

SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET U RIJECI

Stručni studij elektrotehnike

Završni rad

MEHANIČKI PRORAČUN VODIČA

Rijeka, rujan 2015.

Nikica Brkić

0069047802

SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET U RIJECI

Stručni studij elektrotehnike

Završni rad

MEHANIČKI PRORAČUN VODIČA

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

Rijeka, rujan 2015.

Nikica Brkić

0069047802

TEHNIČKI FAKULET

Povjerenstvo za završne ispite
preddiplomskog stručnog studija elektrotehnike
Br.: 602-04/15-14/41
Rijeka, 06.03.2015.

Z A D A T A K
za završni rad

Pristupnik: Nikica Brkić

Matični broj: 0069047802
Lokalni matični broj: 10800027

Naziv zadatka: **MEHANIČKI PRORAČUN VODIČA**

Naziv zadatka na
engleskom jeziku: **MECHANICS ANALYSIS OF OVERHEAD LINES**

Sadržaj zadatka:

Osnovno o nadzemnim vodovima. Definicija parametara za mehanički proračun vodiča.
Horizontalni raspon. Kosi raspon. Dodatno opterećenje vodiča. Utjecaj vjetra. Izraditi
montažne tablice za jedno zatezno polje od minimalno 5 raspona.

Zadano: 17.03.2015.

Mentor:



V. pred. mr. sc. Marijana Živić-Đurović

Predsjednica Povjerenstva:



Izv. prof. dr. sc. Vera Gradišnik

Zadatak preuzeo dana: 17.03.2015.



(potpis pristupnika)

Dostaviti:

- Predsjednica Povjerenstva
- Mentor
- Djelovođa Povjerenstva
- Evidencija studija
- Pristupnik
- Arhiva Zavoda

IZJAVA

Sukladno s člankom 9. PRAVILNIKA o završnom radu, završnom ispitu i završetku stručnih studija Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, od lipnja 2011., izjavljujem da sam samostalno izradio završni rad prema zadatku br. 10800027 od 17.03.2015.

Rijeka, 15.09.2015.

Nikica Brkić

Sadržaj

1. Uvod	1
2. Nadzemni elektroenergetski vodovi	2
2.1. Vod i njegovi elementi	2
2.1.1. Vodiči	4
2.1.2. Izolatori	12
2.1.3. Pribor	15
2.1.4. Stupovi	18
2.1.5. Temelji	23
2.1.6. Zaštitni vodič i uzemljenje	25
3. Mehanički proračun vodiča	26
3.1. Definicija parametara za mehanički proračun vodiča	27
3.2. Proračun provjesa vodiča	34
3.3. Proračun duljine vodiča	36
3.4. Proračun naprezanja vodiča	37
3.4.1. Matematički modeli za jednadžbu stanja	38
3.4.2. Određivanje stanja najvećeg naprezanja po kriteriju kritičnog raspona	39
3.4.3. Određivanje stanja najvećeg provjesa provjesa po kriteriju kritične temperature	40
3.5. Izrada montažne tablice za zatezno polje od 5 raspona	41
4. Zaključak	64
5. Literatura	65
6. Popis oznaka i kratica	66

1. UVOD

Ovaj završni rad se bavi izradom mehaničkog proračuna vodiča, točnije vodiča nadzemnih vodova (dalekovoda). U prvom dijelu rada će se govoriti općenito o nadzemnim vodovima i njihovim podjelama. Zatim će se govoriti o elementima od kojih su sastavljeni te o materijalima od kojih su izgrađeni. Svakom elementu će se posvetiti posebna pažnja.

U drugom dijelu rada se definiraju parametri mehaničkog proračuna vodiča. Govorit će se o utjecaju temperature na parametre voda, a potom i o utjecaju dodatnog opterećenja koje uzrokuje led i snijeg koji se zimi može nakupiti na vodiču. Bit će riječi i o utjecajima vjetra na vod. Definirat će se proračun provjesa vodiča, proračun duljine voda i proračun naprazanja vodiča.

U trećem dijelu će se napraviti mehanički proračun vodiča. Izradit će se montažna tablica za zatezno polje od 5 raspona. U montažnu tablicu ulaze rezultati proračuna horizontalne komponente naprezanja za određene temperature, horizontalne sile za te iste odabrane temperature te rezultati proračuna duljine provjesa.

2. NADZEMNI ELEKTROENERGETSKI VODOVI

2.1. Vod i njegovi elementi

Pod pojmom nadzemni elektonenergetski vod mislimo na zračne neizolirane vodiče obješene na stupove, tj. jedina izolacija između aktivnog vodiča kojim teče struja i okoline je zrak. Takav vodič je i do nekoliko puta jeftiniji po jedinici duljine za određenu udaljenost od kabela, pa se kabeli koriste samo onda kad za to postoje valjani tehnički razlozi, npr. povezivanje otoka, blizina uzletišta ili unutar urbanih gradskih područja.

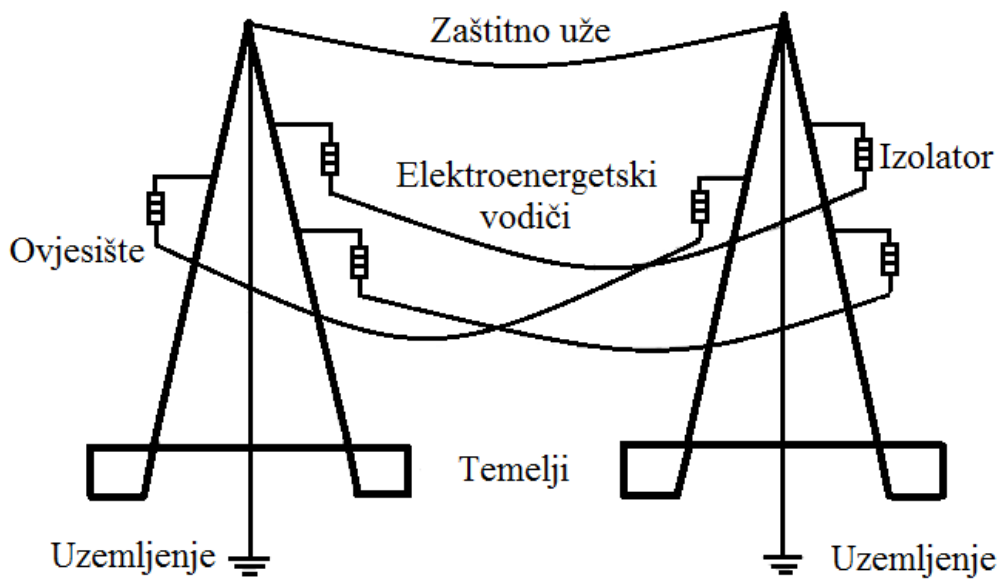
Važno je i spomenuti vrijeme trajanja popravka koje je višestruko na strani nadzemnih vodova. Naime, za popravak nekog banalnog kvara na visokonaponskom plinskom kabelu može potrajati i do 30 dana, dok bi popravak sličnog problema na nadzemnom vodu trajao tek jedan dan.

Nadzemni vodovi mogu se podjeliti po:

- Nazivnom naponu voda
- Broju strujnih krugova (trojki)
- Materijalu i konstrukciji stupova

Osnovni elementi (dijelovi) nadzemnih vodova su:

- Vodiči
- Stupovi
- Izolatori
- Spojni, ovjesni i zaštitni pribor
- Zaštitni vodiči
- Uzemljenje
- Temelji



Slika 2.1. Osnovni dijelovi nadzemnog voda

2.1.1. Vodiči

Uloga vodiča kao jedinog aktivnog dijela voda je voditi električnu struju. Vodič je zbog prolaza električne struje termički opterećen, a kako je obješen između dva stupa zbog vlastite težine je opterećen i na vlak. Stoga materijal od kojeg je vodič izgrađen mora imati dobra električna i mehanička svojstva, a uz to mora biti lako obradiv, otporan na koroziju, oštećenja i starenje te mora biti i povoljne cijene.

Materijali za izradu vodiča nadzemnih vodova:

Danas najčešće upotrebljavan materijal za izradu nadzemnih vodova je aluminij (Al). Iako je slabih električnih svojstava od bakra puno se više koristi zbog svoje prihvatljive cijene i tri puta manje težine. Problem aluminija je u slabim mehaničkim svojstima, naime osjetljiv je na mehanička oštećenja i koroziju stoga se koristi u obliku slitina ili u kombiniranim vodičima u kombinaciji s čelikom. Čelik ima vrlo loša električna svojstva, ali zato odlična mehanička. Kombinacija aluminij-čelik se kod nas naziva alučel. Alučel je vodič koji ima jezgru od čelične žice ili užeta, a za omotač ima aluminijske žice. Čelik preuzima mehanička opterećenja, a aluminij se koristi kao vodič električne struje. Alučel je u Hrvatskoj najčešći materijal za izradu nadzemnih vodova.

Tablica 2.2.1. Usporedba svojstava materijala

	Specifična vodljivost $[\frac{S}{m} \times 10^6]$	Specifična masa $\gamma [\frac{kg}{m^3} \times 10^6]$	Prekidna čvrstoća $\sigma_p [\frac{daN}{mm^2}]$
Bakar	56	8,9	40
Aluminj	34,8	2,7	17-19
Bronza	48-18	8,56-8,9	50-70
Aldrej	30	2,7	30
Čelik	7-8	7,8	40-150

Bakar-čelik		8,25	60-108
Alučel (6:1)		3,45	17/120
Aldrej-čelik		3,45	30/120

U SAD-u se koristi izvedba Copperweld, odnosno čelična žica obložena bakrom, ali u Europi se nije ustalila u upotrebi.

Izvedbe vodiča nadzemnih vodova:

Vodiči mogu biti izvedeni od pune žice (homogene i nehomogene), sukanih vodiča, tj. užeta (homogenog ili kombiniranog), antivibracijske izvedbe, snopova, izoliranih vodiča te tkz. učinkovitih vodiča.

Izvedba od **pune žice** (Slika 2.2. [1]) se koristi samo u niskonaponskoj mreži, s malim presjekom i malog raspona. Najčešće je izgrađena od bakra, presjeka 16 mm^2 i raspona do 80 m. Upotreba žice od aluminija i aldreja je zabranjena zbog njihovih slabih mehaničkih svojstava.



Slika 2.2. Homogena bakrena žica i kombinirani Copperweld vodič

U izradi nadzemnih vodova najčešće se koriste **sukani vodiči**, a najviše kombinirano užo napravljeno od alučelika 6:1. Sukani vodiči imaju veću elastičnost i prekidnu čvrstoću te manju osjetljivost na

utjecaje vjetra od vodiča od pune žice. Homogeni sukani vodič izvodi se tako da se žice omotavaju u slojevima oko najčešće jedne žice napravljene od istog materijala. Kod normalne izvedbe sve su žice istog presjeka. Broj žica u svakom sloju je točno određen formulom:

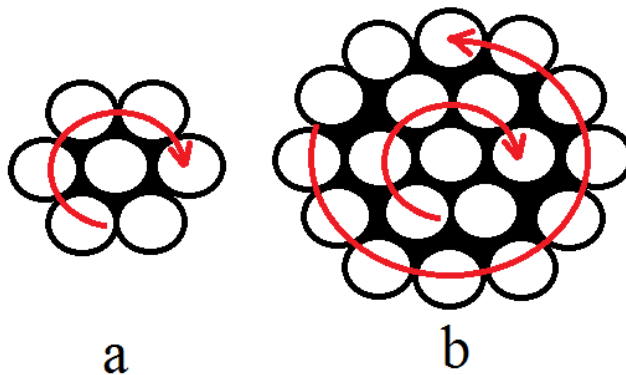
$$n = 3x^2 - 3x + 1 \quad (2.1.)$$

gdje je:

n – ukupni broj žica,

x – broj slojeva.

Kako se žice spiralno sukaju u užu, žice su 2-3% dulje od dužine užeta. Faktor punjenja je približno 75-79%. Standardni presjeci užeta su 10, 16, 25, 35, 70, 95, 120, 150, 185, 240, 300 mm². Stvarni presjeci se nešto razlikuju od nazivnih.



Slika 2.3. Homogeno uže s označenim smjerom sukanja žica: a) sa 7 žica, b) s 19 žica

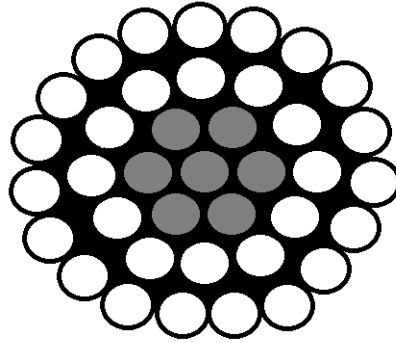
Kombinirani vodiči se radu tako da se oko jedne ili više žica sukaju žice koje će činiti jezgru, a zatim se na njih sukaju žice drugog presjeka i/ili različitog materijala.

Tablica 2.2.2. Izvedbe kombiniranih sukanih vodiča

Vodič	Jezgra
Aluminij	Čelik
Aluminij	Alumoweld
Aldrey	Čelik
Bakar	Čelik
Bakar	Bronza
Bakar	Copperweld

Kombinirani sukani vodiči od alučela 6:1 izvode se u presjecima:

- 16/2,5 - 50/8 - 150/25
- 25/4 - 70/12 - 185/32
- 35/6 - 95/15 - 210/40...



Slika 2.4. Kombinirani sukani vodič alučel Al/Č 2,2 : 1

Uz izvedbe od pune žice i sukanih žica postoje još i specijalne izvedbe vodiča kao što se antivibracijska izvedba, šuplji vodiči te prošireni.

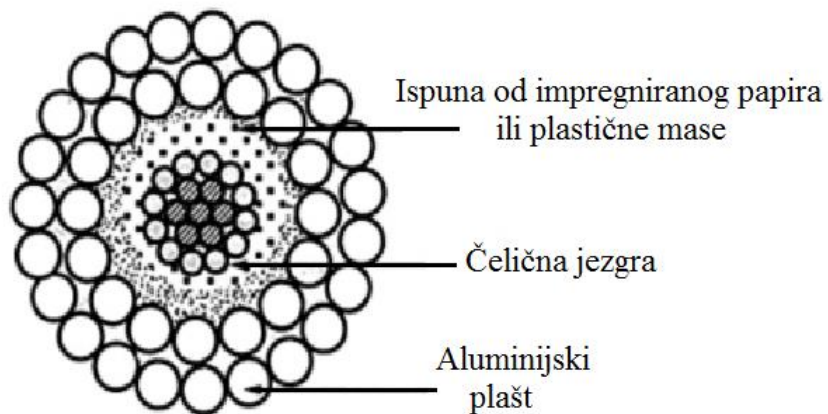
Kod **antivibracijske izvedbe** užeta čelična jezgra je slobodna unutar aluminijskog plašta. Kod montaže takvog užeta posebno se zateže aluminijski plašt, a posebno čelična jezgra. Tako postignemo da plašt i jezgra ne vibriraju na istoj frekvenciji i na taj se način vibracije prigušuju.

Šuplji vodiči (Slika 2.5. [2]) se koriste kod najviših napona. Vrlo su ekonomični jer uz potreban presjek imaju veliki promjer te na taj način sprečavaju nastajanje korone. Često se rade od sukanih žica bakra sa eventualno spiralnim umetcima.



