

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Robert Bađun**

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Janoš Kodvanj

Student:

Robert Bađun

Zagreb, 2017.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se prof.dr.sc. Janošu Kodvanju na podršci te pruženoj pomoći i stručnom usmjeravanju pri izradi završnog rada.

Također, zahvaljujem se tvrtki Metal Product d.o.o na čelu s predsjednikom uprave gosp. Stjepanom Šafranom te tehničkom direktoru gosp. Ivici Klasanu što su mi omogućili izradu ovog rada.

Zahvaljujem se obitelji na pruženoj podršci tijekom studiranja.

Robert Bađun



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Robert BAĐUN**

Mat. br.: 0035193113

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Mehaničko ispitivanje veze izolirane odcjepne stezaljke s električnim vodičem**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Mechanical testing of the connection between insulated branching connector and electrical conductor**

Opis zadatka:

Izolirana stezaljka je namijenjena za prijenos električne energije s glavnog samonosivog kablenskog sklopa ulične električne mreže na kućni priključak. Koristi se za glavne vodiče od 70 mm<sup>2</sup> i 71,5 mm<sup>2</sup> i odcjepne vodiče od 6 mm<sup>2</sup> do 25 mm<sup>2</sup>. Stezaljka je potpuno izolirana i dozvoljava montažu pod naponom glavnog vodiča. Montaža se provodi na temperaturama okoline od -5°C do +35°C bez specijalne opreme za rad pod naponom. Kod stezaljke koja služi za prijenos energije bitan je kontakt glavnog vodiča s odcjepnim vodičem. S ciljem sprječavanja havarija zbog izvlačenja vodiča iz stezaljke spoj se osigurava vijcima.

U radu je potrebno pri statičkom opterećenju odrediti silu izvlačenja vodiča iz stezaljke za različite momente pritezanja vijaka. Ispitivanja provesti pri uobičajenim temperaturama okoline.

Tijekom rada potrebno je:

1. Upoznati se s radom statičke kidalice i pripadajućeg upravljačkog programa.
2. Odrediti prekidnu silu vodiča i usporediti s atestnom dokumentacijom za predmetni vodič.
3. Odrediti silu izvlačenja vodiča iz stezaljke pri različitim momentima pritezanja vijaka na sobnoj temperaturi i temperaturama -5°C i +35°C.
4. Provjeriti električnu vezu glavnog i odcjepnog vodiča pri različitim momentima pritezanja vijaka i temperaturama okoline.
5. Temeljem dobivenih rezultata definirati momente pritezanja vijaka koji pri različitim temperaturama okoline osiguravaju dostatnu čvrstoću spoja stezaljke s vodičem bez izvlačenja ili oštećenja vodiča, uz minimalne prijelazne električne otpore prema normi IEC 61284.

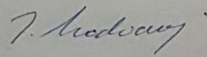
U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:  
30. studenog 2016.

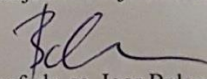
Rok predaje rada:  
1. rok: 24. veljače 2017.  
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2017.  
3. rok: 22. rujna 2017.

Predviđeni datumi obrane:  
1. rok: 27.2. - 03.03. 2017.  
2. rok (izvanredni): 30. 06. 2017.  
3. rok: 25.9. - 29. 09. 2017.

Zadatak zadao:

  
Prof. dr. sc. Janoš Kodvanj

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Igor Balen

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA .....	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY .....	VI
1. UVOD.....	1
2. IZOLIRANA ODCJEPNA STEZALJKA S GLAVNIM I ODCJEPNIM ELEKTRIČNIM VODIČEM.....	2
2.1 Namjena izolirane odcjepne stezaljke.....	2
2.2 Izrada i svojstva izolirane odcjepne stezaljke .....	4
2.3 Vodiči.....	5
3. EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA I REZULTATI.....	8
3.1 Oprema za provedbu ispitivanja .....	8
3.2 Prekidna sila vodiča i usporedba s atestnom dokumentacijom.....	10
3.3 Sila izvlačenja vodiča iz stezaljke.....	16
3.3.1 Određivanje sile izvlačenja vodiča iz stezaljke na -5°C .....	16
3.3.2 Određivanje sile izvlačenja vodiča iz stezaljke na +35°C .....	24
3.4 Električno ispitivanje izolirane odcjepne stezaljke istosmjernom strujom .....	31
4. ZAKLJUČAK.....	36
LITERATURA.....	37
PRILOZI.....	38

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Izolirana odcjepna stezaljka na kabelskom snopu .....	2
Slika 2.	Izolirana odcjepna stezaljka s jednim priključkom .....	3
Slika 3.	Izolirana odcjepna stezaljka: a) izolacijski plašt, b) stezaljka s zaštitnim izolacijskim plaštem, c) dvodijelno aluminijsko tijelo stezaljke.....	3
Slika 4.	Karakteristike korištenih vodiča, izvadak iz norme BS EN 50182:2001 [5] .....	7
Slika 5.	Statička kidalica i upravljačka jedinica .....	8
Slika 6.	Oprema za električna ispitivanja .....	9
Slika 7.	Komora za zagrijavanje uzoraka .....	10
Slika 8.	Uzorci žice prije ispitivanja.....	11
Slika 9.	Mjerenje promjera uzoraka .....	11
Slika 10.	Ispitivanje uzorka na kidalici: a) uzorak 1.2 prije ispitivanja, b) uzorak 1.2 nakon ispitivanja .....	12
Slika 11.	Dijagram sila – vrijeme za uzorak 1.1 .....	13
Slika 12.	Dijagram sila – vrijeme za uzorak 1.2.....	13
Slika 13.	Dijagram sila – vrijeme za uzorak 1.3.....	14
Slika 14.	Dijagram sila – vrijeme za uzorak 1.4.....	14
Slika 15.	Dijagram sila – vrijeme za uzorak 1.5.....	15
Slika 16.	Dijagram sila – vrijeme za uzorak 1.6.....	15
Slika 17.	Mjerenje temperature vodiča .....	17
Slika 18.	Montaža vodiča sa stezaljkom.....	17
Slika 19.	Ispitivanje uzorka na kidalici: a) uzorak prije ispitivanja , b) uzorak nakon ispitivanja .....	18
Slika 20.	Dijagram sila – vrijeme za uzorak s momentom pritezanja 5 Nm .....	19
Slika 21.	Ispitivanje uzorka na kidalici: a) uzorak prije ispitivanja , b) uzorak nakon ispitivanja .....	20
Slika 22.	Dijagram sila – vrijeme za uzorak s momentom pritezanja 10 Nm .....	21
Slika 23.	Ispitivanje uzorka na kidalici: a) uzorak prije ispitivanja, b) uzorak nakon ispitivanja, c) lom vodiča .....	22
Slika 24.	Dijagram sila – vrijeme za uzorak s momentom pritezanja 15 Nm .....	23
Slika 25.	Komora za zagrijavanje uzoraka .....	24
Slika 26.	Pritezanje vijaka stezaljke moment ključem .....	24
Slika 27.	Ispitivanje uzorka na kidalici: a) pozicionirani uzorak prije ispitivanja, b) uzorak nakon ispitivanja, c) detalj veze vodiča i stezaljke .....	25
Slika 28.	Dijagram sila – vrijeme za uzorak s momentom pritezanja 5 Nm .....	26
Slika 29.	Ispitivanje uzorka na kidalici: a) uzorak prije ispitivanja, b) uzorak nakon ispitivanja, c) detalj veze vodiča i stezaljke .....	27
Slika 30.	Dijagram sila – vrijeme za uzorak s momentom pritezanja 10 Nm .....	28
Slika 31.	Ispitivanje uzorka na kidalici: a) uzorak prije ispitivanja, b) uzorak nakon ispitivanja i izvlačenja vodiča iz stezaljke .....	29
Slika 32.	Dijagram sila – vrijeme za uzorak s momentom pritezanja 15 Nm .....	30
Slika 33.	Uzorak pripremljen za električno ispitivanje .....	33

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Rezultati ispitivanja uzoraka vodiča Al 25 mm <sup>2</sup> .....	16
---	----

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$F$	N	Sila izvlačenja vodiča, prekidna sila vodiča
$M$	Nm	Moment pritezanja vijka
$t$	s	Vrijeme
$\vartheta$	°C	Temperatura uzorka
$d$	mm	Promjer žice
$A$	mm <sup>2</sup>	Površina presjeka žice
$R_m$	MPa	Vlačna čvrstoća
$\Delta_{1S}$	V	Pad napona na stezaljki
$\Delta_{2V}$	V	Pad napona na vodiču
$\delta$		Omjer pada napona stezaljke i vodiča



## SAŽETAK

Izolirana odcjepna stezaljka je namijenjena za prijenos električne energije s glavnog samonosivog kablenskog sklopa ulične električne mreže na priključak korisnika. Stezaljka i vodič su tijekom eksploatacije izloženi statičkim i dinamičkim opterećenjima pa je kontakt između stezaljke i odcjepnog vodiča od posebne važnosti. S ciljem sprječavanja nesreća i prekida opskrbe potrošača električnom energijom uslijed oštećenja i pucanja vodiča, provode se mehanička i električna ispitivanja stezaljke i vodiča prema zahtjevima normi.

U ovom radu ispitana je izolirana odcjepna stezaljka s pripadajućim odcjepnim vodičem. Pored ispitivanja mehaničke veze između stezaljke i vodiča provedeno je i električno ispitivanje stezaljke s glavnim i odcjepnim vodičem. Sila izvlačenja vodiča iz stezaljke ispitana je za različite momente pritezanja vijaka stezaljke pri uobičajenim temperaturama okoline, dok su električna ispitivanja stezaljke s vodičem provedena istosmjernom strujom pri uobičajenim temperaturama montaže. Rezultati ispitivanja su pokazali da pri uobičajenim temperaturama okoline moment pritezanja vijaka kod montaže može iznositi do 10 Nm bez opasnosti od oštećenja vodiča. Rezultati električnih ispitivanja stezaljke i vodiča istosmjernom strujom u potpunosti zadovoljavaju uvjet iz norme pri svim temperaturama ispitivanja.

Ključne riječi: izolirana odcjepna stezaljka, električni vodič, moment pritezanja, sila izvlačenja.

## **SUMMARY**

The insulated branch clamp is designed to transmit electrical power from the main self-supporting cable connector of a street electrical network to a user terminal. When used, the clamp and the conductor are subject to static and dynamic loads. Therefore, the contact between the clamp and the branch conductor is particularly important. In order to prevent transmission line failures and power supply cuts due to conductor damage or cracking, mechanical and electrical tests of the clamp and the conductor were carried out in accordance with the standards.

In this study, the branch clamp and the corresponding branch conductor were tested. In addition to testing the mechanical connection between them, the connection between the clamp and the main and branch conductor was also tested electrically. The pull-out force of the conductor was tested for various bolt tensioning torques at normal ambient temperatures, while the electrical testing of the connection between the clamp and the conductor was conducted using direct current (DC) at usual installation temperatures. The results showed that at normal ambient temperatures bolt tensioning torque during assembly can be up to 10 Nm without any risk of damaging the conductors. The results of testing the clamp and the conductor using DC fully met the requirements of the standards at all testing temperatures.

**Keywords:** insulated branch clamp, conductor, bolt tensioning torque, pullout force

## 1. UVOD

Kod prijenosa električne energije niskonaponskom nadzemnom mrežom koristi se spojna i ovjesna oprema s izoliranim vodičima u snopu. Spojna oprema koja je ispitana u okviru ovog rada je izolirana odcjepna stezaljka s pripadajućim vodičima.

Zbog opterećenja turbulencijom vjetra, vibracijama i dodatnim teretom uslijed snijega i leda može doći do izvlačenja odcjepnog vodiča iz stezaljke te u najgorem slučaju do prekida napajanja električnom energijom korisnika priključenih na stezaljku.

Da bi se izbjegle havarije i povećala sigurnost isporuke električne energije nadzemnim vodovima provode se ispitivanja kritičnih elemenata niskonaponske mreže pri različitim vremenskim uvjetima. U ovom radu je ispitana veza izolirane odcjepne stezaljke s odgovarajućim odcjepnim vodičem pri vlačnom opterećenju za različite momente pritezanja vijaka stezaljke i uobičajene temperature okoline. Električna ispitivanja stezaljke i vodiča provedena su istosmjernom strujom pri različitim temperaturama montaže stezaljke i vodiča.

U drugom poglavlju opisana je namjena izolirane odcjepne stezaljke s pripadajućim odcjepnim električnim vodičima. Navedena su osnovna svojstva i zahtjevi koje stezaljka mora zadovoljiti prema normama. Također su navedena svojstva vodiča i materijala za njihovu izradu.

U trećem poglavlju opisano je eksperimentalno ispitivanje stezaljki i vodiča i dani su rezultati ispitivanja. Navedena je korištena oprema, opisana je provedba ispitivanja sile izvlačenja vodiča iz stezaljke i električno ispitivanje stezaljke i vodiča istosmjernom strujom.

Zaključci na temelju provedenih ispitivanja dani su u četvrtom poglavlju.

Ispitivanja prikazana u ovom radu provedena su u laboratoriju tvrtke Metal product d.o.o.

## 2. IZOLIRANA ODCJEPNA STEZALJKA S GLAVNIM I ODCJEPNIM ELEKTRIČNIM VODIČEM

### 2.1 Namjena izolirane odcjepne stezaljke

Izolirana odcjepna stezaljka (Slika 1) je namijenjena za prijenos električne energije s glavnog samonosivog kablenskog snopa ulične električne mreže na priključne vodiče kućnog priključka.



