postavljanje ACCC vodiča pa se mora ugraditi nova infrastruktura ali su takvi slučajevi rjeđi.

Slika 5.1. prikazuje ovisnost provjesa određenih vodiča o temperaturi.



Slika 5.1. Prikaz tipova vodiča s obzirom na temperaturnu ovisnost o provjesu [15]

Kao što je vidljivo iz slike 5.1. ACCC vodič ima najmanji provjes pri velikim temperaturama u odnosu na druge tipove vodiča.

Na slikama 5.2. i 5.3. prikazane su karakteristike ACCC vodiča koji su korišteni u SAD-u, odnosno u Europi.



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
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

Slika 5.2. Specifikacije ACCC vodiča korištenih u SAD-u [15]

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
STOCKHOLM 2L	914	463,3	26,39	8,76	1395	130,2	156,2	0,0605	0,0625	0,0746	1,049	1,576
STOCKHOLM 3L	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

Slika 5.3. Specifikacije ACCC vodiča korištenih u Europi [15]

### 5.3. Svojstva ACCC vodiča

Za dobre performanse, učinkovitost i dugi životni vijek vodiča potrebno je uskladiti brojna električna i mehanička svojstva vodiča. Dobar sklad ovih svojstava može utjecati na početne troškove kao i na troškove u daljnjem životnom ciklusu vodiča i strukture u kojoj se on nalazi. Ukoliko se uspoređi ACCC vodič sa drugim vodičima koji imaju jednaki promjer i ukupnu težinu, ACCC vodič je bolji izbor u gotovo svakom slučaju.

Kada se promatra ekonomski aspekt, ACCC vodič je skuplji po jedinici duljine, međutim mora se uzeti u obzir da je prijenosni kapacitet ACCC-a približno dva puta veći od običnog ekvivalentnog vodiča. U konačnici to rezultira znatno nižim strukturnim opterećenjima.

Vodiči poput ACSS i ACCC tipa vodiča, koriste jezgru kao primarni element za čvrstoću, s obzirom na činjenicu da aluminijske niti vrlo lako popuste pod opterećenjem. Tablica 5.4. sadrži podatke za različite vrste jezgara ACCC vodiča.

Tablica 5.4. Prikaz različitih svojstva jezgre vodiča [15]

Opis	Težina (g/cm <sup>3</sup> )	Modul elastičnosti (GPa)	Vlačna čvrstoća (MPa)	Koeficijent toplinskog širenja (x10 <sup>-6</sup> /°C)
HS čelik	7,78	200	1378 – 1447	11,5
EHS čelik	7,78	200	1516	11,5
EXHS čelik (premazan galfanom)	7,78	200	1964	11,5
Ugljični hibridni epoksid	1,94	110 – 145	2274 – 2584	1,6
Alclad	6,59	162	1102 – 1343	13,0
Pocinčana legura invara	7,78	162	1033 – 1068	3,0
Standardni Mischmetal	7,78	200	1378 – 1447	11,5
HS Mischmetal	7,78	186	1516 – 1620	11,5
Metalna matrica aluminij - oksida	3,32	215	1309	6,0

Iz tablice 5.4. jasno je vidljivo kako ugljični hibridni epoksid, koji se koristi kao materijal za jezgru kod ACCC vodiča ima znatno bolja svojstva, uz to i niži koeficijent toplinskog širenja, od HS čelika koji se koristi kao materijal za jezgru kod ACSR vodiča.

Ukoliko se promotri modul elastičnosti jezgre, da se zaključiti da će se ACCC vodič lako rastezati.

Kako je jezgra vrlo elastična, to za rezultat daje brzo opuštanje niti i poboljšane karakteristike prigušivanja kao i manju osjetljivost na zamor. Općepoznato je da su vodiči izloženi eolskim vibracijama. To su vibracije koje ovise o jačini vjetra, svojstvima vodiča i ostalim parametrima. Vibracije prvenstveno utječu na zamor niti na ovjesnim stezaljkama. Vrlo dobro rješenje u smanjivanju vibracija pokazuje se oblikovanje niti u obliku trapeza, gdje onda niti pružaju veću površinu dodira od okruglih te na taj način smanjuju vibracije. Velika opterećenja, ledom i vjetrom, rezultiraju rastezanjem vodiča što uzrokuje popuštanje aluminijskih niti te se na taj način snižava točka termičkog koljena i poboljšavaju karakteristike samoprigušivanja u svim a osobito u hladnijim uvjetima.

Nakon niza ispitivanja, utvrđeno je da je maksimalna radna kontinuirana temperatura ACCC vodiča 180 °C. Prilikom rada na ovoj temperaturi, količina površinske oksidacije je minimalna. To je reakcija koja kasnije stvara gusti sloj koji usporava daljnju oksidaciju.

Trenutno u svijetu postoji 9 standardnih veličina za jezgru ACCC vodiča te su one u rasponu od 150 mm<sup>2</sup> do 1400 mm<sup>2</sup>. U tablici 5.5. nalaze se svojstva svake veličine jezgre ACCC vodiča.

Tablica 5.5. Svojstva svake veličine jezgre [15]

Serijski broj	200-003	200-004	200-005	200-006	200-007	200-008	200-009	200-010	200-011
Promjer jezgre (mm)	5,97	7,11	7,75	8,13	9,53	8,76	9,78	10,03	10,54
Tolerancija promjera (mm)	±0,05	±0,05	±0,05	±0,05	±0,05	±0,05	±0,05	±0,05	±0,05
Poprečni presjek jezgre (mm <sup>2</sup> )	28,0	39,7	47,1	51,9	71,3	60,3	75,1	79,1	87,3
Čvrstoća kompozitne jezgre (MPa)	2158	2158	2158	2158	2158	2158	2158	2158	2158
Vlačno opterećenje pri popuštanju (kN)	60,4	85,7	101,7	112,0	153,8	130,2	162,1	170,6	188,3
Nominalna masa jezgre (kg/km)	54	76	86	98	132	113	143	147	164
Modul elastičnosti (GPa)	112,3	112,3	112,3	112,3	112,3	116,0	112,3	112,3	112,3
Koef. Topl. Ekspanzije (x10 <sup>-6</sup> /°C)	1,61	1,61	1,61	1,61	1,61	1,45	1,61	1,61	1,61
Spe. Topl. Kapacitet jezgre (J/g/°C)	0,813	0,813	0,813	0,813	0,813	0,813	0,813	0,813	0,813
Topl. Kap. Jezgre (J/m/°C)	43,5	61,7	70,2	79,8	107,7	91,9	116,1	119,8	133,1
El. Vodljivost jezgre (%IACS)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Preporučena radna temp. Jezgre (°C)	180	180	180	180	180	180	180	180	180
Dopuštena privremena nadtemperatura jezgre (°C)	200	200	200	200	200	200	200	200	200

#### **5.4. Poteškoće u primjeni ACCC vodiča**

Iako su prednosti vrlo brojnije, postoje i neke poteškoće kod primjene ACCC vodiča u stvarnim slučajevima. Prva i glavna poteškoća je cijena. ACCC vodič košta 2,5 – 3 puta više od običnog Alučel vodiča. Iako ima znatno manji provjes od drugih HTLS izvedbi, ima manju aksijalnu krutost. To rezultira da se znatno više spušta pod ledom.

