

Analiza primjene suvremenih ACCC vodiča u distribucijskoj i prijenosnoj mreži

Jokić, Antonela

Master's thesis / Diplomski rad

2020

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:710132>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-05**

Repository / Repozitorij:

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



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

Sveučilišni studij

**ANALIZA PRIMJENE SUVREMENIH ACCC VODIČA
U DISTRIBUCIJSKOJ I PRIJENOSNOJ MREŽI**

Diplomski rad

Antonela Jokić

Osijek, 2020.

Sadržaj

1. UVOD	1
1.1. Zadatak i struktura rada	1
2. PREGLED TEME DIPLOMSKOG RADA	3
3. NADZEMNI ELEKTROENERGETSKI VODOVI	4
3.1. Vod i njegovi elementi	4
3.1.1. Stupovi i temelji	5
3.1.2. Vodiči	7
3.1.3. Izolatori	9
3.1.4. Pribor.....	11
3.1.5. Zaštitno uže i uzemljenje.....	12
3.2. Povijest vodiča.....	12
3.3. Općenito o ACCC vodičima.....	13
3.4. Prednosti ACCC vodiča u odnosu na druge vodiče	15
4. OSNOVNE TEORETSKE POSTAVKE PRORAČUNA PROVJESA I MEHANIČKOG NAPREZANJA VODIČA NADZEMNIH VODOVA	18
4.1. Pravilno dimenzioniranje vodiča	18
4.2. Mehanički proračun vodiča	18
4.2.1. Mehanička čvrstoća vodiča	22
4.2.2. Sile koje djeluju na vodiče dalekovoda	23
4.2.3. Proračun provjesa	27
4.2.4. Približni proračun pomoću parabole	28
4.2.5. Točni proračun pomoću lančanice	36
4.3. Provjesa u realnom zateznom polju.....	39
5. USPOREDNA ANALIZA DALEKOVODA UZ POMOĆ CCP PROGRAMA	43
5.1. Proračun dalekovoda Ernestinovo – Našice	47
5.2. Proračun dalekovoda Gradiška – Požega	52
6. ZAKLJUČAK	58

LITERATURA

SAŽETAK

ABSTRACT

ŽIVOTOPIS

PRILOZ

1. UVOD

Električna energija vrlo često se proizvodi u blizini pronalazišta prirodnih izvora energije gdje se prenosi dalekovodima do potrošača. Za prijenos električne energije koriste se kabeli i nadzemni vodovi. Zbog jednostavnijeg i kraćeg popravka većina električne energije prenosi se nadzemnim vodovima. Prijenos kabelima u odnosu na prijenos nadzemnim vodovima je nekoliko puta skuplji pa se zbog toga kabeli koriste samo u specifičnim situacijama.

Zbog konstantnog porasta potražnje za električnom energijom potrebno je zbog povećanja učinkovitosti dalekovoda povećati kapacitete prijenosa snage. Za prijenos veće količine električne energije uz smanjene gubitke prilikom prijenosa na vodu, proizvedene su nove vrste vodiča. Godišnje se u svijetu potroši više od 20 trilijuna kWh električne energije, a 1,4 trilijuna kWh se izgubi tijekom prijenosa. Zbog velike količine izgubljene energije, vrlo je važno ulaganje u sami prijenos električne energije zbog smanjenja gubitaka. Sve je važnija učinkovitost prijenosa električne energije jer je skuplje proizvesti MWh električne energije nego uložiti u poboljšanje, odnosno smanjenje gubitaka na vodu prilikom prijenosa.

1.1. Zadatak i struktura rada

Zadatak diplomskog rada je analizirati primjenu suvremenih ACCC vodiča u distribucijskoj i prijenosnoj mreži. U radu je potrebno napraviti usporedbu klasičnih Al/Č vodiča sa suvremenim visoko temperaturnim ACCC vodičima te usporediti njihove električne i mehaničke karakteristike.

U uvodnom poglavlju opisan je prijenos i glavni problemi prilikom prijenosa električne energije te zadatak i struktura diplomskog rada.

U drugom poglavlju je kroz pet potpoglavlja opisan nadzemni električni vod, njegovi elementi te je predstavljen ACCC vodič skupa s njegovim karakteristikama i prednostima u odnosu na klasične vodiče.

Treće poglavlje sadrži mehanički proračun vodiča gdje je predstavljena mehanička opteretljivost, sile koje djeluju na vodič i proračun provjesa.

U četvrtom poglavlju prikazana je usporedna analiza klasičnih vodiča sa suvremenim ACCC vodičima korištenjem CCP programa (engl. *Conductor Comparison Program Software*).

2. PREGLED TEME DIPLOMSKOG RADA

Prijenos električne energije do potrošača je jedan od najvažnijih faktora elektroenergetskog sustava, a ujedno sa sobom nosi i niz problema. Primjena klasičnih aluminijskih vodiča sa čeličnom jezgrom u sve većoj mjeri pokazuje se kao loše rješenje s aspekta gubitaka električne energije prilikom prijenosa, kapitalnih gubitaka te sa ekološkog aspekta.

Da bi se napravila analiza učinkovitosti postojećih dalekovoda korištenih za prijenos i distribuciju električne energije potrebno je poznavati njegove elemente i njihove značajke. U knjizi profesora Lajos Jozse [4] te u knjizi M. Ožegović, K. Ožegović [6] objašnjeni su dijelovi nadzemnog voda i njihova svrha u prijenosu električne energije.

Vrlo važan čimbenik za određivanje vrste i presjeka vodiča koji će se koristiti za nadzemni dalekovod je i klima u kojoj se gradi prijenosna mreža. Problematika prilikom promjene temperature zraka i dodatnog zimskog tereta je što dolazi do povećavanja ili smanjivanja provjesa dalekovoda. I povećanje i smanjivanje provjesa može dovesti do problema kao što je smanjena sigurnost ljudskih života. Da bi se osigurao provjes u dozvoljenim granicama potrebno je poznavati karakteristike materijala od kojega je napravljen, odnosno njihova mehanička svojstva. Uz pomoć svega navedenog izrađuje se mehanički proračun vodiča, a u knjigama profesora Lajos Jozse [5] i [7] opisan je postupak proračuna vodiča te također u daljnjem radu u poglavlju četiri pod nazivom: „Osnovne teoretske postavke proračuna provjesa i mehaničkog naprezanja vodiča nadzemnih vodova“.

Kako bi se osigurao što ekonomičniji, kvalitetniji, ali i sigurniji prijenos električne energije razvijaju se nove suvremene vrste vodiča kao što je ACCC vodič. Tvrtka CTC Global [2] proizvođač je ACCC vodiča. Ova vrsta vodiča se sa svojim karakteristikama pokazala kao dobro rješenje za prijenos električne energije. Tvrtka je razvila i program kojemu je glavna značajka uspoređivanje postojećeg vodiča korištenog za prijenos električne energije nadzemnim dalekovodom s odgovarajućim ACCC vodičem. Usporednom analizom dvaju vodiča dobiva se izvještaj s različitim podacima kao što je promjena provjesa prilikom različitih temperatura, ušteda na gubicima, smanjivanje emisije stakleničkih plinova i slično. U poglavlju pet pod nazivom : „Usporedna analiza dalekovoda uz pomoć CCP programa“ prikazana je analiza primjene ACCC vodiča umjesto već postojeći Al/Č vodiča.

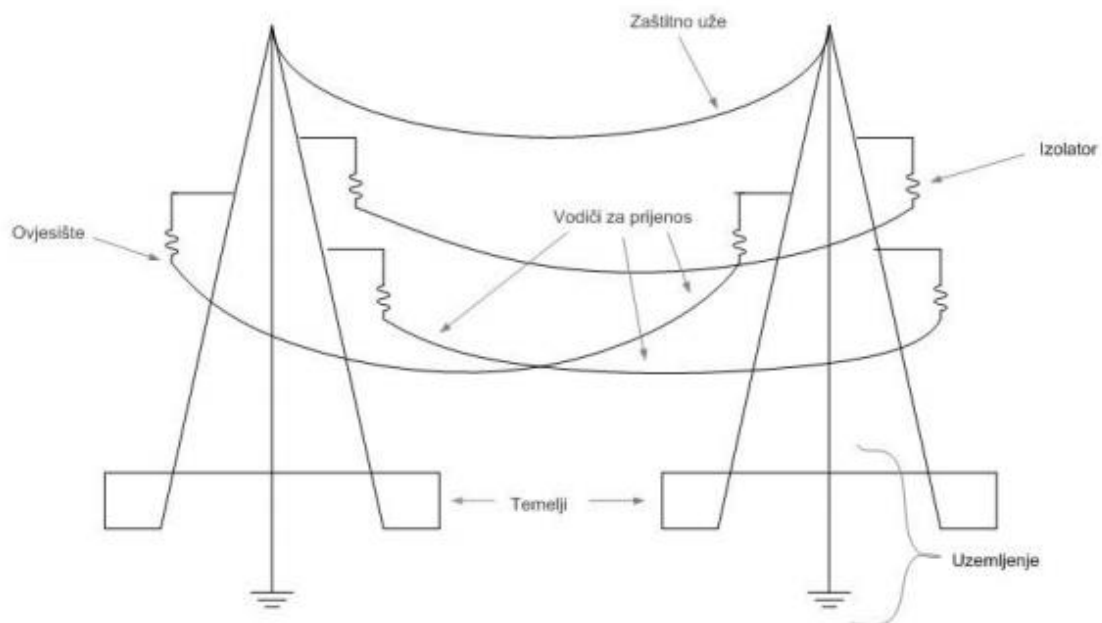
3. NADZEMNI ELEKTROENERGETSKI VODOVI

3.1. Vod i njegovi elementi

Nadzemni elektroenergetski vodovi služe za prijenos električne energije, a često se dijele po broju strujnih krugova na vodu ili prema nazivnom naponu voda.

Dijelovi nadzemnog voda su:

- temelji
- stupovi
- izolatori
- vodiči
- spojni, ovjesni i zaštitni pribor
- zaštitno uže i uzemljenje.



Slika 3.1. Dijelovi nadzemnog voda [1]

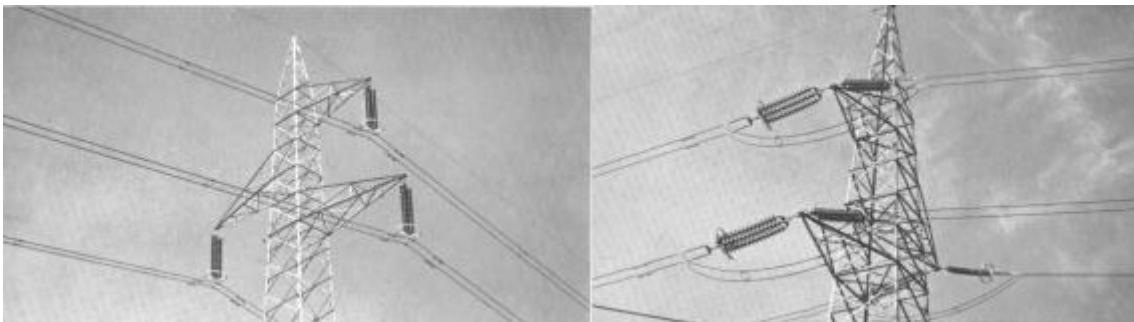
3.1.1. Stupovi i temelji

Osnovni dio nadzemnog voda je stup. On nosi vodiče i pripadajuću opremu, a njegov osnovni zadatak je da osigura dovoljnu visinu dalekovoda iznad zemlje. Na gornji dio stupa, koji se naziva glava, pričvršćuju se poprečni elementi, odnosno ovjesišta na kojima su izolatori i vodiči.

Prema funkciji stupovi se dijele na:

- nosive
- zatezne
- rasteretne
- krajnje
- preponske
- međustupove
- križišne
- prepletne.

Glavne dvije vrste stupova su nosivi i zatezni stupovi. Uloga zateznih stupova je da osiguraju dovoljnu napetost u vodičima, nosivi stupovi osiguravaju dovoljnu visinu vodiča iznad zemlje. U trasi dalekovoda uglavnom nakon nekoliko (3-4) nosiva slijedi jedan zatezni stup.

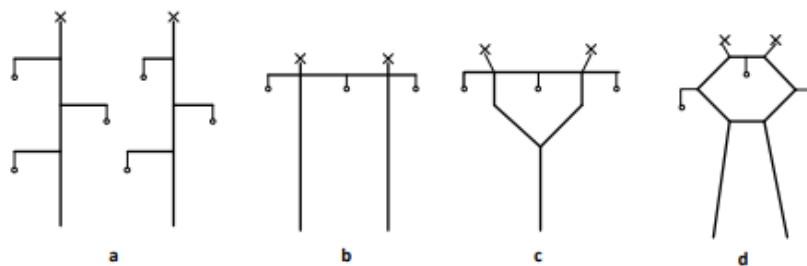


Slika 3.2. Glava nosivog stupa (lijevo) i glava zateznog stupa (desno)[2]

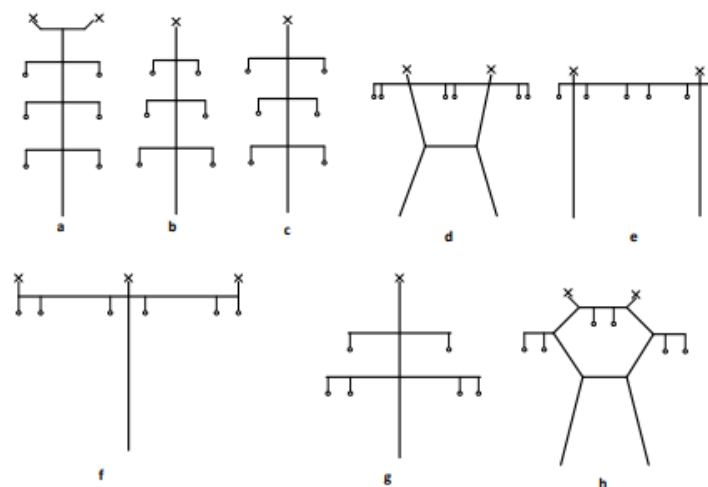
Stup koji mora izdržati prekid svih vodiča na jednoj strani stupa naziva se rasteretni stup. Na kraju voda nalazi se krajnji stup i on je uglavnom rasteretni. Zbog promjene dozvoljenog naprežanja ili zbog promjene presjeka montiraju se preponski stupovi jer oni nisu jednako napregnuti s obje strane. Nosivi stup umetnut u preponsko otponsko polje je međustup čija je uloga da osigura potrebnu visinu vodiča. Kod križanja dva voda upotrebljava se križni stup, a preplitanje faza zbog postizanja simetrije vrši se na prepletanom stupu.

Stupovi se još dijele i prema položaju na linijske i kutne. Na mjestu loma vertikalne projekcije voda nalaze se kutni, a u ravnom djelu se nalaze linijski stupovi.

O vrsti stupa, broju vodiča i broju zaštitne užadi ovisi izgleda glave stupa. Na slici 3.3. i 3.4. prikazani su najčešći izgledi glave stupa, gdje je s kružićem označeno mjesto faznog vodiča, a križićem zaštitnog užeta.



Slika 3.3. Izgled glave stupa kod jednostrukih prijenosnih vodova: a) jela b) portal c) Y-stup d) mačka [1]



Slika 3.4. Izgled glave stupa kod dvostrukih prijenosnih vodova: a) i b) dvostruka jela c) bačva d) Y-stup e) i f) portal g) Dunav h) mačka [1]

3.1.2. Vodiči

Najvažniji i jedini aktivni dio nadzemnog voda su vodiči. Električna energija se prenosi vodičima, a uslijed prolaska električne struje vodiči se zagrijavaju što znači da su termički opterećeni. Na izbor vodiča utječu mnogobrojni zahtjevi, a neki od njih su:

- dobra električna vodljivost,
- dobra mogućnost obrade,
- velika mehanička čvrstoća,
- otpornost protiv korozije, starenja i oštećenja,
- niska cijena.

Nijedan materija ne može zadovoljiti sve kriterije jer su zahtjevi mnogobrojni pa se zbog toga često osim vodiča izrađenih od samo jednog materijala (homogeni vodiči) upotrebljavaju i vodiči izrađeni od više različitih materijala (heterogeni vodiči).