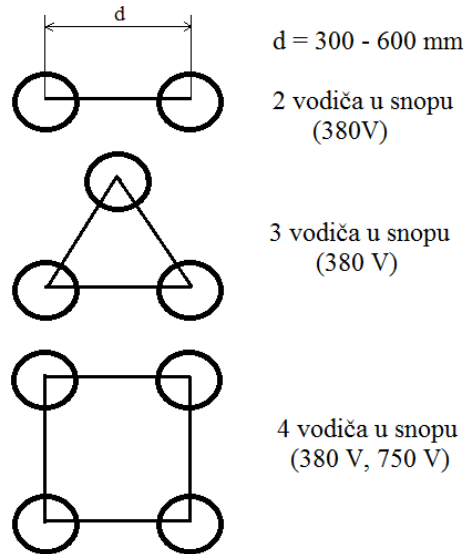
Slika 2.5. Šuplji vodič: Tip HH tvrtke General Cable promjera 3,55 cm korišten za prijenos 287,5 kV preko pustinje Mohave

Prošireni (ekspandirani) vodič (Slika 2.6. [3]) je građen tako da se između jezgre i plašta umeće neki materijal, često impregnirani papir ili plastične mase. Takav vodič rješava probleme korone i vibracija.



Slika 2.6. Prošireni vodič

U Europi kod mreža visokog napona promjer vodiča svake faze se ipak radije prividno povećava povezivanjem 2, 3 ili 4 užeta u jedan **snop** kako bi se povećala prijenosna moć voda i sprečavila pojava korone. Razmak između užadi u snopu se održava odstojećima o kojima će biti više riječi napisano u poglavlju 2.1.3.



Slika 2.7. Vodove izvedeni od snopova vodiča

Na kraju kad uzmemo u obzir sva nabrojana svojstva bakrena užad pri istoj vodljivosti imaju samo jednu prednost pred aluminijskim, a to je manja horizontalna sila uslijed manje površine izložene vjetru. To znači da će biti i manje horizontalno opterećenje stupova u smjeru okomitom na trasu voda. Uz to imaju i veću težinu pa otklon vodiča pri udaru vjetra će biti manji, što znači da međusobni razmak između vodiča može biti manji. Ostala svojstva idu u prilog aluminijskoj grupi užadi. Zbog manje težine imaju manje vertikalne sile i manje provjese pa mogu imati niže stupove, a zbog većeg promjera imaju manju pojavu korone. **Korona** je tinjavo izbijanje oko vodiča koje nastaje kad jakost električnog polja u blizini vodiča prekorači električnu čvrstoću zraka.

Izolirani vodiči imaju aluminijsko uže s izolacijom od umreženog polietilena. Koriste se u srednjenaponskim (SN) i niskonaponskim mrežama (NN). Prednost voda izrađenog od izoliranih vodiča je što faze voda mogu biti međusobno manje udaljene. U NN mreži fazni vodiči i nulti vodič formiraju se u samonosivi kabelski snop (SKS) koji se može montirati na stup bez dodanih izolatora.

Učinkoviti vodiči se dijele na:

- **Vruće vodiče** – podnose temperature do 150° C za razliku od konvencionalnih koji podnose temperature do 80° C.
- **Kompaktne vodiče** – Gap vodiči – vodiči sa utorom ili provjesni vodiči
- **Crne vodiče** – Al/Č vodič koji je obojen crnom bojom zbog korištenja svojstva zračenja crnog tijela da bi bolje odpuštao toplinu nastalu uslijed gubitaka u vodiču.
- **OPGW** – vodiči sa svjetlosnim nitima

2.1.2. Izolatori

U načelu duž nadzemnog voda jedina izolacija između voda i okoline je zrak. Međutim kod nadzemnog voda izolatori imaju dvostruku ulogu, ponajprije da izoliraju vodič od stupa na koji su ovješeni, ali i da mehanički drže vodiče u određenom položaju. Izolatori prenose težinu vodiča i dodatnog tereta poput leda i vjetra sa vodiča na stup pa moraju biti i otporni na mehaničke, atmosferske i kemijske utjecaje, a uz to ne smije prebrzo stariti i mora biti ekonomičan.

Izolatori na nadzemnim vodovima su najčešće rađeni od porculana. **Porculan** se dobiva pečenjem mješavine kaolina (50%), glinca (25%) i kvarca (25%). Po potrebi drugačijih svojstava mijenjamo i omjer materijala. Porculan ima izrazitu čvrstoću na pritisak, čvrstoću na vlak te probojnu čvrstoću. Zbog porozne površine premazuje se bojom da bi se zaštitio od vode i drugih vanjskih utjecaja.

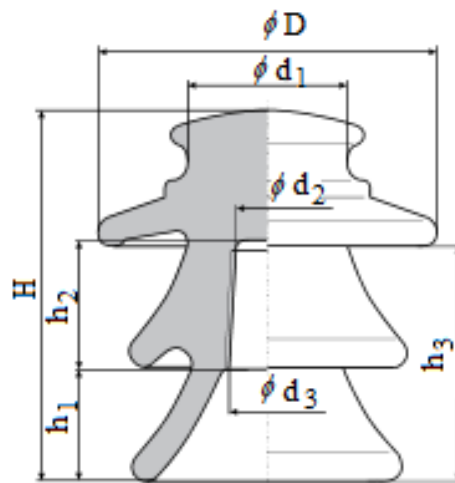
Kao izolator još se upotrebljava **steatit** zbog svoje velike mehaničke čvrstoće, **kaljeno staklo** kojem je jedina prednost pred porculanom u tom da su sva oštećenja na njemu vidljiva te razne umjetne mase kao što se silikonske gume, politetrafluoretilen (PTFE) i ostali materijali rađeni od epoksidnih smola i umjetnih guma. Prednosti izolatora rađenih od raznih guma je u njihovoj maloj težini i visokoj elastičnosti.

Konstrukcija izolatora se sastoji od izolacijskih i metalnih elemenata. Dije se po načinu nošenja vodiča na dvije vrste, na potporne (zvonaste) i ovjesne (lančaste, masivne, štapne)

Potporni izolatori (Slika 2.8 [4]) kruto učvršćuju vodič za stup te na taj način sile izravno prenose s vodiča na stup. Danas se koriste za napone od 0,4 kV do 35 kV.

Glavni tipovi potpornog izolatora su:

- HD – preuzima samo naprezanje na pritisak. Ima nižu probojnu čvrstoću.
- VHD
- HW
- VHW



Slika 2.8. VHD izolator

Ovjesni izoatori se još nazivaju lančasti jer su sastavljeni od članaka spojenih u lance. Što se više članaka poveže, to mu je veća električna čvrstoća. Oni zglobno učvršćuju vodiče.

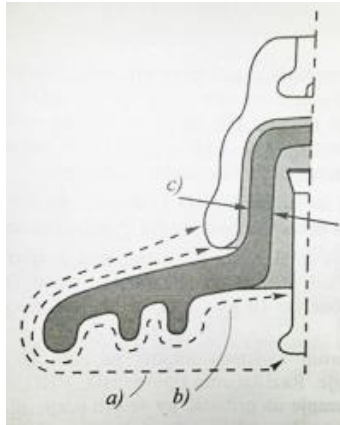
Osnovni tipovi ovjesnih izolatora su:

- Kapasti izolatori (K)
- Masivni izolatori (VK)
- Štapni izolatori (L)

Danas se najviše upotrebljavaju **kapasti izolatori (K)**. Izrađuju se tako da se na porculansko ili stakleno tijelo s gornje strane zacementira kapa napravljena od pocinčanog željeza, a s donje strane je usađen batić napravljen od pocinčanog željeza pokriven olovnom legurom, kitom ili cementom tako da je porculan pod pritiskom što umanjuje njegovu probojnu čvrstoću.

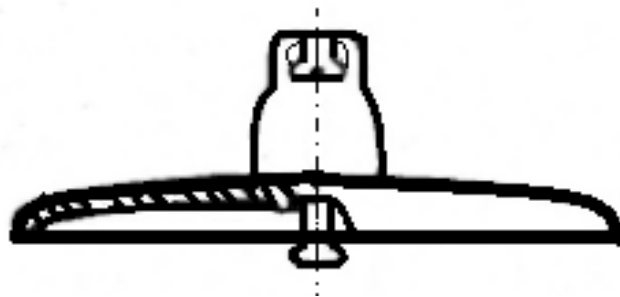
Masivni izolatori (VK) se rade tako da se na tijelo od steatita nataknu dvije metalne kape. Kod njih je tijelo opterećeno na vlak. Ovakvi izolatori imaju veću probojnu čvrstoću.

Štapni izolatori (L) se izrađuju od steatita ili od umjetnih materijala. Tijelo izolatora je opterećeno na vlak. Nešto su kraći od K i VK izolatora pa visina stupa može biti manja. Kod nas se nalaze samo na starim vodovima. Pucanje ovakvog izolatora dovodi do pada vodiča na tlo.



Slika 2.9. Dimenzije izolatora odlučne za električna svojstva: a) preskočna staza; b) duljina kliznih struja; c) dužina staze probaja.

Na slici 2.9. [5] su prikazane najvažnije geometrijske karakteristike ovjesnih i potpornih izolatora. Kako se je željelo izolatore učiniti što otpornima na atmosferska onečišćenja povećavao im se broj rebara, a i rebara su postajala sve veća. Međutim, nakon nekog vremena upotrebe izolatora sa više rebara shvatilo se da se atmosferska onečišćenja puno više zadržavaju na donjim rebrima izolatora jer ih kiša ne može oprati, stoga su se razvili novi **aerodinamični izolatori**. Aerodinamični izolatori su karakteristični po tome što imaju široku kapu i potpuno glatku donju stranu. Na taj način se povećava dužina kliznih struja, a na potpuno glatkoj donjoj strani se ne zadržavaju nečistoće.

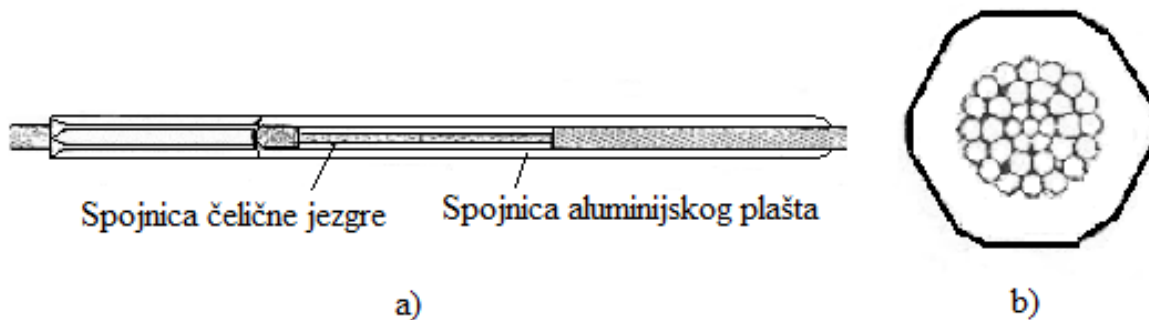


Slika 2.10. Aerodinamički izolator

2.1.3. Pribor

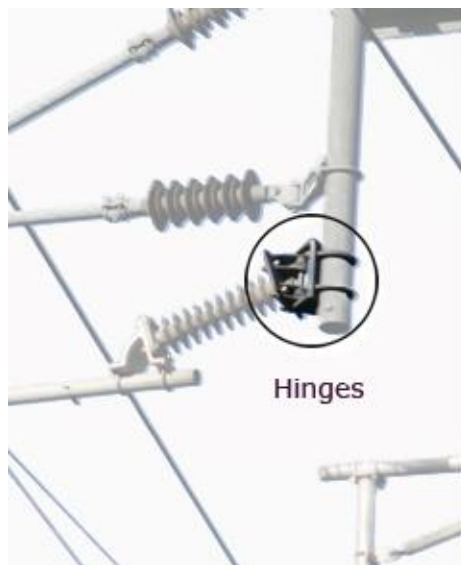
Pribor u nadzemnim vodovima dijelimo na **spojni, ovjesni i zaštitni**. Funkcija spojnog pribora je da omogućava protok električne energije. Ovjesni pribor ima ulogu povezivanja izolatora i vodiča sa stupom. Zaštitni pribor ima više zaštitnih uloga, npr. otklanjanje električnog luka i zaštita od vibracija.

Pojedini pribor ima višestruku ulogu, kao npr. **spojnice i stezaljke** koje mogu imati električnu i mehaničku funkciju. Stezaljke i spojnice mogu biti vijčane, zakovične, zarezne i **kompresijske**. U upotrebi su najčešće kompresijske zbog svoje visoke kvalitete i pouzdanosti. Međutim, mana im je što se ne mogu demontirati. Najviše se koriste na vodovima od 110 kV. Konstruirane su tako da izdrže potrebna mehanička i električna opterećenja te tako da se pri izlazu iz stezaljke ne dogodi plastična deformacija vodiča.



2.11. Kompresijska spojnica: a) Uzdužni presjek b) Poprečni presjek

Za postavljanje izolatora na stup koristi se ovjesni pribor, kao što su zastavice, stremeni i škopci. Stremeni i škopci se više ne koriste zbog prevelikih nedostataka tako da ih se danas može vidjeti jedino na starim vodovima. Danas se uglavnom koriste **zastavice** (Slika 2.12. [6]).



2.12. Zastavica (*hinge*), tvrtke Jones Nuttall Ltd

Predstavnici zaštitnog pribora su rogovi, prstenovi, prigušivači vibracija, odstojnici i utezi.

Uloga **rogova i prstenova** je da otklanjaju električni luk u blizini izolatora, a prstenovi još imaju dodatnu funkciju oblikovanja električnog polja.

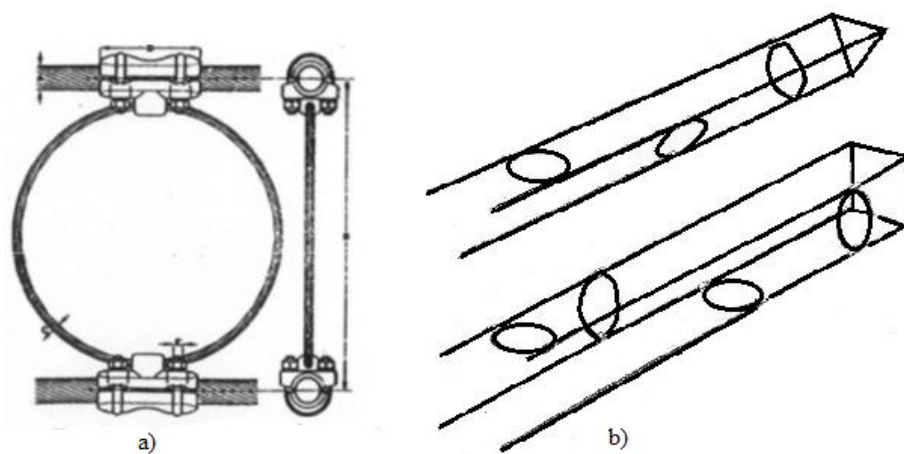
Svrha **prigušnika vibracija** je da spriječe zamor materijala vodiča u stezaljci koji nastaje uslijed vibracija. U Hrvatskoj se najviše upotrebljava prigušivač Stockbridge.



2.13. Prigušivač vibracija Stockbridge

Odstojnici (rastojnici) (Slika 2.14. [7]) imaju svrhu održavanja minimalnog razmaka i geometrijskog rasporeda uzduž raspona između dva vodiča u snopa. Zbog vremenski neprilika kao

što su vjetar i led, ili pri djelovanju struja kratkog spoja razmaci i geometrijski raspored mogu biti promjenjeni. Broj i raspored odstoynika ovisi o dužini raspona.



2.14. a) Odstojnik, b) Odstojnici u snopu od 3 i 4 vodiča

2.1.4. Stupovi

Stupovi su konstrukcije koje nose vodiče, izolatore i zaštitnu užad. Svojom visinom odvajaju vodiče od tla. Stupovi su mehanički opterećeni.

