Ispitivanje polyglas traka za stezanje jarma jezgre transformatora

Ruganec, Davor

Master's thesis / Diplomski rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:372940

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-25**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Davor Ruganec

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor: Student:

Prof. dr. sc. Janoš Kodvanj, dipl. ing. Davor Ruganec

Zagreb, 2020.

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

Zahvaljujem se mentoru prof.dr.sc. Janošu Kodvanju na pruženim savjetima i iskazanoj pomoći u izradi ovoga rada, kolegici Petri Adamović, kolegi Andriji Zaplatiću te gospodinu Gordanu Plačku na pomoći oko realizacije eksperimenata.

Dodatnu zahvalu dugujem i budućem kolegi Pavlu Barišiću te Končar – Energetskim transformatorima na ideji za temu rada te na svoj pomoći oko provedbe eksperimenata.

Posebnu zahvalu na neizmjernoj podršci dugujem svim dragim osobama koje su bile uz mene tijekom svih godina studija.

Davor Ruganec

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodostrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

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

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Davor Ruganec** Mat. br.: 0035197196

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Ispitivanje Polyglas traka za stezanje jarma jezgre transformatora**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Testing of Polyglas bandages used for transformer core yoke clamping**

Opis zadatka:

Polyglas trake se koriste za bandažiranje stupa i stezanje jarma jezgre transformatora. One su jedan od tri standardna rješenja steznih elemenata u KPT-ovom steznom sustavu transformatora. Između limova u jarmu transformatora nužno je održavati odgovarajući pritisak budući da elektromagnetska svojstva jarma odnosno jezgre transformatora uvelike ovise o pritisku među limovima. S obzirom na fleksibilnost Polyglas traka, odlična mehanička svojstva i električnu inertnost, one se nameću kao prikladan materijal za stezni element jarma jezgre. U standardnom postupku pritezanja limova namata se 14 slojeva trake između zatezača za pritezanje limova odgovarajućim iznosom sile.
U radu je potrebno eksperimentalno odrediti vlačnu čvrstoću stezne trake kod postojeće konstrukcijske izvedbe stezanja jarma u ovisnosti o broju slojeva Polyglas trake u steznom elementu. Kod novog konstrukcijskog rješenja steznog elementa primjenom Polyglas traka na način da traka, odnosno stezni element obuhvaća cijeli jaram, odrediti potrebnu silu pritezanja jarma. Dobivene rezultate usporediti s rezultatima za silu pritezanja kod postojećeg rješenja.
Tijekom rada potrebno je:

1. Upoznati se s radom statičke kidalice i optičkog mjernog sustava Aramis.
2. Statičkim vlačnim pokusom odrediti vlačnu čvrstoću steznih elemenata u ovisnosti o broju slojeva Polyglas trake za postojeći način izvedbe stezanja jarma.
3. Mjernim sustavom Aramis odrediti polje pomaka po traci kod nove konstrukcijske izvedbe stezanja jarma.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:	Datum predaje rada:	Predviđeni datum obrane:
14. studenog 2019.	16. siječnja 2020.	20. – 24.1.2020.

Zadatak zadao: Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Janoš Kodvanj

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

SADRŽAJ I
POPIS SLIKA II
POPIS TABLICA IV
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE V
POPIS OZNAKA VI
SAŽETAK VII
SUMMARY VIII
1. UVOD 1
1.1. Općenito o transformatorima 5
1.2. Podjela transformatora po namjeni 8
1.3. Konstrukcija i način rada energetskih transformatora 10
1.3.1. Zahtjevi za ekološki dizajn 13
1.4. Gubici energetskih transformatora 14
1.5. Jezgra energetskog transformatora 17
1.6. Kvantifikacija gubitaka u jezgri energetskog transformatora 21
1.6.1. Gubici uslijed vrtložnih struja 21
1.6.2. Gubici uslijed histereze jezgre 22
2. STEZNI SUSTAV JEZGRE TRANSFORMATORA 26
2.1. Standardna rješenja steznih elemenata u steznom sustavu jezgre transformatora 27
2.2. Princip stezanja steznika Polyglas® trakom 29
2.3. Von Roll Polyglas® trake 30
2.4. Postupak izrade steznog elementa od Von Roll Polyglas® trake 33
3. EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE STEZNOG ELEMENTA 36
3.1. Cilj eksperimenta 36
3.2. Eksperimentalni postav 37
3.2.1. Prihvat uzoraka na kidalici 39
3.3. Provedba eksperimenta 41
3.4. Optički mjerni sustav Aramis 46
3.5. Rezultati eksperimentalnog ispitivanja 48
3.6. Zaključak eksperimenta 58
4. ISPITIVANJE NOVE VARIJANTE STEZANJA JARMA 68
4.1. Konstrukcijska izvedba nove varijante stezanja jarma 70
4.2. Cilj eksperimenta 72
4.3. Eksperimentalni postav 73
4.4. Provedba eksperimenta 76
4.5. Prikaz rezultata eksperimenta 77
4.6. Zaključak eksperimenta 82
5. ZAKLJUČAK 84
PRILOZI 87

POPIS SLIKA

Slika 1. Trend svjetskih potreba za energijom [1] 1
Slika 2. Predviđena struktura pojedinih energenata [1]....2
Slika 3. Udio električne energije po sektorima u 2016. i 2050. [1] 3
Slika 4. Shematski prikaz sustava opskrbe električnom energijom [3]....5
Slika 5. Osnovni dijelovi transformatora te primjer spajanja na izmjeničnu mrežu [5]....6
Slika 6. Primar i sekundar na istom stupu, (engl. Core type) transformator [8] 7
Slika 7. Autotransformator [10] 9
Slika 8. Energetski transformator [11] 9
Slika 9. Izolacijski transformator [12]....9
Slika 10 Zakretni transformator [13]....9
Slika 11. Mjerni transformator [14] 9
Slika 12. Audiofrekvencijski transformator [15] 9
Slika 13. Osnovne komponente energetskog transformatora [16]....10
Slika 14. Složena i uspravljena jezgra sa steznicima [17]....12
Slika 15. Slaganje jezgre [18] 12
Slika 16 Novi i stari zahtijevani PEI [4]....14
Slika 17. Podjela gubitaka transformatora [19]....15
Slika 18. Vrtložne struje po presjeku dijela jezgre [20] 15
Slika 19. Rashladni sustav transformatora - hladnjak s ventilatorima [21]....16
Slika 20. Pumpa ulja za cirkulaciju rashladnim sustavom [22] 16
Slika 21. Rola čeličnog transformatorskog lima [24]....17
Slika 22. Kružni presjek jezgre u 7 koraka [6] 17
Slika 23. Laserski rezač transformatorskog lima [25]....18
Slika 24. Izrezani limovi jezgre [26] 18
Slika 25. Uspravljanje jezgre [27]....19
Slika 26. Preklop jarma i stupa [6]....19
Slika 27. Jezgra prije montaže gornjeg jarma [28]....19
Slika 28. Sklop jezgre i namota u stanju spremnom za ugradnju [29]....20
Slika 29. Gubici uslijed vrtložnih struja 22
Slika 30. Efektivni i neefektivni dio poprečnog presjeka....24
Slika 31. Gubici uslijed histereze jezgre....24
Slika 32. Testna jezgra....26
Slika 33 Polyglas® trake i svornjaci 27
Slika 34. Prečke....27
Slika 35. Princip stezanja Polyglas® trakama 29
Slika 36. Princip stezanja Polyglas® trakama kod manjih jezgri 30
Slika 37. Polyglas® traka u sirovom stanju [35] 31
Slika 38. Polyglas® traka iskorištena kao bandaža rotora generatora [35]....31
Slika 39. Naprava za namatanje steznih elemenata....34
Slika 40. Detalj naprave za namatanje steznih elemenata 34
Slika 41. Namotana i polimerizirana traka spremna za skidanje s namatalice 35
Slika 42. Namotani i označeni uzorci traka 35
Slika 43. Opterećenje trake: a) tijekom ispitivanja na kidalici i b) u transformatoru nakon ugradnje 38
Slika 44. Osovina za napinjanje traka 40
Slika 45. Prihvat na kidalici....40
Slika 46. Prihvat na priključak kidalice....41
Slika 47. Sklop eksperimentalnog postava kidalice 41

Slika 48. Namotani stezni element 42
Slika 49. Uzorci steznih elemenata prije ispitivanja 43
Slika 50. Prihvati u položaju za izmjenu uzorka 45
Slika 51. Uzorak pozicioniran na kidalici 45
Slika 52. Popuštanje uzorka tijekom ispitivanja 45
Slika 53. Mjerni sustav Aramis 46
Slika 54. Neobrađeni prikaz rezultata snimanja mjernim sustavom Aramis 47
Slika 55. Mjerno područje sustava Aramis s odabranim karakterističnim točkama 48
Slika 56. Rezultati kidalice za ispitnu grupu s 2 sloja 49
Slika 57. Rezultati kidalice za testnu grupu s 4 sloja 50
Slika 58. Rezultati kidalice za ispitnu grupu sa 6 slojeva 51
Slika 59. Rezultati kidalice za ispitnu grupu sa 8 slojeva 52
Slika 60. Rezultati kidalice za ispitnu grupu sa 10 slojeva 53
Slika 61. Dijagram sila-deformacija za uzorak 24 (10-2) 57
Slika 62. Prekidne sile svih uzoraka prema ispitnim grupama 59
Slika 63. Rezultati za prekidnu silu relativno u odnosu na proračunsku vrijednost za 2 do 8 slojeva 60
Slika 64. Rezultati za prekidnu silu relativno u odnosu na proračunsku vrijednost za 10 slojeva 61
Slika 65. Prekidna sila u ovisnosti o broju slojeva uspoređena s proračunskom prekidnom silom te s prikazom procjene sile koja se postiže vijkom 62
Slika 66. Odljepljivanje trake 63
Slika 67. Pucanje vlakana u unutrašnjim slojevima 63
Slika 68. Odlijepljeni dio trake prilikom ispitivanja na testnoj jezgri 64
Slika 69. Naknadno pucanje staklenih niti prilikom ispitivanja na testnoj jezgri 64
Slika 70. Pritisak između slojeva traka u steznom elementu prilikom ispitivanja 65
Slika 71. Pritisak na središnjem dijelu steznog elementa uslijed prebacivanja trake preko jarma testne jezgre 66
Slika 72. Ravnina poprečnog presjeka jarma 68
Slika 73. Povećanje širine sklopa jezgre uslijed korištenja poprečnih svornjaka kao steznih elemenata 69
Slika 74. Sastavni dijelovi sklopova predloženog novog i postojećeg načina stezanja 70
Slika 75. Sklop predloženih steznih elemenata izvan sklopa jezgre 72
Slika 76. Eksperimentalni postav za ispitivanje nove varijante steznih elemenata 73
Slika 77. Uzorci prije montaže 74
Slika 78. Eksperimentalni postav za ispitivanje novog steznog elementa 74
Slika 79. Ispitni položaji na modelu jarma 75
Slika 80. Mjerne točke za određivanje deformacije po visini trake 75
Slika 81. Ispitivanje nove varijante steznih elemenata 76
Slika 82. Puknuće trake s 2 sloja prilikom ispitivanja 76
Slika 83. Deformacije steznog elementa s 2 sloja na mjernom mjestu A1 78
Slika 84. Deformacije steznog elementa s 3 sloja na mjernom mjestu DK 78
Slika 85. Deformacije steznog elementa s 3 sloja na mjernom mjestu A1 79
Slika 86. Deformacije steznog elementa s 3 sloja na mjernom mjestu B1 79
Slika 87. Deformacije steznog elementa s 3 sloja na mjernom mjestu C1 80
Slika 88. Deformacije steznog elementa s 3 sloja na mjernom mjestu D1 80
Slika 89. Prikaz deformacija po četvrtini oboda za moment pritezanja vijaka M_2 = 25 Nm 81
Slika 90. Prikaz deformacija po četvrtini oboda za moment pritezanja vijaka M_3 = 30 Nm 82

POPIS TABLICA

Tablica 1. Podjela energetskih transformatora [4] 11
Tablica 2. Ovisnost relativne permeabilnosti o kutu α za B_p = 1 T = konst. [33].....23
Tablica 3. Pozicije koje se koriste u steznim rješenjima 28
Tablica 4. Svojstva Polyglas® P30 trake.....32
Tablica 5. Vrijeme potrebno za polimerizaciju Polyglas® P30 trake [36].....33
Tablica 6. Ispitni uzorci 44
Tablica 7. Rezultati eksperimenta s kidalice za sve ispitne grupe 54
Tablica 8. Rezultati za sve ispitne grupe dobiveni mjernim sustavom Aramis 56
Tablica 9. Pozicije u steznim rješenjima 71
Tablica 10. Rezultati za deformacije dobiveni mjernim sustavom Aramis 77
Tablica 11. Najmanje, prosječne i najveće deformacije po obodu modela za ispitnu grupu s 3 sloja 83

POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

S-001 Sklop naprave za kidanje

D-001 Prihvat

B100111100 OKRUGLI IZVEDBA (A)

A-01 Prihvat na opticki stol

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
α	[°]	Kut između smjera valjanja lima i smjera vektora gustoće magnetskog polja
μ_0	[H/m]	Električna permeabilnost vakuuma
μ_r	[-]	Relativna permeabilnost transformatorskog lima
ρ	[Ωm]	Električna otpornost
A_0	[m^2]	Ukupna površina poprečnog presjeka jezgre
A_{ef}	[m^2]	Efektivna (magnetska) površina nekog poprečnog presjeka jezgre
A_{in}	[m^2]	Inertna (ne magnetska) površina nekog poprečnog presjeka jezgre
B_p	[T]	Gustoća magnetskog toka
d	[mm]	Širina Polyglas® trake
f	Hz	Frekvencija ulazne električne struje
$F_{10,max}$	[N]	Najveća garantirana nosivost steznog elementa s 10 slojeva
F_{max}	[N]	Najveća garantirana nosivost Polyglas® trake
n	[-]	Broj slojeva u steznom elementu
P_0	[W]	Snaga gubitka praznog hoda pri nazivnoj snazi i nazivnoj frekvenciji
P_{c0}	[W]	Električna energija potrebna za sustav hlađenja za rad praznog hoda
P_{ed}	$[\frac{W}{m^3}]$	Gubici uslijed vrtložnih struja
P_h	$[\frac{W}{m^3}]$	Gubici uslijed histereze
P_k	[W]	Gubici pri nazivnoj struji i nazivnoj frekvenciji ispravljeni do referentne temperature
PEI	[-]	Indeks vršne učinkovitosti
S	[-]	Faktor slaganja
S_r	[W]	Nazivna snaga transformatora na kojoj se temelji P_k
t	[m]	Debljima transformatorskog lima

SAŽETAK

U steznom sustavu transformatora u tvornici Končar – Energetski transformatori koriste se tri različita konstrukcijska rješenja steznih elemenata za osiguravanje pritiska na jezgru transformatora. Jedan od ta tri konstrukcijska rješenja je stezni element napravljen od Polyglas® trake. Tema ovog rada je eksperimentalno ispitivanje steznih elemenata izrađenih od Polyglas® trake s ciljem određivanja njihovih mehaničkih svojstava. Kvalitativna i kvantitativna analiza rezultata ispitivanja omogućila bi predviđanje njihova ponašanja te pružila polazišnu točku za razvoj empirijskog modela koji bi omogućio njihovo dimenzioniranje za različite uvjete eksploatacije. Osim samog ispitivanja na postojećim steznim elementima, provedeno je i ispitivanje predloženog novog steznog elementa. Njegovo korištenje predlaže se kao zamjena za jedan od preostala dva stezna elementa. Cilj ispitivanja novog steznog elementa je opisati njegovo ponašanje prilikom ugradnje što bi dalje služilo kao osnova za procjenu efekta koji on ostvaruje na jaram transformatorske jezgre.

Ispitivanjem postojećeg steznog elementa zaključeno je kako su proizvodni faktori od značajnog utjecaja u konačnim svojstvima steznih elemenata. Opisan je mehanizam gubitka integriteta traka na eksperimentalnom postavu te je uspoređen s mehanizmom gubitka integriteta traka ispitanom na testnoj jezgri. Ispitivanjem nove varijante stezanja jarma zaključeno je kako nema indikacija de se po obodu trake gubi značajan dio unesene sile u traci te da je tu tvrdnju potrebno provjeriti opsežnijim ispitivanjem.

Ključne riječi: energetski transformator, stezni elementi jezgre transformatora, jaram jezgre transformatora, eksperimentalno ispitivanje, deformacije.

SUMMARY

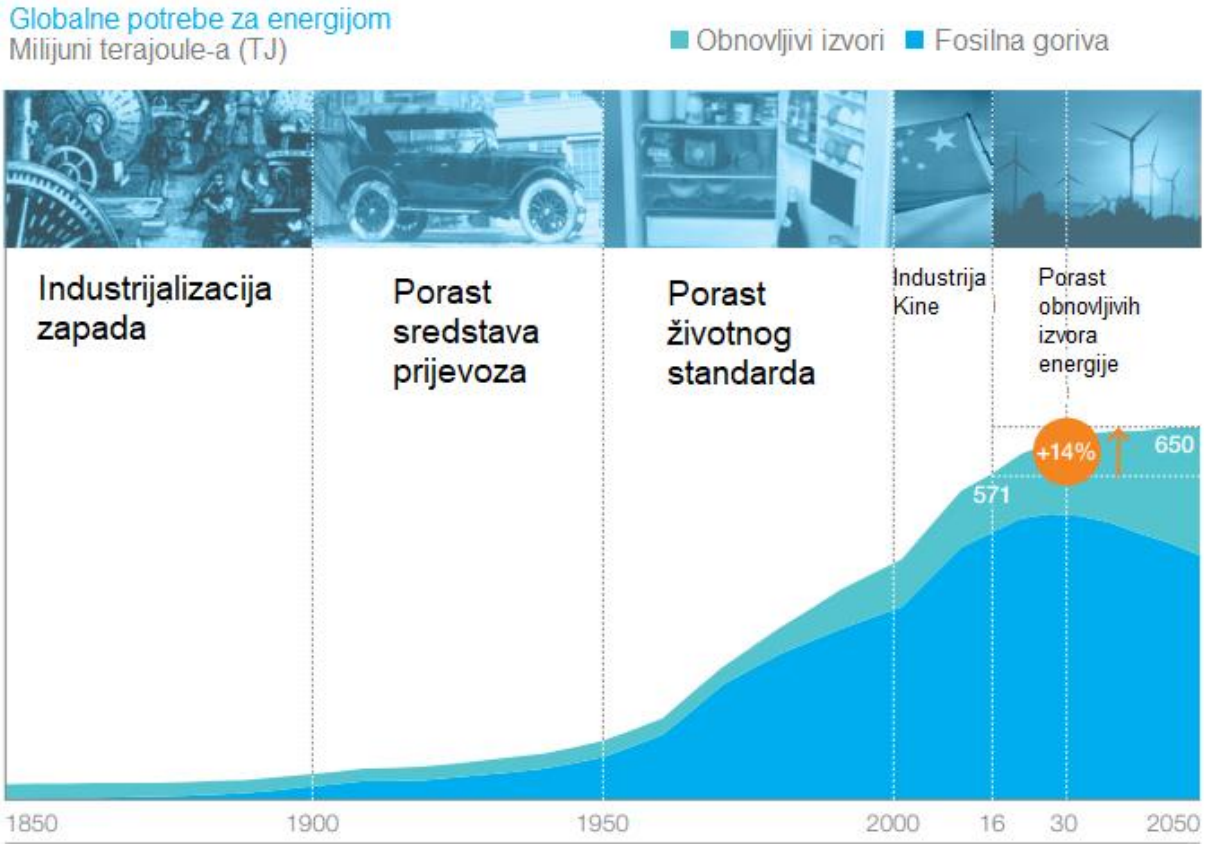
The clamping assembly manufactured by the Končar – Power transformers factory consists of three different types of clamping elements to ensure the exertion of pressure upon the transformer core. One of these three types is a clamping element made of Polyglas® tape. This thesis deals with the experimental investigation of clamping elements made of Polyglas® tape in order to determine their mechanical properties. The qualitative and quantative analysis of the results of the experiment enable their behavior to be predicted and form a starting point for developing an empirical model for their sizing in various exploitation scenarios. Besides conducting the experiment on the existing clamping elements, an experiment on the proposed new clamping element was also carried out. It is proposed that the new clamping element design could replace one of the remaining two elements. The goal of the experiment was to determine the behavior of the new clamping element during installation, which could be used as a basis for evaluation of the effect that it exerts upon the transformer core yoke.

Based on the conducted experiment, it is concluded that manufacturing processes have a significant impact on the final properties of the clamping element. The clamping element failure mechanism is described on an experimental rig and compared with the failure mechanism on the actual experimental transformer core. Furthermore, based on the experiment conducted on the proposed clamping element, it is concluded that there is no significant loss of the applied force within the element although further research is recommended.

Key words: power transformer, transformer core clamping elements, transformer core yoke, experimental testing, deformations

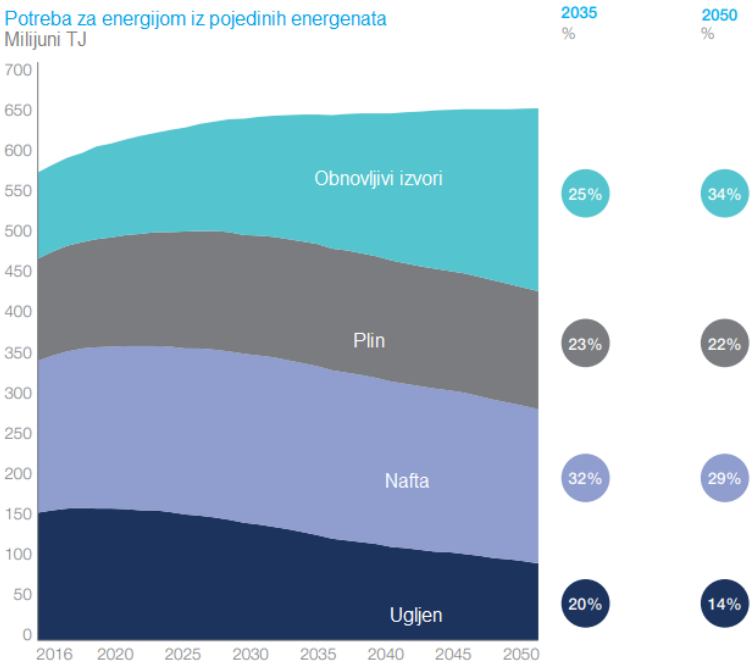
1. UVOD

Nakon gotovo stoljeća naglog povećanja potreba čovječanstva za energijom, očekuje se da će do 2030 taj rast potrebe na globalnoj razini prestati. Predviđa se da će se potreba za energijom zemalja članica Organizacije za ekonomsku suradnju i razvoj (OECD) smanjivati u idućih 50 godina. To se pripisuje povećanju efikasnosti tehnologije u svim sektorima. Najveće povećanje potreba za energijom trenutno imaju Kina i Indija. Potreba za energijom tih dviju zemalja iznosi 80% potreba cijele Azije. Kombinacijom rasta energetskih potreba azijskih zemalja te smanjenjem energetskih potreba zemalja OECD-a, globalna potreba za energijom će stagnirati. Porast BDP-a tradicionalno kroz zadnjih 150 godina snažno korelira s porastom energetskih potreba. Po prvi puta u povijesti predviđa se porast BDP-a zemalja OECD-a uz istovremeno smanjenje energetskih potreba [1]. Trend svjetskih potreba za energijom prikazan je na Slici 1.



Slika 1. Trend svjetskih potreba za energijom [1]

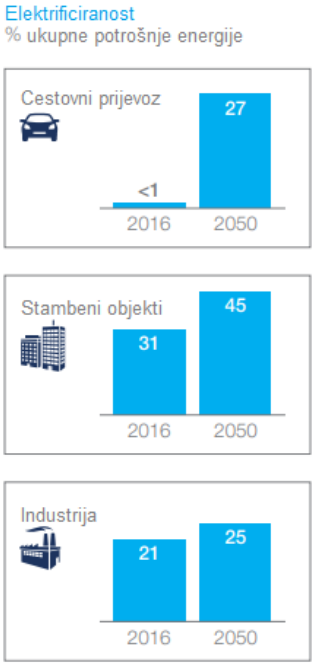
Osim same stagnacije ukupnih potreba, bitna je i struktura primarnih energenata koji opširnije opisuju svjetsku energetsku sliku do 2050. godine [1]. Potrošnja električne energije se udvostručuje do 2050. a do 2035. polovica je iz obnovljivih izvora. Predviđa se pad u udjelu svih fosilnih goriva nakon 2035 (Slika 2.).



Slika 2. Predviđena struktura pojedinih energenata [1]

Potrošnja električne energije

Najveći porast potreba za električnom energijom predviđa se da će se dogoditi u sektorima stanovanja te prijevoza. Ta dva sektora predvodnici su povećanja potreba za električnom energijom za koju se predviđa da će se udvostručiti do 2050. godine. Elektrifikacija transporta razvijenog svijeta, povećanje standarda življenja kineskog stanovništva te povećanje industrijskih potreba Indije te ostalih Azijskih zemalja smatraju se najvećim faktorima u porastu potreba za električnom energijom odnosno povećanju njenog udjela u ukupnoj energetskoj slici svijeta [1] (Slika 3.).



Slika 3. Udio električne energije po sektorima u 2016. i 2050. [1]

Općenito gledano, najizraženiji porast potrebe za električnom energijom imaju zemlje koje prolaze kroz intenzivni ekonomski razvoj. Dugoročno se smatra, da nakon što i Indija te ostale Azijske zemlje završe proces brzog ekonomskog razvoja, žarište potreba za energijom prebacit će se u Afriku te će ona dominirati energetskim potrebama 22. stoljeća [2].

Mreža električne energije

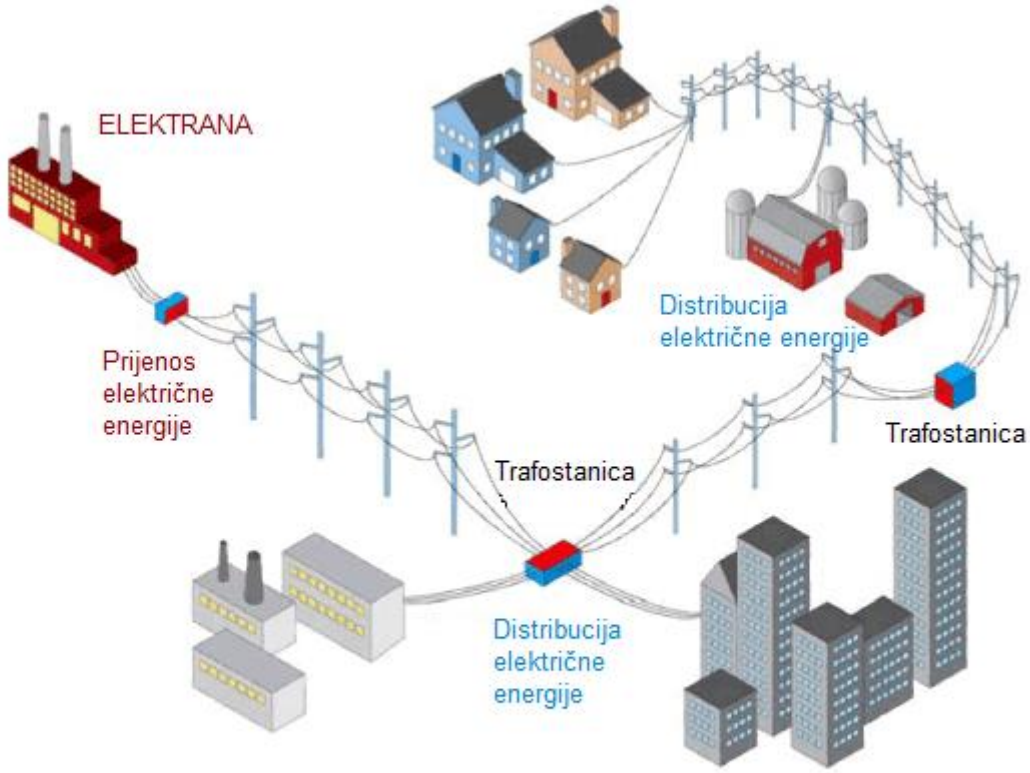
Električna mreža naziv je za skup uređaja, vodiča, osigurača, pretvornika te ostalih električnih komponenti koje sudjeluju u transportu i pretvorbi električne energije od mjesta na kojem se ona proizvodi do mjesta njene potrošnje. Električna se mreža dijeli na mrežu za prijenos električne energije te mrežu za distribuciju električne energije. Budući da goleme količine električne energije nije moguće skladištiti, električnu energiju nužno je proizvoditi istovremeno s njezinom potrošnjom. To objašnjava potrebu za složenom i razgranatom električnom mrežom. Kvalitetna električna mreža dinamičan je sustav čiji svaki dio mora biti u mogućnosti brzo reagirati na promjene u potražnji električne energije [3].

Početak električne mreže je elektrana. U elektranama se razni oblici energije pretvaraju u električnu energiju. To se najčešće odvija pogonom električnog generatora, izuzev solarne elektrane. Najčešće generatore pogone parne turbine. Generator potom pretvara kružno gibanje rotora u električnu energiju. Struja koja izlazi iz takvog generatora, budući da nastaje prolazom

vodiča kroz promjenjivo magnetsko polje, odnosno funkcija je trenutnog položaja vodiča, koji je pak funkcija vremena naziva se izmjeničnom strujom. Takvoj struji lako je mijenjati napon te ju je lako pretvoriti u istosmjernu (za razliku od obrnute pretvorbe). To je pogodno za korištenje izmjenične struje u prijenosu na velike udaljenosti. Zbog strojarskih odnosno mehaničkih ograničenja generatora, pogodno je da se oni vrte sporije te da generiraju struju nižeg napona. Kako generator ima veliku snagu, odnosno na njega je priključen velik broj trošila, struja koja izlazi iz generatora je velika. Struja niskog napona i velike jačine nije pogodna za prijenos električne energije na velike udaljenosti budući da je promjer potrebnog vodiča proporcionalan jakosti struje koja njime prolazi. Kako bi efikasno prenijeli struju dalekovodima potrebno joj je dakle smanjiti jakost, odnosno podići napon. Tipični napon na koji se struja podiže kreće se u granicama od 150 kV pa sve do 750 kV. Što je napon struje veći manji je gubitak uslijed otpora u vodičima odnosno prijenos struje je efikasniji. Za taj ključan korak zadužen je transformator. Kada se jednom struji podigne napon ona je spremna za prijenos dalekovodima do gradskih trafostanica. U praksi najveće geografske razdaljine na koje se struja šalje su do oko 400-tinjak kilometara od elektrana. Sve navedeno do gradskih lokalnih trafostanica spada u prijenos električne energije a sve dalje od njih spada u sustav distribucije električne energije. Takve trafostanice imaju načelno tri osnovne funkcije:

- smanjenje visokog napona od par stotina kV na napon do 10kV
- preklopnicima usmjeravanju struju u potrebnom smjeru u ovisnosti o iznosu i lokaciji trenutnog opterećenja mreže,
- osiguravaju svaki izlaz struje iz trafostanice osiguračima za slučaj kratkog spoja odnosno preopterećenja.

Takva se struja prenosi do manjih trafostanica koje se nalaze na ulazu u pojedine zgrade, manje kvartove, sela te ulice. Zadaća tih trafostanica je da smanje napon na 220 V koji je tek tada primjenjiv u svim kućanskim uređajima. Sustav opskrbe električnom energijom prikazuje Slika 4.



Slika 4. Shematski prikaz sustava opskrbe električnom energijom [3]

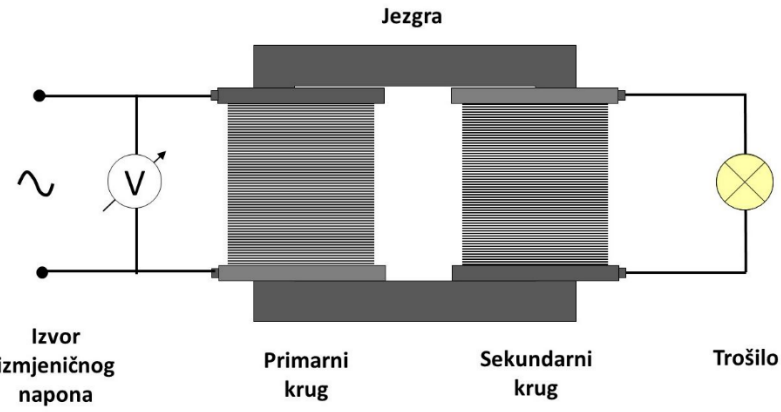
Vidljivo je da se u cijeloj mreži od mjesta na kojem se struja proizvodi pa sve do kućanstava nalazi više transformatora. To objašnjava važnost transformatora u sustavu opskrbe električnom energijom. Kao i u svakom sustavu, što je veća iskoristivost pojedinih komponenti to je i sam sustav iskoristiviji odnosno isplativiji. U 2008. su ukupni gubici svih transformatora unutar 27 zemalja članica Europske unije iznosili 93,7 TWh. Procjenjuje se da se poboljšanjem učinkovitosti kroz konstrukcijske promjene može uštedjeti 16,2 TWh godišnje u 2025., što odgovara uštedi emisije CO_2 od 3,7 Mt [4]. Zbog toga bitno je da i energetski transformator kao komponenta koja se u sustavu javlja više puta ima što veću iskoristivost. Fokus ovog diplomskog rada je upravo na konstrukcijskoj razini utjecati na smanjenje jednog od gubitaka koji se javljaju u energetskom transformatoru.

1.1. Općenito o transformatorima

Transformator je pasivni električni uređaj koji prenosi energiju između dvaju ili više strujnih krugova. Izum električnog transformatora krajem 19. stoljeća omogućio je korištenje mreže izmjenične struje te njeno prenošenje na velike udaljenosti. Osnovna primjena transformatora

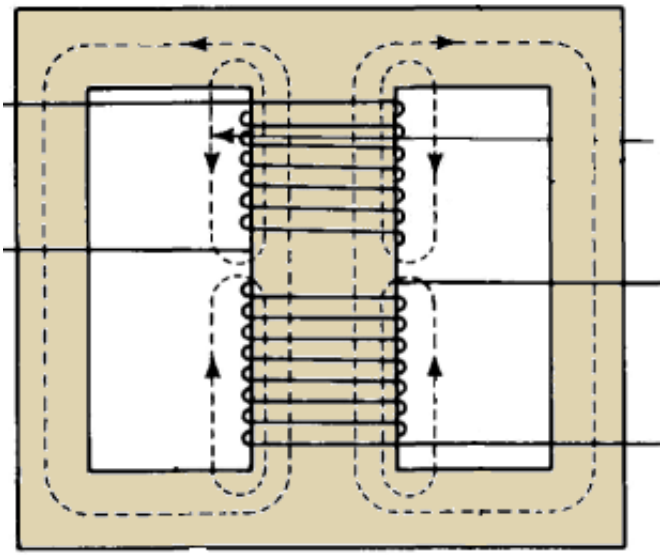
je da niski napon i visoku jakost izmjenične struje iz električnih generatora pretvara u visoke napone te niže vrijednosti struje. Naime, budući da je snaga električne struje jednaka umnošku napona i struje, ukoliko se podigne napon, smanjuje se struja. To omogućava korištenje vodiča manjeg presjeka, budući da je potrebni presjek vodiča proporcionalan jakosti struje. Osim samog smanjenja presjeka smanjuju se i gubici u vodiču te se na taj način praktički efikasno ostvaruje prijenos električne energije na velike udaljenosti.

Osnovni dijelovi svakog transformatora te prikaz spajanja na mrežu izmjenične struje prikazani su na Slici 5.