**Slika 1. Izolirana odcjepna stezaljka na kablenskom snopu**

Izolirane odcjepne stezaljke mogu biti s jednim ili više odcjepnih priključaka vodiča. Nedostaci stezaljki s jednim priključkom (Slika 2.) su:

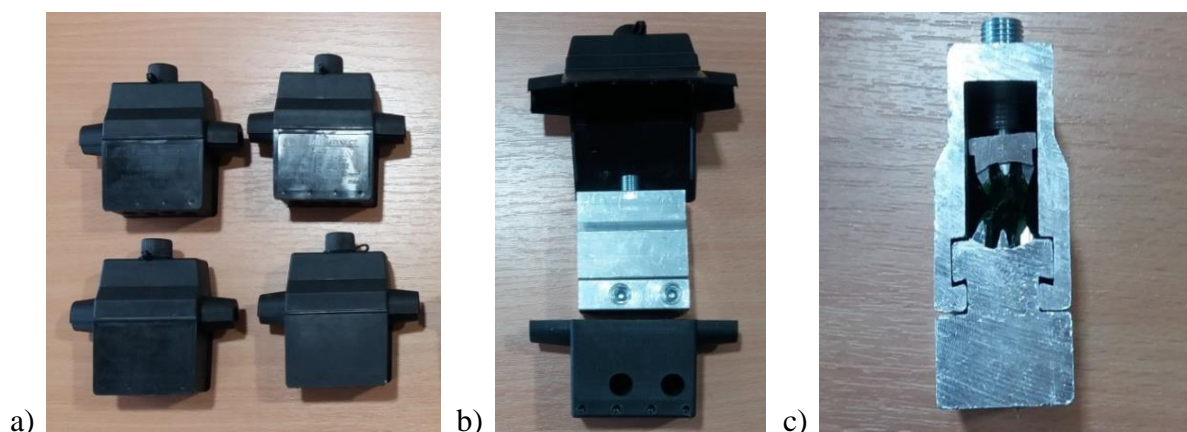
- nemogućnost priključivanja novih korisnika,
- nemogućnost montaže velikog broja stezaljki na stupno mjesto,
- veći troškovi priključivanja novih korisnika,
- dugotrajna montaža stezaljki za više korisnika.

Prednost stezaljke sa samo jednim odcjepnim priključkom je manja cijena stezaljke.



**Slika 2. Izolirana odcjepna stezaljka s jednim priključkom**

Na slici 3 prikazana je odcjepna stezaljka ispitivana u ovom radu. Stezaljka ima veoma zahtjevnu ulogu, predviđena je za priključak četiri odcjepna vodiča koji se priključuju na glavni fazni vodič. Stezaljka se montira na glavni fazni izolirani Al vodič od  $70 \text{ mm}^2$ , a na nju se mogu priključiti četiri odcjepna izolirana Al vodiča od  $16 \text{ mm}^2$  ili  $25 \text{ mm}^2$ .



**Slika 3. Izolirana odcjepna stezaljka: a) izolacijski plašt, b) stezaljka s zaštitnim izolacijskim plaštem, c) dvodijelno aluminijsko tijelo stezaljke**

Koristi se za kućne priključke strujnog opterećenja do 110 A s vodičem od  $16 \text{ mm}^2$  odnosno 145 A s vodičem od  $25 \text{ mm}^2$ . Zahtjevi koje vodiči moraju zadovoljiti definirana su normom EN 60889: 1997 [1]. Montira se na samonosivom kabelskom snopu niskonaponske mreže koji se nalazi na betonskim ili drvenim stupovima ulične mreže za napajanje kućanstava ili drugih objekata.

Stezaljka je projektirana tako da može napajati četiri neovisna odcjepna priključka s iste faze glavnog vodiča čime se smanjuje broj stezaljki, vrijeme montaže stezaljke i ukupni troškovi u odnosu na stezaljke s jednim priključkom.

## 2.2 Izrada i svojstva izolirane odcjepne stezaljke

Stezaljka je projektirana i izrađena na temelju električnih i mehaničkih svojstava propisanih normama CEI IEC 61284 [2] i BS 3288/Part I [3]. Norma zahtjeva da stezaljke moraju imati najmanje 30% veću vodljivost od vodiča koji su priključeni na stezaljku. Temperatura stezaljke pri eksploataciji mora biti manja od vodiča, a za vodič je dozvoljeno maksimalno zagrijavanje do 80°C. Ciklično strujno starenje stezaljke na odcjepnim stezaljkama i adekvatnim vodičima mora zadovoljiti uvjete iz predmetnih normi. Električna i mehanička svojstva stezaljke nakon provedenih 500 ciklusa električnog ispitivanja starenjem ne smiju biti manja od 15% od vrijednosti prije ispitivanja.

Tijelo izolirane odcjepne stezaljke izrađeno je iz aluminijske legure koja posjeduje veliku čvrstoću, dobru električnu provodljivost i malu težinu. Tijelo stezaljke se sastoji iz dva dijela, nepokretnog dijela na kojem su izrađeni oštri zupci i pokretnog dijela s vijkom na kojem je montiran nazubljeni segment koji služi za probijanje izolacije na glavnom vodiču. Vijci su izrađeni od aluminijske bronce i zaštićeni kositrenjem od oksidacije i naponske korozije. Mjesta na stezaljci koja služe za priključak vodiča napunjena su mašću koja služi za poboljšanje kontakta vodiča sa stezaljkom i zaštitu spoja od atmosferskih utjecaja kiše, leda i mogućih nečistoća. Stezaljka je smještena u košuljicu koja je izrađena od specijalnog polimera koji je otporan na UV zrake, ozon, natrijev klorid i postojan je na temperaturama okoline od -40°C do +80°C. Košuljica od polimera se ispituje na sve faktore koji utječu na starenje materijala košuljice kao što su atmosferski uvjeti, posolica i zračenje, koji bitno mogu skratiti životni vijek cijelog sklopa u eksploatacijskim uvjetima.

Tijekom proizvodnje izolirane odcjepne stezaljke vrše se kontinuirane kontrole i ispitivanja kako ulaznog materijala za proizvodnju dijelova stezaljke, tako i gotove kompletne stezaljke. Ispitivanje i kontrola ulaznog materijala za proizvodnju stezaljke obuhvaća kontrolu kvalitete aluminijskog profila za proizvodnju stezaljki i šipki od aluminijske bronce za proizvodnju vijaka za montažu glavnog i odcjepnih vodiča.

Usvojena su sljedeća ispitivanja i kontrole izolirane odcjepne stezaljke:

- ispitivanje vlačne čvrstoće i tvrdoće s ciljem provjere atestne dokumentacije koja prati ulazni materijal,
- dimenzijska kontrola.

Kontrola kompletne stezaljke provodi se slijedećim ispitivanjima:

- određivanje sile izvlačenja vodiča iz stezaljke pri različitim momentima pritezanja vijaka na stezaljkama i temperaturama okoline,
- električno ispitivanje vodljivosti stezaljke i pripadajućih vodiča,
- električno ispitivanje utjecaja umjetnog starenja na svojstva stezaljke i pripadajućih vodiča.

S obzirom da se stezaljka montira na vanjsku električnu mrežu dodatno je mehanički opterećena, dinamički zbog udara vjetra i dodatnim teretom uslijed snijega i leda. Zbog navedenog stezaljka svojom konstrukcijom mora apsorbirati sva opterećenja, ostvariti siguran električni kontakt i osigurati opskrbu potrošaču električnom energijom dugi niz godina. Pored mehaničkih ispitivanja sa stezaljkom se provode i električna ispitivanja prema zahtjevima gore navedenih normi. Stezaljka se električno ispituje na umjetno starenje električnom strujom cikličkim zagrijavanjem i hlađenjem. Kod takvog ispitivanja struja se može povećati do 50% od nominalne vrijednosti za najmanji presjek vodiča ispitnog uzorka. Ispitni uzorak sačinjava glavni vodič, izolirana odcjepna stezaljka i odcjepni vodič. Ispitni uzorak se zagrijava strujom na 100°C u trajanju od 30 minuta, nakon čega se hladi na temperaturu okoline i ponovo zagrijava na 100°C do konačnih 500 ciklusa. Ovakvo ispitivanje izoliranih odcjepnih stezaljki odgovara eksploatacijskim uvjetima u trajanju od 20 godina. Po završetku ispitivanja provjerava se utjecaj stupnja starenja na smanjenje električnih i mehaničkih osobina stezaljke. Kontrola također obuhvaća vizualni pregled aluminijskog tijela stezaljke i izolacijskog plašta stezaljke. Nakon provedenih ispitivanja, ukoliko stezaljka zadovoljava zahtjeve propisane normama, stezaljka se daje u serijsku proizvodnju.

### 2.3 Vodiči

Vodiči kao osnovni funkcionalni elementi dalekovoda imaju zadatak provoditi električnu struju, posjedovati propisana mehanička, električna i izolacijska svojstva. Uslijed vlastite težine vodiči su mehanički opterećeni na vlak, a zbog činjenice da se protjecanjem struje kroz vodič stvaraju Jule-ovi gubici to ih čini termički opterećenima. Vodiči mogu biti izrađeni u obliku žica ili užadi, pri čemu se za prijenos većih snaga koriste isključivo vodiči u obliku užadi. Za izradu električnih vodiča nadzemnih vodova koriste se razni materijali, od kojih se traži dobra električna vodljivost, velika mehanička čvrstoća, dobra prilagodljivost konfiguraciji terena, otpornost na koroziju i starenja te prihvatljiva cijena. Sva navedena

svojstva ne mogu se naći u samo jednom materijalu (tzv. homogeni vodiči) pa se često primjenjuju tzv. kombinirani vodiči koji se sastoje iz najmanje dva različita materijala. Presjek vodiča i materijal od kojeg je izrađen definiraju maksimalno dozvoljenu struju koja smije trajno protjecati vodom u eksploataciji. Veće struje od nazivnih su dopuštene ali u kraćem vremenu, ovisno o strujnom preopterećenju.

Materijali od kojih mogu biti izgrađeni vodiči su:

- Bakar (Cu) – ima najbolja električna svojstva.
- Aluminij (Al) - danas prevladava kao materijal za izradu vodiča za nadzemne vodove. U električnim svojstvima zaostaje za bakrom, ali ima manju specifičnu težinu, lakši je za montažu, jeftiniji je od bakrenih vodiča, zbog čega je istisnuo bakar u gradnji nadzemnih vodova. Osjetljiv je na mehanička oštećenja i strujna preopterećenja. Vodiči od aluminijske legure se sve više koriste jer imaju dobra mehanička, električna svojstva, manje su specifične težine i otporniji su za rukovanje i montažu na dalekovode zbog veće tvrdoće žica u odnosu na čiste aluminijske vodiče.
- Čelik (Fe) - ima vrlo loša električna, ali dobra mehanička svojstva. Čelični vodiči se često primjenjuju kao zaštitna užad na dalekovodima velike snage. Od korozije se štiti vrućim cinčanjem.
- Alučel (Al/Č) - je kombinirani vodič s jezgrom od čelične žice i omotačem od žica aluminijske u više slojeva. Čelik preuzima mehaničko opterećenje, a aluminij ulogu električnog vodiča. Najčešći omjer presjeka aluminijske i čelične žice je 6:1, ali može biti i manji ukoliko se traži veća mehanička čvrstoća koju daje čelik.

Aluminijski vodiči imaju manju specifičnu masu u odnosu na bakarne vodiče, dvostruko su jeftiniji ali je električna vodljivost manja od bakrenih vodiča. Uz to aluminij ima dvostruko veći specifični toplinski kapacitet od bakra. Stoga je razumljivo kako se za nadzemne vodove danas koriste pretežno aluminijski i vodiči od aluminijske legure. S druge strane, mehanička čvrstoća aluminijskih vodiča je znatno manja od bakrenih, posebno žilavost. Manja gustoća aluminijske u odnosu na bakar uzrokuje veći promjer i manju masu aluminijskih vodiča, što kod nadzemnih vodova rezultira većom pobudom eolskih vibracija, koji se moraju dodatno štiti prigušivačima vibracija [4].

U ovom radu korišteni su vodiči Al 70 mm<sup>2</sup> kao glavni vodič i Al 25 mm<sup>2</sup> kao odcjepni vodič. Neka karakteristična svojstva ovih vodiča prikazana su na slici 4. Debljina izolacije vodiča je 1,2 mm, otporna je na sva atmosferska zračenja, mehanička oštećenja i ima dug vijek trajanja.