Stupovi se dijele prema:

1) poziciji u trasi voda na:

- Linijske – ravno posloženi u vertikalnoj projekciji trase voda
- Kutne – smješteni u točke loma vertikalne projekcije trase voda

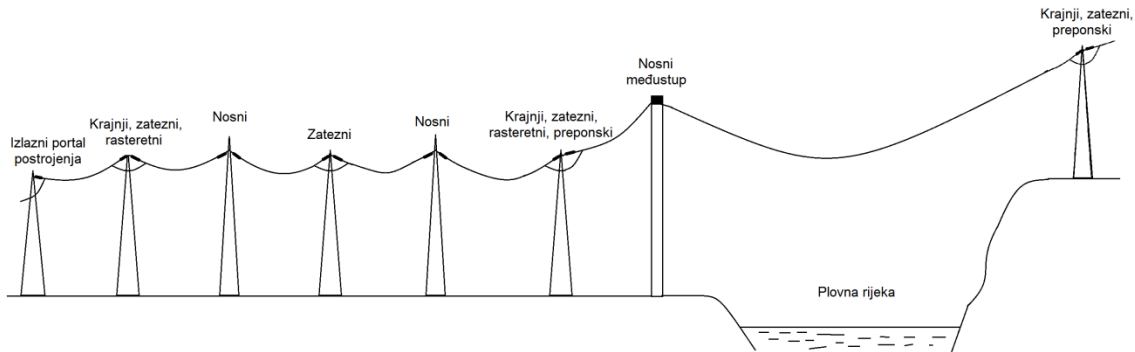
2) načinu zavješanja vodiča na:

- Nosne – imaju nosne izolatore i izolatorske lance. Na njih djeluju samo vertikalne sile opterećeja. Horizontalne sile koje djeluju na njih se poništavaju.
- Zatezne – imaju zatezne izolatore i izolatorske lance. Na njih djeluju horizontalne i vertikalne sile.

3) posebnim funkcijama na :

- Rasteretne stupove – moraju izdržati jednostrani prekid svih vodiča
- Krajnje stupove – stup koji se stavlja na oba kraja voda prije njegovog spajanja s rasklopnim postrojenjem.
- Preponske stupove – nije opterećen jednako s obe strane zbog drugačijeg presjeka ili zbog drugačijeg maksimalnog dozvoljenog naprezanja vodiča
- Međustupove – implementiraju se u preponsko zatezno polje da bi se dosegla željena visina vodiča
- Križišne stupove – stupovi pogodni kao čvorište s drugim vodom
- Prepletene stupove – na njima se izvodi preplitanje voda radi postizanja električne simetrije voda

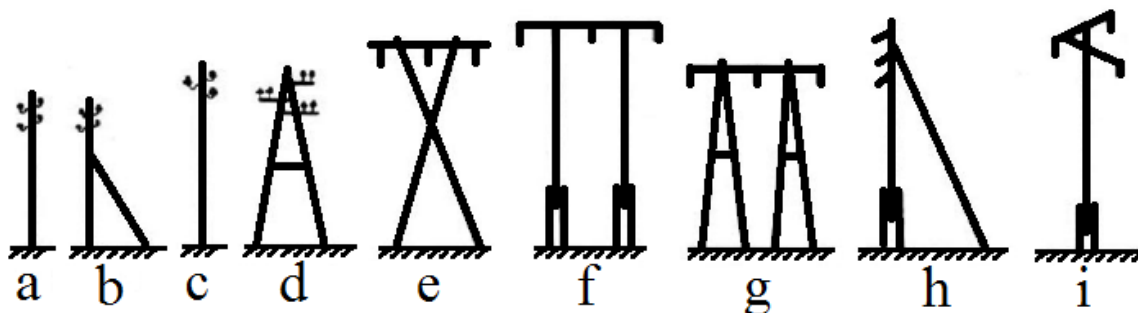
Područje između dva zatezna stupa zove se **zatezno (otponsko) polje**. Zatezno polje služi lokalizaciji oštećenja kod moguće havarije. Zatezno polje ne smije biti duže od 30 raspona, odnosno 8 km, a nastoji se da ne bude kraće od 3 km jer su zatezni stupovi bitno skuplji od nosnih.



2.15. Stupovi u trasi dalekovoda

Stupovi se grade od drva, čelika i armiranog betona.

Drvo se može koristiti do napona od 220 kV, ali ipak njihova primjena je najčešća u mrežama srednjeg i niskog napona. U Hrvatskoj drvo se najviše koristi u mrežama niskog napona i u 10 kV mreži, nešto manje u 20 kV mreži. Najveća prednost drva kao materijala u gradnji stupova je u njegovoj brznoj montaži, maloj težini i niskoj cijeni u izgradnji. Ipak zbog svoje slabe trajnosti su skupi u pogonu. Trajnost im se može povećati postupkom impregnacije. Najkvalitetnije vrste drva koja se koriste u gradnji stupova su redom pitomi kesten, bor, jela i smreka, a hrast se koristi samo za neke dijelove stupa.



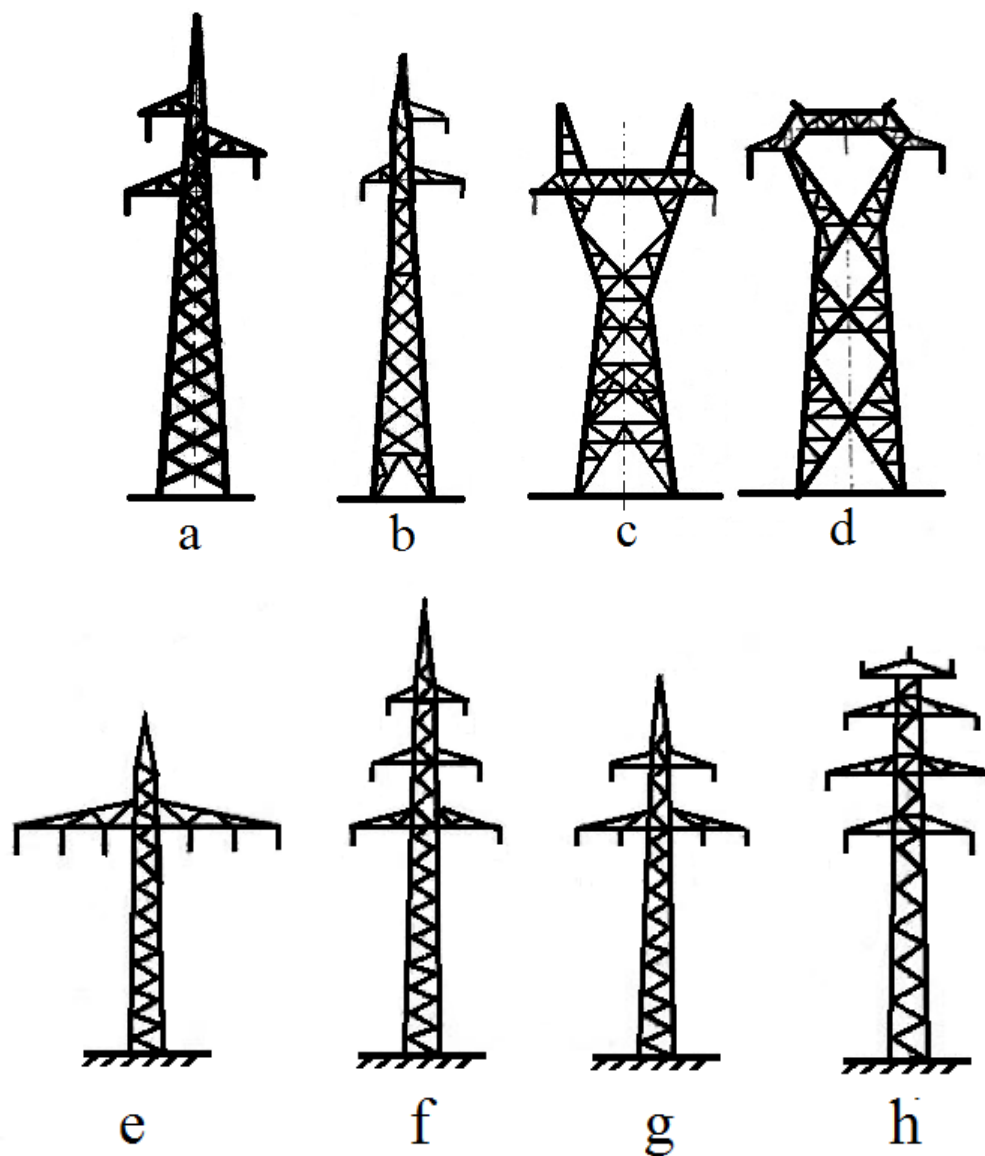
2.16. Tipične siluete drvenih stupova

a) Niskonaponski, kutni; b) Niskonaponski, linijski; c) 10-20 kV, linijski; d) 10-20 kV, kutni A-stup; e) 35 kV, nosni X-stup; f) 110 kV, nosni, portal; g) 35-110 kV, zatezni, kutni, dvostruka piramida; h) 35 kV, kutni, usidreni jarbol (igla); i) 35-10 kV, nosni

Najčešći materijal u gradnji dalekovodnih stupova je **čelik**. Za vodove od 35 kV na više se gotovo isključivo koriste stupovi građeni od čelika. U izradi stupa koriste se čelični L profili, željezne cijevi i željezni limovi. Postoje dvije osnovne izvedbe čeličnog stupa, rešetkasta konstrukcija od profilnog čelika te cijevasta konstrukcija od limova.

Rešetkasta konstrukcija ima četiri kutna čelična štapa (pojasnika) koji preuzimaju veći dio tereta. Štapovi su međusobno učvršćeni pomoću dijagonalnih štapova (dijagonalama). Elementi stupa se spajaju vijčano, varom ili zakovično.

Cijevkaste konstrukcije od lima se koriste u niskonaponskoj i srednjenaponskoj mreži. Mana im je veća osjetljivost na koroziju. Da bi ih se zaštitilo od korozije koristi se skupi nehrđajući čelik ili se konstrukcija pocinčava ili premazuje antikorozivnim premazima.

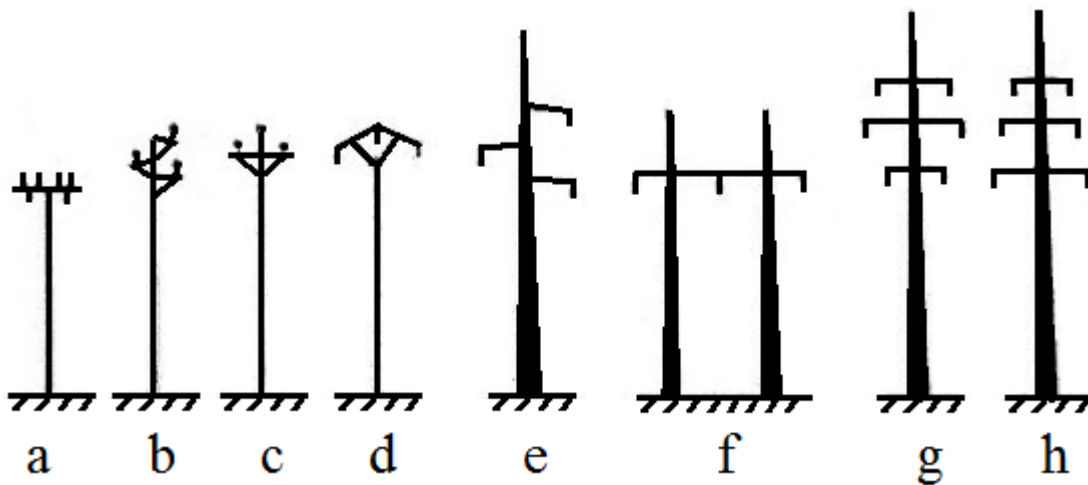


2.17. Tipične siluete čeličnorešetkastih stupova:

a) Jela; b) Modificirana jela; c) Y – stup; d) Mačka; e) Horizontalni raspored vodiča; f) Dvostruka jela; g) Dunav; h) Bačva

Armirani beton se koristi daleko manje od čelika ali je također solidno rješenje za izradu dalekovodnih stupova. Odlikuje ih velika trajnost bez potrebe za održavanjem. Sadrže upola manje čelika nego čelična izvedba stupa, ali je zato znatno teži. Postoji više vrsta betonskih stupova.

Centrifugirani stupovi izrađuju se u tvornici posebnim rotacijskim postupkom te se gotovi transportiraju na mjesto postavljanja. Imaju tvrdi površinu i homogenu strukturu betona. Za niske i srednje napone grade se i četvrtasti betonski stupovi također cijeli izgrađeni unutar tvornice te gotovi prebačeni na mjesto postavljanja. Veći četvrtasti stupovi građeni za veće napone lijevaju se na licu mjesta što umanjuje njihovu kvalitetu izrade.



2.18. Silete tipičnih betonskih stupova:

a) Niski napon; b) c) d) 10-20 kV; e) 35-110 kV, jela; f) 110 kV, portal; g) 35-110 kV, bačva; h) 35-110 kV, dvostruka jela

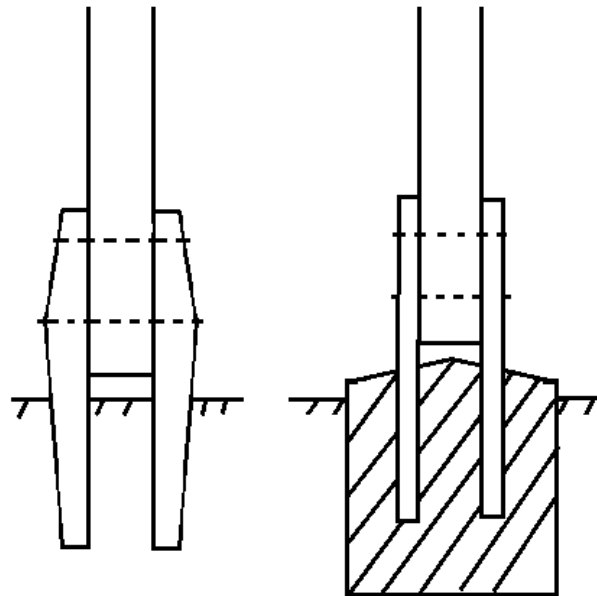
Osim navedenih materijala danas se isprobavaju i neki drugi materijali, a najviše nade se polaže u aluminijske stupove. Pokušava se stupove izraditi i od polimera ali zasad ne ispunjavaju uvjete čvrstoće i cijene.

Oblik glave i visina stupa jako ovisi o naponu mreže, ali i o materijalu izrade, broju i presjeke vodiča, broju zaštitnih užeta, načinu ovješnja vodiča i rasporedu vodičau prostoru.

2.1.5. Temelji

Temelji stupa moraju biti dovoljno čvrsti da ne dopuste pomicanje stupa i osiguraju dovoljnu stabilnost stupa pri utjecaju svih sila na stup. Osnovna uloga temelja je da sa stupa prenosi sve sile u tlo. Tada mogu biti opterećeni vertikalno prema dolje, na izvlačenje te prevrtanje. Temelji se dimenzioniraju ovisno o tipu i iznosu naprezanja, te ovisno o kvaliteti tla prema normiranim metodama Sulzberga, Kleinlogena i Bürklina.

