

# Utjecaj predopterećenja na rezultate vlačnog umjeravanja kidalice

---

**Renjo, Robert**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2010**

*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:235:448522>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-27**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



**Sveučilište u Zagrebu**

**Fakultet strojarstva i brodogradnje**

**DIPLOMSKI RAD**

**Robert Renjo**

Zagreb, 2010.

**Sveučilište u Zagrebu**

**Fakultet strojarstva i brodogradnje**

# **DIPLOMSKI RAD**

**Mentor:**

**Doc. dr. sc. Danko Ćorić**

**Prof. dr. sc. Janoš Kodvanj**

**Robert Renjo**

Zagreb, 2010.

## **Sažetak**

U ovom je radu provedena analiza utjecaja broja predopterećenja na rezultate statičkog vlačnog umjeravanja kidalice.

U teorijskom dijelu rada opisana je uloga kidalica i značaj njihovog umjeravanja te etalonska mjerna oprema i princip njena rada. Detaljno je razrađen postupak umjeravanja kidalice sukladno normi DIN EN ISO 7500-1.

U praktičnom dijelu rada provedena su umjeravanja kidalice s različitim brojem predopterećenja. Na temelju dobivenih rezultata umjeravanja provedena je usporedba rezultata te su donijeti određeni zaključci o utjecaju predopterećenja na karakteristične pogreške mjernog sustava kidalice.

# Sadržaj

Sažetak .....	I
Popis slika .....	IV
Popis tablica .....	VI
Izjava i zahvala.....	IX
1. UVOD .....	1
2. Statičko vlačno ispitivanje .....	2
3. Kidalice .....	6
4. Umjeravanje .....	12
4.1. Sljeđivost.....	12
4.2. Mjerna nesigurnost.....	15
4.2.1. Mjerna nesigurnost kod umjeravanja kidalice .....	17
4.2.1.1. Najbolja mjerna sposobnost .....	17
4.2.1.2. Dodatne mjerne nesigurnosti prijenosnih etalona sile.....	18
4.2.1.3. Mjerna nesigurnost umjeravanja kidalice .....	18
4.2.1.4. Proširena mjerna nesigurnost .....	19
5. Etalonski mjerni sustav .....	20
5.1. Prijenosni etaloni sile .....	20
5.1.1. Dinamometar.....	21
5.1.1.1. Mjerne trake .....	22
5.1.2. Mjerno pojačalo.....	27
5.1.2.1. Princip rada mjernog pojačala.....	30
5.1.2.2. Filtriranje signala.....	31
6. Umjeravanje kidalice prema normi DIN EN ISO 7500-1 .....	34
6.1. Opći pregled kidalice .....	34
6.2. Umjeravanje sustava za mjerenje sile .....	35
6.2.1. Općenito .....	35
6.2.2. Određivanje rezolucije .....	36
6.2.3. Priprema kidalice za umjeravanje .....	37

---

6.2.4. Postupak umjeravanja .....	37
6.2.4.1. Relativna pogreška reverzibilnosti .....	39
6.2.4.2. Relativna pogreška točnosti .....	39
6.2.4.3. Relativna pogreška ponovljivosti .....	40
6.2.4.4. Podudarnost između dva prijenosna etalona sile.....	40
6.2.4.5. Određivanje klase mjernog područja.....	40
6.2.5. Učestalost umjeravanja .....	41
7. 7 Eksperimentalni dio.....	42
7.1. Plan eksperimentalnog dijela .....	42
7.2. Ispitivana kidalica .....	43
7.3. Prijenosni etalon sile .....	44
7.4. Umjeravanje .....	46
7.5. Rezultati umjeravanja.....	50
7.6. Rasprava rezultata .....	60
7.7. Zaključak.....	67
8. Literatura .....	69

# Popis slika

Slika 1	Dijagram kidanja.....	3
Slika 2	Dijagram naprezanje-istezanje.....	4
Slika 3	Elektromehanička kidalica.....	8
Slika 4	Hidraulička kidalica.....	9
Slika 5	Utjecaj upravljanja na rezultate vlačnog ispitivanja (meki čelik).....	10
Slika 6	Piramida sljedivosti.....	14
Slika 7	Piramida sljedivosti za mjernu veličinu sile u Hrvatskoj.....	15
Slika 8	Uzroci mjerne nesigurnosti.....	16
Slika 9	Metode za procjenu mjerne nesigurnosti.....	16
Slika 10	Presjek dinamometra.....	21
Slika 11	Utjecaj deformacije na promjernu otpora mjerne trake.....	23
Slika 12	Mjerna traka.....	25
Slika 13	Wheatstonov most s četiri mjerne trake.....	26
Slika 14	Mjerna pojačala.....	28
Slika 15	Karakteristika DC pojačala.....	29
Slika 16	Karakteristika CF pojačala.....	29
Slika 17	Blok dijagram CF pojačala.....	30
Slika 18	Promjena signala u mjernom sustavu.....	31
Slika 19	Usporedba karakteristika visokopropusnog i niskopropusnog filtera.....	32
Slika 20	Hidraulična kidalica WPM EU 40 mod.....	43
Slika 21	Dinamometar Z4/500 kN.....	44
Slika 22	Mjerno pojačalo DMP 40.....	45
Slika 23	Prihvatne naprave za vlačno/tlačno opterećivanje.....	46
Slika 24	Tlačno predopterećenje kidalice i dinamometra.....	47
Slika 25	Shematski prikaz umjeravanja.....	48
Slika 26	Vlačno umjeravanje kidalice.....	49
Slika 27	Prikaz upravljačkog programa kidalice.....	50

Slika 28	Vrijednost mjernog signala pri induciranoj sili 80 kN.....	52
Slika 29	Vrijednost mjernog signala pri induciranoj sili 160 kN.....	52
Slika 30	Vrijednost mjernog signala pri induciranoj sili 240 kN.....	52
Slika 31	Vrijednost mjernog signala pri induciranoj sili 320 kN.....	52
Slika 32	Vrijednost mjernog signala pri induciranoj sili 400 kN.....	52
Slika 33	Mjerni signal za rastući i padajući niz te referentna vrijednost za mjernu točku 80 kN.....	55
Slika 34	Mjerni signal za rastući i padajući niz te referentna vrijednost za mjernu točku 160 kN.....	55
Slika 35	Mjerni signal za rastući i padajući niz te referentna vrijednost za mjernu točku 240 kN.....	56
Slika 36	Mjerni signal za rastući i padajući niz te referentna vrijednost za mjernu točku 320 kN.....	56
Slika 37	Mjerni signal za rastući i padajući niz te referentna vrijednost za mjernu točku 400 kN.....	57
Slika 38	Relativno odstupanje između stvarne i inducirane sile za rastući niz.....	60
Slika 39	Relativno odstupanje između stvarne i inducirane sile za padajući niz.....	61
Slika 40	Relativna promjena stvarne sile inducirana predopterećenjem, rastući niz.....	61
Slika 41	Relativna promjena stvarne sile inducirana predopterećenjem, padajući niz.....	62
Slika 42	Relativna pogreška točnosti po mjernim točkama za različit broj predopterećenja.....	63
Slika 43	Relativna pogreška reverzibilnosti po mjernim točkama za različit broj predopterećenja.....	64
Slika 44	Relativna pogreška ponovljivosti po mjernim točkama za različit broj predopterećenja.....	64
Slika 45	Proširena mjerna nesigurnost po mjernim točkama za različit broj predopterećenja.....	65
Slika 46	Relativna pogreška nule dinamometra.....	67



## Popis tablica

Tablica 1 Vrijednosti relativnih pogrešaka za različite klase kidalice .....	40
Tablica 2 Karakteristike umjeravane kidalice .....	43
Tablica 3 Karakteristike dinamometra .....	44
Tablica 4 Karakteristike pojačala .....	45
Tablica 5 Vrijednosti relativne rezolucije .....	50
Tablica 6 Rezultati umjeravanja.....	51
Tablica 7 Referentne vrijednosti promjene napona.....	54
Tablica 8 Vrijednosti relativnih pogrešaka mjernog sustava sile.....	59
Tablica 9 Vrijednosti proširene mjerne nesigurnosti .....	65
Tablica 10 Vrijednosti mjernog signala kod vlačnih predopterećenja.....	66

## Popis oznaka i mjernih jedinica

Oznaka	Mjerna jedinica	Značenje
$L$	mm	Duljina epruvete
$\Delta L_u$	mm	Produljenje epruvete nakon kidanja
$L_u$	mm	Mjerna duljina epruvete nakon kidanja
$L_0$	mm	Početna mjerna duljina epruvete
$\sigma$	N/mm <sup>2</sup>	Naprezanje
$F$	N	Sila
$S$	mm <sup>2</sup>	Površina poprečnog presjeka
$S_0$	mm <sup>2</sup>	Početna površina poprečnog presjeka epruvete
$\varepsilon$	mm/mm	Relativno produljenje ili istežanje
$E$	N/mm <sup>2</sup>	Modul elastičnosti
$R_e$	N/mm <sup>2</sup>	Granica razvlačenja
$F_e$	N	Sila tečenja
$F_m$	N	Maksimalna sila
$R_m$	N/mm <sup>2</sup>	Vlačna ili rastezna čvrstoća
$R_k$	N/mm <sup>2</sup>	Konačno naprezanje
$F_k$	N	Konačna sila
$w_{CMC}$	%	Najbolja mjerna sposobnost
$w_t$	%	Mjerna nesigurnost uslijed temperaturnih varijacija
$w_s$	%	Mjerna nesigurnost uslijed utjecaja dugotrajne nestabilnosti osjetljivosti
$w_{dod}$	%	Ukupna dodatna mjerna nesigurnost prijenosnih etalona sile
$w(a)$	%	Mjerna nesigurnost uslijed rezolucije pokazivača sile kidalice
$w(b)$	%	Mjerna nesigurnost zbog rasipanja rezultata ponovljenih mjerenja
$s(\bar{X})$	%	Standardna devijacija srednje vrijednosti
$w(q)$	%	Mjerna nesigurnost umjeravanja kidalice
$w_c$	%	Sastavljena standardna mjerna nesigurnost
$W$	%	Proširena mjerna nesigurnost
$k$		Faktor pokrivanja
$R$	$\Omega$	Električni otpor

$a$	%	Relativna rezolucija pokazivača sile kidalice
$b$	%	Relativna pogreška ponovljivosti sustava za mjerenje sile
$f_0$	%	Relativna pogreška nule sustava za mjerenje sile
$F$	N	Stvarna sila očitana na etalonskom uređaju pri rastućoj ispitnoj sili
$F'$	N	Stvarna sila očitana na etalonskom uređaju pri padajućoj ispitnoj sili
$F_C$	N	Stvarna sila očitana na etalonskom uređaju pri rastućoj ispitnoj sili za dopunski niz mjerenja u najmanjem mjernom području
$F_i$	N	Sila očitana na pokazivaču sile kidalice pri rastućoj ispitnoj sili
$F'_i$	N	Sila očitana na pokazivaču sile kidalice pri padajućoj ispitnoj sili
$\overline{F_i}, \overline{F}$	N	Aritmetička sredina nekoliko mjerenja $F_i$ odnosno $F$ na istoj mjernoj točki
$F_{i\max}, F_{i\min}$	N	Najveća ili najmanja vrijednost sile $F_i$ odnosno $F$ za istu mjernu točku
$F_{\max}, F_{\min}$		
$F_{ic}$	N	Sila očitana na pokazivaču sile kidalice pri rastućoj ispitnoj sili za dopunski niz mjerenja u najmanjem mjernom području
$F_{i0}$	N	Ostatak sile očitana na pokazivaču sile kidalice nakon uklanjanja opterećenja
$F_N$	N	Maksimalna sila mjernog područja pokazivača sile kidalice
$g_n$	m/s <sup>2</sup>	Lokalno ubrzanje uzrokovano gravitacijom
$q$	%	Relativna pogreška točnosti sustava za mjerenje sile kidalice
$r$	N	Rezolucija pokazivača sile kidalice
$\nu$	%	Relativna pogreška reverzibilnosti sustava za mjerenje sile kidalice
$R$	$\Omega$	Električni otpor
$\rho$	S	Električna vodljivost
$X_1, X_2, X_3$	mV/V	Vrijednost mjernog signala pri rastućoj ispitnoj sili u nizovima 1, 2, 3
$X_{\text{ref}}$	mV/V	Referentna vrijednost mjernog signala
$X_{\text{sr}}$	mV/V	Srednja vrijednost mjernog signala
$X_{\text{max}}$	mV/V	Najveća vrijednost mjernog signala za određenu mjernu točku
$X_{\text{min}}$	mV/V	Najmanja vrijednost mjernog signala za određenu mjernu točku
$X_2'$	mV/V	Vrijednost mjernog signala pri padajućoj ispitnoj sili u nizu 2'
$i_f$	mV/V	Vrijednost mjernog signala očitana nakon rasterećenja
$i_0$	mV/V	Vrijednost mjernog signala očitana prije opterećenja
$X_N$	mV/V	Vrijednost mjernog signala pri maksimalnoj sili umjeravanja

## Izjava i zahvala

Izjavljujem da sam ovaj diplomski rad izradio samostalno koristeći znanje stečeno tijekom studija, navedenu literaturu i konzultacije.

Zahvalio bih svojem mentoru doc. dr. sc. Danku Ćoriću na pomoći, strpljenju i razumijevanju koje mi je iskazao tijekom izrade ovog rada.

Zahvalio bih svojoj obitelji, a posebno svojem bratu na pomoći koju mi je ukazivao tijekom studija.

Hvala svim ljudima koji su tijekom studija postali dijelom mojeg života. Hvala vam neizmjereno, nikad vas neću zaboravit.

---

Robert Renjo

## 1 UVOD

Mehanička svojstva materijala zauzimaju posebno mjesto među ostalim fizikalnim i kemijskim svojstvima, budući da se na osnovi njih dimenzioniraju dijelovi strojeva i uređaja. Mehanička svojstva realnih materijala moguće je točno utvrditi samo eksperimentalnim ispitivanjima u laboratoriju. Stoga je na području ispitivanja mehaničkih svojstava razvijena eksperimentalna oprema pomoću koje se epruvete opterećuju na način kako će odgovarajući strojni dijelovi biti opterećeni tijekom eksploatacije. Epruvete su uzorci na kojima se provode ispitivanja; normiranog su oblika i dimenzija. Jedno od najčešćih ispitivanja mehaničkih svojstava je statičko vlačno ispitivanje koje se provodi na uređajima koji se nazivaju kidalice. Kidalice su uređaji na kojima se epruveta kontinuirano opterećuje statičkom silom sve do loma kako bi se analiziralo elastično i plastično ponašanje materijala u uvjetima jednoosnog opterećenja. Pri ispitivanju se kontinuirano mjere sila i deformacija epruvete, te se na osnovu tih veličina određuju mehanička svojstva koja karakteriziraju mehaničku otpornost materijala.

Ispitivanje mehaničkih svojstava općenito možemo podijeliti:

- prema načinu djelovanja opterećenja: vlačno, tlačno, savojno, smično, ispitivanje uvijanjem, te kombinirana ispitivanja;
- prema brzini djelovanja opterećenja: statičko, dinamičko i udarno;
- prema temperaturi ispitivanja: ispitivanje na sobnoj, povišenoj ili sniženoj temperaturi;
- prema trajanju opterećenja: kratkotrajna i dugotrajna ispitivanja.

Kada se materijale promatra iz konstrukcijske perspektive, njihovo najvažnije svojstvo je čvrstoća. Čvrstoća predstavlja otpor materijala prema deformaciji i lomu, odnosno, čvrstoća je sposobnost materijala da podnosi naprezanja uzrokovana vanjskim opterećenjima. Čvrstoća materijala određuje se provođenjem statičkog vlačnog ispitivanja.

## 2 Statičko vlačno ispitivanje

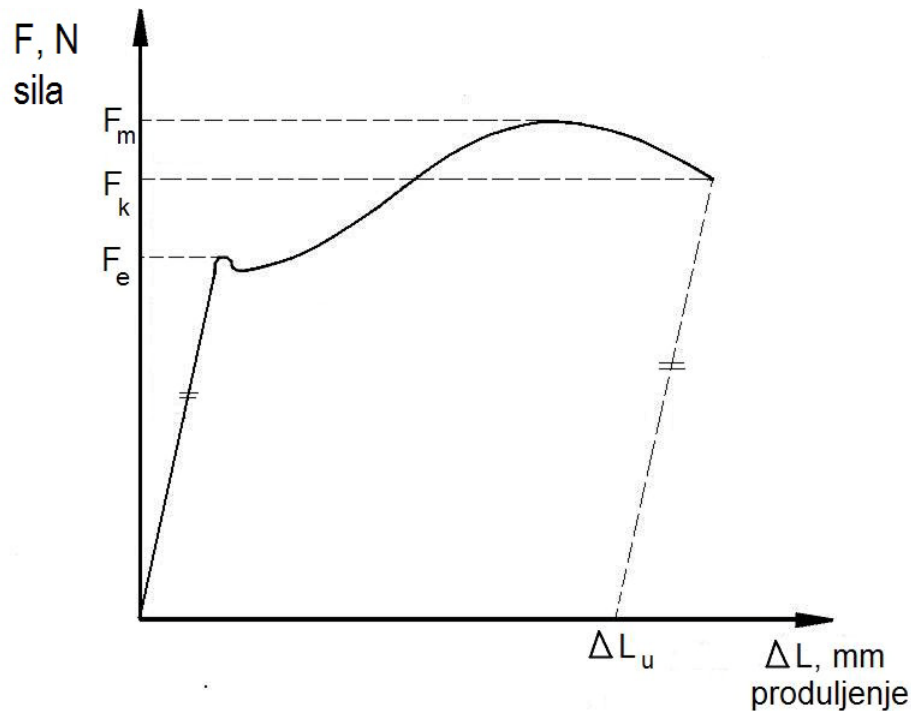
Statičko vlačno ispitivanje spada pod razorne metode ispitivanja materijala, a predstavlja najvažnije ispitivanje na području karakterizacije mehaničke otpornosti materijala. Vlačno ispitivanje provodi se zbog nekoliko razloga:

- rezultati vlačnog ispitivanja koriste se pri izboru materijala za različite inženjerske primjene;
- svojstva utvrđena vlačnim ispitivanjem često se koriste za specifikaciju materijala u svrhu osiguranja kvalitete;
- tijekom razvoja novih materijala i procesa na temelju rezultata vlačnog ispitivanja omogućuje se usporedba s drugim materijalima uzimajući u obzir tehnološki postupak obrade;
- vlačna svojstva koriste se kako bi se predvidjelo ponašanje materijala u realnim eksploatacijskim uvjetima.

Statičkim vlačnim ispitivanjem utvrđuju se osnovna mehanička svojstva materijala kao što su granica razvlačenja, vlačna čvrstoća, istezljivost, modul elastičnosti itd. Ispitivanje se provodi na kidalicama pomoću kojih se epruvete kontinuirano vlačno opterećuju sve do loma. Tijekom ispitivanja kontinuirano se mjere sila i produljenje epruvete, te se pisačem grafički registrira dijagram „sila-produljenje“ koji se naziva dijagramom kidanja. Opterećenje se na kidalici ostvaruje hidraulički ili mehanički. Za preciznije mjerenje produljenja služi ekstenzimetar koji se učvršćuje na epruvetu.

Epruvete na kojima se provodi statičko vlačno ispitivanje mogu biti okruglog ili četvrtastog poprečnog presjeka. Oblik i dimenzije epruvete propisani su odgovarajućom normom. Dimenzije epruvete u uzdužnom smjeru u određenom su razmjeru s dimenzijama epruvete u poprečnom smjeru. Prije ispitivanja, potrebno je izmjeriti početnu duljinu ( $L_0$ ) i početne dimenzije presjeka epruvete. Nakon toga, epruveta se na mjestima zadebljanja („glava“ epruvete) učvršćuje u čeljusti kidalice, te se može započeti s opterećivanjem. Prirast naprezanja u jedinici vremena pri statičkom vlačnom pokusu propisan je normom, a ovisi o modulu elastičnosti ispitivanog materijala.

Ne slici 1 prikazan je dijagram kidanja za niskouglični konstrukcijski čelik u normaliziranom stanju.