Vodiči mogu biti u obliku žice i u obliku užeta. Vodiči u obliku užeta se dobivaju pletenjem više žica (sukani vodiči) i to je standardni oblik za vodiče električnih vodova.



Slika 3.5. Vodič u obliku užeta [1]

Prednost vodiča u obliku užeta je što se pletenjem žica povećava prekidna čvrstoća vodiča jer je duljina pojedinih žica duža 2-3% od duljine cijelog užeta. Osim već navedene prednosti, najveća prednost užeta je njegova gibljivost koja je vrlo bitna prilikom montiranja i u nepogodnim vremenskim okolnostima.

Najčešći materijal koji se koristi za izradu vodiča je aluminij. Aluminij je materijal koji ima jako dobru električnu vodljivost, jako je lagan, ali je sklon mehaničkim oštećenjima te je

također sklon pucanju i rastezanju. Zbog navedenih svojstava aluminija, on se koristi u kombinaciji sa čelikom. Čelik, iako ima loša električna, ima dobra mehanička svojstva. Ova vrsta vodiča naziva se alučel vodič (Al/Č). Ovaj vodič ima jezgru od čeličnih žica i plašt sastavljen od aluminijskih žica, gdje čelik osigurava mehaničku čvrstoću, a aluminij električnu vodljivost.



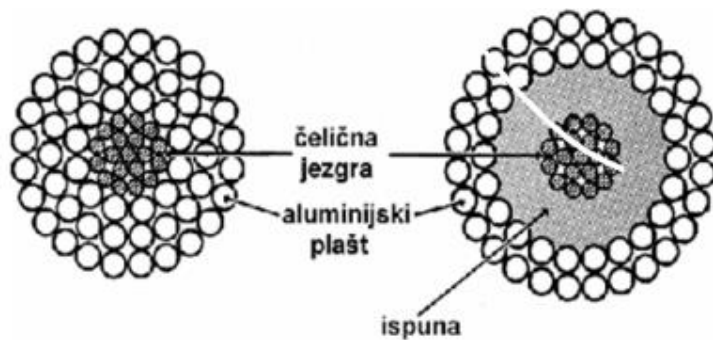
Slika 3.6. Al/Č (Alučel) vodič [1]

Da bi se smanjio negativan učinak korone, na visokim naponima vodiči trebaju imati što veći presjek pa se zbog toga upotrebljavaju šuplji vodiči (ušteta materijala) jer struja svakako zbog skin efekta teče površinom, odnosno rubom vodiča. Zbog mehaničke čvrstoće i efekta korone takvi šuplji vodiči su izrađeni od metalnih traka umjesto žica.



Slika 3.7. Primjeri šupljih vodiča [1]

Osim šupljih vodiča pri visokim naponima još se koriste i ekspanzirani vodiči gdje se između vodljivog plašta i čelične jezgre stavlja ispuna od plastičnih masa ili od impregniranog papira.



Slika 3.8. Usporedba konvencionalnog i ekspaniranog vodiča[1]

3.1.3. Izolatori

Upotreba izolatora je potrebna na mjestima veze sa stupovima, a zrak je u načelu izolacija nadzemnog voda. Prenoseći mehanička naprezanja i težinu vodiča na stupove izolatori drže vodič u određenom položaju. Materijali od kojih se izrađuju izolatori su porculan, staklo, steatit i umjetne mase. Zahtjevi za izolatore su:

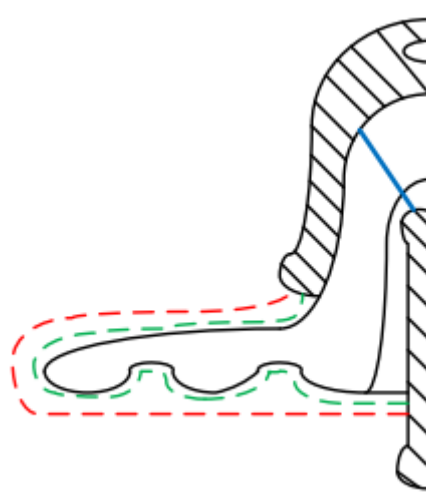
- električna čvrstoća na proboj
- električna čvrstoća na presjek
- mehanička čvrstoća
- otpornost na promjenu temperature
- otpornost na atmosferske utjecaje
- ekonomičnost i lako održavanje
- trajnost.

Izolatori se prema načinu na koji nose vodič dijele na ovjesne i potporne izolatore. Ovjesni izolatori još mogu biti i štapni ili lančani (masivni ili kapasti).



Slika 3.9. Potporni izolator (lijevo) i ovjesni izolator (desno)[1]

Na slici 3.10. prikazan je članak kapastog izolatora koji je sačinjen od dva metalna dijela između kojih je izolatorska masa. Na slici su tri bojava označene preskočna staza, strujna (klizna) staza i probojna staza. Najkraća udaljenost zrakom između dva metalna materijala izolatora naziva se preskočna staza (crvena boja). Najkraća udaljenost između dva metalna dijela površinom vodiča (zeleno boja) naziva se strujna (klizna) staza, a još se naziva i staza puzajućih struja. Najkraća udaljenost metalnih dijelova izolatora kroz tijelo izolatora (plava boja) je probojna staza.



Slika 3.10. Dimenzioniranje izolatora: preskočna staza (crveno), strujna (klizna) staza (zeleno), probojna staza (plavo) [1]

3.1.4. Pribor

Na nadzemnim vodovima, osim već navedenih dijelova, nalazi se još i puno manjih dijelova koji služe za njihovo povezivanje. Pribor nadzemnog dalekovoda se dijeli na ovjesni, zaštitni te spojni pribor. Izolatore i vodič mehanički sa stupom povezuje ovjesni pribor. Zaštitne funkcije kao na primjer otklanjanje električnog luka od izolatora i vodiča, promjena izgleda električnog polja (homogenizacija), zaštita od vibracije i slično, obavlja zaštitni pribor. Funkciju omogućavanja prolaska struje ima spojni pribor.

Spojni pribor je:

- zarezna spojnica
- kompresijska spojnica
- vijčana spojnica
- odstožnik (razmaknik) vodiča u snopu.

U slučaju pucanja vodiča ili prilikom njihovog postavljanja koriste se spojnice koje fizički spajaju vodiče. Kod zarezne i kompresijske spojnice vodiče nije moguće razdvojiti i vodiči ostaju trajno povezani, dok je u slučaju vijčane spojnice to moguće jer se kod nje koriste vijci. Da bi se priječilo sudaranja vodiča u snopu jedne faze zbog djelovanja vjetra, koristi se odstožnici vodiča.

Vodiče i izolatore sa stupom povezuje ovjesni pribor, a ovisno da li se radi o zateznim ili nosivim stupovima, razlikuju se zatezne stezaljke i noseće stezaljke. Zatezne stezaljke mogu biti pužaste, kompresijske i vijčane. Zatezne i noseće stezaljke su jedne od najkritičnijih elemenata nadzemnog voda jer se sve mehaničke sile koje se pojave na vodičima prenose preko stezaljki do stupa.

Zaštitni pribor se sastoji od:

- zaštitnih prstenova
- zaštitnih rogova
- masnih utega
- prigušenih utega

- vizualne kugle.

Kako bi se spriječilo uništavanje tijela izolatora uslijed pojava prenapona na vodu koji uzrokuje velike struje, upotrebljavaju se zaštitni rogovi. Pojava u zraku koja pri tome nastaje zove se električni luk jer zaštitni rogovi povećavaju vjerojatnost proboja kroz zrak. Zaštitni prstenovi se upotrebljavaju za sprječavanje starenja i proboja izolatorskih članaka koji su bliže vodiču. Uslijed djelovanja vjetra dolazi do njihanja voda, da bi se ta pojava smanjila koriste se prigušni utezi.

3.1.5. Zaštitno uže i uzemljenje

Na vrhu stupa nalazi se zaštitno (dozemno, gromobransko) uže, ono je uzemljeno i njegova glavna funkcija je da štiti vod od udara groma. Jedna od uloga zaštitnog užeta je i osiguravanje niske nulte impedancije voda za dobar rad zaštite kod jednofaznih kvarova. Zaštitno uže izrađeno je od čelika, a ponekad i od alučel.

Da bi se osigurao nesmetani rad dalekovoda, ali i sigurnost ljudi, uzemljeni moraju biti svi metalni dijelovi stupova koji u normalnom pogonu nisu pod naponom. Najčešće se na dalekovodnim stupovima koriste trakasti uzemljivači. Da bi se osigurala dobra galvanska veza, na čeličnim stupovima potrebno je dobro povezati zaštitno uže sa stupom, a kod betonskih stupova metalna traka povezuje uzemljivač sa zaštitnim užetom.

3.2. Povijest vodiča

Zbog svoje odlične vodljivosti, prije prvog svjetskog rata koristio se bakar. Bakar je zamijenjen aluminijem zbog ratnih događanja te zbog potražnje bakra. Kako bi se poboljšala električna svojstva aluminija, vremenom su se uvele različite legure aluminija. Zbog dobre mehaničke čvrstoće, počeo se upotrebljavati čelik, ali je izbačen iz svakodnevne upotrebe zbog male vodljivosti. Tijekom drugog svjetskog rata ponovno je u upotrebu vraćen bakar zbog usmjerene proizvodnje aluminija za proizvodnju dalekovoda.

Povećavanjem broja stanovnika te razvojem industrije javio se problem nedovoljno velikih kapaciteta, tj. postojeći nadzemni vodovi nisu mogli prenositi potrebnu snagu električne

energije pa je zbog toga bilo potrebno povećati kapacitet električne mreže. Problem je riješila upotreba novih materijala pri proizvodnji vodiča. Bolju popunjenost aluminijske jezgre u promjeru vodiča omogućava trapezasto lijevani vodiči aluminijski. S takvim načinom lijevanja ponudila se potrebna strujna opterećenost i smanjilo mehaničko opterećenje jezgre. Povećanje kapaciteta prijenosa dovela je pojava ACSS vodiča, ali se njihova upotreba smanjila zbog loših toplinskih svojstava.

U današnje vrijeme dostupan je veliki broj veličina i vrsta vodiča, ali je misao oko električnih i mehaničkih svojstava vodiča ostala ista. Danas se koriste aluminijski vodiči (AAAC, ACAR i AAC) i ACSR (Al/Č).

3.3. Općenito o ACCC vodičima

Plast ACCC (aluminijski vodič kompozitne jezgre) vodiča napravljen je sukanjem trapezasto lijevanih aluminijskih vodiča i ima kompozitnu jezgru od staklenih i ugljičnih vlakana. Prednost visoko temperaturnih ACCC vodiča u odnosu na standardne aluminijske ili vodiče sa čeličnom jezgrom je ta što se pod jednakim opterećenjem gubici voda reduciraju za 25-40%, a maksimalna prijenosna snaga se udvostručava. Zbog malih toplinskih gubitaka i visoke vlačne čvrstoće omogućen je dulji životni vijek vodiča. Primjenom ACCC vodiča smanjuju se inicijalna kapitalna ulaganja u projektu.

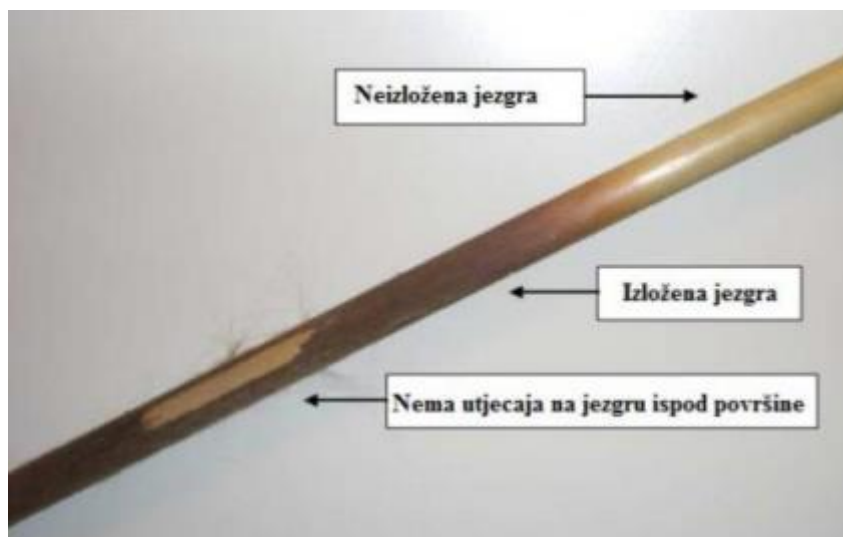
2005. godine predstavljen je ACCC vodič te je danas dostupan u svim veličinama potrebnim za prijenos električne energije. Zbog visokog prijenosnog kapaciteta i malog koeficijenta toplinskog širenja (što uslijed promjene temperature smanjuje provjes) ACCC vodič postigao je svoj postavljeni cilj. U odnosu na čelik, kompozitna jezgra je smanjila težinu vodiča, a zbog kompaktnih niti u obliku trapeza pojedini vodiči mogu sadržavati 28% više aluminijske jezgre. Kada se uspoređuje bilo koji komercijalni vodič s ACCC vodičem jednakog promjera i približno jednake težine, dodatni sadržaj aluminijske jezgre poboljšava učinkovitost i vodljivost. U odnosu na radnu temperaturu, ACCC vodič postiže najveće dozvoljeno strujno opterećenje.



Slika 3.11. Prikaz vodiča: lijevo je ACSR, a desno ACCC vodič [2]

Moguće je proizvesti vodiče vrlo dugih raspona upravo zbog velikog broja različitih veličina i specijaliziranog dizajna vodiča pa se na različite načine mogu mijenjati modul elastičnosti, mehanička čvrstoća i slične karakteristike vodiča. Po potrebi kupaca diljem svijeta, CTC Global je razvio različite veličine vodiča pa sada u ponudi ima 60-ak različitih veličina ACCC vodiča, a u suradnji s kompanijom moguće je sudjelovati u proizvodnji nove vrste vodiča koja će zadovoljiti potrebne zahtjeve. Zbog različitih klimatskih i reljefnih karakteristika, usmjerena je velika pozornost na geografske regije pa se uz standardne ACCC vodiče mogu pronaći i vodiči u rasponu od 150 do 1400 mm² te posebni vodiči namijenjeni za trase s dugim rasponima i dodatnim zimskim opterećenjem. Kod ACCC vodova jezgra je elastičnija od čelika pa uz uvjete opterećenja koja nastaju zimi njihova elastičnost dopušta povećani provjes vodiča.

ACCC vodič, kao i svaki vodič, ima toplinska ograničenja. Toplinske granice ACCC vodiča temelje se na toplinskim granicama kompozitne jezgre jer kaljeni aluminij koji se koristi za izradu ovih vodiča ima termičku granicu iznad 250°C.



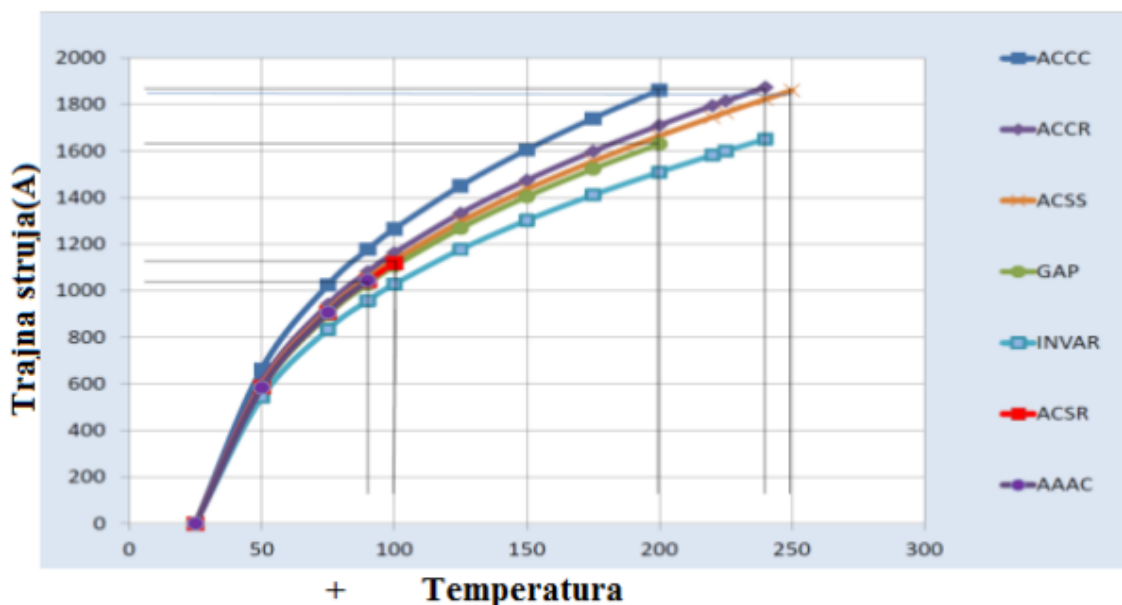
Slika 3.12. Jezgra ACCC vodiča godinu dana nakon izlaganja na 220°C [2]

Maksimalna kontinuirana radna temperatura ustanovljena nakon mnogih istraživanja za ACCC vodič je 180°C jer se na toj temperaturi može vidjeti minimalna količina površinske oksidacije nakon dužeg vremenskog razdoblja. Daljnja oksidacija se usporava upravo zbog oksidacijske reakcije koja stvori sloj debljine sto mikrona.