Code	Old code	Area	No. of wires	Diameter		Mass per unit length	Rated strength	DC resistance	Final modulus of elasticity	Coefficient of linear expansion	Current carrying capacity
				Wire	Cond.						
		mm <sup>2</sup>		mm	mm						
16-AL1	16	15,9	7	1,70	5,10	43,4	3,02	1,798 6	60 000	2,30E-05	110
24-AL1	25	24,2	7	2,10	6,30	66,3	4,36	1,178 7	60 000	2,30E-05	145
34-AL1	35	34,4	7	2,50	7,50	93,9	6,01	0,831 7	60 000	2,30E-05	180
49-AL1	50	49,5	7	3,00	9,00	135,2	8,41	0,577 6	60 000	2,30E-05	225
4S-AL1	50	48,3	19	1,80	9,00	132,9	8,94	0,594 4	57 000	2,30E-05	225
6S-AL1	70	65,8	19	2,10	10,5	180,9	11,85	0,436 7	57 000	2,30E-05	270
93-AL1	95	93,3	19	2,50	12,5	256,3	16,32	0,308 1	57 000	2,30E-05	340
117-AL1	120	117,0	19	2,80	14,0	321,5	19,89	0,245 6	57 000	2,30E-05	390
147-AL1	150	147,1	37	2,25	15,8	405,7	26,48	0,196 0	57 000	2,30E-05	455
182-AL1	185	181,6	37	2,50	17,5	500,9	31,78	0,158 8	57 000	2,30E-05	520
243-AL1	240	242,5	61	2,25	20,3	671,1	43,66	0,119 3	55 000	2,30E-05	625
299-AL1	300	299,4	61	2,50	22,5	828,5	52,40	0,096 6	55 000	2,30E-05	710
400-AL1	400	400,1	61	2,89	26,0	1 107,1	68,02	0,072 3	55 000	2,30E-05	855
500-AL1	500	499,8	61	3,23	29,1	1 382,9	82,47	0,057 9	55 000	2,30E-05	990
626-AL1	625	626,2	91	2,96	32,6	1 739,7	106,45	0,046 4	55 000	2,30E-05	1 140
802-AL1	800	802,1	91	3,35	36,9	2 228,3	132,34	0,036 2	55 000	2,30E-05	1 340
1000-AL1	1000	999,7	91	3,74	41,1	2 777,3	159,95	0,029 1	55 000	2,30E-05	1 540

NOTE 1 NOTE Direction of lay of external layer is right-hand (Z).

NOTE 2 Values of final modulus of elasticity and coefficient of linear expansion for the conductor sizes listed in the Table are used in Germany. Values for other conductor constructions may be calculated using the method given in IEC 61597

NOTE 3 Guideline values of current carrying capacity are valid up to a frequency of 60 Hz, assuming a wind velocity of 0,6 m/s, the effect of solar radiation for Germany, an initial ambient temperature of 35 °C and a conductor temperature of 80 °C. For special applications, when there is no air turbulence, the values should be reduced by 30 %.

Slika 4. Karakteristike korištenih vodiča, izvadak iz norme BS EN 50182:2001 [5]

### 3. EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA I REZULTATI

#### 3.1 Oprema za provedbu ispitivanja

Za ispitivanja izolirane odcjepne stezaljke korištena je statička kidalica s elektromotornim pogonom i frekventnim pretvaračem koji omogućuje promjene prirasta sile u vremenu prema potrebi ispitivanja (Slika 5).

Očitavanje vrijednosti sile na kidalici je preko programa na računalu koji prikazuje dijagram sila-vrijeme i omogućuje upis parametara ispitivanja: naziv uzorka, kataloški broj uzorka, norma ispitivanja, garantirana prekidna sila, datum ispitivanja i ime ispitivača. Pomoću programa dobiva se statistička obrada rezultata: dobivena vrijednost sile tijekom ispitivanja, standardna devijacija i aritmetička sredina za više uzoraka, maksimalna i minimalna sila ako se ispituje više uzoraka.

Kidalica je umjerena od strane ovlaštenog umjerenog laboratorija u klasi 0,5.



Slika 5. Statička kidalica i upravljačka jedinica

Da bi se osigurao dobar kontakt između stezaljke i vodiča bez opasnosti od oštećivanja, vijci stezaljke se kod montaže pritežu propisanim momentom. U ovom radu je za kontrolirano pritezanje vijaka korišten moment ključ (Stahlwille, Njemačka) s područjem do 60 Nm.

Prikaz iznosa momenta je u digitalnom obliku s rezolucijom  $10^{-1}$  Nm. Moment ključ je umjeren u akreditiranom umjerenom laboratoriju. Za mjerenje dimenzija odcjepne stezaljke i vodiča korišteno je pomično mjerilo s digitalnim prikazom rezultata mjerenja do 150 mm s točnošću  $10^{-2}$  mm (Mitutoyo, Japan). Pomično mjerilo je umjeren u akreditiranom umjerenom laboratoriju. Električna ispitivanja odcjepne stezaljke s vodičem provedena su pomoću transformatora istosmjerne struje s točnošću od  $\pm 1$  A (Slika 6). Raspon proizvodnje istosmjerne struje je od 5 A do 4000 A. Uređaj ima dvostruku regulaciju i kontrolu izlazne struje prema ispitnom uzorku. Napon koji transformator ima tijekom ispitivanja se kreće od 5 V do 20 V ovisno o tipu ispitnog uzorka. Laboratorij posjeduje i strujna kliješta koja služe za dodatnu kontrolu ispitne struje koja teče kroz strujni krug. Sva oprema je umjeren od strane akreditiranog umjerenog laboratorija.



**Slika 6. Oprema za električna ispitivanja**

Jedan od zadataka u ovom radu je bio odrediti sile izvlačenja vodiča iz odcjepne stezaljke pri različitim momentima pritezanja vijaka na povišenoj temperaturi ( $+35^{\circ}\text{C}$ ). Za zagrijavanje stezaljke i vodiča korištena je komora s mogućnošću grube regulacije temperature pa je temperatura tijekom zagrijavanja kontrolirana termometrom (Slika 7).



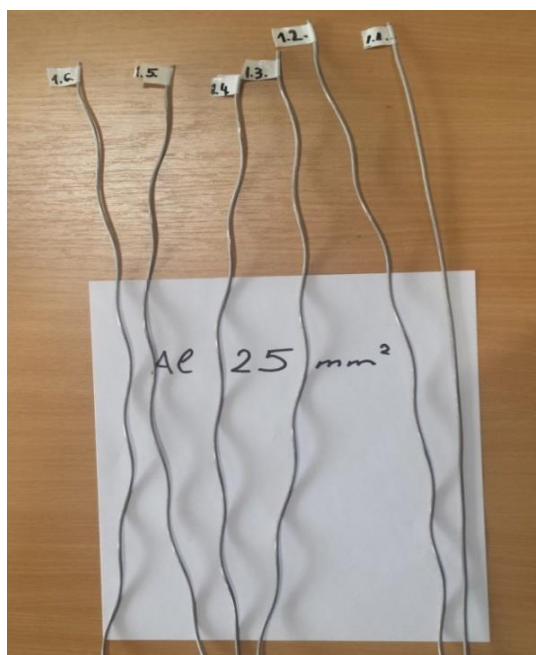
Slika 7. Komora za zagrijavanje uzoraka

### 3.2 Prekidna sila vodiča i usporedba s atestnom dokumentacijom

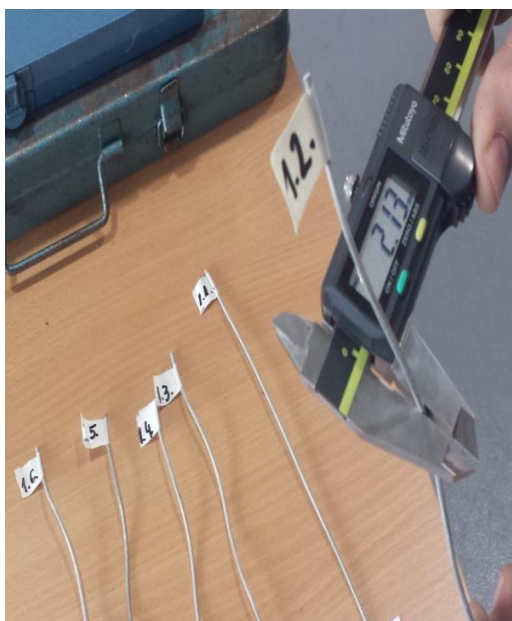
Ispitivanje prekidne sile i vlačne čvrstoće odcjepnog vodiča Al 25 mm<sup>2</sup> provedeno je prema normi EN 60889:1997 [1]. Garantirana vrijednost prekidne sile prema normi iznosi  $F = 480$  N, a za promjer žice od 2,0 do 2,25 mm vlačna čvrstoća iznosi  $R_m = 180$  MPa.

Uzorci su ispitani na sobnoj temperaturi ( $\vartheta = +20^\circ\text{C}$ ). Odcjepni vodič se sastoji od plastične izolacije i snopa od sedam žica, od kojih je za ispitivanje izabrano šest (Slika 8).

Svih šest odabranih uzoraka prvo je označeno oznakama 1.1-1.6 i izmjeren im je promjer digitalnim pomičnim mjerilom (Slika 9). Zatim je izračunata površina presjeka te provedeno samo ispitivanje.



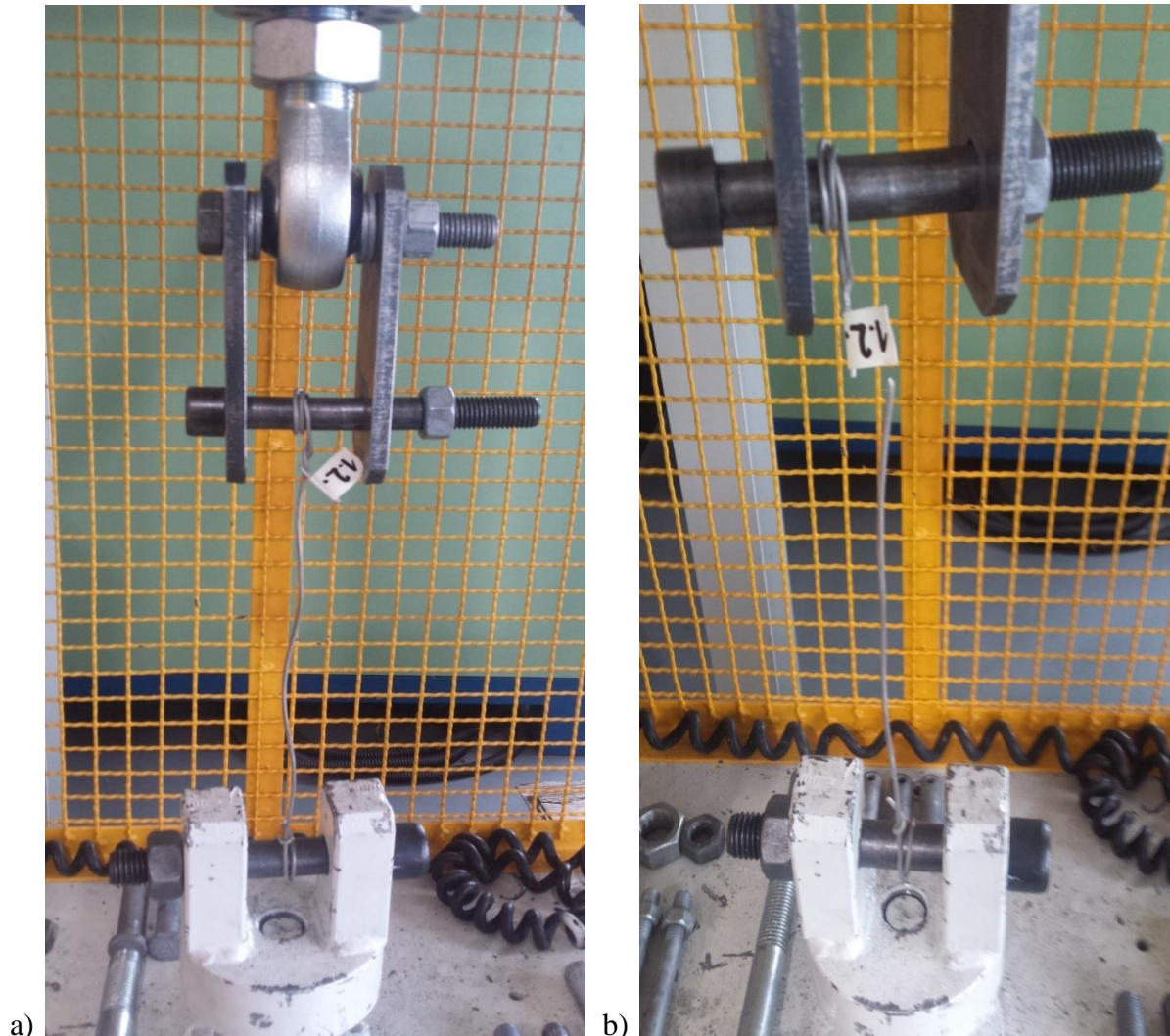
**Slika 8. Uzorci žice prije ispitivanja**



**Slika 9. Mjerenje promjera uzoraka**

Svaki uzorak je pojedinačno namotan na dva vijka koja su zatim stavljena zajedno s uzorkom u prihvat statičke kidalice. Kod pozicioniranja uzoraka na kidalici treba obratiti pozornost da su namotani na sredini vijka kako bi bili opterećeni na vlak bez opasnosti od proklizavanja tijekom ispitivanja. Uzorci su ispitani do loma i svaki je zadovoljio vrijednost prekidne sile koju nalaže norma ispitivanja.