Slika 1 Dijagram kidanja

U prvom dijelu dijagrama ovisnost između sile i pripadajućeg produljenja je linearna. Takav linearni odnos vrijedi sve do dostizanja sile razvlačenja  $F_e$ . U drugom dijelu dijagrama odnos sile i produljenja postaje nelinearan, pri čemu se opterećenje povećava sve do dostizanja maksimalne sile  $F_m$ . Nakon sile  $F_m$ , epruveta se nastavlja produljivati uz sve manju silu zbog smanjenja ploštine poprečnog presjeka. Kada sila dostigne vrijednost konačne sile  $F_k$ , dolazi do loma epruvete. Produljenje epruvete  $\Delta L_u$  nakon kidanja iznosi:

$$\Delta L_u = L_u - L_0, \text{ mm} \quad (1)$$

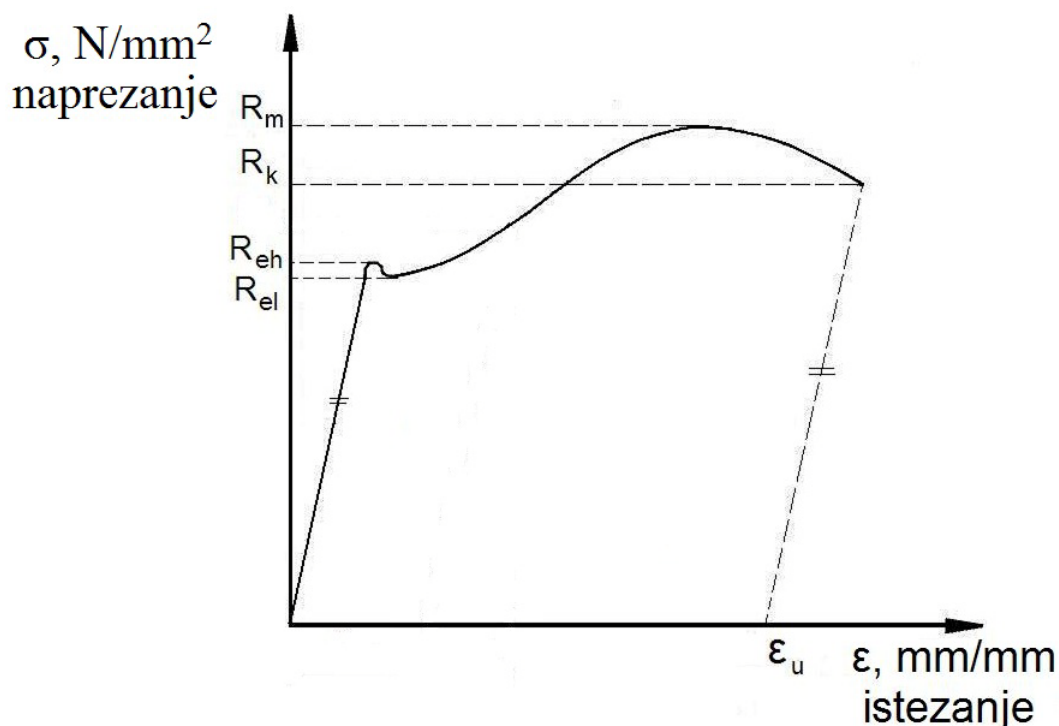
gdje je  $L_u$  mjerna duljina epruvete nakon kidanja, a  $L_0$  početna mjerna duljina epruvete. Dijagram kidanja nije pogodan za inženjersku primjenu jer ne uzima u obzir dimenzije poprečnog presjeka epruvete. Budući da je mehanička otpornost materijala ovisna o površini epruvete umjesto sile  $F$  uvodi se naprezanje  $\sigma$ :

$$\sigma = \frac{F}{S_0}, \text{ N/mm}^2 \quad (2)$$

gdje je  $F$  sila izražena u njutnima, a  $S_0$  početna površina poprečnog presjeka epruvete izražena u  $\text{mm}^2$ , a umjesto produljenja  $\Delta L$  uvodi se relativno produljenje ili istežanje  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}, \text{ mm/mm} \quad (3)$$

Istezanje  $\varepsilon$  predstavlja omjer produljenja  $\Delta L$  i početne mjerne duljine  $L_0$ . Na taj način iz dijagrama  $F-\Delta L$  dobiva se dijagram naprezanje  $\sigma$  - istezanje  $\varepsilon$  koji je za konstrukcijski čelik u normaliziranom stanju prikazan na slici 2.



Slika 2 Dijagram naprezanje-istezanje

Dijagram počinje iz ishodišta pravcem koji se naziva Hookeov pravac za koji vrijedi Hookeov zakon:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (4)$$

gdje je  $E$  modul elastičnosti. U području u kojem vrijedi Hookeov zakon javljaju se samo elastične deformacije koje nakon rasterećenja iščezavaju. Hookeov pravac je s gornje strane ograničen granicom razvlačenja  $R_e$  pri kojoj se epruveta isteže bez povećanja naprezanja ili čak uz privremeno smanjenje naprezanja. Granica razvlačenja utvrđena je izrazom:

$$R_e = \frac{F_e}{S_0}, \text{N/mm}^2 \quad (5)$$

gdje je  $F_e$  sila tečenja a  $S_0$  početna površina poprečnog presjeka epruvete. Granicu razvlačenja određuju dvije vrijednosti: gornja granica razvlačenja  $R_{eh}$  i donja granica razvlačenja  $R_{el}$ . Granica razvlačenja predstavlja naprezanje prema kojem se uz odabrani stupanj sigurnosti utvrđuje maksimalno dopušteno naprezanje pri radu strojnih dijelova i dijelova uređaja.



Naprezanja veća od granice razvlačenja  $R_e$  izazivaju osim elastične i plastičnu (trajnu) deformaciju. Naprezanje kod maksimalne sile  $F_m$  naziva se vlačna ili rastezna čvrstoća  $R_m$ . Vlačna čvrstoća  $R_m$  određena je omjerom maksimalne sile  $F_m$  i početne površine poprečnog presjeka  $S_0$ :

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}, \text{ N/mm}^2 \quad (6)$$

Važno je napomenuti da vlačna čvrstoća nije maksimalno naprezanje već je to naprezanje pri maksimalnoj sili. Naime, nakon dostizanja maksimalne sile površina epruvete počinje se naglo smanjivati, pa stvarno naprezanje unatoč smanjenju sile i dalje raste. Vlačna čvrstoća  $R_m$  je osnovno mehaničko svojstvo na temelju kojeg se materijali vrednuju prema njihovoj mehaničkoj otpornosti.

Naprezanje kod kojeg dolazi do loma epruvete naziva se konačno naprezanje  $R_k$ . Konačno naprezanje  $R_k$  određeno je omjerom konačne sile  $F_k$  i početne površine poprečnog presjeka  $S_0$ :

$$R_k = \frac{F_k}{S_0}, \text{ N/mm}^2 \quad (7)$$

### 3 Kidalice

Kidalica je uređaj ili sklop uređaja za vlačno/tlačno ispitivanje materijala u uvjetima jednoosnog statičkog opterećenja. Na njima je moguće ostvariti vlačna ili tlačna opterećenja. Kidalice spadaju u ispitnu opremu svakog laboratorija koji se bavi mehaničkim ispitivanjima.

Podjela kidalica može biti prema:

- sustavu za opterećivanje,
- položaju osi ispitnog uzorka,
- vrsti uređaja za očitavanje,
- namjeni i dr.

Mehaničke kidalice su komercijalno dostupne od 1886. godine. Od tada pa do danas, kidalice su napredovale od čisto mehaničkih uređaja do puno složenijih elektromehaničkih i hidrauličkih uređaja s naprednom elektronikom i mikroracionalima. Danas postoji čitav niz različitih kidalica, a u praksi se najčešće koriste univerzalne kidalice na kojima se uzorak može opterećivati vlačno, tlačno i savojno. Kidalice su u posljednje vrijeme znatno usavršene, naročito u pogledu točnosti mjernog sustava i regulacije brzine opterećivanja, što je omogućeno primjenom različitih elektroničkih komponenti. Suvremene konstrukcije kidalica trebaju zadovoljavati sljedeće zahtjeve:

- da su što jednostavnije za rukovanje i što manje mase, a pri tom i dovoljno čvrste i krute kako ne bi došlo do neželjenih deformacija tijekom opterećivanja;
- da se opterećenje prenosi na ispitni uzorak na pravilan način i da se iznos sile može u svakom trenutku očitati sa zadovoljavajućom točnošću;
- da se opterećenje postiže mirno, bez udara, te da se po potrebi može održavati dulje vrijeme konstantnim;
- da uređaj za pričvršćivanje bude jednostavan, lak za rukovanje, a da pri tome onemogućí klizanje krajeva ispitnog uzorka.

S obzirom na položaj osi ispitnog uzorka tijekom ispitivanja, kidalice mogu biti horizontalne i vertikalne. Kod horizontalnih kidalica epruveta je položena vodoravno, a kod vertikalnih kidalica okomito. Vertikalne kidalice su puno više zastupljene u svakodnevnom radu. Maksimalne sile koje se mogu postići su najčešće do 1000 kN, pa čak i više. Često su konstruirane tako da se na njima pored ispitivanja razvlačenjem mogu provoditi i ispitivanja tlačenjem, savijanjem i smicanjem.

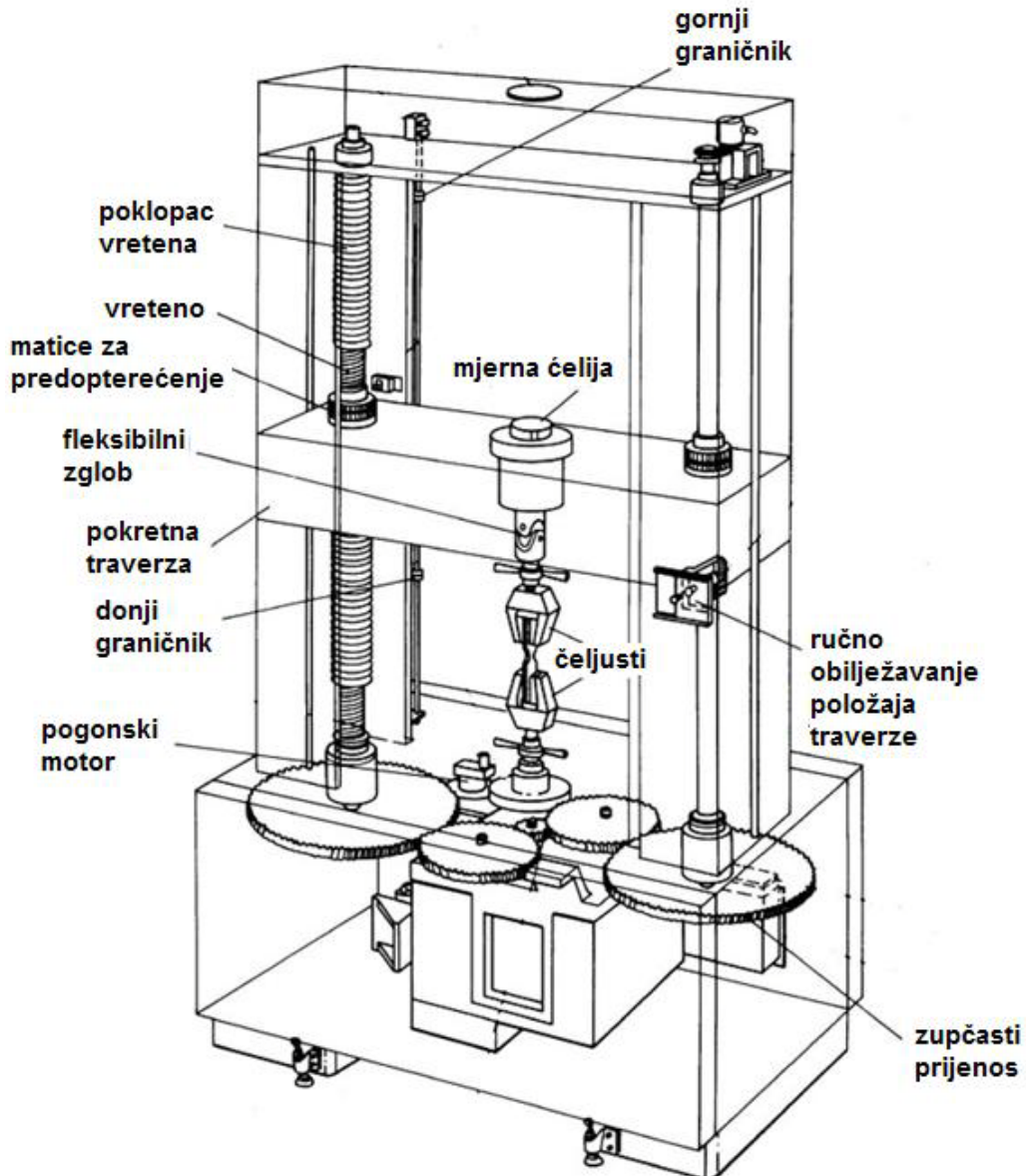
Kidalice se u principu sastoje od sljedećih dijelova:

- okvir (postolja),
- mehanizam za opterećivanje,
- uređaj za mjerenje sile,
- uređaj za očitavanje.

Okvir kidalice sastoji se od vodilica, traverze i postolja u kojem je smješten pogonski mehanizam. Okvir mora podnositi opterećenja usklađena s pogonskim sustavom. Ovo rijetko predstavlja problem budući da je većina postolja napravljena tako da postiže veliku krutost. Okvir mora osigurati dovoljno radnog prostora i svjetla za neometano rukovanje ispitnim uzorkom. Kod nekih kidalica, radni prostor omogućen je iznad i ispod pokretne traverze, ili je osiguran bočni pristup. Krutost okvira kidalice može se razmatrati kao aksijalna, poprečna i torzijska. Kod većine rutinskih vlačnih ispitivanja, aksijalna krutost je najvažniji parametar. Visoka krutost postolja minimizira pojavu deformacija, a samim time i elastičnu energiju koja se u njemu akumulira tijekom ispitivanja. Deformacije okvira prilikom opterećivanja nepovoljno utječu na točnost mjerenja.

Uređaj za opterećivanje može biti mehanički, hidraulički, pneumatski, električni ili kombinacija navedenih tipova. O vrsti uređaja za opterećivanje odlučuju konstrukcijski zahtjevi i potrebna maksimalna sila. Kidalice za opterećenja do 10 kN uglavnom imaju mehanički pogon. Između 10 kN i 100 kN mogu se koristiti oba pogona, i mehanički i hidraulički, ali se preferira mehanički. Za sile iznad 100 kN koristi se hidraulički pogon jer se na taj način relativno lakše postižu velike sile.

Maksimalna brzina kojom se ispitni uzorak opterećuje tijekom ispitivanja ograničena je vrstom kidalice. Maksimalna brzina traverze elektromehaničke kidalice određena je brzinom elektromotora u kombinaciji s reduktorom. Brzina traverze hidrauličkih kidalica ovisi o kapacitetu hidrauličke pumpe. U novije vrijeme ugrađuju se automatski regulatori pomoću kojih se brzina opterećivanja može unaprijed programirati. Konvencionalne elektromehaničke kidalice konstruirane su za brzine opterećivanja od 0,001 mm/min do 500 mm/min, što je pogodno za provođenje statičkih i polu-statičkih ispitivanja. Hidrauličke kidalice uglavnom imaju veći raspon brzina.



**Slika 3 Elektromehanička kidalica**

Primjer elektromehaničke kidalice prikazan je na slici 3. Radi se o kidalici s elektromehaničkim pogonom i mjernom ćelijom za mjerenje sile. Vretena su pokretana pomoću motora, mogu se okretati u oba smjera, a ujedno služe kao vodilice za pokretnu traverzu. Gibanjem traverze opterećuje se ispitni uzorak vlačno ili tlačno, ovisno o tome giba li se traverza prema gore ili dolje. Brzina traverze može se prilagođavati mijenjanjem brzine elektromotora ili mijenjanjem prijenosnog omjera.

Kidalice s vretenima mogu imati jedno, dva ili četiri vretena. Kod kidalica s više vretena, jedno vreteno mora imati lijevi navoj, a drugo desni kako bi se izbjeglo izvijanje ispitnog uzorka zbog rotacije vretena.

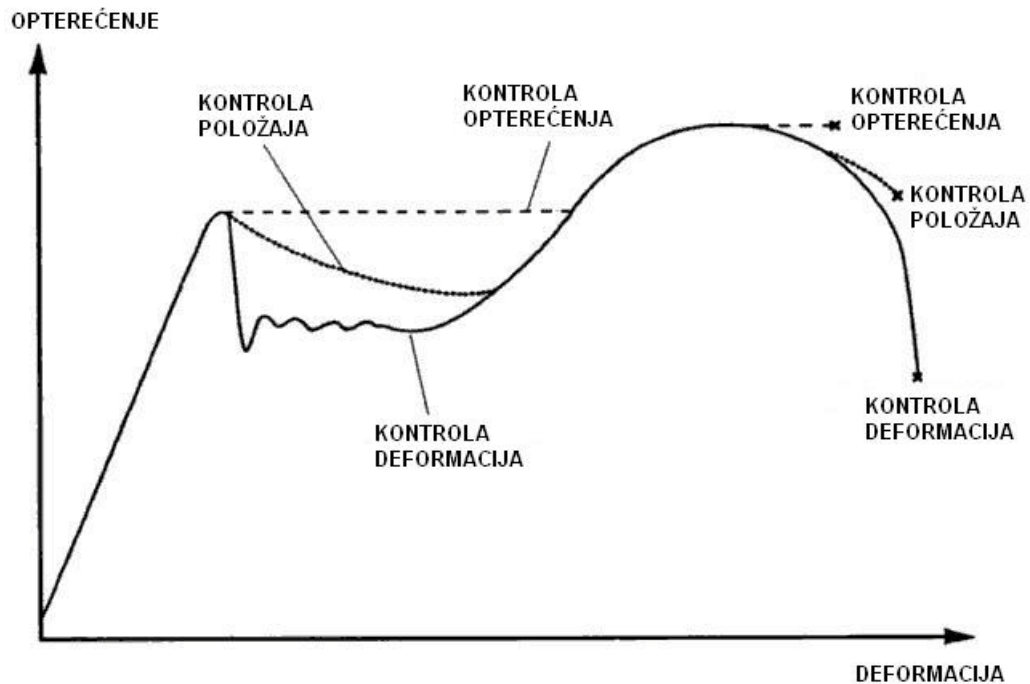
Kod kidalica s hidrauličkim pogonom, ulje pod pritiskom potiskuje klip u cilindru pri čemu dolazi do podizanja traverze ili podizanja cijelog stupa kidalice, slika 4.



**Slika 4 Hidraulička kidalica**

Hidrauličke kidalice mogu koristiti jednoradne ili dvoradne klipove. Glavna prednost hidrauličkih kidalica je mogućnost postizanja visokih vrijednosti sila i precizna regulacija opterećenja.

Sve moderne kidalice (elektromehaničke i hidrauličke) koriste regulacijski sustav. Brojne elektromehaničke kidalice upravljane su samo kontrolom položaja. Većina hidrauličkih kidalica, te neke elektromehaničke, imaju uređaje za kontrolu opterećenja i deformacija. Vrsta upravljanja može značajno utjecati na rezultate ispitivanja. Slika 5 prikazuje utjecaj različitih načina upravljanja na rezultate vlačnog ispitivanja.



**Slika 5 Utjecaj upravljanja na rezultate vlačnog ispitivanja (meki čelik)**

Razlike između kontrole položaja i kontrole deformacija najveće su kod materijala s visokim modulom elastičnosti, kao što su čelici i kompoziti, čija je krutost značajna u odnosu na krutost same kidalice. Za materijale s malim modulom elastičnosti, kao što su elastomeri i tekstil, kod kojih je krutost vrlo mala u usporedbi s krutošću kidalice, razlike između kontrole položaja i kontrole deformacija značajno su manje.

Provođenje vlačnog ispitivanja s kontroliranim opterećenjem omogućuje stabilnu kontrolu u elastičnom području. Nakon što ispitni uzorak počne teći, kontrolna petlja postaje otvorena petlja, što dovodi do značajnog produljenja u fazi tečenja. Kontrola se ponovno uspostavlja u elastično-plastičnom području sve do maksimalne sile kada slijedi lom epruvete.

Kontrola položaja pogodna je za spora i jednostavna ciklička ispitivanja, a postiže se promjenom smjera koji je kontroliran ograničenjima kidalice ili računalom. Očitavanje položaja na elektromehaničkim kidalicama obično se ostvaruje pomoću rotacijskog optičkog enkodera. Provođenje kontrole položaja može biti jako dobro, s točnošću pozicioniranja čak i boljom od  $0,1 \mu\text{m}$ . Očitavanje položaja na servohidrauličkim kidalicama često se temelji na LVDT-u. Unatoč činjenici da LVDT-i imaju odličnu rezoluciju, nelinearnost ukupne putanje od  $\pm 0,5 \%$  predstavlja ograničenje za kontrolu položaja. Kontrola položaja ne može osigurati točnu kontrolu opterećenja ili deformacija ispitnog uzorka zbog deformacija koje se ostvaruju van ispitnog uzorka (čeljusti, okvir, pogon, sustav za opterećenje). Ograničenja koja se javljaju kod kontrole

položaja mogu se prevladati regulacijom opterećenja ili deformacija kad se povratni signal dobiva od mjerne ćelije ili ekstenzimetra. Kontrola opterećenja obično se koristi za ispitivanja u elastičnom području. Kontrola deformacija obično je potrebna u situacijama kad se ispitni uzorak deformira plastično.

Sila ostvarena na kidalici može se mjeriti mehaničkim, hidrauličkim ili električnim putem. Od velikog broja mehaničkih mjernih uređaja, najčešće se primjenjuje uređaj na principu nagibne vage koji se sastoji od klatna s jednim ili više utega poznatih masa. Ovaj mjerni sustav je vrlo jednostavan za rukovanje te u isto vrijeme i vrlo precizan. Kod starijih kidalica koristili su se uređaji za mjerenje sile pomoću opruga, ali se nisu pokazali dovoljno točnim. Danas se ponovno počinju primjenjivati zahvaljujući usavršenoj tehnologiji izrade opruga. Hidraulički mjerni uređaji su u pravilu jednostavniji, a sila se obično mjeri manometrom i razmjerna je tlaku ulja u cilindru. Najčešće primjenjivani hidraulički mjerni uređaj je manometar s klatnom. Za mjerenje sile danas se koriste i električna mjerila u obliku mjernih ćelija ili pretvornika sile koji vrijednost sile pretvaraju u naponski ili strujni signal.

S obzirom na vrstu uređaja za očitavanje sile može se raditi o kidalicama s analognim ili digitalnim pokazivačem. Analogne kidalice sadrže analognu kružnu skalu za svako mjerno područje, a digitalne kidalice numerički indikator.

Većina današnjih kidalica opremljena je računalom. Čak štoviše, dosta modernih kidalica ne može niti funkcionirati bez suvremene računalne opreme. Skup radnji koje obavlja računalo uključuje: kontrolu provođenja ispitivanja, prikupljanje rezultata, obrada podataka, pa čak i kreiranje samog izvještaja. Svim ovim radnjama upravlja jedan ili više programskih paketa specijalno kreiranih za takve namjene. Najnovija generacija digitalne elektronike omogućuje brojne prednosti glede upravljanja i akvizicije podataka uz stabilan rad čime se smanjuje potreba za čestim umjeravanjima. Uporaba računala i pripadajućih programa daje operateru mogućnost da kontrolira rad kidalice uz istodobnu pohranu i analizu rezultata ispitivanja.