Kod izgradnje novih trasa dalekovoda, korištenjem ACCC vodiča može se graditi s manjim brojem stupova u donjem profilu provjesa, a kod rekonstrukcije već postojećih modifikacije su minimalne. Upravo zbog toga ekonomski izdaci se smanjuju uvođenjem ACCC vodiča.

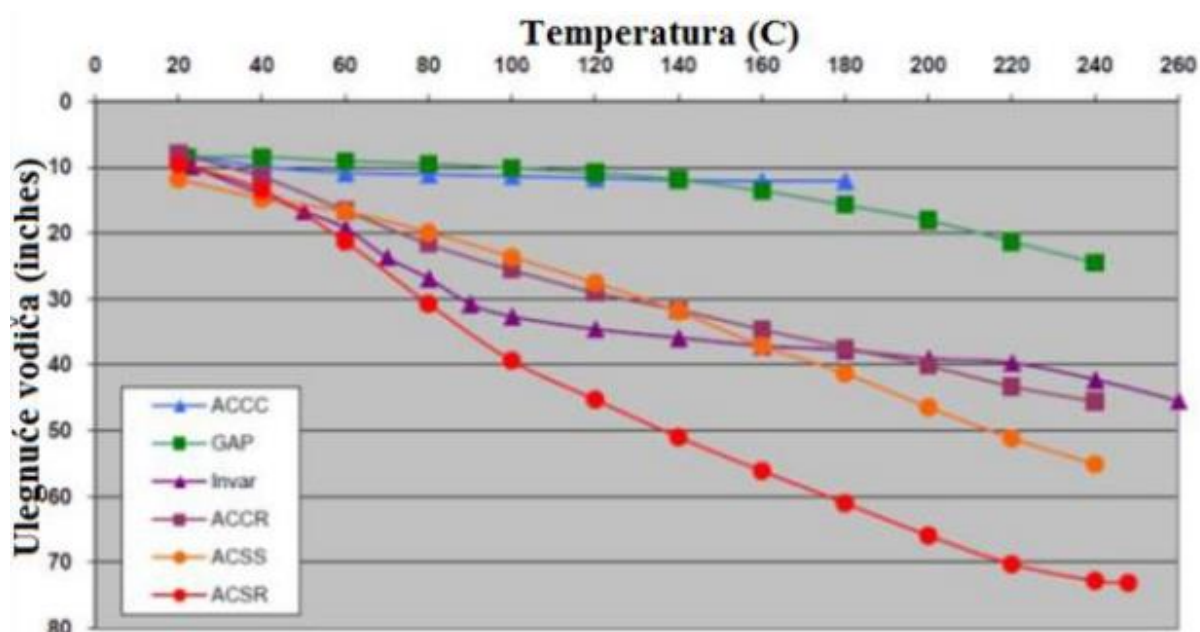
3.4. Prednosti ACCC vodiča u odnosu na druge vodiče

Značajno povećanje vodljivosti ACCC vodiča u odnosu na okrugli ACSR (Al/Č) je što je u svakom presjeku ACCC vodiča oko 28% više aluminija u konfiguraciji trapeza. Bolja mehanička svojstva vodiča i skoro uklanjanje visokog temperaturnog koeficijenta je zbog jezgre ugljika. U odnosu na konvencionalne aluminijske ili čelikom ojačane vodiče, ACCC vodič je razvijen da prenese dvostruko veće vrijednosti struje.



Slika 3.13. Maksimalna pogonska struja vodiča u ovisnosti o temperaturi [2]

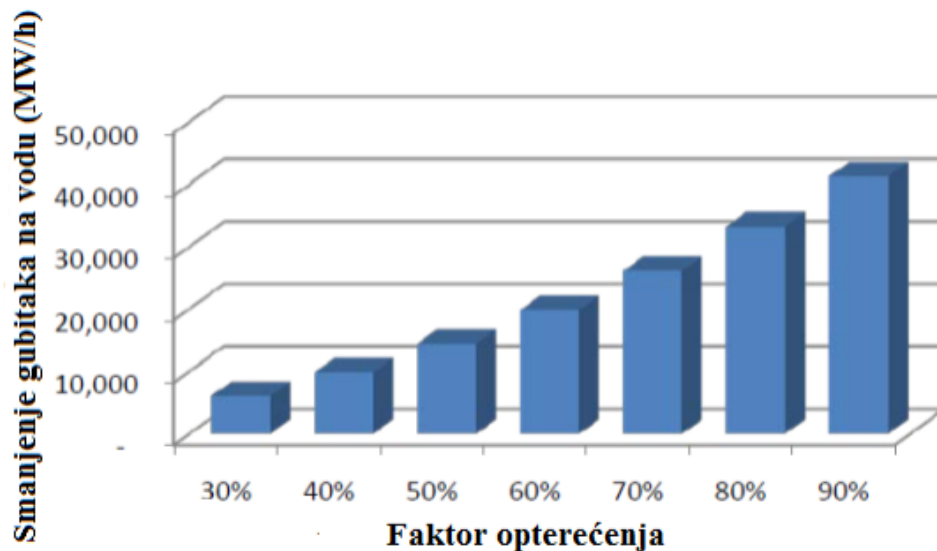
ACCC vodiči mogu raditi na većoj temperaturi od tipičnog ACSR, AAC ili ACSS vodiča zbog koeficijenta toplinskog širenja koji je oko devet puta veći pa zbog toga mogu i prenositi veće struje od klasičnih vodiča. Pod uvjetima visokog opterećenje to značajno poboljšava vođenje struje i skoro eliminira toplinske gubitke. Zbog toga su ACCC vodiči dobar izbor za već postojeće prijenosne dalekovode kada dolazi do povećanja opterećenja, a nije potrebno ojačati postojeće strukture.



Slika 3.14. Usporedba provjesa i temperature vodiča [2]

Zbog bolje vodljivosti, a ujedno i smanjenja gubitaka na vodovima na određenoj temperaturi, koristi se više aluminija u vodičima. Zbog toga se, uz smanjen trošak proizvodnje, isporučuje više snage, a emisija CO₂ može se smanjiti s boljom učinkovitošću vodiča.

Na listi prioriteta učinkovitost vodiča pri proizvodnji i prodaji se ne nalazi pri vrhu jer se uglavnom na proračunima opterećenja temelji izbor vodiča.



Slika 3.15. Smanjenje gubitaka na dalekovodu [2]

Na slici 3.15. prikazano je smanjenje gubitaka na dalekovodu napravljenom od ACCC vodiča u odnosu na Al/Č vodič i prikazani su kao funkcija faktora opterećenja na vodu koji ima duljinu 32 kilometara.

Smanjeno djelovanje na stupove dalekovoda je omogućeno zbog manjeg naprezanja vodiča zbog smanjenog toplinskog koeficijenta i toplinske stabilnosti ACCC vodiča. U odnosu na druge vodiče koji se koriste pri prijenosu električne energije, ACCC vodiči imaju manju težinu po metru.

Kod mrežnih operatera je najvažnija pouzdanost jer se zbog propada linije mogu ugroziti ljudski životi i može doći do velikih ekonomskih gubitaka. ACCC vodič nudi pouzdanost i novu razinu poboljšanih karakteristika koja prije nije bila dostupna. Zbog kompozitne jezgre učinkovitost ACCC vodiča je na visokoj razini. Jezgra od ugljičnih vlakana kod ACCC vodiča je pogodna za velika i dugotrajna opterećenja, otporna je na koroziju i različite klimatske uvjete pa je zbog toga pogodna za upotrebu u zahtjevnim situacijama.

4. OSNOVNE TEORETSKE POSTAVKE PRORAČUNA PROVJESA I MEHANIČKOG NAPREZANJA VODIČA NADZEMNIH VODOVA

4.1. Pravilno dimenzioniranje vodiča

Kod dimenzioniranja vodiča bitno je u obzir uzeti električki i mehanički pogleda, ali se u obzir uzima i ekonomska perspektiva vodiča koji se razmatra.

Dimenzioniranje vodiča u električnom obliku izvodi se s obzirom na njihov napon i struju koja teče u njima. Zbog ekonomičnosti Joule-ovi gubici moraju ostati u dozvoljenim granicama, a temperatura vodiča se mora zadržati unutar dozvoljenih granica. Da ne bi došlo do gubitaka uzrokovanih koronom, električna čvrstoća zraka mora ostati veća od jakosti električnog polja oko vodiča. Kod odabranog vodiča ne smije doći do većeg pada napona od dozvoljene vrijednosti, a te vrijednosti su ograničene raspoloživim opsegom regulacije i promjenom napona kod potrošača. Prilikom proračuna vodiča također treba paziti i na nastanak velikog faznog pomaka napona na početku voda naspram napona na kraju voda zbog narušavanja stabilnog prijenosa.

U mehaničkom pogledu dimenzioniranja vodiča usklađuje se provjes te mehaničko naprezanje vodiča, a naprezanje i provjes vodiča ne smiju preći dozvoljene granice određene pri ekstremnim klimatskim uvjetima.

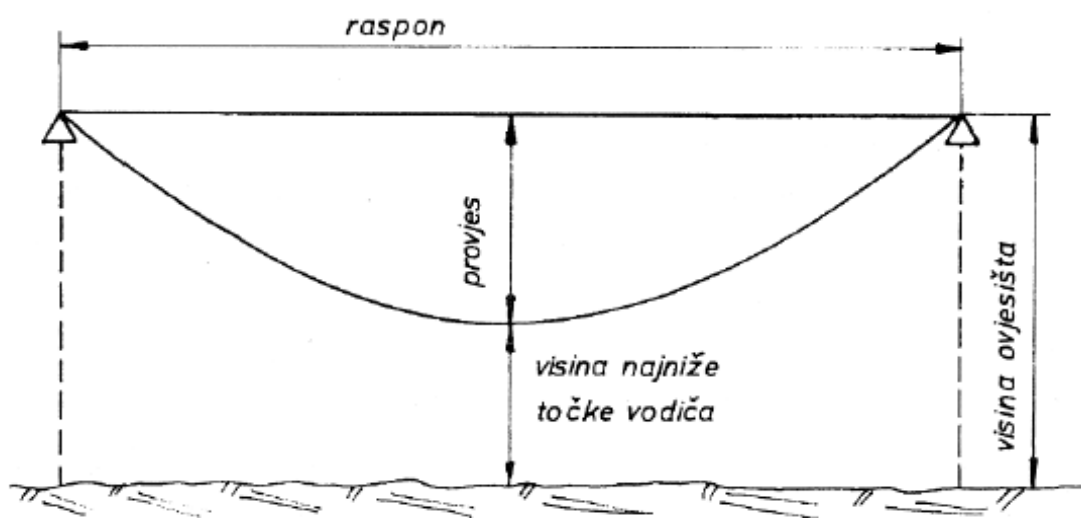
Izabrani vodiči moraju zadovoljiti i u ekonomskom pogledu, tj. ukupni godišnji troškovi prijenosa (troškovi kapitala, održavanja i gubitaka) moraju biti minimalni. Iz toga slijedi ekonomska gustoća od oko $1,8 \text{ A/mm}^2$ za bakrene i $1,0 \text{ A/mm}^2$ za aluminijske vodiče. [3]

4.2. Mehanički proračun vodiča

Osnovna svrha mehaničkog proračuna vodiča je određivanje mehaničkog naprezanja i provjesa vodiča u ovisnosti od atmosferskih i drugih radnih prilika. Pri tome točno određeno mehaničko naprezanje i provjes, u ekstremnim klimatskim uvjetima, ne smiju preći

dozvoljenu granicu. Mehaničko naprezanje i provjes su važni zbog razmaka između vodiča, za određivanje visine stupova i projektiranja zateznih i nosećih supova.

Kod nadzemnih vodova vodiči su uz pomoć izolatora spojeni na stupove i zategnuti. Te točke na stupovima kod kojih se vodiči učvršćuju nazivaju se ovjesištima, a raspon je horizontalni razmak između njih. Zbog različitih vremenskih prilika (skupljanje snijega, zaleđivanja ili djelovanja vjetra) vodič ne nosi samo svoju težinu. Zbog toga je ukupna težina vodiča zbroj vlastite težine i dodatnog tereta. Zbog svoje težine vodič ne može biti spojnica između ovjesišta, nego se provjesi u obliku lančanice, koja se može aproksimirati i parabolom.



Slika 4.1. Vodiča između dva ovjesišta [4]

Provjes bi trebao biti što manji da bi visina vodiča iznad tla bila dovoljna, a to se postiže jačim zatezanjem vodiča. Jačim zatezanjem vodiča povećava se i mehaničko naprezanje, a s tim i mogućnost pucanja vodiča. Mehanički proračun vodiča upravo i služi usklađivanju naprezanja i provjesa vodiča.

Pri mehaničkom proračunu vodiča uzimaju se u obzir različiti klimatski uvjeti, osim dodatne težine uzrokovane ledom, vjetrom ili snijegom, u obzir se uzima i temperatura koja utječe na rastezanje i stezanje vodiča što utječe na veličinu provjesa i mehaničko naprezanje vodiča. Pri mehaničkom proračunu vodiča uzima se temperaturni opseg između -20°C i $+40^{\circ}\text{C}$. U ovisnosti o kojoj zemlji se radi, uzimaju se druge temperaturne vrijednosti.

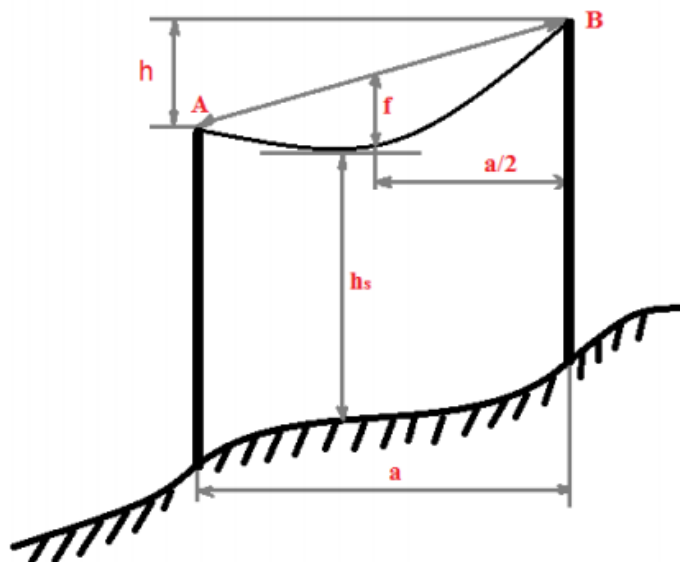
Kod mehaničkog proračuna uzima se nekoliko pretpostavki, a to su:

1. Duljina raspona i točke ovjesišta su točno definirane;
2. Vodič je homogen;
3. Potpuno gibak vodič;
4. Dodatno opterećenje na cijelom vodu je jednolično;
5. Težina samog voda s dodatnim teretom usmjerena je vertikalno prema dolje, a smjer vjetra, odnosno sila je okomita na smjer težine voda.

Postoje tri vrste točnosti mehaničkog proračuna:

1. Vrlo točni proračun gdje krivulju provjesa aproksimiramo elastičnom lančanicom;
2. Točni proračun gdje je krivulja provjesa aproksimirana lančanicom;
3. Približni proračun gdje je krivulja provjesa aproksimirana parabolom.