Žareni aluminij koji se primjenjuje kod ACCC vodiča je izuzetno mekan te čini sam vodič pogodnim za površinska oštećenja. Isto tako, vodič ima minimalni radijus savijanja pa se prilikom instalacije mora obratiti dodatna pozornost.

## 6. IZBOR OPTIMALNIH PARAMETARA ACCC VODIČA ZA ZAMJENU POSTOJEĆIH

Kako je već napomenuto, stanje starih nadzemnih vodova i pojava potrebe za većom prijenosnom moći dovode do revitalizacije takvih vodova, često i zbog sve veće upotrebe obnovljivih izvora energije.

Za spomenutu revitalizaciju vodova, vrlo dobri su se pokazali visokotemperaturni niskoprovjesni vodiči (HTLS). Kako bi izgradnja novih vodova trajala jako dugo (složene procedure i ishođenje dozvola), a uz to bi to rješenje bilo jako skupo, koristi se alternativa. Zamjena starih vodiča sa novim HTLS vodičima. Razlog je upravo taj da se zamjena odrađuje puno brže od izgradnje novih vodova te je znatno jeftinija. Glavna pretpostavka je da novi vodič mora zadovoljiti stanje svih ili barem većinu postojećih stupova.

Često se dešava i situacija da trenutni vodiči ne zadovoljavaju sigurnosne karakteristike (npr. visine) pa ih se treba zamijeniti ACCC vodičima čija je odlika manji provjes. Stoga, opravdanje za uvođenje ACCC vodiča postoji čak i kada nema trenutne potrebe za povećanjem prijenosne moći. No, postoje slučajevi kada se nedovoljno obraća pozornost na tehničke kriterije pa se onda ne postiže optimalni izbor novog vodiča. Tehnički kriteriji su od esencijalne važnosti zbog toga što se na taj način direktno utječe na ekonomsku isplativost i tehničku iskoristivost voda. To ujedno predstavlja i vrlo stručno složen i kompleksan zadatak.

Temeljni tehnički kriteriji kod zamjene vodiča:

- Smanjenje ili zadržavanje istih sila na stupovima
- Povećanje prijenosne moći
- Smanjenje provjesa
- Zadovoljavanje svih ostalih tehničkih zahtjeva
- Smanjenje gubitaka

Utvrđeno je da za svaki tip Alučel vodiča, u 220kV ili 110kV mreži, postoji jedan ili više alternativnih optimalnih zamjena ACCC vodiča, koji bi zadovoljili sve potrebne tehničke zahtjeve a istovremeno poboljšali efikasnost postojećeg voda.

## 6.1. Karakteristike ACCC vodiča

ACCC vodič je danas najčešće korišteni visokotemperaturni niskoprovjesni vodič (prema stanju iz sredine 2022. preko 120.000 km vodiča u 62 zemlje svijeta). Njegova jezgra ima duplo veću čvrstoću i oko 70% manju težinu dok mu je koeficijent toplinskog izduženja oko 10 puta manji od čelične jezgre. Također, podnosi manju radnu temperaturu. Sva ta svojstva omogućuju manji promjer vodiča te se u njega može ugraditi veći presjek, najčešće oko 28% više, visokotemperaturnog aluminija. Na ovaj način se gotovo udvostručuje prijenosna moć voda.

Jezgre ACCC vodiča proizvode se u dva razreda čvrstoće:

- Velika zatezna čvrstoća (min. 2137 MPa)
- Vrlo velika zatezna čvrstoća (komercijalno **ULS**. Min. 2586 MPa)

ULS jezgra se upotrebljava samo u posebno zahtjevnim slučajevima, kod ekstremno velikih raspona ili specijalno zahtjevnih uvjeta poput jakog vjetra, leda itd.

Na slici 6.1. prikazan je presjek ACCC vodiča. Kompozitna jezgra od ugljičnih vlakana uvučena u zaštitni omotač od stakloplastike koji je spiralno omotan vodljivim aluminijskim nitima.



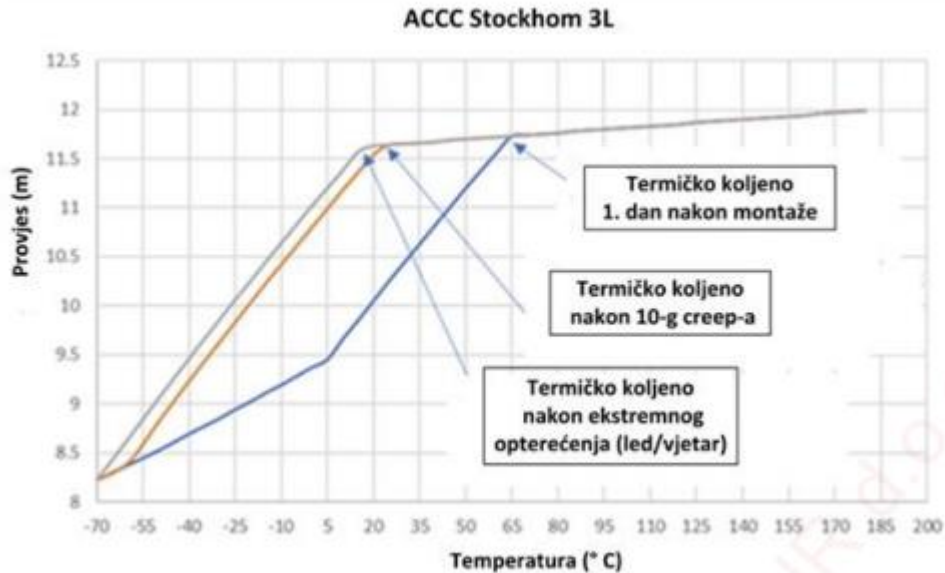


*Slika 6.1. Prikaz ACCC vodiča [8]*

Oko jezgre ACCC vodiča nanosi se sloj posebnih staklenih vlakana (minimalna debljina 0,38 mm) koji služi kao vrlo dobra galvanska barijera između aluminijskog plašta i jezgre.

Plašt je obično izrađen od žica odžarenog aluminija, najčešće u trapezoidnom obliku, u jednom ili više slojeva. Kada su u pitanju teži uvjeti, onda se koristi ACCC AZR vodič, koji ima plašt od legure aluminij-cirkonij.

Specifična osobina ACCC vodiča je temperatura tzv. Termičkog koljena. Kada je temperatura viša od termičkog koljena, ukupna zatezna sila raspoređena je samo na jezgru. U suprotnom, kada je temperatura ispod termičkog koljena onda se zatezna sila raspoređuje između jezgre i vanjskih AL žica. To je svojstvo koje posjeduju svi bimetalni vodiči, dok HTLS vodiči, a posebno ACCC vodiči imaju temperaturu koljena na temperaturi okoline ili čak i niže. Time je omogućeno da ACCC vodič radi u području tzv. Termalnog provjesa – kompletno naprezanje je na jezgri a porast provjesa s temperaturom je jako mali. U području ispod termičkog koljena, ACCC vodič ima slično ponašanje kao i Alučel vodič. Na slici 6.2. prikazano je kretanje temperature termičkog koljena, odnosno ovisnost provjesa vodiča o temperaturi kod ACCC vodiča.