## 4 Umjeravanje

Mjerenje sile predstavlja osnovu za određivanje mehaničkih svojstava materijala ili proizvoda. Sila se općenito definira kao vektorska veličina te mjerenje sile uključuje određivanje iznosa i smjera sile. Ispitivanje sile među ostalim se provodi na kidalicama opisanim u pethodnom poglavlju. Tijekom vremena kidalice gube na točnosti zbog različitih oštećenja, kvarova, preopterećenja, istrošenja vitalnih dijelova i sl. Zbog toga se provodi periodična kontrola mjernog sustava sile ili umjeravanje kidalice kroz određeno vremensko razdoblje kako bi se ispitala točnost mjernog sustava.

Umjeravanje je postupak kojim se određuje odnos između veličine koju pokazuje neko mjerilo ili etalon niže mjeriteljske kakvoće i odgovarajuće vrijednosti ostvarene etalomom više mjeriteljske razine. Etalon je materijalizirana mjera, mjerilo, referencijska tvar ili mjerni sustav namijenjen za određivanje, ostvarivanje, čuvanje i obnavljanje jedinice određene fizikalne veličine.

Kad je riječ o kidalicama, umjeravanje se provodi usporedbom vrijednosti sila očitanih na pokazivaču sile kidalice i stvarnih sila izmjerenih pomoću etalonskog mjernog sustava. Usporedba rezultata mjerenja moguća je postizanjem mjernog jedinstva. Mjerno jedinstvo definira se kao mjeriteljsko stanje u kojem su mjerni rezultati izraženi u zakonitim jedinicama te se mogu s utvrđenim mjernim nesigurnostima dovesti u vezu s etalonima više mjeriteljske sposobnosti. Ispravno provedeno umjeravanje omogućuje:

- osiguranje sljedivosti prema nacionalnom etalonu,
- smanjenje mjerne nesigurnosti.

### 4.1. Sljedivost

Koncept sljedivosti može se shvatiti kao hijerarhija mjerila odnosno mjernih rezultata. Sljedivost se definira kao svojstvo mjernog rezultata po kojemu se on može dovesti u vezu s navedenim referentnim etalomom (obično državnim ili međunarodnim) neprekinutim lancem usporedbi koje imaju utvrđene mjerne nesigurnosti. Sljedivost se ostvaruje umjeravanjem mjernim uređajima umjerenim pomoću etalona više mjeriteljske razine. Na taj način ostvaruje se neprekinuti lanac usporedbi sve do nacionalnog etalona čime se postiže globalna povezanost sveukupnih rezultata mjerenja. Sljedivost omogućuje da rezultati mjerenja različitih laboratorija budu jednako mjerodavni. Rezultati umjeravanja bez iskazane sljedivosti ne smatraju se valjanim.

Osnovni elementi koji određuju sljedivost jesu:

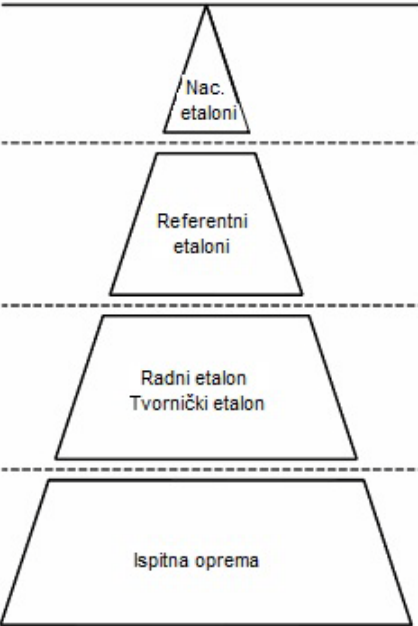


- neprekinuti lanac usporedbi koji vodi do etalona najviše mjeriteljske kakvoće;
- mjerna nesigurnost (izračunata za svaki segment lanca, te za čitav lanac);
- dokumentacija za svaki korak u lancu;
- mjerodavnost laboratorija i tijela koji provode neke korake u lancu mora biti potkrijepljena valjanim dokazima;
- upućivanje na SI jedinice;
- ponovna umjeravanja u određenim vremenskim razmacima.

Sljedivost se osigurava umjeravanjem, ali ovisno o kakvim se mjerilima ili etalonima radi, te na kojem su oni položaju u piramidi sljedivosti, moguće ju je ostvariti na više načina:

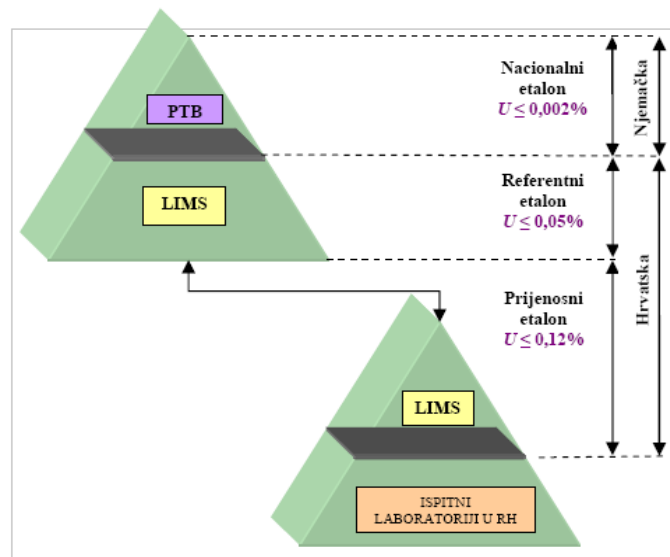
- preko umjernog laboratorija unutar tvrtke;
- preko ovlaštenog laboratorija;
- preko državne mjeriteljske institucije;
- izravnim vezivanjem na međunarodni etalon, oslanjanjem na državni etalon neke druge države ili vezivanjem na etalon stranog ovlaštenog umjernog laboratorija zadovoljavajuće mjerne sposobnosti,
- do definicijskog etalona.

Hijerarhija sljedivosti prikazuje se pomoću piramide sljedivosti (slika 6). U piramidi sljedivosti mjerila su hijerarhijski posložena prema razini mjeriteljske kakvoće. Umjeravanje se provodi od vrha prema dnu piramide. Dakle, etalon niže razine uvijek se umjerava uz pomoć etalona više razine.

Etaloni (ispitna oprema)	Odgovornost	Svrha	Temelj za umjeravanje i mjerenje	Dokumentacija o umjeravanju ili mjerenju
 <p>Nac. etaloni</p>	Nacionalni metrološki institut	Održavanje i prenošenje mjernih jedinica s nacionalnih etalona	Statutarna dužnost za prikazivanje SI jedinica i osiguranje međunarodne usporedivosti	Potvrda o umjeravanju referentnih etalona
Referentni etaloni	Laboratoriji ovlašteni za umjeravanje	Čuvanje metrološke infrastrukture države	Potvrda o umjeravanju od državnog metrološkog instituta ili drugog ovlaštenog laboratorija	Potvrda o umjeravanju referentnih etalona
Radni etalon Tvornički etalon	Tvornički laboratoriji za umjeravanje	Nadzor nad ispitnom opremom za vlastite potrebe	Potvrda o umjeravanju od državnog metrološkog instituta ili drugog ovlaštenog laboratorija	Potvrda o umjeravanju referentnih etalona
Ispitna oprema	Svi dijelovi tvrtke	Mjerenje i ispitivanje kao dio mjera osiguranja kakvoće	Potvrda o tvorničkom umjeravanju, oznaka umjeravanja ili slično	Ispitni znak ili slično

Slika 6 Piramida sljedivosti

Što se tiče etalona za silu, Hrvatska raspolaže državnim etalonima u području od 50 N do 200 kN. Nositelj ovih etalona je Laboratorij za ispitivanje mehaničkih svojstava (LIMS) Fakulteta strojarstva i brodogradnje. To je niz prijenosnih etalona sile najvišeg razreda točnosti 00 i 0,5 zajedno s mjernim pojačalom visoke preciznosti i ponovljivosti. Ovi etaloni se umjeravaju u njemačkom nacionalnom mjeriteljskom institutu Physikalische Technische Bundesanstalt (PTB). Osim toga, LIMS raspolaže i referentnim etalom za silu. Trenutno je u postupku proglašenje referentnog etalona državnim etalom Republike Hrvatske. Piramida sljedivosti etalona sile za Hrvatsku prikazana je slikom 7.



Slika 7 Piramida sljedivosti za mjernu veličinu sile u Hrvatskoj

## 4.2. Mjerna nesigurnost

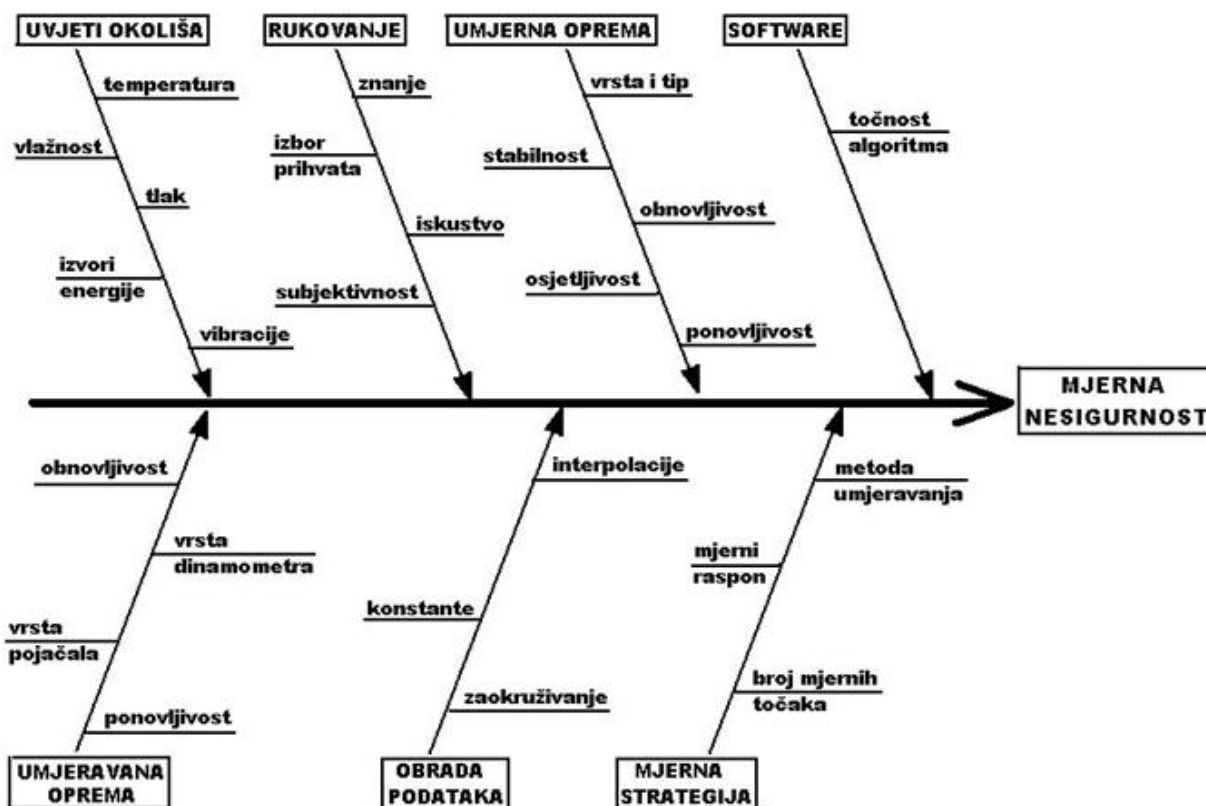
Svako mjerenje je rezultat procesa s više ili manje izraženim slučajnim djelovanjima koja rezultiraju mjernim pogreškama. Pogreške su neizostavni dio svakog mjerenja, pa i onih najpreciznijih koja se vrše na etalonima. Stoga je rezultat mjerenja potpun samo ako je popraćen s kvantitativnim pokazateljem njegove mjerne nesigurnosti.

Mjerna nesigurnost definira se kao parametar pridružen rezultatu mjerenja koji opisuje rasipanje vrijednosti koje bi se razumno moglo pripisati mjerenoj veličini. Mjerna nesigurnost označava se  $W(x)$  i opisuje koliko je povjerenje u rezultat mjerenja. Što je mjerna nesigurnost manja, to je mjerenje bolje. Minimalna vrijednost mjerne nesigurnosti predstavlja najbolju mjernu sposobnost (CMC) nekog laboratorija za mjerenja koja provodi.

Uzroci koji utječu na pojavu mjerne nesigurnosti općenito uključuju:

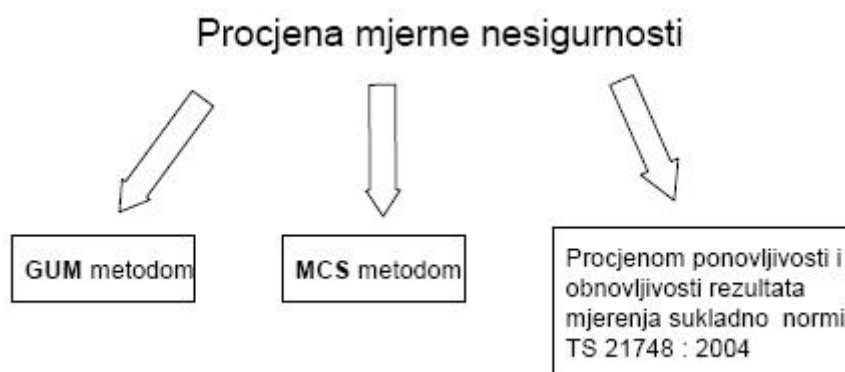
- utjecaj okolišnih uvjeta,
- subjektivnost promatrača (očitanje na analognoj skali),
- vibracije,
- vrijednosti pridružene mjernom standardu,
- vrijednosti konstanti i ostalih parametara koje su dobivene iz vanjskih izvora a koje se koriste u obradi podataka,
- aproksimacije i procjene koje su sastavni dio mjerne metode i mjernog postupka,
- promjene ponovljenih očitavanja iste vrijednosti pri istim uvjetima.

Općenito se može reći da na vrijednost mjerne nesigurnosti utječe cijeli niz različitih faktora čije je djelovanje potrebno procijeniti. Vizualni pregled utjecajnih čimbenika najčešće se prikazuje dijagramom u obliku „riblje kosti“, slika 8.



Slika 8 Uzroci mjerne nesigurnosti

Svi navedeni čimbenici uzrokuju pojavu sistematskih i slučajnih pogrešaka prilikom mjerenja. Sistematske pogreške uzrokuju smanjenu točnost rezultata mjerenja, a slučajne pogreške smanjuju pouzdanost. Na slici 9 prikazana je podjela metoda za procjenu mjerne nesigurnosti.



Slika 9 Metode za procjenu mjerne nesigurnosti

GUM metodom procjenjuju se dvije vrste mjerne nesigurnosti:

- skupine A (tip A),
- skupine B (tip B).

Nesigurnost tipa A određuje se eksperimentalno, ponavljanjem mjerenja i računanjem standardnog odstupanja ( $\sigma$ ) rezultata ponovljenih mjerenja. Procjena nesigurnosti tipa B može se temeljiti na:

- specifikacijama mjerne opreme,
- podacima o umjeravanju mjerila,
- nesigurnosti korištenih podataka koji su preuzeti iz priručnika ili drugih izvora,
- podacima o ponovljivosti i obnovljivosti,
- podacima o ranije provedenim sličnim mjerenjima,
- iskustvu i poznavanju relevantnih mjerila i mjernih objekata,
- raznim drugim informacijama kao što su zaokruživanje, razlučivost i histereza.

#### 4.2.1. Mjerna nesigurnost kod umjeravanja kidalice

Procjena i izračun mjerne nesigurnosti kod umjeravanja kidalice podijeljena je u dva segmenta:

1. nesigurnost umjernog laboratorija (CMC),
2. nesigurnost umjeravanja koja se dijeli na:
  - a. dodatne mjerne nesigurnosti prijenosnih etalona u okruženju u kojem se obavlja umjeravanje,
  - b. mjerne nesigurnost umjeravanja kidalice.

Geometrijska suma vrijednosti ova tri segmenta daje sastavljenu mjernu nesigurnost rezultata umjeravanja kidalice na određenim mjernim točkama.

##### 4.2.1.1. Najbolja mjerna sposobnost

Najbolja mjerna sposobnost LIMS-a (Laboratorij za ispitivanje mehaničkih svojstava) iznosi:

$$w_{\text{CMC}}=0,06\% \quad (8)$$

pri čemu je faktor pokrivanja  $k=1$ . Najbolja mjerna sposobnost predstavlja najmanju mjernu nesigurnost koja se može postići u laboratoriju pri obavljanju svakodnevnih umjeravanja.

Vrijednost faktora  $k$  izabire se na temelju traženog stupnja pouzdanosti. Vrijednost najbolje mjerne sposobnosti koristi se u izračunu sastavljene mjerne nesigurnosti.

#### 4.2.1.2. Dodatne mjerne nesigurnosti prijenosnih etalona sile

Dodatne mjerne nesigurnosti prijenosnih etalona sile dijele se na:

- nesigurnost uslijed temperaturnih varijacija:

$$w_t = \frac{\alpha \cdot a_t}{\sqrt{3}} \quad (9)$$

pri čemu se faktor  $\alpha$  nalazi u tehničkim karakteristikama dinamometra danim od strane proizvođača, a  $a_t$  je devijacija od referentne temperature umjeravanja.

- nesigurnost uslijed utjecaja dugotrajne nestabilnosti osjetljivosti:

$$w_s = \frac{a_s}{\sqrt{3}} \quad (10)$$

pri čemu se faktor  $a_s$  nalazi u tehničkoj specifikaciji dinamometra.

Ukupna dodatna mjerna nesigurnost prijenosnih etalona sile ( $w_{dod}$ ) definirana je kao geometrijska sredina ovih dviju nesigurnosti:

$$w_{dod} = \sqrt{w_t^2 + w_s^2} \quad (11)$$

#### 4.2.1.3. Mjerna nesigurnost umjeravanja kidalice

Ova mjerna nesigurnost dijeli se na:

- standardnu mjernu nesigurnost uslijed utjecaja rezolucije pokazivača sile kidalice,  $w(a)$ ,
- standardnu mjernu nesigurnost zbog rasipanja rezultata ponovljenih mjerenja,  $w(b)$

Standardna mjerna nesigurnost  $w(a)$  računa se prema izrazu:

$$w(a) = \sqrt{\frac{\left(\frac{a}{2}\right)^2}{3}} \quad (12)$$

pri čemu je  $a$  relativna nesigurnost očitavanja koja se prema normi DIN EN ISO 7500-1 određuje pomoću jednadžbe:

$$a = \frac{r}{F} \times 100 \% \quad (13)$$

gdje je  $r$  rezolucija pokazivača sile, a  $F$  je vrijednost sile očitane na kidalici.

Standardna mjerna nesigurnost  $w(b)$  računa se prema:

$$w(b) = \frac{s(\bar{X})}{\bar{X}} \cdot 100 \quad (14)$$

Pri čemu je  $s(\bar{X})$  standardna devijacija srednje vrijednosti, a  $\bar{X}$  je aritmetička sredina izmjerenih rezultata.

Ukupna mjerna nesigurnost umjeravanja kidalice jednaka je:

$$w(q) = \sqrt{w(a)^2 + w(b)^2} \quad (15)$$

#### 4.2.1.4. Proširena mjerna nesigurnost

Sastavljena standardna mjerna nesigurnost umjeravanja kidalice računa se prema izrazu:

$$w_c = \sqrt{w(q)^2 + w_{dod}^2 + w_{CMC}^2} \quad (16)$$

Proširena mjerna nesigurnost ( $W$ ) dobiva se množenjem sastavljene mjerne nesigurnosti  $w_c$  i faktora pokrivanja  $k$ :

$$W = k \times w_c \quad (17)$$

Faktor pokrivanja  $k$  jednak je 2 za stupanj povjerenja od 95 %.

## 5 Etalonski mjerni sustav

Etalon je materijalizirana mjera, mjerilo, referentna tvar ili mjerni sustav namijenjen za određivanje, ostvarivanje, čuvanje i obnavljanje jedinice jedne ili više vrijednosti kakve veličine da bi mogla poslužiti kao referencija. Etaloni se hijerarhijski dijele prema mjeriteljskoj kakvoći tako da se na vrhu nalazi primarni etalon, odnosno etalon najbolje mjerne sposobnosti. Hijerarhijska podjela etalona nužna je zbog osiguranja sljedivosti mjerenja, dakle zbog mogućnosti povezivanja mjerenja s primarnim etalomom.

Osnovni tipovi etalona hijerarhijski rangirani prema mjeriteljskoj kakvoći su:

- primarni etalon,
- međunarodni etalon,
- nacionalni/državni etalon,
- referentni etalon,
- posrednički etalon,
- prijenosni etalon,
- radni etalon.

### 5.1. Prijenosni etaloni sile

Prijenosni etaloni sile su etaloni namijenjeni prijenosu mjerne veličine sile na određena mjesta na kojima se provode ispitivanja ili umjeravanja. Koriste se za umjeravanje drugih mjerila ili uređaja za mjerenje sile koji se nalaze na nižoj mjeriteljskoj razini. Prijenosni etaloni sile se umjeravaju na referentnom etalonu sile koji se opet umjerava uz pomoć posredničkih etalona.

Danas se kao prijenosni etaloni sile najviše koriste elastični mjerni uređaji koji rade na principu mjerenja deformacija. Princip njihova rada temelji se na usporedbi vrijednosti izmjerenih pomoću njih i vrijednosti izmjerenih na ispitivanom mjerilu. Etalonski mjerni sustav za mjerenje sile općenito se sastoji od:

- dinamometra (elastični mjerni uređaj),
- mjernog pojačala,
- uređaja za očitavanje,
- kabela za spajanje komponenti,
- prihvatnih naprava za vlačno ili tlačno opterećivanje.

Mjerno pojačalo i uređaj za očitavanje uglavnom su dio jednog uređaja.