Slika 5. Osnovni dijelovi transformatora te primjer spajanja na izmjeničnu mrežu [5]

Svaki se transformator sastoji od najmanje dvije zavojnice (namota). Priključivanjem izvora struje na jedan od namota (primarni krug – primar), njime poteče struja. Ta struja budući da teče zavojnicom te je izmjenična, kroz os zavojnice principom elektromagnetske indukcije inducira promjenjivi magnetski tok. Taj magnetski tok prolazi zatvorenim okvirom – jezgrom oko koje su oba namota namotana. U drugome se namotu (sekundarnom krugu – sekundaru) istim principom elektromagnetske indukcije događa upravo suprotno . U sekundaru promjenjivi magnetski tok koji prolazi jezgrom inducira struju u namotima. Budući da broj namota primara i sekundara nije jednak, a magnetski tok koji teče jezgrom je (barem u teoretski idealnom slučaju), dolazi se do toga da napon induciran u sekundaru nije jednak onome u primaru, odnosno da struje primara i struje sekundara nisu jednake [6]. Ukoliko je napon sekundara veći od napona primara transformator se naziva uzlazni a ukoliko je napon sekundara niži, transformator je silazni [7]. Primarni i sekundarni namoti mogu biti postavljeni jedan do drugog na jezgri kao što prikazuje Slika 5., a često su postavljeni i jedan preko drugoga kao što je vidljivo na Slici 6.



Slika 6. Primar i sekundar na istom stupu, (engl. Core type) transformator [8]

Neke od karakteristika transformatora su:

- nazivna snaga – mjeri se u Volt-Amperima (VA),
- trajnost pogona – povremeni, kontinuirani, isprekidani, stohastički,
- frekvencijski raspon – strujni, audiofrekvencijski, radiofrekvencijski,
- naponski razred – mjeri se od nekoliko volti do nekoliko stotina tisuća volti,
- način hlađenja – slobodno ili prisilno u zraku ili uronjen u ulju, vodom hlađen,
- tip jezgre – namoti su zatvoreni u jezgri (engl. *Shell type*), namoti su naslagani koaksijalno na stupove (engl. *Core type*),
- tip namota – sendvič namoti, koncentrični namoti na istom stupu,
- preklopke namota – zvijezda, trokut, zigzag, Scott-T, autotransformator.

1.2. Podjela transformatora po namjeni

Prema tipu odnosno namjeri transformatori se dijele na [7]:

- **Autotransformator** (transformator u štednom polju, štedni transformator) – posebni tip transformatora s jednim namotom, odnosno dva namota koji su međusobno spojeni. Koriste se za povezivanje dijelova mreže različitih naponskih razina, pokretanje asinkronih motora, podizanje naponske razine nakon pada napona na mreži, općenito kod potrebe za transformacijom struje čiji je omjer napona približno jednak jedinici [9].
- **Učinski (energetski, strujni) transformator** – rabi se u prijenosu, potrošnji te razdiobi električne energije. Većih su dimenzija u odnosu na ostale tipove transformatora. Izvode se kao silazni i uzlazni transformatori. Jezgra im se izvodi kao laminat tankih čeličnih limova kako bi se smanjili gubitci a namoti su građeni od električnog bakra kružog ili profilnog oblika.
- **Izolacijski (odvojni) transformator** – namjena mu je zaštitno (izolacijsko) odvajanje dvaju strujnih krugova kako bi se smanjila opasnost od dodira pod električnim naponom te uzemljenih dijelova. Iz tog razloga kod takvih transformatora primarni i sekundarni namoti dodatno su izolirani od jezgre te kućišta.
- **Zakretni transformator** – vrsta je regulacijskog transformatora u kojemu je primarni namot na rotoru a sekundarni namot je namot statora zakočenog asinkronog motora. Zakretanjem rotora odnosno primarnog namota kontinuirano se mijenja inducirani napon na statoru te se tako postiže regulacijsko djelovanje.
- **Mjerni transformator –** služe za transformaciju visokih napona koji se žele mjeriti na iznose napona i struja koje su pogodne za mjerne instrumente te regulacijske i zaštitne uređaje. Na taj način mjerni se uređaji izoliraju od visokih napona u mjernom krugu te rukovanje njima postaje sigurno. Dodatna je pogodnost što na taj način mjerni uređaji mogu biti prostorno odmaknuti od mjernog kruga te se time eliminira mogućnost utjecaja mjernog kruga na rezultate mjerenja. Kod takvih transformatora primarni namot se priključuje u mjereni krug a na sekundarni se priključuju mjerni ili sigurnosni uređaji. Prijenosni omjer takvih transformatora mora biti poznat a fazne razlike zanemarive.
- **Audiofrekvencijski (tonski) transformator –** svojom posebnom konstrukcijom omogućuje prijenos audiosignala (16 Hz do 20kHz).

Navedene vrste transformatora prikazane su na Slici 7. do 12.

Slika 7. Autotransformator [10]

Slika 8. Energetski transformator [11]

Slika 9. Izolacijski transformator [12]

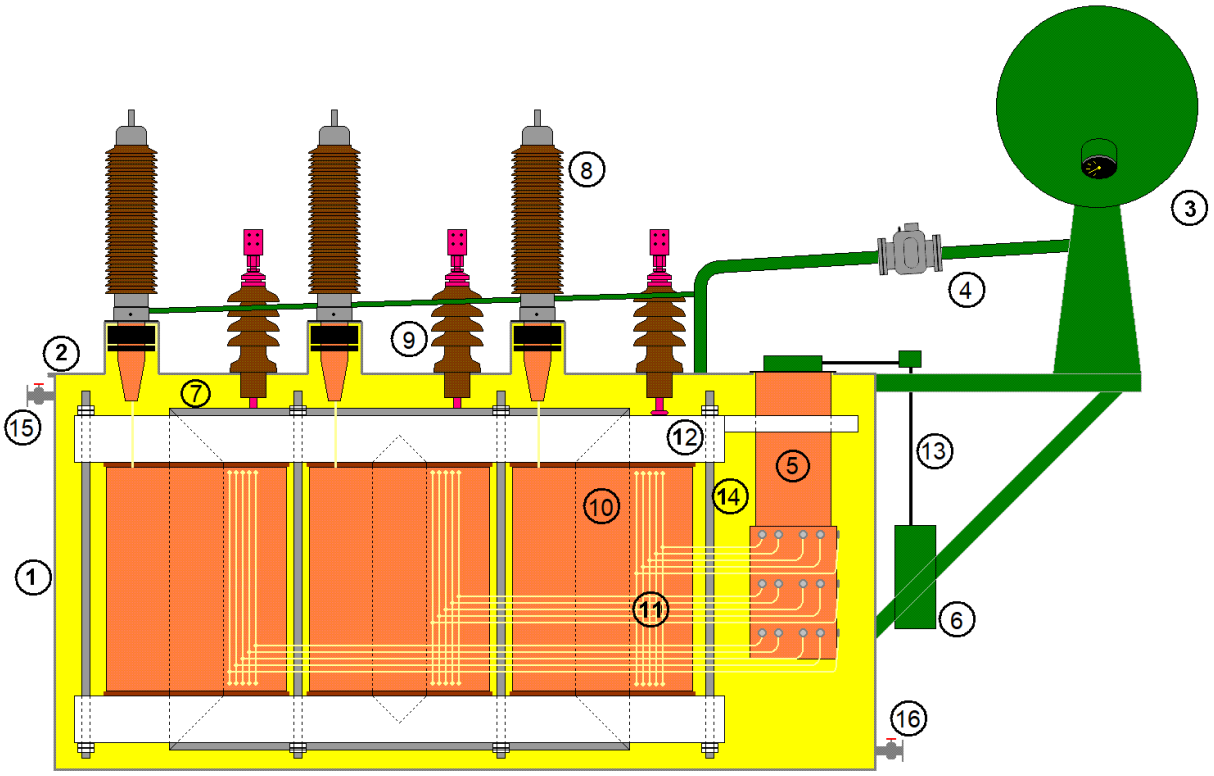
Slika 10 Zakretni transformator [13]

Slika 11. Mjerni transformator [14]

Slika 12. Audiofrekvencijski transformator [15]

1.3. Konstrukcija i način rada energetskih transformatora

Osnovne komponente energetskog odnosno strujnog transformatora ilustrira Slika 13.



Slika 13. Osnovne komponente energetskog transformatora [16]

Brojevima od 1 do 16 označene su komponente:

1. Kućište (kotao)
2. Poklopac kotla
3. Konzervatorski spremnik
4. Buchholz relej
5. Preklopnik
6. Pogonski motor preklopnika
7. Jaram jezgre
8. Visokonaponski priključak (izlazni priključak)
9. Niskonaponski priključak (ulazni priključak)
10. Visokonaponski i niskonaponski namoti
11. Krajevi segmenata namota (unutarnje ožičenje)
12. Steznik
13. Vratilo motora preklopnika
14. Vlačne motke
15. Priključak za dovod vakuuma
16. Otvor za ispust ulja

Prema uredbi Europske Komisije [4], energetski odnosno strujni transformator definiran je kao:

„*Statični aparat s dva ili više namota koji elektromagnetnom indukcijom pretvara sustav izmjeničnih napona i struje u drugi sustav izmjeničnog napona i struje, najčešće različite vrijednosti i na istoj frekvenciji u svrhu prijenosa električne energije*.“

Energetski se transformatori u navedenoj uredbi dijele prema Tablici 1.

Tablica 1. Podjela energetskih transformatora [4]

Naziv	Izlazni napon [kV]	Nazivna snaga
Mali strujni transformator	≤1,1	-
Srednji strujni transformator	1,1 - 36	5 kVA – 40 MVA
Veliki strujni transformator	>36	≥5 kVA
	-	≥40 MVA

Kako bi se lakše razumjela uloga Polyglas traka kod energetskog transformatora svrsishodno je opisati princip njegovog funkcioniranja te dijelove od kojih se sastoji. Na Slici 13. je prikazan *Core type* transformator kakav se najčešće proizvodi u tvornici Končar – Energetski transformatori. Brojem 1 označeno je kućište u kojeg se polažu sklopovi koji direktno služe za obavljanje funkcije pretvorbe napona odnosno koji služe za prenošenje struje. Kućište transformatora uzemljeno je te se često naziva i kotao. Kotao se, u svrhu smanjenja buke te vibracija kao i očuvanja unutarnjih komponenti od korozije puni transformatorskim mineralnim uljem (označeno žutom bojom). Brojem 2 označen je poklopac kotla koji na sebi sadrži rupe za izvode namota transformatora. Budući da se u radu transformator zagrija te hladi u ovisnosti o opterećenju te okolišnim atmosferskim uvjetima, potrebno je osigurati prostor za kompenzaciju promjene u volumenu ulja koje je u kotlu. Ta zadaća se ostvaruje konzervatorskim spremnikom označenim brojem 3. Ukoliko u radu transformatora dođe do teške greške poput bilokakvog probijanja napona visokonaponskih elemenata na niskonaponske elemente ili uzemljene elemente, nužno je isključiti transformator iz pogona. Otkrivanje takve greške efikasno se izvodi primjenom Buchholz releja označenog brojem 4. Taj relej radi na principu da otkriva prisutnost plinovite faze u tekućem ulju. Naime, ukoliko dođe do probijanja napona, na mjestu gdje je došlo do izbijanja električnog luka lokalno se postignu visoke temperature koje uzrokuju isparavanje određene količine ulja. Nastali plinovi prirodno putuju prema gore zahvaljujući blagom nagibu poklopca kotla i cijevi koja vodi do konzervatora. Na toj cijevi ugrađuje se

Buchholz relej koji ukoliko detektira prisutnost parovite faze isključuje transformator iz mreže. Moderni energetski transformatori nude mogućnost transformacije struje na različite napone. Namoti na stupovima ne izvode se kao kontinuirani komadi bakrenih vodiča već ih se presijeca određen broj puta. To daje mogućnost spajanja različitih segmenata namota u strujni krug, odnosno iskapčanja te time 'deaktivira' dio namota. Na taj način dobiva se isti efekt kao da se fizički koriste namoti drugog broja namotaja koji potom rezultira drugim izlaznim naponom struje. Za takvu regulaciju zadužen je mehanički preklopnik označen brojem 5. Brojem 6 označen je pogonski motor tog preklopnika a brojem 13 vratilo tog motora koje dovodi mehaničku snagu potrebnu za rad preklopnika izvoda namota. Vodoravni dijelovi jezgre nazivaju se jarmovi dok se okomiti dijelovi jezgre nazivaju stupovi. Jedan od jarmova prikazan je brojem 7. Brojem 8 odnosno 9 označen je visokonaponski izlazni odnosno niskonaponski ulazni priključak. Budući da se visokonaponski izlazi kao i niskonaponski ulazi pričvršćuju na uzemljeni poklopac, nužno je da su dobro električno izolirani. To se postiže smeđe prikazanim keramičkim izolatorima. Brojem 10 prikazani su narančasto visokonaponski odnosno niskonaponski namoti u koncentričnoj izvedbi. Izvodi segmenata tih namota, označeni brojem 11, prekopčavaju se po potrebi u preklopniku. Kako bi jezgra koju čine stotine čeličnih limova mogla zadržati svoj oblik uslijed vlastite mase, potrebno je ukrutiti jarmove steznicima označenim brojem 12. Stupovi se pak ukrućuju pritezanjem steznih elemenata direktno na stupove bez dodatnih steznika. Složenu, stegnutu i uspravljenu jezgru s vidljivim steznicima i steznim elementima od metalnih traka te s uklonjenim namotima prikazuje Slika 14. Proces slaganja limova jezgre na horizontalnom stolu prikazuje Slika 15.

Slika 14. Složena i uspravljena jezgra sa steznicima [17]

Slika 15. Slaganje jezgre [18]

Steznici gornjeg i donjeg jarma jezgre povezani su vlačnim motkama prikazanim brojem 14. Budući da se između gornjih i donjih steznika nalaze namoti, vlačnim motkama oni se tlače što diže cjelokupnu iskoristivost transformatora. Budući da je transformator punjen uljem, kako bi se smanjila mogućnost curenja ulja predviđeno je da se na vrhu kotla dovodi vakuum te time umanjuju iznosi tlakova na brtve. Taj dovod vakuuma označen je brojem 15. Brojem 16 označen je servisni otvor za ispust ulja.

1.3.1. Zahtjevi za ekološki dizajn

Osim što je uredbom [4] dana definicija i podjela energetskih transformatora, njen je primarni cilj određivanje obveznih karakteristika uređaja za svaki proizvedeni transformator u Europskoj uniji u pogledu ekoloških zahtjeva. Veličina koju uredba regulira, a koja izravno govori o energetskoj kakvoći transformatora naziva se Indeks vršne učinkovitosti (PEI). Izračunavanje indeksa vršne učinkovitosti temelji se na izmjerenim veličinama stvarnog transformatora te se izračunava prema izrazu

$$PEI = 1 - \frac{2(P_0 + P_{c0})}{S_r \sqrt{\frac{P_0 + P_{c0}}{P_k}}}, \quad \textbf{(1)}$$

gdje je:

P_0 – snaga gubitka praznog hoda pri nazivnoj snazi i nazivnoj frekvenciji [W],

P_{c0} – električna energija potrebna za sustav hlađenja za rad praznog hoda [W],

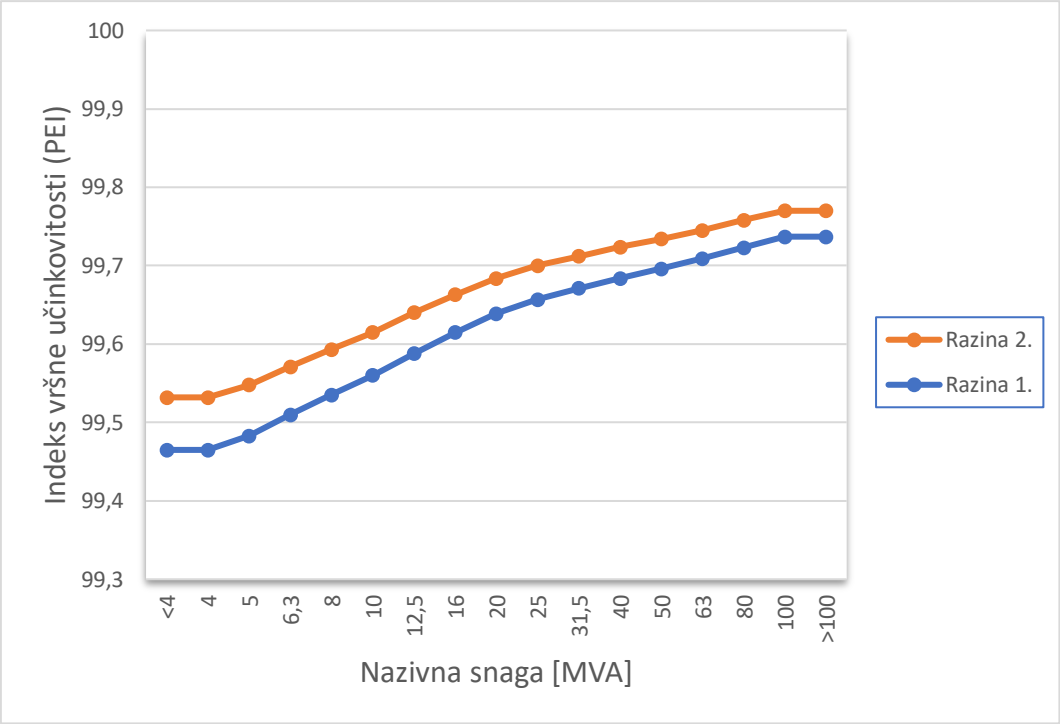
P_k – gubici pri nazivnoj struji i nazivnoj frekvenciji ispravljeni do referentne temperature [W],

S_r – nazivna snaga transformatora na kojoj se temelji P_k [W].

Trenutno, 2020. godine Indeks vršne učinkovitosti mora zadovoljavati Razinu 1 koja je na snazi od 1. srpnja 2015. Iduća, Razina 2. vršne učinkovitosti stupa na snagu 1. srpnja 2021. Te razine propisuju najniže dozvoljene Indekse vršne učinkovitosti transformatora u ovisnosti o nazivnoj snazi transformatora te vrsti transformatora. Prema trenutno važećoj uredbi, razine su definirane za sljedeće vrste transformatora u suhim i mokrim (u ulju) izvedbama [4]:

- trofazni srednje veliki strujni transformatori nazivne snage ≤ 3 150 kVA,
- trofazni srednje veliki strujni transformatori nazivne snage > 3 150 kVA,
- srednje veliki strujni transformatori koji se postavljaju na stup,
- veliki strujni transformatori.

Zahtjeve za potrebne Indekse vršne učinkovitosti kod velikih strujnih transformatora u ulju za Razinu 1. te Razinu 2. prikazuje Slika 16.

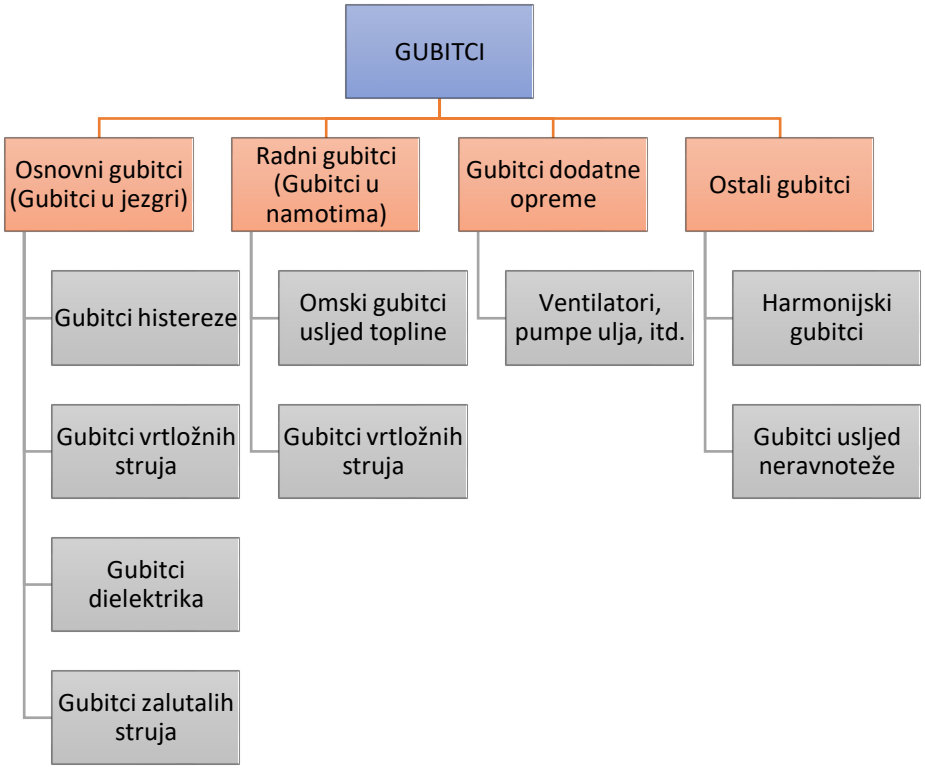


Slika 16 Novi i stari zahtijevani PEI [4]

1.4. Gubici energetskih transformatora

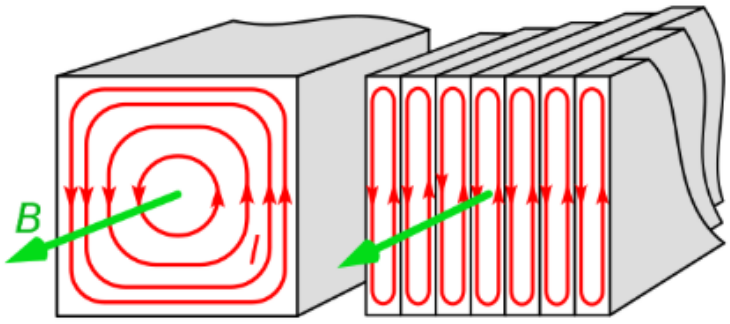
Kod energetskih transformatora budući da su sastavni dio mreže za distribuciju električne energije te da su u trajnom pogonu, efikasnost rada je imperativ. Današnji moderni transformatori u usporedbi s drugim elementima u prijenosu električne energije imaju vrlo visoku iskoristivost. Fenomenološki, kod energetskih kao i kod ostalih vrsta transformatora, gubici se mogu podijeliti na dvije glavne kategorije – osnovni gubici i radni gubici, te dodatno kod većih transformatora, gubici dodatne opreme te ostali gubici [19]. Detaljniju fenomenološku podjelu gubitaka prikazuje Slika 17.

Osnovni gubici u transformatoru još se nazivaju i gubicima jezgre (engl. *Iron losses*). Karakteristično je da ti gubici ne ovise o opterećenju transformatora, odnosno oni su konstantnog iznosa kako za prazni hod tako i za opterećena stanja. Sastoje se od gubitaka uslijed histereze te gubitaka uslijed vrtložnih struja. Budući da je struja koja se dovodi u transformator izmjenična, to znači da je inducirani magnetni tok u jezgri promjenjiv. Gubici histereze nastaju kada promjena smjera induciranog magnetskog toka te frekvencija struje nisu savršeno usklađeni zbog inertnosti jezgre [20]. Gubici histereze ovise o materijalu od kojeg je jezgra



Slika 17. Podjela gubitaka transformatora [19]

izrađena. Smanjenje gubitaka histereze moguće je izborom kvalitetnijeg silikonskog čelika, izborom čelika koji je odgovarajuće valjan ili toplinski obrađen. Mogu se koristiti i limovi s ciljanom zrnatom usmjerenom orijentacijom. Kod današnjih transformatora, gubici histereze odgovorni su za od 50% do 80% osnovnih gubitaka. Gubici vrtložnih struja nastaju kao posljedica Faraday-ovog zakona [20]. Inducirani magnetski tok uzrokuje kružne vrtložne struje (engl. *Eddy current*) kao nuspojavu normalnog rada. Vrtložne struje su manje što je manja površina poprečnog presjeka lima jezgre. To je ujedno i razlog zašto se jezgra izrađuje kao laminat čeličnih limova međusobno izoliranih lakom, a ne kao jedan komad čelika. Prostiranje vrtložnih struja po presjeku različitih površina prikazuje Slika 18.



Slika 18. Vrtložne struje po presjeku dijela jezgre [20]

Gubici uslijed vrtložnih struja iznose glavninu u preostalom udjelu osnovnih gubitaka, od 20% do 50%. Gubici dielektrika te gubitci zalutalih struja manje su značajni te u ukupnom udjelu iznose do 1%.

Radni gubici (gubici u namotima) su gubici koji su ovisni o trenutnom opterećenju te su s opterećenjem u proporcionalnom odnosu. Sastoje se od omskih gubitaka u vodiču uslijed topline te gubitaka uslijed vrtložnih struja u vodiču namota. Omski gubici vodiča događaju se uslijed omskog otpora u bakru te su s njim proporcionalni. Osim samog omskog otpora vodiča odnosno bakra, omski otpori rastu i s kvadratom jakosti struje koja njime prolazi. Način na koji se mogu smanjiti omski otpori je da se poveća promjer vodiča, naravno do razine na kojoj se još mogu ispuniti ostali konstrukcijski zahtjevi poput broja namotaja i sličnih. Gubici uslijed vrtložnih struja u vodičima namota imaju istu genezu kao i kod limova jezgre. Redukcija tih vrtložnih struja u vodičima namota izvodi se slično kao i kod jezgre. Naime, kao što se kod jezgre koristi velik broj međusobno izoliranih limova malog poprečnog presjeka, tako se i kod namota koristi u jednom vodičkom užetu više međusobno izoliranih bakrenih žica. Ukoliko bi svaka žica cijelom dužinom bila stalno izolirana od ostalih, to bi značilo da kroz svaku od takvih žica prolazi malo drugačije magnetsko polje, odnosno da se u svakoj od njih inducira malo drugačiji napon. Kada bi se takve žice konačno spojile na izlazu iz namota (sabirnici), dolazilo bi do velikih vrtložnih struja te gubitaka na sabirnici. Te se žice na više mjesta u samom namotaju međusobno ipak spoje kako bi se izbjegao efekt vrtložnih struja na sabirnici.

Gubici dodatne opreme podrazumijevaju električnu snagu koju je potrebno utrošiti za pogon prateće opreme, odnosno pumpi, ventilatora, upravljačkih motora i tome slično, a koji su potrebni za rad transformatora. Te komponente prikazuje Slika 19 i Slika 20.

U ostale gubitke spadaju iznosom zanemarivi gubici koji uključuju gubitke usred greške u frekvenciji dolazne struje te eventualnim narinutim negativnim naponima.

Slika 19. Rashladni sustav transformatora - hladnjak s ventilatorima [21]

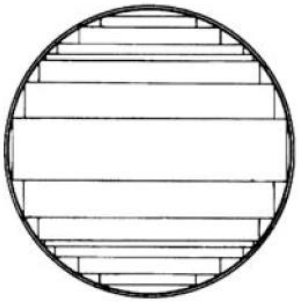
Slika 20. Pumpa ulja za cirkulaciju rashladnim sustavom [22]

1.5. Jezgra energetskog transformatora

Jezgra transformatora dio je transformatora kojemu je glavni zadatak omogućiti prijenos magnetskog toga od niskonaponskih do visokonaponskih namota sa što manje gubitaka. Kao što je već ranije spomenuto, jezgra se ne izrađuje iz jednog velikog komada čelika već iz stotina tankih, lakom izoliranih, čeličnih limova. Takvi limovi isporučuju se kao sirovina u stanju kojeg prikazuje Slika 21, a na njih je unaprijed prilikom valjanja stavljen izolacijski lak.

Slika 21. Rola čeličnog transformatorskog lima [24]

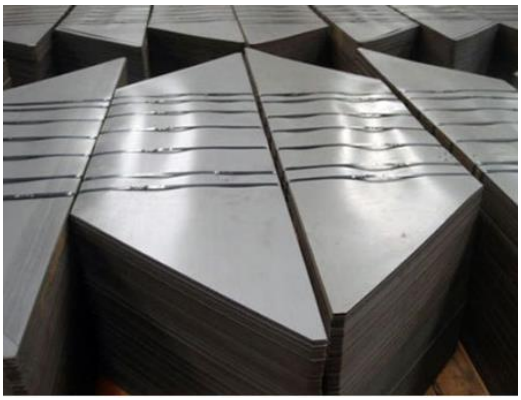
Općenito, vezano uz tehnologiju proizvodnje transformatorskih limova, oni mogu biti hladno ili toplo valjani s usmjerenim ili neusmjerenim zrnima. Debljina im se najčešće kreće između 0.23 sve do 0,36 mm. Početak proizvodnje jezgre je rezanje transformatorskog lima u roli na dijelove iz kojih se slaganjem dobivaju jarmovi odnosno stupovi jezgre. Ukoliko su limovi koji se režu identični, njihovim slaganjem jednog na drugi nastaje jezgra koja ima kvadratni ili pravokutni presjek. Kod većih transformatora povoljnije je da je jezgra što više okruglog oblika. To omogućuje manje rasipanje magnetskog toka te povećanu iskoristivost. Takav kružni oblik postiže se na način da se režu limovi sve manje i manje širine (tzv. koraci) pa se njihovim slaganjem jezgra približava kružnom presjeku [23]. Primjer kružne jezgre u sedam koraka prikazuje Slika 22.



Slika 22. Kružni presjek jezgre u 7 koraka [6]

Što je više koraka u krugu to je veći postotak ispunjenosti kruga samom jezgrom, odnosno sve je manje praznina u poprečnom presjeku. To povoljno djeluje na iskoristivost magnetskog toka. Rezanje limova radi se strojevima na mehanički način – noževima ili kod modernijih strojeva – laserom. Stroj za rezanje transformatorskog lima laserom prikazuje Slika 23, a izrezani limovi spremni za slaganje vidljivi su na Slici 24.

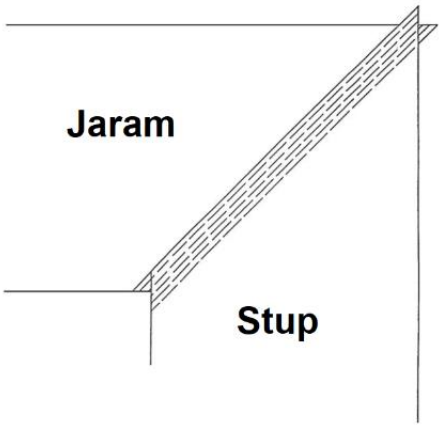
Slika 23. Laserski rezač transformatorskog lima [25]



Slika 24. Izrezani limovi jezgre [26]

Nakon izrezivanja limova kreće se u slaganje same jezgre. Jezgra se slaže na način da se donji jaram te stupovi prvo slažu u vodoravnoj ravnini na posebnom hidrauličkom stolu koji kasnije uspravlja jezgru (Slika 25). Kao pomoć u pozicioniranju limova nerijetko se kroz limove buše provrti kroz koje idu trnovi za pozicioniranje koji omogućuju brzo slaganje limova bez puno brige oko točnosti pozicioniranja. Bitno je naglasiti da se limovi uvijek slažu u preklopu, znači ako je stavljen jedan lim jarma, iduća dva lima su limovi desnog i lijevog stupa te se takav uzorak ponavlja do kraja. Takav preklopni spoj prikazuje Slika 26. To omogućava da je širina jezgre na mjestu spajanja stupova i jarmova jednaka kao i na drugim mjestima. Nakon slaganja donjeg jarma i stupova na jezgru se montiraju donji stezni elementi jarma te po potrebi privremeni stezni elementi stupova. Nakon toga jezgra se uspravlja. Uspravljanje jezgre prikazuje Slika 25.

Slika 25. Uspravljanje jezgre [27]

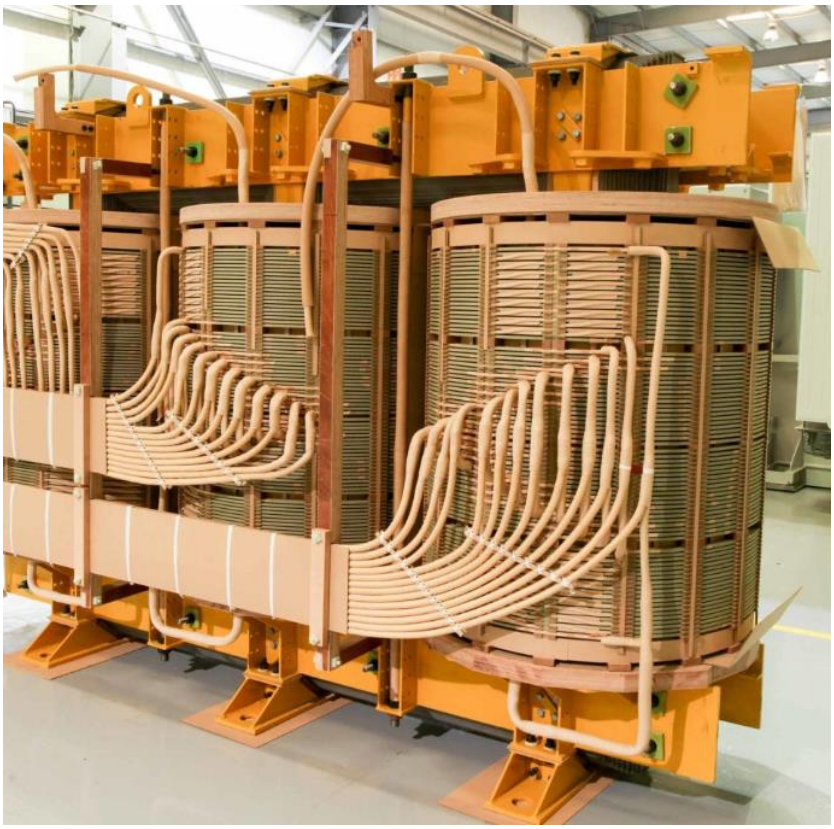


Slika 26. Preklop jarma i stupa [6]

Uspravljena se jezgra uklanja sa stola za slaganje i uspravljanje te se nalazi u stanju koje prikazuje Slika 27. U prikazanoj fazi na stupove jezgre se postavljaju drvene platforme na koje se stavljaju visokonaponski i niskonaponski namoti. Kad su namoti instalirani, jezgra se može zatvoriti ugradnjom gornjeg jarma te njegovih steznika i steznih elemenata kao i vlačnih motki. Tako složenu jezgru prikazuje Slika 28.

Slika 27. Jezgra prije montaže gornjeg jarma [28]

Na slici vidljivi su i izvodi iz namota koji se dalje spajaju u preklopnik zbog regulacije izlaznih svojstava struje. Bitno je za razumjeti da je funkcija jezgre isključivo prenošenje magnetskog toka, ona nema funkciju prijenosa struje. To konkretno znači da je njen potencijal jednak 0, odnosno jezgra se preko kotla i uzemljuje kao zaštita od električnog izbijanja. U prikazanome stadiju završava sklop jezgre i namota te se u takvom stanju prikazani sklop ugrađuje u kotao.



Slika 28. Sklop jezgre i namota u stanju spremnom za ugradnju [29]

1.6. Kvantifikacija gubitaka u jezgri energetskog transformatora

Nakon što su u prethodnim cjelinama opisani dijelovi transformatora, objašnjeni gubici u transformatorima te fenomenološka priroda njihova nastanka, intuitivno je da se to pokuša i opisati na proračunskoj razini. Takav opis omogućuje jednostavno sagledavanje parametara koji utječu na iznose gubitaka. Razmatrat će se samo gubici koji spadaju u kategoriju osnovnih gubitaka kako to prikazuje Slika 17. Razlog tome je taj što se ovaj rad fokusira na opisivanje te razjašnjavanje utjecajnih parametara za iskoristivost jezgre, pa je i logično da se radi i detaljniji pregled samo tih gubitaka. Gubici uslijed vrtložnih odnosno (engl. *Eddy current)* struja za laminirane jezgre energetskih transformatora mogu se opisati izrazom (2), danim u [30].

$$P_{ed} = \frac{(t \cdot \pi \cdot B_p \cdot f)^2}{6 \cdot \rho}, \left[\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^3}\right]. \quad \textbf{(2)}$$

Gubici histereze jezgre mogu se opisati izrazom (3), izvedenim u [31].

$$P_h = \frac{2 \cdot f \cdot B_p^2}{S \cdot \mu_r \cdot \mu_0}, \left[\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^3}\right]. \quad \textbf{(3)}$$

Navedeni izrazi predstavljaju gubitke svedene na jedinicu volumena jezgre, u kojoj je:

t – debljina pojedinog lima u jezgri [m],

B_p – gustoća magnetskog toka kroz jezgru [T],

f – frekvencija električne struje [Hz],

ρ – električna otpornost [Ωm],

S – faktor laminacije (slaganja) [-],

μ_r – relativna električna permeabilnost [-],

μ_0 – električna permeabilnost vakuuma [H/m].