Slika 6.2. Kretanje temperature termičkog koljena kod ACCC vodiča i ovisnost provjesa o temperaturi [2]

## 6.2. Prednosti ACCC vodiča

Uz prethodno navedene tehničke značajke ACCC vodiča dolazimo do njegovih prednosti.

- Smanjene sile na stupove – Zbog toga što su ACCC vodiči lakši, uz to da se zadržava manja ili jednaka horizontalna sila, bolja termička čvrstoća i stabilnost jezgre, omogućena je smanjena zatezna sila. Također, smanjuje se tako i naprezanje stupova
- Povećanje strujnog opterećenja do 2 puta – zbog većeg presjeka visokotemperaturnog aluminijskog plašta i zbog trajnog rada na temperaturi od 180 stupnjeva celzijevih
- Smanjenje provjesa – Razlozi su znatno manji koeficijent termičkog izduženja kompozitne jezgre, porast provjesa nakon termičkog koljena je gotovo pa zanemariv.
- Smanjenje gubitaka – Smanjuju se gubitci do oko 30%, ne samo zbog većeg presjeka aluminija već i zbog bolje vodljivosti odžarenog aluminija
- Prednosti kod revitalizacije – Postojeći vodovi se mogu revitalizirati bez modifikacije postojećih stupova, smanjena potrošnja sredstava
- Prednosti kod izgradnje novih vodova – stupovi su manji i sa većim rasponima, smanjena sredstva sa kraćim rokovima izrade

- Prednosti u slučaju velikih raspona i ekstremnih vremenskih uvjeta – ULS vodiči, sa ultra jakom jezgrom, veći modul elastičnosti, manji koeficijent toplinskog izduženja. Moguća primjena kod izuzetno dugih raspona i teških vremenskih uvjeta.

### 6.3. Povećanje prijenosne moći

Trajna strujna opteretivost može se odrediti analitičkim putem. Za to se koristi opća jednadžba stacionarnog stanja zagrijavanja vodiča i odvođenja topline iz vodiča uz pomoć konvekcije i zračenja (6.1.):

$$\mathbf{P}_{JAC} + \mathbf{P}_S = \mathbf{P}_{kon} + \mathbf{P}_{zr} \quad (6.1.)$$

$\mathbf{P}_{JAC}$  – Snaga izmjeničnih (Jouleovih) gubitaka, [W/m]

$\mathbf{P}_S$  – Snaga zagrijavanja uslijed sunčevog zračenja, [W/m]

$\mathbf{P}_{kon}$  – Snaga odvođenja topline konvekcijom, [W/m]

$\mathbf{P}_{zr}$  – Snaga odvođenja topline zračenjem, [W/m]

$$P_{JAC} = I_V^2 \cdot R_{AC}(\vartheta_V);$$

$$R_{AC}(\vartheta_V) = R_{AC20}(1 + \alpha(\vartheta_V - 20) + \beta(\vartheta_V - 20)^2)$$

Veličina izmjeničnog otpora vodiča uzima u obzir i dodatne gubitke, primjerice kod skin efekta, ukoliko takvi gubitci postoje.

#### Sunčevo zagrijavanje

Za snagu zagrijavanja vodiča  $\mathbf{P}_S$  po jedinici dužine uslijed Sunčevog zagrijavanja  $I_s$  može se približno napisati izrazom (6.2.):

$$P_s = k_s \cdot I_s \cdot d_v \quad (6.2.)$$

$k_s$  – Koeficijent apsorpcije, kod starijih vodiča je veći a kod novih vodiča je manji. Obično je njegova vrijednost od 0,5 – 0,75.

### Odvođenje topline zračenjem

Odvođenje topline zračenjem približno izračunavamo izrazom (6.3.):

$$P_{zr} = k_{SB} \cdot k_e \cdot d_v \cdot \pi \cdot (T_v^4 - T_{ok}^4); \quad (6.3.)$$

$$T = \vartheta + 273,15$$

$k_{SB}$  – Stefan-Boltzmannova konstanta za crno tijelo; = 5,6704 x 10<sup>-8</sup> W/(m<sup>2</sup> °C<sup>4</sup>)

$k_e$  – Koeficijent emisije

$T_v$  – Temperatura vodiča [K]

$T_{ok}$  – Temperatura okoline [K]

### Odvođenje topline konvekcijom

Odvođenje topline konvekcijom približno izračunavamo izrazima (6.4.):

$$P_{kon} = \pi \cdot \lambda \cdot N_u \cdot (T_v - T_{ok})$$

$$N_u = 0,32 + 0,43R_e^{0,52} \quad (6.4.)$$

$$R_e = \frac{v \cdot d_v \cdot \gamma}{\eta}$$

Nusseltov broj  $N_u$  se računa pomoću Reynoldsova broja  $R_e$ , koji se izračunava iz okomite komponente brzine vjetra na vod  $v$ , promjera  $d_v$  te parametara zraka; specifične mase  $\gamma$  i dinamičkog viskoziteta  $\eta$ .

Vrijednost trajne radne struje se onda može izračunati (za poznatu trajnu temperaturu) izrazom (6.5.):

$$I_n = \sqrt{\frac{P_{kon}(T) + P_{zr}(T) - P_s}{R_{AC}(\vartheta)}} \quad (6.5.)$$

Ponekad je potrebno i dodatno razmotriti uvjete okoline, dozvoljenu kratkotrajnu strujnu opteretivost (max ili emergency operating current). Kod ACCC vodiča ta struja je definirana za temperaturu od 200 °C, u trajanju od najviše 10 000 h kroz životni vijek.

**Posebno treba obratiti pozornost** kod interpretacije pojmova. Trajna radna struja ili temperatura se nekad zamjenjuju sa pojmom najveće dozvoljene pogonske struje ili temperature. To nisu trajna radna već kratkotrajno dozvoljene struje ili temperature. Trajna radna temperatura određuje se prema ASTM B987.

#### 6.4. Smanjenje provjesa

Ukoliko postoje uvjeti i zadane sile vodiča, njegov provjes je moguće odrediti PLS-CADD programom. Program funkcionira tako da uzima u obzir ovisnost zatezne sile i temperature.

Na slici 6.4.1 prikazana je tablica sa rezultatima proračuna Sag/Tension uz pomoć PLS-CADD programa za konkretan primjer. Radi se o zamjeni starog Alučel vodiča na 220kV vođu. Uspoređena su dva kandidata za zamjenu, ACCC Stockholm 3L i AZR, čvršća varijanta.

Vidljivo je da je AZR varijanta zadana sa temperaturom termičkog koljena na 60 °C a ACCC Stockholm 3L sa temperaturom na -15 °C. Razlog tome su različite vrste aluminijskog plašta na istoj jezgri vodiča. Aluminiij-cirkonij varijanta je tvrđa i sadržana je u raspodjeli sile sve do 60 °C. Tada svu zateznu silu preuzima kompozitna jezgra ACCC vodiča. Sa slici 6.3. mogu se pogledati konkretni rezultati zamjene Alučel vodiča ACCC vodičem. Vidljive su prednosti ACCC vodiča na područjima naprežanja, provjesa i temperature.