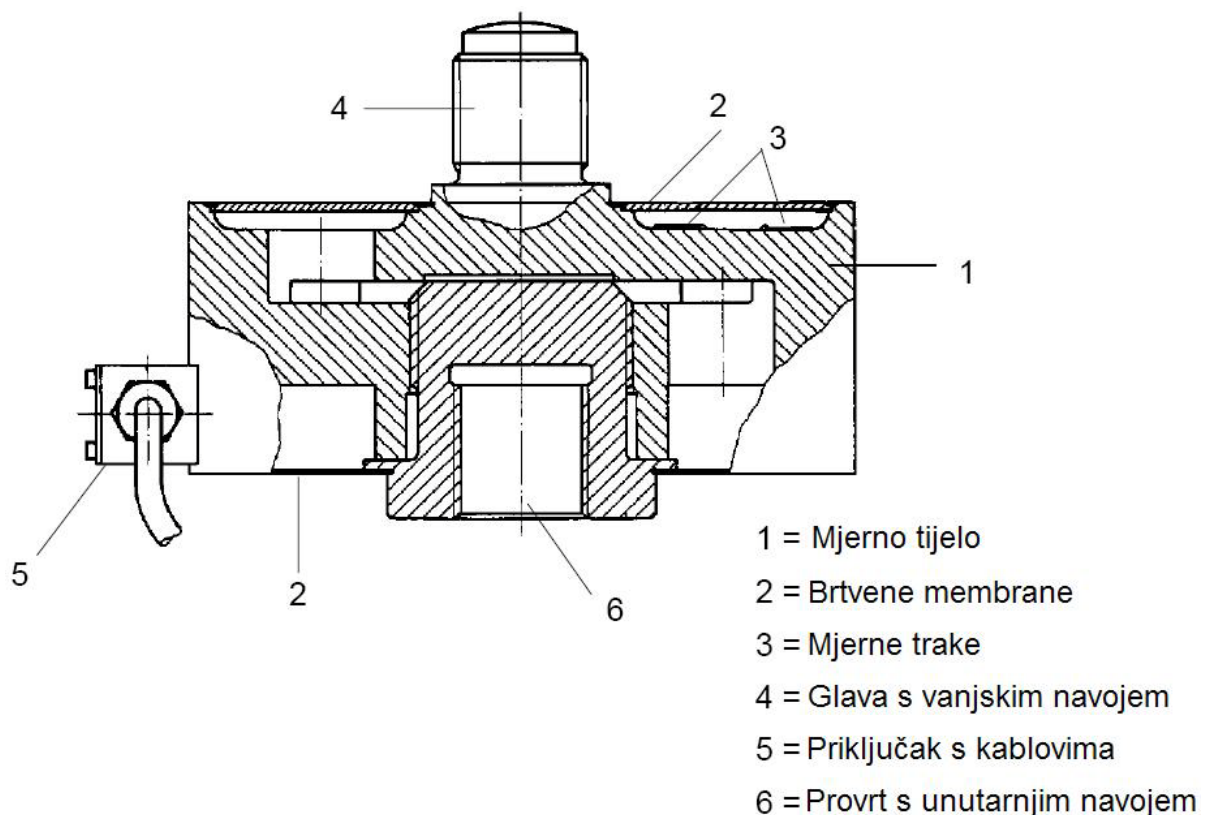


### 5.1.1. Dinamometar

Svaki prijenosni uređaj koji omogućuje mjerenje sile naziva se dinamometar. Električni dinamometar je elektro-mehanička naprava (pretvarač) koji pretvara mehaničku veličinu kao što je sila u električni signal promjene napona. Dinamometri se mogu koristiti za mjerenje vlačnih ili tlačnih sila, a s obzirom na namjenu, dijele se na:

- dinamometre za industrijska mjerenja,
- dinamometre za precizna laboratorijska mjerenja.

Na slici 10 prikazan je poprečni presjek etalonskog dinamometra Z4 s označenim glavnim dijelovima.



**Slika 10 Presjek dinamometra**

Od svih dijelova posebno je potrebno istaknuti dva, a to su:

- mjerno tijelo (elastični element),
- mjerne trake.

Mjerno tijelo dinamometra (slika 10) sadrži osam mjernih traka od kojih su četiri postavljene poprečno, a četiri uzdužno.

Za potrebe vlačnog opterećivanja, s gornje strane dinamometra nalazi se prihvatna glava s vanjskim navojem, dok je s donje strane provrt s unutarnjim navojem. Kućište je s gornje i s donje strane hermetički zatvoreno pomoću brtvenih membrana. Na taj način sprečava se negativan utjecaj vlage naspram osjetljivih elemenata.

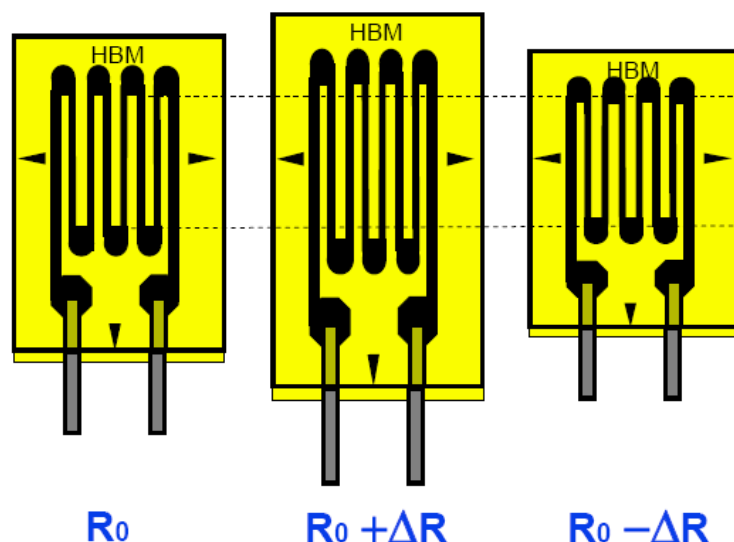
Sila koja djeluje na dinamometar uzrokuje deformaciju mjernih traka pri čemu dolazi do promjene njihovog električnog otpora. Zbog promjene električnog otpora mijenja se izlazni napon s obzirom na ulazni (narinuti) napon što predstavlja električni signal na izlazu iz dinamometra koji se dodatno još pojačava uz pomoć mjernog pojačala.

### 5.1.1.1. Mjerne trake

Mjerne trake su prvi put upotrijebljene 1938. godine, a danas se koriste na području tehnike s ciljem mjerenja i određivanja prisutnih deformacija odnosno opterećenja. Princip rada mjernih traka temelji se na piezootpornom efektu što ga pokazuju metali. Osnove mjerenja postavio je lord Kelvin 1856. godine utvrdivši da se bakrenoj žici električni otpor povećava prilikom rastezanja. Električni otpor vodiča opisan je jednadžbom:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S}, \Omega \quad (18)$$

gdje je  $\rho$  električna vodljivost,  $L$  je duljina, a  $S$  je površina poprečnog presjeka vodiča. Iz jednadžbe je vidljivo da se produljenjem žice otpor povećava, a skraćivanjem smanjuje. Mjerne trake nazivaju se još i tenzometarske trake, a metoda mjerenja pomoću njih naziva se tenzometrija. Prva mjerna traka bila je zavojnica od tanke žice čvrsto zalijepljena za mjerni objekt. Ukoliko se žica čvrsto zalijepi na površinu neopterećene konstrukcije, prilikom opterećenja doći će do deformiranja konstrukcije, a samim time i do deformiranja žice mjerne trake. Osnovni princip tenzometrijskog mjerenja leži u činjenici da se deformacijom mjerne trake, koja slijedi deformaciju ispitnog objekta, mijenja otpor trake. Stoga se mjerenjem promjene otpora određuje iznos deformacije, a indirektno i djelujuće opterećenje. Shematski prikaz utjecaja deformacije na promjenu otpora mjerne trake prikazan je na slici 11.



Slika 11 Utjecaj deformacije na promjenu otpora mjerne trake

Kod mjerenja pomoću mjernih traka, međusobna ovisnost naprezanja i deformacija smatra se linearnom jer se mjerenja provode u linearno-elastičnom području, tj. u području gdje vrijedi Hookeov zakon. Deformacija  $\varepsilon$  općenito se može opisati izrazom:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (19)$$

gdje je  $\Delta L$  produljenje a  $L_0$  je početna mjerna duljina. Odnos između deformacije i promjene električnog otpora definiran je izrazom:

$$\varepsilon = \frac{1}{k} \cdot \frac{\Delta R}{R_0} \quad (20)$$

gdje je  $k$  konstanta ovisna o vrsti materijala mjerne trake,  $\Delta R$  je promjena električnog otpora a  $R_0$  je električni otpor nedeformirane trake. Iz jednadžbe slijedi da je promjena otpora jednaka umnošku deformacije  $\varepsilon$  i konstante  $k$ :

$$\varepsilon \cdot k = \frac{\Delta R}{R_0} \quad (21)$$

Faktor  $k$  omogućuje pretvaranje mehaničke veličine (deformacije) u električnu veličinu promjene otpora. U praksi se najčešće koriste mjerne trake s vrijednostima faktora  $k$ :

- $k=(2,00 \div 2,10) \pm 1\%$  za metalne mjerne trake,
- $k \approx 120$  kod poluvodiča.

Od metala se najčešće koristi konstantan, legura koja sadrži 55% bakra i 45% nikla, s vrijednošću faktora  $k=2$ . Vrijednost koeficijenta  $k$  ne smije se mijenjati s promjenom

temperature jer u suprotnom ne bi bilo moguće jednoznačno odrediti deformaciju koja odgovara određenoj promjeni otpora što je svakako vrlo nepovoljno s aspekta mjerenja. Stoga su za mjerne trake pogodni materijali sa što manjom temperaturnom osjetljivošću.

S obzirom na izvedbu, mjerne trake možemo podijeliti na:

- žičane mjerne trake,
- mjerne trake s metalnom folijom,
- mjerne trake s metalnim filmom,
- mjerne trake s poluvodičem.

Starije izvedbe mjernih traka bile su načinjene od žica za otpornike promjera 15  $\mu\text{m}$  do 25  $\mu\text{m}$ . Aktivna duljina mjerne trake bila je relativno velika, obično 6 mm ili dulja. Na taj način postizao se veliki omjer duljine i poprečnog presjeka što je rezultiralo smanjenjem naprezanja na površini poprečnog presjeka.

Današnje izvedbe mjernih traka rade se iz tankih folija debljine od 3 do 5  $\mu\text{m}$  postupkom nagrizanja metalnih folija određenim kiselinama. Aktivne duljine variraju u rasponu od 0,2 mm do 100 mm.

Osim podjele prema izvedbi, trake možemo podijeliti i prema obliku i namjeni na:

- linearne mjerne trake,
- rozete.

Linearne mjerne trake koriste se za mjerenje deformacija u jednom smjeru, dok se rozete koriste za mjerenje deformacija u dva ili tri smjera. Rozete se koriste i za mjerenje naprezanja u membranama te za određivanje zaostalih naprezanja.

Mjerne trake mjere deformaciju na način da su čvrsto priliječljene na površini uzorka ili mjernog objekta. Pričvršćuju se najčešće ljepilom, a rjeđe točkastim zavarivanjem ili plamenim štrcanjem. Sredstva za učvršćivanje mogu biti:

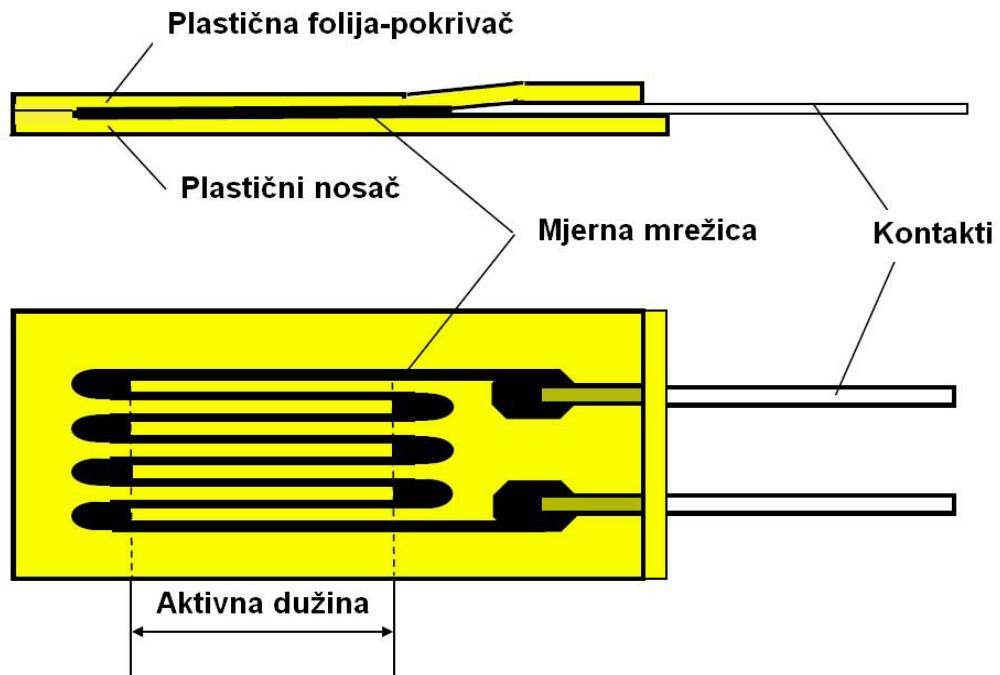
- dvokomponentna organska ljepila (temperaturno područje primjene -240 °C do 280 °C),
- keramički kit (temperaturno područje primjene -250 °C do 600 °C),
- plameno štrcanje (temperaturno područje primjene -270 °C do 1000 °C).

Ljepila kojim se pričvršćuju trake moraju zadovoljavati sljedeće zahtjeve:

- moraju osigurati dobro prianjanje između konstrukcije i nosećeg elementa trake,
- ne smiju imati osobine puzanja što bi moglo dovesti do pojave histereze,

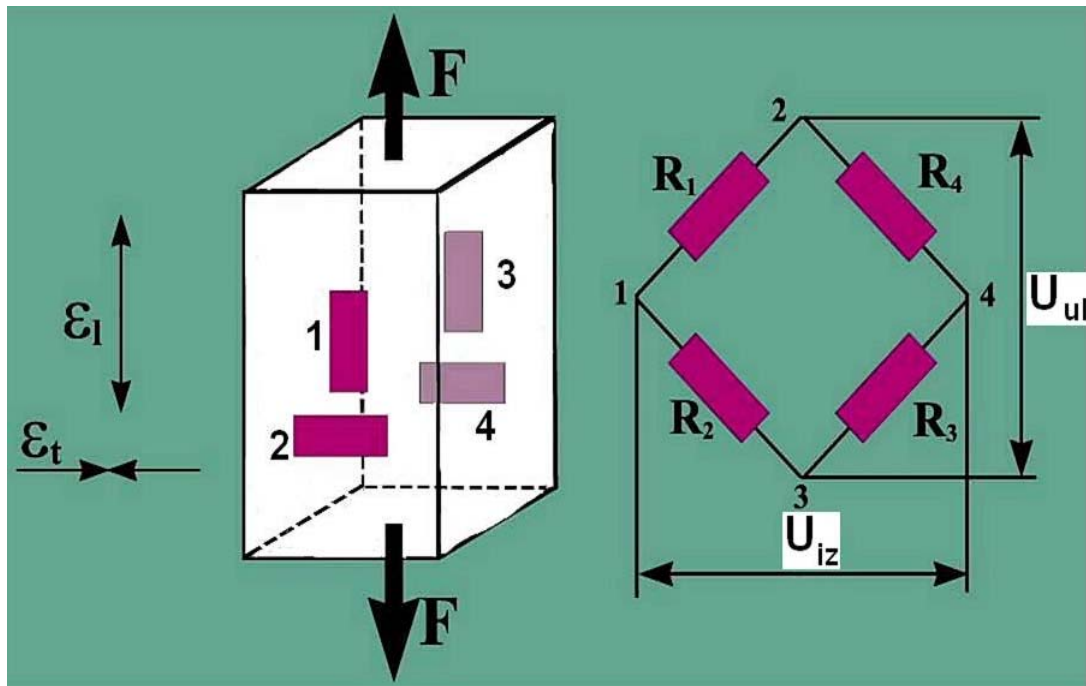
- trebaju biti otporna na vlagu.

Primjer mjerne trake s pripadajućim dijelovima prikazan je na slici 12. Donji dio mjerne trake je plastični nosač na kojem se nalazi mjerna mrežica, a s gornje strane je plastična folija. Plastični nosač prenosi deformacije s konstrukcije na mjernu mrežicu. Trake se mogu koristiti i bez gornje plastične folije u slučaju da mjere deformacije vrlo tankih objekata ili deformacije elastičnih materijala.



Slika 12 Mjerna traka

Za potrebe mjerenja, mjerne trake spajaju se u Wheatstonov most. Na slici 13 prikazan je raspored 4 mjerne trake spojene u puni Wheatstonov most i čvrsto nalijepljene na vlačno napregnuti štap. Mjerne trake 1 i 3 mjere uzdužnu deformaciju predmeta ( $\epsilon_l$ ), a trake 2 i 4 poprečnu deformaciju ( $\epsilon_t$ ).



Slika 13 Wheatstonov most s četiri mjerne trake

Zbog deformacije traka i relativne promjene njihova otpora mijenja se vrijednost izlaznog napona s Wheatstonovog mosta. Omjer izlaznog i ulaznog napona može se izraziti jednadžbom:

$$\frac{U_{iz}}{U_{ul}} = \frac{1}{4} \cdot \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (22)$$

Pozitivna promjena otpora u trakama 1 i 3 posljedica je rastezanja, dok je negativna promjena u trakama 2 i 4 rezultat njihova sabijanja. Budući da se relativna promjena otpora može izraziti umnoškom deformacije  $\varepsilon$  i konstante  $k$ , dobiva se sljedeći izraz:

$$\frac{U_{iz}}{U_{ul}} = \frac{k}{4} \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (23)$$

Uvođenjem Poissonove konstante, poprečna deformacija se može izraziti pomoću uzdužne deformacije pa se prethodni izraz može pisati u obliku:

$$\frac{U_{iz}}{U_{ul}} = \frac{k}{4} \cdot [\varepsilon_u - (-\nu \cdot \varepsilon_u) + \varepsilon_u - (-\nu \cdot \varepsilon_u)] \quad (24)$$

Ako je  $\nu=0,3$ , slijedi:

$$\frac{U_{iz}}{U_{ul}} = \frac{k}{4} \cdot 2,6 \cdot \varepsilon_u \quad (25)$$

Prednosti mjernih traka u odnosu na ostala mjerila deformacije jesu sljedeće:

- mogućnost mjerenja deformacija na daljinu,

- male dimenzije, mala masa,
- mogućnost mjerenja statičkih i dinamičkih naprezanja,
- skoro nikakva inertnost,
- mogućnost mjerenja deformacija na vrlo malim objektima ili strojnim dijelovima,
- mogućnost mjerenja deformacija u uvjetima visoke temperature (do 1000 °C).

Nedostaci mjernih traka su:

- relativno visoki troškovi,
- složen posao postavljanja i lijepljenja trake,
- potreba za mjernim pojačalom u svrhu pojačanja električnog signala,
- potrebna hermetička zaštita zbog štetnog utjecaja vlage.

### 5.1.2. Mjerno pojačalo

Mjerno pojačalo je jedan od glavnih elemenata mjernog sustava. Služi za pojačanje izlaznog signala s dinamometra budući da se radi o vrlo malim promjenama napona maksimalnog iznosa do 10 mV, uz napon napajanja Wheatstonovog mosta od 5 V. Da bi se tako male promjene napona mogle odrediti i očitati sa zadovoljavajućom točnošću, one se moraju dodatno pojačati uz pomoć mjernog pojačala. Osnovni zahtjevi koji se postavljaju pred mjerna pojačala jesu sljedeći:

- osiguravanje napona (struje) na izlazu koji su proporcionalni veličinama napona (struje) na ulazu pojačala,
- što manja vlastita potrošnja,
- što vjernije praćenje mjerene veličine (prenošenje signala bez dodatnih šumova i kašnjenja).

Pored toga, mjerna pojačala se koriste i za daljnju obradu mjernog signala (sabiranje, oduzimanje, množenje, logaritmiranje, integriranje i slične matematičke operacije).

Postupak obrade mjernog signala može se vršiti na dva načina:

- analogno i
- digitalno.

Analogna tehnika podrazumijeva korištenje različitih elektronskih krugova (operaciona pojačala), dok preciznija digitalna tehnika podrazumijeva korištenje programskih paketa za

obradu rezultata mjerenja. Na slici 14 prikazane su različite vrste mjernih pojačala koja su dio palete HBM-ovih proizvoda.



**Slika 14** Mjerna pojačala

Pojačala općenito možemo podijeliti na:

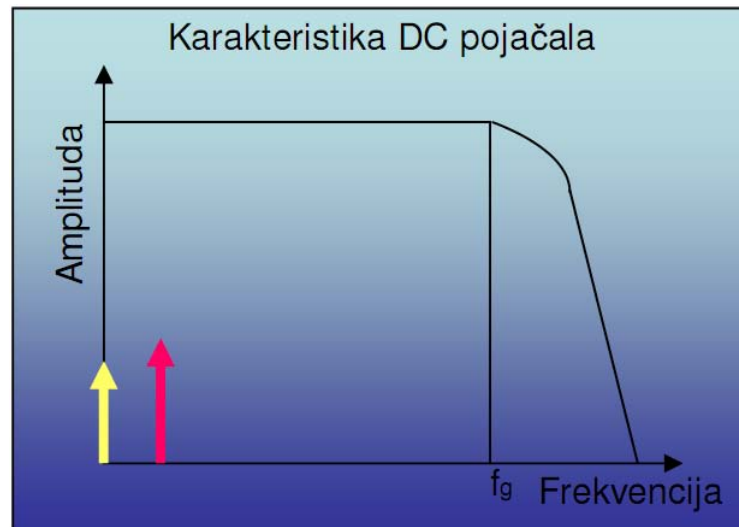
- industrijska pojačala,
- mjerna pojačala.

Industrijska pojačala su kompaktnog dizajna, zadovoljavajuće ponovljivosti i točnosti i moraju biti jednostavna za rukovanje. Mjerna pojačala od kojih se zahtijeva visoka točnost dijele se na dva tipa:

- DC (istosmjerna pojačala),
- CF (pojačala s nosećom frekvencijom).