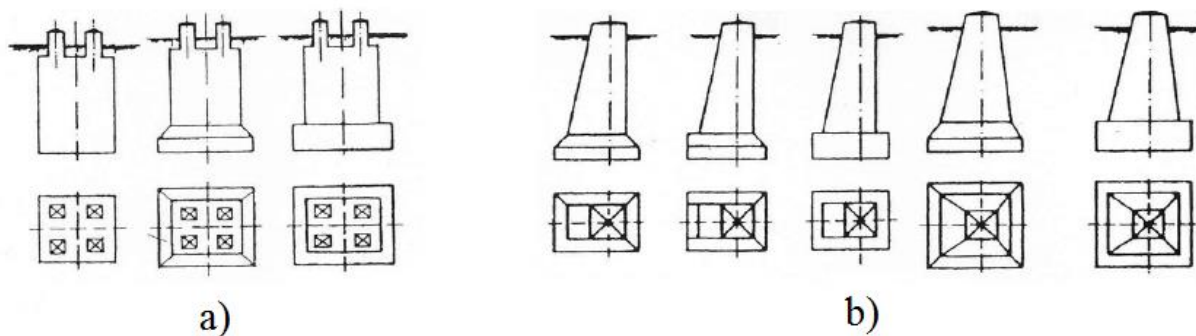
Drveni i lakši tvornički izgrađeni betonski stupovi se u pravilu mogu izravno ukopati u tlo bez izgradnje temelja, ali se tada moraju ukopati barem do jedne šestine svoje visine te minimalno na 160 cm dubine da bi se postigla željena stabilnost. Jama u koju se stup polaže ispunjava se iskopinom. Ispunjavanje jame se vrši u slojevima. Svaki nanese sloj se čvrsto nabija prije nanošenje novog sloja. Pojednim A-stupovima, drvenim portalima te piramidama se noge (balvani) povezuju temeljnim prečkama (pločama). Redovito se drveni stupovi postavljaju u betonske nogare kako bi se spriječilo propadanje drva.



Slika 2.19. Temelji drvenog stupa

a) Betonske nogare; b) Betonski temelj

Betonski ili čeličnorešetkasti stupovi moraju imati temelje da umanje pritisak na tlo. Temelji im se grade od armiranog i nearmiranog betona. Mogu se graditi kao monolitni temelji, tj. jedan temelj za cijeli stup, ali mogu se graditi i kao raščlanjeni temelj (Slika 2.20. [8]), tj. za svaku nogu poseban manji temelj. Postoji više oblika temelja za betonske i čeličnorešetkaste, a najčešći su oblik krnje piramide i pravokutne prizme.



Slika 2.20. Temelji čelično rešetkastih vodova: a) blok temelji; b) raščlanjeni temelji

2.1.6. Zaštitni vodič i uzemljenje

Svrha sustava uzemljenja je galvanski povezati nadzemni vod sa zemljom. Sustav uzemljenja se sastoji od zaštitnog užeta, uzemljivača i međusobno galvanski povezanih metalnih dijelova koji nisu pod naponom.

Glavni zadatak **zaštitnog užeta** je štititi fazne vodiče od direktnog udara groma. Uz to, zaštitno uže osigurava dovoljno nisku nultu impedanciju voda čime doprinosi pouzdanom radu zaštite kod kratkih spojeva sa zemljom (zemljospoj). Također, ostvaruje galvansku vezu između uzemljivača svih stupova i time unapređuje sustave uzemljenja svih vodova. Zaštitno uže se za svrhu zaštite vodiča od direktnog udara groma može napraviti od čeličnog užeta, ali za ostale uloge bilo bi poželjno je od bolje vodljivog materijala kao što je alučel ili alumoweld. Zaštitno uže je povezano sa uzemljivačem kod čeličnorešetkastih stupova direktno preko stupa, a kod drvenih i betonskih (ako nije uspostavljena veza preko armature stupa) stupova preko dozemnog voda postavljenog uzduž stupa.

Uzemljivači se u načelu izvode na tri načina, kao vertikalne cijevi zabijene u zemlju, kao vertikalno ukopane ploče te kao trake ukopane u zemlju. Kod dalekovoda najviše se upotrebljavaju trakasti uzemljivači ukopani u zemlji oko stupa u obliku 1-2 prstena ili u obliku 2-4 zvjezdasto položene trake oko stupa, a redovito se istovremeno postavljaju i zrakasto i prstenasto. Prije postavljanja uzemljivača radi se proračun uzemljenja uz unaprijed poznati specifični otpor tla.

3. MEHANIČKI PRORAČUN VODIČA

Mehanički proračun vodiča je sastavni dio projekta dalekovoda kojim se utvrđuje mehanička sigurnost vodiča. Preliminarni raspored stupova prikazan je na geodetskom profilu koji se izrađuje u mjerilu 1:2000 za duljinu i 1:500 za visinu. Na geodetskom profilu moraju biti naznačeni svi objekti, ceste, rijeke i stupovi nekog drugog električnog voda koji okružuju ili su unutar trase projektiranog voda. Raspored se može mijenjati i dorađivati i nakon početka radova jer se lako može naići na probleme koji su nisu prvotno pretpostavljeni unutar projekta.

Pretpostavke koje se uzimaju pri mehaničkom proračunu vodiča:

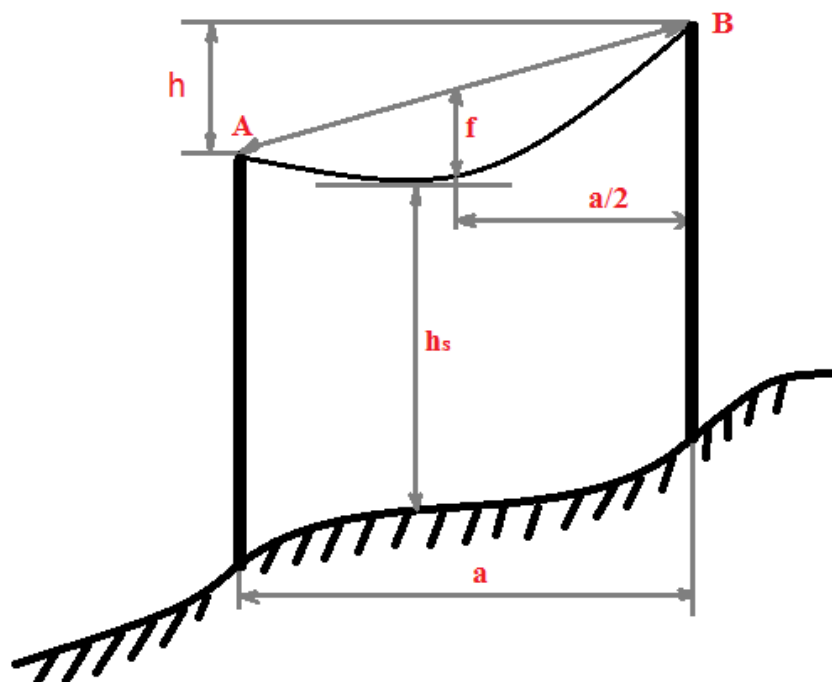
- 1) Točke ovjesišta i duljina raspona je točno definirana;
- 2) Vodič je homogen;
- 3) Vodič je potpuno gibak;
- 4) Dodatno opterećenje je cijelom dužinom voda jednolično;
- 5) Vlastita težina voda i dodatno opterećenje je orijentirano vertikalno prema dolje, a smjer vjetra je vodoravan, odnosno sila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

Točnost mehaničkog proračuna vodiča:

- 1) Vrlo točni proračun – krivulja provjesa se nadomješta elastičnom lančanicom;
- 2) Točni proračun – krivulja provjesa se nadomješta lančanicom;
- 3) **Približni proračun** – krivulja provjesa se nadomješta parabolom.

U inženjerskom projektiranju nadzemnog voda koristi se približni proračun jer je mnogo jednostavniji, a dovoljno točan za sigurnu izgradnju voda.

3.1. Definicija parametara za mehanički proračun vodiča



Slika 3.1. Vodič u rasponu

Gdje je:

a (m) – raspon

A i B – točke ovjesišta

f (m) – provjes

h (m) – visinska razlika

h_s (m) – sigurnosna visina

Raspon (a) je horizontalni razmak između dvaju susjednih stupova. Osim horizontalnog razmaka, razlikujemo još i **kosi razmak**. Kosi razmak je najkraći razmak između ovjesišta stupova između kojih postoji **denivelacija** (h). Denivelacija je visinska razlika između dva susjedna stupa postavljena na neravnom terenu. Točke ovjesišta A i B su mjesta na kojima je vodič učvršćen za stup. **Provjes**

vodiča (f) je vertikalni razmak između sredine dužine koja spaja točke ovjesišta i vodiča. Isto vrijedi i za provjes zaštitnog užeta. **Sigurnosna visina (h_s)** je najmanja dozvoljena visina između najnižeg vodiča nadznenog voda pod naponom i zemlje pri maksimalnom provjesu.

U mehaničkom proračunu vrlo važan čimbenik je **vlastita težina vodiča (G₀)** i računa se relacijom

$$G_0 = m_l \cdot g \text{ [N / m]} \quad (3.1)$$

gdje je:

m_l – jedinična masa vodiča [kg / m]

g – gravitacija i iznosi $g = 9,81$ m/s

U proračunima se redovito koriste reducirane vrijednosti. Reducirana vrijednost težine vodiča se računa relacijom:

$$g_0 = \frac{G_0}{A} \left[\frac{N}{mm^2m} \right] \quad (3.2)$$

gdje je A / mm² stvarni presjek vodiča.

U proračunu veliku ulogu ima **temperatura vodiča** i zaštitne užadi. Oznaka za temperaturu je v . Tri su ključne temperature u mehaničkom proračunu vodiča, a to su:

- 1) Minimalna temperatura za koju se vodič gradi je $v = -20^\circ \text{C}$. Minimalna temperatura je bitna zbog mehaničkog naprezanja vodiča.
- 2) Temperatura zaleđivanja odnosno temperatura pri kojoj na vodiču postoji dodatno opterećenje (led, snijeg). Temperatura zaleđivanja iznosi $v = -5^\circ \text{C}$ i važna je za mehaničko dimenzioniranje vodiča, ali i za sigurnosnu visinu jer je vodič pod težinom dodatnog tereta dodatno opterećen na vlak.

- 3) Maksimalna temperatura okoline koja iznosi $v = + 40^{\circ} \text{C}$. Važna je u određivanju sigurnosne visine jer se materijal vodiča pod utjecajem topline širi te mu se povećava provjes.

Nakon temperature dolazimo do još jednog bitnog čimbenika u mehaničkom proračunu, a to je **dodatno opterećenje vodiča**. Dodatnim opterećenjem se smatra utjecaj težine leda,inja ili snijega na vodič koja djeluje okomito prema dolje na vodič i pribraja se vlastitoj težini vodiča. Kad je vodič zaleđen ima temperaturu od $v = - 5^{\circ} \text{C}$. Razlikujemo dvije vrste dodatnog opterećenja:

- 1) **Normalno dodatno opterećenje** je maksimalno opterećenje dodatnog tereta koje se javlja na području izgradnje voda jednom u 5 godina i ne smije iznositi manje od:

$$G_{10} = 0,18 \sqrt{d} \left[\frac{\text{daN}}{\text{m}} \right] \quad (3.3)$$

gdje je d / mm promjer vodiča.

Stvarno dodatno opterećenje uslijed zaleđivanja iznosi:

$$G_l = k \cdot G_{10} \left[\frac{\text{daN}}{\text{m}} \right] \quad (3.4)$$

gdje je k koeficijent hidrometeoroloških podataka koji vrijede na području izgradnje voda.

Neke vrijednosti koeficijenta k su: $k = 1,0 - 1,6 - 2,5 - 4,0$.

Iznos reducirane težine zaleđenog vodiča je:

$$g_z = \frac{G_0 + G_l}{A} \left[\frac{\text{daN}}{\text{m mm}^2} \right] \quad (3.5)$$

- 2) **Iznimno dodatno opterećenje** je najveće dodatno opterećenje koje se javlja na mjestu izgradnje voda jednom u 20 godina i nije manje od dvostrukog normalnog dodatnog opterećenja.

$$G_{li} \geq 2 G_l \left[\frac{\text{daN}}{\text{m}} \right] \quad (3.6)$$

Idući važan čimbenik u mehaničkom proračunu vodiča je **vjetar**. Vjetar je također uzrok dodatnog opterećenja. U proračunu se uzima kao pritisak P / N

$$P = A \cdot p \cdot c \cdot \sin\alpha \text{ [N]} \quad (3.7)$$

gdje je:

A / m^2 površina,

$p / \frac{N}{m^2}$ specifični pritisak vjetra (tlak vjetra),

c koeficijent djelovanja vjetra koji za vodiče iznosi 1, a za stupove od 0.7 do 2.0,

$\alpha / ^\circ$ kut pod kojim djeluje vjetar na promatrani element.

Specifični pritisak vjetra (tlak vjetra) p se određuje formulom:

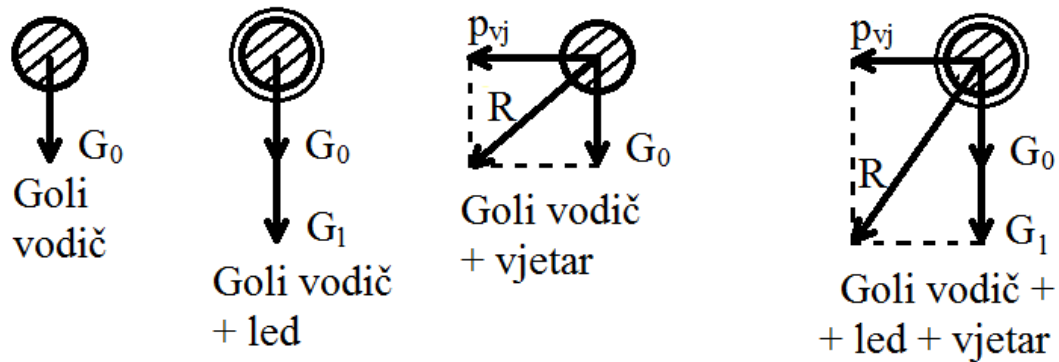
$$p = \frac{v^2}{16} \left[\frac{N}{m^2} \right] \quad (3.8)$$

gdje je $v / \frac{m}{s}$ maksimalna brzina vjetra koja se u području izgradnje voda pojavljuje u prosjeku svakih 5 godina.

Relacija 3.8. se odnosi na dijelove voda koji se nalaze u osnovnoj visinskoj zoni od 0 - 40 m nad zemljom, a tlak vjetra dobiven s njom ne smije iznositi manje od $500 \frac{N}{m^2}$. Svi veći iznosi pritiska vjetra se izjednačavaju s prvim većim iznosom iz niza: 600 – 750 – 900 – 1100 – 1300 $[\frac{N}{m^2}]$. Ako se

djelovi voda nalaze na visini od 40 – 80 m onda se iznosi pritiska vjetra izjednačavaju s prvim većim iznosom iz niza: 750 – 900 – 1100 – 1300 – 1500 [$\frac{N}{m^2}$].

Projektant je dužan unutar projekta napraviti proračun utjecaja vjetra i leda pojedinačno, no ne i istovremeno iako je dolazilo do havarija uslijed istovremenog djelovanja vjetra i leda.



Slika 3.2. Sile na vodič uslijed djelovanja leda i/ili vjetra

Iz dosad nabrojanog dolazimo do zaključka da postoje tri tipična stanja vodiča:

- 1) $v = -20^\circ \text{ C}$ bez leda
- 2) $v = -5^\circ \text{ C}$ sa ledom
- 3) $v = v_{max} \geq 40^\circ \text{ C}$

Pri stanjima 1) i 2) dolazi do maksimalnog **naprezanja** u vodiču, dok pri stanjima 2) i 3) dolazi do maksimalnog provjesa.

U normalnom pogonu pod **naprezanje vodiča** σ mislimo na zatezno (vlačno) opterećenje koje se računa na sredini raspona. Da bi odredili mehaničku čvrstoću vodiča odnosno njegovu maksimalnu opteretivost moramo vodič ispitati na kidanje:

$$\sigma = \frac{F}{A} \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (3.9)$$

Prema formuli (3.9) računamo zatezno naprezanje pri čemu je F / N vučna sila, a A / mm^2 presjek vodiča.