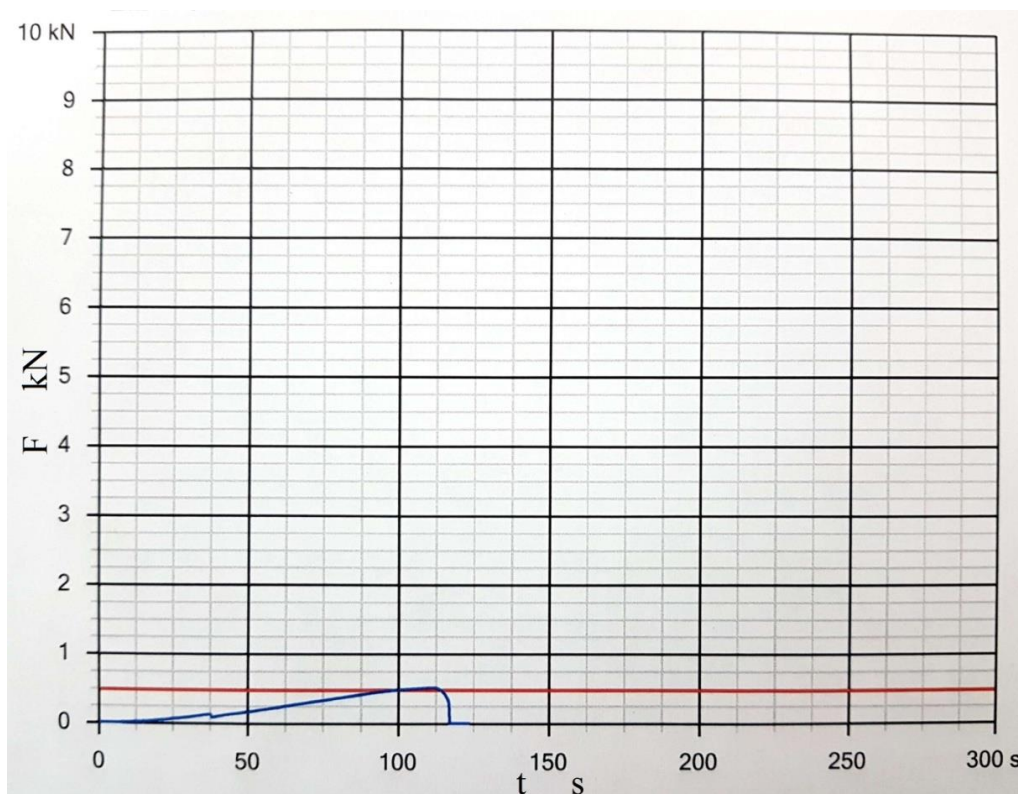
Na slici 10 a) prikazan je uzorak 1.2 prije ispitivanja, a na slici 10 b) uzorak 1.2 nakon ispitivanja.



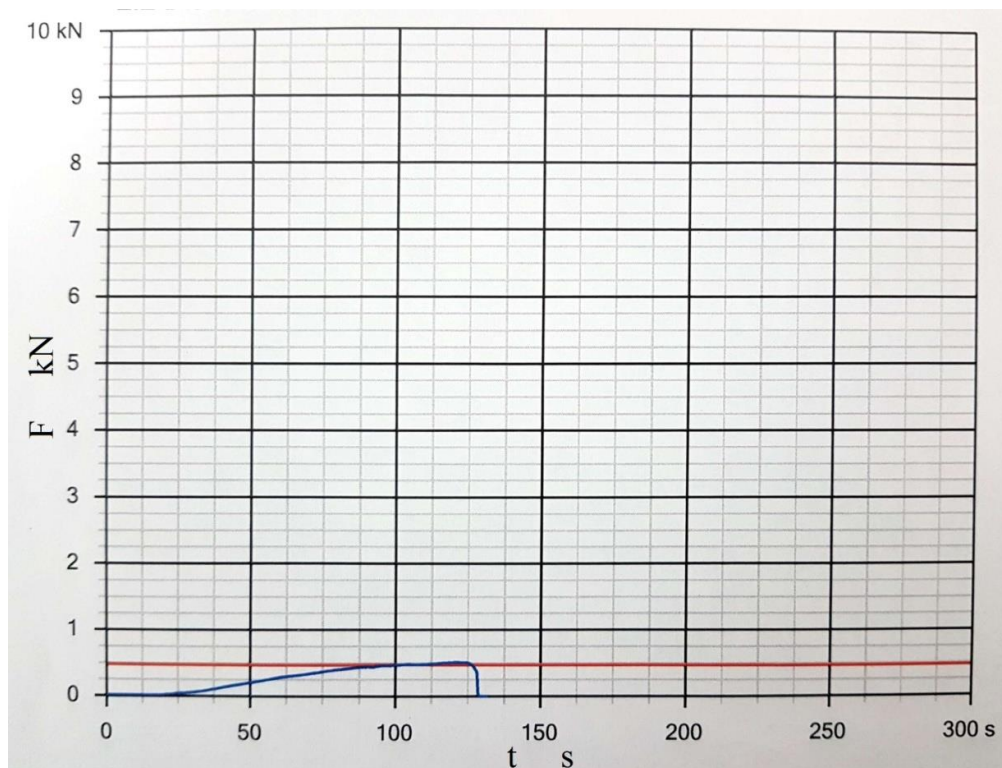
**Slika 10. Ispitivanje uzorka na kidalici: a) uzorak 1.2 prije ispitivanja, b) uzorak 1.2 nakon ispitivanja**

Prekidna sila koja se postiže na statičkoj kidalici tijekom ispitivanja zapisuje se i očitava pomoću upravljačkog programa na računalu u obliku dijagrama sila – vrijeme. Crvenom linijom u dijagramu označena je garantirana vrijednost sile koju uzorak mora izdržati prema normi, a plava linija prikazuje promjenu sile za vrijeme ispitivanja.

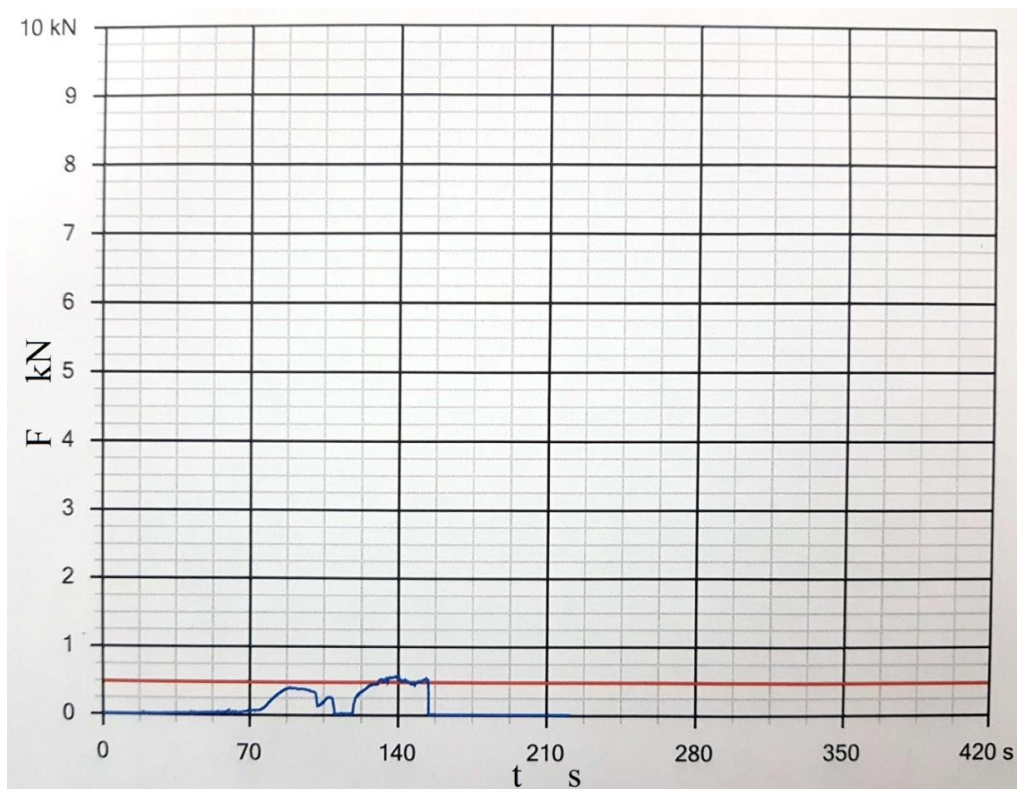
Na slikama od 11 do 16 prikazani su dijagrami sila-vrijeme za sve ispitane uzorke žica, a rezultati za prekidnu silu i vlačnu čvrstoću dani su u tablici 1.



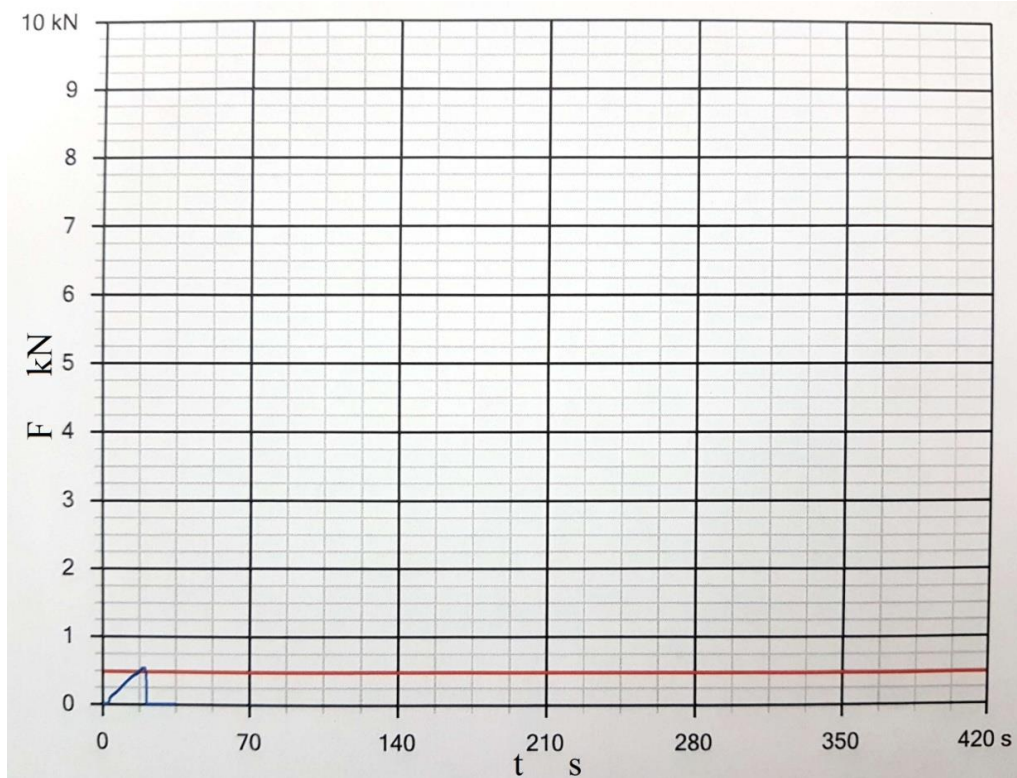
Slika 11. Dijagram sila – vrijeme za uzorak 1.1