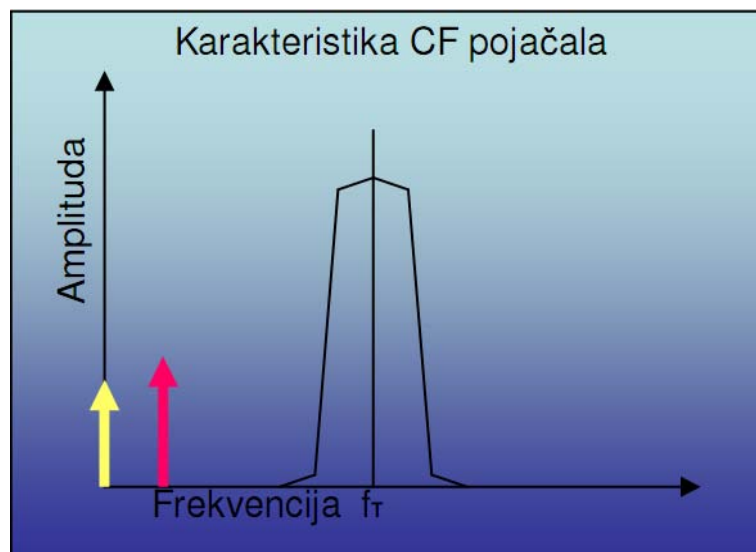
Na slikama 15 i 16 prikazane su karakteristike ovih pojačala. Kod DC pojačala (slika 15) postoji prekidna frekvencija  $f_g$  iznad koje ne dolazi do pojačanja signala te se iznad te frekvencije amplituda naglo smanjuje. Međutim, nepoželjna strana ovih pojačala je to što pojačavaju sve frekvencije ispod prekidne, pa tako i šumove, smetnje koje se javljaju prilikom mjerenja.





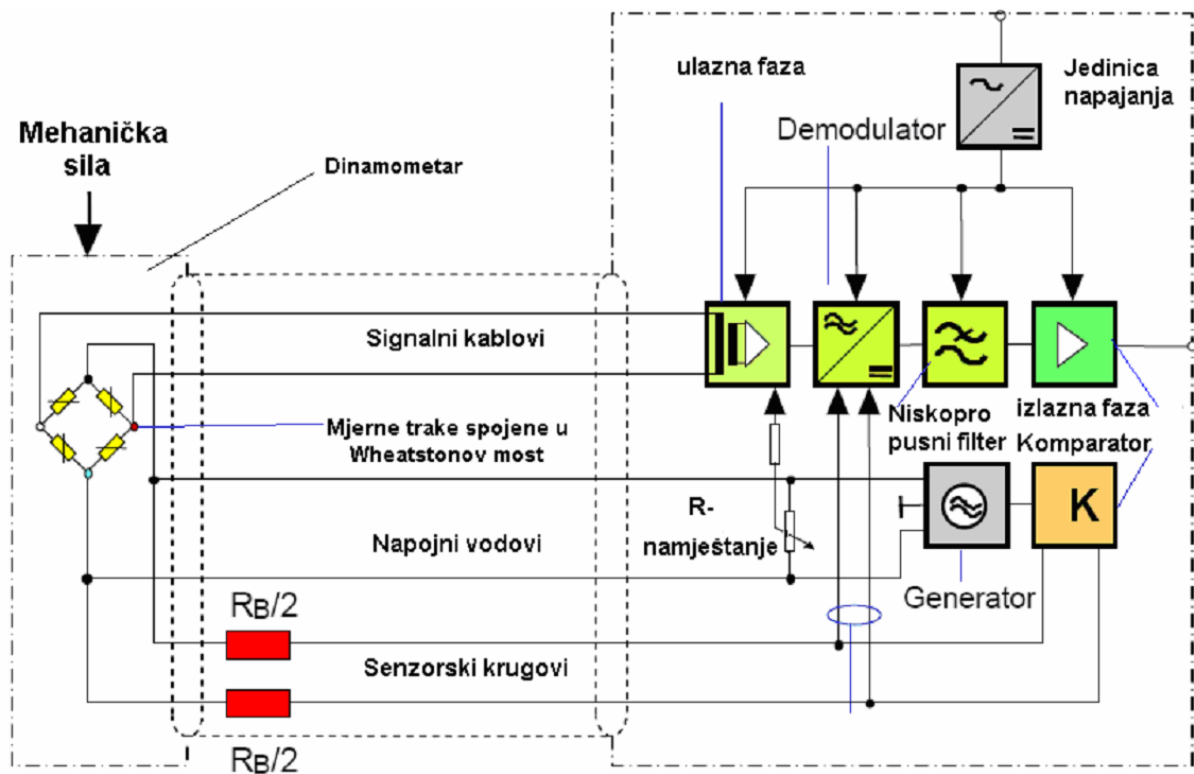
**Slika 15 Karakteristika DC pojačala**

Kod CF pojačala (slika 16) smanjuje se značajno utjecaj šumova i smetnji jer ona pojačavaju samo one signale čija je frekvencija blizu noseće  $f_T$ , pa su time CF pojačala puno točnija. Osim toga puno je stabilnija frekvencija nego kod DC pojačala s obzirom na signal nule i na promjenu signala uslijed temperaturnih varijacija.



**Slika 16 Karakteristika CF pojačala**

Frekvencijska područja za CF pojačala su niža nego ona kod DC pojačala. Na slici 17 prikazana je shema jednog CF pojačala s nosećom frekvencijom.

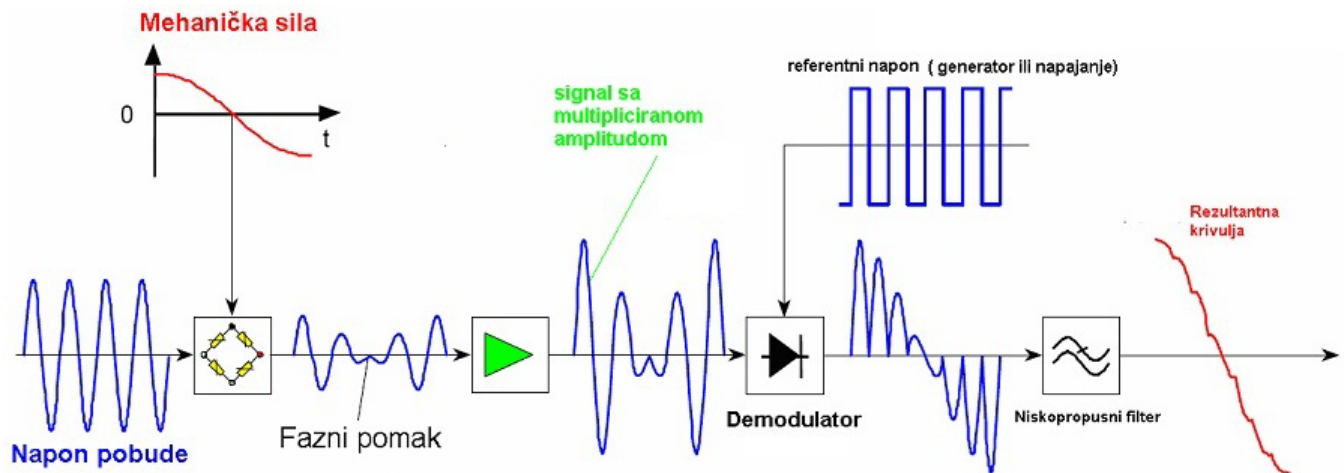


Slika 17 Blok dijagram CF pojačala

Naponski signal koji dolazi s mjernih traka u pojačalu se demodulira, filtrira i potom pojačava.

### 5.1.2.1. Princip rada mjernog pojačala

Proces mjerenja shematski je prikazan na slici 18. Djelovanjem neke mehaničke sile na dinamometar dolazi do deformacije mjernih traka odnosno promjene njihova otpora te se mijenja izlazni napon s Wheatstonovog mosta s obzirom na ulazni narinuti napon. Uslijed promjene amplitude i faznog pomaka javlja se izobličen izlazni signal. Taj signal je jako slab i da bi ga uopće mogli registrirati i dalje operirati njime potrebno ga je pojačati. Stoga ovaj signal ulazi u pojačalo u kojem prvo dolazi do multipliciranja amplitude, što je primarna zadaća pojačala. Ovako pojačani signal ide dalje u demodulator. Paralelno sa signalom u demodulator dolazi i referentni signal pravokutnog oblika te dolazi do superponiranja kada se noseći signal mijenja pod utjecajem tzv. obavjesnog signala.



**Slika 18 Promjena signala u mjernom sustavu**

Noseća frekvencija  $f_T$  je frekvencija referentnog napona. Brzina uzorkovanja je brzina pri kojoj se uzorkuje obavijesni signal. Frekvencija nosećeg signala je obično mnogo veća od najveće frekvencije ulazno obavijesnog signala. Nyquistov teorem uzorkovanja zahtjeva da brzina uzorkovanja bude veća od dvostrukog zbroja noseće frekvencije i najveće frekvencije moduliranog signala da bi demodulator informaciju povratio točno bez gubitaka.

Ovisno što je preneseno nosećim valom amplituda, frekvencija ili fazni pomak, ta informacija se uzima kao osnova za formiranje novog signala. Naposljetku signal ide u niskopropusni filter. Filtrirani signal sadrži vršne vrijednosti signala te takav izlazni signal daje informaciju o mjernoj vrijednosti, što se očitava na displeju ili šalje dalje na računalo kako bi se podaci dodatno obradili.

### 5.1.2.2. Filtriranje signala

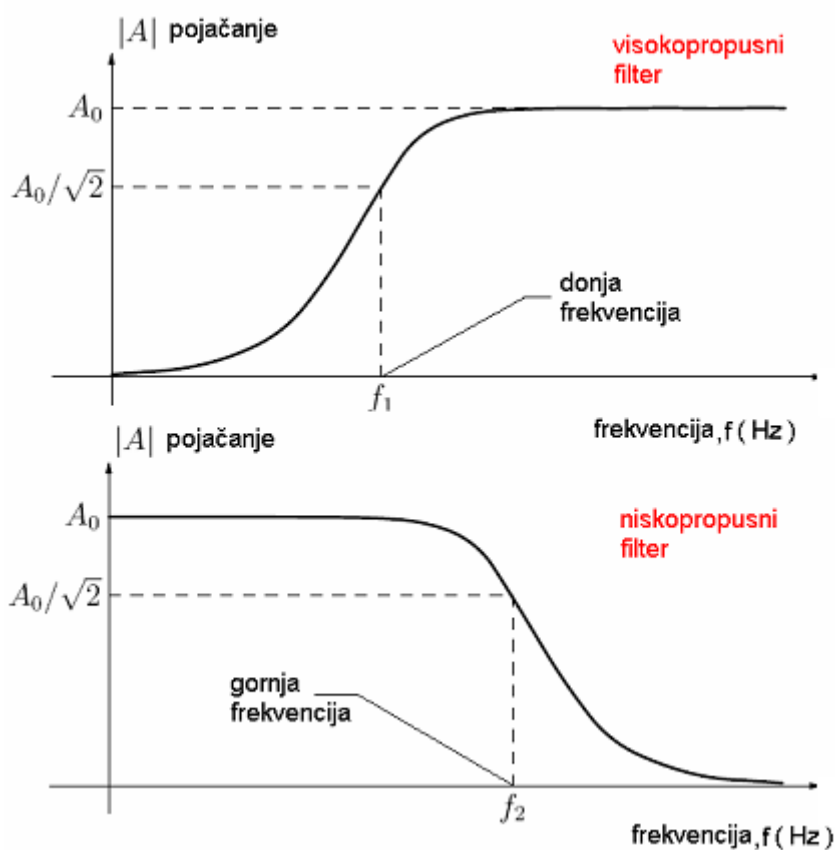
U elektroničkim uređajima potrebno je eliminirati različite oscilacije i pobude koje predstavljaju smetnje. To su tzv. šumovi. Premda se dio takvih smetnji otklanja dobrim uzemljenjem i efektom Faraday-evog kaveza, ostaju frekvencije koje se na taj način ne mogu otkloniti, a s druge strane javlja se i potreba da se kontrolira točno područje frekvencija koje nisu poželjne. Sklopovi kojima se kontrolira određeno frekvencijsko područje nazivaju se filteri.

Filtriranje signala vrši se radi eliminiranja određenih frekvencijskih područja u signalu (niskofrekventnih, visokofrekventnih ili pojasa srednje frekvencije). Ovisno o njihovoj frekventnoj karakteristici filteri mogu biti: niskopropusni, visokopropusni, pojasno-propusni i pojasno-nepropusni te uskopojasni (rezonantni). Filtriranje signala sastoji se u nepropuštanju ili propuštanju signala niskih, srednjih ili visokih frekvencija i to iz određenog spektra frekvencija

ulaznog signala. Pojas frekvencija koji se propušta naziva se propusna zona, a pojas koji se ne propušta jest nepropusna zona. Ovdje je riječ o pasivnim filterima i njihovom integralnom ili derivacijskom djelovanju.

Na slici 19 dana je usporedba karakteristika visokopropusnog i niskopropusnog filtera. Visokopropusni filter propušta signale većih frekvencija (frekvencije veće od donje granične frekvencije). Za razliku od visokopropusnog, niskopropusni filter propušta samo signale nižih frekvencija, frekvencija manjih od gornje granične frekvencije. Signale viših frekvencija ovaj filter prigušuje.

Kod visokopropusnog filtera vidljivo je iz grafa njegovo derivacijsko djelovanje koje proizlazi iz odgovarajuće kombinacije otpornika i kondenzatora. Dakle oni manifestiraju potpuno inverznu karakteristiku u odnosu na niskopropusne filtere.



**Slika 19 Usporedba karakteristika visokopropusnog i niskopropusnog filtera**

Visokopropusni filteri se koriste, da bi se suzbile neželjene interferencije niskih frekvencija ispod definirane prekidne frekvencije. Visokopropusnim filterom mogu se suzbiti spore fluktuacije kao što su one nastale utjecajem temperature.

Niskopropusni filteri se koriste da bi se suzbile neželjene interferencije visokih frekvencija iznad definirane prekidne frekvencije. Odziv amplitude, kašnjenje faze i impulsni odziv su ovisni o karakteristikama filtera. Interesantne su 2 vrste niskopropusnih filtera: Butterworth i Bessel. Butterworthova karakteristika pokazuje linearni odziv amplitude uz nadvišenje od oko 10% nakon čega dolazi do strmog pada iznad prekidne frekvencije. Bessel-ova karakteristika prikazuje impulsni odziv sa jako malim ili nikakvim nadvišenjem. Amplitudni odziv pada puno blaže. Butterworthova karakteristika se koristi kada je potrebno jako suzbijanje amplitude, malo iznad prekidne frekvencije  $f_g$ . Inače se koristi Besselova karakteristika.

## 6 Umjeravanje kidalice prema normi DIN EN ISO 7500-1

Umjeravanje kidalice provodi se prema normi DIN EN ISO 7500-1: *Metalni materijali - Provjeravanje statičkih jednoosnih kidalica* - Dio 1: Vlačno/tlačne kidalice - Provjeravanje i umjeravanje sustava za mjerenje sile.

Norma DIN EN ISO 7500-1 odnosi se na statičku provjeru sustava za mjerenje sile. Vrijednosti umjeravanja nisu vrijedeće za primjenu kod visokobrzinskih i dinamičkih ispitivanja.

Provjeravanje i umjeravanje kidalice općenito se sastoji iz dva dijela:

- opće provjere kidalice uključujući i pribora za primjenu sile,
- umjeravanja sustava za mjerenje sile.

### 6.1. Opći pregled kidalice

Ispitivanje kidalice obavlja se samo ukoliko je kidalica u ispravnom radnom stanju. U tu svrhu potrebno je provesti opći pregled kidalice prije samog umjeravanja sustava za mjerenje sile.

Opći pregled kidalice sastojati se od sljedećih operacija:

- vizualnog pregleda,
- pregleda strukture uređaja,
- pregleda pogonskog mehanizma traverze.

Vizualni pregled mora potvrditi:

- a) da je uređaj u dobrom radnom stanju i da nije izložen štetnim djelovanjima određenih aspekata njegovog općeg stanja kao što su trošenje ili defekti na vodilicama traverze ili čeljusti, te zračnost između stupova i traverze;
- b) da uređaj nije izložen štetnim okolišnim uvjetima (vibracije, električne interferencije, korozija, temperaturne varijacije itd.);
- c) da se utezi i njihove mase mogu točno identificirati ako je riječ o uređajima s klatnom.

Pregledom strukture uređaja provjerava se da li struktura i sustav prihvata omogućuju aksijalnu primjenu sile.

Pri pregledu pogonskog mehanizma traverze potrebno je ispitati da li pogonski mehanizam omogućuje jednoliku i mirnu promjenu sile te da je moguće postići različite diskretne sile sa zadovoljavajućom točnošću. Pogonski mehanizam također mora omogućiti različite brzine deformiranja ispitnog uzorka propisane normama za određena mehanička ispitivanja.

Kod tlačnih kidalica potrebno je obaviti i pregled tlačnih ploča koje mogu biti permanentno postavljene na kidalici ili predstavljaju zasebne komponente. Pregledom treba utvrditi da ploče obavljaju svoju funkciju sukladno zahtjevima kidalice. Ukoliko nisu navedeni drugačiji zahtjevi u određenim normama, odstupanje ravnoće smije biti 0,01 mm na 100 mm duljine. Kad se radi o čeličnim pločama tvrdoća mora biti veća ili jednaka od 55 HRC. Kod uređaja koji se koriste za ispitivanje uzoraka osjetljivih na savojna naprezanja, gornja ploča mora biti postavljena u kuglasto ležište tako da se u neopterećenom stanju može slobodno zakretati za kut od približno 3°.

## **6.2. Umjeravanje sustava za mjerenje sile**

### **6.2.1. Općenito**

Umjeravanje predstavlja skup operacija kojima se pod određenim uvjetima uspostavlja veza između vrijednosti očitanih na mjernom instrumentu ili mjernom sustavu, ili vrijednosti prezentiranih materijalnom mjerom ili referentnim materijalom i odgovarajućih vrijednosti ostvarenih pomoću etalona.

Na temelju rezultata umjeravanja omogućuje se namještanje mjerila prema očitanjima ili utvrđivanje korekcija s obzirom na očitavanja.

Umjeravanje kidalice se provodi za sva mjerna područja koja se rabe i za sve korištene pokazivače sile. Bilo koji dodatni uređaj (npr. prateća kazaljka ili pisač) koji mogu štetno utjecati na sustav za mjerenje sile potrebno je također provjeriti.

Ukoliko kidalica ima nekoliko sustava za mjerenje sile, svaki sustav treba razmatrati kao zasebnu cjelinu. Jednaka procedura vrijedi i za hidrauličke uređaje s dvostrukim klipom.

Umjeravanje se provodi pomoću etalonskih dinamometara osim u slučaju kada je iznos sile manji od donje granice mjernog područja etalonskog uređaja pri čemu je dozvoljeno umjeravanje korištenjem utega poznatih masa. Kad se za provjeru sila koristi set utega, on se smatra jedinstvenim mjernim sustavom. Instrumenti koji se koriste za umjeravanje moraju imati dokazanu sljedivost prema međunarodnom sustavu jedinica. Ukoliko se umjeravanje provodi pomoću prijenosnih etalona sile oni moraju zadovoljiti zahtjeve norme ISO 376. Klasa etalonskog mjerila mora biti jednaka ili bolja od klase za koju se kidalica umjerava.

Kad se za umjeravanje mjernog područja koristi nekoliko etalona sile, najveća sila primijenjena na manji uređaj mora biti jednaka najmanjoj sili primijenjenoj na etalonski dinamometar većeg kapaciteta.

Prilikom umjeravanja potrebno je minimizirati bilo kakve efekte savijanja o čemu je potrebno voditi računa prilikom namještanja prijenosnog etalona sile. Etalonski dinamometar treba postaviti na kidalicu na takav način da se efekti savijanja svedu na što je moguće manju mjeru. Pri namještanju prijenosnog etalona za tlačno umjeravanje, na uređaj je potrebno postaviti ploču s kuglastim zglobovom ako kidalica nema već inkorporiranu takvu ploču.

Umjeravanje se obavlja pri okolišnoj temperaturi između 10 °C i 35 °C pri čemu je potrebno osigurati dovoljan vremenski period da etalonski uređaj postigne konstantnu temperaturu. Temperatura etalonskog uređaja mora ostati stabilna unutar granica od  $\pm 2$  °C tijekom svakog niza mjerenja.

### 6.2.2. Određivanje rezolucije

Prije umjeravanja potrebno je odrediti rezoluciju ( $r$ ) pokazivača sile ovisno o tome radi li se o analognoj ili digitalnoj skali. Kod analogne skale rezolucija je jednaka omjeru širine kazaljke i udaljenosti između dvije susjedne oznake skale. Preporučeni su odnosi 1:2, 1:5 ili 1:10, a razmak od 2,5 mm ili veći potreban je da bi se očitala jedna desetina podjele skale.

Kod digitalne skale rezolucija je jednaka jednom pomaku na brojaču numeričkog indikatora pod uvjetom da očitavanja ne variraju više od jednog pomaka kada je uređaj neopterećen, a motor i upravljački sustav rade.

Ukoliko očitavanja variraju više od vrijednosti prethodno određene rezolucije tada se uzima da je rezolucija jednaka polovici područja fluktuacije uvećano za jedan pomak sile.

Rezolucija ( $r$ ) izražava se u mjernoj jedinici za silu.

Na temelju rezolucije „ $r$ “ određuje se relativna rezolucija ( $a$ ) pokazivača sile i to za svaku mjernu točku umjeravanja:

$$a = \frac{r}{F_i} \cdot 100 \quad (26)$$

gdje je  $F_i$  sila na razmatranoj mjernoj točki.

Relativna rezolucija ne smije preći vrijednosti navedene u tablici 1 za određenu klasu kidalice.