Na slici 4.2. predstavljen je vodič u rasponu gdje su obilježeni različiti parametri potrebni za mehanički proračun vodiča.



Slika 4.2. Raspon vodiča (Izvor: www.oldriteh.com; Preuzeto: svibanj, 2020. god.)

Gdje je:

a (m) – raspon

A i B – točke ovjesišta

f (m) – provjes

h (m) – visinska razlika

h_s (m) – sigurnosna visina

Raspon (a) predstavlja horizontalni razmak između ovjesišta, odnosno dva stupa. Postoji još i kosi razmak koji predstavlja najkraći razmak između ovjesišta kod kojih postoji denivelacija (h). Denivelacija je razlika visina dva susjedna stupa koji su postavljeni na neravnom terenu. Mjesta na stupovima gdje su vodiči učvršćeni nazivaju se točke ovjesišta A i B . Provjes (f) možemo definirati kao najveću vertikalnu udaljenost vodiča od sredine dužine do spojnice između ovjesišta. Najmanja dozvoljena visina između vodiča pod naponom koji je najniži i zemlje pri najvećem provjesu predstavlja sigurnosnu visinu (h_s).

Kod mehaničkog proračuna vodiča bitan čimbenik je temperatura vodiča (v) i zaštitne užadi. Postoje tri bitne temperature za mehanički proračun:

1. Minimalna temperatura za koju je vodič građen, a iznosi $v = -20^{\circ}\text{C}$. Ova temperatura je važna zbog mehaničkog naprezanja vodiča.
2. Temperatura kod koje na vodiču nastaje dodatni teret (inje, led, snijeg). Temperatura zaleđivanja iznosi $v = -5^{\circ}\text{C}$ i bitna je zbog mehaničkog dimenzioniranja vodiča te zbog sigurnosne visine.
3. Maksimalna temperatura okoline koja je $v = +40^{\circ}\text{C}$, a bitna je zbog širenja materijala zbog povećanja temperature. Širenjem materijala povećava se i provjes vodiča te je zbog toga ova temperatura važna za određivanje sigurne visine.

4.2.1. Mehanička čvrstoća vodiča

Kod računanja mehaničkog proračuna vodiča bitan čimbenik predstavlja mehanička čvrstoća vodiča koja se računa prema relaciji:

$$G_0 = m_1 \cdot g \left[\frac{N}{m} \right] \quad (4-1)$$

gdje je:

m_1 - jedinična masa vodiča (kg/m);

g – gravitacija, $g = 9,81$ (m/s).

U proračunima se često koriste reducirane vrijednosti. Reducirana vrijednost vlastite težine vodiča računa se prema relaciji:

$$g_0 = \frac{G_0}{A} \left[\frac{N}{mm^2m} \right] \quad (4-2)$$

gdje A (mm^2) predstavlja stvarni presjek vodiča.

Zatezno naprezanje σ (daN/mm^2) je svedena zatezna sila F na prvobitni presjek A :

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (4-3)$$

Svedeno na prvobitnu dužinu vodiča l , rastezanje λ je u postocima izraženo produženje vodiča Δl :

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

Postoji trajno rastezanje λ_t koje ostaje i nakon djelovanja opterećenja, i elastično rastezanje λ_e koje nestaje nakon prestanka djelovanja opterećenja. Rastezanje λ je zbroj trajnog i elastičnog rastezanja ($\lambda_t + \lambda_e$) koje se prilikom opterećivanja može izmjeriti.

Kada je trajno opterećenje jednako nuli ($\lambda_t = 0$), odnosno kada ga nema, omjer naprezanja i rastezanja je modul elastičnosti E (daN/mm^2):

$$E = \frac{\sigma}{A} \quad (4-5)$$

Kod ispitivanja kidanja prednapregnutog užeta možemo definirati sljedeće pojmove, a to su:

1. Prekidna čvrstoća σ_p (daN/mm²) predstavlja najveće naprezanje kod provođenja ispitivanja. Ovo naprezanje uža mora izdržati jednu minutu da bi zadovoljilo kriterije.
2. Trajno naprezanje σ_t je ono naprezanje čija vrijednost ne smije biti prekoračena u iznimnim prilikama, odnosno kod temperature -5°C kada se na vlastitu težinu vodiča dodaje i dodatna.
3. Dozvoljeno naprezanje σ_d se odnosi na onu vrijednost čvrstoće s obzirom na materijal vodiča, odnosno ona vrijednost koju uža može podnijeti u neograničenom trajanju, a da ne dođe do promjene oblika.

4.2.2. Sile koje djeluju na vodiče dalekovoda

Sile koje djeluju na vodiče dalekovoda mogu djelovati u vertikalnoj i horizontalnoj ravnini.

a) Vertikalne sile

Vlastita težina vodiča G (daN) svedena je na vodič dužine 1 m i presjeka 1 mm² i vrijedi izraz da je:

$$G = g \cdot l = \gamma \cdot A \cdot l \quad (4-6)$$

gdje je:

g – težina vodiča po jedinici dužine (daN/m);

l – dužina vodiča (m);

A – stvarni presjek vodiča (mm²);

γ – specifična težina vodiča (daN/mm²).

Reducirana vlastita težina vodiča dobije se kada se specifična težina γ (daN/mm²) izrazi iz jednadžbe (4-6):

$$\gamma = \frac{g}{A} \quad (4-7)$$

Dodatno opterećenje vodiča još je jedan bitan čimbenik koji utječe na mehanički proračun vodiča. Utjecaj težine leda,inja ili snijega na vodič, koja djeluje okomito prema dolje na vodič i dodaje se vlastitoj težini vodiča, smatra se dodatnim opterećenjem vodiča.

Postoje dvije vrste dodatnog opterećenja:

1. Normalno dodatno opterećenje koje se javlja jednom u 5 godina. To je najveće dozvoljeno opterećenje dodatnog tereta i ne smije iznositi manje od:

$$\Delta g = 0,18\sqrt{d} \left[\frac{daN}{m} \right] \quad (4-8)$$

gdje d u mm predstavlja promjer vodiča.

Reducirana težina dodatnog tereta $\Delta\gamma$ (daN/m,mm²) dobije se svođenjem na stvarni presjek vodiča A :

$$\Delta\gamma = \frac{\Delta g}{A} \quad (4-9)$$

Kod mehaničkog proračuna za uže koje je opterećeno dodatnim teretom smatra se da mu se specifična težina povećala, odnosno na vlastitu težinu dodaje se i dodatni teret. Izraz za specifičnu težinu s dodanim zimskim teretom γ_x (daN/m,mm²) glasi:

$$\gamma_x = \gamma + \Delta\gamma = \gamma + \frac{\Delta g}{A} \quad (4-10)$$

2. Iznimni dodatni teret je najveći dodatni teret koji se na mjestu izgradnje javlja u prosjeku svakih 20 godina.

b) Horizontalne sile

Vjetar je opterećenje zbog kojega nastaju horizontalne sile na dalekovodu. Kako je vjetar promjenjiv i pojavljuje se povremeno, u proračunima se uzima sila koja je ravnomjerno raspoređena i horizontalnog je usmjerenja. Veličina sile vjetra određena je oblikom i veličinom površine vodiča ili drugog dijela dalekovoda, smjerom vjetra u odnosu na tu površinu i brzinom vjetra.

Izraz za silu vjetra F_v (daN) koja djeluje na ravnu površinu okomitu na smjer vjetra glasi:

$$F_v = c \cdot p \cdot A \quad (4-11)$$

Sila vjetra svedena na jedinicu dužine vodiča (uz $A = d \cdot l$) glasi:

$$f_v = c \cdot p \cdot d \cdot 10^{-3} \quad (4-12)$$

gdje je:

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

c – koeficijent aerodinamičnog djelovanja vjetra;

p – specifični pritisak vjetra (daN/m²);

A – nezaleđena površina napadnuta vjetrom (m²);

d – promjer vodiča (mm).

Koeficijent aerodinamičnog djelovanja vjetra uzima u obzir tlačno i usisno djelovanje vjetra, oblik predmeta koji je izložen vjetru i djelovanje vjetra na stražnju stranu rešetkastih konstrukcija.

Specifični pritisak vjetra p (daN/m²) dobije se iz formule u kojoj se može uočiti kvadratna ovisnost o brzini vjetra:

$$p = \frac{v^2}{16} \quad (4-13)$$

gdje je v (m/s) najveća brzina vjetra, koja se na određenom dijelu voda pojavljuje u prosjeku svakih pet godina, a u dužem razdoblju za dalekovode 400 kV. Zbog otpora vodiča blizu tla

na manjim visinama brzina vjetra je manja, a raste prema gore. Zbog toga će i specifični pritisak rasti ovisno o visini na koju je vodič postavljen.

Provjes vodiča se zbog djelovanja vjetra otklanja iz vertikalne ravnine i zauzima položaj u smjeru rezultante F_r koju stvaraju vertikalna sila vlastite težine vodiča G i horizontalna sila vjetra F_v . Prema tome kut otklona iznosi:

$$tg\alpha = \frac{F_v}{G} = \frac{f_v}{g} \quad (4-14)$$

gdje je:

f_v – sila pritiska vjetra po jedinici džine vodiča (daN/m)

g – vlastita težina vodiča po jedinici dužine (daN/m).

Iz formule (4-14) slijedi da je otklon vodiča manje specifične težine za isti presjek vodiča veći od otklona vodiča s većom specifičnom težinom.

Opterećenje otklonjenog vodiča povećava se zbog vjetra, a zbroj vektorskih sila koje djeluju na vodič daju rezultantno opterećenje f_r :

$$f_r = \sqrt{g^2 + f_v^2} \quad (4-15)$$

Kada je kut otklona poznat, izraz se koristi u obliku:

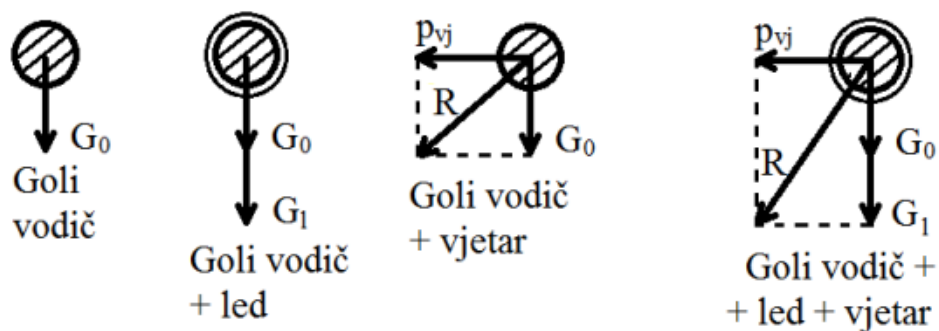
$$f_r = \sqrt{g^2 + f_v^2} = g \sqrt{1 + \frac{f_v^2}{g^2}} = g \sqrt{1 + tg^2\alpha} = \frac{g}{\cos\alpha} \quad (4-16)$$

do kojeg se dolazi iz vektorske slike.

Kada se rezultantna sila svede na 1 mm² presjeka vodiča po jedinici dužine dobije se izraz:

$$\frac{f_r}{A} = \frac{g}{A \cdot \cos\alpha} = \frac{\gamma}{\cos\alpha} \gamma_r \quad (4-17)$$

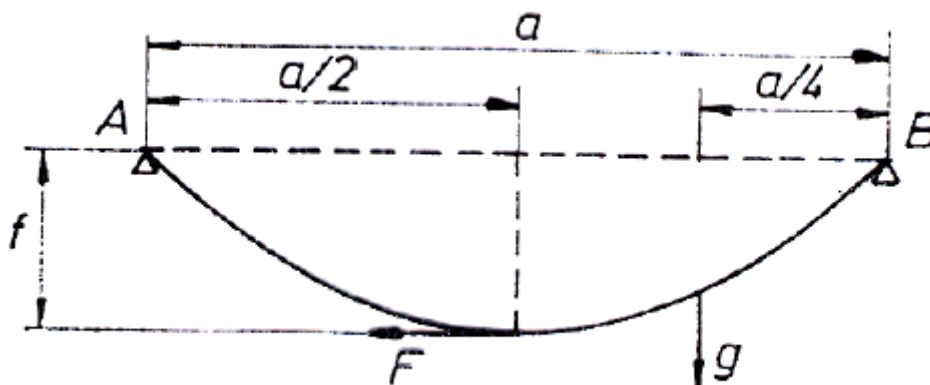
Specifična težina vodiča na kojeg djeluje vjetar povećava $\frac{1}{\cos\alpha}$ puta.



Slika 4.3. Sile na vodiču [4]

4.2.3. Proračun provjesa

Zategnut vodič između dvije točke u horizontalnoj ravnini zauzima oblik tzv. simetrične lančanice. Najniža točka tog zategnutog vodiča, odnosno simetrične lančanice, ima najnižu točku na sredini spojnice ovjesišta A-B (slika 4.4.).



Slika 4.4. Ispitivanje ravnoteže zategnutog užeta pri ovjesištima nejednakih visina [4]

Ukoliko se pretpostavi da je vodič savršeno homogen, potpuno savitljiv i da pod djelovanjem sile težine samog vodiča i težina po jedinici dužine ostaju nepromijenjeni, zategnuti vodič će poprimiti oblik lančanice.

Vodič se prilikom promjene stanja cijelom dužinom rasteže ravnomjerno bez promjene presjeka, za određene materijale temperaturni koeficijent rastezanja α i modul elastičnosti E

ostaju nepromijenjeni. Zbog toga što je lančanica krivulja koja pod djelovanjem vertikalne sile težine ima položaj s najmanjom potencijalnom energijom, zategnuti vodič zauzima upravo njezin oblik.

4.2.4. Približni proračun pomoću parabole

Kod približnog proračuna pomoću parabole uzima se u obzir da je težina užeta ravnomjerno raspodijeljena po horizontalnoj osi vodiča, odnosno razlika između dužine strune i luka se zanemaruje. U odnosu na okomicu koja prolazi najnižom točkom užeta, iz simetrije krivulje užeta na sredini užeta može se povući linija, odnosno može se presjeći pa se zateznom silom F može nadomjestiti druga polovica.

Izraz za moment koji djeluje na točku ovjesišta glasi:

$$F \cdot f = \left(g \cdot \frac{a}{2}\right) \cdot \frac{a}{4} \quad (4-18)$$

Provjes iz izraza (4-18) glasi:

$$f = \frac{a^2 \cdot g}{8 \cdot F} \quad (4-19)$$

Uzimajući u obzir $g = \gamma \cdot A$, te $F = \sigma \cdot A$ dobije se:

$$f = \frac{a^2 \cdot \gamma}{8 \cdot \sigma} \quad (4-20)$$

Izrazom (4-20) dobiva se provjes kada na vodiču nema dodatnog tereta.

Izraz za provjes f_z uz dodatni zimski teret glasi:

$$f_z = \frac{a^2 \cdot \gamma_z}{8 \cdot \sigma_z} \quad (4-21)$$

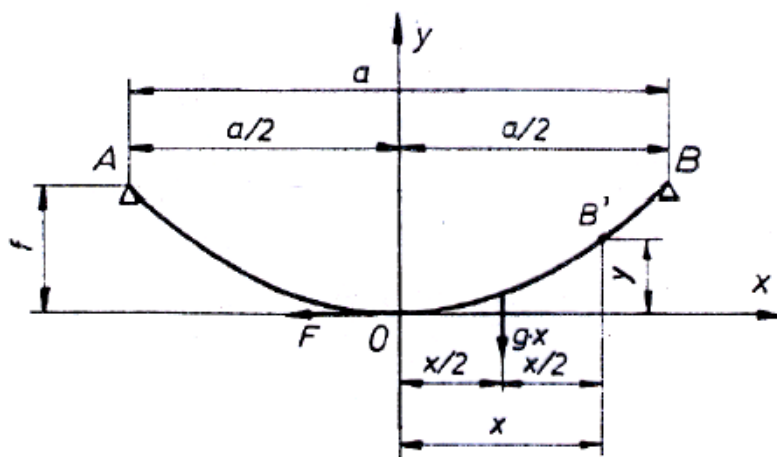
gdje je:

γ_z – specifična težina zaleđenog užeta;

σ_z – naprezanje kod -5°C uz dodatni teret.

Za određivanje provjesa u svakoj točki raspona, mora se pronaći opća jednačba krivulje vodiča.