VODIČ	Weather Case Description	CABLE LOAD			R.S. INITIAL CONDITION				R.S. FINAL CONDITION AFTER CREEP					
		Hor. Load (N/m)	Vert. Load	Res. Load (N/m)	Max. Tens. (N)	Horiz. Tens. (N)	Max Ten % UL	C (m)	R.S. Sag (m)	Max. Tens. (N)	Horiz. Tens. (N)	Max Ten % UL	C (m)	R.S. Sag (m)
Al/Č 360/57 In = 730.9 A	Ice, k=2,5; temp -5 C	0	37.49	37.49	<b>38190</b>	<b>37573</b>	30	1002	16.48	37049	36411	30	971	<b>17.01</b>
	WIND 1300 Pa; temp 0 C	34.58	14.28	37.41	37824	37202	30	994	16.61	36707	36066	29	964	<b>17.14</b>
	40	0	14.28	14.28	14376	14138	11	990	16.68	13929	13683	11	958	<b>17.24</b>
	80	0	14.28	14.28	13524	13270	11	930	17.78	13150	12889	11	903	<b>18.31</b>
ACCC Stockholm 3L H = Hmax In = 1 566.2 A	Ice, k=2,5; temp -5 C	0	36.83	36.83	<b>38168</b>	<b>37572</b>	25	1020	16.19	38168	37572	25	1020	<b>16.19</b>
	WIND 1300 Pa; temp 0 C	34.32	13.62	36.92	38119	37519	25	1016	16.25	38119	37519	25	1016	<b>16.25</b>
	40	0	13.62	13.62	16509	16321	11	1198	13.77	15327	15125	10	1110	<b>14.87</b>
	80	0	13.62	13.62	15824	15628	10	1147	14.39	15242	15038	10	1104	<b>14.95</b>
ACCC Stockholm 3L H = 0.96 Hmax In = 1 566.2 A	Ice, k=2,5; temp -5 C	0	36.83	36.83	<b>36322</b>	<b>35694</b>	23	969	17.05	36322	35694	23	969	<b>17.05</b>
	WIND 1300 Pa; temp 0 C	34.32	13.62	36.92	36282	35650	23	966	17.11	36282	35650	23	966	<b>17.11</b>
	40	0	13.62	13.62	15311	15108	10	1109	14.88	14405	14190	9	1042	<b>15.85</b>
	80	0	13.62	13.62	14749	14538	9	1067	15.47	14332	14115	9	1036	<b>15.93</b>
ACCC AZR Stockholm 3L H = Hmax In = 1 527.5A	Ice, k=2,5; temp -5 C	0	36.82	36.82	<b>38175</b>	<b>37573</b>	23	1021	16.18	38175	37573	23	1021	<b>16.18</b>
	WIND 1300 Pa; temp 0 C	34.32	13.61	36.92	38033	37431	23	1014	16.29	38033	37431	23	1014	<b>16.29</b>
	40	0	13.61	13.61	14655	14443	9	1061	15.56	14089	13868	9	1019	<b>16.21</b>
	80	0	13.61	13.61	13822	13597	9	999	16.53	13496	13265	8	975	<b>16.95</b>
	180	0	13.61	13.61	13344	13111	8	963	17.15	13344	13111	8	963	<b>17.15</b>

Slika 6.3. Tablica rezultata zamjene Alučel vodiča [8]

Potrebno je uočiti i manji provjes AZR varijante kod ekstremnijih uvjeta, što je upravo i njegova zadaća. Važno je da obje varijante zadovoljavaju sve tehničke uvjete, a kod odabira je potrebno uključiti još nekoliko kriterija, kriterija koji su vezani za provjes u sredini raspona. Kod nas su oni raspisani u Pravilniku.

Međutim, za kontrolu možemo koristiti i izraze (6.6.):

- Zadovoljavanje uvjeta o minimalnoj dozvoljenoj udaljenosti prema zaštitnom užetu u sredini raspona

$$f_{ACCC40} \geq f_{zu40} - D_y + \sqrt{D_{min}^2 - D_x^2} \quad (6.6.)$$

$f_{ACCC40}$  – Provjes ACCC vodiča sa temperaturom 40 °C u sredini raspona, [m]

$f_{zu40}$  – Provjes zaštitnog užeta temperature 40 °C u sredini raspona, [m]

$D_y$  – Vertikalna udaljenost vodiča u glavi stupa i zaštitnog užeta, [m]

$D_x$  – Horizontalna udaljenost vodiča u glavi stupa i zaštitnog užeta, [m]

$D_{min}$  – Minimalna dozvoljena udaljenost vodiča i zaštitnog užeta određena izrazom iz Pravilnika, [m]:

$$D_{min} = k \cdot \sqrt{f_{40} + L_{ins}} + D_{el} \quad (6.6.)$$

- Zadovoljavanje uvjeta o najmanjem kutu zaštitnog užeta prema vodičima u sredini raspona

$$f_{ACCC40} \geq f_{zu40} + \frac{D_x}{tg(30^\circ C)} - D_y \quad (6.6.)$$

Kada je ACCC vodič zategnut maksimalno dozvoljenom horizontalnom silom, s obzirom na raspon promatranog voda, stupovima koji se koriste i njihovim dimenzijama te uvjetima okoline, zbog prevelikog smanjenja provjesa sa temperaturom od 40 °C kod ACCC vodiča rješenje bi trebalo potražiti sa povećanjem provjesa smanjenjem horizontalne sile sve dok provjes kod uvjeta sa ledom ne dosegne postavljeni dozvoljeni provjes u vodu. Ukoliko su u tom slučaju zadovoljeni svi dodatni uvjeti, tada je najbolji izbor ACCC Stockholm 3L, zbog 5,3% manjih radnih gubitaka.

Međutim, ukoliko ni tada nisu zadovoljeni dodatni uvjeti odabire se ACCC AZR jer on zadovoljava sve obavezne uvjete. U ovom se slučaju radi o teškim vremenskim uvjetima okoline za koje AZR varijanta i služi.

Iskustva su pokazala da je za uvjete s ledom do  $k = 1,6$  i sa vjetrom do 900 Pa skoro pa uvijek moguće smanjiti horizontalnu zateznu silu ACCC vodiča s Al žicama od odžarenog aluminija da se dobije istovremeno ciljano smanjenje provjesa i da se pritom zadovolje uvjeti iz Pravilnika u sredini raspona. Pokazano je da, kada se radi o teškim vremenskim uvjetima, nije dovoljno samo odabrati najveći ili dozvoljeni provjes već propisati i konkretne uvjete koje proizlaze iz Pravilnika o tehničkim normativima za izgradnju nadzemnih elektroenergetskih vodova napona 1 kV do 400 kV.

## 6.5. Primjenjivost i esencijalnost određenih propisa za ACCC i ostale HTLS vodiče

Općepoznato je da svi vodiči, a posebno HTLS odnosno ACCC vodiči, moraju zadovoljavati određene uvjete i norme te da moraju biti podvrgnuti tipskim ispitivanjima. S obzirom na građu HTLS vodiča s kompozitnom jezgrom potpuno su primjenjive postojeće norme koje vrijede i za druge vodiče. Recimo za **EN 50540**, **EN 50182** i ostale norme.

Već dugo godina su u pripremi izrade odgovarajućih IEC normi ali u IEC grupama još nije postignut dogovor. Jedina trenutno važeća i široko prihvaćena norma, za ACCC i druge HTLS vodiče sa kompozitnim jezgrom je **ASTM B987M-20** norma.