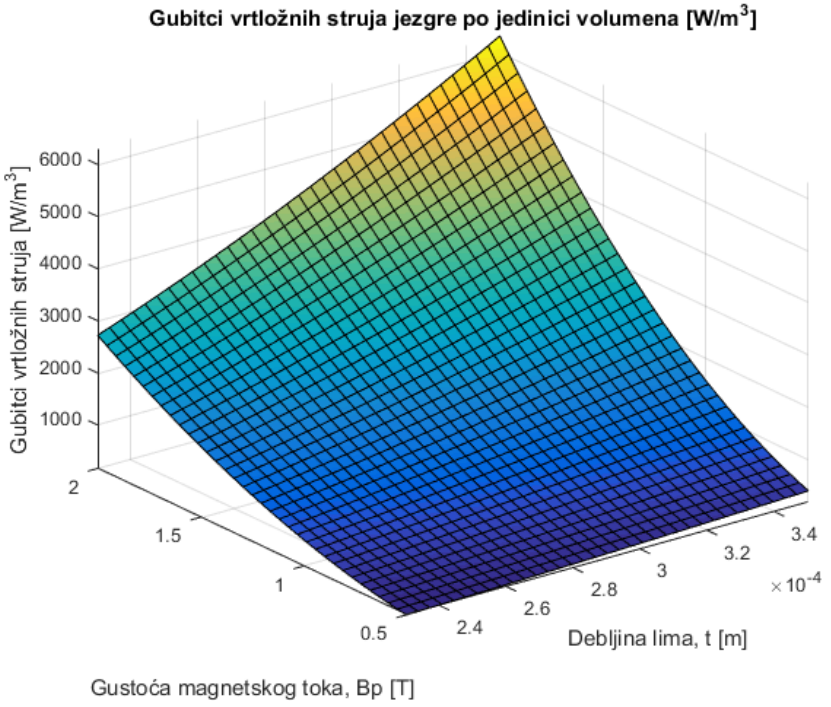
1.6.1. Gubici uslijed vrtložnih struja

Gubitke uslijed vrtložnih struja prema izrazu (2) zgodno je prikazati grafički na način da promatramo kako se mijenja njihov iznos u ovisnosti o promjeni debljine transformatorskog lima t, te iznosa gustoće magnetskog toka B_p kroz jezgru. Debljina limova konstrukcijsko je svojstvo transformatora dok gustoća magnetskog toka govori o trenutnoj opterećenosti transformatora odnosno mreže. Frekvencija struje iznosi $f = 60$ Hz, što je standarda

frekvencija struje u opskrbnoj mreži Europe, dok električna otpornost limova iznosi oko $\rho = 4.6 \cdot 10^{-7}$ Ωm, kako je navedeno u [32]. Uz te odabrane i konstantne vrijednosti frekvencije i električne otpornosti limova, gubici uslijed vrtložnih struja mogu se prikazati kao:

$$P_{ed} = P_{ed}(B_p, t). \quad \textbf{(4)}$$

Gustoće magnetskih tokova kod energetskih transformatora kreću se od 0.5 T pa sve do 2 T, dok se debljine transformatorskih limova najčešće kreću od 0.23 mm do 0.35 mm. Uz navedene raspone grafički prikaz izraza (4) prikazuje Slika 29. Vidljivo je da izborom debljih limova dolazi do povećanja gubitka što i odgovara opisu prirode nastanka tih gubitaka u poglavlju 1.4. Isto tako, povećavanjem opterećenja transformatora, odnosno rastom gustoće magnetskog toka dolazi i do porasta navedenih gubitaka.



Slika 29. Gubici uslijed vrtložnih struja

1.6.2. Gubici uslijed histereze jezgre

Gubitke uslijed histereze jezgre prema izrazu (3) zgodno je promatrati kao funkciju faktora laminacije S te gustoće magnetskog toka B_p

$$P_h = P_h(S, B_p). \quad \textbf{(5)}$$

Ipak, budući da ta jednadžba ovisi još i o relativnoj električnoj permeabilnosti μ_r te frekvenciji struje f, potrebno je prvo njih usvojiti. Frekvencija struje iznosi $f = 60$ Hz, kao i kod

prethodnog razmatranja. Vrijednost μ_r je pak faktor koji govori koliko je puta permeabilnost lima veća od permeabilnosti vakuuma μ_0 (konstanta). Kod transformatorskih limova u općem slučaju vrijednost μ_r ovisi o kutu α između vektora magnetskog polja u nekoj točki lima i smjera valjanja limova kao i o gustoći magnetskog toka B_p. Objašnjenje toga leži u činjenici da se transformatorski limovi proizvode kao što je i spomenuto, postupkom valjanja, što nužno rezultira anizotropnim svojstvima, kako mehaničkim tako i magnetskim.

U općem slučaju može se dakle pisati

$$\mu_r = \mu_r(B_p, \alpha). \quad \textbf{(6)}$$

Primjera radi, vrijednosti μ_r za nekolicinu kutova α te B_p = 1 T = konst. prikazuje Tablica 2. [33]

Tablica 2. Ovisnost relativne permeabilnosti o kutu α za B_p = 1 T = konst. [33]

α [°]	0	45	67,5	90
μ_r (B = 1 T)	29325	3704	5747	3186

Iz navedene tablice usvojena je vrijednost

$$\mu_r = \mu_r(B_p = 1\ T, \alpha = 0°) = 29325. \quad \textbf{(7)}$$

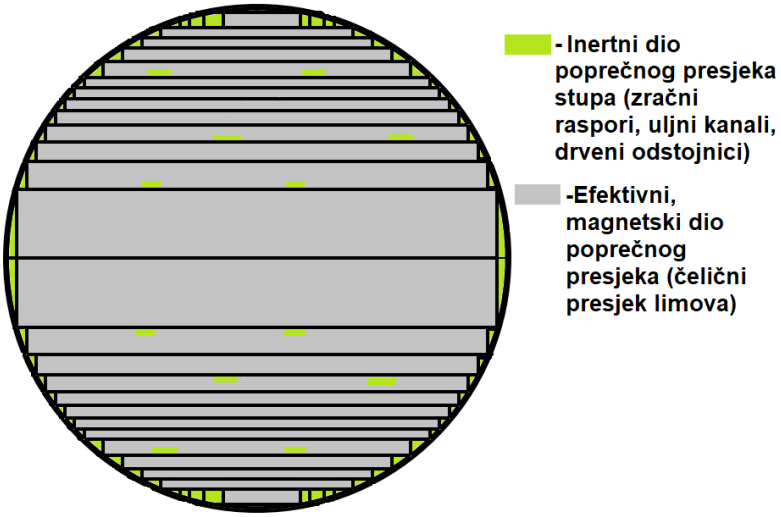
Ta vrijednost primjenjiva je u potpunosti samo ukoliko je vektor magnetskog polja paralelan smjeru valjanja limova te ukoliko je gustoća magnetskog toka u toj točki lima 1 T. Bez obzira što jednadžba (3) podrazumijeva promjenjivu gustoću magnetskog toka, za pretpostaviti je da njen kvalitativni prikaz nije pogrešan.

Jedina preostala neopisana varijabla u izrazu (3) je faktor laminacije S. Naime, stvarni poprečni presjek stupa odnosno jarma (A_0) energetskog transformatora nije cijeli magnetski vodljiv. Sami limovi imaju magnetski i električni inertni izolacijski lak koji zauzima dio poprečnog presjeka, uzdužno se umeću drveni odstojnici koji kreiraju kanale za cirkulaciju ulja za hlađenje, pa vanjska kontura nije savršeno okrugla već stepenasta interpolacija okruglog oblika paketima čeličnih limova. Sve to rezultira time da je efektivna magnetska površina poprečnog presjeka jarma odnosno stupa (A_{ef}) manja od stvarne površine poprečnog presjeka (A_0). Slika 30 prikazuje efektivni i neefektivni dio poprečnog presjeka, te prema njoj vrijedi

$$A_0 = A_{ef} + A_{in}. \quad \textbf{(8)}$$

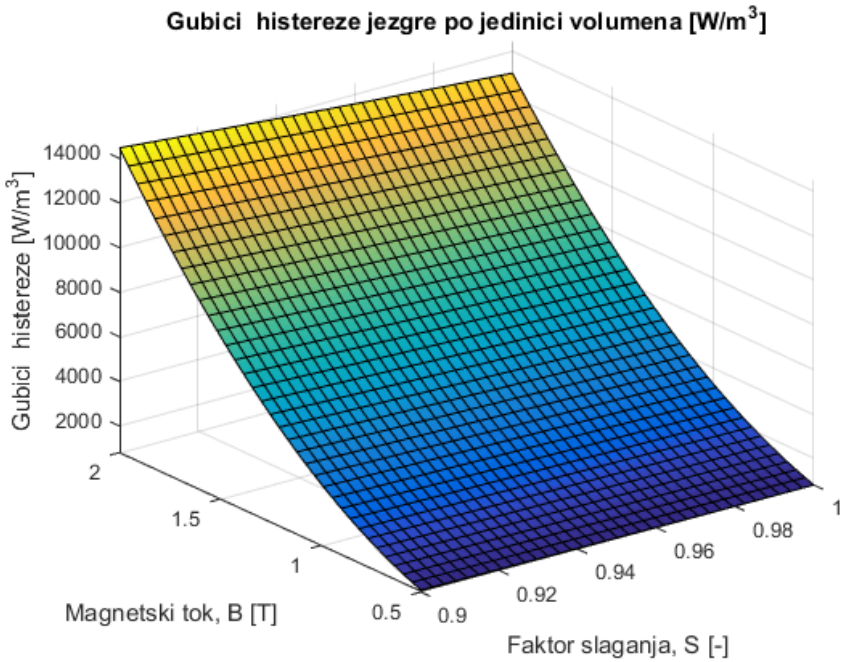
Faktor laminacije može se iskazati kao omjer efektivne površine poprečnog presjeka te ukupne površine

$$S = \frac{A_{ef}}{A_0}. \tag{9}$$



Slika 30. Efektivni i neefektivni dio poprečnog presjeka

Sada kada su svi utjecajni faktori u jednadžbi (3) opisani može se iscrtati graf kojeg definira jednadžba (5). Taj graf prikazuje Slika 31.



Slika 31. Gubici uslijed histereze jezgre

Gustoća magnetskog toka razmatra se u granicama radnog područja transformatora, kao i kod razmatranja gubitaka uslijed vrtložnih struja. Faktor slaganja S najčešće se kod energetskih transformatora kreće u granicama od 0,9 do 0,98. Vidljivo je kako s porastom faktora slaganja, odnosno povećanjem udjela efektivne površine jezgre u ukupnoj površini (prema jednadžbi (6)), pada i navedeni oblik gubitaka u transformatoru, odnosno povećava se iskoristivost transformatora.

Načelno na faktor slaganja može se utjecati

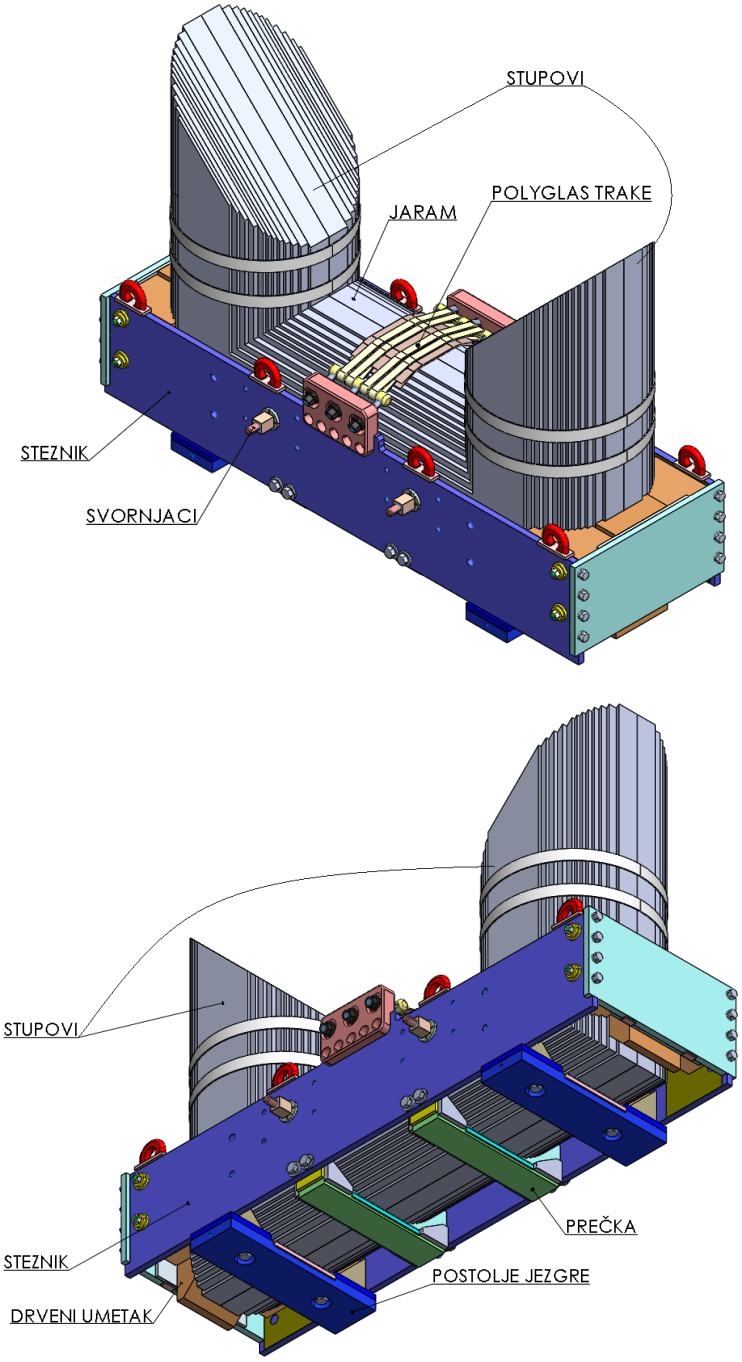
- povećanjem broja paketa „stepenica“ limova odnosno finijom interpolacijom kružnice,
- povećanjem pritiska među limovima što rezultira povećanjem poprečne kompaktnosti jezgre.

Povećanje broja paketa odnosno stepenica diktira sama ekonomska isplativost. Što je više stepenica odnosno „paketa“ limova to je veći utrošak vremena potrebnog za njihovo rezanje i slaganje, što u konačnici rezultira povećanjem cijene i vremena potrebnog za izradu. Jedini preostali način za povećanje navedenog faktora a time i iskoristivosti jezgre je povećanje pritiska između limova. Budući da se međusobni pritisak limova ostvaruje unošenjem normalne sile preko steznika (čeličnih ploča) korištenjem steznih elemenata, nužno je dobro poznavati mehanička svojstva i granice navedenih elemenata kao i konstrukcijskih rješenja njihove primjene. To bi omogućilo optimizaciju te prilagodbu konstrukcijskih rješenja stvarnim potrebama, što bi posljedično smanjilo potrebne faktore sigurnosti te mehanički i ekonomski povećalo efikasnost samog transformatora.

Jedan tip steznih elementa u tvornici energetskih transformatora „Končar – energetski transformatori“ su i stezne trake od staklenih vlakana impregnirane u epoksidnoj smoli komercijalnog naziva Polyglas® trake. Mehanička svojstva te karakteristike navedenih steznih elemenata u Končar – Energetskim Transformatorima nisu egzaktno poznate već je dosad ustaljena praksa izrade svakog steznog elementa od 14 namotaja Polyglas® trake. Zadatak ovog diplomskog rada je identificirati parametre koji utječu na mehaničke karakteristike navedenih steznih elemenata te kvantitativno odrediti njihova svojstva u ovisnosti o utjecajnim parametrima u postojećem konstrukcijskom rješenju njihove primjene odnosno na eksperimentalnom postavu. Osim samih steznih elemenata u postojećem konstrukcijskom rješenju, ispitat će se i nova predložena konstrukcijska izvedba stezanja jarma odnosno stupa korištenjem Polyglas® trake.

2. STEZNI SUSTAV JEZGRE TRANSFORMATORA

Elemente koji se koriste za stezanje jezgre najlakše je objasniti te prikazati u sklopu sastavljene jezgre. Za potrebe testiranja potencijalnih promjena te noviteta u postupku proizvodnje jezgre, u Končar Energetskim-Transformatorima izrađena je takozvana „Testna“ jezgra koja služi kao umanjeni model stvarnih, načelno mnogo većih jezgri. Zbog jednostavnosti na toj jezgri nije ugrađen gornji jaram već je ona izrađena kako prikazuje Slika 32.



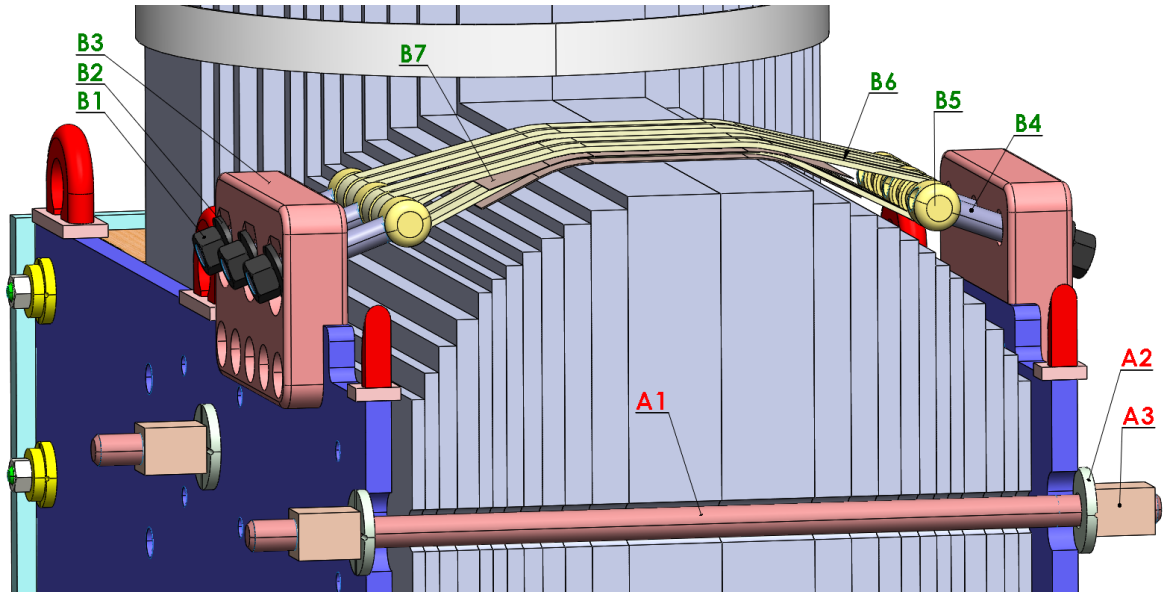
Slika 32. Testna jezgra

2.1. Standardna rješenja steznih elemenata u steznom sustavu jezgre transformatora

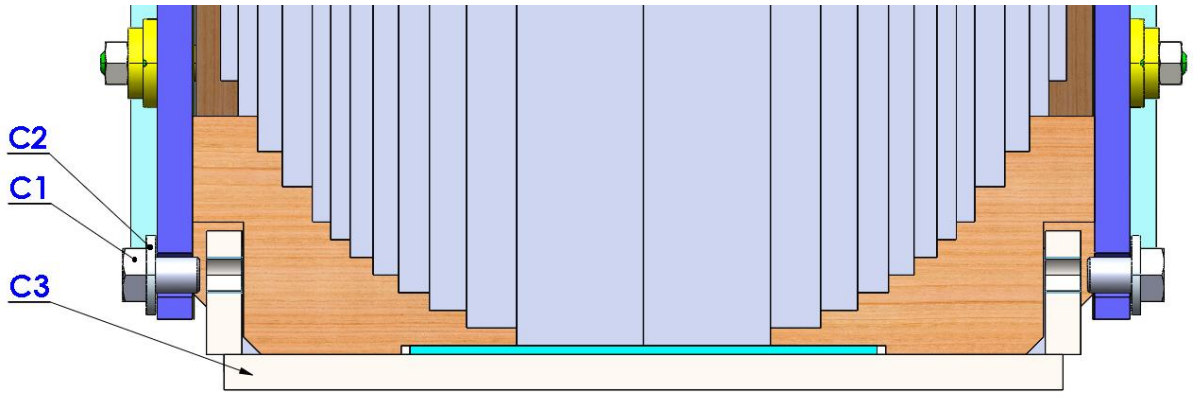
U steznom sustavu jezgre transformatora Končar – Energetskih Transformatora postoje tri standarda odnosno ustaljena rješenja koja se primjenjuju za održavanje kompaktnosti jezgre odnosno pritiska među limovima. To su

1. svornjaci (metalni ili HGW kompozitni),
2. Polyglas® trake,
3. prečke.

Položaj tih steznih rješenja u sklopu testne jezgre prikazuje Slika 32. Detaljniji pogledi na ta tri stezna elementa skupa s označenim pozicijama prikazuje Slika 33 te Slika 34.



Slika 33 Polyglas® trake i svornjaci



Slika 34. Prečke

Pozicije koje čine sustave pojedinih steznih rješenja prikazuje Tablica 3. Boje oznaka pozicija koje pripadaju pojedinim steznim rješenjima analogna su bojama oznaka pozicija koje prikazuje Slika 33 i Slika 34.

Tablica 3. Pozicije koje se koriste u steznim rješenjima

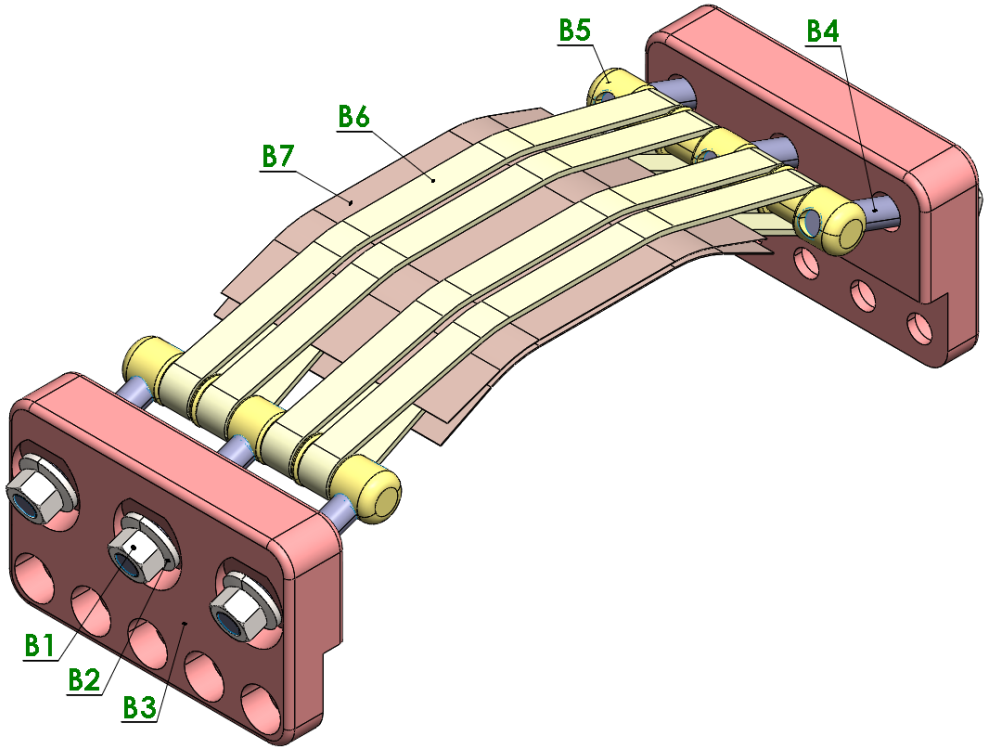
SVORNJACI (A)	**A1**	HGW kompozitni svornjak M24
	A2	Podložna pločica - izolacijska
	A3	Matica HGW 2372.4; DIN 40606
POLYGLAS® TRAKE (B)	**B1**	Matica A20 ISO 4032
	B2	Podloška A20 DIN 6796
	B3	Stezni oslonac
	B4	Navojne šipke M20
	B5	Osovine za napinjanje
	B6	Stezni elementi od Polyglas® traka
	B7	Podloga steznih elemenata
PREČKE (C)	**C1**	Vijak M20
	C2	Podloška A20 DIN 6796
	C3	Prečka u zavarenoj izvedbi

Stezanje svornjacima provodi se na način da se kroz prolazne rupe u steznicima i limovima provuče HGW kompozitni svornjak s navojem ili obična čelična navojna šipka (A1). Na svaki kraj se umetnu podložne pločice (A2) te se cijeli paket pritegne maticama (A3). Princip takvog stezanja je ekvivalentan stezanju klasičnog vijčanog spoja.

Stezanje prečkama izvodi se na donjem dijelu jarma. Prečke (C3) predstavljaju zavarene komade na čijim je stopama na krajevima urezan navoj. Na steznicima se izvode prolazne rupe te se s vanjske strane steznika umeće vijak koji prolazi kroz steznik do navoja na stopama prečki. Zračnosti između stopa prečki i steznika osiguravaju da pritezanjem vijka ne dolazi do njihova nalijeganja. Time se osigurava da se reakcijska sila između vijka i steznika prenosi drvenim umecima na limove jezgre te ih na taj način tlači.

2.2. Princip stezanja steznika Polyglas® trakom

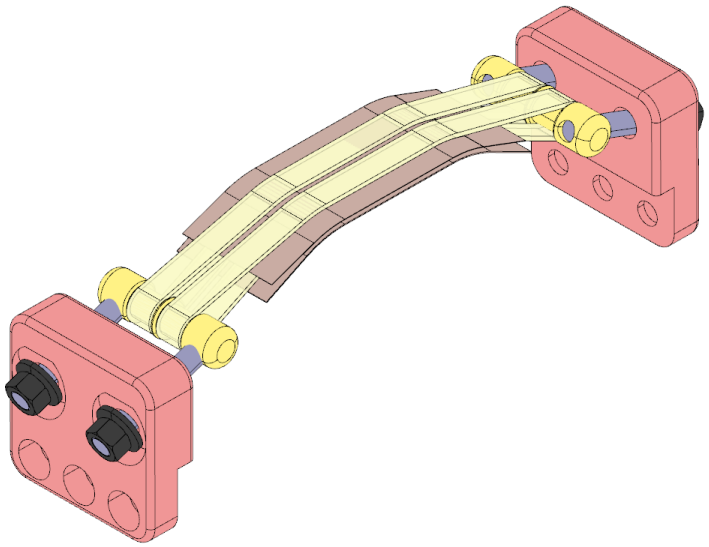
Primjenu steznih elemenata od Polyglas® traka u sklopu jezgre prikazuje Slika 35.



Slika 35. Princip stezanja Polyglas® trakama

Prikazano rješenje stezanja započinje izradom steznih elemenata (B6) od Polyglas® P 30 trake. Traka se izrađuje namatanjem na potrebnu dužinu koja se dobiva iz CAD modela. Nakon namatanja i polimerizacije stezni elementi se prebacuju preko osovina (B5). Osovine su valjkastog oblika, izrađene od čelika, s navojnim provrtima simetrično raspoređenim po duljini osovina. U te navojne provrte ručno se uvrću navojne šipke (B4). Stezni oslonac (B3) montiran je na vrh steznika te služi kao među-element za prijenos tlačne sile na steznik odnosno pakete limova. Na gornjem dijelu steznih oslonaca, pod kutom, izvode se prolazne rupe za navojne šipke. Navojne šipke se provlače kroz svaki od oslonaca te se pritežu maticama (B1). Kut pod kojim se nalaze navojne šipke je određen na način da simetrala navojnih šipki mora biti tangentna na konturu prvog pregiba trake. Na taj način se izbjegava savijanje tijela vijka. Moment pritezanja matica propisan je te služi za ostvarivanje željene sile u steznim elementima. Kao standardne varijacije steznog rješenja s Polyglas® trakama osim izvedbe koju prikazuje Slika 35., za transformatorske jezgre manjih dimenzija koristi se izvedba koju prikazuje Slika 36.

Kod izvedbe koju prikazuje Slika 35. svaka od tri matice priteže se momentom od 210 Nm, dok kod izvedbe korištene na manjim jezgrama koju prikazuje Slika 36. svaka od dvije matice priteže se s momentom 170 Nm.



Slika 36. Princip stezanja Polyglas® trakama kod manjih jezgri

Osnovnom se matematikom lako zaključuje da kod izvedbe s 4 trake odnosno 3 matice svaka od traka „nosi“ 157,4 Nm momenta, odnosno sile koju stezanje na taj moment uzrokuje. Izvedba s dvije trake i dvije matice pak rezultira momentom od 170 Nm po traci, te ekvivalentni iznos u sili, što posljedično čini taj stezni element napregnutijim. Intuitivno je dakle da se prilikom izrade samog steznog elementa mora voditi računa o tome u koju će se izvedbu ugrađivati, odnosno potrebna nosivost jednog elementa funkcija je varijante stezanja.

2.3. Von Roll Polyglas® trake

Polyglas® komercijalni je naziv za proizvod Švicarske grupacije Von Roll. Sam trgovački naziv Polyglas® objedinjuje četiri podvrste proizvoda [35]:

- Polyglas® H200,
- Polyglas® H220,
- Polyglas® K200,
- Polyglas® P30.

Sve gore navedene vrste proizvoda su zapravo trake te se isporučuju namotane oko šupljeg cilindra u sredini, poput selotejpa. Prema strukturi proizvoda radi se o staklenim vlaknima,

kontinuirano jednosmjerno uzdužno orijentiranim u obliku trake te tvornički impregniranih u napola polimeriziranoj smoli. [34]

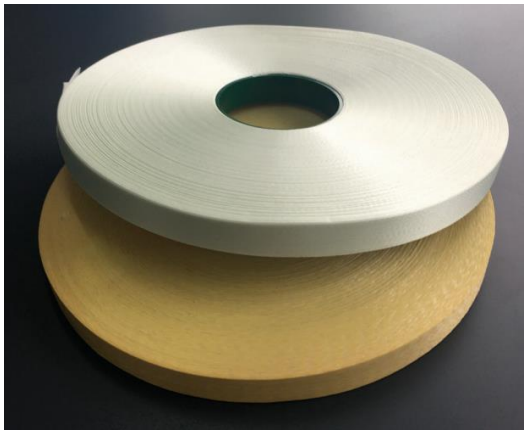
Područje primjene traka je [35]

- bandažiranje namota i izvoda električnih strojeva,
- vezanje stupova i namota kako suhih tako i transformatora u ulju,
- vezanje i pozicioniranje statorskih namota,
- općenito gledano, osiguravanje i vezanje raznih strojnih elemenata.

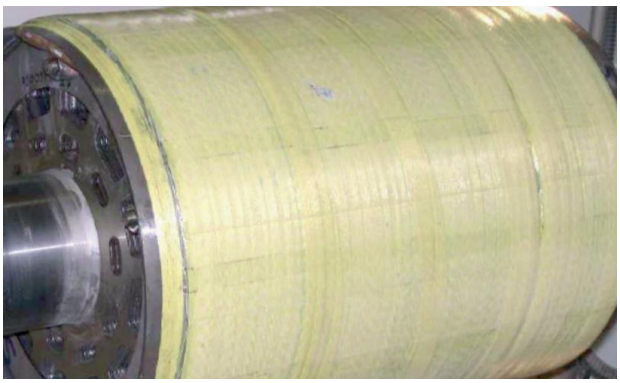
U usporedbi s alternativnim rješenjem korištenja metalnih traka odnosno limova, prednosti Polyglas®-a su [35]

- otpornost na zamor odnosno sposobnost dugotrajnog očuvanja mehaničkih svojstava,
- električni izolator – smanjenje vrtložnih struja te mogućnosti proboja struje,
- otpornost na vlagu i kemikalije te korozijska postojanost,
- niska specifična težina,
- niža cijena u usporedbi s metalnim rješenjima.

Za korištenje u energetskim transformatorima proizvođač preporuča Polyglas® P30 te se ta inačica i koristi u Končar Energetskim-Transformatorima. Navedena inačica trake za vezivo koristi termosenzibilnu poliesteramidnu smolu. Temperaturno područje primjene je do 155 °C. Samu traku u svojem sirovom stanju prikazuje Slika 37., Slika 38. prikazuje primjenu trake kod bandažiranja rotora generatora, dok svojstva koja propisuje proizvođač daje Tablica 4 [36].



Slika 37. Polyglas® traka u sirovom stanju [35]



Slika 38. Polyglas® traka iskorištena kao bandaža rotora generatora [35]

Tablica 4. Svojstva Polyglas® P30 trake

SVOJSTVA	ISPITNA NORMA	MJERNA JEDINICA	IZNOS
ISPORUČENO STANJE			
Debljina	IEC 60371-2	mm	0.30 ± 0.03
Masa	IEC 60371-2	g/m^2	550 ± 50
Hlapljivi udio	IEC 60371-2[1]	%	1.25 ± 0.75
Udio smole	IEC 60371-2	%	26 ± 2
Vlačna čvrstoća	IEC 60394-2	N/cm	≥ 2500
UGRADBENO STANJE			
Termalni razred	IEC 60085	°C	155
Debljina nakon polimerizacije		mm	0.28 ± 0.03
Vlačna čvrstoća jednog sloja (20°C)	Gl 09.01b	N/cm	≥ 2500
Vlačna čvrstoća jednog sloja (155°C)	Gl 09.01b	N/cm	≥ 1800

Dimenzije traka

- standardne širine traka su 6.5, 10, 20, 25, 30, 38, 50 mm (KPT koristi 25 mm širinu),
- 100 ili 200 metara dužine namotana na cilindar promjer 82mm.

Rok upotrebe te uvjeti skladištenja

- čuvati u hlađenoj atmosferi, u originalnom pakiranju sve do trenutka korištenja,
- rok trajanja:
    - 18 mjeseci kod temperature skladištenja od maksimalno 10 °C,
    - 6 mjeseci kod temperature skladištenja od maksimalno 20 °C.

[1] Za 5 min/150 °C

Prilikom postupka namatanja trake odnosno korištenja trake, proizvođač propisuje uvjete koji moraju biti zadovoljeni kako bi konačni proizvod imao očekivana mehanička svojstva nakon polimerizacije

- u procesu namatanja traka mora biti ugrijana na temperaturu od 80 °C do 100 °C,
- uređaj korišten za namatanje traka mora osigurati napetost trake u iznosu od 800 N/cm do 1000 N/cm (širine trake),
- brzina namatanja trake mora iznositi približno 10 m/min.

Postupak polimerizacije trake služi kako bi se otopila vezivna smola što osigurava kompaktnost trake odnosno jednoliku raspodjelu opterećenja u svim vlaknima koji čine traku. Sam proces polimerizacije, odvija se na povišenoj temperaturi, najčešće u pećnici. Potrebno vrijeme provedeno na povišenoj temperaturi ovisi o samoj temperaturi pećnice te ga prikazuje prema Von Roll-ovom uputstvu Tablica 5.