Pri vučnom opterećenju vodič duljine l se rastegne za produljenje Δl . Omjer produljenja i duljine zovemo relativno produljenje λ :

$$\lambda = \frac{\Delta l}{l} = \lambda_e + \lambda_t \quad (3.10)$$

gdje je λ_e elastično rastezanje, a λ_t trajno rastezanje. Razlikuju se po tome što elastično rastegnuće nestaje nakon prestanka djelovanja sile, dok trajno ostaje i nakon prestanka djelovanja sile (plastična deformacija materijala).

Modul elastičnosti vodiča E je omjer naprezanja i elastičnog rastezanja.

$$E = \frac{\sigma}{\lambda} \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (3.11)$$

Naprezanje vodiča σ dijelimo na:

- 1) Najveće naprezanje koje uže može izdržati jednu minutu, a da ne dođe do pucanja vodiča zove se **prekidna čvrstoća** i označava se σ_p .
- 2) **Normalno dopušteno naprezanje** σ_d se odnosi na horizontalnu komponentu naprezanja koju vodič ili zaštitno uže mora trajno izdržati uz prisustvo dodatnog opterećenja na $-5^\circ C$ ili

na - 20° C. Kod dvometalnih užadi iznosi 40% prekidne čvrstoće vodiča. Prekidna čvrstoća se računa kao omjer 90% računске prekidne sile i stvarnog presjeka. Za Al/Fe 6/1 normalno dopušteno naprezanje iznosi $\sigma_d = 130 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$.

- 3) **Maksimalno radno naprezanje σ_{max}** vodiča ili zaštitnog užeta je vrijednost koju horizontalna komponenta naprezanja dosegne pri normalnom dodatnom opterećenju na - 5° C ili na temperaturi od - 20° C. Maksimalno radno opterećenje ne smije biti veće od normalnog dopuštenog naprezanja. $\sigma_{max} \leq \sigma_d$
- 4) **Iznimno dopušteno naprezanje σ_i** je naprezanje koje vodič ili zaštitno uže mora izdržati godinu dana pri iznimnom dodatnom opterećenju na - 5° C. Za Al/Fe 6/1 iznosi $\sigma_i = 245 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$.

$$\sigma_{max} (-20^\circ \text{ C bez dodatnog opterećenja i vjetra}) \leq \sigma_d$$

$$\sigma_{max} (-5^\circ \text{ C uz dodatno opterećenje, bez vjetra}) \leq \sigma_d$$

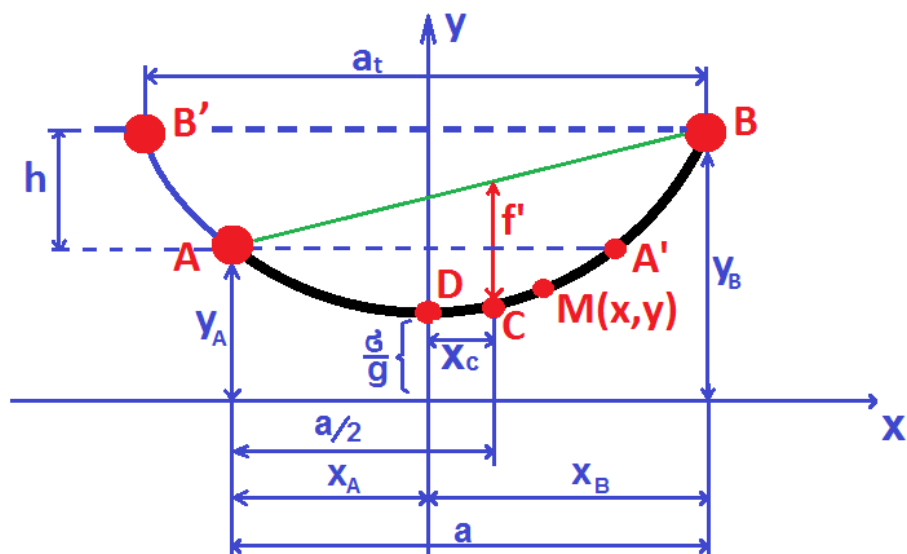
$$\sigma_{max} (-5^\circ \text{ C bez dodatnog opterećenja, uz vjetar}) \leq \sigma_d$$

$$\sigma_{max} (-5^\circ \text{ C uz iznimno dodatno opterećenje, bez vjetra}) \leq \sigma_i$$

$$f_{max} (+40^\circ \text{ C}) \leq f_d$$

$$f_{max} (-5^\circ \text{ C uz dodatno opterećenje}) \leq f_d$$

3.2. Proračun provjesa vodiča



Slika 3.3. Vodič u kosom rasponu

Proračun provjesa u kosom rasponu:

Provjes vodiča u kosom rasponu možemo računati u bilo kojoj točki M (x,y) prema formuli:

$$f'_M = \frac{6}{g} \left(ch \frac{a_t g}{26} - ch \frac{x g}{6} \right) - \left(\frac{a_t}{2} - x \right) \frac{h}{a}$$

$$f'_M = 2 \frac{6}{g} sh \frac{\frac{a_t+x}{2}}{\frac{6}{g}} sh \frac{\frac{a_t-x}{2}}{\frac{6}{g}} - \left(\frac{a_t}{2} - x \right) \frac{h}{a} \quad (3.12)$$

Gdje je a_t **totalni raspon** koji se računa pomoću formule:

$$a_t = a + 2 \frac{6}{g} Ar sh \frac{h g}{26 sh \frac{a g}{26}} \quad (3.13)$$

Ako računamo provjes točno na sredini kosog raspona možemo koristiti formule:

$$f' = \frac{6}{g} \left(ch \frac{a_t g}{26} - ch \frac{a_t - a}{26} g \right) - \frac{h}{2}$$

$$f' = 2 \frac{6}{g} sh \frac{a_t - \frac{a}{2}}{26} g - sh \frac{a g}{26} - \frac{h}{2} \quad (3.14)$$

Proračun provjesa u horizontalnom rasponu:

U horizontalnom rasponu nema denivelacije tj. $h = 0$, a totalni raspon je jednak rasponu $a_t = a$ pa je izračun nešto jednostavniji.

Formula za provjes vodiča u bilo kojoj točki M (x,y) horizontalnog raspona glasi:

$$f = \frac{6}{g} \left(ch \frac{a g}{26} - ch \frac{x g}{6} \right) \quad (3.15)$$

Formula za provjes vodiča u sredini horizontalnog raspona glasi:

1) Za točni proračun – Lančanica

$$f = \frac{6}{g} \left(ch \frac{a g}{26} - 1 \right) \quad (3.16)$$

2) Za približni proračun- Parabola

$$f = \frac{a^2}{86} + \frac{a^4 g^3}{384 6^3} + \frac{a^6 g^5}{46080 6^5} + \dots \quad (3.17)$$

Relativni provjes:

$$\varphi = \frac{f}{a} \cdot 100 \% \quad (3.18)$$

3.3. Proračun duljine vodiča

1) Duljina vodiča u kosom rasponu:

$$l = \sqrt{4 \frac{6^2}{g^2} sh^2 \frac{a g}{2 6} + h^2} \text{ [m]} \quad (3.19)$$

2) Duljina vodiča u horizontalnom rasponu:

- Točni proračun: $l = 2 \frac{6}{g} sh \frac{a g}{2 6} \text{ [m]}$ (3.20)

- Približni proračun: $l = a + \frac{a^3 g^2}{24 6^2} + \frac{a^5 g^4}{1920 6^4} + \dots$ (3.21)

3) Otpust – razlika između duljine užeta vodiča i raspona

$$Otpust = l - a \text{ [m]} \quad (3.22)$$

$$Relativni otpust A = \frac{l-a}{a} \cdot 100\% \quad (3.23)$$

3.4. Proračun naprezanja vodiča

Zbog promjene temperature i elastičnosti vodiča mijenja se njegova duljina, a s tim i njegov oblik. U proračunu ćemo to promatrati kroz tri stanja:

- 1) Početno stanje na temperaturi v_1 . Pri čemu vrijede vrijednosti σ_1 , f_1 i l_1 .
- 2) Promjenjeno stanje pri temperaturi v_2 . Ako je $v_2 > v_1$ vodič se rasteže te je provjes f_2 veći, a naprezanje σ_2 manje. Ako je $v_2 < v_1$ vodič se steže te je provjes f_2 manji, a naprezanje σ_2 veće.
- 3) Rezultatno stanje je stanje u koje vodič dođe nakon elastične reakcije materijala. Pri rastu temperature elastično svojstvo materijala sužava vodič te smanjuje provjes. A pri padu temperature materijal se elastično odupire suženju te širi provjes.

Jednadžba stanja vodiča:

$$l_2 = l_1 [1 + \beta (v_2 - v_1)] [1 + \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{E}] \quad [\text{m}] \quad (3.24)$$

gdje je:

$\beta / \frac{1}{K}$ - koeficijent linearnog toplinskog istežanja,

$E / \frac{N}{\text{mm}^2}$ - modul elastičnosti.

Jednadžbu stanja koristimo za definiciju početnog i poznatog stanja.

3.4.1. Matematički modeli za jednadžbu stanja

1) Jednadžba stanja prema točnom proračunu

- Kosi raspon

$$\sqrt{4 \frac{\sigma_2^2}{g_2^2} sh^2 \frac{a g_2}{2 \sigma_2} + h^2} = \sqrt{4 \frac{\sigma_1^2}{g_1^2} sh^2 \frac{a g_1}{2 \sigma_1} + h^2} \cdot \left[1 + \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{E} + \beta (v_2 - v_1) \right] \quad (3.25)$$

- Horizontalni raspon

$$2 \frac{\sigma_2}{g_2} sh \frac{a g_2}{2 \sigma_2} = 2 \frac{\sigma_1}{g_1} sh \frac{a g_1}{2 \sigma_1} \left[1 + \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{E} + \beta (v_2 - v_1) \right] \quad (3.26)$$

2) Jednadžba stanja prema približnom proračunu za horizontalni raspon

$$\frac{\sigma_2 - \sigma_1}{E} + \beta (v_2 - v_1) = \frac{a^2}{24} \left(\frac{g_2^2}{\sigma_2^2} - \frac{g_1^2}{\sigma_1^2} \right) \quad (3.27)$$

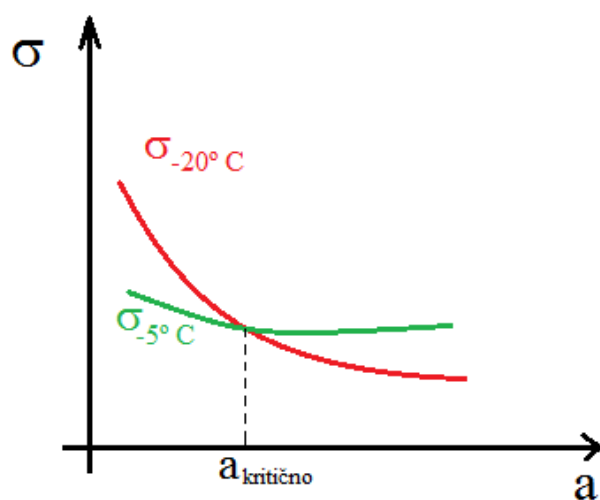
$$\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{E} + \beta (v_1 - v_2) = \frac{a^2}{24} \left(\frac{g_1^2}{\sigma_1^2} - \frac{g_2^2}{\sigma_2^2} \right)$$

$$\sigma_2 = f(\sigma_2, \sigma_1, g_1, g_2, v_1, v_2, E, \beta)$$

3.4.2. Određivanje stanja najvećeg naprezanja po kriteriju kritičnog raspona

Raspon pri kojem je naprezanje vodiča na -5°C uz dodatno opterećenje jednako opterećenju na -20°C zovemo **kritični raspon a_k** .

Jednostavnije napisan uvjet: $\bar{\sigma}_{-20^{\circ}\text{C}} = \bar{\sigma}_z = \bar{\sigma}_{\max} \leq \bar{\sigma}_d$.



Slika 3.4. Kritični raspon

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

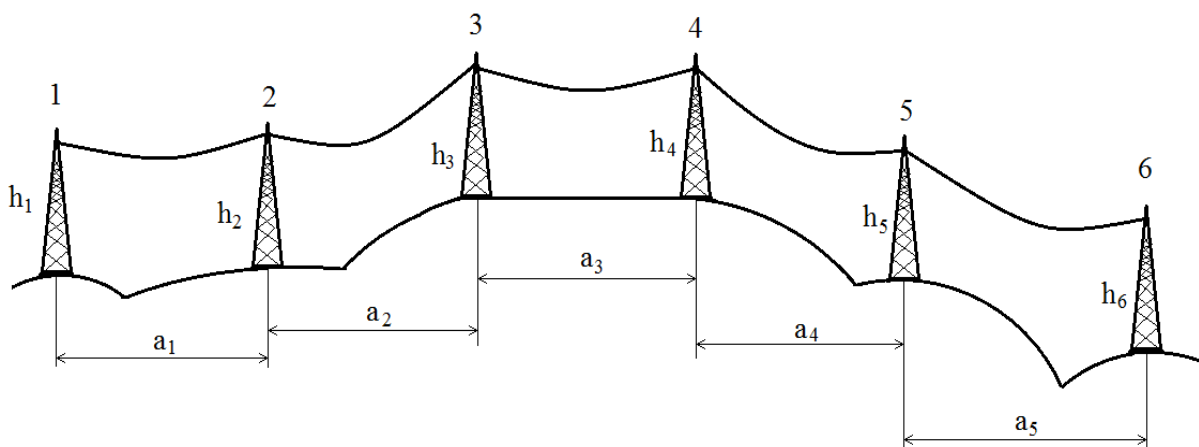
$$a_k = \bar{\sigma}_{\max} \sqrt{\frac{360 \beta}{g_z^2 - g_0^2}} \quad (3.28)$$

3.4.3. Određivanje stanja najvećeg provjesa provjesa po kriteriju kritične temperature

Najveći provjes f_{\max} vodiča se događa pri temperaturi od $+40^{\circ}\text{C}$ ili pri temperaturi od -5°C uz dodatno opterećenje leda ili snijega. Temperatura pri kojoj se događa maksimalni provjes naziva se **kritična temperatura**.

$$v_k = \frac{6_z}{E \beta} \left(1 - \frac{g_0}{g_z} \right) + v_z \quad (3.29)$$

3.5. Izrada montažne tablice za zatezno polje od 5 raspona



Slika 3.5. Zatezno polje od 5 raspona

Tablica 1. Podaci vodiča HRN N.C1.351 Al/Fe 95/15

Podaci vodiča	Al/Fe 95/15
Nazivni presjek / mm ²	95/15
Računski presjek A / mm ²	109,7
Promjer vodiča d / mm	13,6
Uzdužna masa m ₁ / $\frac{kg}{m}$	0,382
Modul elastičnosti E / $\frac{N}{mm^2}$	77000
Koeficijent linearnog toplinskog istezanja $\beta / \frac{1}{^{\circ}C}$	$18,9 \cdot 10^{-6}$
Normalno dozvoljeno naprezanje $\sigma_d / \frac{N}{mm^2}$	120
Iznimno dozvoljeno naprezanje $\sigma_i / \frac{N}{mm^2}$	210
Uzdužni srednji električni otpor Ω / km	0,3058

Koeficijent dodatnog tereta: $k = 1,0$; Maksimalno dozvoljeno naprezanje $\sigma_d / \frac{N}{mm^2} = 110$

Rasponi a / m:

1) $a_1 = 100 \text{ m}$

2) $a_2 = 120 \text{ m}$

3) $a_3 = 130 \text{ m}$

4) $a_4 = 100 \text{ m}$

5) $a_5 = 130 \text{ m}$

Visine ovjesišta h / m:

1) $h_1 = 90 \text{ m}$

2) $h_2 = 100 \text{ m}$

3) $h_3 = 120 \text{ m}$

4) $h_4 = 120 \text{ m}$

5) $h_5 = 100 \text{ m}$

6) $h_6 = 80 \text{ m}$

Denivelacija ovjesišta:

$$h_{12} = h_2 - h_1 = 100 \text{ m} - 90 \text{ m} = 10 \text{ m}$$

$$h_{23} = h_3 - h_2 = 120 \text{ m} - 100 \text{ m} = 20 \text{ m}$$

$$h_{34} = h_4 - h_3 = 120 \text{ m} - 120 \text{ m} = 0 \text{ m}$$

$$h_{45} = h_5 - h_4 = 100 \text{ m} - 120 \text{ m} = -20 \text{ m}$$

$$h_{56} = h_6 - h_5 = 80 \text{ m} - 100 \text{ m} = -20 \text{ m}$$

Spojnice ovjesišta:

$$a'_1 = \sqrt{h_{12}^2 + a_1^2} = \sqrt{10^2 + 100^2} = 100,4987 \text{ m}$$

$$a'_2 = \sqrt{h_{23}^2 + a_2^2} = \sqrt{20^2 + 120^2} = 121,6552 \text{ m}$$

$$a'_3 = \sqrt{h_{34}^2 + a_3^2} = \sqrt{0^2 + 130^2} = 130,0 \text{ m}$$

$$a'_4 = \sqrt{h_{45}^2 + a_4^2} = \sqrt{-20^2 + 100^2} = 97,9795 \text{ m}$$

$$a'_5 = \sqrt{h_{56}^2 + a_5^2} = \sqrt{-20^2 + 130^2} = 128,4523 \text{ m}$$

Vlastita težina vodiča:

$$G_0 = m_1 \cdot g = 0,382 \cdot 9,81 = 3,74742 \frac{N}{m}$$

Reducirana težina vodiča:

$$g_0 = \frac{G_0}{A} = \frac{3,74742}{109,7} = 0,03416 \frac{N}{m \cdot mm^2}$$

Normalno dodatno opterećenje:

$$G_{10} = 0,18 \sqrt{d} \cdot g = 0,18 \cdot \sqrt{13,6} \cdot 9,81 = 6,5119 \frac{N}{m}$$

Stvarno dodatno opterećenje uslijed zaleđivanja:

$$G_1 = k \cdot G_{10} = 1,0 \cdot 6,5119 = 6,5119 \frac{N}{m}$$

Reducirana težina zaleđenog vodiča:

$$g_z = \frac{G_0 + G_1}{A} = \frac{3,74742 + 6,5119}{109,7} = 0,09352 \frac{N}{m \cdot mm^2}$$

Kritični raspon:

$$a_k = \sigma_{\max} \sqrt{\frac{360 \beta}{g_z^2 - g_0^2}} = 110 \cdot \sqrt{\frac{360 \cdot 18,9 \cdot 10^{-6}}{0,09352^2 - 0,03416^2}} = 104,2236 \text{ m}$$

Idealni raspon:

$$\begin{aligned}
 a_{\text{idealno}} &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n a_i^3}{\sum_{i=1}^n \frac{a_i^2}{a_i}}} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \frac{a_i^3}{a_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{a_i^2}{a_i}} = \\
 &= \sqrt{\frac{100^3 + 120^3 + 130^3 + 100^3 + 130^3}{\frac{100,4987^2}{100} + \frac{121,6552^2}{120} + \frac{130,0^2}{130} + \frac{97,9795^2}{100} + \frac{128,4523^2}{130}}} \cdot \frac{\frac{100,4987^3}{100^2} + \frac{121,6552^3}{120^2} + \frac{130,0^3}{130^2} + \frac{97,9795^3}{100^2} + \frac{128,4523^3}{130^2}}{\frac{100,4987^2}{100} + \frac{121,6552^2}{120} + \frac{130,0^2}{130} + \frac{97,9795^2}{100} + \frac{128,4523^2}{130}} = \\
 &= \sqrt{\frac{8122000}{577,2559}} \cdot \frac{576,0101}{577,2559} = 118,3611 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Osnovno stanje jednadžbe stanja:

$a_{\text{idealno}} = 118,3611 \text{ m} > a_k = 104,2236 \text{ m}$ iz čega slijedi da je početno stanje -5° C sa dodatnim opterećenjem.

Početno stanje definiramo sljedećim vrijednostima:

$$v_1 = -5^\circ \text{ C}$$

$$g_1 = g_z = 0,09352 \frac{N}{m \cdot mm^2}$$

$$\sigma_1 = \sigma_d = 110 \frac{N}{mm^2}$$

Nadomjesno naprezanje maksimalnog radnog naprezanja:

$$\bar{\sigma}_1 = \sigma_{\text{max}} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \frac{a_i^3}{a_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{a_i^2}{a_i}} = 110 \cdot \frac{576,0101}{577,2559} = 109,7626 \frac{N}{mm^2}$$

Horizontalne komponente naprezanja za zatezno polje za odabrane temperature:

$$\frac{\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_2}{E} + \beta (v_1 - v_2) = \frac{\alpha_{idealno}^2}{24} \left(\frac{g_1^2}{\bar{\sigma}_1^2} - \frac{g_2^2}{\bar{\sigma}_2^2} \right)$$

Za $v_2 = -20^\circ \text{C}$:

$$\frac{\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_2}{E} + \beta (v_1 - v_2) = \frac{\alpha_{idealno}^2}{24} \left(\frac{g_1^2}{\bar{\sigma}_1^2} - \frac{g_2^2}{\bar{\sigma}_2^2} \right)$$

$$\frac{109,7626 - \bar{\sigma}_2}{77000} + 18,9 \cdot 10^{-6} (-5 - (-20)) = \frac{118,3611^2}{24} \left(\frac{0,09352^2}{109,7626^2} - \frac{0,03416^2}{\bar{\sigma}_2^2} \right)$$

$$\frac{109,7626 - \bar{\sigma}_2}{77000} + 2,835 \cdot 10^{-4} = 4,2192 \cdot 10^{-4} - \frac{0,68114}{\bar{\sigma}_2^2} / \cdot 77000 / \cdot \bar{\sigma}_2^{-2}$$

$$\bar{\sigma}_2^2 (109,7626 - \bar{\sigma}_2) + 21,8295 \bar{\sigma}_2^2 - 32,45784 \bar{\sigma}_2^2 + 52447,78 = 0$$

$$-\bar{\sigma}_2^3 + 109,7626 \bar{\sigma}_2^2 + 21,8295 \bar{\sigma}_2^2 - 32,45784 \bar{\sigma}_2^2 + 52447,78 = 0 / \cdot (-1)$$

$$\bar{\sigma}_2^3 - 98,96355 \cdot \bar{\sigma}_2^2 - 52447,78 = 0$$

Kubne jednačbe riješavamo pomoću računskog programa Microsoft Mathematics.

$$\bar{\sigma}_2 = \sqrt[3]{\frac{11\sqrt{108450039226778044028345490}}{2250000000} + \frac{211053071016814560787}{3375000000000000}} + \sqrt[3]{-\frac{11\sqrt{108450039226778044028345490}}{2250000000} + \frac{211053071016814560787}{3375000000000000}} + \frac{4967083}{150000} = 104,174518 \frac{N}{mm^2}$$

$$\overline{\sigma}_2 = \overline{\sigma}_{-20^\circ C} = \overline{\sigma}_2 \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \frac{a_i'^3}{a_i'^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{a_i'^2}{a_i}} = 104,174518 \cdot \frac{576,0101}{577,2559} = 103,94969 \frac{N}{mm^2}$$

Za $v_2 = -10^\circ C$:

$$\frac{\overline{\sigma}_1 - \overline{\sigma}_2}{E} + \beta (v_1 - v_2) = \frac{a_{idealno}^2}{24} \left(\frac{g_1^2}{\overline{\sigma}_1^2} - \frac{g_2^2}{\overline{\sigma}_2^2} \right)$$

$$\frac{109,7626 - \overline{\sigma}_2}{77000} + 18,9 \cdot 10^{-6} (-5 - (-10)) = \frac{118,3611^2}{24} \left(\frac{0,09352^2}{110^2} - \frac{0,03416^2}{\overline{\sigma}_2^2} \right)$$

$$\frac{109,7626 - \overline{\sigma}_2}{77000} + 9,45 \cdot 10^{-5} = 4,2192 \cdot 10^{-4} - \frac{0,68114}{\overline{\sigma}_2^2} / \cdot 77000 / \cdot \overline{\sigma}_2^{-2}$$

$$\overline{\sigma}_2^{-2} (109,7626 - \overline{\sigma}_2) + 7,2765 \overline{\sigma}_2^{-2} - 32,45784 \overline{\sigma}_2^{-2} + 52447,78 = 0$$

$$- \overline{\sigma}_2^{-3} + 109,7626 \cdot \overline{\sigma}_2^{-2} + 7,2765 \overline{\sigma}_2^{-2} - 32,45784 \overline{\sigma}_2^{-2} + 52447,78 = 0 / \cdot (-1)$$

$$\overline{\sigma}_2^{-3} - 84,81886 \cdot \overline{\sigma}_2^{-2} - 52447,78 = 0$$

$$\overline{\sigma}_2 =$$

$$\sqrt[3]{\frac{\sqrt{9482152317669786701316005790}}{2250000000} + \frac{164780983125832246237}{337500000000000}} + \sqrt[3]{-\frac{\sqrt{9482152317669786701316005790}}{2250000000} + \frac{164780983125832246237}{337500000000000}} + \frac{4240933}{150000} = 91,13361 \frac{N}{mm^2}$$

$$\overline{\sigma}_2 = \overline{\sigma}_{-10^\circ C} = \overline{\sigma}_2 \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \frac{a_i'^3}{a_i'^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{a_i'^2}{a_i}} = 91,13361 \cdot \frac{576,0101}{577,2559} = 90,93693 \frac{N}{mm^2}$$

Za $v_2 = -5^\circ \text{C}$ sa dodatnim teretom:

$$\frac{\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_2}{E} + \beta (v_1 - v_2) = \frac{\alpha_{idealno}^2}{24} \left(\frac{g_1^2}{\bar{\sigma}_1^2} - \frac{g_2^2}{\bar{\sigma}_2^2} \right)$$

$$\frac{109,7626 - \bar{\sigma}_2}{77000} + 18,9 \cdot 10^{-6} (-5 - (-5)) = \frac{118,3611^2}{24} \left(\frac{0,09352^2}{110^2} - \frac{0,09352^2}{\bar{\sigma}_2^2} \right)$$

$$\frac{109,7626 - \bar{\sigma}_2}{77000} = 4,2192 \cdot 10^{-4} - \frac{5,10523}{\bar{\sigma}_2^2} / \cdot 77000 / \cdot \bar{\sigma}_2^2$$

$$\bar{\sigma}_2^2 (109,7626 - \bar{\sigma}_2) - 32,45784 \bar{\sigma}_2^2 + 393102,71 = 0$$

$$- \bar{\sigma}_2^3 + 109,7626 \bar{\sigma}_2^2 - 32,45784 \bar{\sigma}_2^2 + 393102,71 = 0 / \cdot (-1)$$

$$\bar{\sigma}_2^3 - 77,54216 \cdot \bar{\sigma}_2^2 - 393102,71 = 0$$

$$\bar{\sigma}_2 =$$

$$\sqrt[3]{\frac{\sqrt{3592844851769138200034945145}}{281250000} + \frac{11275646569991581933}{5273437500000}} + \sqrt[3]{-\frac{\sqrt{3592844851769138200034945145}}{281250000} + \frac{11275646569991581933}{5273437500000}} + \frac{969277}{37500} = 110,01885 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_2 = \sigma_{-5^\circ \text{C}} = \bar{\sigma}_2 \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \frac{a_i'^3}{a_i'^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{a_i'^2}{a_i}} = 110,01885 \cdot \frac{576,0101}{577,2559} = 109,78141 \frac{N}{mm^2}$$

Za $v_2 = 0^\circ C$:

$$\frac{\bar{v}_1 - \bar{v}_2}{E} + \beta (v_1 - v_2) = \frac{a_{idealno}^2}{24} \left(\frac{g_1^2}{\bar{v}_1^2} - \frac{g_2^2}{\bar{v}_2^2} \right)$$

$$\frac{109,7626 - \bar{v}_2}{77000} + 18,9 \cdot 10^{-6} (-5 - 0) = \frac{118,3611^2}{24} \left(\frac{0,09352^2}{110^2} - \frac{0,03416^2}{\bar{v}_2^2} \right)$$

$$\frac{110 - \bar{v}_2}{77000} - 9,45 \cdot 10^{-5} = 4,2192 \cdot 10^{-4} - \frac{0,68114}{\bar{v}_2^2} / \cdot 77000 / \cdot \bar{v}_2^2$$

$$\bar{v}_2^2 (109,7626 - \bar{v}_2) - 7,2765 \bar{v}_2^2 - 32,45784 \bar{v}_2^2 + 52447,78 = 0$$

$$- \bar{v}_2^3 + 109,7626 \bar{v}_2^2 - 7,2765 \bar{v}_2^2 - 32,45784 \bar{v}_2^2 + 52447,78 = 0 / \cdot (-1)$$

$$\bar{v}_2^3 - 70,26566 \cdot \bar{v}_2^2 - 52447,78 = 0$$

$$\bar{v}_2 =$$

$$\sqrt[3]{\frac{\sqrt{6893040187217423416763722290}}{2250000000} + \frac{131870633943561636187}{3375000000000000}} + \sqrt[3]{-\frac{\sqrt{6893040187217423416763722290}}{2250000000} + \frac{131870633943561636187}{3375000000000000}} + \frac{3513283}{150000} = 78,72765 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_2 = \sigma_{0^\circ C} = \bar{\sigma}_2 \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \frac{a_i'^3}{a_i'^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{a_i'^2}{a_i}} = 78,72765 \cdot \frac{576,0101}{577,2559} = 78,557744 \frac{N}{mm^2}$$

Za $v_2 = 10^\circ \text{ C}$:

$$\frac{\bar{v}_1 - \bar{v}_2}{E} + \beta (v_1 - v_2) = \frac{a_{idealno}^2}{24} \left(\frac{g_1^2}{\bar{v}_1^2} - \frac{g_2^2}{\bar{v}_2^2} \right)$$

$$\frac{109,7626 - \bar{v}_2}{77000} + 18,9 \cdot 10^{-6} (-5 - 10) = \frac{118,3611^2}{24} \left(\frac{0,09352^2}{110^2} - \frac{0,03416^2}{\bar{v}_2^2} \right)$$

$$\frac{109,7626 - \bar{v}_2}{77000} - 2,835 \cdot 10^{-4} = 4,2192 \cdot 10^{-4} - \frac{0,68114}{\bar{v}_2^2} / \cdot 77000 / \cdot \bar{v}_2^2$$

$$\bar{v}_2^2 (109,7626 - \bar{v}_2) - 21,8295 \bar{v}_2^2 - 32,45784 \bar{v}_2^2 + 52447,78 = 0$$

$$- \bar{v}_2^3 + 109,7626 \bar{v}_2^2 - 21,8295 \bar{v}_2^2 - 32,45784 \bar{v}_2^2 + 52447,78 = 0 / \cdot (-1)$$

$$\bar{v}_2^3 - 55,71266 \cdot \bar{v}_2^2 - 52447,78 = 0$$

$$\bar{v}_2 =$$

$$\sqrt[3]{\frac{\sqrt{5181995391712979339883788790}}{2250000000} + \frac{110121447794285231137}{3375000000000000}} + \sqrt[3]{-\frac{\sqrt{5181995391712979339883788790}}{2250000000} + \frac{110121447794285231137}{3375000000000000}} + \frac{2785633}{150000} = 67,294309 \frac{N}{mm^2}$$

$$\bar{v}_2 = \bar{v}_{10^\circ \text{ C}} = \bar{v}_2 \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \frac{a_i'^3}{a_i'^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{a_i}{a_i}} = 67,294309 \cdot \frac{576,0101}{577,2559} = 67,14907 \frac{N}{mm^2}$$