Najvažnije potrebne karakteristike HTLS vodiča su kvaliteta i dugovječnost jezgri od ugljičnih vlakana. Kako bi se spriječila **galvanska korozija** tijekom životnog vijeka vodiča od oko 40+ godina, jedna od najbitnijih stvari je zahtjev za galvanskom barijerom koji je propisan normom ASTM B-987.

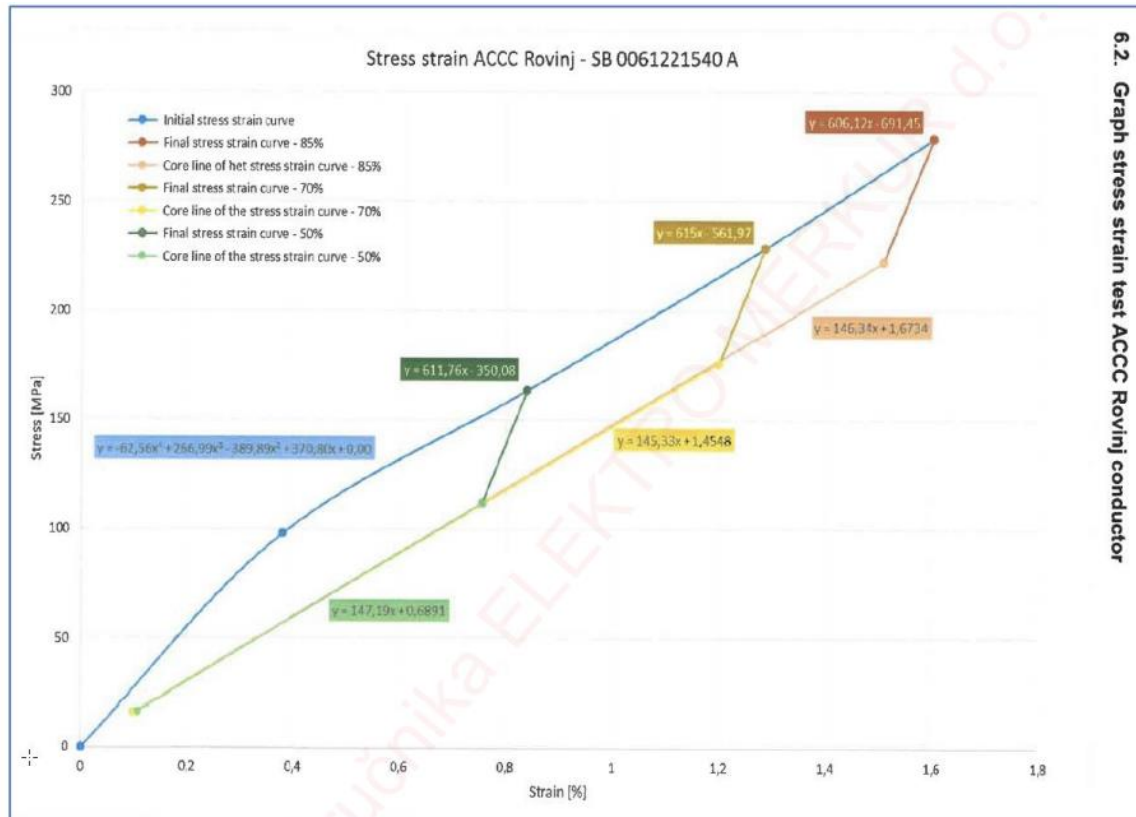
Galvanska korozija jedan je od glavnih uzroka kvarova vodiča. Zbog toga što postoji značajna razlika u elektroodnom potencijalu, rizik od galvanske korozije daleko je veći nego kod običnih Alučel vodiča. Zbog promjena temperature i drugih uvjeta okoline, vodiči su podvrgnuti konstantnim naprezanjima pa ako galvanska barijera nije dovoljno čvrsta, pojavljuju se i galvanske korozije. Odnosno, mora se pratiti ASTM B-987. Ukoliko se ne slijede propisane odredbe, vodič može prijevremeno puknuti ili se pokvariti.

U konačnici, karakteristike HTLS vodiča bi se trebale uvijek potvrditi stress/strain tipskim ispitivanjima prema EN 50182 ili EN 50540. Rezultati onda budu upisani u ulaznoj datoteci vodiča. U tom slučaju treba pripaziti zbog toga što nekad mogu biti upisani samo generički podatci, odnosno podatci koji nisu dobiveni mjerenjima.

Razlike između generičkih podataka i mjerenja ponekad mogu biti tako velike da se vodič koji zadovolji uvjete kasnije može pokazati kao pogrešan odabir. Sa tipskim se ispitivanjima ne dobije samo provjera kvalitete već i najbitnije tehničke karakteristike za kompozitnu jezgru.

Ukoliko se dogodi bilo kakav propust u ovom području, on može prouzročiti ogromne materijalne štete. Na slici 6.4. prikazani su rezultati stress strain testa za realan slučaj vodiča tipa Rovinj.





6.2. Graph stress strain test ACCC Rovinj conductor

Slika 6.4. Prikaz rezultata iz tipskog stress-strain testa za ACCC vodič Rovinj [8]

### 6.5.1. Preporuke za optimalan izbor ACCC vodiča za zamjenu starih Alučel vodiča

Ukoliko se primjene određeni tehnički kriteriji i provedu potrebne analize, može se dobiti pregled ACCC vodiča koji su optimalni za zamjenu starih Alučel vodiča koji će pritom zadovoljavati sve potrebne uvjete:

- Manja sila na stupovima
- Povećanje prijenosne moći
- Manji provjesi
- Manji radni gubitci

Slika 6.5. prikazuje podatke za Alučel vodiče i za njihove optimalne zamjene kada se radi o prijenosnim i distribucijskim mrežama.

Alučel (Al/Č; ACSR)							ACCC (Aluminum Conductor Composite Core)							
Naziv	Presjek Al plašta (mm <sup>2</sup> )	Promjer vodiča (mm)	Masa vodiča (kg/km)	Prekidna sila (kN)	El. AC otpor 25 °C (Ω/km)	Maksimalno opterećenje 80 °C (A)*	Naziv	Presjek Al plašta (mm <sup>2</sup> )	Promjer vodiča (mm)	Masa vodiča (kg/km)	Prekidna sila (kN)	Promjer jezgre (mm)	El. AC otpor 25 °C (Ω/km)	Maksimalno opterećenje 180 °C (A)*
150/25	148,9	17,1	607	54,3	0,1973	420	Rovinj	189,3	17,1	583	71,2	5,97	0,1509	879
							Zadar	177,4	17,1	566	95,7	7,11	0,1611	857
240/40	243,0	21,9	987	86,5	0,1214	571	Casablanca	273,6	20,5	834	101,1	7,11	0,1049	1,120
							Lisbon	315,5	21,8	948	103,5	7,11	0,0910	1,227
360/57	360,2	26,6	1 455,3	125,2	0,0819	729	Brussels	421,4	25,2	1 265	135,7	8,13	0,0687	1,479
							Stockholm 3L	460,8	26,4	1388	155,3	8,76	0,0628	1,544
120/20	121,6	15,5	494	44,9	0,2426	372	Silvassa	122,7	14,35	393,9	67,3	5,97	0,2286	671
							Dubrovnik	159,9	15,5	476,4	48,0	4,83	0,1753	783
95/15	94,4	13,6	383	35,1	0,3125	322	Cres - Z	122,8	13,59	370,5	46,2	4,83	0,2262	659
							ACCCZ Rijeka	112,4	13,6	362,5	66,1	5,97	0,2485	658
70/12	69,9	11,7	284	26,3	0,4221	263	Slano - Z	85,4	11,7	268,4	44,0	4,83	0,3254	525
							AZR Slano - Z	85,4	11,7	268,4	41,3	4,83	0,3414	517