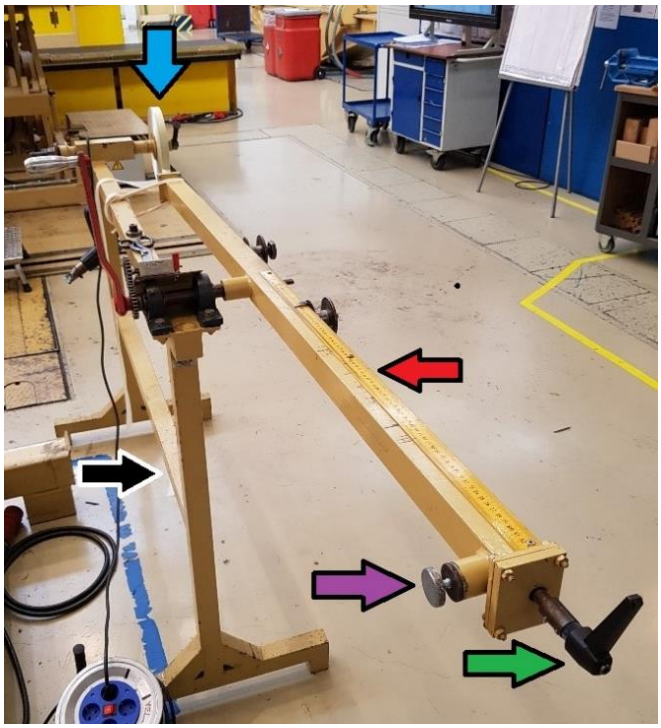
Tablica 5. Vrijeme potrebno za polimerizaciju Polyglas® P30 trake [36]

Temperatura (°C)	Minimalno potrebno vrijeme polimerizacije (h)
160	2.5
150	3
135	5
120	14

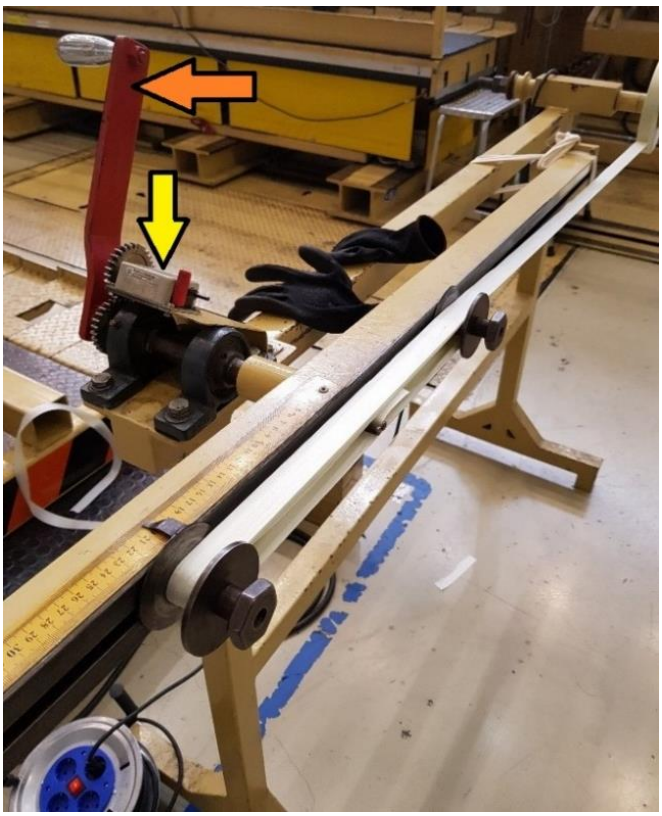
2.4. Postupak izrade steznog elementa od Von Roll Polyglas® trake

Stezni elementi od Polyglas® traka koji se koriste za pritezanje steznika, na načine na koje je prikazano u poglavlju 2.2, proizvode se namatanjem sirove trake te njenom polimeriziranjem. Navedeni postupak izvodi se u proizvodnom pogonu Končar – Energetskih transformatora. Za potrebe izrade steznih elemenata konstruirana je posebna naprava odnosno namatalica koju prikazuje Slika 39. Namatalica se sastoji od zavarenog postolja (označenog crnom strelicom), rotirajuće letve s trnovima za namatanje te metra za određivanje njihova razmaka (označeno crvenom strelicom), vretena za podešavanje razmaka trnova (označeno zelenom strelicom) te kočnice položaja trnova (označeno ljubičastom strelicom). Na samom zavarenom postolju

nalazi se i prihvat za role Polyglas® trake označen plavom strelicom. Slika 40. prikazuje detalj namatalice na kojem je narančastom strelicom označena ručka za rotiranje letve s trnovima.



Slika 39. Naprava za namatanje steznih elemenata



Slika 40. Detalj naprave za namatanje steznih elemenata

Sama letva je dakle čvrsto vezana za ručku te skupa s njome rotira. Os rotacije letve nalazi se na polovini letve, na taj način polovište razmaka trnova uvijek leži na osi rotacije. Na sam uređaj za namatanje trake ugrađen je i mehanički brojač označen strelicom žute boje. Na njemu je prikazano koliko je punih krugova letva napravila u procesu namatanja što odgovara broju slojeva trake (Slika 41). Sama polimerizacija trake odvija se na način da se industrijskim fenom zagrijava traka te se istovremeno sa škarama pritišće odnosno „pegla“. Takav postupak proizvodnje u suprotnosti je s postupkom danim u poglavlju 2.3. kojeg propisuje proizvođač. Za potrebe provođenja eksperimenta opisanog u poglavlju 3.3. namotano je 25 uzoraka odnosno po 5 uzoraka raspoređenih u 5 različitih grupa. Jednu takvu grupu s njenih 5 uzoraka prikazuje Slika 42.

Slika 41. Namotana i polimerizirana traka spremna za skidanje s namatalice

Slika 42. Namotani i označeni uzorci traka

3. EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE STEZNOG ELEMENTA

Kako je i ranije navedeno, cilj eksperimenta je odrediti faktore koji utječu na nosivost steznih elemenata od Polyglas® traka, utvrditi najutjecajnije te odrediti njihov utjecaj. Takvi stezni elementi već se koriste u proizvodima tvornice Končar – Energetski transformatori no njihova svojstva nikada nisu bila ispitivana. Praksa je da se namotava 14 namotaja za svaki stezni element neovisno o veličini jezgre, količini steznih elemenata ili bilo kojem drugom parametru. Prema informacijama dobivenim od odjela Proizvodnje, do sada se nikada nije dogodilo lom steznih elemenata. Razumno je u tom slučaju za pretpostaviti da su sami stezni elementi predimenzionirani u odnosu na opterećenja koja preuzimaju. Naravno, ukoliko bi svojstva steznih elemenata bila poznata odnosno ukoliko bi se njihovo ponašanje u ovisnosti o utjecajnim faktorima moglo opisati na kvantitativnoj razini, to bi omogućilo dimenzioniranje samih steznih elemenata odnosno uštede kako materijala tako i troškova proizvodnje.

Rješenje navedenog problema, kao i većine drugih strojarskih problema može biti analitičko, numeričko te eksperimentalno. Uzevši u obzir manjak iskustva s Polyglas® trakama kao kompozitnim materijalom od kojeg je napravljen stezni element, nepostojanja bilokakvog analitičkog ili numeričkog modela za proračun navedenih steznih elemenata, razumno je za zaključiti kako bi validacija i verifikacija modela bila nemoguća. Naravno, analitički ili numerički model bez čvrste validacije i verifikacije nisu adekvatni za korištenje u praksi. Sukladno tome, kao metoda kojom će se pokušati opisati svojstva steznih elemenata izabrana je eksperimentalna metoda te je to već i definirano u samoj temi diplomskog rada.

3.1. Cilj eksperimenta

Prema ranije opisanoj problematici, postavljeni ciljevi eksperimenta su

- analizirati način ugradnje steznih elemenata u sklop jezgre transformatora te sukladno postojećem načinu ugradnje osmisliti takav eksperimentalni postav da se rezultati mogu uz što manje poteškoća primijeniti na stvarni ugradbeni slučaju u transformatorskoj jezgri,
- odrediti utjecajne varijable na čvrstoću odnosno nosivost steznih elemenata,
- odrediti potreban broj uzoraka te grupa uzoraka uzimajući u obzir utjecajne varijable, potencijalne statističke pogreške, ograničenja eksperimentalnog postava te ostale ciljeve i ograničenja,
- kvalitativno odrediti mehanizam pucanja traka za odabrani eksperimentalni postav,

- kvantitativno odrediti mehanička svojstva steznih elemenata,
- prikazati rezultate eksperimenta u kontekstu ugradbenog slučaja steznih elemenata.

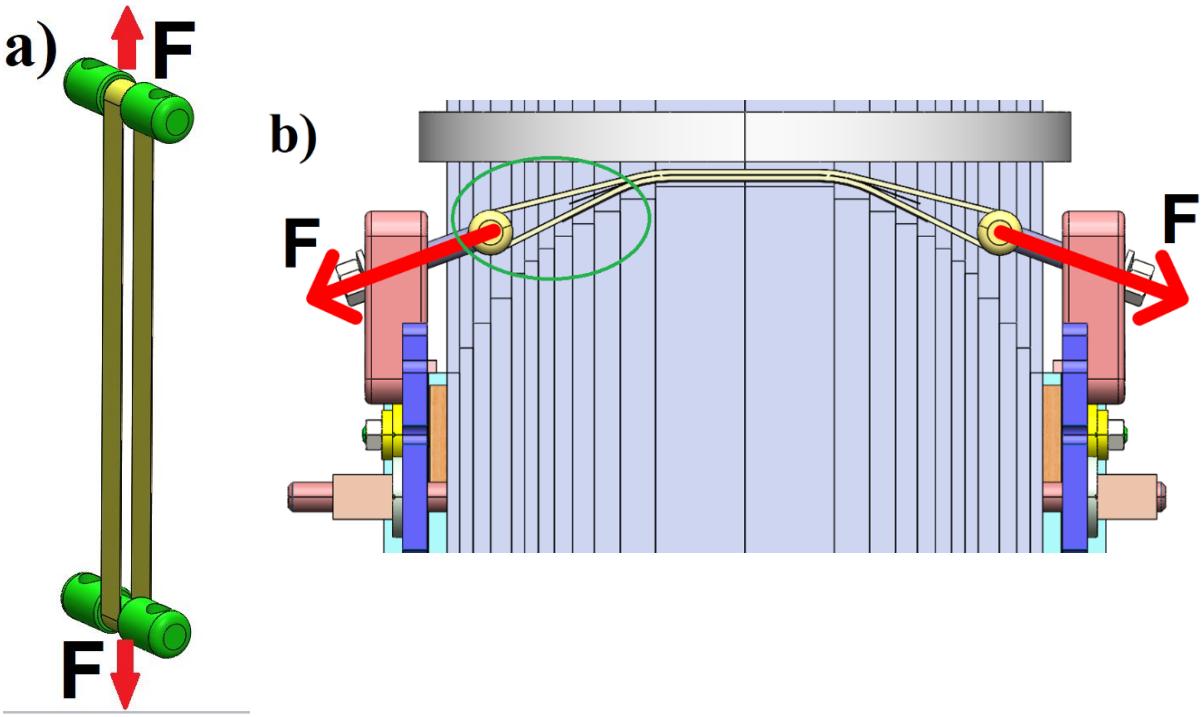
3.2. Eksperimentalni postav

Prilikom razrade odnosno osmišljavanja eksperimentalnog postava poželjno je da on bude što sličniji stvarnom ugradbenom slučaju kako bi ga vjernije opisivao. Za potrebe provedbe ispitivanja s ciljem razvoja novih odnosno poboljšanja postojećih konstrukcijskih rješenja, u Končar – Energetskim transformatorima izrađena je tzv. testna jezgra koja je i ranije spomenuta te koju prikazuje Slika 32. Idealnim eksperimentalnim postavom odmah se nameće sama testna jezgra odnosno provedba samog ispitivanja u sklopu na testnoj jezgri. Kada bi se ispitivanje provodilo izravno na testnoj jezgri, eksperimentalni postav bi tada uključivao jezgru transformatora te bi se rezultati mogli direktno primijeniti na ugradbeni slučaj komercijalnih transformatora. Takav bi postav najvjernije opisivao ugradbeni slučaj što bi svakako svelo broj uvedenih pretpostavki na minimum, a postojala bi i mogućnost da se naknadno teorijom sličnosti rezultati skaliraju i primjene na cijelom skupu geometrijski sličnih jezgri.

Takav eksperimentalni postav odbačen je zbog niza poteškoća. Klasični problem koji bi se javio je problem preciznog te mjerljivog unošenja opterećenja odnosno sile. Unošenje sile momentom pritezanja vijaka je nepouzdano zbog nepoznavanja faktora trenja, hidraulički napinjači vijaka nisu primjenjivi ni dostupni i tome slični problemi vezano uz opterećivanje. Čak uz pretpostavku da je unošenje sile moment ključem pritezanjem vijaka dovoljno precizno, javlja se dodatan problem. Eksperimentom je bilo predviđeno i snimanje optičkim mjernim sustavom Aramis koji daje podatke o deformaciji trake. To bi značilo da bi Aramis bilo potrebno prevesti do Končar – Energetskih transformatora gdje se testna jezgra i nalazi. Osim što sam prijenos Aramisa nije lagan, upitno je i njegovo funkcioniranje u toj okolini budući da zahtjeva određene svjetlosne uvjete, kalibraciju te potreban kut snimanja. Drugo rješenje bilo bi prenošenje testne jezgre na fakultet. To je također zahtjevno. Naime, testna jezgra ima masu od 4110 kg te su joj gabaritne dimenzije 1850x1300x550 mm. Takvu masu i te dimenzije iz logističkih razloga teško je uvesti u prostorije fakulteta u jednom komadu. Rastavljanje jezgre i njeno unošenje u dijelovima predstavlja dodatni problem. Samo rastavljanje jezgre je posao za više ljudi koji je vremenski višednevan te bi radnici u tvornici gubili previše vremena na nekomercijalni projekt. Naravno, problem je i sastavljanje jezgre na fakultetu budući da pojedine pozicije imaju masu oko 200 kg. Sljedeći izbor eksperimentalnog postava je postav na statičkoj kidalici. Osnovna je prednost korištenja kidalice što je opterećivanje kontrolirano,

a mjerenje unesene sile te rezultirajućeg pomaka veoma precizno. Na taj način mjerna nesigurnost je svedena na minimum. Za razliku od mjerne nesigurnosti, konačnu geometriju trake odnosno njeno ugradbeno zakrivljenje prilikom ugradnje u jezgru, koje prikazuje Slika 35. je teško postići na kidalici. Dodatno, osim samog zakrivljenja, na kidalici je nemoguće postići da sila djeluje tangencijalno na konturu trake kao što se to ostvaruje vijcima prilikom ugradnje. Razlog tome je taj što kidalica ima mogućnost opterećivanja samo u vertikalnoj osi, odnosno kut opterećivanja se ne može mijenjati, što bi naravno bilo neophodno za postizanje identičnog (tangencijalnog) načina opterećenja trake.

Ipak, čak i uz nemogućnost simuliranja zakrivljenja trake te njemu svojstvenog tangencijalnog načina opterećenja , može se pokazati da bi ispitivanje na kidalici trebalo davati ekvivalentne rezultate kao i ispitivanje u sklopu jezgre. Slika 43a. prikazuje geometriju i opterećenje trake prilikom njenog ispitivanja na kidalici dok Slika 43b. prikazuje traku u sklopu te njeno opterećenje.



Slika 43. Opterećenje trake: a) tijekom ispitivanja na kidalici i b) u transformatoru nakon ugradnje

Na istoj slici zelenom elipsom označen je dio trake odnosno geometrije koju ona zauzima. Za taj dio geometrije može se tvrditi da je ekvivalentno opterećen te da posjeduje ekvivalentna mehanička svojstva u odnosu na isti dio trake u postavu na kidalici (Slika 43a).

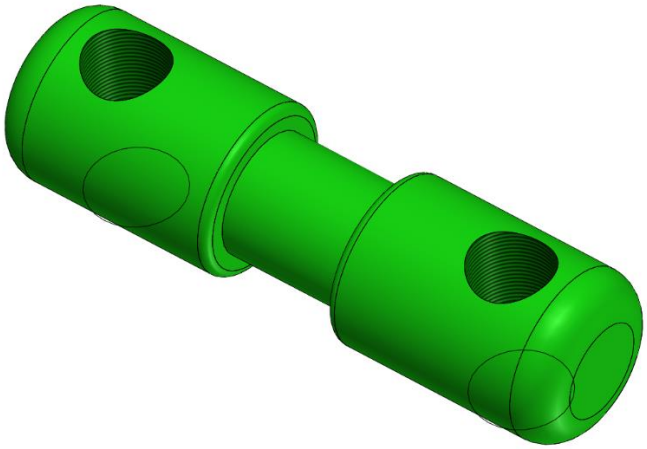
Naravno, ta tvrdnja sadrži sljedeće pretpostavke i pojednostavljenja

- osovine preko kojih se vrši napinjanje trake identične su u oba postava,
- kut spajanja dvije strane trake na mjestu gdje one prelaze jaram na Slici 43b. dovoljno je malen da se može zanemariti,
- dio na kojemu dvije strane trake prelaze jaram, tlak kojim gornja tlači donju, trenje koje se na tome mjestu razvija između dviju traka, trenje između donje trake i drvenih pregiba limova jarma kao i gubitak sile u traci na tom dijelu ni na koji način ne utječu na opterećenost ili mehanička svojstva u zeleno zaokruženom dijelu trake,
- mehanizam (kvalitativno) gubitka integriteta trake u oba slučaja je jednak.

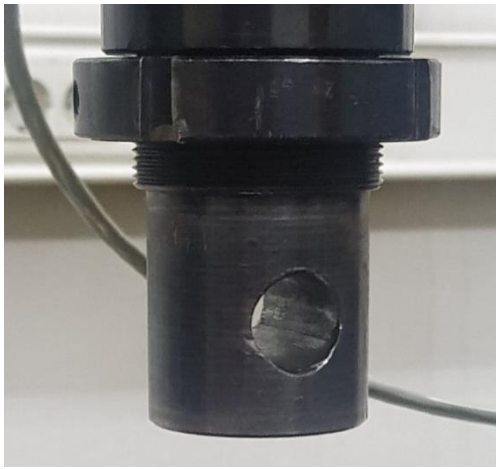
Inženjerskim razmatranjem može se zaključiti kako su navedene pretpostavke i pojednostavljenja prihvatljivi te se može tvrditi da bi ispitivanje na kidalici trebalo dati rezultate primjenjive na stvarnoj konstrukciji. Izneseno razmatranje rezultira izborom eksperimentalnog postava na kidalici u skladu sa Slikom 43a.

3.2.1. Prihvat uzoraka na kidalici

U poglavlju 3.1. usvojena je pretpostavka da bi osovine koje su u kontaktu s trakom odnosno preko kojih se traka opterećuje morale biti identične kako u slučaju ugradnje u jezgru tako i u eksperimentalnom postavu. Najjednostavnije je u tom slučaju koristiti osovine koje se koriste i na stvarnoj jezgri prilikom ugradnje traka. Takva osovina standardni je konstrukcijski element u Končar – Energetskim transformatorima te je prikazana na crtežu broj B100111100 dok njen CAD model prikazuje Slika 44. Sama osovina prihvaća se na druge dijelove konstrukcije preko dvije navojne rupe M20. Na samoj kidalici u Laboratoriju za eksperimentalnu mehaniku prihvat za čeljusti prikazuje Slika 45.



Slika 44. Osovina za napinjanje traka



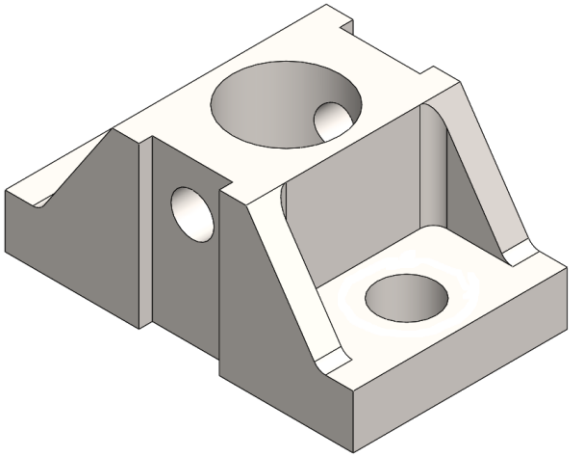
Slika 45. Prihvat na kidalici

Između ta dva prikazana dijela nužno je osmisliti međudio odnosno prihvat koji mora ispuniti sljedeće zahtjeve

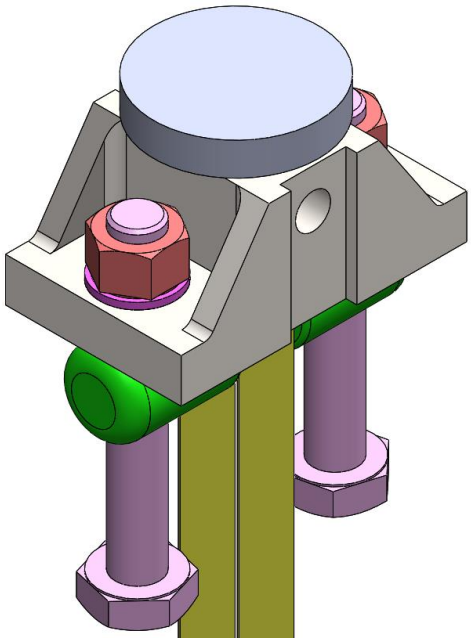
- odgovarajuća čvrstoća koja osigurava mogućnost prijenosa najveće sile koju kidalica može ostvariti (50 kN),
- laka, brza i jednostavna izmjena ispitnih uzorka,
- jednostavna montaža i demontaža s kidalice,
- niska cijena proizvodnje (obrada odvajanjem čestica, niske tolerancije, na široko zastupljen materijal…).

Prema navedenim zahtjevima osmišljen je prihvat prikazan na crtežu broj D-001 dok njegov CAD model prikazuje Slika 46. Prihvat je izrađen od općeg konstrukcijskog čelika S235JR te je tehnološki jednostavan za izradu. Vršna ekvivalentna naprezanja pri najvećem opterećenju kidalice od 50 kN iznose 174 MPa. Sam prihvat na kidalicu se spaja zatikom. Na prihvatu su izvedene i dvije prolazne rupe za M20 navoj na razmaku koji odgovara razmaku na osovini kojom se vrši napinjanje traka. Slika 47. prikazuje sklop eksperimentalnog postava skupa s trakom. Zamišljena upotreba je na način da se vijci uvrnu u navojne rupe na osovini, prođu kroz prolazne rupe na prihvatu te se osiguraju maticama s gornje strane prihvata. Vijci su namjerno na oko predugi kako bi ih se moglo lagano primiti te ručno uvrtati. Kada su matice pritegnute, osovine se upiru o donju plohu prihvata što osigurava okomitost osi osovine na os opterećivanja kidalice a time i jednoliko opterećivanje trake po širini. Za samu izmjenu ispitnih uzoraka dovoljno je odvrnuti jedan od vijaka te zakrenuti osovine za 90° oko drugog vijka. Time se kraj osovine pomiče bočno te se omogućava izmjena ispitnog uzorka. Crtež broj S-001 prikazuje

sklopni crtež eksperimentalnog postava na kidalici. Naravno, kako na pomičnom dijelu kidalice, sklop kojeg prikazuje Slika 47. nalazi se i na drugom kraju rastegnute trake prihvaćen za postolje odnosno stol kidalice.



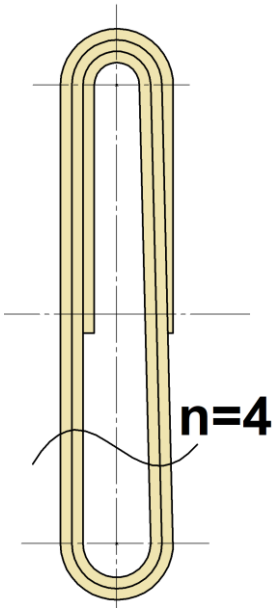
Slika 46. Prihvat na priključak kidalice



Slika 47. Sklop eksperimentalnog postava kidalice

3.3. Provedba eksperimenta

Prilikom planiranja eksperimenta odnosno prije izrade uzorka nužno je odrediti koje varijable najviše utječu na rezultat ispitivanja. Slika 48. prikazuje poprečni presjek steznog elementa s vidljivim krajevima trake. Parametre koji utječu na nosivost trake mogli bi podijeliti na konstrukcijske i tehnološke. Konstrukcijski bi svakako bili broj slojeva trake, mjesto krajeva trake u odnosu na osovine te sami promjer osovina. Kao tehnološke parametre mogu se navesti temperatura na kojoj se vrši polimerizacija, pritisak na trake tijekom polimerizacije, vrijeme trajanja polimerizacije i slično. Naprava, kao i postupak kojim se trake namataju opisana je u poglavlju 2.4. Taj proces u potpunosti izvodi ručno sam operater te je lako zaključiti da takav proces proizvodnje ne može rezultirati nužnim uvjetima koje propisuje proizvođač iz poglavlja 2.3.



Slika 48. Namotani stezni element

Ipak, promatranjem samih steznih elemenata varijabla koja se intuitivno nameće kao najzanimljivija za ispitati je svakako broj slojeva trake te će to ujedno biti jedina varijabla koja će se ispitivati. Sad kada je izabrana varijabla od interesa, poželjno je osigurati da se svi ostali utjecajni parametri što manje mijenjaju od uzorka do uzorka. Budući da će svaki uzorak namatati isti operater, može se pretpostaviti da to svodi varijacije u tehnološkim parametrima na minimum. Što se pak konstrukcijskih parametara tiče, promjer odnosno sama osovina za napinjanje je identična za sve uzorke a krajevi trake na svim će se uzorcima polimerizirati u položaju kojeg prikazuje Slika 48. Duljina svih uzoraka identična je te iznosi 40 cm od središta jedne osovine do druge.

Prilikom namatanja steznih elemenata za ispitivanje, s ciljem kontrole rasipanja odnosno valjanosti rezultata određeno je da će se ispitati po 5 uzoraka od svake grupe. Grupe će se međusobno razlikovati po jedinom parametru čiji se utjecaj ispituje a to je broj slojeva trake. Prema Slici 48. vidljivo je da polovici steznog elementa odgovara 'n' slojeva dok drugoj polovici odgovara 'n+2' sloja. Prilikom govora o broju slojeva pojedine grupe uvijek će se referirati na presjek s manjim brojem slojeva, budući da je taj kritičniji te se na njemu očekuje pucanje.

Uvažavajući izneseno, osmišljen je sustav označavanja uzorka prema sljedećoj šabloni

$$redni\ br.eksperimenta\ (grupa\ slojeva - redni\ broj\ uzorka\ u\ grupi)$$

pa sukladno tome npr. za eksperiment odnosno uzorak s oznakom 13 (6-3) slijedi:

- 13 → redni broj provedenog eksperimenta odnosno ispitanog uzorka (kronološki),
- 6 → ispitani uzorak pripada grupi uzoraka sa 6 slojeva na dijelu trake prema Slici 48,
- 3 → redni broj uzorka u grupi.

Namotane te sortirane uzorke spremne za ispitivanje prikazuje Slika 49.

Slika 49. Uzorci steznih elemenata prije ispitivanja

Osim samih podataka o sili i pomaku s kidalice dodatno se većina uzoraka kao što je i ranije spomenuto snimala i optičkim mjernim sustavom Aramis. Njime je dobiveno polje deformacija na segmentu trake. Detaljniji pregled uzoraka daje Tablica 6. Ispitivanje svih uzorka na kidalici provedeno je s brzinom opterećivanja od 5 mm/min.

Tablica 6. Ispitni uzorci

Grupa uzoraka	Oznaka uzorka	Kidalica	Aramis	Napomena
2	2 (2-1)	✓	✓	
	3 (2-2)	✓	✓	
	4 (2-3)	✓	✓	
	5 (2-4)	✓	✓	
	6 (2-5)	✓	✓	
4	1 proba OK KPT	✓		Izradio drugi operater
	7 (4-1)	✓	✓	
	8 (4-2)	✓	✓	
	9 (4-3)	✓	✓	
	10 (4-4)	✓	✓	
	11 (4-5)	✓	✓	
	17 (4-6) OK KPT	✓	✓	Izradio drugi operater
6	12 (6-1)	✓	✓	
	13 (6-2)	✓	✓	
	14 (6-3)	✓	✓	
	15 (6-4)	✓	✓	
	16 (6-5)	✓	✓	
8	19 (8-1)	✓	✓	
	20 (8-2)	✓	✓	
	21 (8-3)	✓	✓	
	22 (8-4)	✓	✓	
	23 (8-5)	✓	✓	
10	18 (10-1)	✓	✓	
	24 (10-2)	✓	✓	
	25 (10-3)	✓	✓	
	26 (10-4)	✓	✓	
	27 (10-5)	✓	✓	

Kako prikazuje Tablica 6. vidljivo je da su odabrane grupe sa 2, 4, 6, 8 i 10 slojeva trake. Gornja granica od 10 slojeva odabrana je iz uvjeta najveće ispitne sile kidalice. Naime, kako je navedeno u poglavlju 2.3., prema proizvođačevoj specifikaciji garantirana sila po centimetru širine trake kod koje još ne dolazi do pucanja trake iznosi $F_{max} = 2500\ N/cm$. Iz toga slijedi da je nosivost 10 slojeva trake:

$$F_{10,max} = d \cdot n \cdot F_{max} = 2.5 \cdot 10 \cdot 2500 = 62500\ \text{N} = 62{,}5\ \text{kN}$$

gdje je

d – širina trake, 25 mm.

Za grupu od 8 slojeva proračunska nosivost iznosi 50 kN što točno odgovara najvećem mogućem opterećenju kidalice. Grupa sa 10 slojeva predstavlja prvi idući inkrementalni porast broja slojeva koji je po proračunskoj nosivosti iznad mogućnosti kidalice. To je učinjeno da se raspolaže dodatnom grupom uzoraka u slučaju da trake pucaju pri manjem opterećenju od proračunskog. Slika 50. prikazuje osovine za napinjanje u položaj za izmjenu uzorka. Slika 51. prikazuje uzorak pozicioniran za provedbu eksperimenta. Na uzorku je vidljiv raster točaka nanesen crnim sprejom koji služi mjernom sustavu Aramis za određivanje polja pomaka i deformacija na površini uzorka. Slika 52. prikazuje uzorak tijekom ispitivanja.

Slika 50. Prihvati u položaju za izmjenu uzorka

Slika 51. Uzorak pozicioniran na kidalici

Slika 52. Popuštanje uzorka tijekom ispitivanja

3.4. Optički mjerni sustav Aramis

Optički mjerni sustav Aramis (GOM GmbH, Njemačka) radi na principu korelacije digitalne slike (engl. *digital image correlation*). Korelacija digitalne slike beskontaktna je metoda koja omogućuje trodimenzionalno mapiranje i praćenje točaka na površini ispitnih uzoraka [37]. Praćenje točaka omogućava izračunavanje odnosno snimanje polja pomaka te samim time i polja deformacija. Razlučivost uređaja je velika što mu omogućava snimanje mikrometarskih pomaka. Prednost navedenog uređaja odnosno metode koju koristi je to što je beskontaktna i neovisna o materijalu što omogućava širok spektar primjene kako u analizi statičkih pojava tako i u dinamici [38]. Mjerni sustav podrazumijeva sam uređaj, kontroler te računalo s računalnim programom za prikupljanje, obradu i ispisivanje rezultata eksperimenata. Sam uređaj sastoji se od stativa, dvije kamere te dva svjetlosna izvora kao što je prikazano na Slici 53.

Slika 53. Mjerni sustav Aramis

Mjernim sustavom Aramis prilikom ispitivanja snimano je polje pomaka po površini ispitnih uzoraka u oba eksperimenta. Da bi to bilo moguće, prethodno je potrebno obraditi uzorke te kalibrirati mjerni sustav. Na uzorke se crnim sprejom pod tlakom nanosi stohastički uzorak točkica te se pušta da se sprej osuši. Sustav se prije samog eksperimenta kalibrira koristeći kalibracijsku ploču. U toku ispitivanja sustav prati nanesene točkice na površini uzorka te snima seriju uzastopnih slika. Temeljem uzastopnih slika određuju se pomaci svake točke te se iz tog polja pomaka izračunavaju deformacije. Osim samih pomaka, na svakoj slici bilježi se i vrijeme

kada je slikana u odnosu na početak snimanja. To omogućava povezivanje različitih interesnih parametara eksperimenta različitih mjernih uređaja na načelu vremenske istodobnosti. Primjerice, kod eksperimenta kidanja steznih elemenata na kidalici vremenski se sinkroniziraju očitanja sile i pomaka s kidalice te rezultirajuće deformacije dobivene mjernim sustavom Aramis. Takav cjelovit pristup eksperimentu omogućava dobivanje dubljeg uvida u ponašanje ispitnog uzorka što omogućuje precizniju kvantifikaciju fizikalnih pojava tokom provedbe eksperimenta.