Najniža točka krivulje vodiča uzima se za ishodište koordinatnog sustava. Uzima se pretpostavka da je užo fiksirano u točki B' i da se ne mijenja oblik krivulje vodiča. Težina vodiča čija je dužina x koncentrirana je na udaljenosti $x/2$ od ishodišta pa u odnosu na točku B' uvjet ravnoteže glasi:



Slika 4.6. Izvođenje opće jednačbe krivulje vodiča[4]

$$F \cdot y = (g \cdot x) \frac{x}{2} \quad (4-22)$$

Izražavanjem koordinate y iz prethodnog izraza dobije se opća jednačba krivulje u obliku parabole:

$$y = \frac{1}{2} \frac{g}{F} x^2 = \frac{1}{2} \frac{\gamma}{\sigma} x^2 \quad (4-23)$$

U bilo kojoj točki raspona vodiča na nekoj udaljenosti od ishodišta do ovjesišta, provjes f_x dobije se iz izraza:

$$f_x = f - y = \frac{\gamma a^2}{8\sigma} - \frac{\gamma x^2}{2\sigma} \quad (4-24)$$

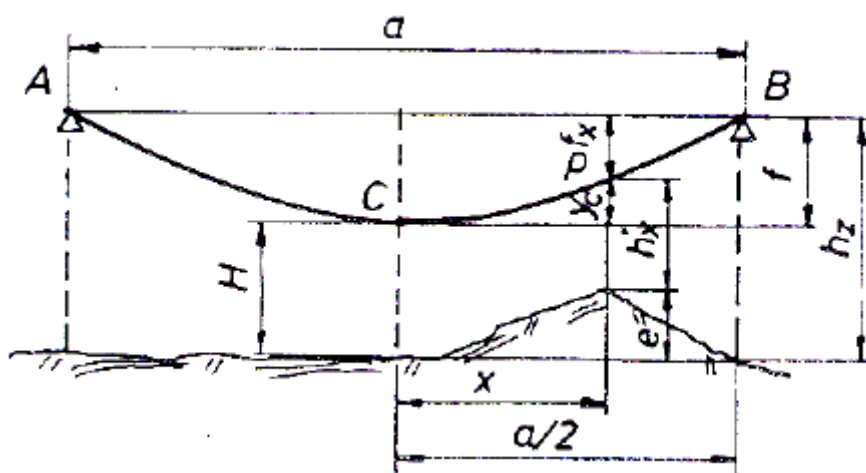
što nadalje daje:

$$f_x = \frac{\gamma}{8\sigma} (a^2 - 4x^2) \quad (4-25)$$

Oblikovanjem izraza (4-25), koristeći izraz (4-20), dobije se formula za izražavanje provjesa u bilo kojoj točki raspona vodiča:

$$f_x = f \cdot \frac{a^2 - 4x^2}{a^2} \quad (4-26)$$

Izvedena formula koristi se za ispitivanje visine vodiča duž trase vodiča iznad pojedinih točaka. Iz sigurnosnih razloga visina vodiča iznad tla i objekata je točno propisana. Zbog toga što je najniža točka vodiča na mjestu najvećeg provjesa, izraz (4-20) koristi se za provjeru najniže točke između stupova u slučaju ravnog tla. Visina vodiča se provjerava na kritičnim mjestima ako je tlo neravno ili je objekt izdignut.



Slika 4.7. Kontrola visine vodiča [4]

Za izračun visine h_x točke P iznad ispupčenja koristi se izraz:

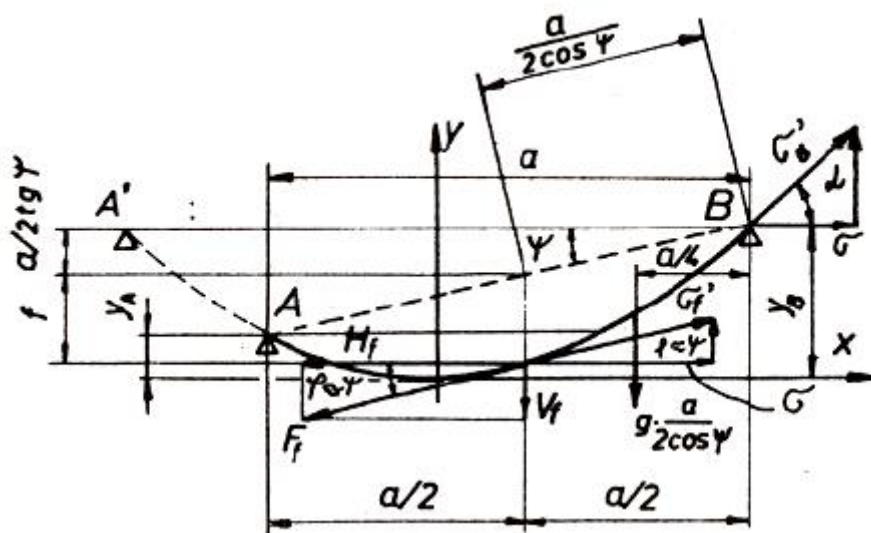
$$h_x = h_z - (e + f_x) \quad (4-27)$$

gdje je:

h_z – visina ovjesišta iznad razine trase;

e – visina ispupčenja ispod točke P.

U praksi je jako često da je visina ovjesišta nejednaka, ali se također na sredini raspona mjeri najveći provjes. Bez obzira na nejednaku visinu ovjesišta, za raspon se podrazumijeva horizontalni razmak između dva stupa. Iznad točke užeta u kojoj se mjeri provjes, tangencijalni smjer sile zatezanja F_r je približno paralelan sa spojnicom ovjesišta \overline{AB} ($\varphi \cong \psi$). U toj se točki sila rastezanja može rastaviti na vertikalnu V_f i horizontalnu H_f komponentu. U obzir se kod postavljanja jednadžbe ravnoteže momenta, u odnosu na točku B, treba uzeti da sila vlastite težine vodiča nije proporcionalna dužini luka, već dužini strune ($a/2\cos\psi$):



Slika 4.8. Ispitivanje ravnoteže zategnutog užeta pri ovjesištima nejednakih visina [4]

$$H_f \left(f + \frac{a}{2} \operatorname{tg} \psi \right) = \left(g \frac{a}{2 \cos \psi} \right) \frac{a}{4} + V_f \frac{a}{2} \quad (4-28)$$

Sila zatezanja na mjestu najvećeg provjesa je:

$$F_f = \sigma_f' A \quad (4-29)$$

gdje je σ_f' naprezanje užeta na tom mjestu.

Komponente sile zatezanja F_f na tom mjestu su:

$$H_f = F_f \cos\psi = \sigma_f' A \cos\psi \quad (4-30)$$

$$V_f = F_f \sin\psi = \sigma_f' A \sin\psi \quad (4-31)$$

vrijedi:

$$\sigma_f' A \cos\psi \left(f + \frac{a}{2} \operatorname{tg}\psi \right) = \frac{ga^2}{8\cos\psi} + \sigma_f' A \sin\psi \frac{a}{2} \quad (4-32)$$

Zbog toga što je horizontalna komponenta naprezanja:

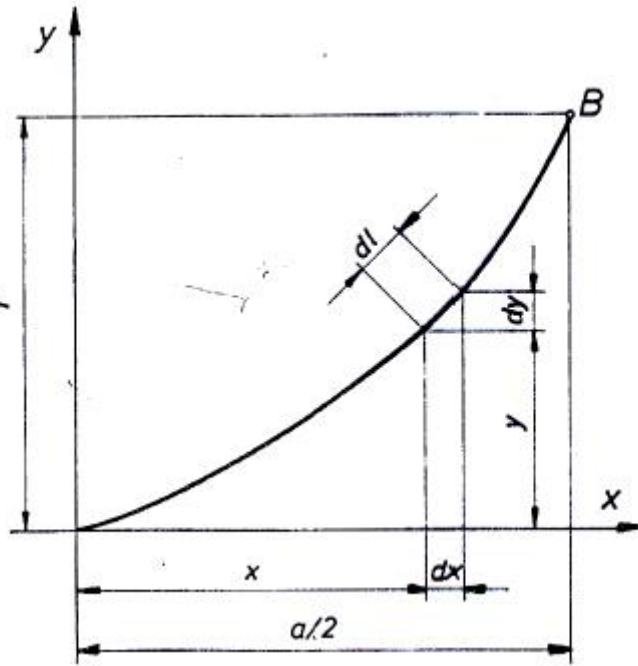
$$\sigma = \sigma_f' \cos\psi \quad (4-33)$$

za provjes se dobije:

$$f = \frac{a^2\gamma}{8\sigma\cos\psi} \quad (4-34)$$

U slučaju nejednakih visina ovjesišta, provjes je $1/\cos\psi$ veći od provjesa u slučaju kada su visine jednake.

Uz poznavanje provjesa, još je potrebno poznavati i dužinu provješenog vodiča koja je veća od dužine raspona.



Slika 4.9. Određivanje dužine luka vodiča nadomještenog parabolom[4]

Za dio dužine luka vodiča vrijedi idući izraza:

$$dl = \sqrt{dx^2 + dy^2} = dx \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} \quad (4-35)$$

Iz diferencijalne jednadžbe (4-23) provješenog vodiča u obliku parabole dobije se:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\gamma}{\sigma} x \quad (4-36)$$

i zamjenom u (4-35) dobije se izraz:

$$dl = dx \sqrt{1 + \left(\frac{\gamma}{\sigma}\right)^2 x^2} \quad (4-37)$$

Zbog toga što je drugi član pod korijenom i vrijednosti za γ i σ su male, izraz (4-37) se može zapisati i kao:

$$dl \cong \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\gamma}{\sigma} \right)^2 x^2 \right] dx \quad (4-38)$$

Ukupna dužina parabole dobije se integriranjem u granicama od $-a/2$ do $a/2$:

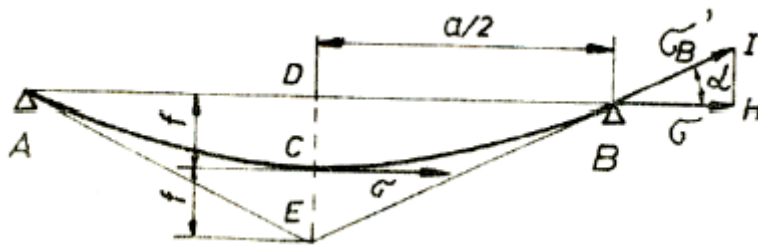
$$l = \int_{-a/2}^{a/2} dl = \int_{-a/2}^{a/2} \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\gamma}{\sigma} \right)^2 x^2 \right] dx = a + \frac{\gamma^2 a^3}{a^2 24} \quad (4-39)$$

Koristeći izraz (4-20) dužina parabole l može se izraziti i kao:

$$l = a + \frac{8 f^2}{3 a} \quad (4-40)$$

Po ovoj jednadžbi dužina parabole se razlikuje za oko 0,1% od dužine raspona što opravdava da je $a \cong 1$.

Kod užeta, koje može samo duž svoje osi primiti zateznu silu, u svakoj točki sila zatezanja pada u smjer tangente na krivulju. Zbog toga je najveće naprezanje na ovjesištima, a σ je najmanje naprezanje koje se javlja kod vodiča.



Slika 4.10. Ispitivanje promjene zatezne sile duž vodiča [4]

$$\sigma_A' = \sigma_B' = \frac{\sigma}{\cos \alpha} \quad (4-41)$$

Omjer između σ_A (ili σ_B) i σ se može zapisati i u drugačijem obliku uz pomoć sličnosti trokuta DEB i HIB i uz svojstvo simetrično povučениh tangenti parabole gdje vrijedi da je $\overline{DC} = \overline{CE} = f$.

$$\frac{\sigma'_A}{\sigma} = \frac{\sigma'_B}{\sigma} = \frac{\overline{BE}}{\overline{BD}} = \frac{4f^2 + \frac{a^2}{4}}{\frac{a}{2}} = 1 + 16\left(\frac{f}{a}\right)^2 \quad (4-42)$$

I u najekstremnijim slučajevima omjer f/a je manji od 0,05, a $\sigma'_A = \sigma'_B = 1,02\sigma$, znači da je za 2% $\sigma'_A = \sigma'_B$ veći od σ .

Razvijanjem binoma na desnoj strani jednadžbe (4-42) u red i uzimanjem samo prva dva člana u obzir, dobiva se:

$$\sigma'_A = \sigma'_B = \sigma \left[1 + 8\left(\frac{f}{a}\right)^2 \right] = \sigma \left[1 + 8f \frac{a^2 \gamma}{8\sigma a^2} \right] \quad (4-43)$$

što dalje daje:

$$\sigma'_A = \sigma'_B = \sigma + f\gamma \quad (4-44)$$

U proizvoljnoj točki P parabole s ordinatom y_P za naprezanje vrijedi:

$$\sigma'_P = \sigma + y_P \gamma \quad (4-45)$$

Kod različitih visina ovjesišta, u gornjem ovjesištu nastupa najveće naprezanje, a dobije se iz izraza (4-45) i glasi:

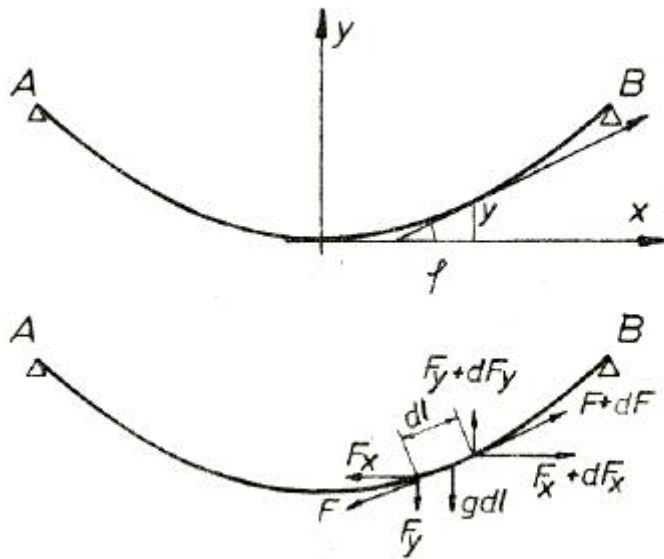
$$\sigma'_B = \sigma + y_B \gamma \quad (4-46)$$

Analogno tome, za donje ovjesište vrijedi izraz:

$$\sigma'_A = \sigma + y_A \gamma \quad (4-47)$$

4.2.5. Točni proračun pomoću lančanice

Tri sile, koje su u ravnoteži, djeluju na element luka užeta dužine dl (slobodno visećeg i zategnutog između točaka koje su na istoj visini), a to su: sila težine u vertikalnom smjeru, sila zatezanja F u pravcu tangente, odnosno $F + dF$.



Slika 4.11. Proračun provjesa pomoću lančanice [4]

Kada se sile koje djeluju u pravcu tangente rastave na horizontalnu i vertikalnu komponentu, uvjet za ravnotežu elementa luka glasi:

$$dF_x = 0 \quad (4-48)$$

$$dF_y = gdl \quad (4-49)$$

Kada se povuče tangenta na element luka užeta, njezin koeficijent dobije se iz izraza:

$$tg\varphi = \frac{dy}{dx} = \frac{F_y}{F_x} \quad (4-50)$$

Iz izraza (4-48) se može zaključiti da je $F_x = konst$, a da se komponenta F_y može izračunati iz izraza (4-49) gdje je l dužina luka. Dužina luka zategnutog užeta može se izračunati iz sljedećeg izraza:

$$l = \int_0^x \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx \quad (4-51)$$

U konkretnom slučaju:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{F_y}{F_x} = \frac{gl}{F_x} = \frac{g}{F_x} \cdot \int_0^x \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx \quad (4-52)$$

Kada se obje strane diferenciraju dobije se:

$$\frac{d^2y}{d^2x} = \frac{g}{F_x} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} \quad (4-53)$$

Pomoću horizontalne komponente naprezanja σ može se izraziti horizontalna komponenta zatezne sile F_x . Horizontalna komponenta naprezanja σ mjerodavna je u dalekovodnoj mehanici i vrijedi $F_x = \sigma A$, a g se može izraziti kao $g = \gamma A$ pa izraz (4-52) možemo zapisati kao:

$$\frac{d^2y}{d^2x} = \frac{\gamma}{\sigma} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} \quad (4-54)$$

Dobiveni izraz predstavlja opću diferencijalnu jednadžbu drugog reda, a njezino opće rješenje glasi:

$$y = c \cdot ch \frac{x}{c} + K \quad (4-55)$$

Jednadžbu lančanice predstavlja dobiveni izraz u kojem je parametar lančanice $c = \sigma/\gamma$ gdje je σ horizontalna komponenta naprezanja, a integracijska konstanta je K .