### 6.2.3. Priprema kidalice za umjeravanje

Prije započinjanja mjernih nizova potrebno je kidalicu s namještenim etalonskim uređajem pripremiti za umjeravanje što uključuje barem tri predopterećenja između nule i maksimalne mjerene sile.

### 6.2.4. Postupak umjeravanja

Umjeravanje se u principu obavlja s konstantnim silama  $F_i$  očitanim na pokazivaču sile kidalice. Za zadanu silu  $F_i$  bilježi se vrijednost stvarne sile  $F$  očitane na etalonskom uređaju. Ukoliko to nije moguće, umjeravanje se provodi s konstantnim stvarnim silama kada je za određenu stvarnu silu  $F$  očitano na etalonskom uređaju potrebno zabilježiti silu  $F_i$  na pokazivaču sile ispitivane kidalice. Riječ „konstantna“ označuje da se iste vrijednosti sile  $F_i$  (ili  $F$ ) koriste u svim nizovima mjerenja.

Kod umjeravanja mjernog sustava sile potrebno je načiniti tri niza mjerenja pri rastućoj sili te jedan niz pri padajućoj sili. Svaki niz mjerenja mora sadržavati najmanje pet diskretnih sila približno jednako raspoređenih u intervalu između 20% i 100% maksimalne vrijednosti skale.

Ukoliko se umjeravanje obavlja ispod 20% mjernog područja, potrebno je obaviti dodatna mjerenja pri točkama 10%, 5%, 2%, 1%, 0,5%, 0,2% i 0,1% maksimalnog iznosa skale čemu je potrebno dodati i donju granicu umjeravanja.

Donja granica mjernog područja određuje se množenjem rezolucije „r“ sa odgovarajućim faktorom:

- 400 za klasu 0,5;
- 200 za klasu 1;
- 100 za klasu 2;
- 67 za klasu 3.

Kod kidalice s automatskom promjenom područja potrebno je obaviti barem dva mjerenja kod sila pri kojima se rezolucija ne mijenja.

Prije drugog i trećeg uzlaznog niza potrebno je etalonski uređaj rotirati za kut od 120° nakon čega slijedi predopterećenje i tek potom novi mjerni niz.

Za svaku diskretnu silu izračunava se aritmetička srednja vrijednost rezultata pojedinih nizova. Pomoću tih aritmetičkih sredina računaju se relativna pogreška točnosti i relativna pogreška ponovljivosti sustava za mjerenje sile.

Prije svake serije mjerenja potrebno je očitavanje na pokazivaču kidalice postaviti na nulu. Očitavanje se namješta na nulu otprilike 30 s nakon što je kidalica rasterećena. Ukoliko se radi o analognom pokazivaču, kazaljka mora slobodno balansirati oko nule, dok kod digitalnog pokazivača svaki pad sile ispod nule mora se trenutno registrirati, npr. predznakom pokazivača (+ ili -).

Relativna pogreška nule ( $f_0$ ) za svaki mjerni niz računa se iz jednadžbe:

$$f_0 = \frac{F_{i0}}{F_N} \times 100 \quad (27)$$

Ukoliko kidalica raspolaže dodatnim priborom (prateća kazaljka, pisač) potrebno je provjeriti utjecaj pribora na rad kidalice zbog otpora i trenja kojeg stvaraju mehanički dijelovi. To se može postići jednom od sljedećih metoda ovisno o tome rabi li se uređaj s dodatnim priborom ili bez njega:

- a) kidalica se normalno koristi s dodatnim priborom: provode se tri niza mjerenja s rastućom silom i priključenim dodatnim priborom, te još jedan dodatni niz mjerenja u najmanjem mjernom području bez pribora.
- b) kidalica se normalno koristi bez dodatnog pribora: provode se tri niza mjerenja s rastućom silom pri čemu je dodatni pribor isključen, te još jedan dodatni niz mjerenja u najmanjem mjernom području s dodatnim priborom u funkciji.

U oba slučaja, relativna pogreška točnosti  $q$  računa se iz tri glavna niza mjerenja, dok se relativna pogreška ponovljivosti  $b$  računa za sve četiri serije. Vrijednosti dobivene za  $b$  i  $q$  moraju udovoljavati vrijednostima navedenim u tablici 1 za odgovarajuću klasu kidalice. Također moraju biti zadovoljeni i sljedeći uvjeti:

- za umjeravanje s konstantnom silom očitanom na pokazivaču sile ispitivane kidalice:

$$100 \left| \frac{F_i - F_c}{F_c} \right| \leq 1,5|q| \quad (28)$$

gdje je  $F_i$  sila očitana na pokazivaču sile kidalice pri rastućoj ispitnoj sili, a  $F_c$  je stvarna sila očitana na etalonskom uređaju pri rastućoj ispitnoj sili u dopunskom nizu mjerenja u najmanjem mjernom području;

- za umjeravanje s konstantnom stvarnom silom:

$$100 \left| \frac{F_{ic} - F}{F} \right| \leq 1,5|q| \quad (29)$$

gdje je  $F_{ic}$  sila očitana na pokazivaču sile kidalice pri rastućoj ispitnoj sili u dopunskom nizu mjerenja u najmanjem mjernom području, a  $F$  je stvarna sila očitana na etalonskom uređaju pri rastućoj ispitnoj sili.

U navedenim jednadžbama, vrijednost  $q$  je najveća dopuštena vrijednost navedena u tablici 1 za razmatranu klasu mjernog područja.

Kod hidrauličkih kidalica, kod kojih se hidraulički tlak koristi za induciranje sile potrebno je provjeriti utjecaj različitih položaja klipa u najmanjem mjernom području. Klip mora biti u drugačijem početnom položaju za svaki mjerni niz. Ukoliko se radi o uređajima s dva klipa, u obzir se moraju uzeti oba klipa.

#### 6.2.4.1. Relativna pogreška reverzibilnosti

Relativna pogreška reverzibilnosti ( $v$ ) određuje se umjeravanjem pri istim diskretnim silama, najprije s rastućom a potom i s padajućom ispitnom silom. Na temelju vrijednosti izmjerenih pri rastućoj sili ( $F$  ili  $F_i$ ) i padajućoj ( $F'$  ili  $F_i'$ ) izračunava se relativna pogreška reverzibilnosti temeljem jednadžbe:

$$v = \frac{F_i - F'}{\bar{F}} \times 100 \quad (30)$$

ili za poseban slučaj umjeravanja s konstantnom stvarnom silom:

$$v = \frac{F_i' - F_i}{F} \times 100 \quad (31)$$

Ovu pogrešku potrebno je izračunati za svaku mjernu točku u najmanjem i najvećem mjernom području.

#### 6.2.4.2. Relativna pogreška točnosti

Relativna pogreška točnosti ( $q$ ) izražava se kao postotak srednje vrijednosti stvarne sile  $F$ :

$$q = \frac{F_i - \bar{F}}{\bar{F}} \times 100 \quad (32)$$

gdje je  $F_i$  sila očitana na pokazivaču sile kidalice pri rastućoj ispitnoj sili, a  $\bar{F}$  je aritmetička sredina nekoliko mjerenja stvarne sile  $F$  na istoj mjernoj točki.

Za poseban slučaj kada se umjeravanje temelji na konstantnim stvarnim silama, relativna pogreška točnosti definirana je jednadžbom:

$$q = \frac{\bar{F}_i - F}{\bar{F}} \times 100 \quad (33)$$

gdje je  $\overline{F}_i$  i  $\overline{F}$  aritmetička sredina nekoliko mjerenja  $F_i$  odnosno  $F$  na istoj mjernoj točki, a  $F$  je stvarna sila očitana na etalonskom uređaju pri rastućoj ispitnoj sili.

### 6.2.4.3. Relativna pogreška ponovljivosti

Relativna pogreška ponovljivosti ( $b$ ) za svaku diskretnu silu definirana je kao omjer razlike između najveće ( $F_{max}$ ,  $F_{imax}$ ) i najmanje izmjerene vrijednosti ( $F_{min}$ ,  $F_{imin}$ ) i prosječne vrijednosti stvarne sile:

$$b = \frac{F_{max} - F_{min}}{\overline{F}} \times 100 \quad (34)$$

Ako se umjeravanje provodi sa konstantnom stvarnom silom relativna pogreška ponovljivosti slijedi iz jednadžbe:

$$b = \frac{F_{imax} - F_{imin}}{F} \times 100 \quad (35)$$

### 6.2.4.4. Podudarnost između dva prijenosna etalona sile

Kad su za umjeravanje mjernog područja potrebna dva prijenosna etalonska dinamometra te se ista sila zasebno primjenjuje na oba uređaja, tada razlika između relativnih pogrešaka točnosti ( $q$ ) dobivenih za svaki uređaj ne smije biti veća od 1,5 x vrijednost maksimalno dozvoljene pogreške ponovljivosti ( $b$ ) za odgovarajuću klasu:

$$q_1 - q_2 \leq 1,5 \cdot b \quad (36)$$

### 6.2.4.5. Određivanje klase mjernog područja

Tablica 1 sadrži maksimalne dopuštene vrijednosti različitih relativnih pogrešaka sustava za mjerenje sile, te relativne rezolucije pokazivača sile koje karakteriziraju područje kidalice u skladu s njegovom klasom.

**Tablica 1 Vrijednosti relativnih pogrešaka za različite klase kidalice**

Klasa mjernog područja	Maksimalne dozvoljene vrijednosti, %				
	Relativna pogreška				Relativna rezolucija
	točnosti	ponovljivosti	reverzibilnosti	nule	
	$q$	$b$	$v$	$f_0$	$a$
0,5	±0,5	0,5	±0,75	±0,05	0,25
1	±1,0	1,0	±1,5	±0,1	0,5
2	±2,0	2,0	±3,0	±0,2	1,0
3	±3,0	3,0	±4,5	±0,3	1,5

Mjerno područje pokazivača sile smatra se ispravnim ukoliko su dobiveni zadovoljavajući rezultati u području od najmanje 20% do 100% nazivne vrijednosti.

### **6.2.5. Učestalost umjeravanja**

Vremenski razmak između dva umjeravanja ovisi o vrsti kidalice, njenom održavanju i učestalosti korištenja. Ukoliko nije drugačije naznačeno vremenski razmak ne bi smio biti dulji od 12 mjeseci.

Osim toga kidalicu je potrebno obavezno podvrgnuti ispitivanju ako se premješta na novu lokaciju i pritom rastavlja te ukoliko se podvrgava većim popravcima ili namještanjima.

## 7 Eksperimentalni dio

### 7.1. Plan eksperimentalnog dijela

U eksperimentalnom dijelu rada provedeno je umjeravanje kidalice s različitim brojem prethodnih predopterećenja. Umjeravanje je općenito skup operacija kojima se uspostavlja veza između vrijednosti očitanih na ispitivanom mjernom sustavu i odgovarajućih vrijednosti ostvarenih pomoću etalona. Kad je riječ o kidalici, umjeravanje se provodi usporedbom vrijednosti sila prikazanih na pokazivaču kidalice i vrijednosti izmjerenih pomoću prijenosnog etalona sile.

Prijenosni etalonski dinamometar koji se koristi za umjeravanje sadrži tenzometarske mjerne trake koje se pod utjecajem opterećenja deformiraju pri čemu se mijenja električni otpor. Zbog promjene električnog otpora mijenja se izlazni napon s Wheatstonovog mosta s obzirom na ulazni narinuti napon što predstavlja električni signal na izlazu iz dinamometra. Stoga se rezultati umjeravanja prikazuju u obliku promjene napona i izražavaju u mV/V. Budući da se radi o malim promjenama napona, izlazni signal se dodatno pojačava uz pomoć mjernog pojačala koje je sastavni dio prijenosnog etalona sile.

Prije same provedbe umjeravanja potrebno je kidalicu s namještenim dinamometrom predopteretiti između nule i najveće ispitivane sile kako bi kidalica i etalonski sustav bili spremni za umjeravanje. Hipoteza je ovog rada da prijenosni etalon sile u rasterećenom stanju sadrži određenu zaostalu deformaciju ukoliko je prethodno opterećen silom suprotnog smjera. Ta mala deformacija koja zaostaje u mjernim trakama utjecat će na rezultate kasnijih mjerenja pa se na neki način ona mora anulirati što se postiže provođenjem predopterećenja. Da bi se ocijenio utjecaj predopterećenja na rezultate umjeravanja kidalice tj. relativne pogreške mjernog sustava sile, a time indirektno i na klasu mjernog područja u radu je provedeno umjeravanje kidalice variranjem broja predopterećenja. Umjeravanje je načinjeno bez predopterećenja te sa jednim, dva, tri odnosno četiri prethodna opterećivanja do vrijednosti nazivne sile. Budući da dostupna literatura ne daje podatke o utjecaju višestrukog predopterećenja na rezultate umjeravanja, variranjem broja predopterećenja i analizom dobivenih rezultata nastoje se donijeti zaključci o efektima predopterećenja u pogledu karakterističnih pogrešaka mjernog sustava sile ispitivane kidalice.

## 7.2. Ispitivana kidalica

Umjeravana kidalica zajedno s upravljačkom jedinicom spojenom na računalo prikazana je na slici 20. Karakteristike ispitivane kidalice navedene su u tablici 2.



**Slika 20 Hidraulična kidalica WPM EU 40 mod.**

**Tablica 2 Karakteristike umjeravane kidalice**

Proizvođač:	VEB WPM, Njemačka
Tip:	Hidraulična
Vrsta:	EU 40 mod
Mjerno područje:	0 - 400 kN
Smjer sile:	Vlak, tlak
Nazivna sila:	400 kN
Mjerni sustav:	Električni pretvornik tlaka; digitalni pokazivač

### 7.3. Prijenosni etalon sile

Prijenosni etalon sile sastoji se od etalonskog dinamometra tipa Z4A nazivne sile 500 kN, mjernog pojačala DMP 40 i prihvatnih naprava za vlačno i tlačno opterećivanje.

Na slici 21 prikazan je električni vlačno tlačni dinamometar Z4A korišten u eksperimentalnim ispitivanjima. Ovaj dinamometar rabi se za visoko precizna mjerenja u postupku umjeravanja mjerila sile kao što su kidalice, preše i sl.



Slika 21 Dinamometar Z4/500 kN

Tehničke karakteristike dinamometra navedene su u tablici 3.

Tablica 3 Karakteristike dinamometra

Proizvođač:	Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM) GmbH, Njemačka	
Tip:	Z4A	
Serijski broj:	88923	
Duljina kabela:	cm	40 + 705
Maksimalno preopterećenje:	%	150
Nominalni temperaturni raspon:	°C	10-40
Način opterećivanja:	Vlak/tlak	
Nazivna osjetljivost:	mV/V	2
Materijal kućišta:	čelik	
Masa	kg	42



Mjerno pojačalo DMP40 prikazano na slici 22 omogućuje visoko precizna komparativna mjerenja mehaničkih veličina kao što su sila, masa, moment i tlak. Radi se o pojačalu vrlo visoke točnosti, osjetljivosti, rezolucije i stabilnosti signala.



**Slika 22 Mjerno pojačalo DMP 40**

Pojačalo radi na principu noseće frekvencije 225 Hz i klase je točnosti 0,0005. DMP40 raspolaže s 2 vrste digitalnih filtera: Butterworth i Bessel. Tehnička specifikacija pojačala dana je u tablici 4.

**Tablica 4 Karakteristike pojačala**

Proizvođač:	Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Njemačka	
Tip:	DMP40	
Klasa točnosti:		0,0005
Broj pojačala:		1
Napon napajanja:	V	2,5 ; 5 ; 10
Noseća frekvencija:	Hz	225±100 ppm
Dopuštena duljina kabela:	m	<<200
Mjerno područje:	mV/V	±2,5 ; ±5 ; ±10
Rezolucija:		0,000001
Digitalni filter:	Hz	0,03....11
Rezolucija displeja:	digit	<1000000
Ulazni otpor:	MΩ	1000
Napon mreže:	V	230 ± 10%
Masa:	kg	14
Dimenzije:	mm	458 x 171 x 367

Na slici 23 prikazane su različite prihvatne naprave za vlačno/tlačno opterećivanje dinamometra. Naprave su tako izvedene da omogućuju jednoosno aksijalno opterećenje bez pojave radijalne komponente sile koja bi uzrokovala nepoželjni efekt savijanja. Vlačne naprave se u principu sastoje od dvije kružne matice, dvije kružne šalice te od dvije šipke za prenošenje vlačnog opterećanja dok se za potrebe tlačnog opterećivanja koristi jedan ili dva tlačna podloška. Tlačni podložak je dizajniran tako da smanji površinski pritisak na dinamometar. Pri velikim silama dozvoljeno je korištenje i dva podloška. Podložak može imati ravnu ili konveksnu gornju površinu za uvođenje sile. Oblik i dimenzije vlačno/tlačnih naprava definirani su normom ISO 376.



**Slika 23 Prihvatne naprave za vlačno/tlačno opterećivanje**

#### **7.4. Umjeravanje**

Umjeravanje je provedeno vlačnim opterećivanjem kidalice u skladu s normom DIN EN ISO 7500-1.

Prije samog umjeravanja obavljen je opći pregled kidalice kako bi se utvrdilo da je kidalica u dobrom radnom stanju te ispravna za umjeravanje. Vizualnim pregledom je utvrđeno da nema izraženog trošenja i defekata na vodilicama traverze odnosno čeljusti, te da nema zračnosti između stupova i traverze. Općim pregledom kidalice ustanovljeno je da nema štetnih okolišnih utjecaja kao što su vibracije, električne interferencije, korozija i temperaturne oscilacije. Pregledom strukture kidalice i sustava prihвата utvrđeno je da oni omogućuju aksijalnu silu. Pri pregledu pogonskog mehanizma traverze vidljivo je da pogonski sustav ostvaruje kontinuiranu i polaganu promjenu sile te da je moguće postići različite diskretne sile s prihvatljivom točnošću.

Umjeravanje je obavljeno pomoću prijenosnog etalona sile koji zadovoljava zahtjeve norme ISO 376. Klasa etalonskog dinamometra je 00 odnosno 0,5 što je bolje ili jednako klasi za koju se kidalica umjerava. Dinamometar je namješten na kidalicu i pravilno pozicioniran kako bi se

djelovanje radijalne komponente sile svelo na najmanju moguću mjeru. Potom je dinamometar priključen na mjerno pojačalo i tako ostavljen 30 minuta radi stabiliziranja mjernog signala. Za potrebe umjeravanja na mjernom pojačalu su odabrani sljedeći parametri:

- napon napajanja Wheatstonovog mosta 5 V;
- puni most, 4 mjerne trake;
- mjerno područje: 2,5 mV/V, (zbog mogućnosti preopterećenja);
- vrijednost "nule" je postavljena na 0 mV/V;
- izabrana je mjerna jedinica: mV/V;
- podešena je rezolucija pokazivača na 0,00001 mV/V.

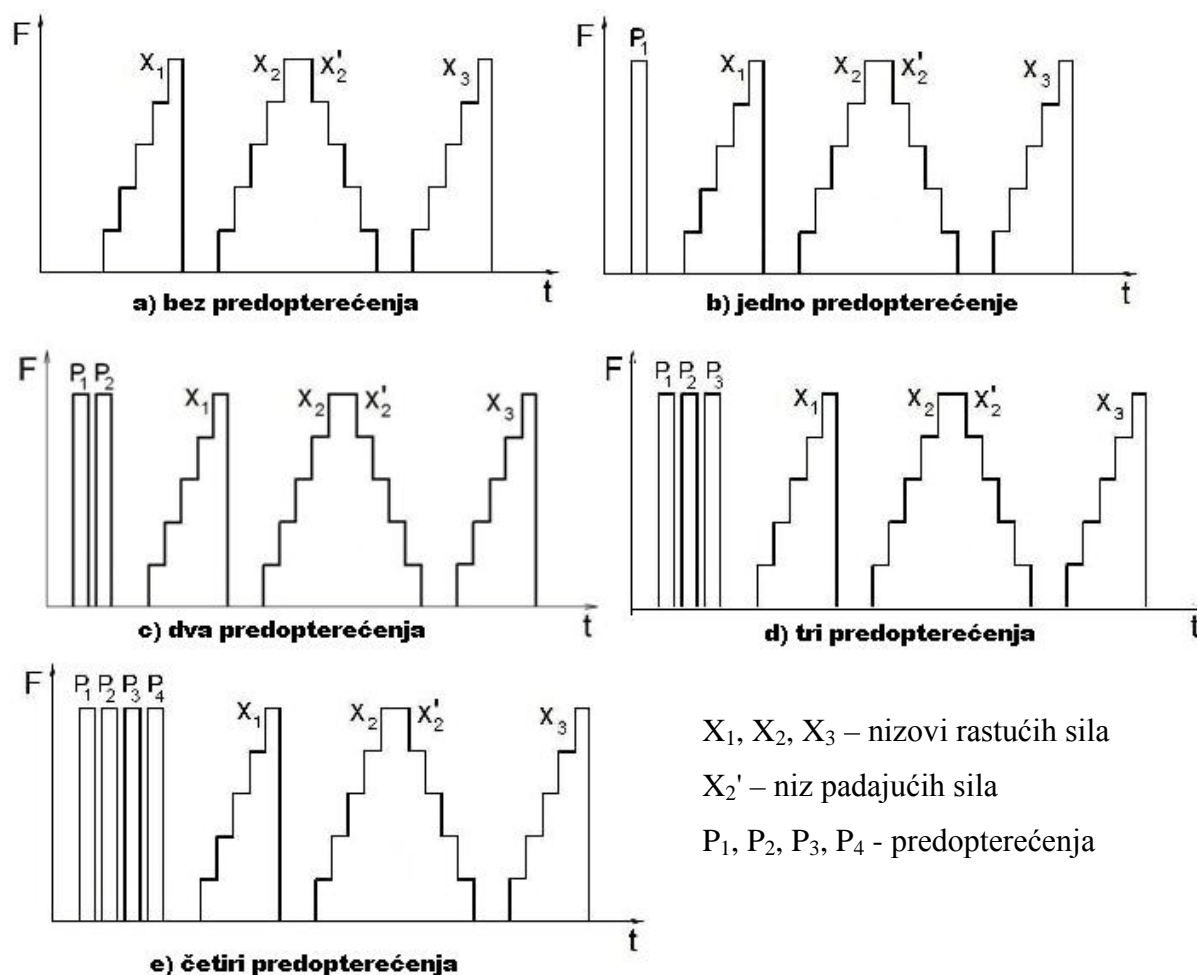
Prije započinjanja vlačnog umjeravanja, dinamometar i kidalica su tri puta tlačno opterećeni sve do nazivne sile mjernog područja kako bi se prijenosni etalon sile i njegove tenzometarske trake rastegnule u smjeru suprotnom onomu kod umjeravanja. Ovo će imati važnu ulogu pri kasnijem vlačnom umjeravanju. Tlačno predopterećivanje prikazano je slikom 24.