Slika 6.5. Tablica pregleda optimalnih vodiča za zamjenu kod prijenosnih i distribucijskih mreža [8]

Na slici 6.5. može se vidjeti tablica sa navedenim optimalnim izborima u najvećem broju slučajeva. Ukoliko se u obzir uzimaju ekstremniji slučajevi, moguće da se rješenje ne nalazi unutar tablice. Bitno je napomenuti da se u gotovo svakom konkretnom slučaju može za stari Al/Č naći adekvatna HTLS, odnosno ACCC zamjena.

## 6.6. Prikaz zamjene Alučel vodiča sa visokotemperaturnim niskoprovjesnim vodičem na realnom postojećem vodu

Zamjena Alučel vodiča sa visokotemperaturnim niskoprovjesnim vodičem, u ovom slučaju ACCC vodič, podrazumijeva zamjenu postojeće opreme dalekovoda sa HTLS opremom. Na ovom

primjeru vidjeti će se primjer 110 kV dalekovoda, gdje je obavljena zamjena ACSR vodiča sa ACCC vodičem.

Zamjena se događa na postojećoj 110 kV opremi a duljina voda je 8 km. Dalekovod je postavljen uz cestu.

#### Ulazni podatci:

- Raspon između stupova: 148 m
- Najniža temperatura:  $-40^{\circ}\text{C}$
- Prosječna godišnja najniža temperatura:  $-20^{\circ}\text{C}$
- Projektirano opterećenje ledom: 12,7 mm radijalno uz 383 Pa pritiska vjetrom pri temperaturi od  $-20^{\circ}\text{C}$
- Vodič: ACSR
- Zamjenski vodič: ACCC
- Kontrolirano naprezanje: 21,6 kN, za opterećenje ledom
- Trenutna strujna opteretivost: 707 A pri temperaturi od  $30^{\circ}\text{C}$  uz pritisak vjetra od 192 Pa pri temperaturi od  $20^{\circ}\text{C}$

Prvi kriterij je postizanje što veće strujne opteretivosti a da se pritom uzimaju u obzir troškovi. S obzirom da su drveni stupovi zastarjeli, neki će biti zamijenjeni novima dok će se drugi premjestiti, zbog toga što tako nalažu lokacijske potrebe. Na trasi postoji i nekoliko čeličnih stupova koji su nepoznate čvrstoće.

Drugi kriterij je da se ne prekorači najveći provjes starog vodiča.

Redoslijed optimalnog odabira HTLS vodiča za zamjenu postojećeg ACSR vodiča na nadzemnom vodu:

1. Određivanje početnih parametara: toplinska ograničenja, razmak vodiča, faktori opterećenja i čvrstoće.

2. Određivanje najvećeg napreznja i najvećeg provjesa trenutnog stanja.

Kada se utvrđuje najveći provjes, potrebno je poznavati inicijalno, trenutno projektno stanje. Ukoliko ti podatci nisu dostupni, tada se izračunaju iz postojećeg odnosno pretpostavljenog stanja.

3. Provjeravaju se postojeći razmaci vodiča s obzirom na minimalne udaljenosti. Nameće se korištenje zamjenskog vodiča sa istim promjerom, manje ili iste težine, sa manjim ili istim koeficijentom toplinskog širenja zbog toga kako bi se izbjegli problemi sa zatezanjem vodiča na određenu silu.
4. Pravilan odabir vodiča. Kako bi se ispunio gornji uvjet, potrebno je izvršiti usporedbu starog i novog vodiča s obzirom na dizajnirano napreznje. Napreznje kod novog vodiča mora biti manje od najveće vrijednosti koja je zabilježena mjerenjem za stari vodič. Kao rezultat toga, odabire se ACCC vodič.
5. Zamjena ACSR vodiča sa ACCC vodičem.
6. Kontrola najvećeg provjesa. Kod novog vodiča provjes ne smije biti veći od najvećeg provjesa starog vodiča, Provjes ACCC vodiča može se odrediti proračunom pa se onda uspoređuje sa mjerenim vrijednostima starog vodiča.
7. Potrebno je napraviti usporedbu te utvrditi da novi vodič ne narušava funkcionalnost trase te da su sve udaljenosti u skladu sa pravilima.
8. Određivanje radne temperature vodiča. Iako novi vodič ima mogućnost zagrijavanja na veće temperature od starog vodiča, potrebno je u obzir uzeti najveći dopušteni provjes, te u skladu s njim odrediti najveću moguću radnu temperaturu.
9. Uz pomoć najveće radne temperature odrediti novu strujnu opteretivost dalekovoda.

U tablici 6.1. prikazana je usporedba ACSR vodiča sa ACCC vodiče, uz usporedbu ACSS vodiča sa ACCR vodičem.

Tablica 6.1. Usporedba podataka Alučel i HTLS vodiča[16]

	ACSR	ACCC	ACSS	ACSS/TW	ACCR
Promjer[mm]	21,8	21,8	21,8	20,04	21,64
Težina[kg/m]	0,976	0,927	0,976	0,975	0,793
Vlačna čvrstoća[kN]	86,74	109,2	69,4	69,4	85,41
Otpor pri 75°C [ $\Omega$ /km]	0,144	0,112	0,141	0,14	0,142

Uočljivo je da je za isti promjer od 21,8 mm, novi ACCC vodič lakši u odnosu na ACSR vodič, te ima veću vrijednost vlačne čvrstoće. Otpor pri temperaturi od 75°C manji je za 22% te iznosi 0,112  $\Omega$ /km.

U tablici 6.2. nalaze se rezultati zamjene Alučel (ACSR) vodiča sa ACCC vodičem. Uspoređeni su podatci tijekom rada oba vodiča.

Tablica 6.2. Podatci za ACSR i ACCC vodič

	ACSR	ACCC
Naprezanje[kN]	21,57	21,57
Provjes, sa ledom[m]	0,762	0,753
Provjes, bez leda[m]	0,663	0,566
Naprezanje pri 40°C	11,51	13,82
Nazivna opteretivost[A]	707	1200
Opteretivost pri 90°C	707	779

U ovom slučaju, radna temperatura ACSR vodiča je 90°C dok je za ACCC vodič 180°C.

Vidljivo je da su naprezanja oba vodiča usklađena te da su provjesi ACCC vodiča manji u odnosu na stari vodič. S obzirom da je uvjet bio da provjes ne smije biti veći od vrijednosti koje su bile u

stanju sa starim vodičem, provjesi ACSS vodiča uskladivi su sa provjesima ACSR vodiča pa se samim time može smanjiti naprežanje ACCC vodiča.