Slika 12. Dijagram sila – vrijeme za uzorak 1.2

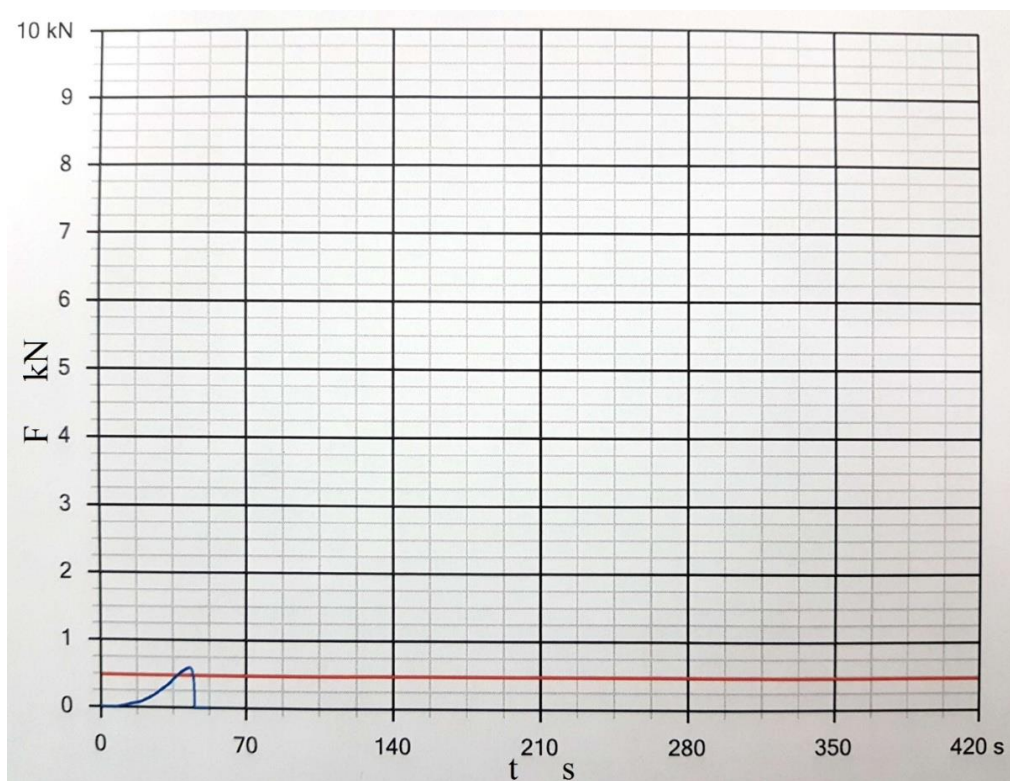


Slika 13. Dijagram sila – vrijeme za uzorak 1.3

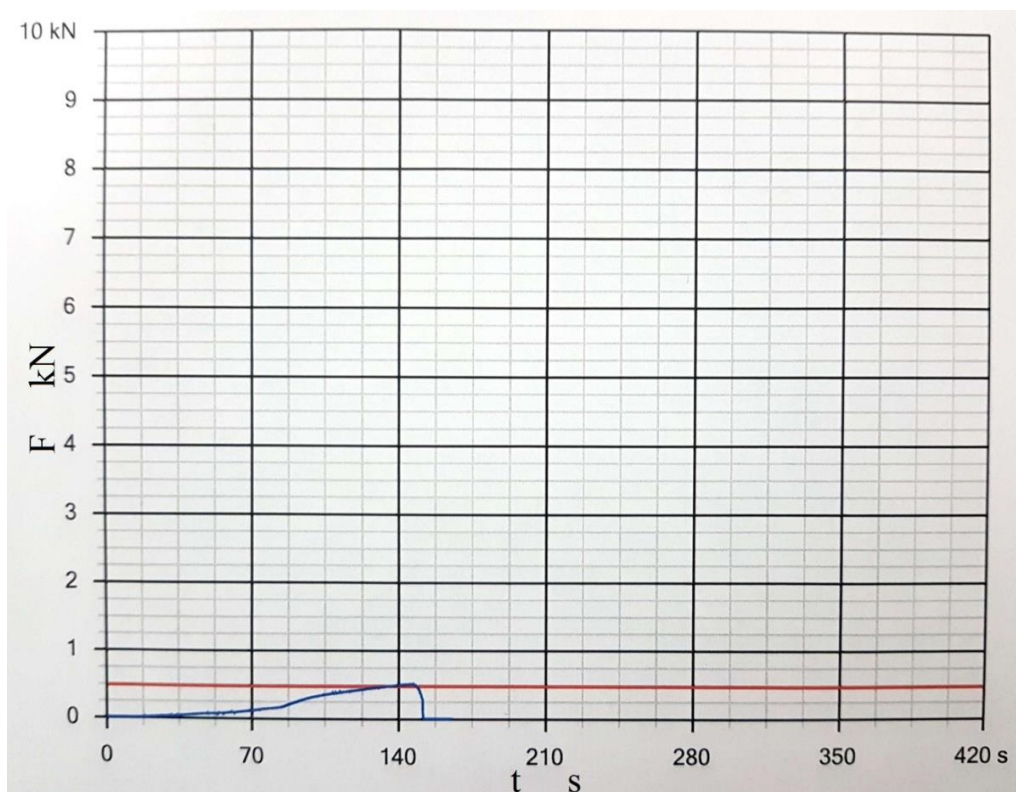


Slika 14. Dijagram sila – vrijeme za uzorak 1.4





Slika 15. Dijagram sila – vrijeme za uzorak 1.5



Slika 16. Dijagram sila – vrijeme za uzorak 1.6

Tablica 1. Rezultati ispitivanja uzoraka vodiča Al 25 mm<sup>2</sup>

Redni broj uzoraka	Promjer žice $d$ (mm)	Površina presjeka $A$ (mm <sup>2</sup> )	Prekidna sila $F$ (N)	Vlačna čvrstoća $R_m$ (MPa)	Zaključak
1.1	2,10	3,46	500	144,51	Zadovoljen uvjet prekidne sile. Uvjet vlačne čvrstoće nije zadovoljen.
1.2	2,13	3,56	500	140,45	
1.3	2,12	3,53	600	169,97	
1.4	2,10	3,46	500	144,51	
1.5	2,12	3,53	600	169,97	
1.6	2,11	3,49	500	143,27	

### 3.3 Sila izvlačenja vodiča iz stezaljke

Ispitivanja su provedena s različitim momentima pritezanja vijaka stezaljke na temperaturama -5°C i +35°C. Ove temperature su odabrane na temelju iskustva proizvođača i uobičajene su u eksploatacijskim uvjetima montaže stezaljke na dalekovodima.

#### 3.3.1 Određivanje sile izvlačenja vodiča iz stezaljke na -5°C

Temperatura od -5°C postignuta je držanjem stezaljki i odcjernih vodiča na vanjskoj temperaturi okoline (Slika 17). Nakon postignute temperature stezaljki i vodiča izvršeno je pritezanje vijka moment ključem s 5 Nm, 10 Nm i 15 Nm na tri različita Al vodiča od 25 mm<sup>2</sup> i tri različite odjepne stezaljke (Slika 18).

Nakon postavljanja vodiča u stezaljku uzorak je pozicioniran na kidalici za provedbu vlačnog ispitivanja. Na slici 19 a) prikazan je uzorak prije ispitivanja, a na slici 19 b) nakon ispitivanja. Uzorak na kidalicu s gornje strane je stavljen u jednostavni prihvatač napravljen od dva vijka i dvije pločice. Jedan vijak prolazi kroz čeljust kidalice a drugi vijak prolazi kroz stezaljku na mjestu glavnog vodiča. Na donjoj strani odcjepni vodič je učvršćen u čeljust kidalice.



Slika 17. Mjerenje temperature vodiča



Slika 18. Montaža vodiča sa stezaljkom

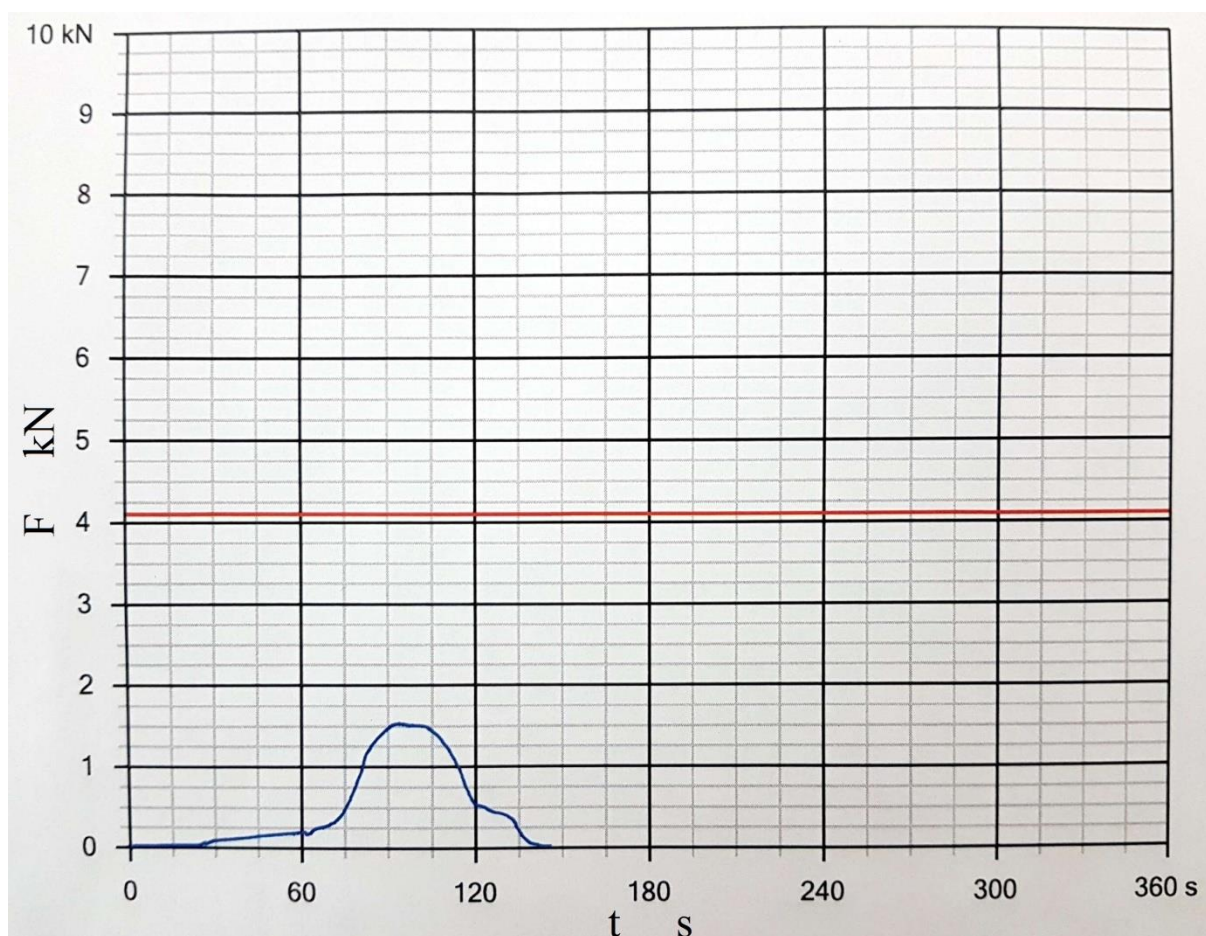


Slika 19. Ispitivanje uzorka na kidalici: a) uzorak prije ispitivanja, b) uzorak nakon ispitivanja

Detalj A na slici 19 b) pokazuje da je došlo do izvlačenja odcjepnog vodiča iz stezaljke.

Dijagram promjene sile tijekom vlačnog ispitivanja (sila-vrijeme) za uzorak s momentom pritezanja  $M = 5 \text{ Nm}$  prikazan je na slici 20.

Iz dijagrama je vidljivo da je kod temperature  $-5^\circ\text{C}$  i momenta pritezanja vijka s  $5 \text{ Nm}$  došlo do izvlačenja  $A1 \text{ } 25 \text{ mm}^2$  vodiča iz odcjepne stezaljke. Sila pri kojoj je nastupilo popuštanje veze iznosila je  $1,5 \text{ kN}$ .



Slika 20. Dijagram sila – vrijeme za uzorak s momentom pritezanja 5 Nm

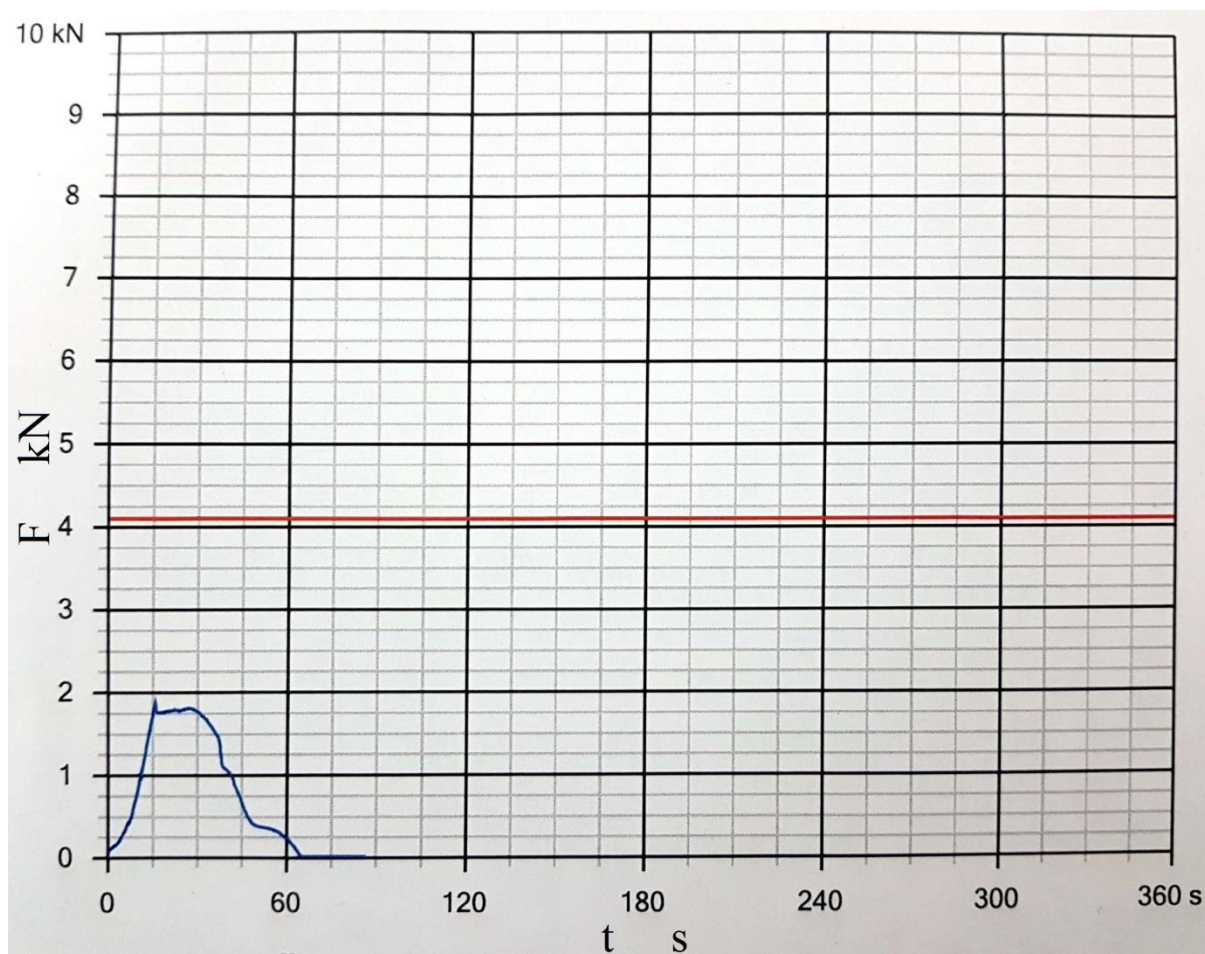
Nakon ponovnog postavljanja vodiča u stezaljku i pritezanja momentom 10 Nm uzorak je pozicioniran na kidalici za provedbu vlačnog ispitivanja. Na slici 21 a) prikazan je uzorak prije ispitivanja, a na slici 21 b) nakon ispitivanja.