Integracijska konstanta K može se odrediti iz izraza (4-55) u koji uvrštavamo vrijednosti $x = 0$ i $y = 0$ jer je tjeme lančanice u ishodištu koordinatnog sustava:

$$0 = c + K \quad (4-56)$$

$$K = -c = -\frac{\sigma}{\gamma} \quad (4-57)$$

Krivulja lančanice je:

$$y = c \cdot ch \frac{x}{c} - c \quad (4-58)$$

ili:

$$y = \frac{\sigma}{\gamma} \cdot ch \frac{\gamma x}{\sigma} - \frac{\sigma}{\gamma} \quad (4-59)$$

Ako su ovjesišta užeta na jednakoj visini i raspon a je horizontalna udaljenost između ovjesišta, a f je maksimalna ordinata provjesa, tada se iz izraza (3-58), uz $x = a/2$ i $y = f$, dobije:

$$f = c(ch \frac{a}{2c} - 1) \quad (4-60)$$

$$f = \frac{\sigma}{\gamma} (ch \frac{\gamma a}{2\sigma} - 1) \quad (4-61)$$

Razvojem funkcije $ch(t)$ u red:

$$ch(t) = 1 + \frac{t^2}{2!} + \frac{t^4}{4!} + \frac{t^6}{6!} + \dots \quad (4-62)$$

Dobiva se novi oblik izraza (4-59):

$$f = \frac{\sigma}{\gamma} \cdot (1 + \frac{\gamma^2 a^2}{8\sigma^2} + \frac{\gamma^4 a^4}{16\sigma^4 \cdot 24} + \dots - 1) \quad (4-63)$$

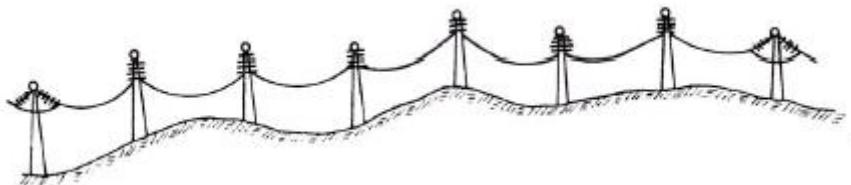
Nakon sređivanja dobije se izraz:

$$f = \frac{a^2\gamma}{8\sigma} + \frac{a^4\gamma^3}{384\sigma^3} + \frac{a^6\gamma^5}{46080\sigma^5} + \dots \quad (4-64)$$

Uzimajući u obzir samo prvi član dobivenog izraza, rezultat je jednak kao i kod proračuna na osnovi parabole (4-20). Za male raspone nema velike razlike između ta dva postupka, a provjes se mijenja u funkciji raspona gdje su γ i σ konstante. Može se reći da se do veličine raspona između 400 i 500 m u obzir ože uzeti izraz (4-20), a kod većih raspona treba uzeti u obzir i drugi, a ponekad i teći član jednadžbe (4-64) u obzir jer će u protivnom doći do prevelikih odstupanja. Uzimanje drugog člana jednadžbe (4-64) potrebno je uzeti u obzir ako on iznosi 5 cm ili više.

4.3. Provjesa u realnom zateznom polju

Dosadašnji proračuni jednadžbe stanja vodiča odnosili su se na zatezno polje s jednakim rasponima ili na jedan raspon. U stvarnosti je to rijetkost jer se pri postavljanju stupova na neravnom terenu treba prilagoditi danim uvjetima, te se zbog toga zatezno polje sastoji od raspona nejednakih duljina. Prema dosadašnjim navodima, kod montiranja ovakvog zateznog polja bilo bi potrebno svaki raspon zategnuti onom silom određenom temperaturom montiranja, što znači da bi svaki raspon bio zategnut drugom zateznom silom. U stvarnosti je tako nešto nemoguće iz razloga što su vodiči smješteni na koturima gdje je moguće ostvariti samo jednu zateznu silu. Bitno pitanje je kolika bi trebala biti zatezna sila da bi u stanju najvećeg naprezanja (uz dodatni teret na -5°C ili na -20°C) nastupalo najveće radno naprezanje ($\sigma_{\max} \leq \sigma_d$) u svim rasponima zateznog polja.



Slika 4.12. Različiti rasponi dalekovoda[4]

Određivanje izjednačavajućeg napreznog polja dobije se uz pretpostavku da je zbroj dužina raspona, odnosno ukupna dužina vodiča, u početnom stanju poznata i jednaka zbroju dužina parabola u pojedinačnim rasponima.

Dužina luka u r-tom rasponu (uzimajući da je vodič u obliku parabole) računa se prema izrazu:

a) Početno stanje

$$l_0 = a_r + \frac{a_r^3 \gamma_0^2}{24 \sigma_0^2} \quad (4-65)$$

b) Nakon promjene stanja

$$l = a_r + \frac{a_r^3 \gamma^2}{24 \sigma^2} \quad (4-66)$$

Pri promjeni stanja razlika u dužini luka vodiča je:

$$l - l_0 = \frac{a_r^3 \gamma^2}{24 \sigma^2} - \frac{a_r^3 \gamma_0^2}{24 \sigma_0^2} \quad (4-67)$$

Razlika u dužini luka nastaje zbog elastičnosti vodiča i zbog promjene temperature. Kod različitih raspona zatezno napreznje se ne mijenja podjednako u slučaju kada ovjesište ima ograničenu pokretljivost pa se zbog izjednačavanja napreznog ovjesišta pomiču. Osim već navedenih razlika, na promjenu dužine luka utječe i dužina Δa_r . Dužina Δa_r prelazi u negativnom ili pozitivnom smislu iz susjednih raspona (r+1)-og ili (r-1)-og. Uzimajući u obzir da je $l_0 \cong a_r$, promjena dužine luka u r-tom rasponu može se izraziti:

$$\frac{a_r^3 \gamma^2}{24 \sigma^2} - \frac{a_r^3 \gamma_0^2}{24 \sigma_0^2} = a_r \alpha (t - t_0) + a_r \frac{1}{E} (\sigma - \sigma_0) + \Delta a_r \quad (4-68)$$

Nakon izjednačavanja zateznih sila u svim rasponima, uspostavlja se u zateznom polju zajedničko horizontalno napreznje σ . Vodeći računa da je $\sum_{r=1}^n \Delta a_r = 0$ (jer je zbog zateznih

stupova prijelaz vodiča u susjedna zatezna polja nemoguć) zbrojem jednažbi za sve „n“ raspone u danom zateznom polju dobije se:

$$\sum_{r=1}^n a_r^3 \left(\frac{\gamma^2}{24\sigma^2} - \frac{\gamma_0^2}{24\sigma_0^2} \right) = \sum_{r=1}^n a_r \alpha (t - t_0) + \sum_{r=1}^n a_r \frac{1}{E} (\sigma - \sigma_0) \quad (4-69)$$

Kada se dobiveni izraz podijeli s $\sum_{r=1}^n a_r$ dobije se:

$$\frac{\sum_{r=1}^n a_r^3}{\sum_{r=1}^n a_r} \cdot \left(\frac{\gamma^2}{24\sigma^2} - \frac{\gamma_0^2}{24\sigma_0^2} \right) = \alpha (t - t_0) + \frac{1}{E} (\sigma - \sigma_0) \quad (4-70)$$

Uvođenjem oznake:

$$\frac{\sum_{r=1}^n a_r^3}{\sum_{r=1}^n a_r} = a_i^2 \quad (4-71)$$

dobije se oblik jednažbe koji predstavlja jednažbu stanja zategnutog polja koja je jednaka jednažbi stanja vodiča horizontalnom rasponu:

$$\frac{a_i^2 \gamma^2}{24\sigma^2} - \frac{a_i^2 \gamma_0^2}{24\sigma_0^2} = \alpha (t - t_0) + \frac{1}{E} (\sigma - \sigma_0) \quad (4-72)$$

Iz ovoga se može zaključiti da se izjednačeno naprezanje zateznog polja koje ima raspone različitih dužina, kod promjene stanja, svodi na naprezanje jednog (idealnog) raspona, a njegova dužina dobije se izraza:

$$a_i = \sqrt{\frac{\sum_{r=1}^n a_r^3}{\sum_{r=1}^n a_r}} \quad (4-73)$$

Prilikom projektiranja realnog zateznog polja potrebno je prvo izračunati idealni raspon, a nakon toga se postavlja jednažba stanja zateznog polja. Slijedi poslije toga određivanje zajedničkog naprezanja kod različitih temperatura, a nakon toga i provjes koji se dobije iz formule:

$$f_r = \left(\frac{\gamma}{8\sigma}\right) a_r^2 \quad (4-74)$$

Uvođenjem oznake za „idealni“ provjes dobije se izraz:

$$f_i = \left(\frac{\gamma}{8\sigma}\right) a_i^2 \quad (4-75)$$

Bilo koji provjes f_r u zateznom polju može se kombinacijom prethodna dva izraza izraziti funkcijom idealnog raspona i idealnog provjesa, a izraz glasi:

$$f_r = f_i \left(\frac{a_r}{a_i}\right) \quad (4-76)$$

5. USPOREDNA ANALIZA DALEKOVODA UZ POMOĆ CCP PROGRAMA

Ovisno o stanju elemenata nekog dalekovoda donosi se odluka o revitalizaciji dalekovoda. Ukoliko pogonska sigurnost i pouzdanost dalekovoda nisu ugroženi, nije potrebno obavljati obnovu dalekovoda. Nakon detaljnog pregleda donosi se ocjena pogonske sigurnosti, odnosno oštećenja i dotrajalosti pojedinih elemenata dalekovoda. Starenje pojedinih elemenata dalekovoda je uzrokovano djelovanjem različitih procesa, a to je osnovni uzrok propadanja elemenata dalekovoda. Korozija je glavni uzrok smanjivanja vlačne čvrstoće vodiča i zaštitne užadi, te najviše ugrožava upravo zaštitnu užad, vodiče, ali i ovjesnu i spojnu opremu. Upravo zbog korozije dolazi do pucanja zaštitne užadi jer im se tako pogoršavaju mehanička svojstva. Prosječna vrijednost životne dobi u normalnom okruženju Al/Če vodiča je 54 godina s devijacijom od ± 14 godina, a za vodove u zagađenom okruženju životna dob elemenata dalekovoda je 46 godina s devijacijom ± 15 godina. Faktori koji utječu na životnu dob pojedinih elemenata dalekovoda su:

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

S obzirom na važnost ispravnog funkcioniranja elektroenergetskog sustava, prilikom revitalizacije dalekovoda unutar nekoliko godina, dalekovode se dijeli u različite grupe. Prema očekivanim opterećenjima dalekovoda u budućnosti, podacima o stanju opreme dalekovoda i prema godini izgradnje donosi se odluka o revitalizaciji dalekovoda. Ukoliko

tokovi snage za neki dalekovod pokazuju da prijenosna moć tog dalekovoda ne zadovoljava buduće zahtjeve, potrebno je zamijeniti vodiče novim koji imaju veću prijenosnu moć. Za aluminijske žice Al/Č vodiča je dokazano da se njihova zatezna čvrstoća znatno smanjuje već nakon nekoliko desetaka godina. Kvaliteta zamašćivanja čelične jezgre jedan je od bitnih faktora koji utječu na zateznu čvrstoću aluminijskih žica. Do starenja mehaničkih svojstava vodiča dolazi i zbog toga što na pojedinim dijelovima korozija napada čeličnu jezgru Al/Č vodiča. Prilikom prolaska struje kroz vodič, povećava se temperatura vodiča, odnosno vodič se zagrijava, što također utječe na starenje vodiča. Na stanje čelične jezgre vodiča loše utječu temperature od maksimalno 1000 °C (u prosjeku 700 °C) jer su takve jezgre konstruirane za temperature do 500 °C. Prilikom kratkotrajnih povišenih temperatura ili kod dugotrajno nižih temperatura dolazi do smanjenja mehaničkih i električnih svojstava aluminijskih žica, a pri temperaturama od 1000 °C do 1200 °C može doći i do njihovog taljenja. Laboratorijskim programima ili tijekom pogona dalekovoda moguće je ispitati stvarno stanje zaštitne užadi i vodiča. Vizualnim pregledom moguće je grubo procijeniti stanje vodiča, ali je problem što se korozija čelične jezgre može uočiti tek u visokom stadiju, a koroziju aluminijske žice općenito je teško primijetiti. Koristeći različite vrste laboratorijskih ispitivanja dobivaju se korisne informacije o stanju opreme dalekovoda, a neki od tih testova su:

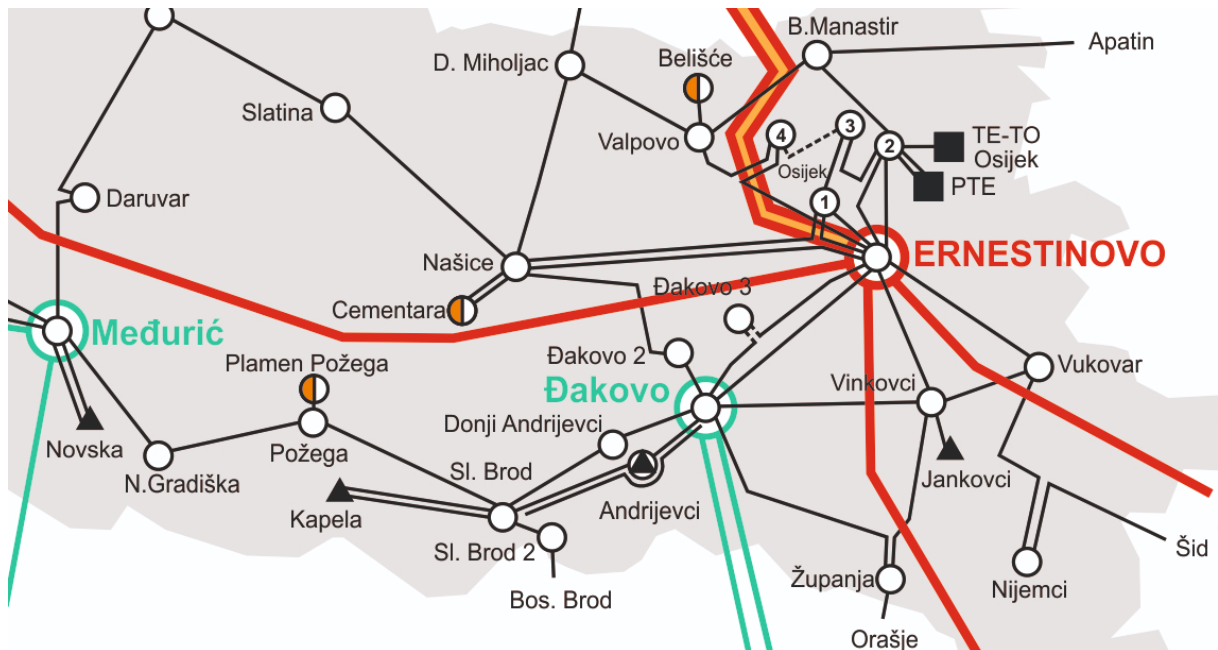
- vizualni pregled,
- kemijska analiza,
- test električne otpornosti,
- test ubrzane korozije,
- metalurgijsko ispitivanje,
- test prekrivenosti cinkom,
- test preostalog cinka,
- test izdržljivosti materijala,
- test napetosti i istezanja,
- test oscilacijske izdržljivosti,
- test vibracijske izdržljivosti,
- test torzionalne rastezljivosti,
- test prolaznosti na koloturi.