Za $v_2 = 20^\circ \text{ C}$:

$$\frac{\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_2}{E} + \beta (v_1 - v_2) = \frac{a_{idealno}^2}{24} \left(\frac{g_1^2}{\bar{\sigma}_1^2} - \frac{g_2^2}{\bar{\sigma}_2^2} \right)$$

$$\frac{109,7626 - \bar{\sigma}_2}{77000} + 18,9 \cdot 10^{-6} (-5 - 20) = \frac{118,3611^2}{24} \left(\frac{0,09352^2}{110^2} - \frac{0,03416^2}{\bar{\sigma}_2^2} \right)$$

$$\frac{109,7626 - \bar{\sigma}_2}{77000} - 4,725 \cdot 10^{-4} = 4,2192 \cdot 10^{-4} - \frac{0,68114}{\bar{\sigma}_2^2} / \cdot 77000 / \cdot \bar{\sigma}_2^2$$

$$\bar{\sigma}_2^2 (109,7626 - \bar{\sigma}_2) - 36,3825 \bar{\sigma}_2^2 - 32,45784 \bar{\sigma}_2^2 + 52447,78 = 0$$

$$- \bar{\sigma}_2^3 + 109,7626 \bar{\sigma}_2^2 - 36,3825 \bar{\sigma}_2^2 - 32,45784 \bar{\sigma}_2^2 + 52447,78 = 0 / \cdot (-1)$$

$$\bar{\sigma}_2^3 - 41,15966 \cdot \bar{\sigma}_2^2 - 52447,78 = 0$$

$$\bar{\sigma}_2 =$$

$$\sqrt[3]{\frac{\sqrt{4167157916954679830983705290}}{2250000000} + \frac{97221791860220281087}{337500000000000}} + \sqrt[3]{-\frac{\sqrt{4167157916954679830983705290}}{2250000000} + \frac{97221791860220281087}{337500000000000}} + \frac{2057983}{150000} = 57,19341 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_2 = \sigma_{20^\circ \text{ C}} = \bar{\sigma}_2 \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \frac{a_i'^3}{a_i'^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{a_i'^2}{a_i}} = 57,19341 \cdot \frac{576,0101}{577,2559} = 57,06997 \frac{N}{mm^2}$$

Za $v_2 = 30^\circ \text{ C}$:

$$\frac{\bar{b}_1 - \bar{b}_2}{E} + \beta (v_1 - v_2) = \frac{a_{idealno}^2}{24} \left(\frac{g_1^2}{\bar{b}_1^2} - \frac{g_2^2}{\bar{b}_2^2} \right)$$

$$\frac{109,7626 - \bar{b}_2}{77000} + 18,9 \cdot 10^{-6} (-5 - 30) = \frac{118,3611^2}{24} \left(\frac{0,09352^2}{110^2} - \frac{0,03416^2}{\bar{b}_2^2} \right)$$

$$\frac{109,7626 - \bar{b}_2}{77000} - 6,615 \cdot 10^{-4} = 4,2192 \cdot 10^{-4} - \frac{0,68114}{\bar{b}_2^2} / \cdot 77000 / \cdot \bar{b}_2^2$$

$$\bar{b}_2^2 (109,7626 - \bar{b}_2) - 50,9355 \bar{b}_2^2 - 32,45784 \bar{b}_2^2 + 52447,78 = 0$$

$$- \bar{b}_2^3 + 109,7626 \bar{b}_2^2 - 50,9355 \bar{b}_2^2 - 32,45784 \bar{b}_2^2 + 52447,78 = 0 / \cdot (-1)$$

$$\bar{b}_2^3 - 26,60666 \cdot \bar{b}_2^2 - 52447,78 = 0$$

$$\bar{b}_2 =$$

$$x^3 \sqrt{\frac{\sqrt{3666667748740750250370971790}}{2250000000} + \frac{90860033323584036037}{337500000000000}} + \sqrt[3]{-\frac{\sqrt{3666667748740750250370971790}}{2250000000} + \frac{90860033323584036037}{337500000000000}} + \frac{1330333}{150000} = 48,710879 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_2 = \sigma_{30^\circ \text{ C}} = \bar{b}_2 \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \frac{a_i'^3}{a_i'^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{a_i}{a_i}} = 48,710879 \cdot \frac{576,0101}{577,2559} = 48,60575 \frac{N}{mm^2}$$

Za $v_2 = 40^\circ \text{ C}$:

$$\frac{\bar{v}_1 - \bar{v}_2}{E} + \beta (v_1 - v_2) = \frac{a_{idealno}^2}{24} \left(\frac{g_1^2}{\bar{v}_1^2} - \frac{g_2^2}{\bar{v}_2^2} \right)$$

$$\frac{109,7626 - \bar{v}_2}{77000} + 18,9 \cdot 10^{-6} (-5 - 40) = \frac{118,3611^2}{24} \left(\frac{0,09352^2}{110^2} - \frac{0,03416^2}{\bar{v}_2^2} \right)$$

$$\frac{110 - \bar{v}_2}{77000} - 8,505 \cdot 10^{-4} = 4,2192 \cdot 10^{-4} - \frac{0,68114}{\bar{v}_2^2} / \cdot 77000 / \cdot \bar{v}_2^{-2}$$

$$\bar{v}_2^2 (109,7626 - \bar{v}_2) - 65,4885 \bar{v}_2^2 - 32,45784 \bar{v}_2^2 + 52447,78 = 0$$

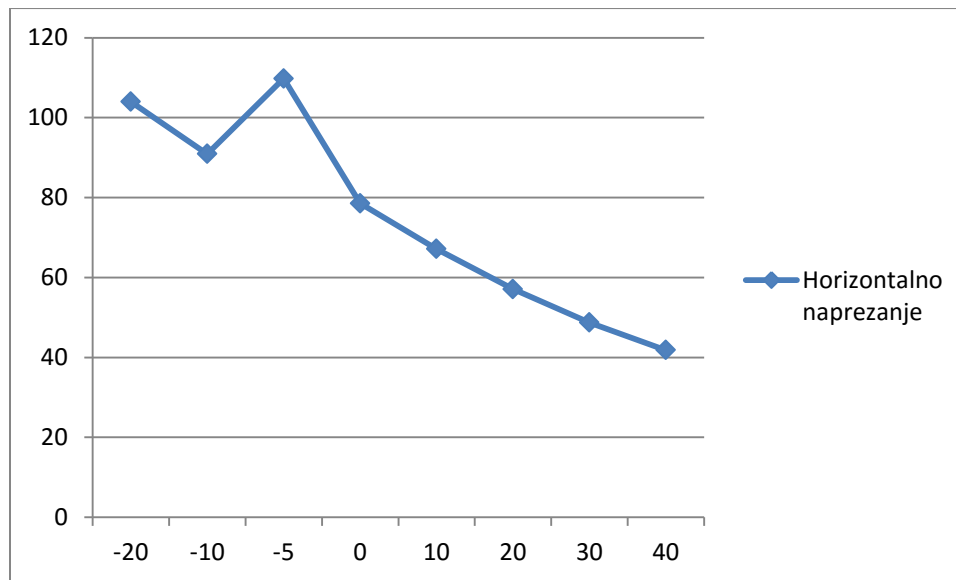
$$- \bar{v}_2^3 + \bar{v}_2^2 - 65,4885 \bar{v}_2^2 - 32,45784 \bar{v}_2^2 + 52447,78 = 0 / \cdot (-1)$$

$$\bar{v}_2^3 - 12,05366 \cdot \bar{v}_2^2 - 52447,78 = 0$$

$$\bar{v}_2 =$$

$$\sqrt[3]{\frac{\sqrt{3498664872869415958353088290}}{2250000000} + \frac{88724539366593745987}{337500000000000}} + \sqrt[3]{-\frac{\sqrt{3498664872869415958353088290}}{2250000000} + \frac{88724539366593745987}{337500000000000}} + \frac{602683}{150000} = 41,911565 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_2 = \sigma_{40^\circ \text{ C}} = \bar{v}_2 \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \frac{a_i'^3}{a_i'^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{a_i'^2}{a_i}} = 41,911565 \cdot \frac{576,0101}{577,2559} = 41,82111 \frac{N}{mm^2}$$



Slika 3.6. Ovisnost horizontalnog naprezanja o temperaturi

Horizontalne sile za pojedine temperature:

$$F_{H-20^{\circ}C} = \mathfrak{G}_{-20^{\circ}C} \cdot A = 103,9496 \cdot 109,7 = 11403,28 \text{ N}$$

$$F_{H-10^{\circ}C} = \mathfrak{G}_{-10^{\circ}C} \cdot A = 90,9369 \cdot 109,7 = 9975,7812 \text{ N}$$

$$F_{H0^{\circ}C} = \mathfrak{G}_{0^{\circ}C} \cdot A = 78,5577 \cdot 109,7 = 8617,77696 \text{ N}$$

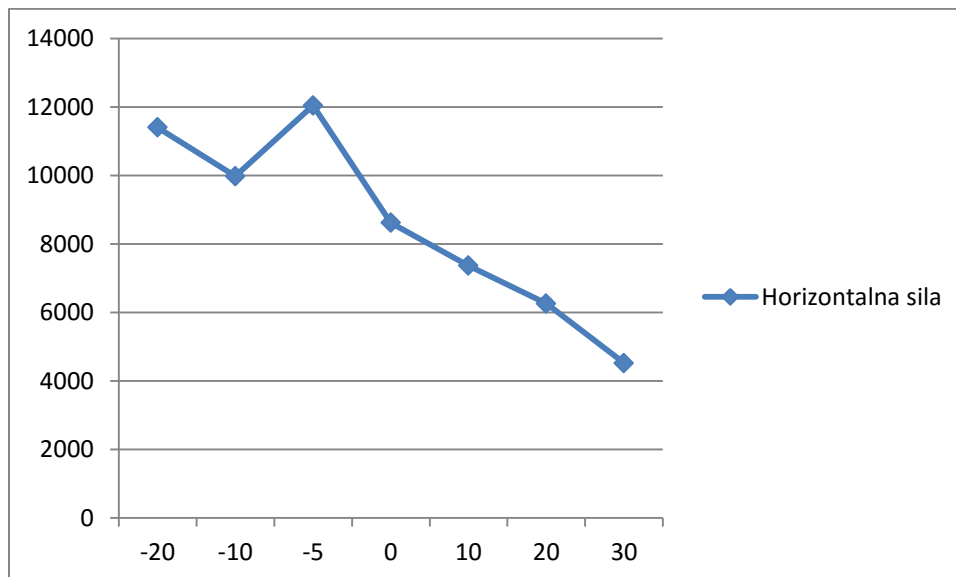
$$F_{H10^{\circ}C} = \mathfrak{G}_{10^{\circ}C} \cdot A = 67,149 \cdot 109,7 = 7366,2453 \text{ N}$$

$$F_{H20^{\circ}C} = \mathfrak{G}_{20^{\circ}C} \cdot A = 57,0699 \cdot 109,7 = 6260,568 \text{ N}$$

$$F_{H30^{\circ}C} = \mathfrak{G}_{30^{\circ}C} \cdot A = 48,7108 \cdot 109,7 = 5343,5747 \text{ N}$$

$$F_{H40^{\circ}C} = \mathfrak{G}_{40^{\circ}C} \cdot A = 41,2111 \cdot 109,7 = 4520,8576 \text{ N}$$

$$F_{H-5^{\circ}C + \text{led}} = \mathfrak{G}_{40^{\circ}C} \cdot A = 109,7814 \cdot 109,7 = 12043,01958 \text{ N}$$



Slika 3.7. Ovisnost horizontalne sile o temperaturi

Idealan provjes za pojedine raspone i odabrane temperature:

$$f = \frac{a_{idealno}^2 \cdot g_0}{8 \cdot 6_v}$$

Za $v = -20^\circ \text{C}$

$$f = \frac{a_{idealno}^2 \cdot g_0}{8 \cdot 6_v} = \frac{118,3611^2 \cdot 0,03416}{8 \cdot 103,94969} = 0,5754 \text{ m}$$

Za $v = -10^\circ \text{C}$

$$f = \frac{a_{idealno}^2 \cdot g_0}{8 \cdot 6_v} = \frac{118,3611^2 \cdot 0,03416}{8 \cdot 90,93693} = 0,65781 \text{ m}$$

Za $v = 0^\circ \text{C}$

$$f = \frac{a_{idealno}^2 \cdot g_0}{8 \cdot 6_v} = \frac{118,3611^2 \cdot 0,03416}{8 \cdot 78,557744} = 0,761477 \text{ m}$$

Za $v = 10^\circ \text{C}$

$$f = \frac{a_{idealno}^2 \cdot g_0}{8 \cdot 6_v} = \frac{118,3611^2 \cdot 0,03416}{8 \cdot 67,14907} = 0,89085 \text{ m}$$

Za $v = 20^\circ \text{C}$

$$f = \frac{a_{idealno}^2 \cdot g_0}{8 \cdot 6_v} = \frac{118,3611^2 \cdot 0,03416}{8 \cdot 57,06997} = 1,04818 \text{ m}$$

Za $v = 30^\circ \text{C}$

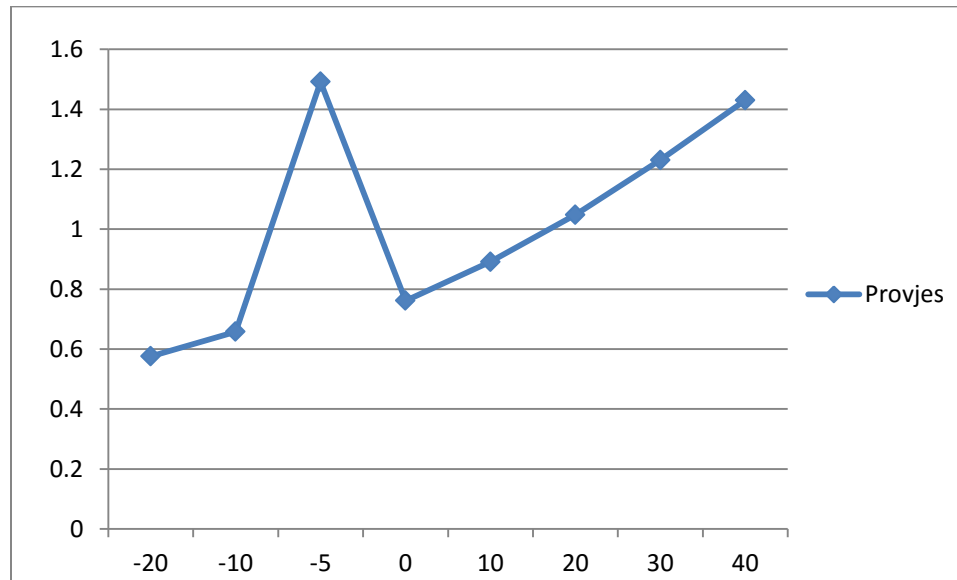
$$f = \frac{a_{idealno}^2 \cdot g_0}{8 \cdot 6_v} = \frac{118,3611^2 \cdot 0,03416}{8 \cdot 48,60575} = 1,23071 \text{ m}$$

Za $v = 40^\circ \text{C}$

$$f = \frac{a_{idealno}^2 \cdot g_0}{8 \cdot 6_v} = \frac{118,3611^2 \cdot 0,03416}{8 \cdot 41,82111} = 1,43037 \text{ m}$$

Za $v = -5^\circ\text{C} + \text{Led}$

$$f = \frac{a_{idealno}^2 \cdot g_z}{8 \cdot 6_v} = \frac{118,3611^2 \cdot 0,09352}{8 \cdot 109,78141} = 1,49177 \text{ m}$$