**Slika 24 Tlačno predopterećenje kidalice i dinamometra**

Nakon toga se pristupilo samom umjeravanju kidalice koje uključuje vlačna predopterećenja iza kojih slijede mjerni nizovi umjeravanja. Kako bi se utvrdio značaj predopterećenja u postupku umjeravanja kidalice, provedeno je ukupno pet umjeravanja s različitim brojem vlačnih predopterećenja. S ciljem što kvalitetnije analize utjecaja predopterećenja na rezultate ispitivanja napravljeno je polazno umjeravanje bez prethodnog opterećivanja, a svako sljedeće umjeravanje

sadržalo je jedan niz predopterećenja više, do maksimalno četiri. Na slici 25 shematski su prikazani postupci umjeravanja. Svaki pojedini vertikalni stupac na slici 25 predstavlja jedno predopterećenje pri čemu je potrebno uzeti u obzir da je početno umjeravanje obavljeno bez predopterećenja. Predopterećenje se obavlja između nule i maksimalne sile koja u ovom slučaju iznosi 400 kN.



Slika 25 Shematski prikaz umjeravanja

Sukladno normi DIN EN ISO 7500-1, nakon predopterećenja slijede četiri mjerna niza umjeravanja i to tri niza s rastućom ispitnom silom, te jedan niz mjerenja s padajućom silom. Mjerni nizovi su shematski prikazani na slici 25 pri čemu  $X_1, X_2$  i  $X_3$  označavaju nizove rastućih sila, a  $X_2'$  niz padajućih sila. Nakon niza  $X_1$ , dinamometar se zakreće za kut od  $120^\circ$  nakon čega slijede nizovi  $X_2$  i  $X_2'$ . Prije posljednjeg rastućeg niza  $X_3$  dinamometar se ponovno rotira za  $120^\circ$  tako da ukupan kut zakreta dinamometra iznosi  $240^\circ$  s obzirom na početni položaj. Nakon svakog zakretanja potrebno je kidalicu i dinamometar jednom predopteretiti do maksimalne sile

i tek potom slijedi novi mjerni niz. Na slici 26 prikazan je postupak vlačnog umjeravanja kidalice.

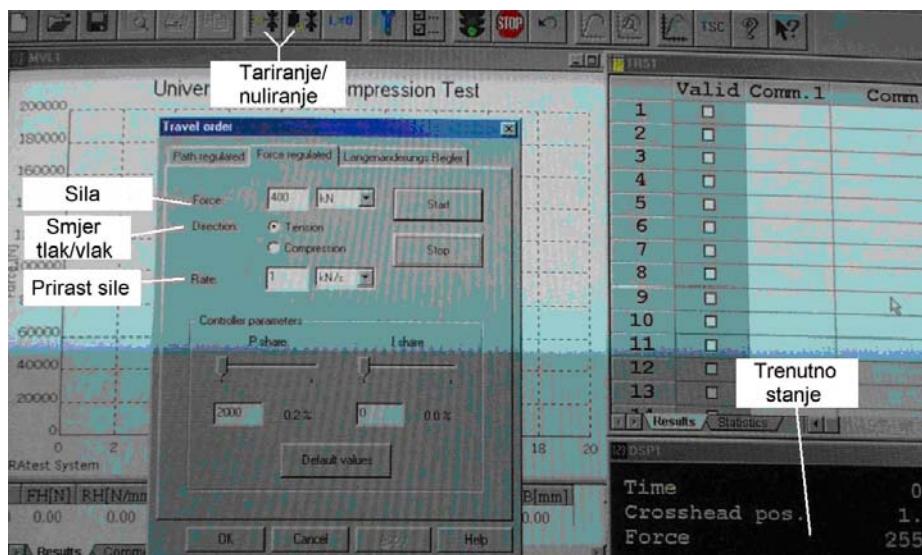


**Slika 26** Vlačno umjeravanje kidalice

Svaki mjerni niz sastoji se od pet diskretnih sila pravilno raspoređenih u rasponu od 20% do 100% nazivne vrijednosti mjernog područja kidalice. Budući da je maksimalna sila 400 kN, mjerne točke redom su iznosile: 80 kN, 160 kN, 240 kN, 320 kN i 400 kN.

Prije svakog rastućeg niza očitavanje na kidalici je postavljeno na nulu i to otprilike 30 s nakon što je opterećenje potpuno uklonjeno. U tom trenutku nulirano je i mjerno pojačalo, kako bi kidalica i etalonski mjerni sustav bili spremni za umjeravanje.

Na slici 27 prikazano je sučelje upravljačkog programa pomoću kojeg se upravlja radom kidalice. U programu se definira smjer sile, iznos sile, brzina prirasta opterećenja i provodi nuliranje. U svakom trenutku moguće je pratiti trenutno stanje aktivnih veličina.



Slika 27 Prikaz upravljačkog programa kidalice

U postupku umjeravanja za određene vrijednosti diskretnih sila očitane na kidalici zabilježene su vrijednosti mjernog signala prienosnog etalona sile u obliku promjene napona izražene u mV/V. Nakon provedenih umjeravanja, dobiveni podaci su obrađeni i međusobno analizirani.

## 7.5. Rezultati umjeravanja

Sva umjeravanja su provedena pri temperaturi od 22,2 °C. Brzina prirasta sile u mjernim nizovima iznosila je 1 kN/s, a brzina predopterećenja 5 kN/s. Frekvencija Butterworthova filtera na mjernom pojačalu iznosila je 8,7 Hz. Mjerenja su obavljena uz rezoluciju ( $r$ ) digitalnog pokazivača sile ispitivane kidalice od 0,1 kN. Na temelju rezolucije određene su vrijednosti relativne rezolucije ( $a$ ) pokazivača sile i to za svaku mjernu točku umjeravanja temeljem jednadžbe:

$$a = \frac{r}{F_i} \times 100 \% \quad (37)$$

U tablici 5 navedene su vrijednosti relativne rezolucije.

Tablica 5 Vrijednosti relativne rezolucije

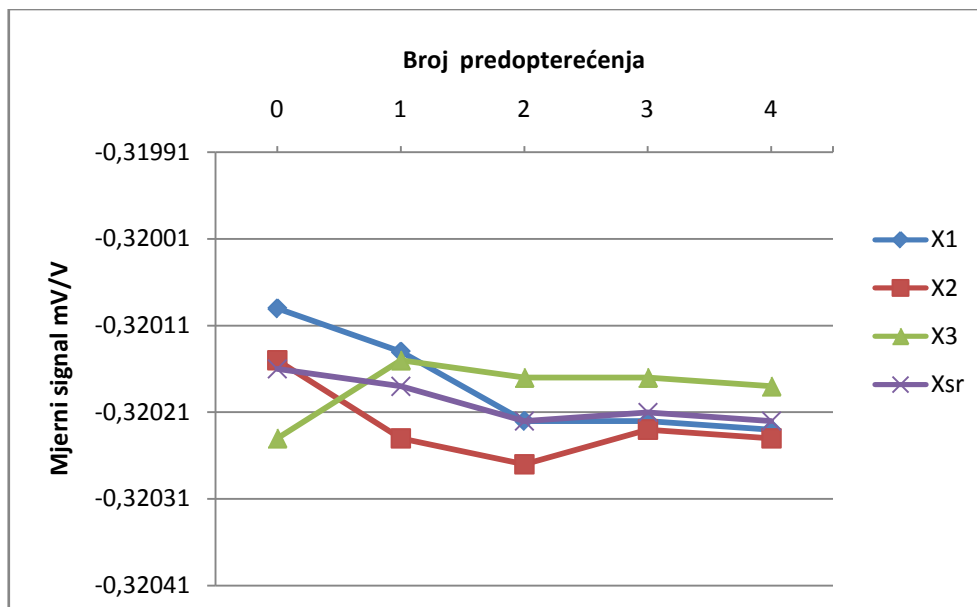
$F_i$ [kN]	80	160	240	320	400
$a$ , %	0,13	0,06	0,04	0,03	0,03

Pojedinačni rezultati umjeravanja izmjereni pri rastućoj i padajućoj ispitnoj sili i različitom broju prethodnih predopterećenja zajedno sa srednjim vrijednostima mjernog signala za rastuće nizove prikazani su u tablici 6.

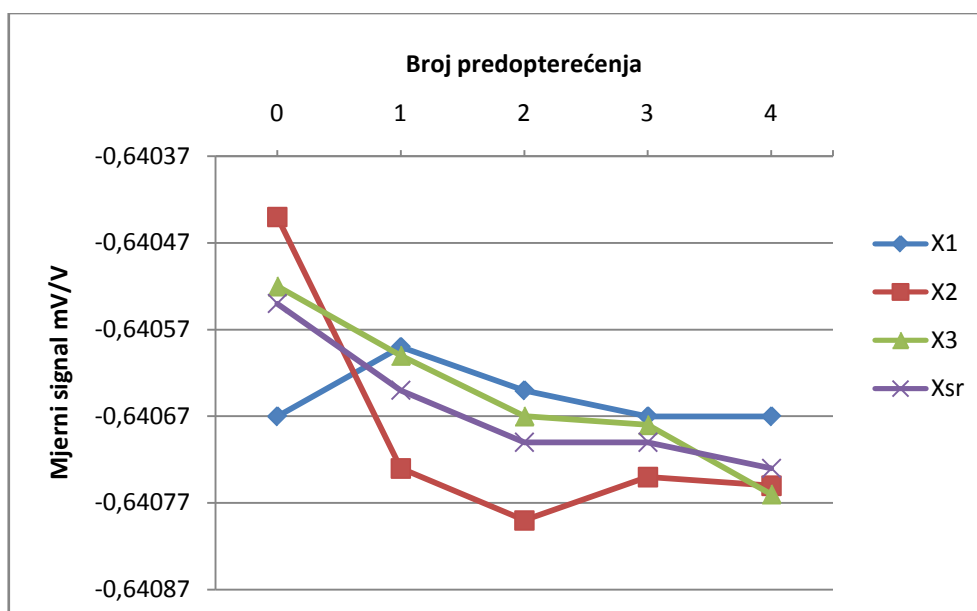
**Tablica 6 Rezultati umjeravanja**

Broj predopterećenja	$F_i$ [kN]	$X_1$ [mV/V]	$X_2$ [mV/V]	$X_2'$ [mV/V]	$X_3$ [mV/V]	$X_{sr}$ [mV/V]
0	0	0,00000	0,00000	-	0,00000	0,00000
	80,0	-0,32009	-0,32015	-0,32026	-0,32024	-0,32016
	160,0	-0,64067	-0,64044	-0,64097	-0,64052	-0,64054
	240,0	-0,96133	-0,96105	-0,96186	-0,96113	-0,96117
	320,0	-1,28204	-1,28175	-1,28291	-1,28186	-1,28188
	400,0	-1,60313	-1,60284	-	-1,60284	-1,60294
	0	-0,00037	-	0,00003	0,00008	-
1	0	0,00000	0,00000	-	0,00000	0,00000
	80,0	-0,32014	-0,32024	-0,32012	-0,32015	-0,32018
	160,0	-0,64059	-0,64073	-0,64057	-0,64060	-0,64064
	240,0	-0,96129	-0,96117	-0,96135	-0,96116	-0,96121
	320,0	-1,28198	-1,28201	-1,28228	-1,28206	-1,28202
	400,0	-1,60293	-1,60291	-	-1,60304	-1,60296
	0	0,00002	-	0,00007	0,00003	-
2	0	0,00000	0,00000	-	0,00000	0,00000
	80,0	-0,32022	-0,32027	-0,32020	-0,32017	-0,32022
	160,0	-0,64064	-0,64079	-0,64074	-0,64067	-0,64070
	240,0	-0,96127	-0,96148	-0,96144	-0,96144	-0,96140
	320,0	-1,28216	-1,28229	-1,28252	-1,28228	-1,28224
	400,0	-1,60307	-1,60324	-	-1,60320	-1,60317
	0	0,00006	-	0,00002	0,00005	-
3	0	0,00000	0,00000	-	0,00000	0,00000
	80,0	-0,32022	-0,32023	-0,32024	-0,32017	-0,32021
	160,0	-0,64067	-0,64074	-0,64087	-0,64068	-0,64070
	240,0	-0,96139	-0,96134	-0,96165	-0,96131	-0,96135
	320,0	-1,28220	-1,28209	-1,28265	-1,28215	-1,28215
	400,0	-1,60300	-1,60301	-	-1,60297	-1,60299
	0	0,00006	-	0,00005	0,00007	-
4	0	0,00000	0,00000	-	0,00000	0,00000
	80,0	-0,32023	-0,32024	-0,32027	-0,32018	-0,32022
	160,0	-0,64067	-0,64075	-0,64083	-0,64076	-0,64073
	240,0	-0,96134	-0,96134	-0,96166	-0,96140	-0,96136
	320,0	-1,28221	-1,28216	-1,28255	-1,28220	-1,28219
	400,0	-1,60304	-1,60307	-	-1,60308	-1,60306
	0	0,00005	-	0,00006	0,00002	-

Zbog bolje vizualizacije rezultata mjerenja na slikama 28, 29, 30, 31 i 32 koje prezentiraju rezultate za mjerne točke 80 kN, 160 kN, 240 kN, 320 kN i 400 kN prikazane su vrijednosti mjernog signala za rastuće nizove izmjerene uz različit broj predopterećenja.

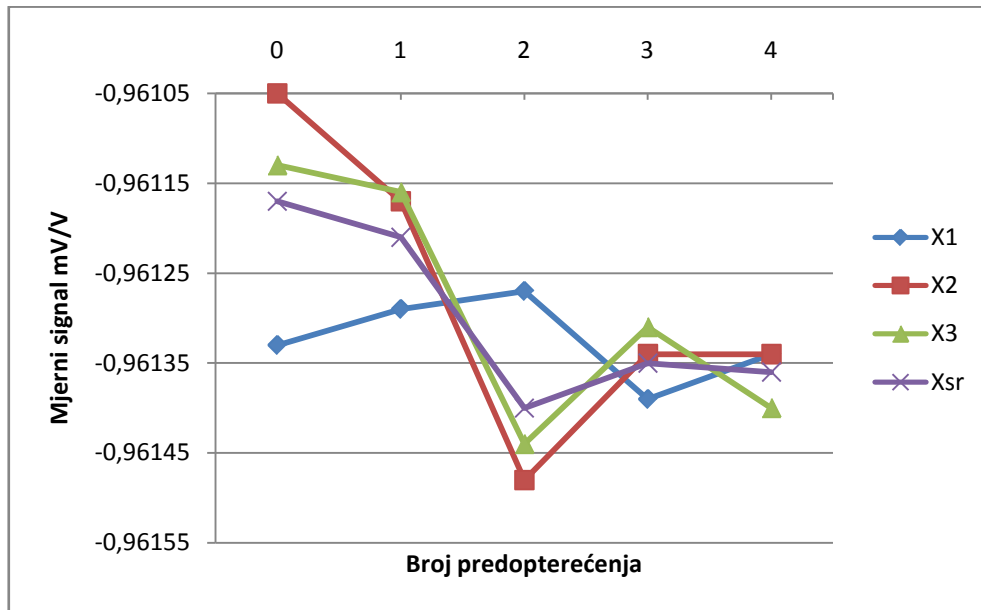


Slika 28 Vrijednost mjernog signala pri induciranoj sili 80 kN

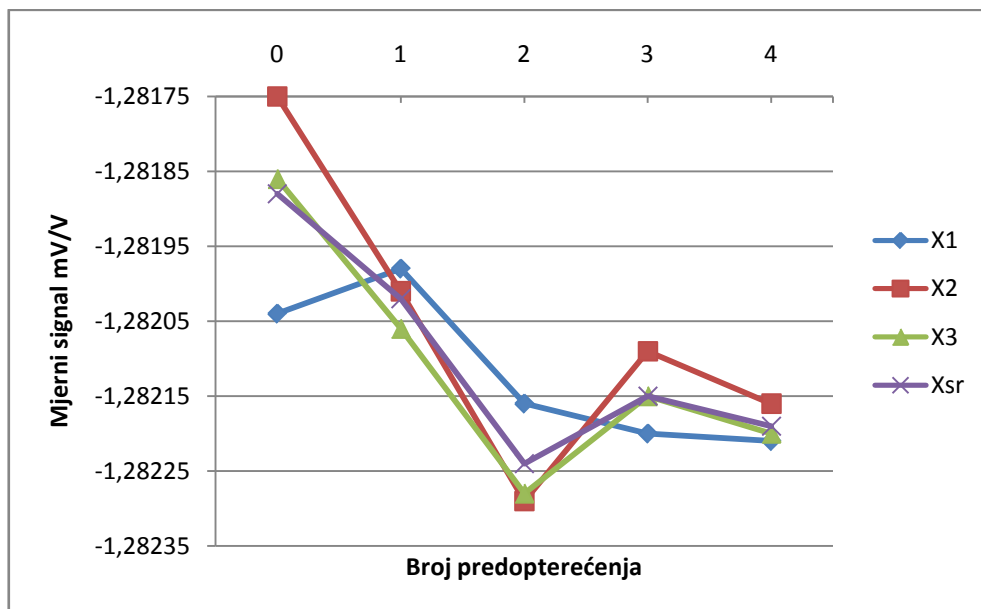


Slika 29 Vrijednost mjernog signala pri induciranoj sili 160 kN

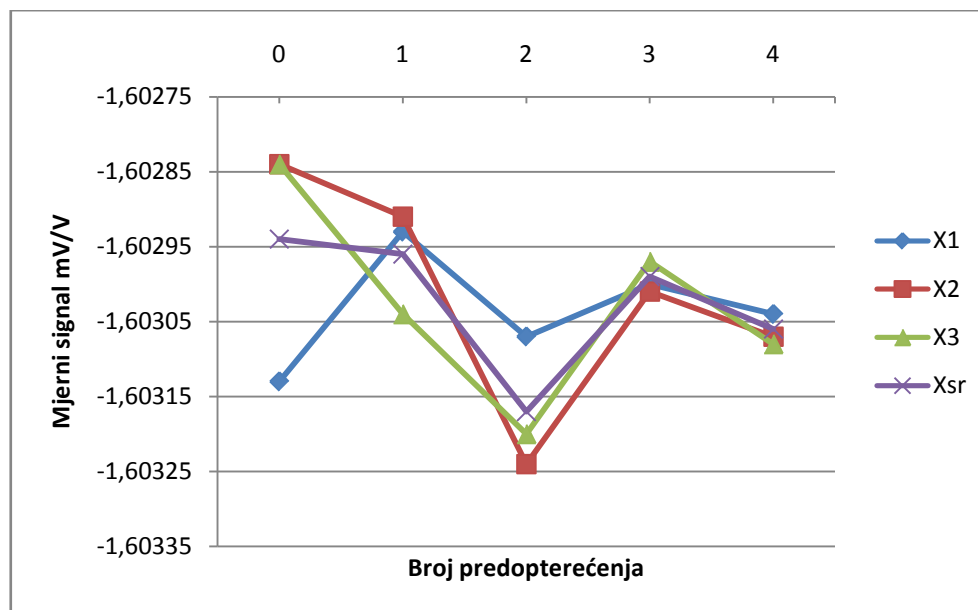




Slika 30 Vrijednost mjernog signala pri induciranoj sili 240 kN



Slika 11 Vrijednost mjernog signala pri induciranoj sili 320 kN



**Slika 32 Vrijednost mjernog signala pri induciranoj sili 400 kN**

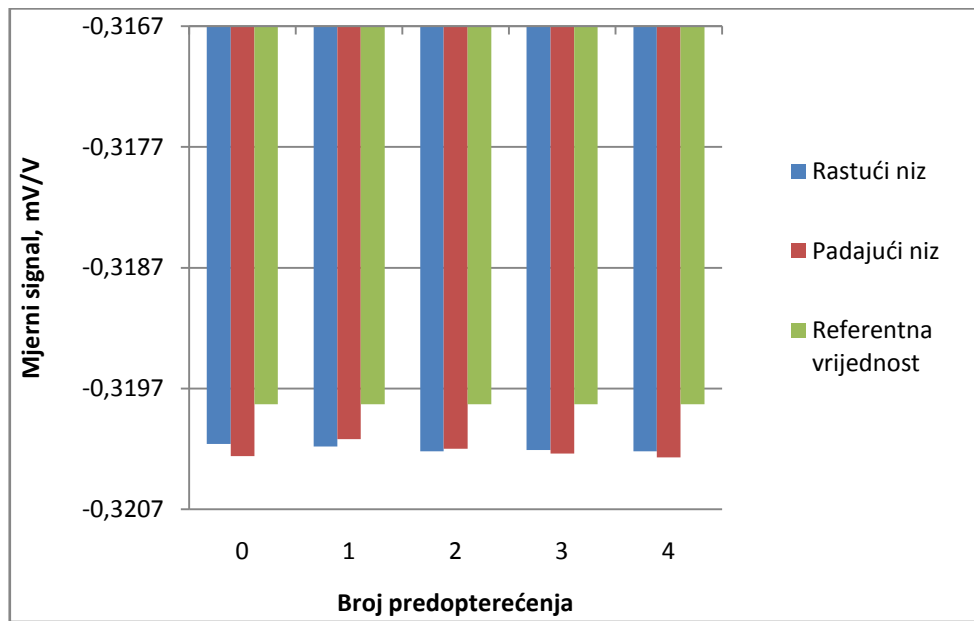
Iz priloženih slika se može zaključiti da su na svim mjernim točkama najveće vrijednosti promjene napona izmjerene kod umjeravanja bez predopterećenja, dok su najniže vrijednosti u principu dobivene za dva predopterećenja. Na svim mjernih točaka je vidljivo da nakon tri i četiri predopterećenja rezultati mjerenja u pojedinim mjernim nizovima vrlo malo odstupaju.