Kada se otkriju posljedice starenja elemenata nadzemnog voda njihov rad se promatra ili se parcijalno zamjenjuju. Na mjestima gdje je korozija napredovala toliko da ugrožava rad cijelog voda, dijelovi vodiča ili zaštitne užadi se mijenjaju. Na osjetljivim mjestima kao što je

blizina ceste, prelazak preko pruge, blizina stambenih objekata i slično, na mjestima duž trase dalekovoda mijenja se i ovjesna oprema. Cjelokupnu zamjenu elemenata dalekovoda je potrebno obaviti ukoliko su starost i oštećenja dalekovoda toliki da je ekonomski neisplativo njihovo održavanje, a pouzdanost voda smanjena. Na temelju materijala od kojih su stupovi i temelji napravljeni, na osnovu prisutnosti oštećenja i korozije, opterećenju i klimatskim uvjetima u kojima se nalaze, određuje se njihovo stanje. Građevinski dijelovi dalekovoda imaju sva puta veću životnu dob u odnosu na električne komponente dalekovoda pa je njih potrebno u životnom vijeku dalekovoda jednom zamijeniti ukoliko se građevinski dijelovi dalekovoda redovito saniraju i održavaju. Vijci su najizloženiji koroziji, a upravo je proces korozije glavni problem ograničavanja funkcionalnosti elemenata dalekovoda. Na mjestima gdje je betonski stup popucao i moguć je ulazak vlage, korozija također napada i čeličnu armaturu koja se tamo nalazi. Uz održavanje čelično-rešetkastih stupova i korištenje zaštitnih sredstava, njihova životna dob je oko 80 godina, a glavni uzroci smanjivanja njihove životne dobi su:

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

Životni vijek drvenih stupova ovisi o truljenju drveta, održavanju, klimatskim uvjetima, insektima i pticama, a procjenjuje se na 44 ± 4 godine.



Slika 5.1. Shema elektroenergetskog sustava – korišteni dalekovodi u diplomskom radu: Ernestinovo – Našice i Požega – N.Gradiška (Izvor: www.hops.hr ; Preuzeto: srpanj 2020. god.)

Za proračun dalekovoda korišten je CCP program. CTC Global stvorio je CCP program (engl. *Conductor Comparison Program Software*) kako bi pomogao inženjerima da usporede kapacitete, gubitke na vodovima, toplinsko i zimsko opterećenje te ekonomske aspekte gotovo bilo koje vrste vodiča, tako da se brojne prednosti ACCC vodiča mogu u potpunosti realizirati. [1]

5.1. Proračun dalekovoda Ernestinovo – Našice

Slika 5.2. prikazuje usporedbu Al/Č vodiča, koji predstavlja dalekovod Ernestinovo-Našice, sa ACCC vodičem. Za ACCC vodič korišten je 310 HAWK. Na slici su prikazana dva vodiča, njihove karakteristike i osnovni parametri kao što je presjek, težina po kilometru te otpor.

Conductor Information	Base Conductor	Comparison Conductor #1
Type	ACSR	ACCC®
Size (Unit - Code Word)	242 mm ² HAWK	310 mm ² HAWK
Aluminum Area (mm ²)	241.7	309.7
Diameter (mm)	21.793	21.793
Rated Strength (kN)	86.7	103.2
Weight (kg/km)	976.1	929.6
Electrical Characteristics		
DC Resistance at 20°C (ohms/km)	0.1169	0.0900
AC Resistance at 25°C (ohms/km)	0.1198	0.0923
AC Resistance at 75°C (ohms/km)	0.1432	0.1094

Slika 5.2. Usporedba Al/Č i ACCC vodiča

Ona izmjenična struja koja neće zagrijavati vodič više od 40° C iznad temperature okoline naziva se maksimalna pogonska struja. Tablica 5.1. prikazuje presjek vodiča i trajnu struju, a za naš vodič, prema presjeku, ta bi struja trebala iznositi 530 A.

Tablica 5.1. Presjek vodiča i trajna struja [4]

Presjek vodiča	Presjek vodiča	Trajna struja
(mm ²)	(mm ²)	(A)
16/2.5	15.3/2.55	90
25/4	23.8/4.0	125
35/6	34.3/5.7	145
50/8	48.3/8.0	170
70/12	69.9/11.4	235
95/15	94.4/15.3	290
120/20	121.6/19.5	345
150/25	148.9/24.2	400
185/30	183.8/29.8	455

210/35	209.1/34.1	490
240/40	243.0/39.5	530
360/57	360.2/57.3	780
490/65	490.3/63.6	951
170/40	171.8/40.1	440
240/55	241.3/56.3	530
350/80	349.3/78.9	780
490/110	487.8/111.2	961
50/30	51.2/29.8	187
95/55	96.5/56.3	364
120/70	122.0/71.3	404
75/80	74.8/78.9	240
1045/45	1045/45	1544

U programu smo temperaturu zraka postavili na 35° C (slika 4.3.) i očitali maksimalnu pogonsku struju 581 A (slika 5.4.). Osim temperature okoline, potrebno je upisati još i brzinu vjetrova, koeficijent emisije i apsorpcije te mjesec u kojemu promatramo zadani dalekovod.

ENVIRONMENTAL INFORMATION

Select Solar Radiation * ? Input Solar Radiation Parameters

Ambient Temp. (°C) * ? 35.0

Elevation (m) ? 0

Wind Angle (deg.) ? 90

Azimuth of Line (NS=0, EW=90) ? 0

Latitude (neg = South) ? 32

Wind (m/sec) * ? 0.60

Sun Radiation (W/m²) ? 1020.2

Emissivity (%) ? 0.50

Absorptivity (%) ? 0.50

Month ? August x ▾

Day of Month ? 21

Time (24 hrs.) ? 12

Atmosphere ? Clear x ▾

Slika 5.3. Parametri okoliša

Ampacity (A) at Temperature (°C)	(60) - 436	(60) - 498
Ampacity (A) at Temperature 2 (°C)	(75) - 581	(75) - 665
Ampacity (A) at Temperature 3 (°C)	(100) - 750	(100) - 860
Ampacity (A) at Rated Operating Temp (°C)	(75) - 581	(180) - 1,249
Ampacity (A) at Maximum Temp (°C)	(100) - 750	(200) - 1,322

Slika 5.4. Određivanje maksimalne pogonske struje pri temperaturi zraka od 35° C

Steady-State Temperature (°C) at Peak Ampacity	67	60
First Year Line Losses (MWh)	27,399	20,501
Cost of Line Losses (HRK)	1,643,940	1,230,060
Generation Capacity Required to Supply Line Losses (MW)	3.13	2.34
Cost of Generation Capacity (HRK)	0	0
CO ₂ Emissions From Line Losses (MT)	6,313.42	4,723.95
Value of CO ₂ (HRK-kn/MT)	157,836	118,099
First Year Differences of Using Comparison Conductor		
Difference in Generation Capacity vs Base Conductor (MW)	--	-0.79
Difference in Capital Cost of Capacity vs Base Conductor (HRK)	--	0
Difference in First Year Line Losses vs Base Conductor(MWh)	--	-6,898
% Difference in First Year Line Losses vs Base Conductor (%)	--	-25 (%)
First Year Line Loss Savings vs. Base Conductor Base Conductor (HRK/Year)	--	413,894
Line Loss Savings per meter of Conductor vs Base Conductor (HRK/m/Year)	--	3.21
Difference in First Year CO ₂ Generated vs Base Conductor (MT)	--	-3,504
30 Year Differences of Using Comparison Conductor		
Difference in 30 Year Line Losses vs Base Conductor (MWh)	--	-206,940.00
30 year Line Loss Savings vs Base Conductor (HRK)	--	12,416,818
Difference in 30 year CO ₂ Generated vs Base Conductor (MT)	--	-105,129
30 year CO ₂ Value vs Base Conductor at kn25/MT (HRK)	--	2,628,225
Green House Gas (GHG) Emissions		
Difference in First Year CO ₂ Generated vs Base Conductor (MT)	--	-3,504
Difference in First Year CO ₂ Value vs. Base Conductor at kn25/MT (HRK)	--	-87,600
30 year CO ₂ Value vs Base Conductor at kn25/MT (HRK)	--	2,628,225
Equivalent Number of Cars Removed from Highway by Use of Comparison Conductor*	--	757
Equivalent Number of Homes Powered by Use of Comparison Conductor*	--	593

Slika 5.5. Usporedba povrata kapitala, gubitaka na vodu i emisija CO₂

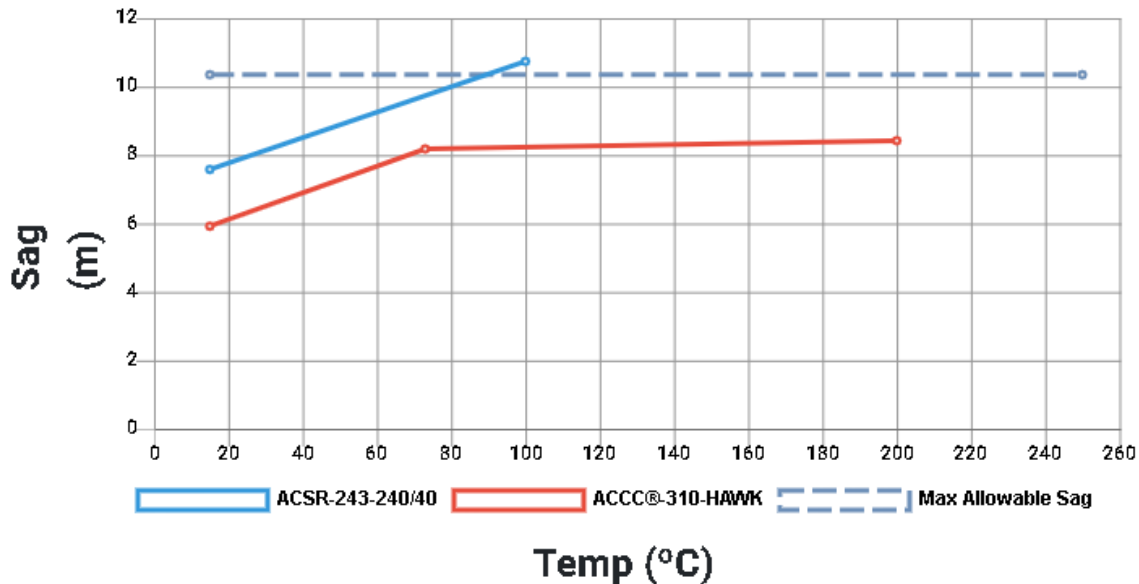
Iz slike 5.5. može se zaključiti da ACCC vodiči imaju najbolju mogućnost povrata kapitala zbog mogućnosti isporuke veće količine snage u odnosu na Al/Č vodiče. Zbog materijalne uštede na gubicima te zbog smanjenja emisije CO₂, može se reći da su ACCC vodiči optimalan izbor za zamjenu Al/Č vodiča.

Conductor Information	Base Conductor	Comparison Conductor #1
Type	ACSR	ACCC®
Size (Unit - Code Word)	242 mm ² HAWK	310 mm ² HAWK
Initial Sag/Tension at Above-Stringing Temperature (15 °C)		
Ruling Span (m)	326.8	326.8
% RTS	20.0	20.0
Sag at Initial Sagging Temperature (m)	7.40	5.92
Total Initial Tension at Structure at Sagging Temperature (kN)	17.4	20.6
Total Conductor Weight/phase (kg/km)	976.1	929.6
Sag/Tension at Stringing Temperature		
Sag at Peak Operating Amps		
Temp (°C)	67	60
Sag (m)	9.34	7.71
Total Structure Tension (kN)	13.8	15.9
Sag at Rated Operating Temperature		
Temp (°C)	75	180
Sag (m)	9.61	8.38
Total Structure Tension (kN)	13.4	14.6
Sag at Maximum Temperature		
Temp (°C)	100	200
Sag (m)	10.46	8.42
Total Structure Tension (kN)	12.3	14.5
Max Allowable Temperature at Sag of 10 m		
Max. Allowable Temp (°C)	97	200
Sag (m)	10.36	8.42
Total Structure Tension (kN)	12.5	14.5
Ampacity (A)	733	1,322

Slika 5.6. Usporedba provjesa pri različitim temperaturama

Na slici 5.6. prikazani su provjesi pri različitim temperaturama. Na slici je također prikazana i zatezna sila te se da zaključiti da je pogodnija s aspekta ACCC vodiča.

Na slici 5.7. prikazana je usporedna krivulja provjesa Al/Č i ACCC vodiča na kojoj se može vidjeti da provjes Al/Č vodiča prelazi dozvoljeni provjes, a kod ACCC vodiča provjes ostaje ispod maksimalne dozvoljene vrijednosti.



Slika 5.7. Krivulja provjesa Al/Č i ACCC vodiča

Wind/Ice or Cold Temperature Sag/Tension		
Temperature (°C) = 0		
Wind Pressure (Pa): = 0		
Radial Ice Thickness (mm) = 0		
Total Sag (m)	6.88	5.70
Total Structure Tension (kN)	18.7	21.4
% RTS	21.5	20.8
Max. Allowable Tension (kN):	0	0
Max. Tension (% RTS)	60.00	60.00
Knee Point Temperature Sag/Tension		
Knee Point Temperature (°C)	119	73
Sag (m)	11.06	8.18
Total Structure Tension (kN)	11.7	15.0

Slika 4.8. Karakteristike dalekovoda kod temperature koljena te uz temperaturu od 0° C

Na slici 5.8. prikazana je zatezna sila i provjes na temperaturi 0° C . Na slici se može vidjeti da su zatezne sile velike, provjes dosta manji u odnosu na prethodno zadanu temperaturu od 35° C. ACCC vodič je bolji izbor što se također može vidjeti iz slike na kojoj su prikazani i

izračuni kod temperature koljena jer i tada ima manji provjes koji neće preći dozvoljeni maksimalni, za razliku od Al/Č vodiča.

Za isti dalekovod pri temperaturi od -5° C maksimalna pogonska struja iznosi 630 A za Al/Č vodič što se može iščitati sa slike 5.9 dok je kod ACCC vodiča ta struja 719 A.

Ampacity (A) at Temperature (°C)	(35) - 630	(35) - 719
Ampacity (A) at Temperature 2 (°C)	(75) - 869	(75) - 994
Ampacity (A) at Temperature 3 (°C)	(100) - 974	(100) - 1.116
Ampacity (A) at Rated Operating Temp (°C)	(75) - 869	(180) - 1.403
Ampacity (A) at Maximum Temp (°C)	(100) - 974	(200) - 1.462

Slika 5.9. Određivanje maksimalne pogonske struje pri temperaturi okoline od -5° C

5.2. Proračun dalekovoda Gradiška – Požega

Conductor Information	Base Conductor	Comparison Conductor #1
Type	ACSR	ACCC®
Size (Unit - Code Word)	149 mm ² 150/25 (149AL1/24-ST1A)	188 mm ² ROVINJ
Aluminum Area (mm ²)	149.0	187.8
Diameter (mm)	17.094	17.094
Rated Strength (kN)	53.7	71.1
Weight (kg/km)	600.7	576.4
Electrical Characteristics		
DC Resistance at 20°C (ohms/km)	0.1940	0.1487
AC Resistance at 25°C (ohms/km)	0.1976	0.1520
AC Resistance at 75°C (ohms/km)	0.2316	0.1819

Slika 5.10. Usporedba Al/Č i ACCC vodiča

Na slici 5.10. je prikazana usporedba Al/Č vodiča, koji predstavlja dalekovod Gradiška-Požega, s ACCC vodičem ROVINJ.

Ampacity (A) at Temperature (°C)	(60) - 336	(60) - 380
Ampacity (A) at Temperature 2 (°C)	(75) - 438	(75) - 494
Ampacity (A) at Temperature 3 (°C)	(100) - 560	(100) - 629
Ampacity (A) at Rated Operating Temp (°C)	(75) - 438	(180) - 896
Ampacity (A) at Maximum Temp (°C)	(100) - 560	(200) - 946

Slika 5.11. Određivanje maksimalne pogonske struje

Kao i u prethodnom slučaju, na temelju presjeka i uz pomoć tablice možemo odrediti maksimalnu pogonsku struju koja prema presjeku iznosi 400 A, a očitati precizna uz pomoć programa koja iznosi 438 A s obzirom na postavljenu temperaturu u programu.

ENVIRONMENTAL INFORMATION

Select Solar Radiation * ? Input Solar Radiation Parameters

Ambient Temp. (°C) * ?

Elevation (m) ?

Wind Angle (deg.) ?

Azimuth of Line (NS=0, EW=90) ?

Latitude (neg = South) ?

Wind (m/sec) * ?

Sun Radiation (W/m²) ?