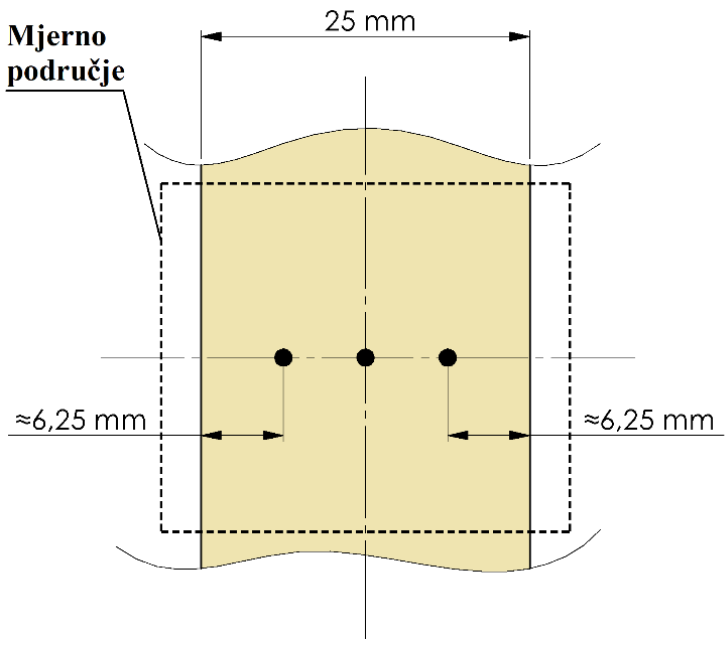
Same rezultate sustav sprema u obliku tekstualnih datoteka čiji je sadržaj moguće mijenjati u ovisnosti o cilju ispitivanja. Prilikom ispitivanja steznih elemenata u oba eksperimenta definirano je 6 točaka koje tvore tri dužine. Položaji tih 6 točaka praćeni su kroz sve snimljene slike za vrijeme trajanja eksperimenta te su u svakoj slici mjereni razmaci između parova točaka. Takav zapis rezultata korišten je u oba eksperimenta te je na primjeru jednog od ispitnih uzoraka dan na Slici 54.

```
# <defaultcodec>utf-8</defaultcodec>
Statistic export
Line 1: Y-length [mm] Line 2: Y-length [mm] Line 3: Y-length [mm] Time [s]
2.62216034e+01 2.63177867e+01 2.64086783e+01 0.00000000e+00
2.62210173e+01 2.63172847e+01 2.64095876e+01 9.40768000e-01
2.62217577e+01 2.63174250e+01 2.64091685e+01 1.95254800e+00
2.62210703e+01 2.63170467e+01 2.64090274e+01 2.96632700e+00
2.62223240e+01 2.63169807e+01 2.64096738e+01 3.97759000e+00
2.62215755e+01 2.63170159e+01 2.64081444e+01 4.98951000e+00
2.62201512e+01 2.63169240e+01 2.64017972e+01 6.00159500e+00
2.62205260e+01 2.63173195e+01 2.64087772e+01 7.00959800e+00
2.62202330e+01 2.63161457e+01 2.64029818e+01 8.02314000e+00
2.62216715e+01 2.63170430e+01 2.64035178e+01 2.49392120e+01
2.62204204e+01 2.63173593e+01 2.64092650e+01 2.59548760e+01
2.62255381e+01 2.63188884e+01 2.64048932e+01 2.67163980e+01
2.62299658e+01 2.63210376e+01 2.64094242e+01 2.77309560e+01
2.62329747e+01 2.63481687e+01 2.64133096e+01 2.89165370e+01
2.62368625e+01 2.63326723e+01 2.64184601e+01 2.99312980e+01
2.62407468e+01 2.63460615e+01 2.64215837e+01 3.09433690e+01
2.62461483e+01 2.63390216e+01 2.64264423e+01 3.19552560e+01
2.62508198e+01 2.63416672e+01 2.64327682e+01 3.29670340e+01
2.62570112e+01 2.63493232e+01 2.64347513e+01 3.39789420e+01
2.62616089e+01 2.63698827e+01 2.64408750e+01 3.49912180e+01
2.62679292e+01 2.63558810e+01 2.64425183e+01 3.59327880e+01
2.62708764e+01 2.63638107e+01 2.64476326e+01 3.69447060e+01
2.62771370e+01 2.63715691e+01 2.64523598e+01 3.79564860e+01
2.62816563e+01 2.63734345e+01 2.64563867e+01 3.89664480e+01
2.62843883e+01 2.63787202e+01 2.64598441e+01 3.99789830e+01
```

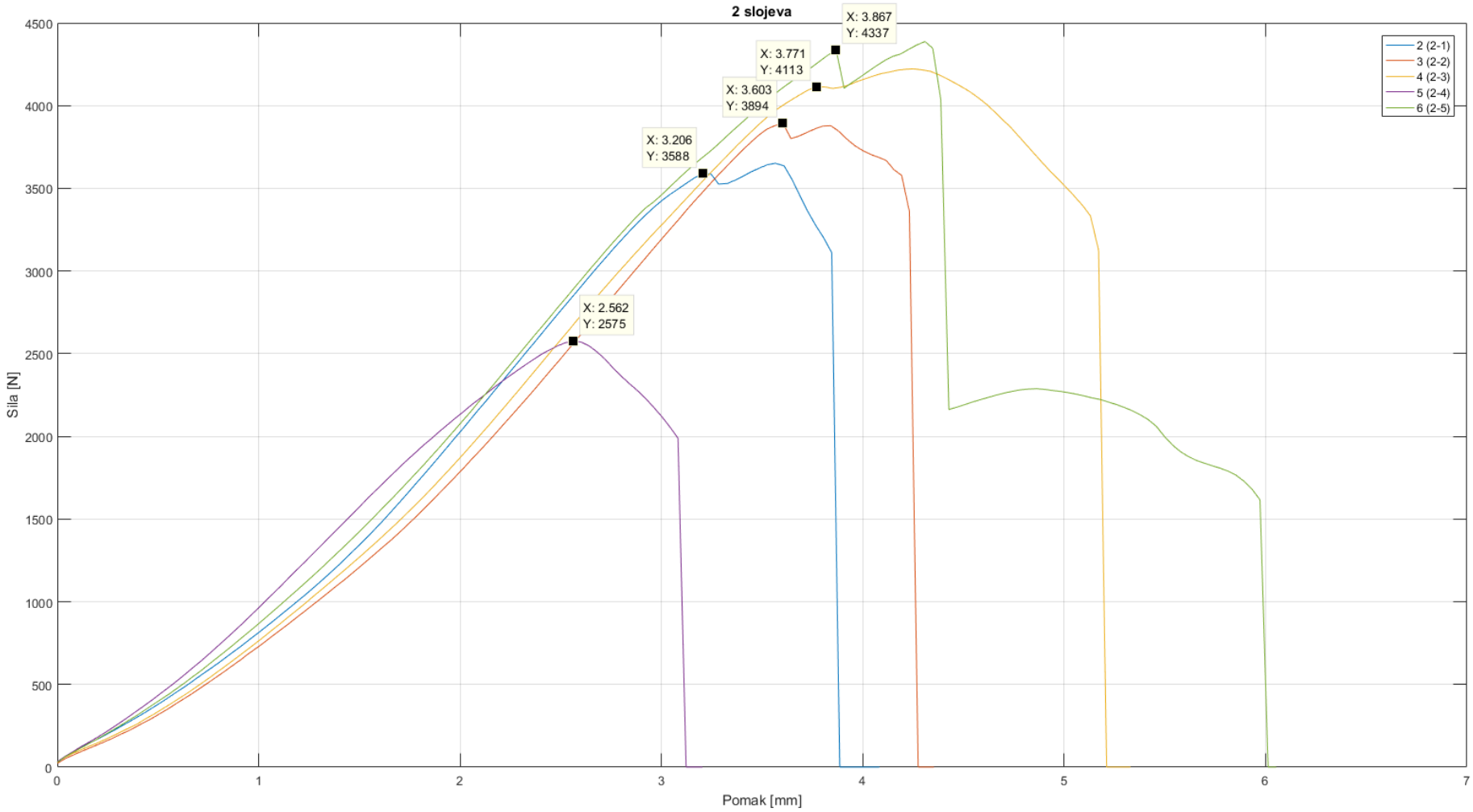
Slika 54. Neobrađeni prikaz rezultata snimanja mjernim sustavom Aramis

3.5. Rezultati eksperimentalnog ispitivanja

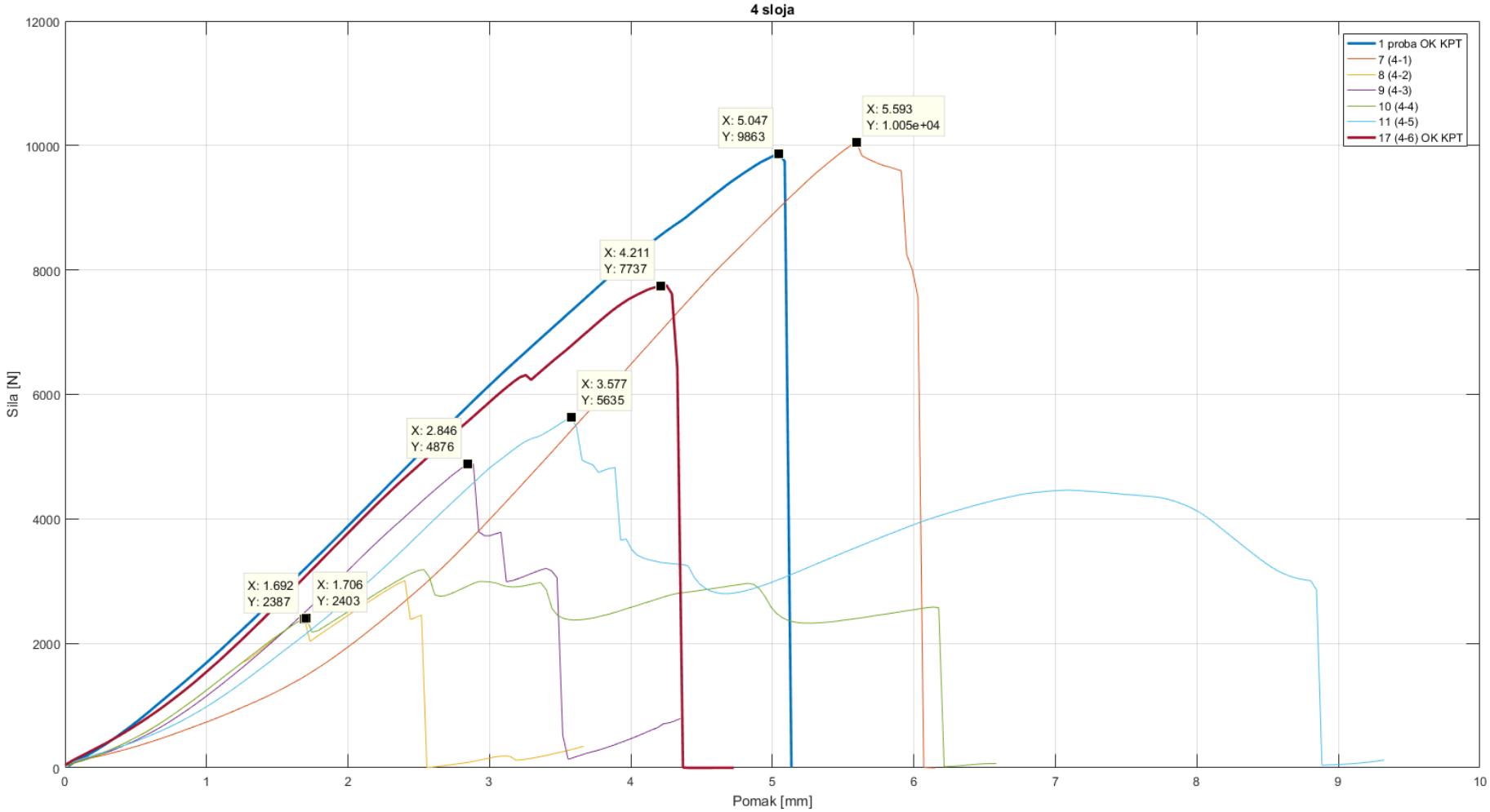
Kao što Tablica 6. prikazuje, velika većina uzoraka u toku ispitivanja praćena je mjerenjima sile i pomaka na kidalici te sustavom Aramis. Aramisom su u toku ispitivanja bilježeni pomaci vanjskog sloja na dijelu trake u sredini između osovina. Iz zabilježenog polja pomaka izračunavaju se deformacije na karakterističnim mjestima trake – blizu lijevog ruba, u sredini trake te blizu desnog ruba. Mjerno područje te karakteristične točke u kojima će se određivati deformacije ilustrira Slika 55. Koristeći informacije o deformacijama u te tri točke raspoređene po širini trake zapravo kvalitativno se dobiva raspodjela naprezanja po širini trake. Rezultati s kidalice prikazani su za svaku grupu uzoraka u istom sila-pomak dijagramu radi preglednosti te lakoće usporedbe uzoraka međusobno. Na grafu svakog uzorka označena je točka koja označava gubitak integriteta traka. Svaku točku prati i vrijednost na x osi – pomak te vrijednost na y osi – sila. Rezultate dobivene s kidalice prikazani su od Slike 56 do Slike 60.



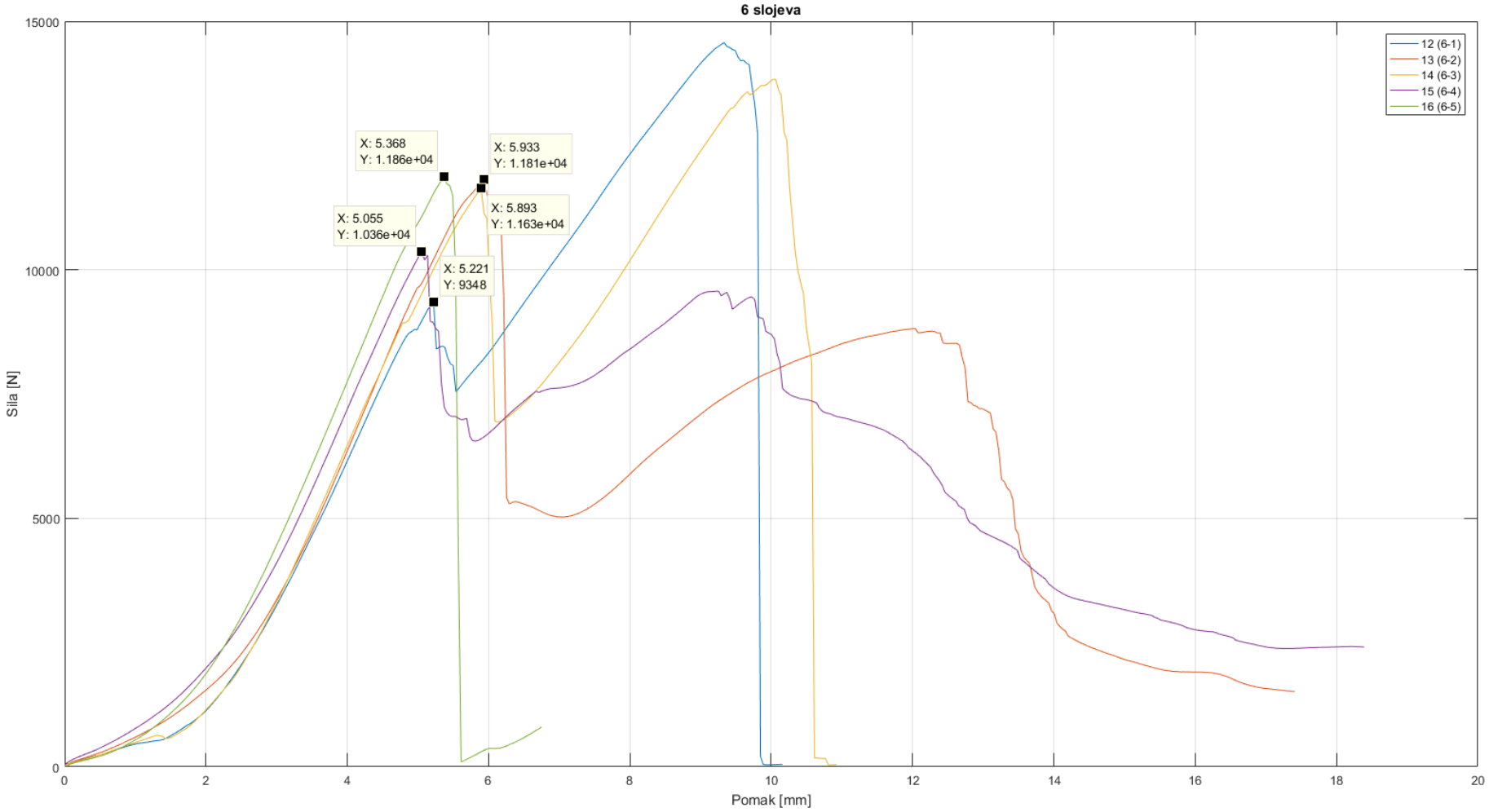
Slika 55. Mjerno područje sustava Aramis s odabranim karakterističnim točkama



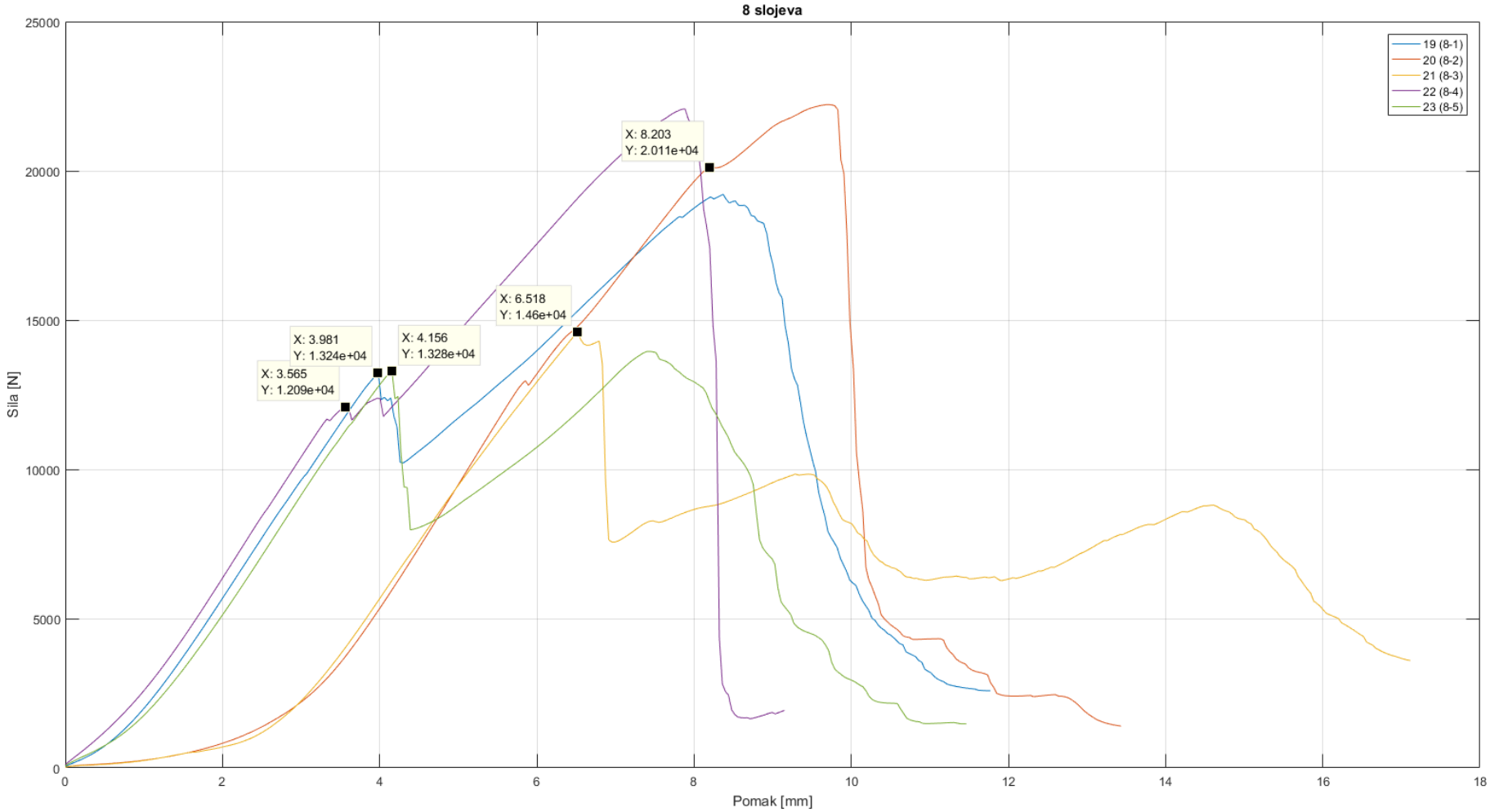
Slika 56. Rezultati kidalice za ispitnu grupu s 2 sloja



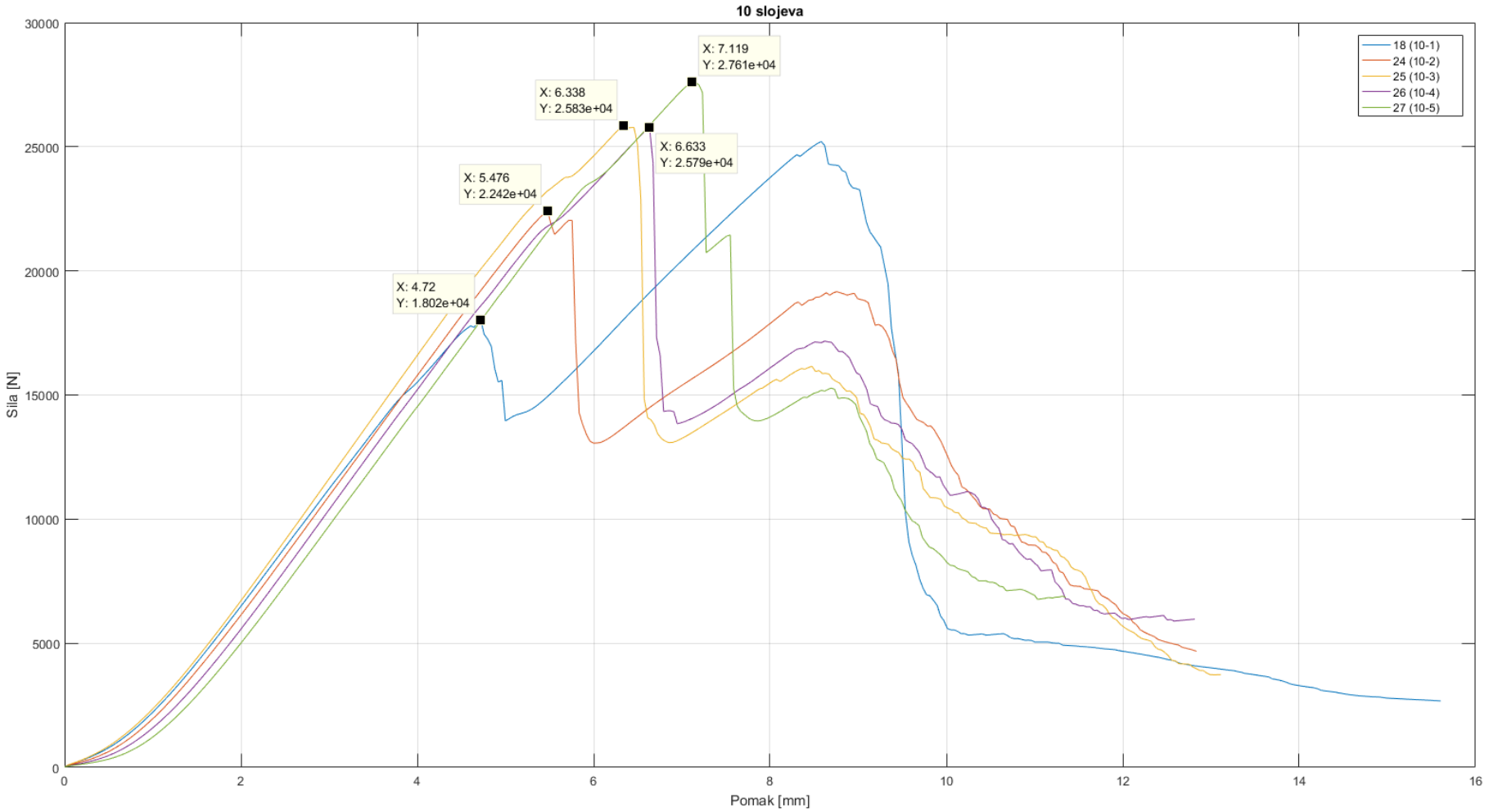
Slika 57. Rezultati kidalice za testnu grupu s 4 sloja



Slika 58. Rezultati kidalice za ispitnu grupu sa 6 slojeva



Slika 59. Rezultati kidalice za ispitnu grupu sa 8 slojeva



Slika 60. Rezultati kidalice za ispitnu grupu sa 10 slojeva

Točke koje su označene na grafovima odnosno u kojima je došlo do gubitka integriteta traka prikazuje i Tablica 7. Trake u takvom stanju više ne mogu obavljati svoju funkciju.

Tablica 7. Rezultati eksperimenta s kidalice za sve ispitne grupe

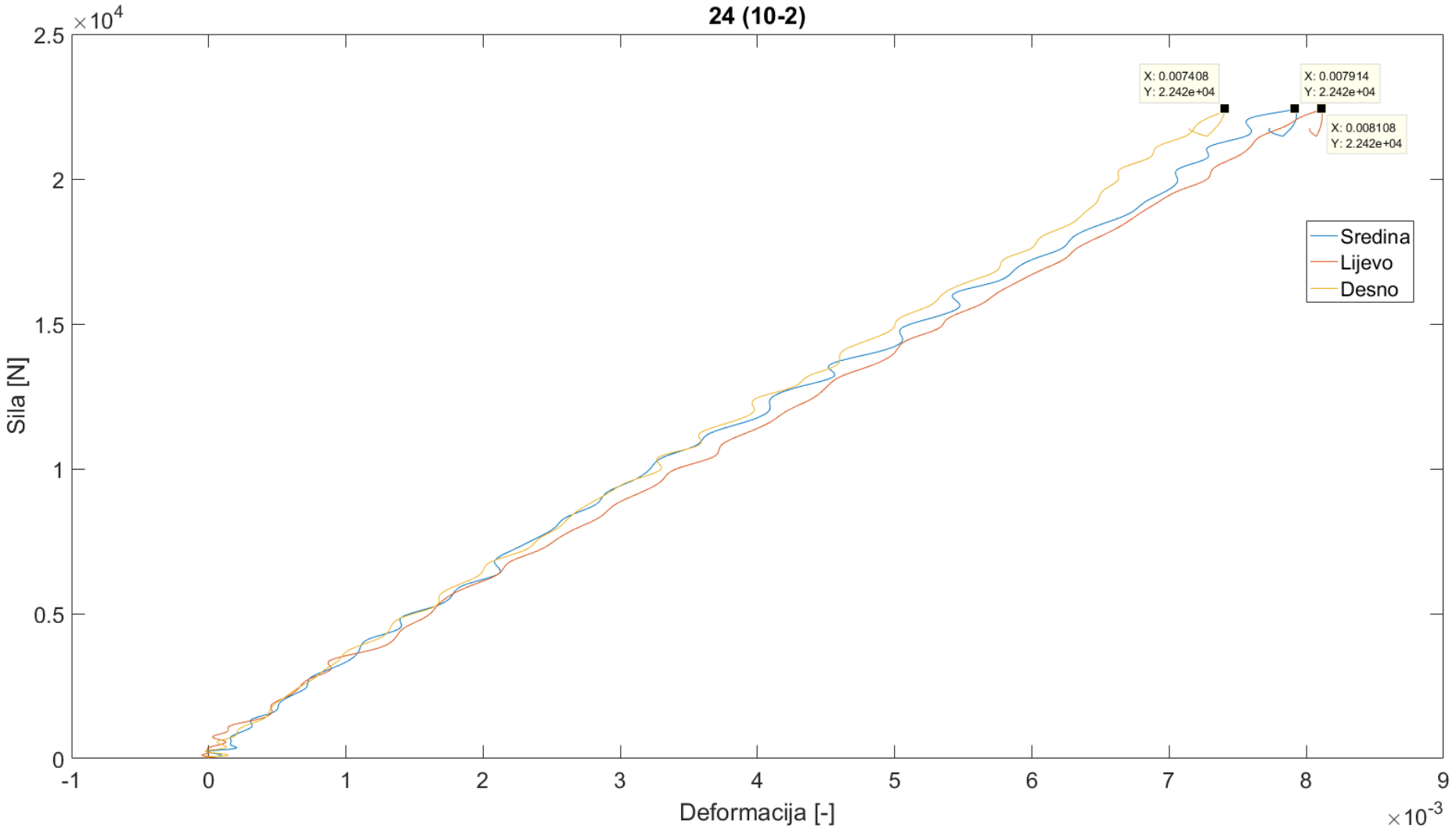
Grupa uzoraka	Oznaka uzorka	Sila [N]	Pomak [mm]	Prosječna vrijednost		Standardna devijacija	
				Sila [N]	Pomak [mm]	Sila [N]	Pomak [mm]
2	2 (2-1)	3588	3.206	3701	3.402	688	0.533
	3 (2-2)	3894	3.603				
	4 (2-3)	4113	3.771				
	5 (2-4)	2575	2.562				
	6 (2-5)	4337	3.867				
4	1 proba OK KPT	7737	5.047	5832	3.525	2876	1.538
	7 (4-1)	10050	5.593				
	8 (4-2)	2387	1.692				
	9 (4-3)	4876	2.846				
	10 (4-4)	2403	1.706				
	11 (4-5)	5635	3.577				
	17 (4-6) OK KPT	7737	4.211				
6	12 (6-1)	9348	5.221	11002	5.494	1110	0.398
	13 (6-2)	11810	5.933				
	14 (6-3)	11630	5.893				
	15 (6-4)	10360	5.055				
	16 (6-5)	11860	5.368				
8	19 (8-1)	13240	3.981	14664	5.285	3171	1.998
	20 (8-2)	20110	8.203				
	21 (8-3)	14600	6.518				
	22 (8-4)	12090	3.565				
	23 (8-5)	13280	4.156				
10	18 (10-1)	18020	4.72	23934	6.057	3802	0.957
	24 (10-2)	22420	5.476				
	25 (10-3)	25830	6.338				
	26 (10-4)	25790	6.633				
	27 (10-5)	27610	7.119				

Rezultati snimanja optičkim mjernim sustavom Aramis sastoje se, kako je već spomenuto, od deformacija u 3 karakteristične točke na površini trake. Mjerenje sustavom Aramis provedeno je kako prikazuje Tablica 6. na svim uzorcima osim jednog - probnog. To dakle znači da svaki uzorak ima 3 krivulje sila-deformacija. Prikaz rezultata na način da su krivulje sila-deformacija svih uzoraka iste grupe na jednom dijagramu bio bi nepregledan budući da bi tada u svakom dijagramu bilo po 15 krivulja. Aramisom snimljene krivulje kvalitativno su jednake za sve grupe uzoraka. Iz tog razloga s krivulja su očitane vrijednosti deformacija samo u trenutku kada je došlo do gubitka integriteta traka. Taj trenutak odgovara označenim točkama na dijagramima s kidalice. Deformacije u tim točkama zapravo inženjerski predstavljaju deformacije prilikom loma.

Prilikom snimanja Aramisom kod malog broja uzoraka se dogodilo da je sustav prestao pratiti naneseni raster točaka prije točke gubitka integriteta trake. Kod tih uzoraka naravno nije moguće odrediti deformaciju prilikom loma te takvi uzorci nemaju navedenu vrijednost u Tablici 8. Kod svih uzoraka deformacija je mjerena u inkrementima od 1 sekunde. Primjera radi, dijagram deformacija s tri krivulje koje odgovaraju trima karakterističnim točkama prikazuje Slika 61.

Tablica 8. Rezultati za sve ispitne grupe dobiveni mjernim sustavom Aramis

Grupa uzoraka	Oznaka uzorka	Deformacija pri lomu u karakterističnoj točki (Slika 55.)			Prosječna vrijednost deformacije po širini trake	Prosječna vrijednost deformacije za istu karakterističnu točku za cijelu grupu (Slika 55.)			Prosječna vrijednost za grupu	Standardna devijacija za grupu
		Lijevo	Sredina	Desno		Lijevo	Sredina	Desno		
4	1 proba OK KPT									
	7 (4-1)	0.007483	0.007579	0.007605	0.007556	0.004602	0.003927	0.004123	0.00421711	0.00238214
	8 (4-2)	0.002332	0.001872	0.001434	0.001879					
	9 (4-3)	0.004453	0.00349	0.003929	0.003957					
	10 (4-4)	0.002197	0.00094	0.001584	0.001574					
	11 (4-5)	0.003855	0.003107	0.003373	0.003445					
	17 (4-6) OK KPT	0.007289	0.006571	0.006815	0.006892					
6	12 (6-1)	0.003958	0.005793	0.005131	0.004961	0.004803	0.004894	0.005627	0.00510787	0.0019421
	13 (6-2)	0.002689	0.003832	0.008694	0.005072					
	14 (6-3)	0.006425	0.00259	0.001509	0.003508					
	15 (6-4)	0.004847	0.005357	0.0054	0.005201					
	16 (6-5)	0.006096	0.006897	0.0074	0.006798					
8	19 (8-1)	0.005623	0.005598	0.006125	0.005782	0.005085	0.004756	0.005910	0.005250	0.000838
	20 (8-2)	-	-	-	-					
	21 (8-3)	-	-	-						
	22 (8-4)	0.004546	0.003913	0.005695	0.004718					
	23 (8-5)	-	-	-	-					
10	18 (10-1)	0.005789	0.006303	0.007064	0.006385	0.007791	0.007839	0.008006	0.007878	0.001174
	24 (10-2)	0.008108	0.007914	0.007408	0.007810					
	25 (10-3)	0.009567	0.009495	0.008455	0.009172					
	26 (10-4)	0.007698	0.007645	0.009095	0.008146					
	27 (10-5)	-	-	-	-					



Slika 61. Dijagram sila-deformacija za uzorak 24 (10-2)

3.6. Zaključak eksperimenta

Prilikom provedbe eksperimenta kao pretpostavka o varijabli koja utječe na čvrstoću steznih elemenata, kao što je i ranije spomenuto, uzet je broj slojeva trake. Analizom rezultata eksperimenta na Slici 56. 60. odnosno ispisanih vrijednosti sile kod koje dolazi do gubitka integriteta steznih elemenata danih u Tablici 7. uočljivo je da nosivost traka svakako je funkcija broja slojeva trake. Objedinjeni prikaz sile kod koje dolazi do gubitka integriteta svakog od steznih elemenata u svim ispitnim grupama prikazuje Slika 62. Redni brojevi uzoraka dodijeljeni su na način da rednom broju 1 odgovara najslabiji ispitani uzorak u grupi dok rednom broju 5 odgovara uzorak koji je izdržao najveće opterećenje. Ovakav prikaz omogućava jednostavan pregled rezultata ispitivanja svakog uzorka te njihovu međusobnu usporedbu. Ipak, takav pregled ne stavlja rezultate ispitivanja u kontekst pogodan za uporabu u proračunske svrhe budući da ih s ničime ne uspoređuje. U ranijim poglavljima spomenuto je kako sam proizvođač garantira nosivost po centimetru širine trake kao poluproizvoda od F_{max} = 2500 N/cm. Najjednostavniji intuitivni proračunski model procjene nosivosti elementa je u tom slučaju

$$F_{n,max} = d \cdot n \cdot F_{max} \tag{10}$$

gdje je

d – širina trake [mm],

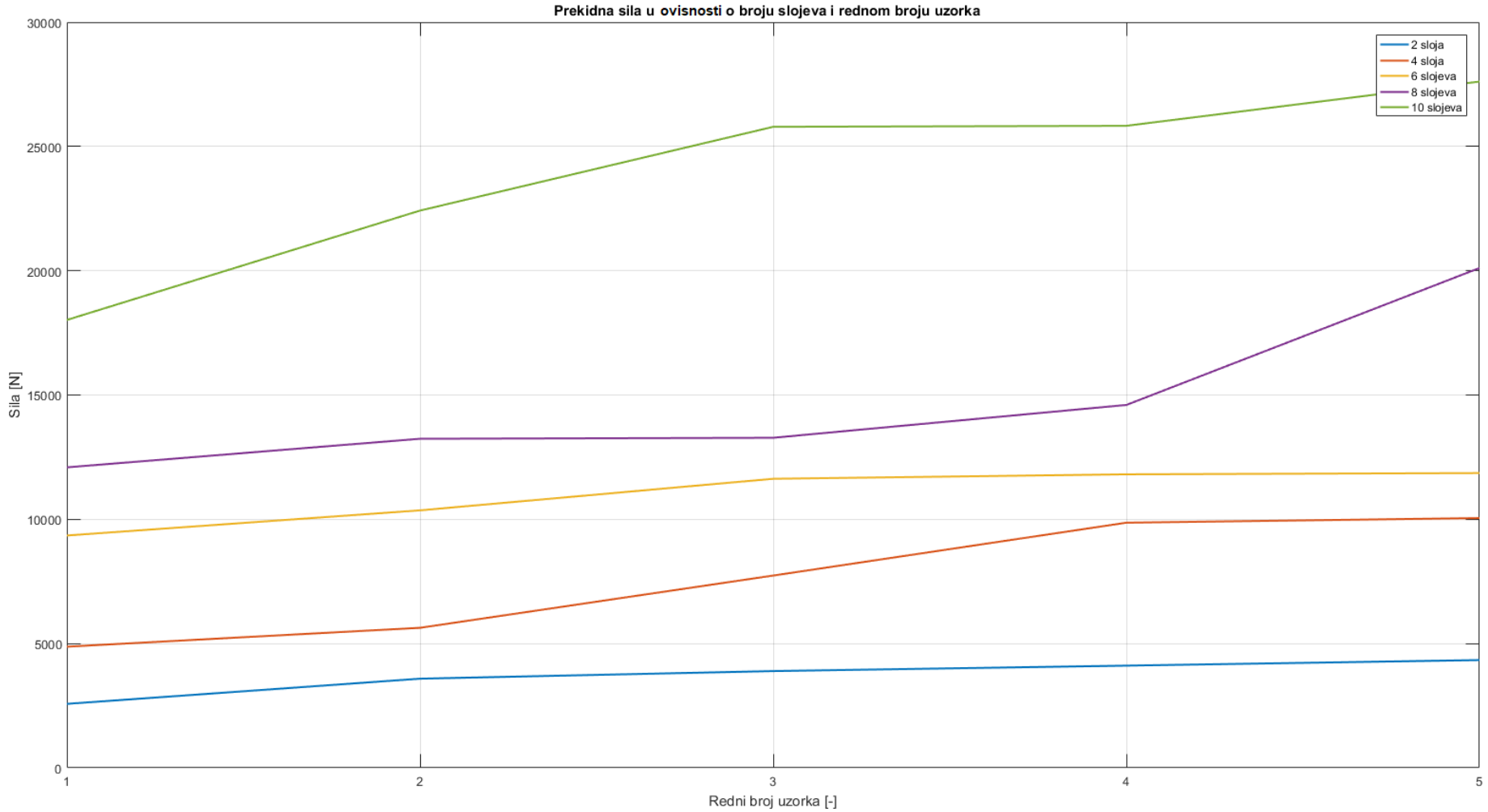
n – broj slojeva trake u steznom elementu [-],

F_{max} – garantirana nosivost jednog sloja trake kao poluproizvoda [N/cm].