Slika 3.6. Ovisnost provjesa o temperaturi i dodatnom opterećenju leda

Provjesi za pojedine raspone i odabrane temperature:

Raspon a_1 :

Za $v = -20^\circ \text{C}$

$$f' = \frac{a_1 a_1' g_0}{8 G_{-20^\circ \text{C}}} = \frac{100 \cdot 100,4987 \cdot 0,03416}{8 \cdot 103,94969} = 0,41282 \text{ m}$$

Za $v = -10^\circ \text{C}$

$$f' = \frac{a_1 a_1' g_0}{8 G_{-10^\circ \text{C}}} = \frac{100 \cdot 100,4987 \cdot 0,03416}{8 \cdot 90,93693} = 0,47189 \text{ m}$$

Za $v = 0^\circ \text{C}$

$$f' = \frac{a_1 a_1' g_0}{8 G_{0^\circ \text{C}}} = \frac{100 \cdot 100,4987 \cdot 0,03416}{8 \cdot 78,557744} = 0,5462 \text{ m}$$

Za $v = 10^\circ \text{C}$

$$f' = \frac{a_1 a_1' g_0}{8 G_{10^\circ \text{C}}} = \frac{100 \cdot 100,4987 \cdot 0,03416}{8 \cdot 67,14907} = 0,63906 \text{ m}$$

Za $v = 20^\circ \text{C}$

$$f' = \frac{a_1 a_1' g_0}{8 G_{20^\circ \text{C}}} = \frac{100 \cdot 100,4987 \cdot 0,03416}{8 \cdot 57,06997} = 0,75193 \text{ m}$$

Za $v = 30^\circ \text{C}$

$$f' = \frac{a_1 a_1' g_0}{8 G_{30^\circ \text{C}}} = \frac{100 \cdot 100,4987 \cdot 0,03416}{8 \cdot 48,60575} = 0,88287 \text{ m}$$

Za $v = 40^\circ \text{C}$

$$f' = \frac{a_1 a_1' g_0}{8 G_{40^\circ \text{C}}} = \frac{100 \cdot 100,4987 \cdot 0,03416}{8 \cdot 41,82111} = 1,0261 \text{ m}$$

Za $v = -5^\circ \text{C}$

$$f' = \frac{a_1 a'_1 g_z}{8 \cdot 6_{-5^\circ C}} = \frac{100 \cdot 100,4987 \cdot 0,09352}{8 \cdot 109,78141} = 1,07 \text{ m}$$

Raspon a₂:

$$Za \nu = -20^\circ C$$

$$f' = \frac{a_2 a'_2 g_0}{8 \cdot 6_{-20^\circ C}} = \frac{120 \cdot 121,6552 \cdot 0,03416}{8 \cdot 103,94969} = 0,59967 \text{ m}$$

$$Za \nu = -10^\circ C$$

$$f' = \frac{a_2 a'_2 g_0}{8 \cdot 6_{-10^\circ C}} = \frac{120 \cdot 121,6552 \cdot 0,03416}{8 \cdot 90,93693} = 0,6854 \text{ m}$$

$$Za \nu = 0^\circ C$$

$$f' = \frac{a_2 a'_2 g_0}{8 \cdot 6_{0^\circ C}} = \frac{120 \cdot 121,6552 \cdot 0,03416}{8 \cdot 78,557744} = 0,7935 \text{ m}$$

$$Za \nu = 10^\circ C$$

$$f' = \frac{a_2 a'_2 g_0}{8 \cdot 6_{10^\circ C}} = \frac{120 \cdot 121,6552 \cdot 0,03416}{8 \cdot 67,14907} = 0,9283 \text{ m}$$

$$Za \nu = 20^\circ C$$

$$f' = \frac{a_2 a'_2 g_0}{8 \cdot 6_{20^\circ C}} = \frac{120 \cdot 121,6552 \cdot 0,03416}{8 \cdot 57,06997} = 1,09227 \text{ m}$$

$$Za \nu = 30^\circ C$$

$$f' = \frac{a_2 a'_2 g_0}{8 \cdot 6_{30^\circ C}} = \frac{120 \cdot 121,6552 \cdot 0,03416}{8 \cdot 48,60575} = 1,2824 \text{ m}$$

$$Za \nu = 40^\circ C$$

$$f' = \frac{a_2 a'_2 g_0}{8 \cdot 6_{40^\circ C}} = \frac{120 \cdot 121,6552 \cdot 0,03416}{8 \cdot 41,82111} = 1,49054 \text{ m}$$

Za v = -5 ° C + Led

$$f' = \frac{a_2 a_2' g_z}{8 \text{ } 6_{-5^\circ \text{ C}}} = \frac{120 \cdot 121,6552 \cdot 0,09352}{8 \cdot 109,78141} = 1,5545 \text{ m}$$

Raspon a₃:

Za v = -20° C

$$f' = \frac{a_3 a_3' g_0}{8 \text{ } 6_{-20^\circ \text{ C}}} = \frac{130 \cdot 130 \cdot 0,03416}{8 \cdot 103,94969} = 0,69421 \text{ m}$$

Za v = -10 ° C

$$f' = \frac{a_3 a_3' g_0}{8 \text{ } 6_{-10^\circ \text{ C}}} = \frac{130 \cdot 130 \cdot 0,03416}{8 \cdot 90,93693} = 0,79355 \text{ m}$$

Za v = 0 ° C

$$f' = \frac{a_3 a_3' g_0}{8 \text{ } 6_{0^\circ \text{ C}}} = \frac{130 \cdot 130 \cdot 0,03416}{8 \cdot 78,557744} = 0,9185 \text{ m}$$

Za v = 10 ° C

$$f' = \frac{a_3 a_3' g_0}{8 \text{ } 6_{10^\circ \text{ C}}} = \frac{130 \cdot 130 \cdot 0,03416}{8 \cdot 67,14907} = 1,0746 \text{ m}$$

Za v = 20 ° C

$$f' = \frac{a_3 a_3' g_0}{8 \text{ } 6_{20^\circ \text{ C}}} = \frac{130 \cdot 130 \cdot 0,03416}{8 \cdot 57,06997} = 1,2645 \text{ m}$$

Za v = 30 ° C

$$f' = \frac{a_3 a_3' g_0}{8 \text{ } 6_{30^\circ \text{ C}}} = \frac{130 \cdot 130 \cdot 0,03416}{8 \cdot 48,60575} = 1,48465 \text{ m}$$

Za v = 40 ° C

$$f' = \frac{a_3 a_3' g_0}{8 \text{ } 6_{40^\circ \text{ C}}} = \frac{130 \cdot 130 \cdot 0,03416}{8 \cdot 41,82111} = 1,72551 \text{ m}$$

Za v = -5 ° C + Led

$$f' = \frac{a_3 a'_3 g_z}{86_{-5^\circ C}} = \frac{130 \cdot 130 \cdot 0,09352}{8 \cdot 109,78141} = 1,79958 \text{ m}$$

Raspon a₄:

Za v = -20° C

$$f' = \frac{a_4 a'_4 g_0}{86_{-20^\circ C}} = \frac{100 \cdot 97,9795 \cdot 0,03416}{8 \cdot 103,94969} = 0,4024 \text{ m}$$

Za v = -10 ° C

$$f' = \frac{a_4 a'_4 g_0}{86_{-10^\circ C}} = \frac{100 \cdot 97,9795 \cdot 0,03416}{8 \cdot 90,93693} = 0,46 \text{ m}$$

Za v = 0 ° C

$$f' = \frac{a_4 a'_4 g_0}{86_{0^\circ C}} = \frac{100 \cdot 97,9795 \cdot 0,03416}{8 \cdot 78,557744} = 0,53256 \text{ m}$$

Za v = 10 ° C

$$f' = \frac{a_4 a'_4 g_0}{86_{10^\circ C}} = \frac{100 \cdot 97,9795 \cdot 0,03416}{8 \cdot 67,14907} = 0,62305 \text{ m}$$

Za v = 20 ° C

$$f' = \frac{a_4 a'_4 g_0}{86_{20^\circ C}} = \frac{100 \cdot 97,9795 \cdot 0,03416}{8 \cdot 57,06997} = 0,7331 \text{ m}$$

Za v = 30 ° C

$$f' = \frac{a_4 a'_4 g_0}{86_{30^\circ C}} = \frac{100 \cdot 97,9795 \cdot 0,03416}{8 \cdot 48,60575} = 0,86074 \text{ m}$$

Za v = 40 ° C

$$f' = \frac{a_4 a'_4 g_0}{86_{40^\circ C}} = \frac{100 \cdot 97,9795 \cdot 0,03416}{8 \cdot 41,82111} = 1,00 \text{ m}$$

Za v = -5 ° C + Led

$$f' = \frac{a_4 a_4' g_z}{8 \rho_{-5^\circ C}} = \frac{100 \cdot 97,9795 \cdot 0,09352}{8 \cdot 109,78141} = 1,0433 \text{ m}$$

Raspon a₅:

Za v = -20° C

$$f' = \frac{a_5 a_5' g_0}{8 \rho_{-20^\circ C}} = \frac{130 \cdot 128,4523 \cdot 0,03416}{8 \cdot 103,94969} = 0,6859 \text{ m}$$

Za v = -10 ° C

$$f' = \frac{a_5 a_5' g_0}{8 \rho_{-10^\circ C}} = \frac{130 \cdot 128,4523 \cdot 0,03416}{8 \cdot 90,93693} = 0,7841 \text{ m}$$

Za v = 0 ° C

$$f' = \frac{a_5 a_5' g_0}{8 \rho_{0^\circ C}} = \frac{130 \cdot 128,4523 \cdot 0,03416}{8 \cdot 78,557744} = 0,90766 \text{ m}$$

Za v = 10 ° C

$$f' = \frac{a_5 a_5' g_0}{8 \rho_{10^\circ C}} = \frac{130 \cdot 128,4523 \cdot 0,03416}{8 \cdot 67,14907} = 1,06187 \text{ m}$$

Za v = 20 ° C

$$f' = \frac{a_5 a_5' g_0}{8 \rho_{20^\circ C}} = \frac{130 \cdot 128,4523 \cdot 0,03416}{8 \cdot 57,06997} = 1,2494 \text{ m}$$

Za v = 30 ° C

$$f' = \frac{a_5 a_5' g_0}{8 \rho_{30^\circ C}} = \frac{130 \cdot 128,4523 \cdot 0,03416}{8 \cdot 48,60575} = 1,4669 \text{ m}$$

Za v = 40 ° C

$$f' = \frac{a_5 a_5' g_0}{8 \rho_{40^\circ C}} = \frac{130 \cdot 128,4523 \cdot 0,03416}{8 \cdot 41,82111} = 1,7049 \text{ m}$$

Za $v = -5^\circ \text{C} + \text{Led}$

$$f' = \frac{a_5 a'_5 g_z}{8 \cdot 6_{-5^\circ \text{C}}} = \frac{130 \cdot 128,4523 \cdot 0,09352}{8 \cdot 109,78141} = 1,7781 \text{ m}$$

Kritična temperatura:

$$v_k = \frac{6_z}{\beta E} \left(1 - \frac{g_0}{g_z}\right) - 5 = \frac{110}{18,9 \cdot 10^{-6} \cdot 77000} \cdot \left(1 - \frac{0,03416}{0,09352}\right) - 5 = 42,9766^\circ \text{C}$$

$v_k = 42,9766^\circ \text{C} > 40^\circ \text{C}$ iz čega sledi da je najveći provjes pri -5°C .

Montažna tablica naprežanja i provjesa za sve raspone i temperature:

		Montaža pri temperaturi (°C)												
		-20 °C	-10 °C	0 °C	10 °C	20 °C	30 °C	40 °C	-5 °C + led					
Idealni raspon $a_{idealno} = 118,3611$ m														
Provjes vodiča (m)		0,5754	0,6578	0,7614	0,8908	1,0481	1,2307	1,4303	1,4917					
Horizontalno naprežanje $\left(\frac{N}{mm^2}\right)$		103,9496	90,9363	78,5577	67,149	57,0699	48,7108	41,8211	109,7814					
Horizontalna sila (N)		11403,28	9975,7812	8617,7769	7366,2453	6260,568	5343,5747	4520,8576	12043,01958					
Stup		Provjes f (m) za stvarne raspone												
	Raspon a (m)	Visinska razlika h (m)												
1														
	100	0,41282	0,47189	0,5462	0,63906	0,75193	0,888287	1,0261	1,07					
2														
	120	0,59967	0,6854	0,7935	0,9283	1,09227	1,2824	1,4905	1,5545					
3														
	130	0,6942	0,7935	0,9185	1,0746	1,2645	1,4846	1,7255	1,7995					
4														
	100	0,4024	0,46	0,5325	0,623	0,7331	0,86074	1,00	1,0433					
5														
	130	0,6859	0,7841	0,9076	1,0618	1,2494	1,4669	1,7049	1,7781					
6														

4. ZAKLJUČAK

Elektroenergetski vodovi su osnovni element elektroenergetskog sustava i kao takvi njihov mehanički proračun ima iznimnu važnost. Da bi se mogao izgraditi optimalni dalekovod koji će ispunjavati sve tehničke i sigurnosne uvjete, a uz to biti financijski opravdan nužno je napraviti mehanički proračun vodiča.

U proračunu se uvidjelo da promjene temperature i količine dodatnog tereta na vodu mijenjaju iznose naprezanja i veličinu provjesa. Uvidjelo se da pri visokim temperaturama dolazi do povećanja provjesa te da se to mora uzeti u obzir pri izgradnji dalekovoda i određivanju njegove sigurnosne visine. Također se primjetilo da dolazi do povećanja provjesa i pri niskoj temperaturi uz prisustvo leda ili snijega kao dodatnog opterećenja.

Pri niskim temperaturama dolazi do povećanja horizontalnog naprezanja i sile što može dovesti do pucanja vodiča i ostalih elemenata voda što još jednom ukazuje na važnost mehaničkog proračuna vodiča dalekovoda.

5. LITERATURA

1. [4] [5] Ožegović Marija; Ožegović Karlo; “Električne energetske mreže”, FESB Split OPAL COMPUTING d.o.o. Split 1996.
 2. [7] [8] Komen Vitomir; “Prijenos i distribucija električne energije – Nadzemni elektronenergetski vodovi”, “Mehanički proračun vodiča”, Zavod za elektroenergetiku, Tehnički fakultet u Rijeci.
- [1] “AFLglobal copperweld”, sa interneta <https://www.aflglobal.com/getattachment/d8f0aee6-b2f1-4c23-b132-408ce44594cb/Copperweld-Steel-Dead-Soft-Annealed-Single-Strand.aspx>
<http://www.rejyra.com/2013/images/varilla%20coperwell.jpg>, 12.09.2015.
- [2] “A hollow cable that ones spanned the Hoover dan gorge”, sa interneta <http://waynesword.palomar.edu/images2/holcabl2b.jpg>, 12.09.2015.
- [3] http://1.bp.blogspot.com/-6jyNdAnF7Ic/TsWbpd6kunI/AAAAAAAAACMM/M5dX74Wi_LY/s1600/ccc145.jpeg,
12.09.2015
- [6] Jones Nuttall: " Overhead lines" s interneta, <http://www.jonesnuttall.com/overhead-lines>
12.09.2015.

6. POPIS OZNAKA I KRATICA

A – poprečni presjek vodiča

a - raspon

β – koeficijent linearnog toplinskog istezanja

d – udaljenost između dva vodiča u snopu

E – modul elastičnosti vodiča

f – provjes

g – gravitacija

g_z – reducirana težina zaleđenog vodiča

G_o – vlastita težina vodiča

h – visina

m_1 – jedinična masa vodiča

v – temperatura

n – ukupni broj žica

P – Pritisak vjetra na vodič

P – specifični pritisak vjetra (tlak vjetra)

σ – naprezanje vodiča

v – brzina vjetra

x – broj slojeva žice