Emissivity (%) ?

Absorptivity (%) ?

Month ? August × ▾

Day of Month ?

Time (24 hrs.) ?

Atmosphere ? Clear × ▾

Slika 5.11. Parametri okoliša

Na slici 5.11. prikazani su parametri okoline potrebni za daljnje proračune i usporedbe s ACCC vodičem.

First Year Line Losses (MWh)	15,194	11,622
Cost of Line Losses (HRK)	911,640	697,320
Generation Capacity Required to Supply Line Losses (MW)	1.73	1.33
Cost of Generation Capacity (HRK)	0	0
CO ₂ Emissions From Line Losses (MT)	3,501.08	2,678.00
Value of CO ₂ (HRK-kn/MT)	87,527	66,950
First Year Differences of Using Comparison Conductor		
Difference in Generation Capacity vs Base Conductor (MW)	--	-0.41
Difference in Capital Cost of Capacity vs Base Conductor (HRK)	--	0
Difference in First Year Line Losses vs Base Conductor(MWh)	--	-3,571
% Difference in First Year Line Losses vs Base Conductor (%)	--	-24 (%)
First Year Line Loss Savings vs. Base Conductor Base Conductor (HRK/Year)	--	214,282
Line Loss Savings per meter of Conductor vs Base Conductor (HRK/m/Year)	--	3.15
Difference in First Year CO ₂ Generated vs Base Conductor (MT)	--	-1,814
30 Year Differences of Using Comparison Conductor		
Difference in 30 Year Line Losses vs Base Conductor (MWh)	--	-107,130.00
30 year Line Loss Savings vs Base Conductor (HRK)	--	6,428,452
Difference in 30 year CO ₂ Generated vs Base Conductor (MT)	--	-54,428
30 year CO ₂ Value vs Base Conductor at kn25/MT (HRK)	--	1,360,700
Green House Gas (GHG) Emissions		
Difference in First Year CO ₂ Generated vs Base Conductor (MT)	--	-1,814
Difference in First Year CO ₂ Value vs. Base Conductor at kn25/MT (HRK)	--	-45,350
30 year CO ₂ Value vs Base Conductor at kn25/MT (HRK)	--	1,360,700
Equivalent Number of Cars Removed from Highway by Use of Comparison Conductor*	--	392
Equivalent Number of Homes Powered by Use of Comparison Conductor*	--	307

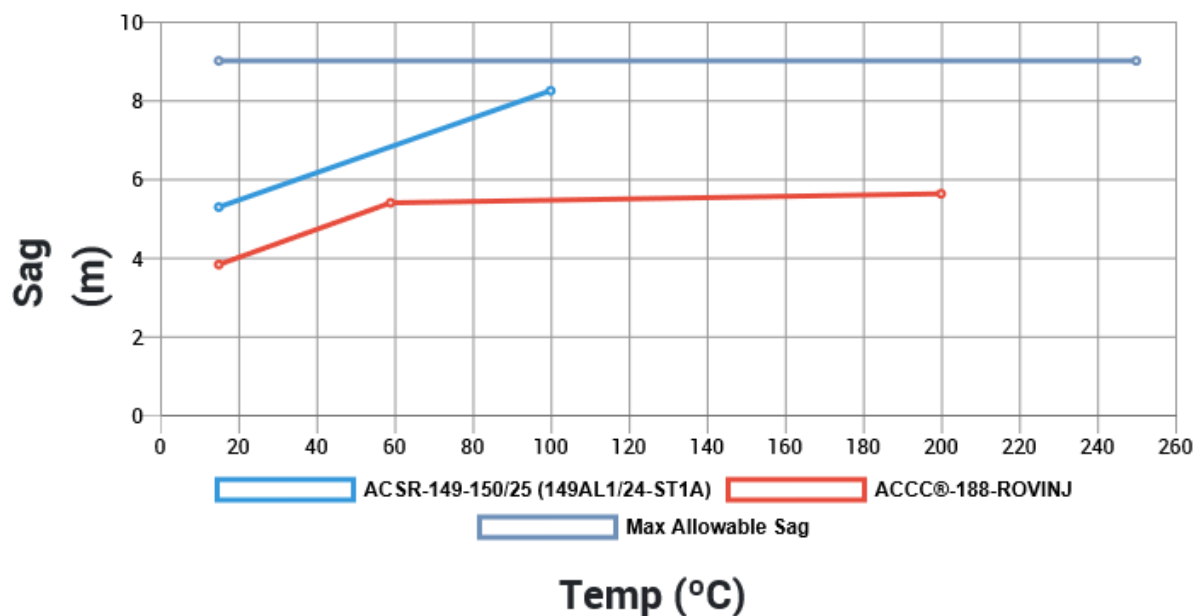
Slika 5.13. Gubitaka na vodu, usporedba povrata kapitala i emisija CO₂

Slično kao i u prethodnom slučaju, na slici 5.13. možemo vidjeti da je ACCC vodič bolji izbor u odnosu na Al/Č vodič s aspekta uštede na gubicima, s ekološkog aspekta zbog smanjenja emisije CO₂, zbog snage isporuke električne energije te zbog vraćanja uloženog.

Conductor Information	Base Conductor	Comparison Conductor #1
Type	ACSR	ACCC®
Size (Unit - Code Word)	149 mm ² 150/25 (149AL1/24-ST1A)	188 mm ² ROVINJ
Initial Sag/Tension at Above-Stringing Temperature (15 °C)		
Ruling Span (m)	277.0	277.0
% RTS	20.0	20.0
Sag at Initial Sagging Temperature (m)	5.28	3.82
Total Initial Tension at Structure at Sagging Temperature (kN)	10.7	14.2
Total Conductor Weight/phase (kg/km)	600.7	576.4
Sag/Tension at Stringing Temperature		
Sag at Peak Operating Amps		
Temp (°C)	71	64
Sag (m)	7.31	5.39
Total Structure Tension (kN)	7.8	10.1
Sag at Rated Operating Temperature		
Temp (°C)	75	180
Sag (m)	7.44	5.59
Total Structure Tension (kN)	7.6	9.7
Sag at Maximum Temperature		
Temp (°C)	100	200
Sag (m)	8.24	5.62
Total Structure Tension (kN)	6.9	9.7
Max Allowable Temperature at Sag of 9 m		
Max. Allowable Temp (°C)	100	200
Sag (m)	8.24	5.62
Total Structure Tension (kN)	6.9	9.7
Ampacity (A)	560	946

Slika 5.14. Provjes vodiča pri različitim teperaturama

I u ovom slučaju može se vidjeti prednost ACCC vodiča u odnosu na Al/Č. Na slici 5.14. je vidljivo da ACCC vodič pri različitim temperaturama ima manji provjes u odnosu na Al/Č vodič. Upravo zbog koeficijenta temperature ACCC vodiči imaju manji provjes pri većim temperaturama u odnosu na druge vodiče.



Slika 5.15. Krivulja provjesa vodiča

Na slici 5.14. prikazana je usporedna krivulja provjesa ACCC i Al/Č u odnosu na maksimalni dozvoljeni provjes, a na idućoj slici (5.15) je prikazana zatezna sila i provjes pri temperaturi od 0° C.

Wind/Ice or Cold Temperature Sag/Tension			
Temperature (°C) = -20			
Wind Pressure (Pa): = 0			
Radial Ice Thickness (mm) = 0			
Total Sag (m)	4.23	3.52	
Total Structure Tension (kN)	13.4	15.4	
% RTS	24.9	21.7	
Max. Allowable Tension (kN):	0	0	
Max. Tension (% RTS)	60.00	60.00	
Knee Point Temperature Sag/Tension			
Knee Point Temperature (°C)	100	59	
Sag (m)	8.24	5.39	
Total Structure Tension (kN)	6.9	10.1	

Slika 4.16. Karakteristike pri temperaturi 0° C i temperaturi koljena

Na slici 5.17. prikazano je određivanje maksimalne pogonske struje za isti dalekovod, ali pri temperaturi okoline od -5°C . U ovom slučaju temperatura iznosi 469 A, to jest povećala se u odnosu na slučaj s ljetnom temperaturom, dok za ACCC vodič ta struja iznosi 533 A.

Ampacity (A) at Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	(35) - 469	(35) - 533
Ampacity (A) at Temperature 2 ($^{\circ}\text{C}$)	(75) - 643	(75) - 725
Ampacity (A) at Temperature 3 ($^{\circ}\text{C}$)	(100) - 721	(100) - 810
Ampacity (A) at Rated Operating Temp ($^{\circ}\text{C}$)	(75) - 643	(180) - 1.006
Ampacity (A) at Maximum Temp ($^{\circ}\text{C}$)	(100) - 721	(200) - 1.046

Slika 5.17. Određivanje maksimalne pogonske struje pri temperaturi okoline od -5°C

6. ZAKLJUČAK

U prijenosnoj i distribucijskoj mreži svaki pojedini uređaj i dio opreme ima svoj životni vijek unutar kojega bi trebao raditi nesmetano i zadovoljiti postavljene kriterije. Ukoliko dođe do smanjenja sigurnosti i narušavanja pouzdanosti opskrbe električnom energijom, zbog čega će doći i do povećanja troškova u elektroenergetskom sustavu, u sustavu postoji veći broj dotrajalih i starih dijelova. Zbog toga što se za pojedine elemente ne može unaprijed odrediti životni vijek trajanja, određuju se očekivane veličine i na temelju njih se prati rad elemenata elektroenergetskog sustava.

U ovom radu predstavljeni su elementi električne mreže gdje je naglasak stavljen na vodiče, odnosno na nove materijale koji se koriste u prijenosnoj mreži. Uz pomoć CCP programa izvršena je usporedba ACSR vodiča i ACCC vodiča. Nakon obrade rezultat dobivenih CCP programom utvrđeno je da je primjena novih materijala, odnosno ACCC vodiča u prijenosnoj mreži u potpunosti isplativa i ekonomske i ekološke perspektive. Svi proračuni dobiveni usporedbom ova dva vodiča idu u korist novim materijalima u elektrotehnici, ACCC vodičima.

LITERATURA

- [1] Marko Delimar, Predavanja i auditorne vježbe na kolegiju Prijenos i razdjela električne energije, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2017.
- [2] Engineering Transmission Lines with High Capacity Low Sag ACCC® Conductors, CTC Global, www.ctcglobal.com, 1.7.2020.
- [3] Pravilnik o tehničkim normativima za izgradnju nadzemnih elektroenergetskih vodova nazivnog napona od 1 kV do 400 kV (Sl. list br. 65/88, NN 53/91 i 24/97)
- [4] L. Jozsa, Nadzemni vodovi, Elektrotehnički fakultet, Osijek, 2011.
- [5] L. Jozsa, Parametri nadzemnih vodova, Elektrotehnički fakultet, Osijek, 2006.
- [6] M. Ožegović, K. Ožegović, Električne energetske mreže I, Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Split, 1996.
- [7] L. Jozsa, Konstante nadzemnih vodova, Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku, Elektrotehnički fakultet, Osijek, 2005.

SAŽETAK

U diplomskom radu prikazani su različiti materijali vodiča koji se koriste kod prijenosa električne energije te njihove prednosti i mane. Naglasak je u radu stavljen na usporedbu materijala koji se inače koriste za prijenosne dalekovode s kompozitnim visokotemperaturnim vodičima. Mogućnost opteretivosti prijenosne mreže i njezine karakteristike su najvažniji faktor koji kod prijenosa snage do krajnjeg potrošača utječe na normalan rad elektroenergetskog sustava. U radu je opisan postupak mehaničkog proračuna vodiča uz različite atmosferske prilike sukladno području na kojemu se dalekovod nalazi. U radu je uz primjenu teorijskog djela te uz pomoć CCP programa napravljena usporedba dvaju vodiča, ACSR i ACCC.

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

ABSTRACT

In the final paper there are shown different conductor materials used for transmission of electricity and their advantages and disadvantages. Comparison of materials normally used for transmission lines and high temperature low sag conductors is made. Transmission network characteristics and capacity are factors that affect power transmission to the end user of electricity and normal operation of power system. The final paper describes procedure of mechanical calculation of conductors with different atmospheric conditions in accordance with the area in which the transmission line is located. The paper compares two conductors, ACSR and ACCC, with the application of a theoretical work and with the help of the CCP program.

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

ŽIVOTOPIS

Antonela Jokić rođena je 20. kolovoza 1995. godine u Slavonskom Brodu. Osnovnu školu završila je u Gunji 2010. godine. Iste godine upisuje Opću gimnaziju u Županji koju završava 2014. te nakon završene srednje škole upisuje preddiplomski studij elektrotehnike u Osijeku. Nakon završetka preddiplomskog studija 2017. godine upisuje diplomski studij na istom fakultetu, smjer elektroenergetski sustavi.

Studentica:

Antonela Jokić

PRILOZI

Prilog 1. Prijevod informacija dobivenih CCP programom

30 year differences of using comparison conductor – tridesetogodišnja razlika u korištenju usporednog vodiča

Absorptivity - apsorptivnost

AC resistance - izmjenični otpor

Aluminum area - područje aluminijske površine

Ambient temp. - temperatura okoliša

Ampacity at maximum temp - kapacitet pri maksimalnoj temp

Ampacity at rated operating temp - kapacitet pri nazivnoj radnoj temp

Ampacity at temperature - kapacitet na temperaturi

Base Conductor - osnovni vodič

CO₂ emissions from line losses - emisija CO₂ zbog gubitaka na vodovima

Comparison conductor - usporedni vodič

Conductor Information – informacije o vodiču

Cost of generation capacity - trošak proizvodnog kapaciteta

Cost of line losses - cijena gubitaka na dalekovodu

Day of month - dan u mjesecu

DC resistance - istosmjerni otpor

Diameter - promjer

Difference in capital cost of capacity vs base conductor - razlika u kapitalnim troškovima kapaciteta u odnosu na osnovni vodič

Difference in first year CO₂ generated vs base conductor - razlika u prvoj godini generiranog CO₂ u odnosu na osnovni vodič

Difference in first year CO₂ value vs base conductor - razlika u vrijednosti CO₂ u prvoj godini u odnosu na osnovni vodič

Difference in first year line losses vs base conductor - razlika u gubicima na dalekovodu u prvoj godini u odnosu na osnovni vodič

Difference in generation capacity vs base conductor - razlika u proizvodnom kapacitetu u odnosu na osnovni vodič

Elevation - nadmorska visina

Emissivity - emisivnost

Environmental information - informacije o okolišu

Equivalent number of cars removed from highway by use of comparison conductor - ekvivalentan broj automobila uklonjenih s autoceste pomoću usporednog vodiča

Equivalent number of homes powered by use of comparison conductor - ekvivalentan broj domova napajanih pomoću usporednog vodiča

First year differences of using comparison conductor - razlika korištenja usporednog vodiča nakon godine dana

First year line loss savings vs base conductor - uštede na gubicima u prvoj godini u odnosu na osnovni vodič

First year line losses - gubici na dalekovodu u prvoj godini

Generation capacity required to supply line losses - kapacitet proizvodnje potreban za opskrbu gubitaka na vodovima

Green house gas emissions – emisija stakleničkih plinova

Initial sag – početni provjes

Latitude (neg=South) – geografska širina

Line loss savings per meter of conductor vs base conductor - uštede gubitaka na dalekovodu po metru vodiča u odnosu na osnovni vodič

Max allowable temperature at sag of 10 m – maksimalna dozvoljena temperatura pri provjesu od 10 m

Month - mjesec

Rated strength - nazivna snaga

Ruling span – idealni raspon

Sag at initial sagging temperature - provjes na početnoj temperaturi

Sag at maximum temperature – provjes pri maksimalnoj temperaturi

Sag at peak operation amps - provjes na vršnim radnim kapacitetima

Sag at rated operating temperature - provjes pri nazivnoj radnoj temperaturi

Size - veličina

Solar radiation - solarno zračenje

Steady-state temperature at peak ampacity - stacionarna temperatura pri vršnom kapacitetu

Sun radiation- sunčevo zračenje

Tension at above-stringing temperature - napetost pri temperaturi

Time - vrijeme

Total conductor weight/phase - ukupna težina / faza vodiča

Total initial tension at structure at sagging temperature – ukupna početna napetost na strukturi pri temperaturi provjesa

Type - tip

Value of CO₂ - vrijednost CO₂

Weight - težina

Wind angle - kut vjetra