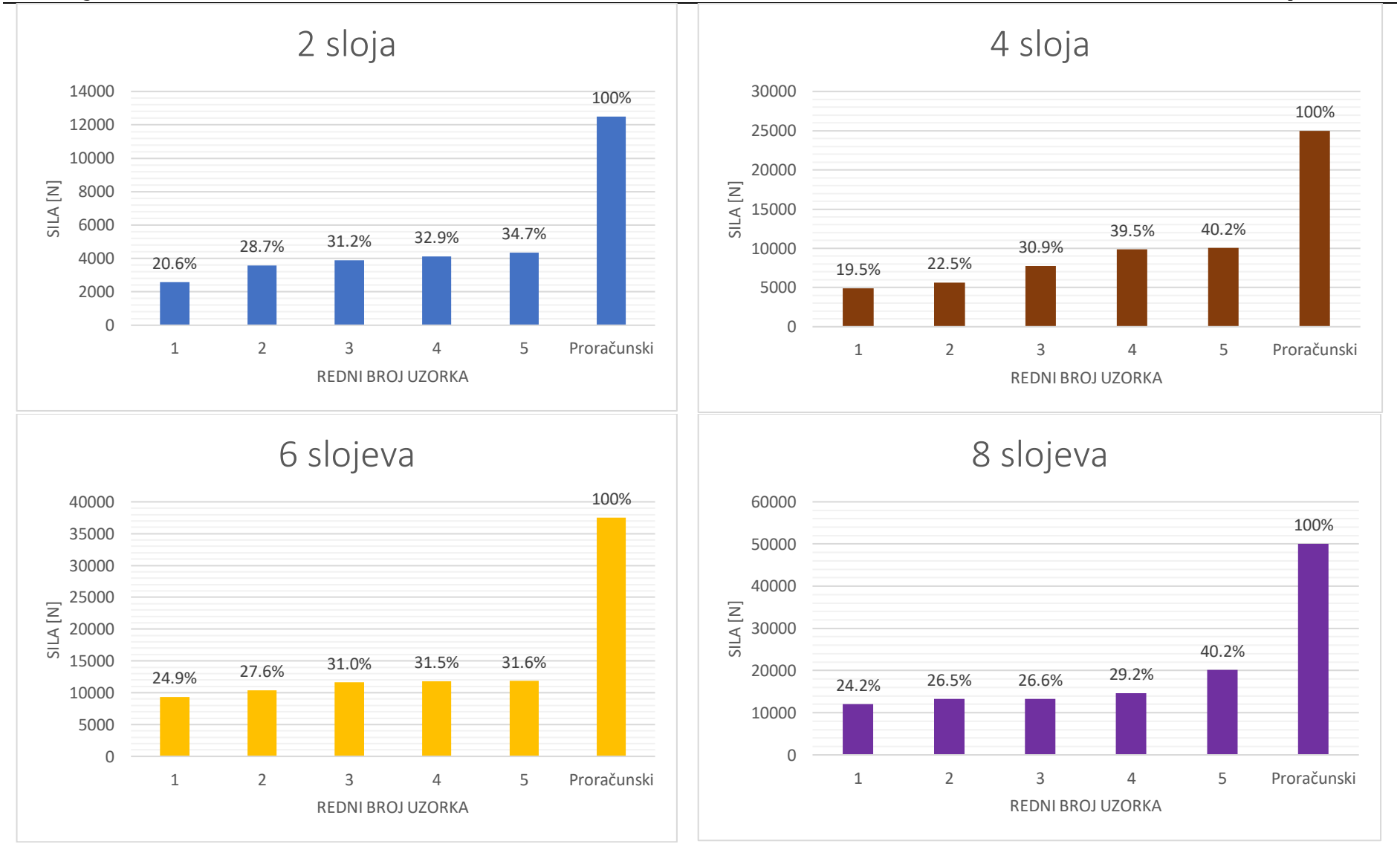
Budući da širina trake iznosi 25 mm te se baš kao niti garantirana nosivost po centimetru širine ne mijenja, jedina varijabla u jednadžbi (10) je broj slojeva steznog elementa. Proračunska nosivost steznog elementa u tom slučaju je pravac odnosno mijenja se linearno. Uvrštavanjem broja slojeva, nosivosti steznih elemenata iznose

$$F_{n,max}\begin{pmatrix} 2\ sloja \\ 4\ sloja \\ 6\ slojeva \\ 8\ slojeva \\ 10\ slojeva \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 12500 \\ 25000 \\ 37500 \\ 50000 \\ 62500 \end{bmatrix} \text{N} \tag{11}$$

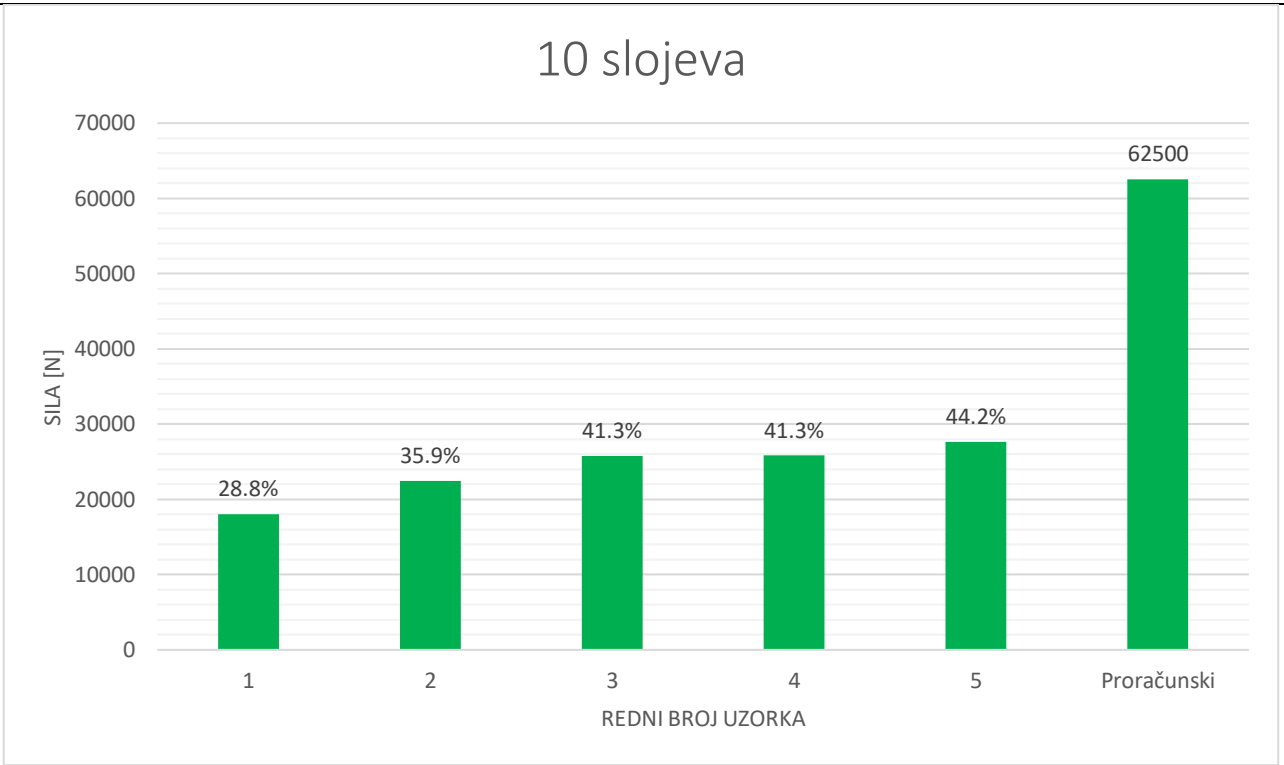
Te proračunske nosivosti sada je moguće usporediti s nosivostima traka dobivenima ispitivanjem. Takva relativna usporedba dana je na Slici 63 do 65. i prikazuje usporedbu iznosa proračunske sile, najveće, najmanje i prosječne vrijednosti sile iz pojedine grupe uzoraka



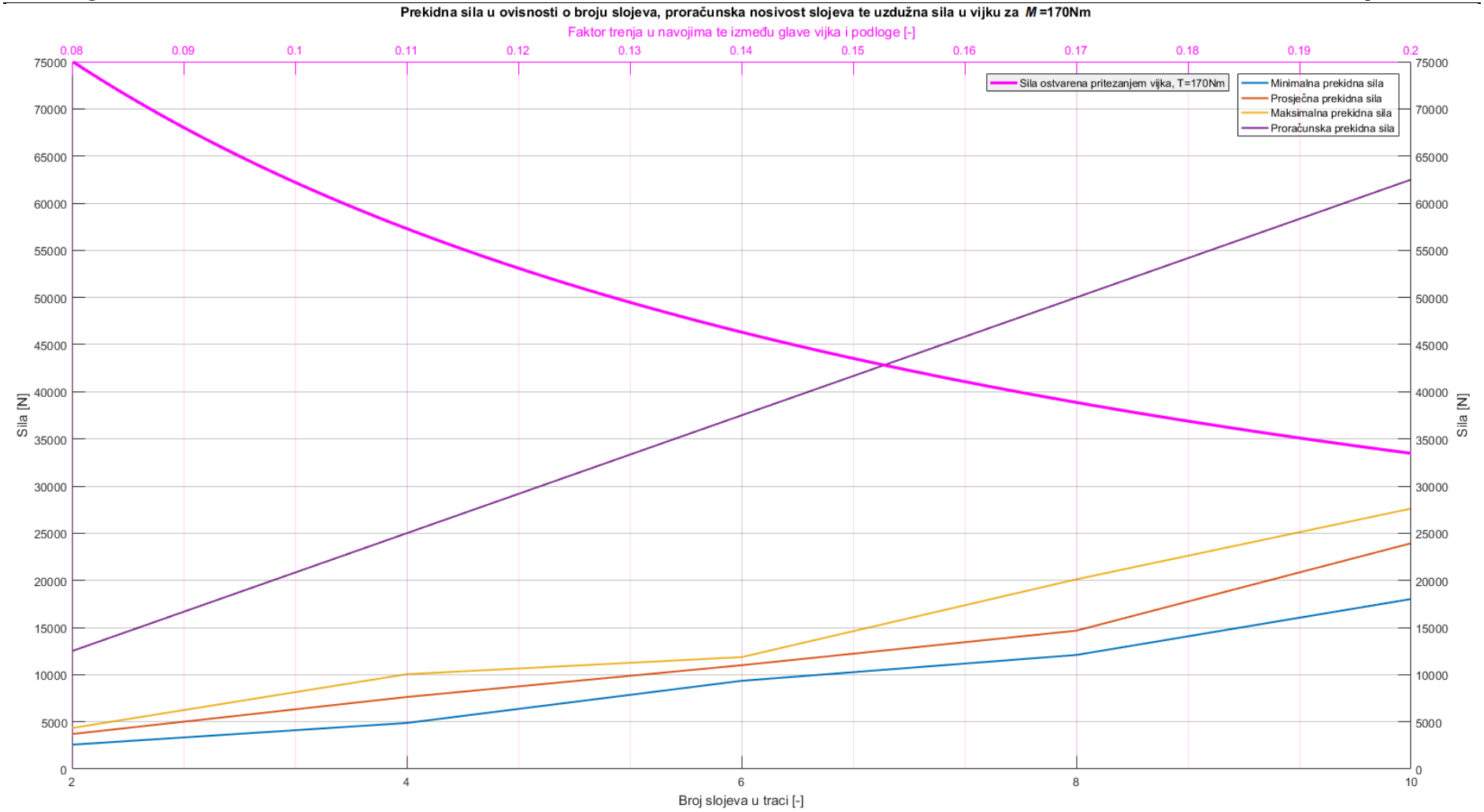
Slika 62. Prekidne sile svih uzoraka prema ispitnim grupama



Slika 63. Rezultati za prekidnu silu relativno u odnosu na proračunsku vrijednost za 2 do 8 slojeva



Slika 64. Rezultati za prekidnu silu relativno u odnosu na proračunsku vrijednost za 10 slojeva



Slika 65. Prekidna sila u ovisnosti o broju slojeva uspoređena s proračunskom prekidnom silom te s prikazom procjene sile koja se postiže vijkom

te procjenu unesene sile u ovisnosti o faktoru trenja u navojima te na vijencu matice pritezanjem matica na Slici 36. momentom M = 170 Nm.

Iz Slike 63. i Slike 64. vidljivo je da je nosivost traka u ispitivanju najčešće svega 20%…40% u odnosu na proračunske vrijednosti.

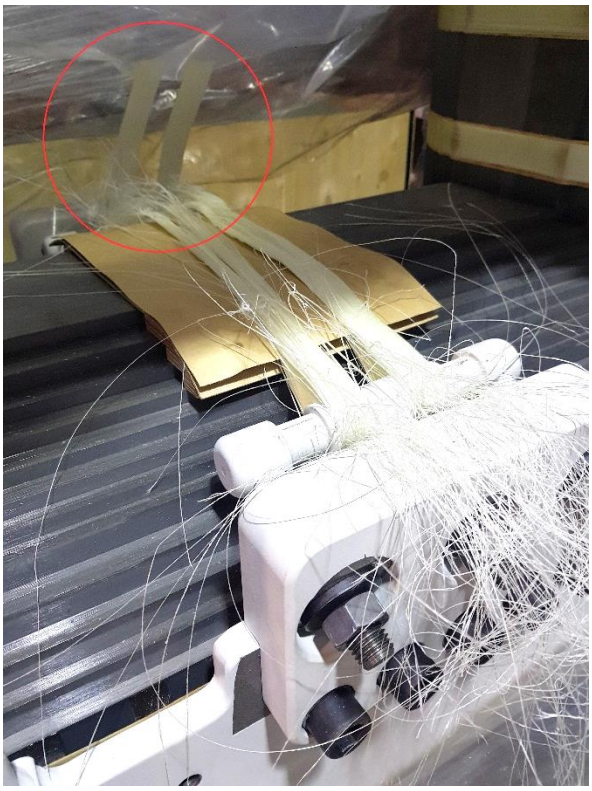
Razloga za takva odstupanja svakako je mnogo, no ipak prilikom ispitivanja uzoraka na kidalici uočen je obrazac gubitka integriteta steznih elemenata koji se čini dominantnim u objašnjavanju ovakvih odstupanja. Naime, svaki od 26 uzoraka mehanički je zakazao odnosno izgubio integritet na način da se prvo njegov vanjski sloj odlijepio. To prikazuje Slika 66. koja je zapravo zamrznuti kadar u video zapisu tijeka ispitivanja. Nakon odljepljivanja vanjskog sloja te nastavka opterećivanja je tek došlo do pucanja samih niti staklenih vlakana (Slika 67.). Budući da proizvođač specificira iznos najveće sile koju svaka traka može preuzeti do pucanja njenih vlakana, razumno je za zaključiti da su rezultati ispitivanja nosivosti toliko niži od proračunskih upravo zbog kvalitativno različitog mehanizma gubitka integriteta.

Slika 66. Odljepljivanje trake

Slika 67. Pucanje vlakana u unutrašnjim slojevima

Budući da u tehničkoj specifikaciji trake nigdje nisu navedena geometrijska ograničenja ili nedozvoljeni načini ugradnje i/ili opterećivanja elemenata koji se iz nje rade, može se zaključiti

da je kvalitativno neočekivan način gubitka integriteta traka isključivo posljedica proizvodnih odnosno tehnoloških procesa odnosno postupka njihova namatanja. U samoj tehničkoj specifikaciji trake nigdje nije spomenuta opasnost od mogućnosti odljepljivanja. No ipak, ukoliko su uistinu razlozi odljepljivanja trake proizvodne odnosno tehnološke prirode, krajnje je neobično da se traka nikada nije odmotala prilikom montaže na stvarnu jezgru transformatora. Iz tog razloga odlučeno je da će se provesti pritezanje trake sve do pucanja u sklopu testne jezgre u Končar – Energetskim transformatorima kako bi se kvalitativno saznao mehanizam gubitka integriteta u stvarnom ugradbenom slučaju. Rezultati ispitivanja na testnoj jezgri slični su rezultatima s kidalice. Stanje neposredno nakon gubitka integriteta trake u sklopu testne jezgre prikazuje Slika 68. Na njoj je crveno zaokružen odlijepljeni vanjski sloj trake gdje je ona spajana. Na Slici 69. prikazano je naknadno potpuno pucanje niti trake, slično kao i kod ispitivanja na kidalici.



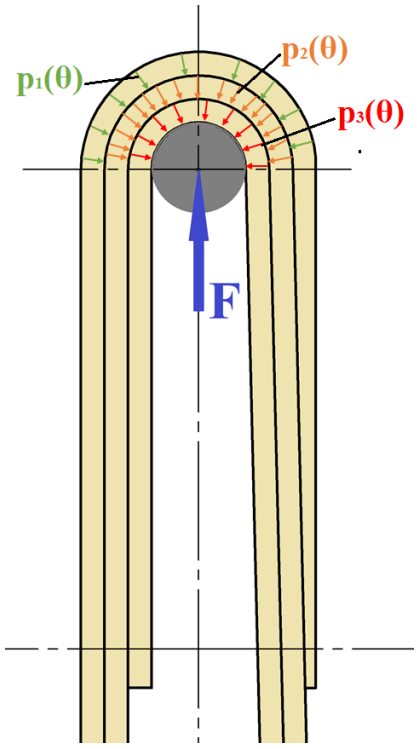
Slika 68. Odlijepljeni dio trake prilikom ispitivanja na testnoj jezgri

Slika 69. Naknadno pucanje staklenih niti prilikom ispitivanja na testnoj jezgri

Ipak, za razliku od masovnog odljepljivanja vanjskog sloja ili ponekad i vanjska dva sloja što je bio slučaj kod ispitivanja na kidalici, prilikom ispitivanja na testnoj jezgri odlijepljeni sloj trake je isključivo dio koji je zaokružen crvenom bojom na Slici 68. Odljepljivanje prilikom ispitivanja na testnoj jezgri stalo je odmah kod osovine za napinjanje te nije dalje propagiralo

već se mehanizam gubitka integriteta traka prebacio na pucanje staklenih niti. Takav povoljniji rezultat ispitivanja može se objasniti sljedećim razmatranjem.

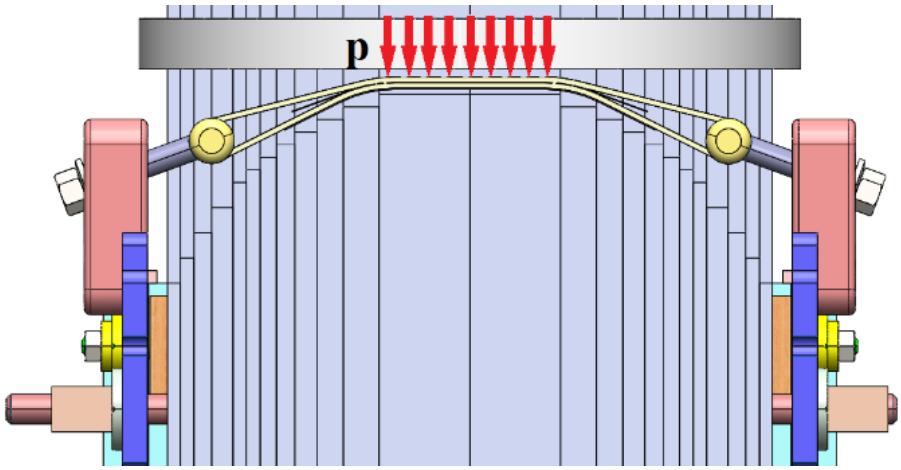
Naime, prilikom rastezanja traka na kidalici razumno je za pretpostaviti da svaka traka na ravnom dijelu steznog elementa preuzima neki dio narinute sile *F*. Isto tako na pregibima preko osovina između slojeva traka javljaju se tlakovi prikazani na Slici 70 koji u općem slučaju mogu biti funkcija cilindričnih koordinata z, r i Θ. Može se primijetiti da na svaki sloj trake djeluje pritisak od sloja iznad, izuzev vanjskog sloja. Budući da je vanjski sloj trake posljednji, na njega ne djeluje nikakav pritisak koji bi ga držao čvršće vezanim za ostale slojeve. To je objašnjenje zašto dolazi do odmatanja upravo vanjskog sloja traka. Dakle, do odmotavanja vanjskog sloja traka dolazi onda kada je dio sile koji vanjski sloj preuzima veći od kohezijske sile između zadnjeg i predzadnjeg sloja, što uključuje sile inducirane uslijed pritisaka između ta dva sloja na osovini kao i kohezijske sile na ravnim segmentima steznog elementa.



Slika 70. Pritisak između slojeva traka u steznom elementu prilikom ispitivanja

Slika 71. daje objašnjenje zašto odljepljivanje traka prilikom ispitivanja na testnoj jezgri nije toliko izraženo glede gubitka integriteta steznog elementa. Geometrija koju traka u ugradbenom slučaju na slici zauzima povoljno djeluje na sprečavanje njenog odmotavanja. Zbog postojanja izbočine jarma preko koje je prebačena traka, jasno je da traka prilikom stezanja djeluje

okomitom silom na sam jaram. Tu okomitu silu može se prikazati kao integral umnoška na Slici 71. prikazanog pritiska *p* (u općem slučaju funkcija plošnih koordinata x i y) te tlocrtne površine koju trake ostvaruju na jaram. Lako je za uočiti da prikazani pritisak traka na jaram djeluje korisno. Ukoliko je vanjski kraj trake okrenut prema jarmu, do odljepljivanja ne može ni doći budući da vanjski sloj odozgo pritišću ostale napete trake. Ako je pak vanjski kraj trake okrenut od jarma, tada je samo odljepljivanje moguće samo do osovine gdje je daljnja propagacija zaustavljena. Naime, kako bi propagacija odljepljivanja bila uopće moguća, nužno je da gibanje trake nije spriječeno. Upravo na slici prikazani pritisak pritišće svaki od slojeva o jaram te time sprečava daljnje odljepljivanje. Na taj način odljepljivanje trake prilikom ispitivanja na testnoj jezgri se zaustavlja u crveno zaokruženom položaju prikazanom na Slici 68.



Slika 71. Pritisak na središnjem dijelu steznog elementa uslijed prebacivanja trake preko jarma testne jezgre

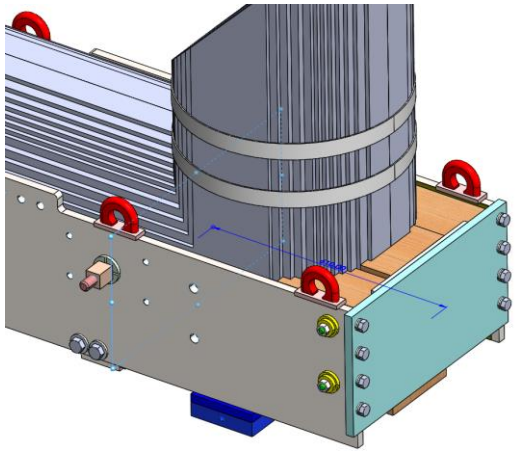
Uz iznesene zaključke očito je da pretpostavka kvalitativno jednakog gubitka integriteta steznih elemenata u eksperimentalnom postavu i na stvarnoj jezgri uvedena u poglavlju 3.2. nije ispunjena. To znači da eksperimentalno dobivene rezultate nije moguće direktno primijeniti na slučaj u praksi. No ipak, mogu se izvući i neki univerzalni zaključci poput

- prilikom postavljanja steznih elemenata na jaram, postaviti ih treba s vanjskim krajem trake okrenutim prema jarmu,
- opterećenje steznih elemenata po širini približno je jednoliko,
- konačna mehanička svojstva steznih elemenata uvelike ovise o proizvodnom postupku te njegovoj ponovljivosti,
- stezni elementi pokazuju linearno-elastičnu karakteristiku.

Kao smjernicu za buduća ispitivanja može se navesti ponavljanje ispitivanja s eksperimentalnim postavom koji u potpunosti opisuje ugradbeni slučaj ili provedba ispitivanja u sklopu.

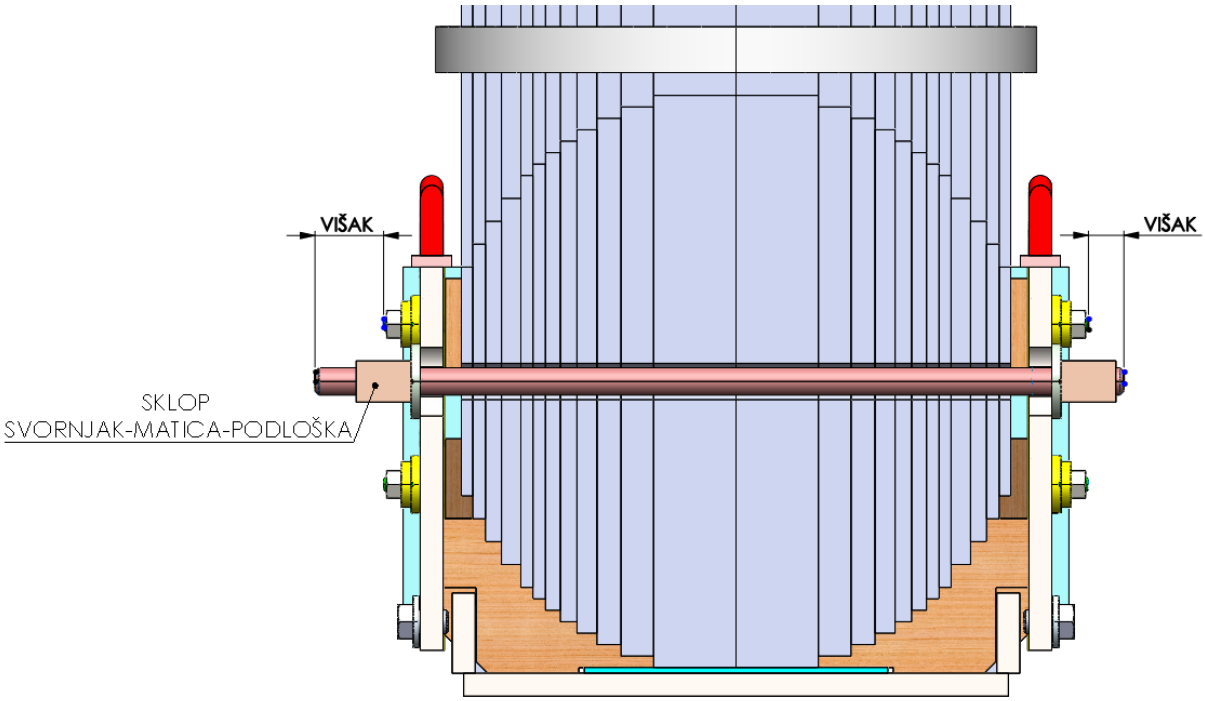
4. ISPITIVANJE NOVE VARIJANTE STEZANJA JARMA

Prilikom konstruiranja aktivnog dijela transformatora odnosno njegove jezgre, osim samih proračunskih svojstava koje sam transformator mora zadovoljavati, nužno je i osigurati da transformator bude cjenovno konkurentan. Kao mogući način uštede u konačnoj cijeni transformatora u Končar – Energetskim transformatorima identificirano je smanjenje proizvodnog troška kućišta odnosno kotla transformatora shematski prikazanog brojem 1 na Slici 15. Smanjiti trošak izrade kotla moguće je ostvariti na način da se smanji masa utrošenog materijala potrebnog za njegovu izradu (konstrukcijski faktor) ili da se smanji sam trošak postupka proizvodnje (proizvodni/tehnološki faktor). Orijentirajući se na konstrukcijski faktor, ispravno je dakle zaključiti da bi konstrukcijski zahvat koji bi omogućio smanjenje dimenzija kotla istodobno rezultirao smanjenjem mase čelika potrebne za njegovu izradu, a samim time i smanjenjem troška izrade. Gabaritne dimenzije kotla uvjetovane su dimenzijama sklopa aktivnog dijela koji se u njega ulaže. Jezgra kao masom i volumenom dominantan podsklop aktivnog dijela transformatora ima najveći utjecaj na konačne dimenzije kotla te je osnovni podsklop čijem se obliku ostali podsklopovi aktivnog dijela prilagođavaju. Dakle, smanjenjem sklopa jezgre transformatora moguće je utjecati na dimenzije kotla. Sami limovi jezgre koji su nosioc najvećeg dijela mase i volumena sklopa jezgre definirani su proračunom te se na njih ne može konstrukcijski utjecati. Osim limova u sklopu jezgre nalazi se i stezni sustav koji je prikazan na Slici 32. Kao što je i ranije spomenuto, stezni sustav čine 3 različita podsklopa steznih elemenata prema Slici 33. od kojih je jedan podsklop prethodno ispitivani stezni element od Polyglas® traka označen slovom B. Ukoliko se CAD model jezgre presiječe ravninom prikazanom na Slici 72. postaje očito da gabaritnu dimenziju širine cijele jezgre



Slika 72. Ravnina poprečnog presjeka jarma

definiraju svornjaci koji kroz nju prolaze. To je prikazano na Slici 73. Podsklop steznih elemenata od Polyglas® traka nije prikazan budući da se može smjestiti s unutarnje strane steznika gdje ne utječe na gabaritnu širinu sklopa jezgre.

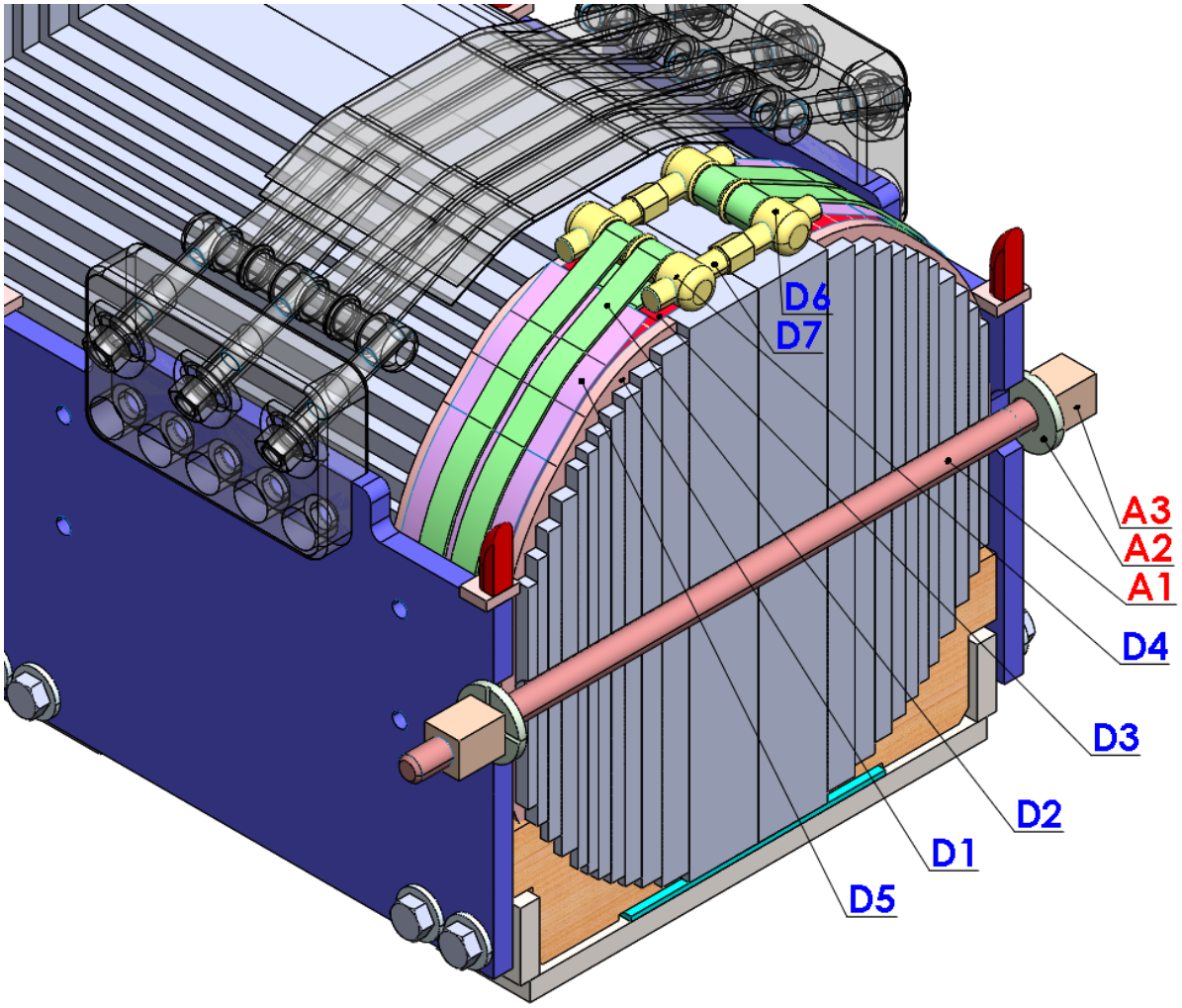


Slika 73. Povećanje širine sklopa jezgre uslijed korištenja poprečnih svornjaka kao steznih elemenata

Samo korištenje poprečnih svornjaka kao steznih elemenata rezultira „viškom“ u poprečnoj dimenziji jezgre kotiranim na Slici 73. Prikazani višak u dimenziji jezgre rezultira širim kotlom što nije zanemarivo povećanje mase čelika odnosno troškova materijala. Osim povećanja kotla, prikazani stezni elementi nepovoljni su i iz razloga što zahtijevaju rezanje svakog lima jezgre kako bi ih se provuklo kroz nju. To povećava potrebno vrijeme za proizvodnju limova kao i otpor jezgre provođenju magnetskog toka. Iz navedenih razloga u Končar – Energetskim transformatorima razmatra se prestanak korištenja steznih elemenata svornjaka te uvođenje zamjenskog načina osiguravanja pritiska između limova korištenjem steznih elemenata od Polyglas® trake na način koji je opisan u sljedećem poglavlju.

4.1. Konstrukcijska izvedba nove varijante stezanja jarma

Kao predložena zamjena za stezne elemente s poprečnim svornjacima, predlaže se korištenje novih steznih elemenata od Polyglas® trake u konstrukcijskoj izvedbi u kojoj bi oni obuhvaćali cijeli jaram te se na gornjoj strani pritezali. Sastavni dijelovi sklopa novog konstrukcijskog rješenja kao i postojećeg rješenja sa svornjacima označeni su na Slici 74.



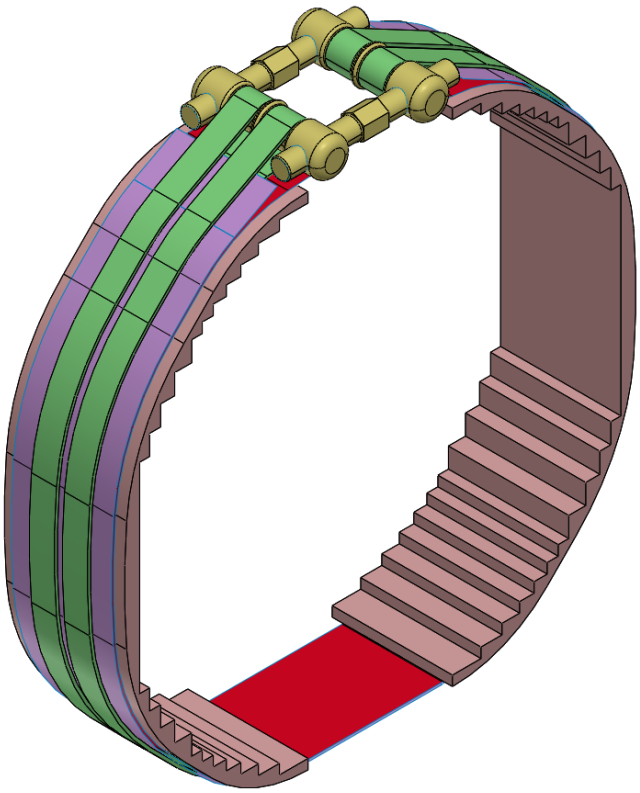
Slika 74. Sastavni dijelovi sklopova predloženog novog i postojećeg načina stezanja

Zbog jednostavnosti prikaza, na slici nisu presječeni svornjaci te njihove matice i podloške. Postojeći stezni elementi od Polyglas® traka prikazani su kao prozirni kako bi se izbjegle nejasnoće vezane uz postojeće stezne elemente od Polyglas® traka koji ostaju te novih steznih elemenata od Polyglas® traka koji bi zamjenjivali svornjake. Sastavni dijelovi prema prikazu na Slici 74. imenovani su u Tablici 9.