**Slika 21. Ispitivanje uzorka na kidalici: a) uzorak prije ispitivanja, b) uzorak nakon ispitivanja**

Na detalju B slike 21 b) vidljivo je da je došlo do izvlačenja odcjepnog vodiča iz stezaljke. Dijagram promjene sile tijekom vlačnog ispitivanja (sila-vrijeme) za uzorak s momentom pritezanja 10 Nm prikazan je na slici 22.

Iz dijagrama je vidljivo da je kod temperature  $-5^{\circ}\text{C}$  i momenta pritezanja vijka s 10 Nm došlo do izvlačenja Al  $25\text{ mm}^2$  vodiča iz odcjepne stezaljke. Sila pri kojoj je nastupilo popuštanje veze iznosila je 1,9 kN. S obzirom na prethodni uzorak ovaj je izdržao za 21% veću silu.



Slika 22. Dijagram sila – vrijeme za uzorak s momentom pritezanja 10 Nm

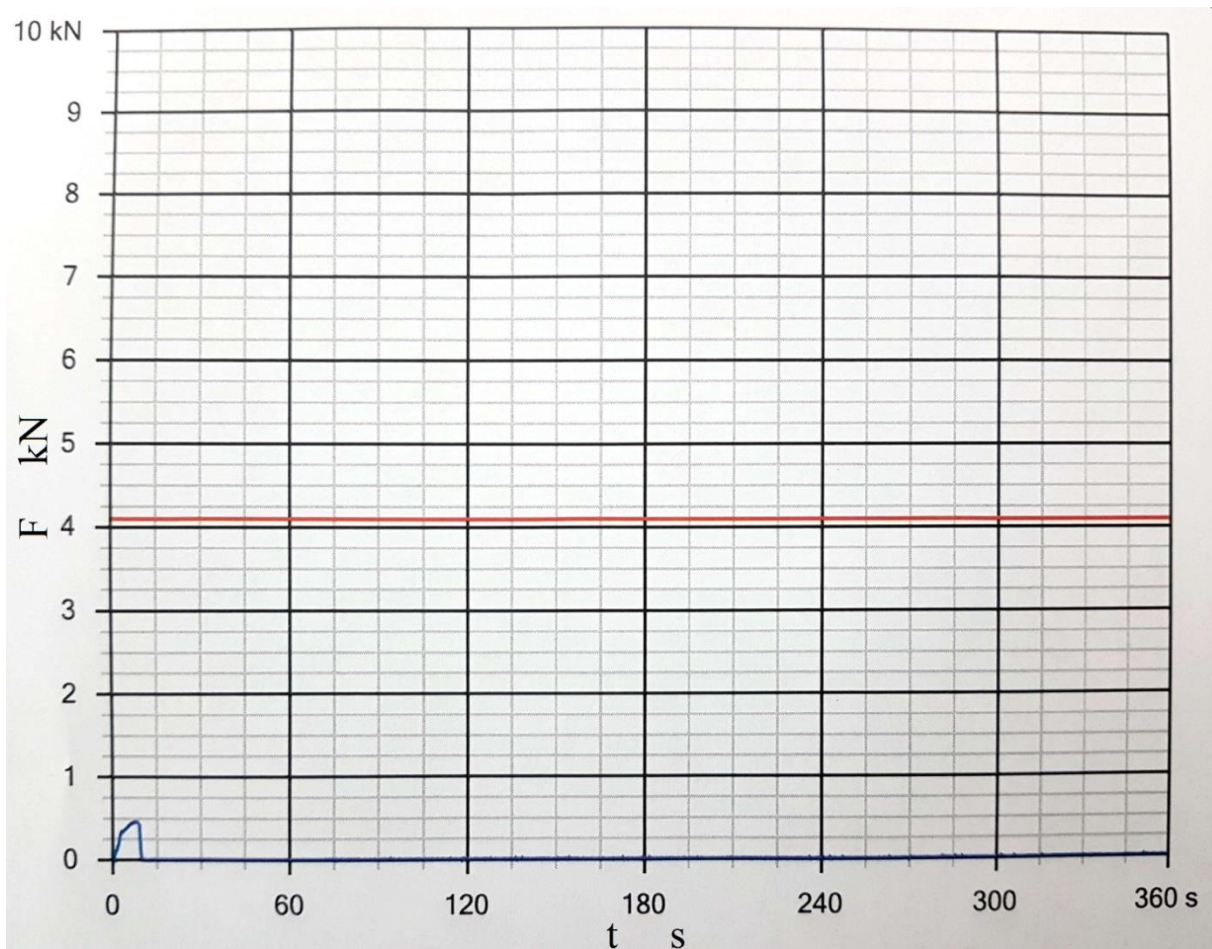
Kod trećeg uzorka vodič je u stezaljki pritegnut momentom 15 Nm, nakon čega je uzorak pozicioniran na kidalici za provedbu vlačnog ispitivanja. Na slici 23. a) prikazan je uzorak prije ispitivanja, na slici 23 b) nakon ispitivanja, a na slici 23 c) lom vodiča nakon ispitivanja i vađenja iz stezaljke.



**Slika 23. Ispitivanje uzorka na kidalici: a) uzorak prije ispitivanja, b) uzorak nakon ispitivanja, c) lom vodiča**

Detalj C na slici 23 b) pokazuje da je došlo do značajnog izvlačenja odcjepnog vodiča iz stezaljke tijekom ispitivanja. Tijekom vađenja vodiča iz stezaljke nakon ispitivanja odlomio se dio vodiča koji je bio učvršćen u samoj stezaljki, kao što je vidljivo na detalju D slike 23 c). Dijagram promjene sile tijekom vlačnog ispitivanja (sila-vrijeme) za uzorak s momentom pritezanja 15 Nm prikazan je na slici 24.





**Slika 24. Dijagram sila – vrijeme za uzorak s momentom pritezanja 15 Nm**

Iz dijagrama je vidljivo da je kod temperature  $-5^{\circ}\text{C}$  i momenta pritezanja vijka s  $M = 15 \text{ Nm}$  došlo do maksimalne deformacije vodiča Al  $25 \text{ mm}^2$  u odcjepnoj stezaljki i loma. Sila pri kojoj je nastupilo popuštanje veze iznosila je  $0,5 \text{ kN}$ . Usporedbom s rezultatom prethodnog uzorka dobiva se da je izdržao za  $73,7\%$  manju silu izvlačenja.

Rezultati ispitivanja svih uzoraka pokazuju da na temperaturi  $-5^{\circ}\text{C}$  moment pritezanja vijaka stezaljke za fiksiranje odcjepnih vodiča može iznositi do  $10 \text{ Nm}$ .

### 3.3.2 Određivanje sile izvlačenja vodiča iz stezaljke na +35°C

Temperatura od +35°C postignuta je stavljanjem stezaljki i odcjernih vodiča u komoru za zagrijavanje (Slika 25). Da bi se ravnomjerno progrijali, uzorci su držani na toj temperaturi u trajnju od tri sata. Nakon toga Al vodič 25 mm<sup>2</sup> je postavljen u stezaljku, a vijak stezaljke je pritegnut pomoću moment ključa s momentima 5 Nm, 10 Nm i 15 Nm (Slika 26).



Slika 25. Komora za zagrijavanje uzoraka



Slika 26. Pritezanje vijaka stezaljke moment ključem

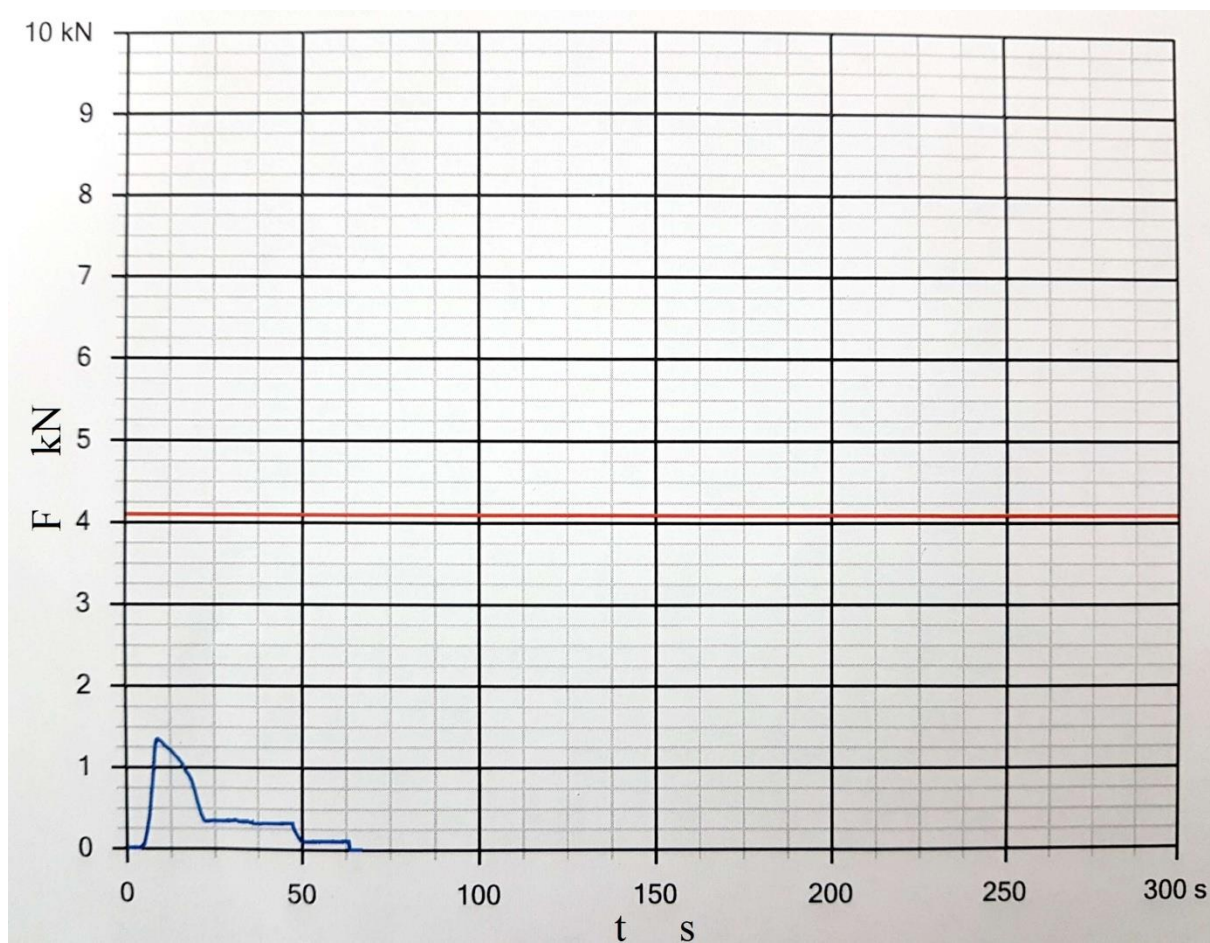
Nakon što su uzorci pripremljeni, uzorak s momentom pritezanja od 5 Nm je pozicioniran u prihvat kidalice (Slika 27 a)) na način opisan u prethodnom poglavlju. Uzorak je vlačno opterećen do izvlačenja vodiča iz stezaljke (Slika 27 b) i c)).