#### 6.6.1 Ekonomska evaluacija revitalizacije postojećih nadzemnih vodova sa HTLS vodičima

Za primjer se uzima jedan 110 kV vod, duljina voda je 30 km te na njemu je potrebno zamijeniti stari Al/Č 150/25 mm<sup>2</sup> vodič. Trenutno, nije nužno potrebno povećanje prijenosne moći. Razmatrani vod je opterećen tako da uz godišnju krivulju opterećenja gubitci postojećeg vodiča iznose 267 MWh/km godišnje. HTLS vodič koji treba zamijeniti trenutni Al/Č vodič ima ukupni presjek 188 mm<sup>2</sup>. On će uz jednaku krivulju opterećenja na kraju godine imati 202 MWh/km gubitaka. Razlika godišnjih gubitaka u ovom slučaju iznosi 65 MWh/km, za 30 km voda daje 1.950 MWh godišnje. Ako se pretpostavi da je cijena gubitaka 350 kn/MWh, dobijemo razliku koja iznosi 682.500 kn! Nadalje, obično se uzima da je vijek trajanja vodiča nekih 40 godina, to u prijevodu znači da se korištenjem HTLS vodiča na taj način, kroz 40 godina, uštedi 27,3 milijuna kuna.

Ako se izračuna taj iznos kao sadašnja vrijednost u prvoj godini od ukupnih 40 godina, prema ekonomski poznatom izrazu (6.8.):

$$PV = \sum_1^n \frac{c_k}{(1+p)^k} \quad (6.8.)$$

Gdje su:

PV – Trenutna vrijednost promatranog financiranja ili investicija, unutar „n“ godina

C<sub>k</sub> – Novčani iznos u godini „k“, u ovom slučaju 682.500,00 kn

„k“ – broj godine, računa se od prve

p – diskontna stopa. U ovom slučaju 4% ili 7%

Dobiveni su slijedeći rezultati:

- Za diskontnu stopu od 4% godišnje – 13,5 milijuna kuna
- Za diskontnu stopu od 7% godišnje – 9,1 milijun kuna

Odnosno, ušteda gubitaka na godišnjoj razini na vodu koji je uzet kao primjer, koja iznosi 0,68 milijuna kuna na godinu, rezultira sadašnjom vrijednošću tih ušteda za period od 40 godina od 9,1 – 13,5 milijuna kuna, ovisno s obzirom na primijenjenu diskontnu stopu.

Potrebno je i primijetiti da je godišnja ušteda značajno veća od razlike kod nabavnih cijena HTLS vodiča. HTLS vodiči su u pravilu od 3 do 5 puta skuplji od Al/Č vodiča. Za konkretan primjer voda sa duljinom od 30km, potrebno je 100km vodiča. Srednje cijena za HTLS vodič iznosi oko 70kn/m a srednja cijena za Al/Č vodič iznosi 20kn/m. Rezultat je razlika u nabavnoj vrijednosti od 5 milijuna kuna. Može se primijetiti kako će se razlika vrlo brzo pokriti uštedama u troškovima kod radnih gubitaka, te će se ulaganje isplatiti u dva do skoro četiri puta životnog vijeka vodiča od cca. 40 godina, ovisno o diskontnoj stopi koja se primjeni.

Uzimajući u obzir sve izneseno, ukoliko se izabere stari Al/Č vodič, unaprijed se prihvaćaju značajno veći gubitci, dok se izborom visokotemperaturnog niskoprovjesnog vodiča značajno mogu smanjiti ti isti gubitci.

Ukoliko se situacija sagleda sa ekološke strane, za veće gubitke potrebno je i puno više električne energije, a samim time to podrazumijeva više proizvodnje raznih nus-produkata, ponajviše plina CO<sub>2</sub>.

Razlika gubitaka u ovom konkretnom primjeru iznosila je 1.950 MWh/ godišnje. Nadalje, to daje slijedeće vrijednosti:

- Uz miks HEP-a za 2019. godinu (0,131 t CO<sub>2</sub>/MWh): 255 t CO<sub>2</sub>
- Ukoliko se uzmu samo TE (0,9 t CO<sub>2</sub>/MWh): 1.755 t CO<sub>2</sub>

Predviđa se povećanje cijena emisije CO<sub>2</sub> u budućnosti.

Sagledavajući sve izneseno, može se doći do zaključka da iako trenutno na nekom mjestu nema potrebe za povećanjem prijenose moći voda, ekonomski može biti opravdana zamjena starih Al/Č vodiča sa HTLS vodičima. Prvenstveno ne samo iz financijskog aspekta, već i iz ekološkog aspekta te se na taj način može izbjeći ogromna šteta za cijelo gospodarstvo.

## 7. ZAKLJUČAK

Ekspanzija elektroenergetskog sustava rezultira potrebom za povećanjem prijenosne moći samih vodova. Nedostatak do sada najčešće korištenih ACSR vodiča predstavlja njihova temperaturna ograničenost. Kao odlična alternativa koriste se visokotemperaturni niskoprovjesni (HTLS) vodiči. Postoji nekoliko vrsta HTLS vodiča: ACCR vodiči, ACCC vodiči, ZTACIR vodiči, G(Z)TACRT vodiči, TACSR i TASCRAW vodiči te ACSS i ACSS/TW vodiči. Kao najbolji izbor HTLS vodiča pokazao se ACCC tip visokotemperaturnog niskoprovjesnog vodiča. Aluminijski vodič s kompozitnom jezgrom (ACCC) se sastoji od kompozitne jezgre od ugljičnih vlakana uvučene u zaštitni omotač od stakloplastike koji je spiralno omotan vodljivim aluminijskim nitima. Kod zamjene Alučel vodiča HTLS vodičem, pri izboru zamjenskog vodiča, potrebno je voditi računa o tome da zamjenski vodič, uz to što će povećati prijenosnu moć samog voda i raditi na većoj radnoj temperaturi, zadržava isti ili manji provjes od starog vodiča. Odnosno, potrebno je pripaziti na dva kriterija. Prvi kriterij je postizanje što veće strujne opteretivosti a drugi kriterij je da se ne prekorači najveći provjes starog vodiča. Također, važno je pripaziti da već postojeća infrastruktura u cijelosti ili barem u velikoj većini zadovoljava mehaničke i tehničke uvjete za postavljanje novog vodiča. Na primjeru zamjene vodiča na 110kV vodu prikazano je da ušteda gubitaka na godišnjoj razini iznosi 0,98 milijuna kuna a to rezultira uštedom od 9,1 – 13,5 milijuna kuna kroz 40 godina. Sve većom primjenom ove vrste vodiča nameće se rješenje kojim bi moglo čak u cijelosti riješiti problem preopterećenosti „žila“ elektroenergetskog sustava. Stoga, ukoliko se unaprijed odabire Alučel vodič, prihvaćaju se značajno veći gubitci nego da se odabere HTLS vodič. Veći gubitci rezultiraju većom proizvodnjom nus-produkata, ponajviše plina CO<sub>2</sub>. Početak proizvodnje svakog proizvoda je električna energija te ukoliko se ona ne proizvodi na ekološki i ekonomski prihvatljive načine, ne možemo govoriti ni o ekološki i ekonomski prihvatljivim proizvodima. Procijenjeno je da gubitci dalekovoda sami stvaraju 1,2x10<sup>12</sup> tona CO<sub>2</sub> na godišnjoj razini. Kada bi se ugradili ACCC vodiči samim time bi se emisija smanjila za jednu trećinu. To je smanjenje emisije od čak 209 milijuna tona CO<sub>2</sub> na godinu. Podatak ekvivalentan tome da se sa ceste makne 55,8 milijuna automobila sam govori o tome koliko je zapravo rješenje smanjenja emisije CO<sub>2</sub> „jednostavno“.