Tablica 9. Pozicije u steznim rješenjima

SVORNJACI (A)	**A1**	HGW kompozitni svornjak M24
	A2	Podložna pločica - izolacijska
	A3	Matica HGW 2372.4; DIN 40606
PREDLOŽENI POLYGLAS® STEZNI ELEMENTI (D)	**D1**	Vodilica trake
	D2	Polyglas® traka
	D3	Podloga traka-vodilica (NOMEX ili karton)
	D4	Osovina za napinjanje – desni navoj
	D5	Podloga traka-traka (NOMEX ili karton)
	D6	Osovina za napinjanje – lijevi navoj
	D7	Dvostruki vijci za napinjanje

Stezanje predloženim novim steznim elementima odvijalo bi se na način da se prvo na složenu jezgru umetnu simetrične vodilice trake (D1). One osiguravaju glatku neprekinutu konturu bez oštrih bridova koja štiti trake te prenosi pritisak na limove. Na navedene vodilice potom se postavlja podloga od teflona (komercijalni naziv – NOMEX) ili kartona (D3) kako bi se smanjilo trenje između drvenih vodilica i trake. Na tako pripremljen jaram, polaže se traka (D2) te se kroz njene „kopče“ provode desnovojne i lijevovojne osovine za napinjanje (D4 i D6). Između dvije strane trake umeće se još jedna podloga od NOMEX-a ili kartona (D5), isto tako za redukciju trenja traka-traka. Kao zadnji korak u osovine za napinjanje (D4 i D6) uvode se dvostruki vijci kojima se ostvaruje napinjanje traka (D7). Kako bi opisano konstrukcijsko rješenje bilo implementirano, nužno je pokazati da pruža jednaka ili bolja svojstva održavanja pritiska među limovima u odnosu na stezne elemente sa svornjacima koje bi zamijenila. Za razliku od svornjaka, kod prikazanog novog rješenja nije potrebno rezati rupe u limovima niti proširivati kotao kao posljedicu njihova korištenja. (Slika 75.)



Slika 75. Sklop predloženih steznih elemenata izvan sklopa jezgre

4.2. Cilj eksperimenta

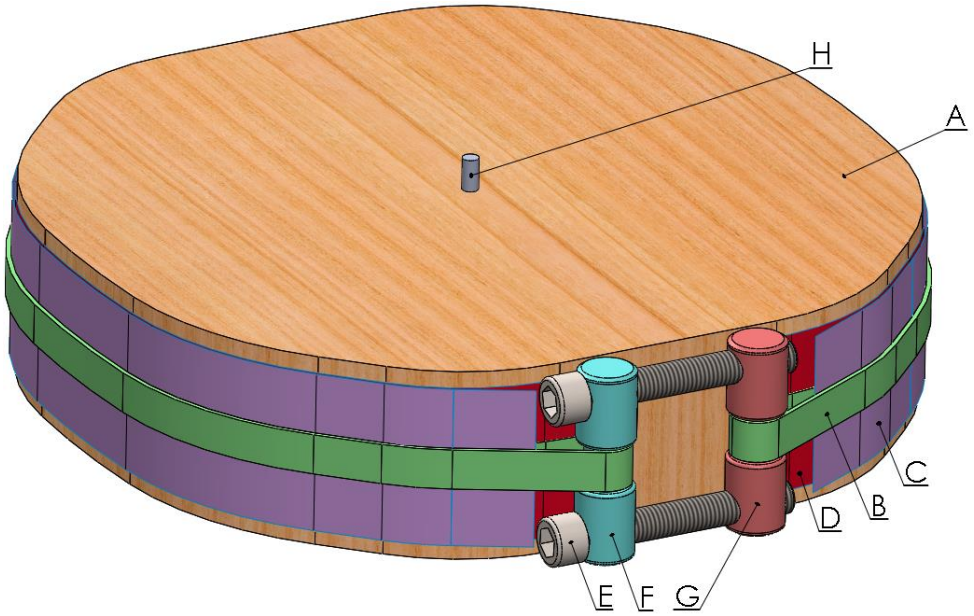
Kako bi eksperiment mogao biti što točnije proveden, potrebno je osmisliti eksperimentalni postav na način da je što sličniji ugradbenom slučaju odnosno da se rezultati dobiveni ispitivanjem što jednostavnije mogu primijeniti na jezgri transformatora

Cilj provedbe ispitivanja novog konstrukcijskog rješenja je

- kvalitativno opisati mehanizam gubitka integriteta steznih elemenata,
- odrediti polje pomaka odnosno deformacija po obodu trake s ciljem određivanja gubitka naprezanja na različitim dijelovima trake.

4.3. Eksperimentalni postav

Budući da nije moguće ispitivanje provesti na testnoj jezgri iz razloga navedenog u poglavlju 3.2, osmišljen je eksperimentalni postav. Prilikom definiranja eksperimentalnog postava težilo se dobiti što sličnije uvjete geometrije i opterećenja uz uvođenje što manje pretpostavki i pojednostavljenja. Odabrani eksperimentalni postav prikazan je na Slici 76.



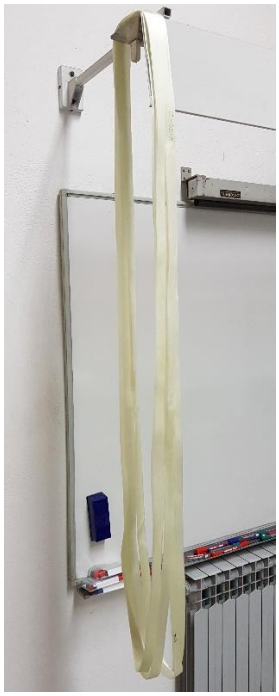
Slika 76. Eksperimentalni postav za ispitivanje nove varijante steznih elemenata

Slovom „A“ označen je model jarma i vodilica traka u prirodnoj veličini, izrađen od prešanog laminiranog drva komercijalnog naziva DEHONIT®. Vanjska geometrija modela u potpunosti odgovara vanjskoj geometriji stvarnog jarma s ugrađenim vodilicama (Slika 75). Ovakav model ne zahtjeva nikakva pojednostavljenja niti pretpostavke za provedbu ispitivanja izuzev razlike u kompresijskoj karakteristici čeličnog jarma i modela, za što se može pretpostaviti da nije faktor koji bi znatnije utjecao na rezultate ispitivanja traka. Slovom „B“ označen je stezni element napravljen od Polyglas® traka istim postupkom proizvodnje opisanim u poglavlju 2.4. Duljina namatanja steznog elementa na Slici 76. iznosi 1560 mm. Usporedbom stvarne izvedbe na jezgri transformatora i prikazanog eksperimentalnog postava uočljivo je da se na eksperimentalnom postavu koristi samo jedna traka dok bi se na stvarnoj jezgri koristile dvije. Korištenje jedne trake omogućava određivanje unesenog opterećenja preciznije nego izvedba s dvije trake, što ima značajan pozitivni utjecaj na rezultat ispitivanja. Dvije trake se kod jezgre transformatora koriste samo kako bi se povećala nosivost takve izvedbe dok bi kod korištenja

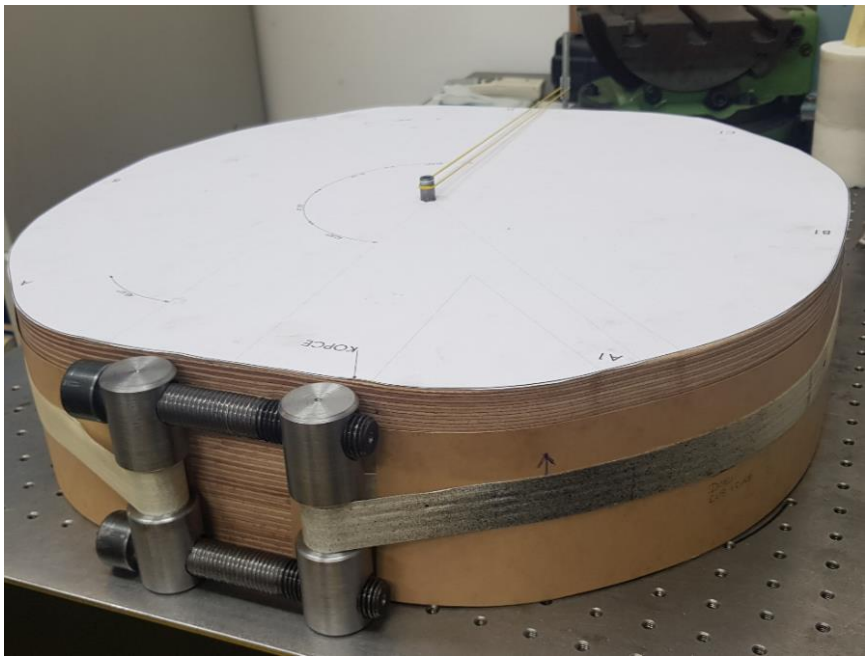
dvije trake u eksperimentalnom postavu uvijek postojala nesigurnost u vidu upitno jednake opterećenosti svake od traka. Slovima „C“ i „D“ označene su podloge traka izrađene od kartona. Same podloge identične su onima označenima s „D3“ i „D5“ na Slici 74. tako da se njihovim korištenjem ne unose pojednostavljenja ni pretpostavke u ispitivanje. Slovom „E“ označen je imbus vijak M20x140 DIN 912 kojim se trake opterećuju. Slovima „F“ i „G“ označene su osovine za prijenos opterećenja na trake. Prikazane osovine zapravo su iste već korištene osovine. Radi se o osovinama s crteža B100111100 sa sljedećim preinakama

- obje osovine su skraćene simetrično za 10 mm u dužini kako bi se osiguralo da su jednake visine kao i eksperimentalni model, odnosno da postav može nesmetano ležati na ravnoj podlozi,
- na osovini označenoj slovom „F“ izvedene navojne rupe su preinačene u prolazne rupe M20 navoja.

Slovom „H“ označen je trn s prihvatom za koordinatni optički stol (crtež A-01). Svrha trna je da se montira na optički stol te da se na njega postavi model spreman za ispitivanje koji se može rotirati oko trna radi postizanja različite orijentacije sukladno s odabranim dijelovima oboda na kojima se provodi mjerenje optičkim mjernim sustavom Aramis. Namotani uzorci prije ispitivanja prikazani su na Slici 77. a eksperimentalni postav prikazuje Slika 78.

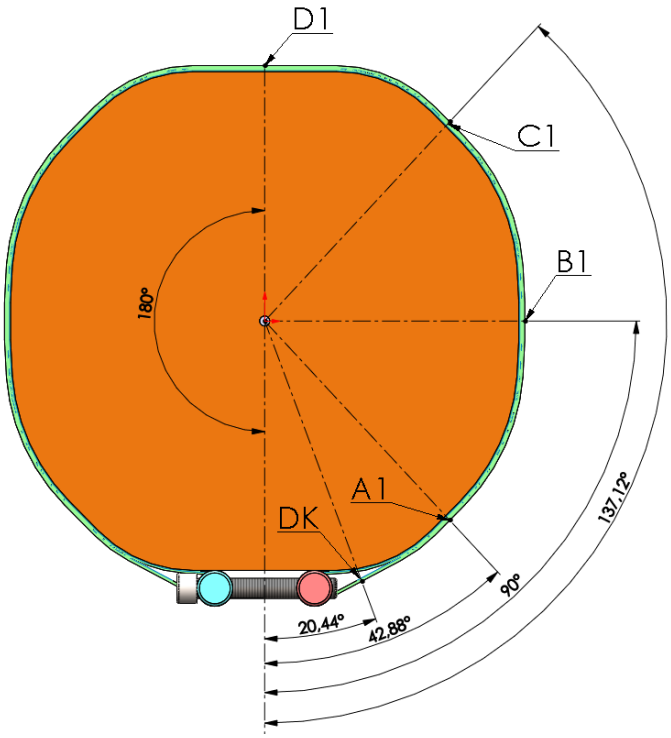


Slika 77. Uzorci prije montaže



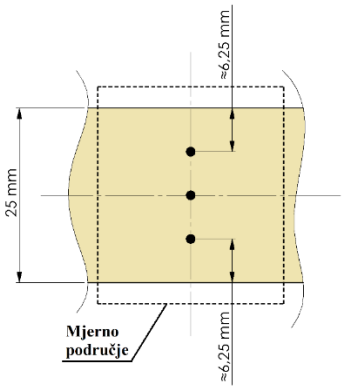
Slika 78. Eksperimentalni postav za ispitivanje novog steznog elementa

Na samom drvenom modelu s gornje strane vidljiva je zalijepljena šablona s označenim ispitnim mjestima te rastegnuta gumica koja služi kao indikator za poravnavanje modela na željeno ispitno mjesto na obodu. Ispitni položaji koji se nalaze na šabloni prikazani su i na Slici 79. Svaki od ispitnih položaja odabran je na ravnom dijelu modela izuzev položaja B1 koji je dio kružnice velikog radijusa te ga se može smatrati približno ravnim. Osim samih oznaka ispitnih položaja, prikazani su i kutovi koji definiraju svaki položaj.



Slika 79. Ispitni položaji na modelu jarma

Kao i kod mjerenja deformacija u prvom eksperimentu, i kod ovog eksperimenta deformacije po širini trake su mjerene u tri točke. Te tri točke nalaze se u sredini te iznad i ispod sredine trake. Približan položaj točaka prikazan je na Slici 80.



Slika 80. Mjerne točke za određivanje deformacije po visini trake

4.4. Provedba eksperimenta

Za samu provedbu eksperimenta namotani su po jedan uzorak s 2 i 3 sloja. Budući da svrha eksperimenta nije ispitivanje samih traka već gubitka narinute sile na različitim mjestima po obodu jarma, nije bilo potrebno namatati više uzoraka.

Ideja ispitivanja je da se prvo ispituje traka s 2 sloja do gubitka integriteta kako bi se na njoj odredio približni iznos momenta koji se može primijeniti do gubitka integriteta trake. Početni moment prednaprezanja s kojim su vijci opterećeni iznosio je M_1 = 20 Nm. Taj moment je odabran budući da je najmanji mjerljivi moment dostupnog moment ključa. Nakon unosa početnog momenta raster je snimljen na mjernom mjestu A1 koristeći mjernim sustavom Aramis i predstavljao je referentni raster. Nakon opterećenja početnim referentnim momentom svaki daljnji inkrement povećanja momenta iznosio je M_i = 5 Nm te je nakon svakog takvog povećanja ponovno slikana traka. Zadnji moment koji je traka izdržala iznosio je M_4 = 35 Nm te je prilikom stezanja na idući moment od M_5 = 40 Nm došlo do njenog pucanja. Ispitivanje tog probnog uzorka s 2 sloja prikazuje Slika 81. a mjesto gubitka integriteta trake Slika 82.

Slika 81. Ispitivanje nove varijante steznih elemenata

Slika 82. Puknuće trake s 2 sloja prilikom ispitivanja

Tijekom ispitivanja sa steznim elementom s tri sloja opterećivanje je provedeno s istim momentima kao i kod elemenata s 2 sloja. Budući da je bitno da se snime deformacije na svim mjernim mjestima (Slika 79.) odabrani su isti momenti pritezanja vijaka kao bi se stalo na stranu sigurnosti da traka ne pukne prije završetka eksperimenta. Dakle, uzorak s 3 sloja opterećivan je silama koje rezultiraju uslijed pritezanja vijaka momentima: M_1 = 20 Nm, M_2 = 25 Nm i M_3 = 30 Nm.

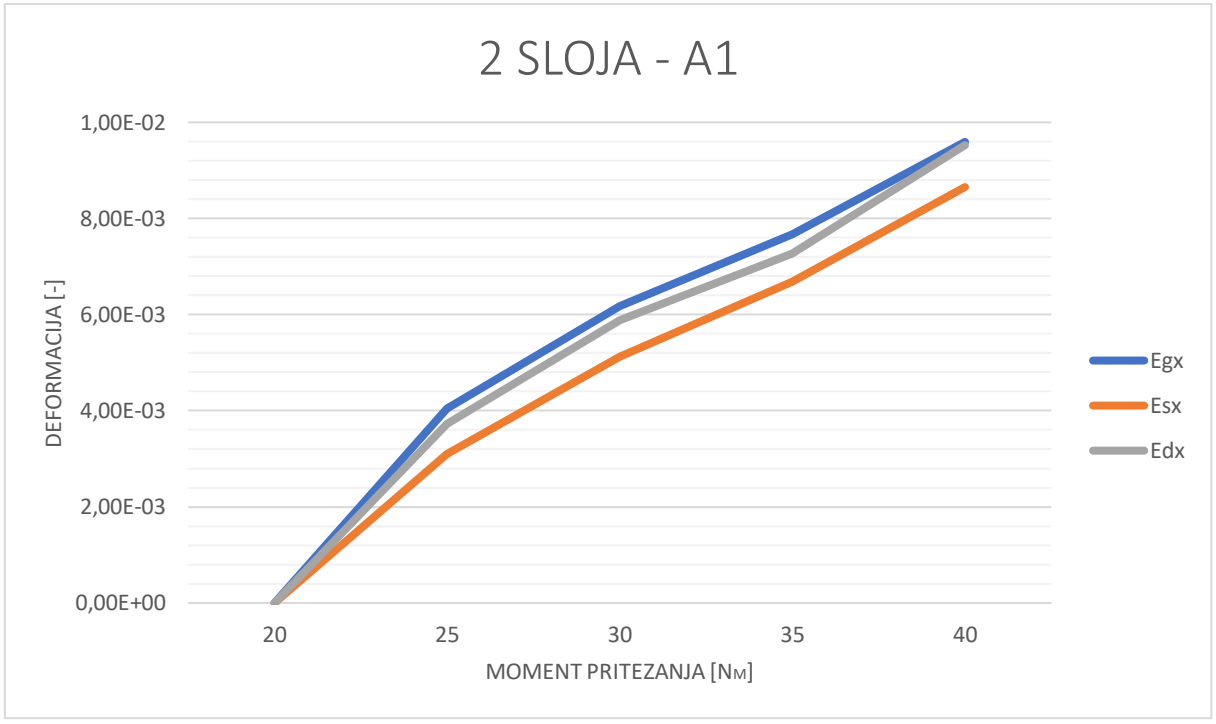
4.5. Prikaz rezultata eksperimenta

Budući da su deformacije na svakom od segmenata snimane za svaki moment pritezanja vijaka, to omogućuje dva različita načina grafičkog prikaza rezultata. Moguća je usporedba deformacija na mjernim mjestima u ovisnosti o momentu pritezanja vijaka te usporedba deformacija na različitim mjernim mjestima za isti moment pritezanja vijaka. Brojčani rezultati ispitivanja dani su u Tablici 10.

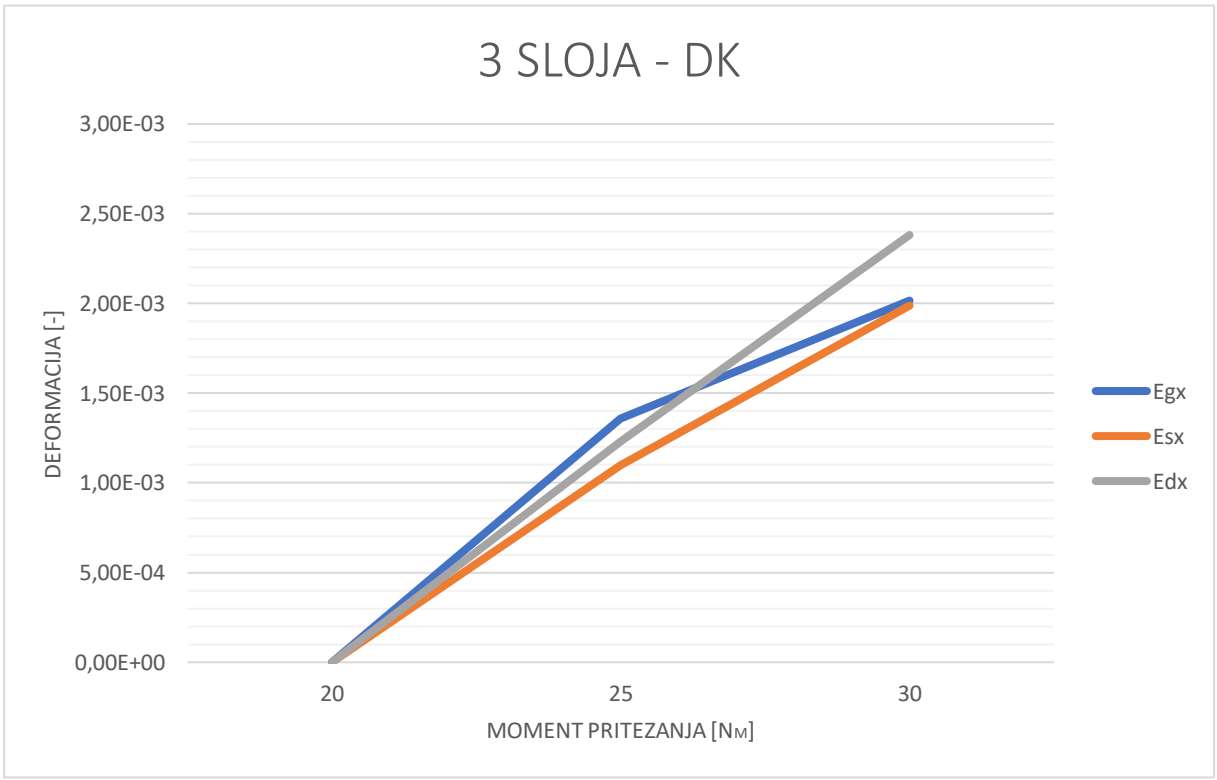
Tablica 10. Rezultati za deformacije dobiveni mjernim sustavom Aramis

Grupa uzoraka (broj slojeva)	Pozicija na modelu (Slika 79.)	Deformacija [-] (Slika 80.)			Moment pritezanja vijaka [Nm]	Prosječna vrijednost deformacije [-]	Napomena
		Gore (Egx)	Sredina (Esx)	Dolje (Edx)			
2	A1	0	0	0	20	0	Mjerno ishodište
	A1	0.00405	0.003105	0.003721	25	0.003625	
	A1	0.006171	0.005122	0.005886	30	0.005727	
	A1	0.007674	0.006679	0.007273	35	0.007209	
	A1	0.009594	0.008654	0.009526	>35	0.009258	Puklo tijekom stezanja
3	DK	0	0	0	20	0	
	DK	0.001359	0.001099	0.001229	25	0.001229	
	DK	0.002016	0.001988	0.002381	30	0.002128	
	A1	0	0	0	20	0	
	A1	0.001299	0.001291	0.001283	25	0.001291	
	A1	0.001403	0.001469	0.00157	30	0.001481	
	B1	0	0	0	20	0	
	B1	0.001584	0.001434	0.001368	25	0.001462	
	B1	0.002181	0.002088	0.002057	30	0.002109	
	C1	0	0	0	20	0	
	C1	0.000008	-0.000016	0.000033	25	0.000008	
	C1	0.003615	0.003428	0.003583	30	0.003542	
	D1	0	0	0	20	0	
	D1	8.6E-05	0.000949	0.000128	25	0.000388	
	D1	-	-	-	30	-	

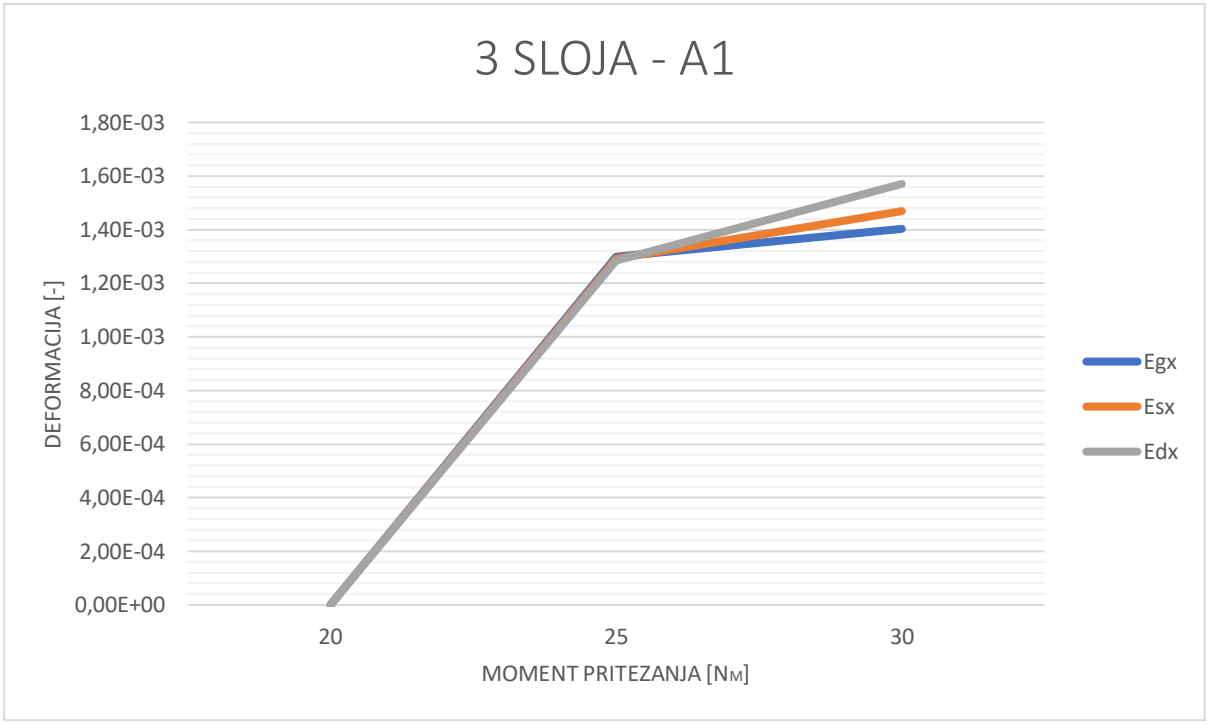
Promjena deformacije u ovisnosti o momentu pritezanja vijaka na svakom od mjernih mjesta prikazuje Slika 83. 88., dok su promjene deformacije u ovisnosti o mjernom mjestu za konstantni moment pritezanja prikazane na Slici 89 i Slici 90.



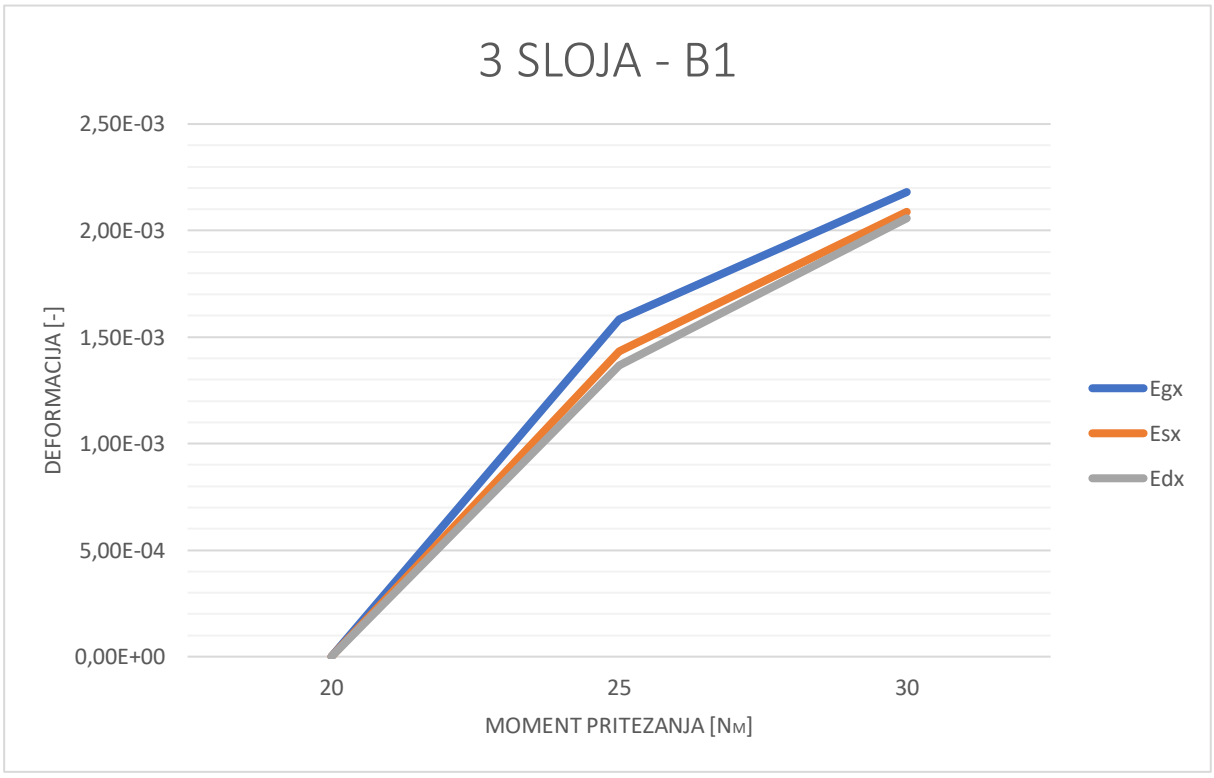
Slika 83. Deformacije steznog elementa s 2 sloja na mjernom mjestu A1



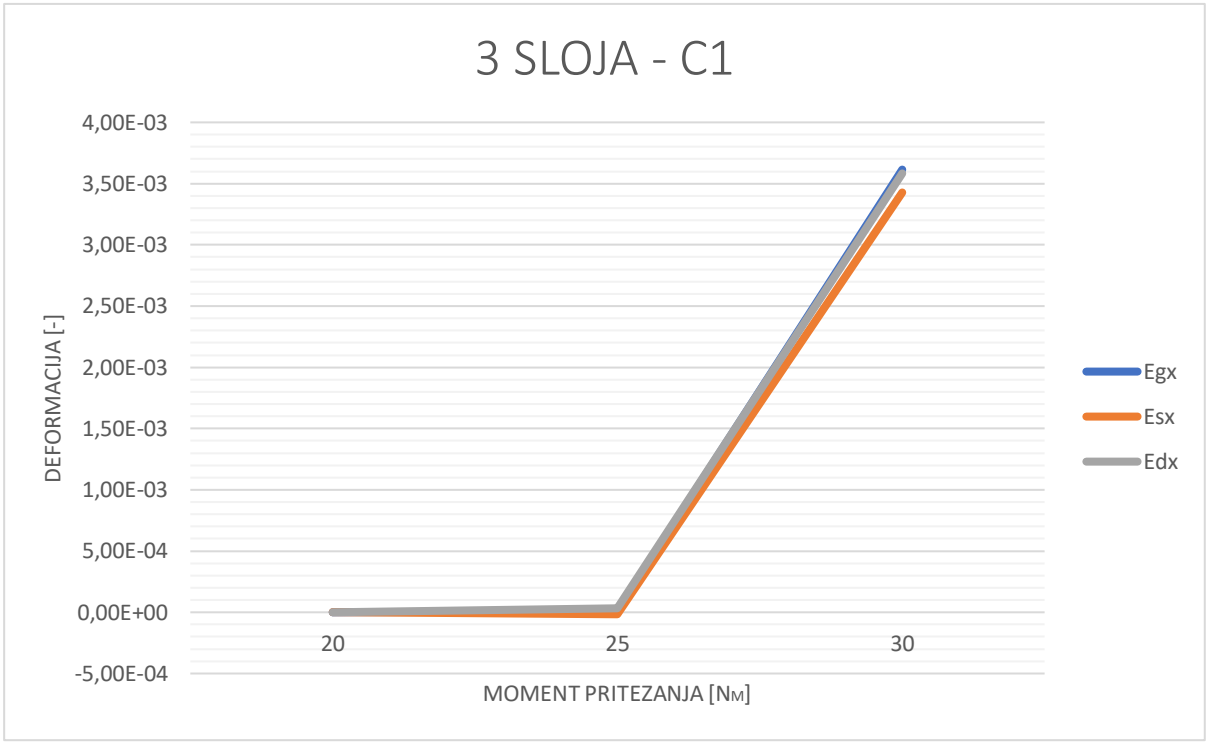
Slika 84. Deformacije steznog elementa s 3 sloja na mjernom mjestu DK



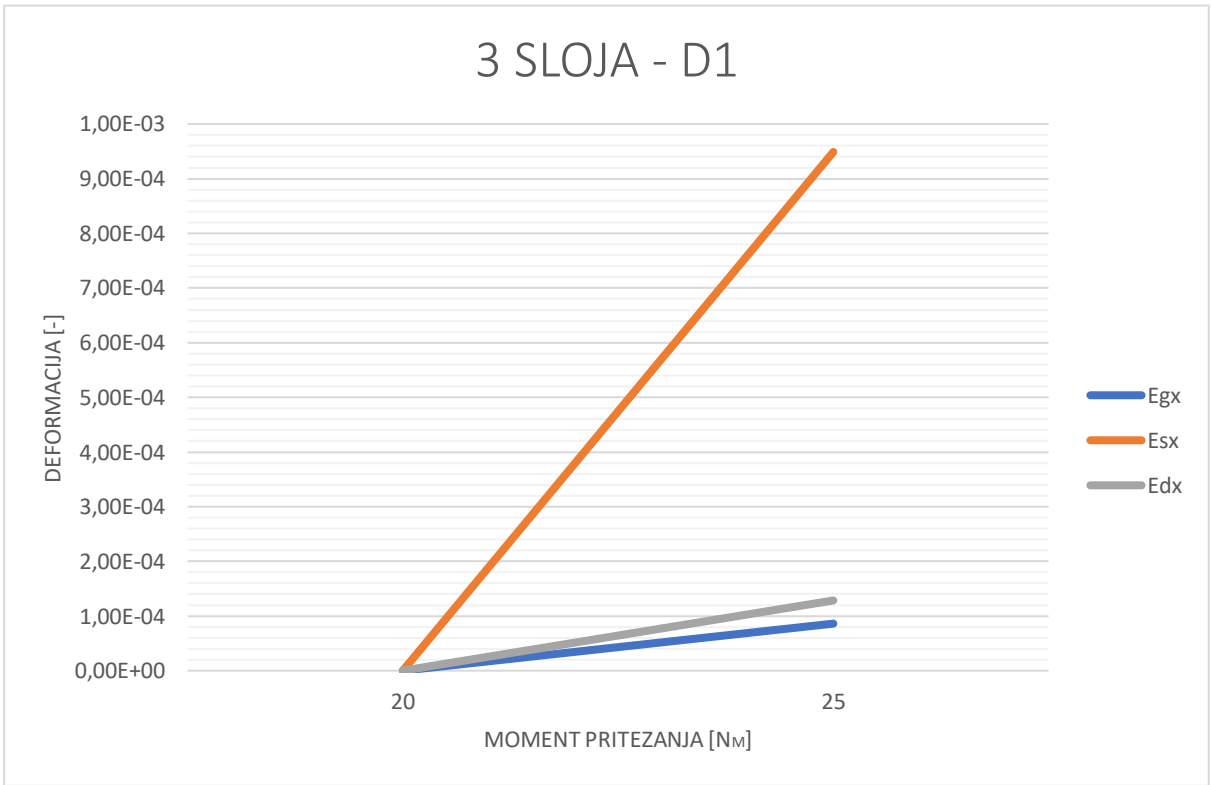
Slika 85. Deformacije steznog elementa s 3 sloja na mjernom mjestu A1