**Slika 27. Ispitivanje uzorka na kidalici: a) pozicionirani uzorak prije ispitivanja, b) uzorak nakon ispitivanja, c) detalj veze vodiča i stezaljke**

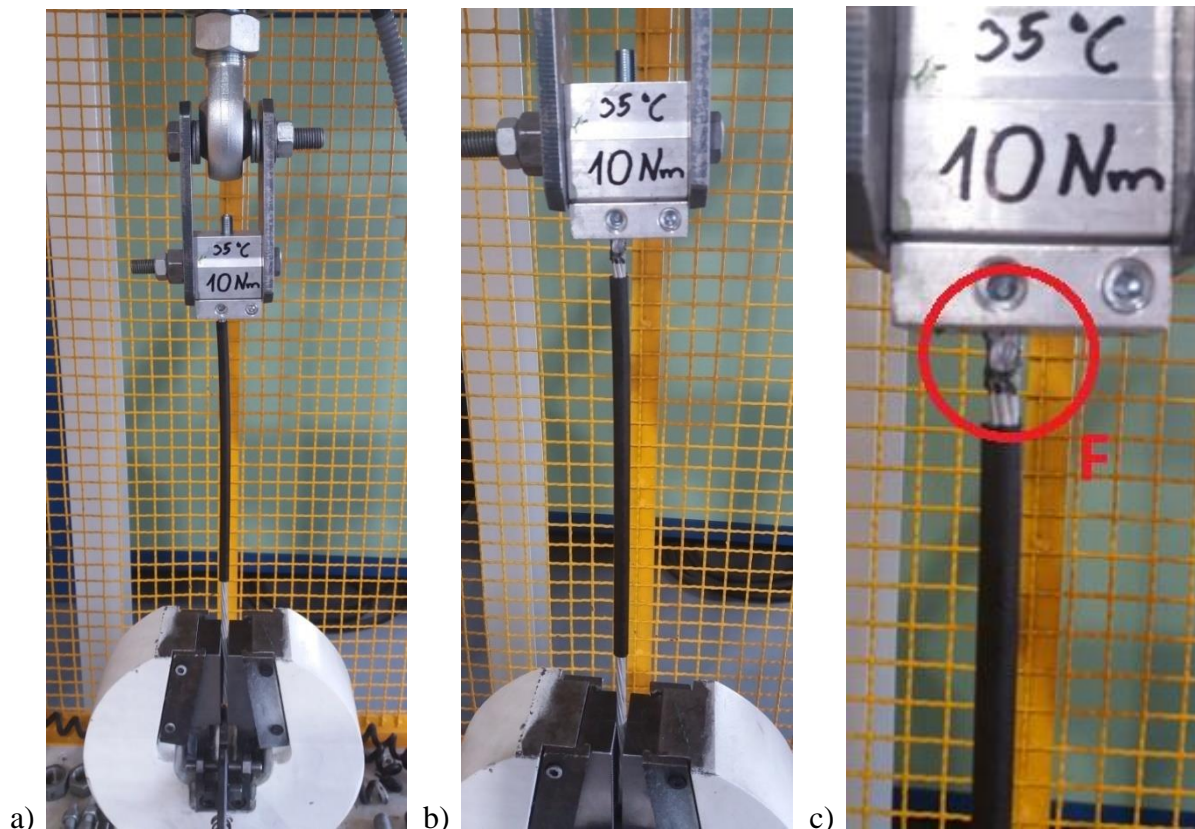
Detalj E na slici 27 c) pokazuje da se odcjepni vodič tijekom ispitivanja izvukao iz stezaljke. Dijagram promjene sile tijekom vlačnog ispitivanja (sila-vrijeme) za uzorak s momentom pritezanja 5 Nm prikazan je na slici 28.

Iz dijagrama je vidljivo da je kod temperature +35°C i momenta pritezanja vijka s 5 Nm došlo do izvlačenja Al 25 mm<sup>2</sup> vodiča iz odcjepne stezaljke pri sili od 1,3 kN.



Slika 28. Dijagram sila – vrijeme za uzorak s momentom pritezanja 5 Nm

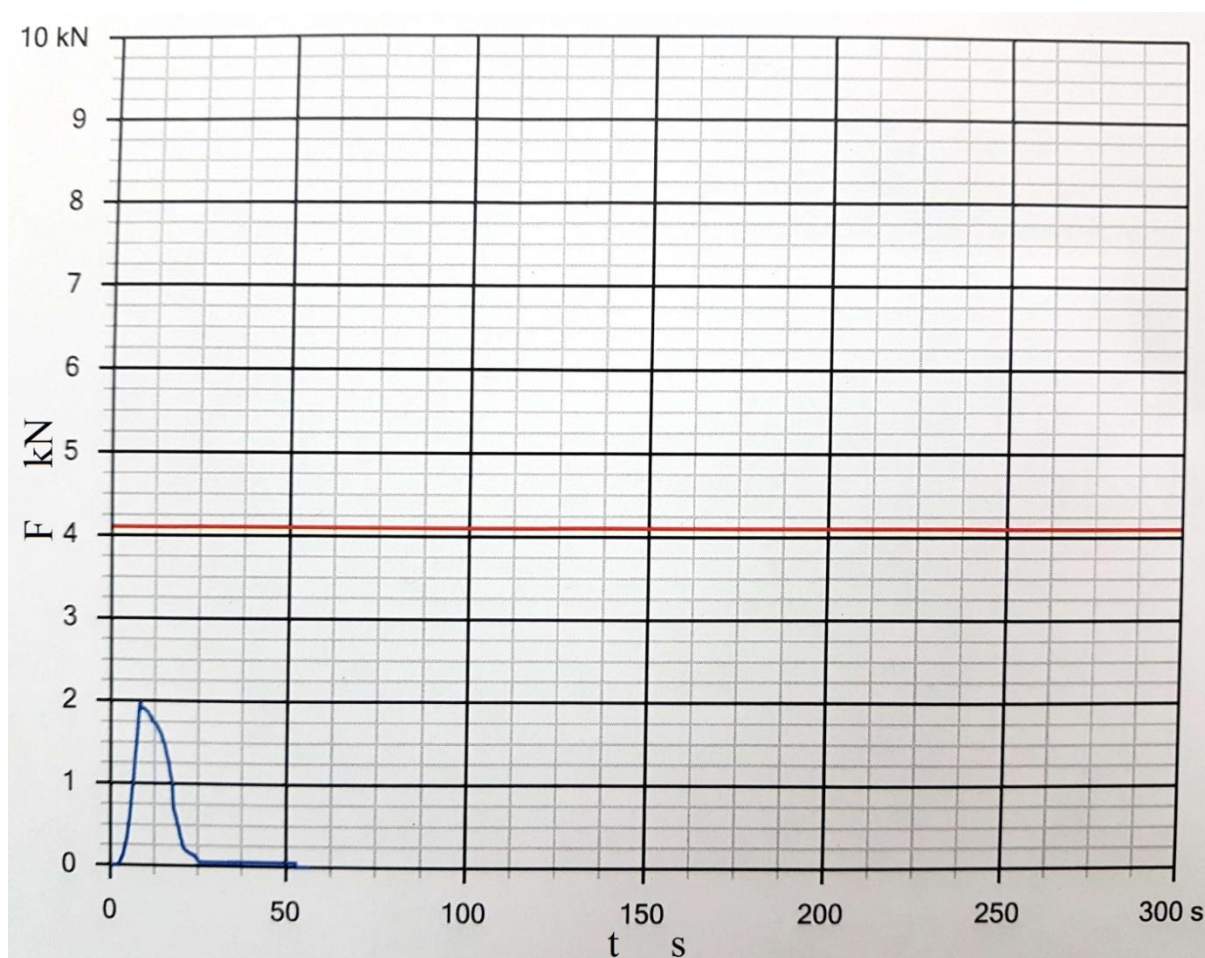
Određivanje sile izvlačenja vodiča iz stezaljke s momentima pritezanja vijka 10 Nm i 15 Nm provedeno je na isti način kao i kod uzorka s momentom od 5 Nm. Na slici 29. prikazan je drugi uzorak s momentom pritezanja od 10 Nm prije ispitivanja, nakon ispitivanja i izvlačenje vodiča iz stezaljke.



**Slika 29. Ispitivanje uzorka na kidalici: a) uzorak prije ispitivanja, b) uzorak nakon ispitivanja, c) detalj veze vodiča i stezaljke**

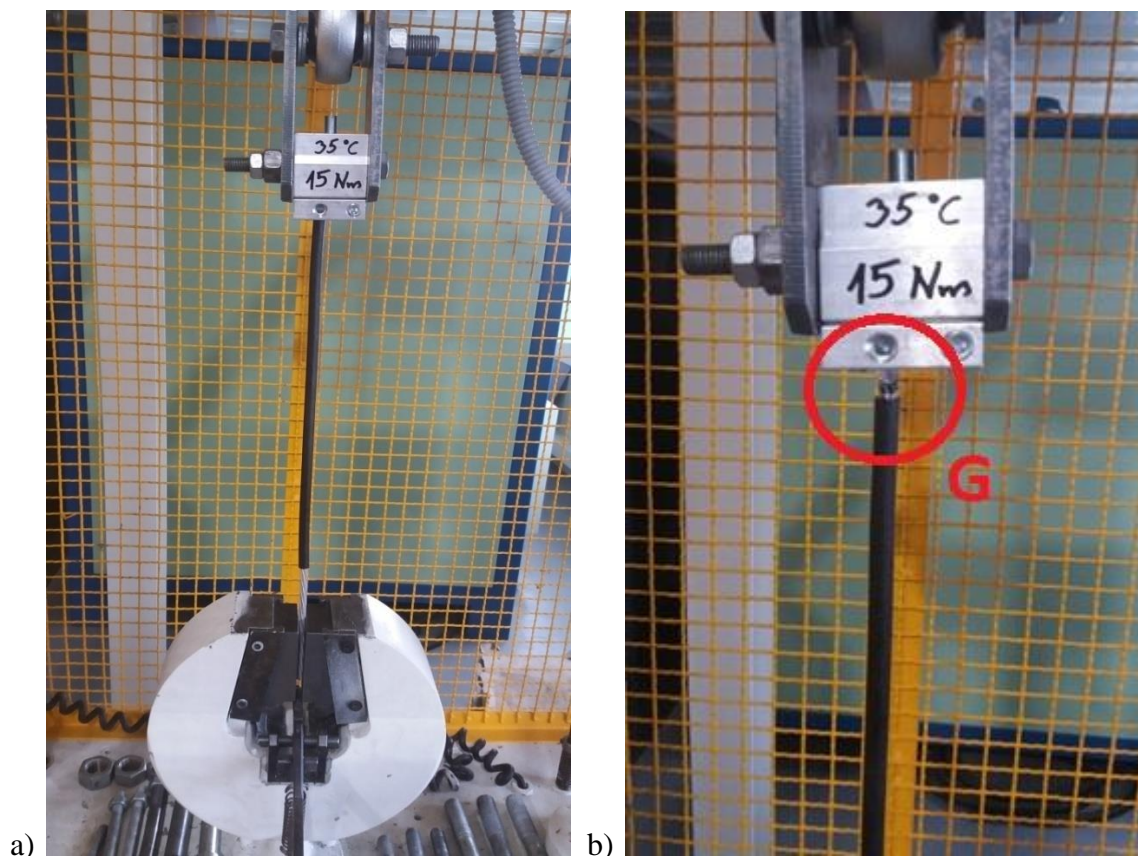
Dijagram promjene sile tijekom vlačnog ispitivanja (sila-vrijeme) za uzorak s momentom pritezanja 10 Nm prikazan je na slici 30. Iz dijagrama je vidljivo da je kod temperature  $+35^{\circ}\text{C}$  i momenta pritezanja vijka s 10 Nm došlo do izvlačenja Al  $25\text{ mm}^2$  vodiča iz odcjepne stezaljke. Sila pri kojoj je nastupilo popuštanje veze iznosila je 2,0 kN.

S obzirom na prethodni uzorak ovaj je izdržao 0,7 kN veću silu što je za 35% bolji rezultat.



Slika 30. Dijagram sila – vrijeme za uzorak s momentom pritezanja 10 Nm

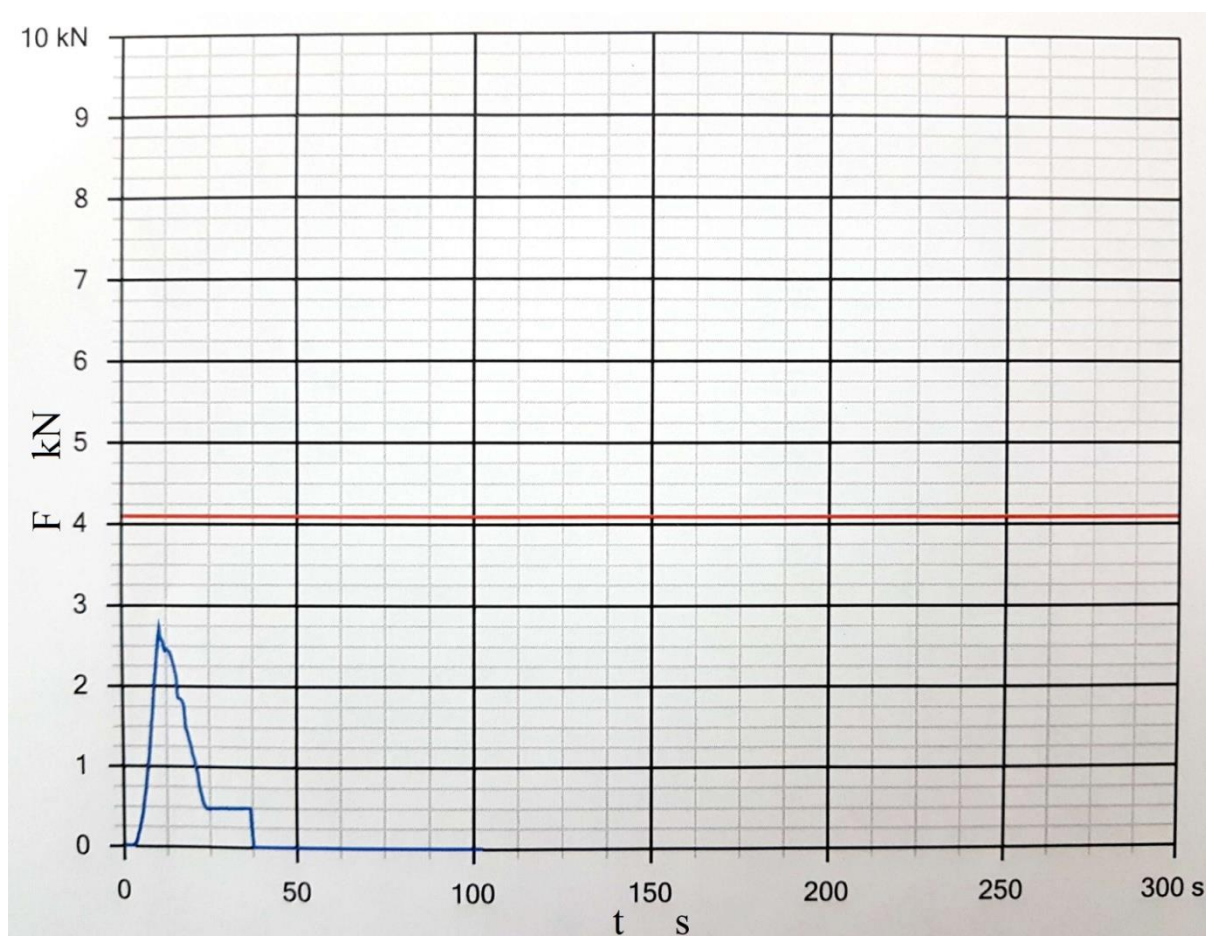
Treći uzorak kod kojeg je moment pritezanja vijka stezaljke iznosio 15 Nm u prihvatu kidalice prije i nakon ispitivanja prikazan je na slici 31.