## LITERATURA

- [1] Jurić I., Ćurković M.: „Eksploatacija visokotemperaturnog vodiča s kompozitnom jezgrom tipa ACCC u distribucijskoj mreži“, 2021.
- [2] Pavić I., Ćučić R., Kovač Z., Mihalic D.: „Kriteriji odabira optimalnih karakteristika HTLS vodiča za povećanje prijenosne moći postojećih vodova“, 2021.
- [3] Starašinić M., Kalin V., Jež P.: „Možnosti povećanja prenosne zmogljivosti daljnovoda DV 220 kV Divača-Padriče z uporabo sodobnih vodikov“, 2019.
- [4] Milun D., Katić I., Caktaš Z., Zorić Z.: „Tehničko-ekonomski aspekti pri zamjeni Al/Č vodiča visokotemperaturnim niskoprovjesnim ACCC vodičima na DV 35 kV“, 2021.
- [5] „Pravilnik o tehničkim normativima za izgradnju nadzemnih elektroenergetskih vodova napona 1 kV do 400 kV“ (SI list br. 65/1988; NN 53/1991; NN 24/1997.)
- [6] EN 50182; Conductors for overhead lines – Round wire concentric lay stranded conductors
- [7] EN 50540; Conductors for overhead lines – Aluminum Conductors Steel Supported (ACSS)
- [8] „Izbor optimalnih ACCC vodiča za zamjenu Alučel vodiča“ – ACCC priručnik
- [9] „ACSR (Aluminium Conductor Steel Reinforced) / ACSR-AW“, s Interneta, <https://www.deangeliprodotti.com/en/products/acsr-aluminium-conductor-steel-reinforced-acsr-aw/>, 24.10.2022.
- [10] „Hrvatska prijenosna mreža“, s Interneta, <https://www.hops.hr/shema-ees-a>, 24.10.2022.
- [11] Ožegović M., Ožegović K.: „Električne energetske mreže I“, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Split, 1996.
- [12] „3M Aluminum Conductor Composite Reinforced“, katalog, 25.10.2022.
- [13] „De Angeli prodotti“, s Interneta, <https://www.deangeliprodotti.com/en/products/invar-core-tacir-ktacir-ztacir/>, 25.10.2022.
- [14] „J-powe systems Corp. GTASCR“, s Interneta, [https://www.jpowers.co.jp/english/product/pdf/gap\\_c1.pdf](https://www.jpowers.co.jp/english/product/pdf/gap_c1.pdf), 25.10.2022.

[15] „Sag comparison test data“, s Interneta, [www.ctcglobal.com](http://www.ctcglobal.com), 25.10.2022.

[16] “Engineering Transmission Lines with High Capacity Low Sag ACCC Conductors“, s Interneta, [https://ctc-media.s3.amazonaws.com/wp-content/uploads/20181218185439/Engineering\\_Transmission\\_Lines\\_with\\_ACCC\\_Conductor.pdf](https://ctc-media.s3.amazonaws.com/wp-content/uploads/20181218185439/Engineering_Transmission_Lines_with_ACCC_Conductor.pdf), 7.11.2022.

[17] “ZTT CABLE Up – rating conductors“, s Interneta, [Catalogo-ZTT Cabo-Conductor-Especial.pdf \(zttcable.com.br\)](http://Catalogo-ZTT_Cabo-Conductor-Especial.pdf(zttcable.com.br)), 7.11.2022.

[18] “STER-TACSRTM – Sterlite power“, s Interneta, <https://www.sterlitepower.com/tacsr-conductor>, 7.11.2022.

[19] “Composite Concentric Stranded Wire ACSS Cable Customization“, s Interneta, <https://kvcable.com/products/htls-conductor-cable/acss-conductor-cable/>, 7.11.2022.

## POPIS OZNAKA I KRATICA

HTLS - High Temperature Low Sag – Visokotemperaturni niskoprovjesni vodiči

AAC – All Aluminum Conductor - Aluminijski vodiči

ACSR – Aluminum Conductor Steel Reinforced - Čelikom ojačan aluminijski vodič

AAAC – All Aluminum Alloy Conductor - Vodiči sa aluminijskom legurom

ACAR – Aluminum Conductor Aluminum-Alloy Reinforced - Aluminijski vodiči pojačani aluminijskom legurom

ACCR i ACCR/TW – Aluminium Conductor Composite Reinforced / Trapezoidal Wire ( Ojačani Kompozitni Aluminijski Vodič / Trapezoidna Žica)

ACCC – Aluminium Conductor Composite Core (Aluminijski Vodič sa Kompozitnom Jezgrom)

ZTACIR – (Super) Thermal Aluminium Alloy Conductor, Invar Reinforced (Aluminijski Vodič Pojačan Invarom)

G(Z)TACSR – Gap (Super) Thermal Aluminium Alloy, Steel Reinforced (Aluminijski Vodič, Pojačan Čelikom)

TACSR i TACSR/AW – Thermal Aluminium Alloy Conductor, Steel Reinforced (Aluminijski Vodič, Pojačan Čelikom)

ACSS i ACSS/TW – Aluminium Conductor Steel Supported / Trapezoidal Wire (Aluminijski Vodič, Pojačan Čelikom / Trapezoidna Žica)

Al – Aluminij

Če – Čelik

IACS – International Annealed Copper Standard (Međunarodni standard za žareni bakar)

## SAŽETAK

Visokotemperaturni niskoprovjesni (HTLS) vodiči pokazali su se kao odlično rješenje za zamjenu starih Alučel vodiča sa ciljem revitalizacije postojećeg voda, odnosno povećanja prijenosne moći voda. Pri zamjeni vodiča HTLS varijantom vodiča zadržavaju se, ako ne i poboljšavaju, svi uvjeti koji su bili u funkciji kod Alučel vodiča a da se pritom maksimalno iskoristi postojeća infrastruktura. Potrebno je obratiti pozornost na nekoliko parametara pri odabiru HTLS vodiča. Prvenstveno su to temperatura, prijenosni kapacitet i provjes vodiča. To je vidljivo na realnom primjeru koji pokazuje prednost uvođenja HTLS vodiča kako sa elektroenergetske tako i sa ekonomske strane.

**Ključne riječi:** Visokotemperaturni niskoprovjesni vodič, zamjena, revitalizacija, povećanje prijenosne moći, parametri

## SUMMARY

High Temperature Low Sag (HTLS) are shown as one of the best replacements of an old ACSR conductors with the goal to renew the current transmission line or to increase the power of the current transmission line. When replacing the ACSR conductor with HTLS variant, all the current conditions are remaining the same, some of them are even improved. It is necessary to be cautious when choosing the parameters for HTLS conductor. Primarily the temperature, transmission capacity and sag of the conductor. That can be noticeable in a real example which shows the advantage of integration of HTLS conductors, from electroenergetic and economic aspect.

**Keywords:** High Temperature Low Sag conductor, replacement, revitalisation, increasing the transmission power, parameters