Slika 86. Deformacije steznog elementa s 3 sloja na mjernom mjestu B1

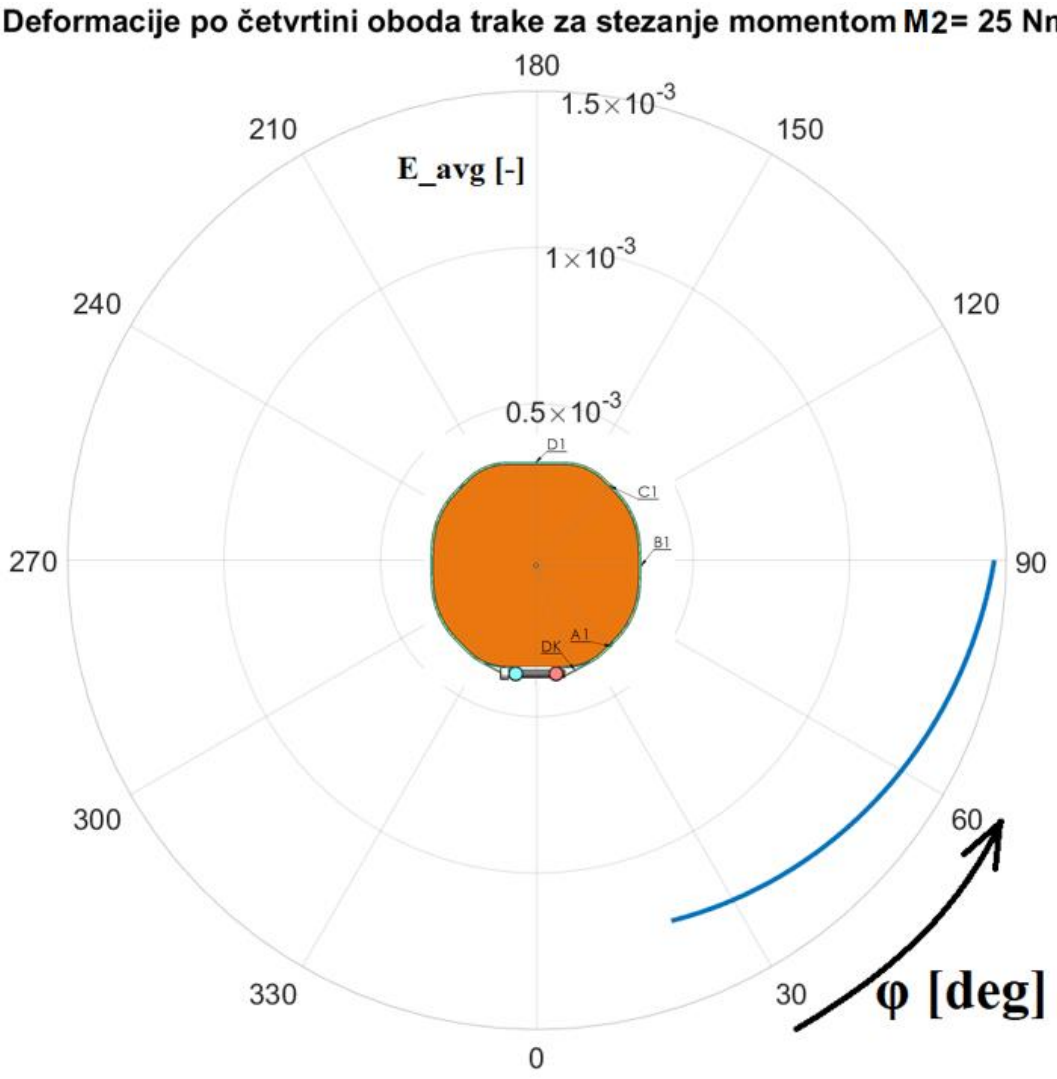


Slika 87. Deformacije steznog elementa s 3 sloja na mjernom mjestu C1

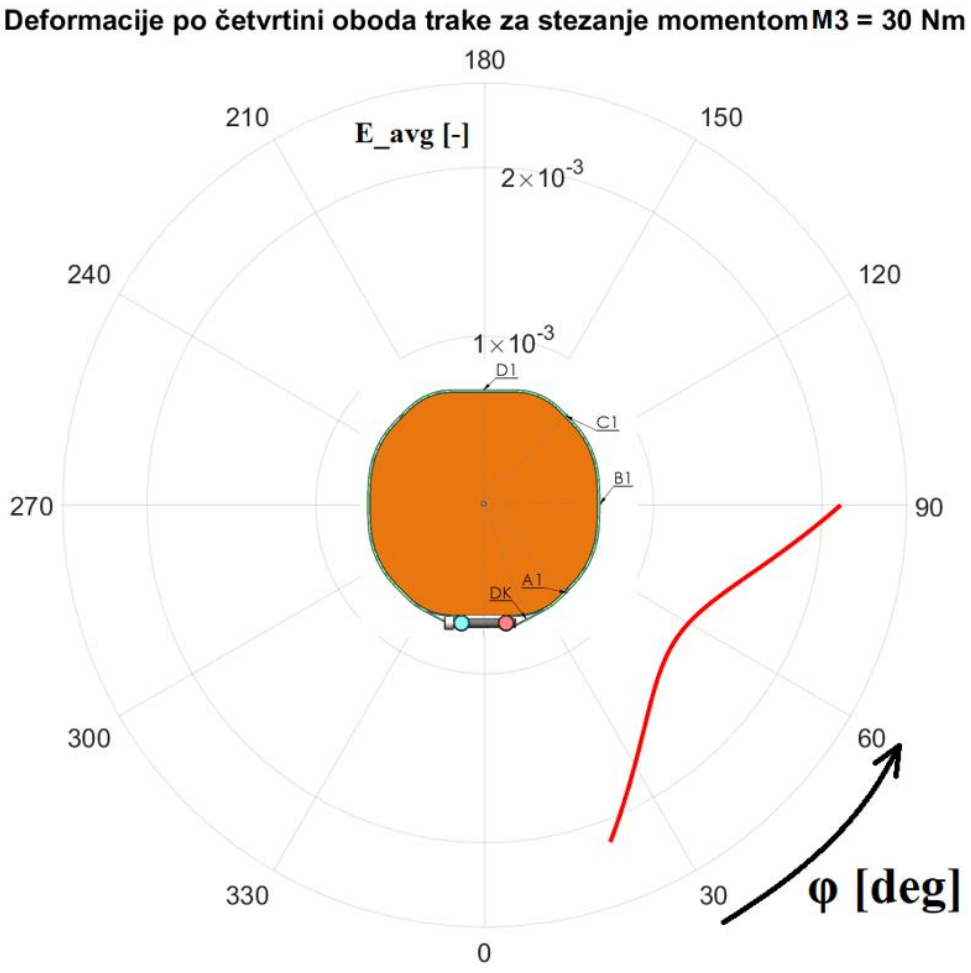


Slika 88. Deformacije steznog elementa s 3 sloja na mjernom mjestu D1

Na polarnim dijagramima (Slika 89. i Slika 90.) dane su deformacije u ovisnosti o momentu pritezanja vijaka samo za početnu polovinu mjerne domene. Razlog za to je nemogućnost interpretacije mjerenja deformacija u točkama C1 te D1. Ukoliko se u Tablici 10. pogledaju vrijednosti deformacija provedenih mjerenja po širini trake u točkama C i D, jasno se vidi da se ona međusobno razlikuju i preko 10 puta. Takvi rezultati najblaže rečeno su nepouzdani te nisu pogodni za donošenje zaključaka temeljem njih.



Slika 89. Prikaz deformacija po četvrtini oboda za moment pritezanja vijaka M_2 = 25 Nm



Slika 90. Prikaz deformacija po četvrtini oboda za moment pritezanja vijaka M_3 = 30 Nm

4.6. Zaključak eksperimenta

Tijekom stezanja probne trake s 2 sloja identificirani mehanizam gubitka integriteta je pucanje trake oko nateznih osovina. Traka se postavila na jaram na način da je njena vanjska polimerizirana strana okrenuta jarmu u ispitnoj točki D1 gdje se očekuje najmanja preostala sila u traci te gdje je opasnost od odljepljivanja trake najmanja.

Snimljene deformacije u dva provedena koraka stezanja na mjestima DK, A1 i B1 po širini trake ne razlikuju se značajno. Time ti rezultati dobivaju na težini te bi logično bilo zaključiti da su ti rezultati valjani i podobni za interpretaciju. Deformacije na mjernim mjestima C i D po širini trake razlikuju se i do 10 puta. Takve razlike u deformacijama, posebice po širini trake nisu očekivane te se s pravom može sumnjati u podudarnost snimljenih deformacija s stvarnim slučajem. No, analizom dijela podataka koji se čine vjerodostojnima, može se zaključiti da pad naprezanja u traci odnosno pad narinute sile u traci po obodu nije značajan. Takav zaključak

prikazuje i Slika 89. te Slika 90. Naime, ukoliko se obrati pozornost na razliku između najniže i najviše vrijednosti na prikazanim krivuljama, mogu se izvesti određeni zaključci. U Tablici 11. dane su vrijednosti najmanjih, prosječnih i najvećih deformacija za ispitnu grupu s 3 sloja. Navedene vrijednosti dakle ogovaraju najvećim, prosječnim te srednjim vrijednostima krivulja na Slici 89 i Slici 90.

Tablica 11**. Najmanje, prosječne i najveće deformacije po obodu modela za ispitnu grupu s 3 sloja**

Ispitna grupa (broj slojeva)	Moment pritezanja, M [Nm]	Deformacije [-]		
		Najmanja	Srednja	Najveća
3	25	0.00123	0.0013	0.001462
	30	0.001384	0.0016	0.00213

Analizom iznosa deformacija koje se prilikom stezanja javljaju dolazi se do zaključka da je

- najveća deformacija koja se javlja prilikom stezanja vijaka sa momentom M_2 = 25 Nm, na prvoj polovici mjerne domene je 12,46% veća od prosječne vrijednosti, dok je najmanja deformacija koja se javlja za 5,4% niža od prosječne,
- najveća deformacija koja se javlja prilikom stezanja vijaka sa momentom M_3 = 30 Nm, na prvoj polovici mjerne domene je 33,1% veća od prosječne vrijednosti dok je najmanja deformacija koja se javlja za 13,5% niža od prosječne.

Takvi rezultati inženjerski su prihvatljivi te mog biti ispravni ukoliko se to potvrdi provođenjem opsežnijeg ispitivanja sa statistički relevantnim brojem mjerenja i uzoraka. To je ujedno i smjernica za daljnje istraživanje nove izvedbe steznog elementa.

5. ZAKLJUČAK

U okviru rada provedena su dva eksperimentalna ispitivanja. Prvo ispitivanje vezano je uz postojeće stezne elemente koji se koriste u steznom sustavu jezgre Končar – Energetskih transformatora dok je drugo ispitivanje vezano uz predloženi novi način stezanja jarma koji bi omogućio efikasniju te cjenovno povoljniju konstrukciju. Prvi eksperiment opisao je mehanizam pucanja steznih elemenata na eksperimentalnom postavu te prikazao njegove sličnosti i različitost s mehanizmom pucanja steznih elemenata u ugradbenom slučaju na jezgri transformatora. Osim takve kvalitativne usporedbe, kvantitativno se odredio doprinos broja slojeva traka ukupnoj nosivosti steznog elementa. Isto tako, dokazan je snažan utjecaj proizvodnih parametara na konačna mehanička svojstva steznih elemenata. Drugi eksperiment rezultirao je indikacijom da novi način stezanja jarma ima potencijal da pruži adekvatnu pritisnu silu na limove. To opravdava daljnje ulaganje u istraživanja odnosno daljnji razvoj takvog rješenja stezanja.

LITERATURA

[1] McKinsey, »Global Energy Perspective 2019: Reference Case,« Energy Insights, 2019..

[2] B. Petrolium, »BP Energy Outlook: 2019 edition,« 2019.

[3] M. Brain i D. Roos, »HowStuffWorks.com,« 1 Travanj 2000.. [Mrežno]. Available: https://science.howstuffworks.com/environmental/energy/power.htm. [Pokušaj pristupa 8 Studeni 2019].

[4] E. Komisija, »UREDBA KOMISIJE (EU) br. 548/2014,« *Službeni list Europske unije,* pp. 152/1 - 152/15, 21 Svibanj 2014..

[5] »edutorij.e-skole.hr,« [Mrežno]. Available: https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/452e1469-e362-4711-abcb-6f535c3b5254/html/7590_Transformatori.html.

[6] M. J. Heathcote, The J & P Transformer Book, Burlington: Elsevier, 2007..

[7] S. Ravlić, Ur., »Hrvatska enciklopedija,« u *Hrvatska enciklopedija, svezak 11*, Verbum, 2009..

[8] L. W. Matsch, »vias.org,« [Mrežno]. Available: http://www.vias.org/matsch_capmag/matsch_caps_magnetics_chap6_05_02.html. [Pokušaj pristupa 5 Studeni 2019.].

[9] D. Žarko. [Mrežno]. Available: https://www.scribd.com/doc/219601671/Autotransformator.

[10] »https://www.ete.co.uk/product/variable-autotransformer-10-amp-bench-mounted-1ph/,« [Mrežno].

[11] »https://www.directindustry.com/prod/siemens-high-voltage-power-transmission/product-32878-723751.html,« [Mrežno].

[12] »https://www.ato.com/2-kva-isolation-transformer,« [Mrežno].

[13] »http://www.biltekelektrik.com/urun/tamagawa-ts2620n581e97-resolver/,« [Mrežno].

[14] »http://www.koncar-mjt.hr/proizvodi/srednjenaponski_mjerni_transformatori,« [Mrežno].

[15] »https://longshengelectronic.en.made-in-china.com/product/ObFxMVUdkCap/China-Audio-Frequency-Transformer-20Hz-to-20kHz-Available-in-Various-Sizes.html,« [Mrežno].

[16] »en.wikipedia.org,« 24 Ožujak 2007.. [Mrežno]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Transformer. [Pokušaj pristupa 14 Studeni 2019.].

[17] »https://cnorinno.en.alibaba.com/product/342873569-210452327/Stacked_Transformer_Lamination_Core.html,« [Mrežno].

[18] »https://previews.123rf.com/images/teptong/teptong1807/teptong180700080/104661327-step-lap-interleaved-transformer-core-during-manufacturing-while-stacking-the-silicon-steel-sheets-f.jpg,« [Mrežno].

[19] A. Baggini, »Power Transformers – Introduction to measurement of losses,« European Union, 2016..

[20] »https://www.motioncontroltips.com/hysteresis-loss/,« [Mrežno].

[21] »https://globecore.com/cooling-of-transformer.html,« [Mrežno].

[22] »https://www.kelvion.com/products/product/transformer-oil-pumps/,« [Mrežno].

[23] »http://img.everychina.com/nimg/0d/65/07601fc0df878f576c0b628a23ce-600x600-0/galvanized_non_grain_oriented_silicon_steel_crgo_electrical_steel_rust_proof.jpg,« [Mrežno].

[24] E. Csanyi, »https://electrical-engineering-portal.com/power-transformer-construction-core,« 23 Kolovoz 2012. [Mrežno].

[25] »https://www.taiyilaser.com/sale-9298688-ipg-raycus-cnc-fiber-laser-cutting-machine-laser-sheet-metal-cutter-ty-3015dd.html,« [Mrežno].

[26] »https://www.indiamart.com/proddetail/crgo-lamination-13893919688.html,« [Mrežno].

[27] »https://www.georg.com/china/en/products/transformer-lines/core-stacking-tables/,« [Mrežno].

[28] »https://www.123rf.com/photo_114394014_interleaved-step-lap-core-of-three-phase-transformer-in-assembly-line-made-of-cold-rolled-grain-orie.html,« [Mrežno].

[29] »https://eurogulftransformers.com/capabilities/manufacturing-process/,« [Mrežno].

[30] J. C. Olivares-Galvan, P. S. Georgilakis, E. Campero-Littlewood and R. Escarela-Perez, "Core lamination selection for distribution transformers based on sensitivity analysis," *Electrical Engineering,* pp. 33-42, 29 Veljača 2012..

[31] J. Barranger, HYSTERESIS AND EDDY-CURRENT LOSSES OF A TRANSFORMER LAMINATION VIEWED AS AN APPLICATION OF THE POYNTING THEOREM, Sves. %1 od %2TN D-3114, Cleveland, Ohio: NASA TECHNICAL NOTE, 1965.

[32] »https://www.thoughtco.com/table-of-electrical-resistivity-conductivity-608499,« [Mrežno].

[33] C. Freitag, »Magnetic Properties of Electrical Steel, Power Transformer Core Losses and Core Design Concepts,« Karlsruhe, 2017..

[34] Von Roll, [Mrežno]. Available: https://www.vonroll.com/en/product-detail/polyglas-h-200/?id=product12143. [Pokušaj pristupa 18 Prosinac 2019.].

[35] V. Roll, »Polyglas® Banding Tapes,« [Mrežno]. Available: https://www.vonroll.com/userfiles/downloads/1529067070144574/VonRoll_PolyglasBrochure_2018_A3_03.pdf. [Pokušaj pristupa 18 Prosinac 2019.].

[36] »Banding tapes, Polyglas® P30 (251.10), tehnička specifikacija,« Von Roll, 2018..

[37] »https://trilion.com/digital-image-correlation/,« [Mrežno].

[38] »https://trilion.com/aramis/,« [Mrežno].

[39] S. E. Zirka, Y. I. Moroz, P. Marketos and A. J. Moses, "Comparison of engineering methods of loss prediction in thin ferromagnetic laminations," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials,* pp. 2504-2508, 12 Svibanj 2008..

[40] K. Karsai, D. Kerenyi and L. Kiss, Large Power Transformers, Budapest: Muszaki Konyvkiado, 1987..

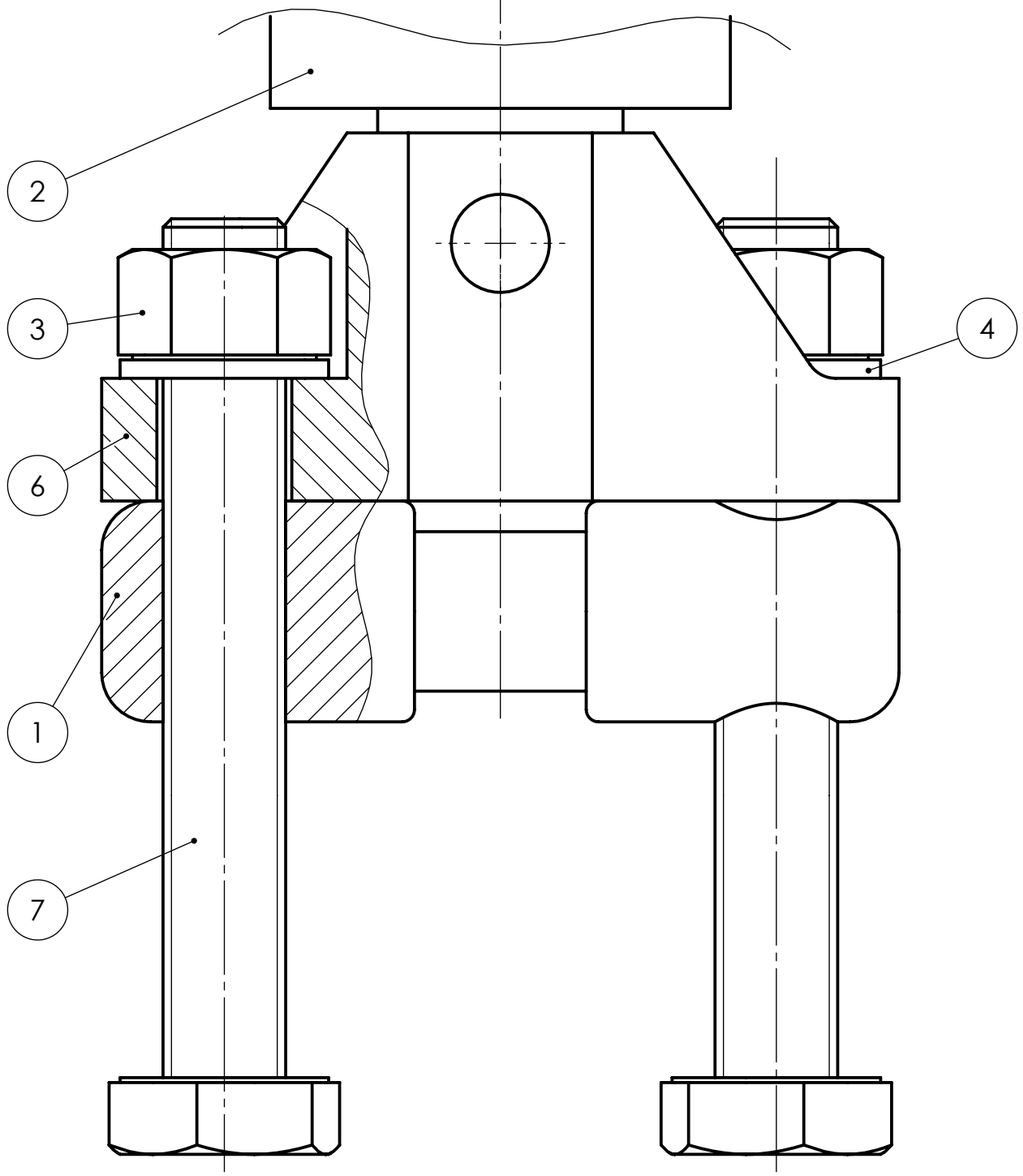
[41] N. Hasan, N. R. Nadi, M. A. Haroon and M. A. Akik, "Supervising the Stacking Factor and Magnetic Flux Density: An Effort to Reduce the Loss of Distribution Transformer," *International Journal of Microwaves Applications,* pp. 36-40, Veljača 2013..

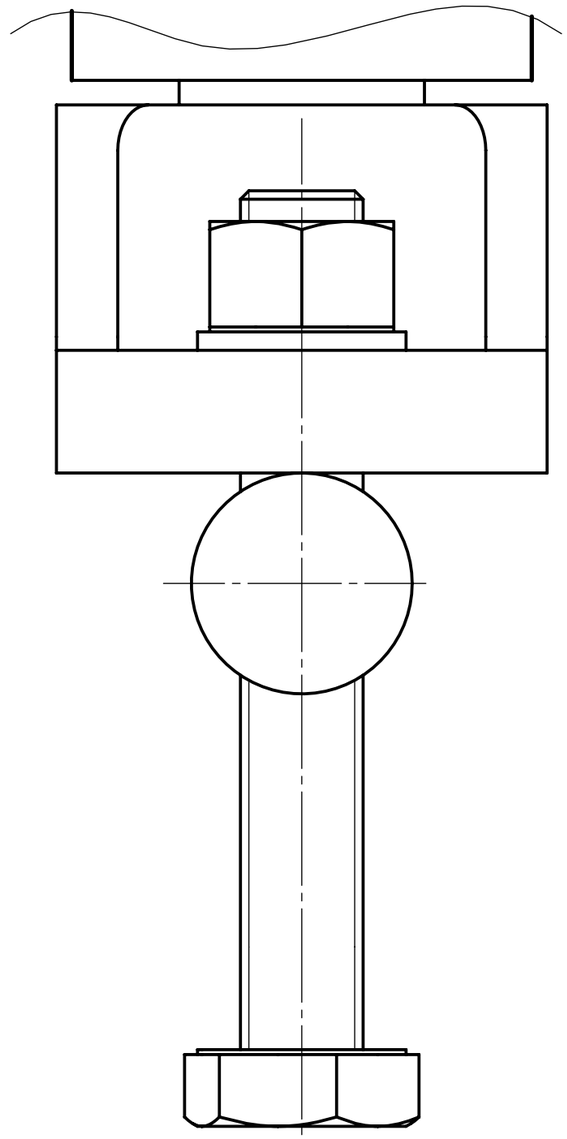
[42] Enerdata, »yearbook.enerdata.net,« Enerdata, 2019.. [Mrežno]. Available: https://yearbook.enerdata.net/electricity/world-electricity-production-statistics.html.

PRILOZI

I. CD-R disc

II. Tehnička dokumentacija





POZ.	Naziv dijela	Kom.
7	ISO 7412 - M20 x 140 --- 140-WN	2
6	Prihvat	1
4	Podloška DIN 433 - 21	2
3	Matica ISO - 4032 - M20 - W - N	2
2	Klip kidalice	1
1	OKRUGLI IZVEDBA A	1

		Datum	Ime i prezime	Potpis
Broj naziva - code	Projektirao			
	Razradio			
	Crtao	2.1.2020.	Davor Ruganec	
	Pregledao			
	Mentor			

FSB Zagreb

ISO - tolerancije

Objekt:

Objekt broj:

R. N. broj:

Napomena:

Kopija

Materijal:

Masa:

Mjerilo originala 1:1

Naziv: Sklop naprave za kidanje

Pozicija:

Format: A3

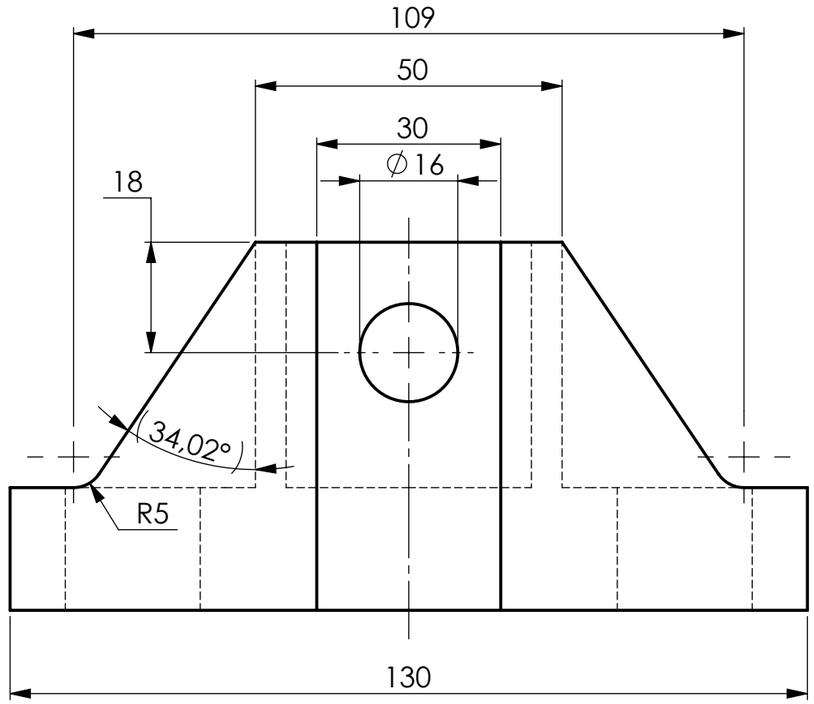
Listova: 1

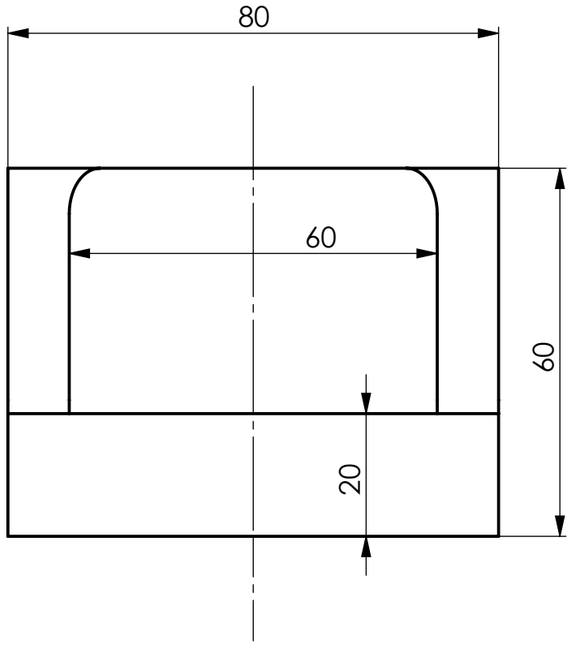
Crtež broj: S-001

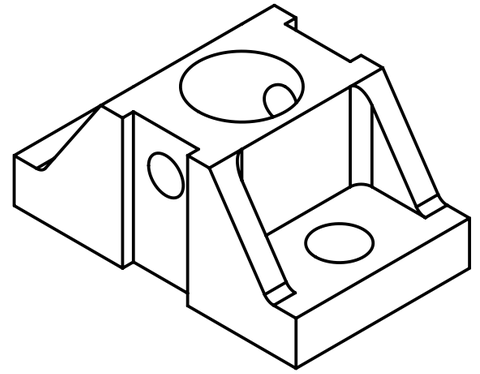
List: 1

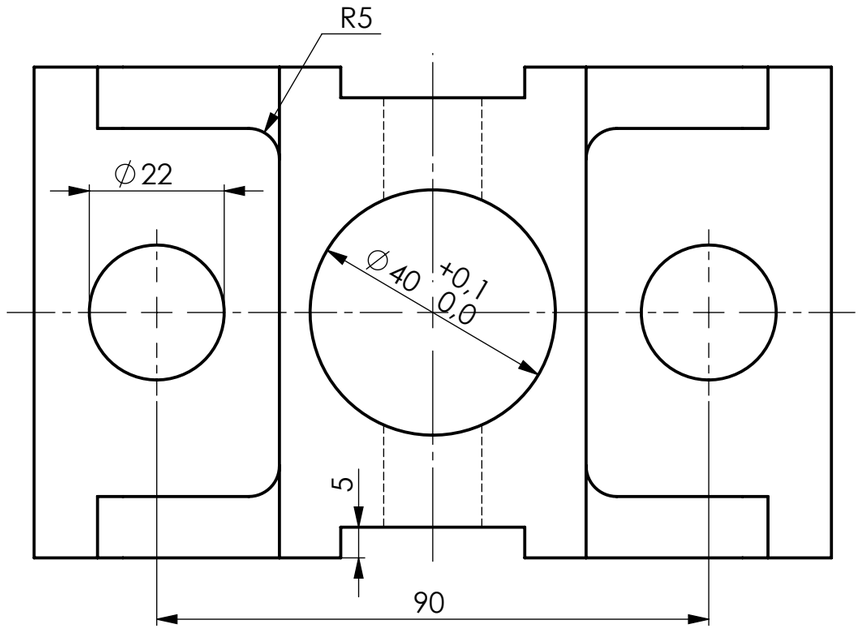
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100

Design by CADLab









Broj naziva - code		Datum	Ime i prezime	Potpis
	Projektirao			
	Razradio			
	Crtao	5.11.2019.	Davor Ruganec	
	Pregledao			
	Mentor			

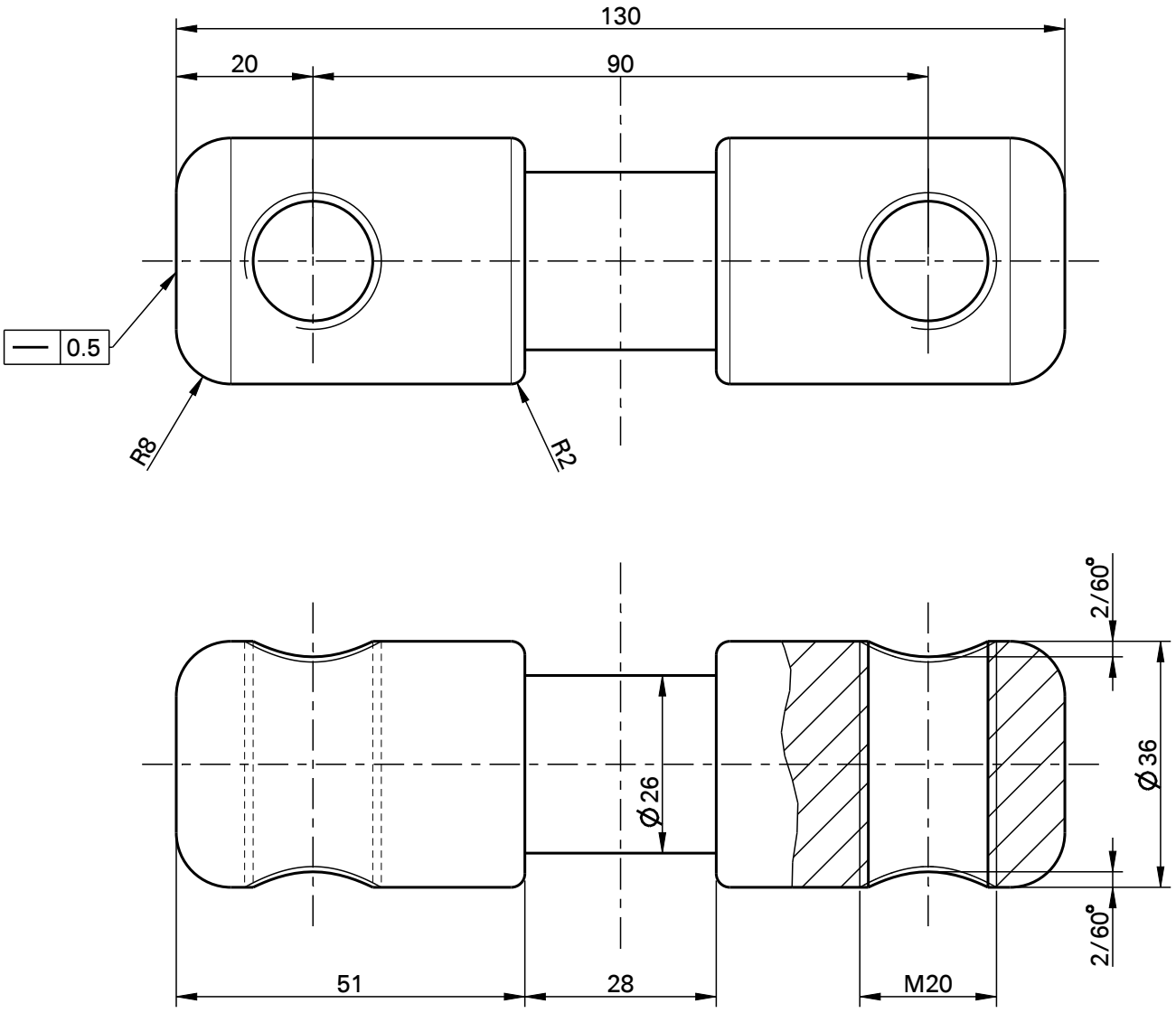
FSB Zagreb

ISO - tolerancije	Objekt:	Objekt broj:	
		R. N. broj:	
	Napomena:		Kopija
	Materijal: S235JR	Masa: 2,3	
	Mjerilo originala 1:1	Naziv: Prihvat	Pozicija: 1
		Crtež broj: D-001	Format: A3
			Listova: 1
			List: 1

Design by CADLab

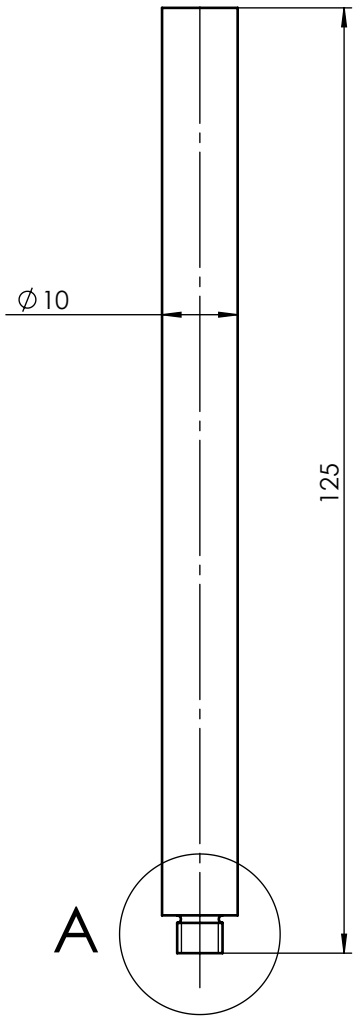
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100

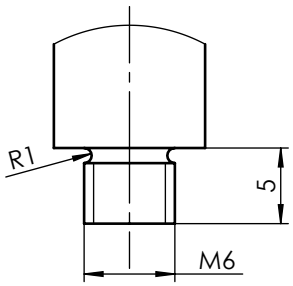
Dokument je izdan u elektroničkom obliku. Punovažan je bez potpisa i ostaje u isključivom vlasništvu društva Končar Energetski transformatori d.o.o. Pretisak i upotreba izvan namjene nisu dozvoljeni.
This document is published electronically. It is valid without signature. The document remains the exlusive property of the Končar Power Transformers Ltd. Reproduction or any use not in conformity with the intended application is not permissible.



Dekor: E24960

Broj dijela transformatora: CAD	Tip transformatora:	Naziv projekta:			Tolerancija slobodnih mjera: QA-UR 04.108	
SAP Broj materijala:	Naziv materijala: S355J2; DIA 36				Mjerilo:	
Datum: 03-07-2016 01:55 Izradio: Simić Ispitao: Nenadić Odobrio: Nenadić	Naziv: OKRUGLI IZVEDBA (A)				KPT EN D CREO/A4	
Končar Energetski transformatori d.o.o.	Broj dijela: 3W00046136	Promjena broj:	Izdanje: A.3	Broj crteža: B100111100	Masa: 0.78	List/listova: 1/1





A (2 : 1)

Broj naziva - code		Datum	Ime i prezime	Potpis
	Projektirao			
	Razradio			
	Crtao	10.12.2019.	Davor Ruganec	
	Pregledao			

FSB Zagreb

ISO - tolerancije	Objekt:	Objekt broj:	
		R. N. broj:	
	Napomena:		Kopija
	Materijal: S235JR	Masa:	
	Mjerilo originala 1:1	Naziv: Prihvat na opticki stol	Pozicija: 1
		Crtež broj: A-01	Format: A4
			Listova: 1
			List: 1

Design by CADLab