**Slika 31. Ispitivanje uzorka na kidalici: a) uzorak prije ispitivanja, b) uzorak nakon ispitivanja i izvlačenja vodiča iz stezaljke**

Dijagram promjene sile tijekom vlačnog ispitivanja (sila-vrijeme) za uzorak s momentom pritezanja 15 Nm prikazan je na slici 32. Kod temperature +35°C i momenta pritezanja vijka s 15 Nm došlo je do izvlačenja Al 25 mm<sup>2</sup> vodiča iz odcjepne stezaljke pri sili  $F = 2,7$  kN, koja je za 25,9% veća od vrijednosti sile kod uzorka s momentom pritezanja  $M = 10$  Nm.

Rezultati ispitivanja pokazuju da pri temperaturi +35°C za momente pritezanja vijaka odcjernih vodiča do  $M = 15$  Nm dolazi do izvlačenja vodiča iz stezaljke ali bez opasnosti od loma vodiča i prekida napajanja korisnika električnom energijom.



Slika 32. Dijagram sila – vrijeme za uzorak s momentom pritezanja 15 Nm



### 3.4 Električno ispitivanje izolirane odcjepne stezaljke istosmjernom strujom

Električna ispitivanja električne otpornosti izolirane odcjepne stezaljke se najčešće provode u dva slučaja, nakon provedenih ispitivanja umjetnog starenja stezaljke cikličkim zagrijavanjem električnom strujom i hlađenjem te razvojnih eksperimentalnih ispitivanja kao u ovom radu. Električna ispitivanja stezaljke su definirana normom BS 3288/Part I u točki 7.3.1 i kriterij prihvatljivosti rezultata ispitivanja stezaljke.

Izolirana odcjepna stezaljka se montira u strujni krug prema preporuci proizvođača stezaljke uz poštivanje uvjeta za električna ispitivanja iz norme BS 3288/Part I.

Cilj svih prethodno provedenih mehaničkih ispitivanja je nalaženje optimalnih svojstava izolirane odcjepne stezaljke koji će se koristiti pri montaži stezaljke na dalekovodnu mrežu i zadovoljiti uvjete iz norme za električna svojstva. Stezaljka mora zadovoljiti sva statička, dinamička i ostala opterećenja na kontaktnoj mreži dalekovoda uz garantirani dugotrajan i siguran prijenos električne energije.

Temeljem provedenih mehaničkih ispitivanja stezaljke i vodiča s različitim momentima pritezanja vijka stezaljki pri temperaturama od  $-5^{\circ}\text{C}$  do  $+35^{\circ}\text{C}$  došlo se do zaključka da je optimalni moment pritezanja vijka na stezaljci 10 Nm i taj moment je korišten za pritezanje vijka na stezaljci pri električnom ispitivanju.

Električno ispitivanje vodiča i stezaljke (Slika 33) provodi se na sljedeći način:

- Strujni krug se formira s dvije izolirane odcjepne stezaljke, glavnim izoliranim aluminijskim vodičem od  $70\text{ mm}^2$  i dva odcjepna izolirana aluminijska vodiča od  $25\text{ mm}^2$ .
- Prema normi BS 3288/Part I minimalna dužina vodiča za ispitivanje je definirana kao vrijednost  $50 \times$  promjer vodiča, što u ovom slučaju za odcjepni vodič iznosi (promjer vodiča  $6,3\text{ mm} \times 50 = 315\text{ mm} \times 2$  stezaljke =  $630\text{ mm}$ ), dok je za glavni vodič ( $10,5\text{ mm} \times 50 = 525\text{ mm} \times 2$  stezaljke =  $1050\text{ mm}$ ).
- Dužina glavnog izoliranog Al vodiča  $70\text{ mm}^2$  za strujno ispitivanje iznosila je  $1350\text{ mm}$ , a odcjepnih Al izoliranih vodiča je  $1000\text{ mm}$ . Definirane dužine vodiča za ispitivanja koja su navedena u normi BS 3288/part I su zbog sprečavanja mogućeg prijelaza topline s vodiča na stezaljku i obrnuto.

- Na izlazu odcjepnog izoliranog Al vodiča i glavnog izoliranog Al vodiča iz stezaljke odstrani se izolacija s vodiča u dužini 25 mm, kako bi se montirale strujne sabirnice koje služe za priključak stezaljki instrumenta za mjerenje pada napona na stezaljkama.
- Na ispitnom uzorku se izmjeri osna dužina strujnog kruga od sabirnice na glavnom vodiču preko stezaljke do sabirnice na odcjepnom vodiču. Izmjerena osna dužina se prenosi na odcjepni vodič na kojem je prethodno odstranjena izolacija i montirane su sabirnice za mjerenje pada napona instrumentom, na početku i na kraju izmjerene osne dužine.
- Na krajeve izoliranih Al odcjepnih vodiča 25 mm<sup>2</sup> se montiraju priključne stezaljke koje se pričvršćuju na sabirnice transformatora.
- Struja kojom se vršiti ispitivanje izoliranih odcjepnih stezaljki je određena prema vodiču koji ima najmanji poprečni presjek, u ovom slučaju to je odcjepni izolirani Al vodič od 25 mm<sup>2</sup>. Prema normi BS EN 50182 nominalna struja opterećenja za vodič Al 25 mm<sup>2</sup> iznosi 145 A.
- Sklop se opterećuje istosmjernom strujom, a instrument za mjerenje napona se priključuje na strujne sabirnice na glavnom izoliranom Al vodiču 70 mm<sup>2</sup> i na sabirnice na odcjepnom izoliranom Al vodiču 25 mm<sup>2</sup> (osna dužina stezaljke + 2 x 25 mm na vodičima) i mjere se padovi napona  $\Delta_{1S}$ .
- Priključivanjem instrumenta za mjerenje napona na sabirnicu odcjepnog izoliranog Al vodiča koja je ekvivalentna dužini izmjerenoj na stezaljki +25 mm na glavnom vodiču +25 mm na odcjepnom vodiču, mjere se padovi napona  $\Delta_{2V}$ .
- Temperatura okoline u laboratoriju na kojoj je provedeno električno ispitivanje stezaljki iznosila je 20°C.
- Nakon što su svi uvjeti i parametri koji se odnose na električno ispitivanje stezaljki ispunjeni, provedeno je samo ispitivanje.

Ispitivanje izoliranih odcjernih stezaljki je provedeno sa sljedećim elementima i opremom:

- ispitni glavni vodič: izolirani Al vodič 70 mm<sup>2</sup>,
- ispitni odcjerni vodič: izolirani Al vodič 25 mm<sup>2</sup>,
- izolirana odcjerna stezaljka,
- transformator za proizvodnju istosmjerne struje od 5 – 4000 A,
- moment pritezanja vijaka: 10 Nm na odcjernom vodiču,
- moment pritezanja vijka: 10 Nm na glavnom vodiču,
- ispitna struja: istosmjerna struja 145 A
- instrument za mjerenje napona: univerzalni multimeter,
- instrument za mjerenje temperature okoline: termometar.



Slika 33. Uzorak pripremljen za električno ispitivanje

Izmjerene vrijednosti pada napona kod pojedinih uzoraka iznosile su:

### 1. Uzorak

Temperatura montaže stezaljke i vodiča:  $-5^{\circ}\text{C}$

Pad napona na stezaljki  $\Delta_{1S} = 13,1 \text{ mV}$

Pad napona na vodiču  $\Delta_{2V} = 21,6 \text{ mV}$

$$\delta = \frac{13,1}{21,6} = 0,6065 \times 100 = 60,65\%$$

### 2. Uzorak

Temperatura montaže stezaljke i vodiča:  $0^{\circ}\text{C}$

Pad napona na stezaljki  $\Delta_{1S} = 13,5 \text{ mV}$

Pad napona na vodiču  $\Delta_{2V} = 21,4 \text{ mV}$

$$\delta = \frac{13,5}{21,4} = 0,6308 \times 100 = 63,08\%$$

### 3. Uzorak

Temperatura montaže stezaljke i vodiča:  $20^{\circ}\text{C}$

Pad napona na stezaljki  $\Delta_{1S} = 13,0 \text{ mV}$

Pad napona na vodiču  $\Delta_{2V} = 21,4 \text{ mV}$

$$\delta = \frac{13,0}{21,4} = 0,6075 \times 100 = 60,75\%$$

### 4. Uzorak

Temperatura montaže stezaljke i vodiča:  $35^{\circ}\text{C}$

Pad napona na stezaljki  $\Delta_{1S} = 13,0 \text{ mV}$

Pad napona na vodiču  $\Delta_{2V} = 21,2 \text{ mV}$

$$\delta = \frac{13,0}{21,2} = 0,6132 \times 100 = 61,32\%$$

Prema normi CEI IEC 61284 [2] i BS 3288/Part I [3] pad napona na stezaljki ne smije biti veći od 75% od pada napona na odcjepnom vodiču. Iz rezultata električnih ispitivanja, pri montaži stezaljke i vodiča kod temperatura od  $-5^{\circ}\text{C}$  do  $+35^{\circ}\text{C}$  i konstantnom momentu pritezanja vijaka s 10 Nm, vidljivo je da se padovi napona kreću od 60,75 % do 63,42 % i u potpunosti zadovoljavaju uvjet propisan normama.

## 4. ZAKLJUČAK

Cilj ovog završnog rada bio je ispitati kvalitetu izolirane odcjepne stezaljke, glavnog i odcjepnog vodiča. Vlačnim ispitivanjem određena je sila izvlačenja vodiča iz stezaljke kod različitih momenata pritezanja vijaka stezaljke, a električnim ispitivanjem izmjereni su padovi napona na glavnom i odcjepnom vodiču. Ispitivanja su provedena pri temperaturama od  $-5^{\circ}\text{C}$  do  $+35^{\circ}\text{C}$ .

Temeljem provedenih ispitivanja mogu se navesti sljedeći zaključci:

- 1) Uzorci vodiča  $\text{Al } 25 \text{ mm}^2$  prema normi EN 60889 zadovoljili su uvjet prekidne sile u iznosu od 0,48 kN, ali nisu zadovoljili uvjet vlačne čvrstoće koja iznosi 180 MPa.
- 2) Sila izvlačenja vodiča iz stezaljke na  $-5^{\circ}\text{C}$  je ispitana kod momenta pritezanja vijka s 5 Nm, 10 Nm i 15 Nm. Kod momenta pritezanja vijka s 5 Nm i 10 Nm došlo je do izvlačenja  $\text{Al } 25 \text{ mm}^2$  vodiča iz odcjepne stezaljke, dok je kod momenta od 15 Nm došlo do loma vodiča.
- 3) Sila izvlačenja vodiča iz stezaljke na  $+35^{\circ}\text{C}$  ispitana je s momentima pritezanja vijka iznosa 5 Nm, 10 Nm i 15 Nm. Kod sve tri vrijednosti momenta pritezanja vijaka došlo je do izvlačenja vodiča iz stezaljke.
- 4) Rezultati električnih ispitivanja stezaljke i vodiča kod temperatura montaže od  $-5^{\circ}\text{C}$  do  $+35^{\circ}\text{C}$  u potpunosti zadovoljavaju uvjet iz normi CEI IEC 61284 i BS 3288/Part I.

Ispitivanja mehaničkih i električnih svojstava izoliranih odcjepnih stezaljki do sada nisu provedena ovako detaljno. Rezultati ispitivanja su pokazali da ispitana stezaljka pri različitim temperaturama montaže na odgovarajuće vodiče, najbolja svojstva ima pri momentu pritezanja vijaka od 10 Nm.

Ispitivanja provedena u okviru ovog rada su od velike važnosti jer mogu poslužiti za poboljšanje svojstva sličnih stezaljki iz proizvodnog programa spojne opreme za niskonaponsku mrežu tvrtke Metal product d.o.o.

## **LITERATURA**

- [1] EN 60889, Hard – drawn aluminium wire for overhead line conductors, 1997.
- [2] CEI IEC 61284, Overhead lines – Requirements and test for fittings, 1997.
- [3] BS 3288, Insulator and conductor fittings for overhead power lines – Part 1: Performance and general requirements, 1997.
- [4] Goić, R., Jakus, D., Penović, I., Distribucija električne energije, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Split, 2008.
- [5] BS EN 50182, Conductors for overhead lines – Round wire concentric lay stranded conductors, 2001.

## **PRILOZI**

I. CD-R disc