Referentne vrijednosti promjene napona ( $X_{ref}$ ) koje odgovaraju vrijednostima diskretnih sila očitanim na pokazivaču sile kidalice navedene su u tablici 7. Ove vrijednosti očitane su iz potvrde o umjeravanju (kalibracijski certifikat) za etalonski dinamometar Z4/500 kN.

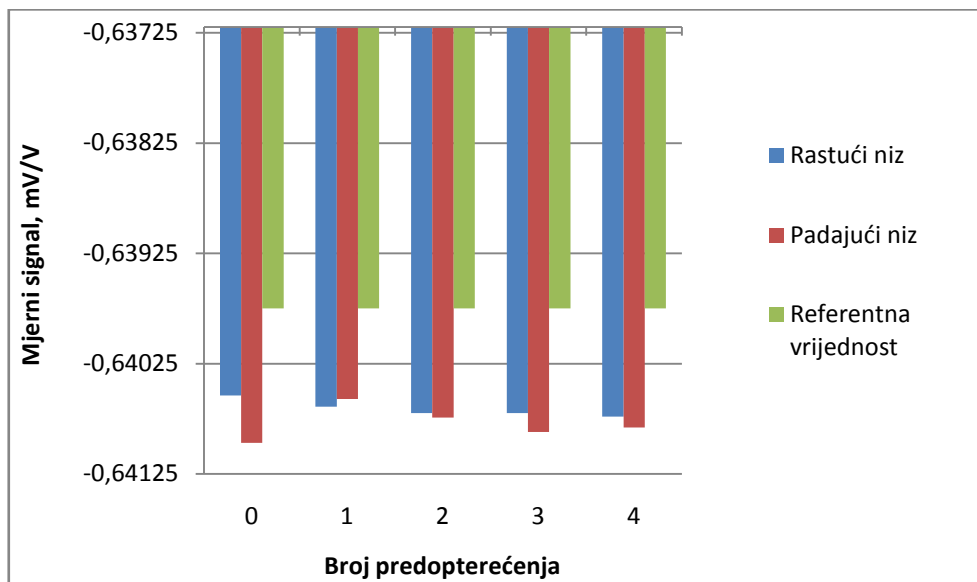
**Tablica 7 Referentne vrijednosti promjene napona**

$F_i$ [kN]	80	160	240	320	400
$X_{ref}$ [mV/V]	-0,31983	-0,63975	-0,95974	-1,27977	-1,59980

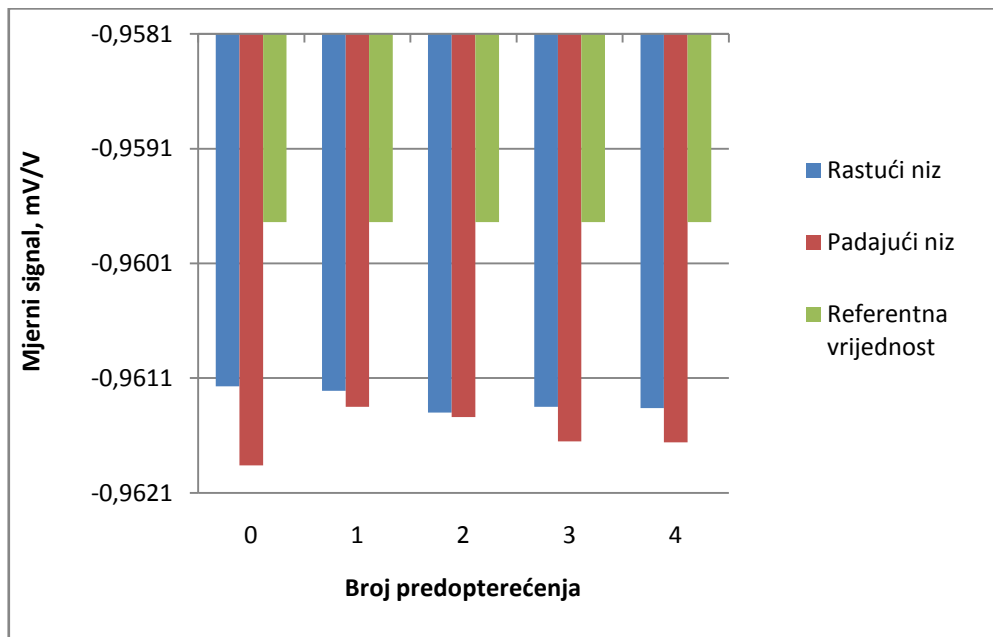
Usporedba srednjih vrijednosti mjernog signala za rastuće nizove i signala pri padajućoj sili zajedeno s referentnom vrijednošću prikazana je na slikama 33, 34, 35, 36 i 37. Svaka slika odnosi se na određenu mjernu točku i prikazuje međusobni odnos pri različitom broju predopterećenja.



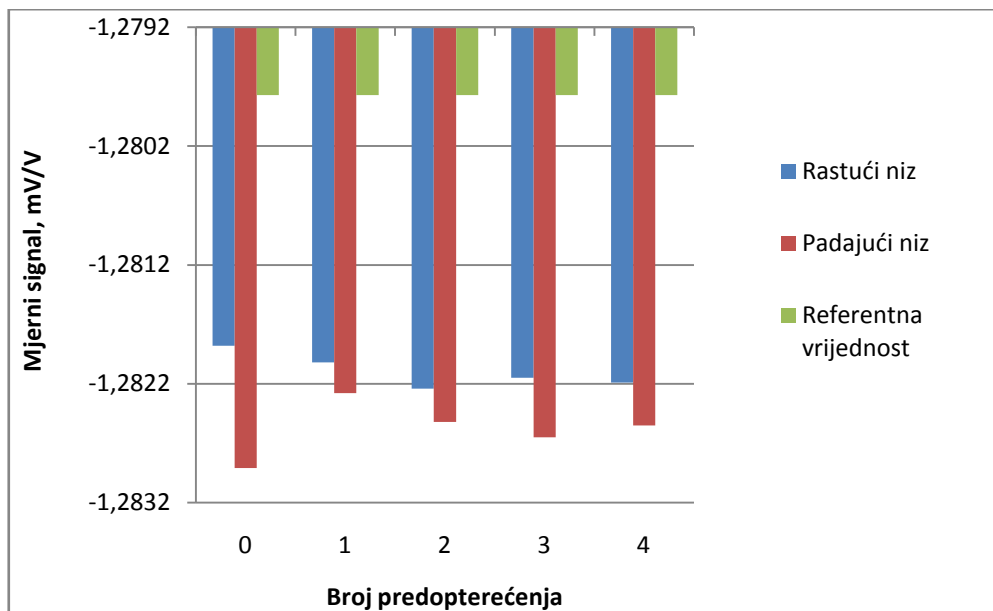
Slika 33 Mjerni signal za rastući i padajući niz te referentna vrijednost za mjernu točku 80 kN



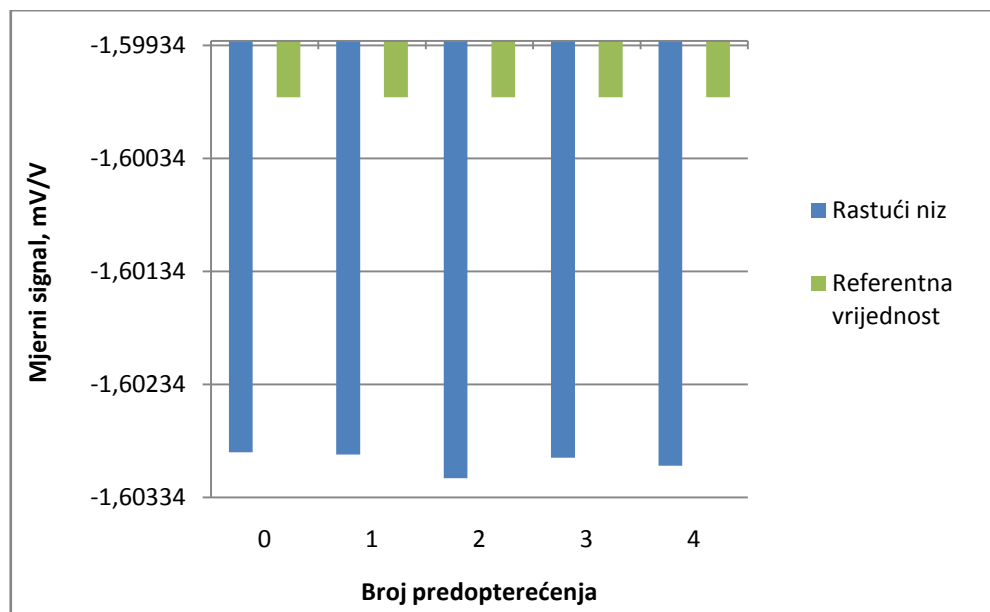
Slika 34 Mjerni signal za rastući i padajući niz te referentna vrijednost za mjernu točku 160 kN



**Slika 35** Mjerni signal za rastući i padajući niz te referentna vrijednost za mjernu točku 240 kN



**Slika 36** Mjerni signal za rastući i padajući niz te referentna vrijednost za mjernu točku 320 kN



**Slika 37 Mjerni signal za rastući i padajući niz te referentna vrijednost za mjernu točku 400 kN**

Očito je da se na svakoj mjernoj točki mjerni signal u rastućim nizovima varira provođenjem predopterećenja što je osobito izraženo na višim mjernim točkama. Za svaku diskretnu silu najveća vrijednost signala u padajućem nizu zabilježena je kod umjeravanja bez predopterećenja. Uz samo jedno predopterećenje dolazi do značajnog smanjenja mjernog signala pri padajućoj sili. Za veći broj predopterećenja karakteristično je lagano povećanje signala u padajućem nizu, ali se ne dostiže vrijednost zabilježena bez predopterećenja. Osim toga može se uočiti da je na svim mjernim točkama, osim 400 kN, gotovo za svaki broj predopterećenja vrijednost promjene napona izmjerena pri padajućoj sili veća nego vrijednost izmjerena za rastuće nizove. Usporede li se vrijednosti mjernog signala za rastuće i padajuće nizove s referentnim vrijednostima postaje jasno da su i u jednom i u drugom slučaju izmjerene vrijednosti signala veće od referentnih.

Iz rezultata umjeravanja izračunate su relativne pogreške mjernog sustava kidalice sukladno normi DIN EN ISO 7500-1. Vrijednosti pogrešaka točnosti, reverzibilnosti, ponovljivosti te nule određene umjeravanjima sa i bez predopterećenja sistematizirane su u tablici 8. Na osnovi karakterističnih pogrešaka mjernog sustava sile te relativne rezolucije pokazivača sile određena je klasa mjernog područja ispitivane kidalice.

Relativna pogreška točnosti izračunata je pomoću jednadžbe:

$$q = \frac{X_{\text{ref}} - X_{\text{sr}}}{X_{\text{sr}}} \times 100 \% \quad (38)$$

gdje je  $X_{\text{ref}}$  referentna vrijednost promjene napona, a  $X_{\text{sr}}$  je srednja vrijednost promjene napona za ponovljena mjerenja na istoj mjernoj točki. Referentne vrijednosti signala navedene su u tablici 7 dok su srednje vrijednosti mjernog signala prikazane u tablici 6.

Relativna pogreška ponovljivosti slijedi iz izraza:

$$b = \frac{X_{\text{max}} - X_{\text{min}}}{X_{\text{sr}}} \times 100 \% \quad (39)$$

gdje su  $X_{\text{max}}$  i  $X_{\text{min}}$  najveća i najmanja vrijednost promjene napona za istu mjernu točku i rastuće nizove (tablica 6).

Relativna pogreška reverzibilnosti definirana je jednadžbom:

$$v = \frac{X_{\text{ref}} - X_2'}{X_{\text{sr}}} \times 100 \% \quad (40)$$

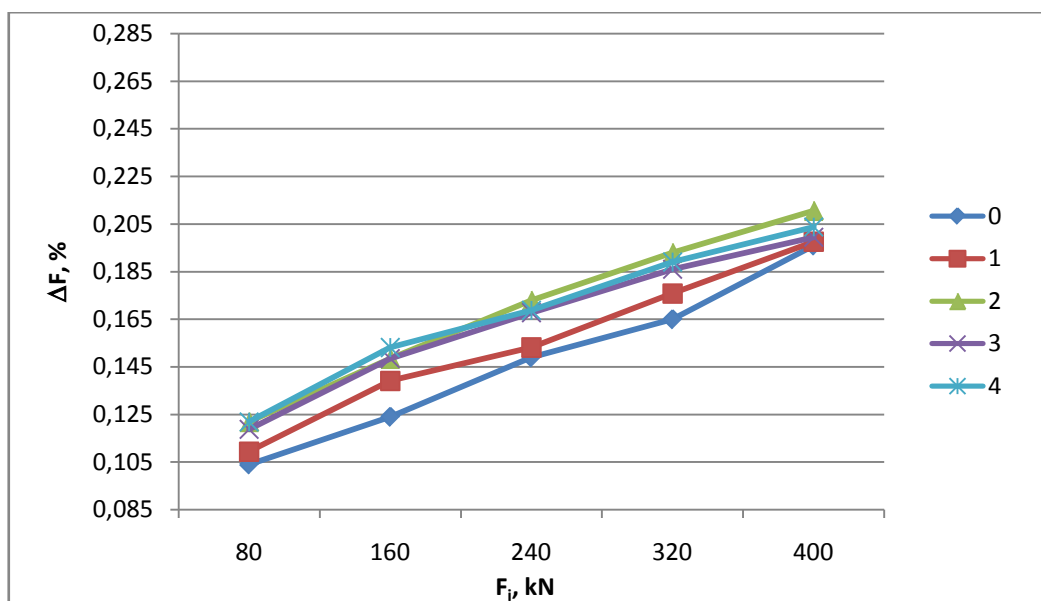
gdje je  $X_{\text{ref}}$  referentna vrijednost a  $X_2'$  je vrijednost signala izmjerena u padajućem nizu. Vrijednosti za  $X_2'$  navedene su u tablici 6.

**Tablica 8 Vrijednosti relativnih pogrešaka mjernog sustava sile**

Broj predopterećenja	$F_i$ [kN]	q [%]	b [%]	$\nu$ [%]	Niz 1	Niz 2	Niz 3	Klasa
					$f_{01}$	$f_{02}$	$f_{03}$	
					[%]			
0	80,0	-0,103	0,047	-0,135	0,00	0,00	0,00	0,5
	160,0	-0,123	0,036	-0,190				
	240,0	-0,148	0,029	-0,220				
	320,0	-0,165	0,023	-0,245				
	400,0	-0,196	0,018	-				
1	80,0	-0,109	0,031	-0,091	0,00	0,00	0,00	0,5
	160,0	-0,138	0,022	-0,128				
	240,0	-0,152	0,014	-0,167				
	320,0	-0,175	0,006	-0,196				
	400,0	-0,197	0,008	-				
2	80,0	-0,122	0,031	-0,116	0,00	0,00	0,00	0,5
	160,0	-0,148	0,023	-0,154				
	240,0	-0,172	0,022	-0,177				
	320,0	-0,193	0,010	-0,215				
	400,0	-0,210	0,011	-				
3	80,0	-0,118	0,019	-0,128	0,00	0,00	0,00	0,5
	160,0	-0,147	0,011	-0,174				
	240,0	-0,167	0,008	-0,198				
	320,0	-0,186	0,009	-0,225				
	400,0	-0,199	0,002	-				
4	80,0	-0,121	0,019	-0,138	0,00	0,00	0,00	0,5
	160,0	-0,152	0,014	-0,168				
	240,0	-0,168	0,006	-0,199				
	320,0	-0,189	0,004	-0,217				
	400,0	-0,204	0,002	-				

## 7.6. Rasprava rezultata

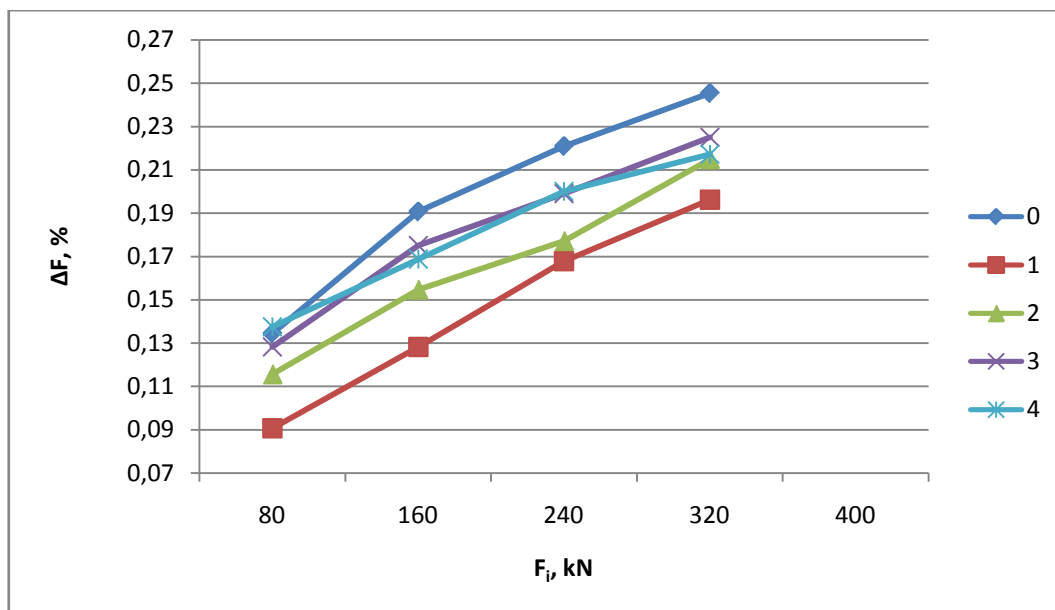
Za ispitivano mjerno područje 0-400 kN na slici 38 su prikazana relativna odstupanja između srednjih vrijednosti mjernog signala u rastućim nizovima i referentnih vrijednosti za broj predopterećenja od 0 do 4. Ova odstupanja identična su relativnoj razlici stvarne i inducirane sile. Iz slike je vidljivo da s povećanjem broja predopterećenja raste relativno odstupanje napose ako se radi o nižim mjernim točkama. Najmanje odstupanje je zabilježeno kod umjeravanja bez predopterećenja i to na svim mjernim točkama na kojima je mjerenje provedeno. Za umjeravanja s dva ili više predopterećenja relativna razlika između stvarne i inducirane sile gotovo se ne mijenja variranjem broja predopterećenja. Za sva provedena umjeravanja evidentno je da se porastom diskretne sile povećava i postotno odstupanje stvarne i inducirane sile. Relativna razlika kreće se od cca. 0,11% pri 80 kN do cca. 0,20% za 400 kN. Za razliku od umjeravanja bez predopterećenja i umjeravanja s jednim predopterećenjem, umjeravanja s dva i više predopterećenja rezultiraju gotovo linearnim povećanjem relativne razlike sila.



Slika 38 Relativno odstupanje između stvarne i inducirane sile za rastući niz

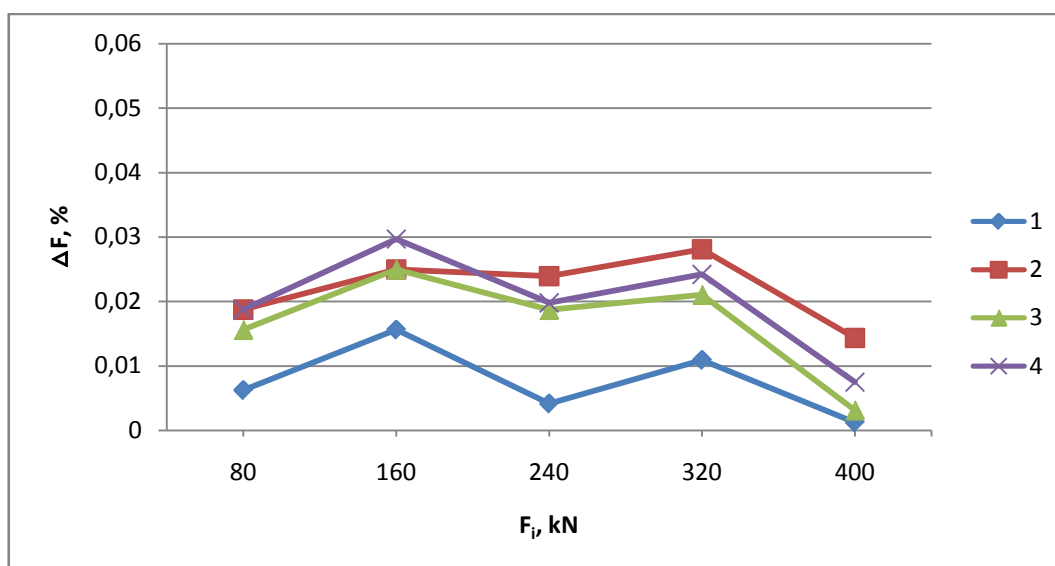
Slika 39 prikazuje relativnu razliku između stvarne i inducirane sile, ali za padajuće nizove. Iz slike je jasno vidljivo da se najveća odstupanja javljaju kod umjeravanja bez predopterećenja. Umjeravanje s jednim predopterećenjem rezultira vrlo bliskim vrijednostima stvarne i inducirane sile i to na svim mjernim točkama u rasponu od 80 kN do 400 kN. Pri umjeravanju s više predopterećenja postotna razlika se povećava, ali ne dostiže vrijednost zabilježenu bez predopterećenja. Slično kao i u rastućim nizovima i ovdje je vidljiva sve veća postotna razlika između stvarne i inducirane sile kako se sila približava nazivnoj vrijednosti 400 kN.





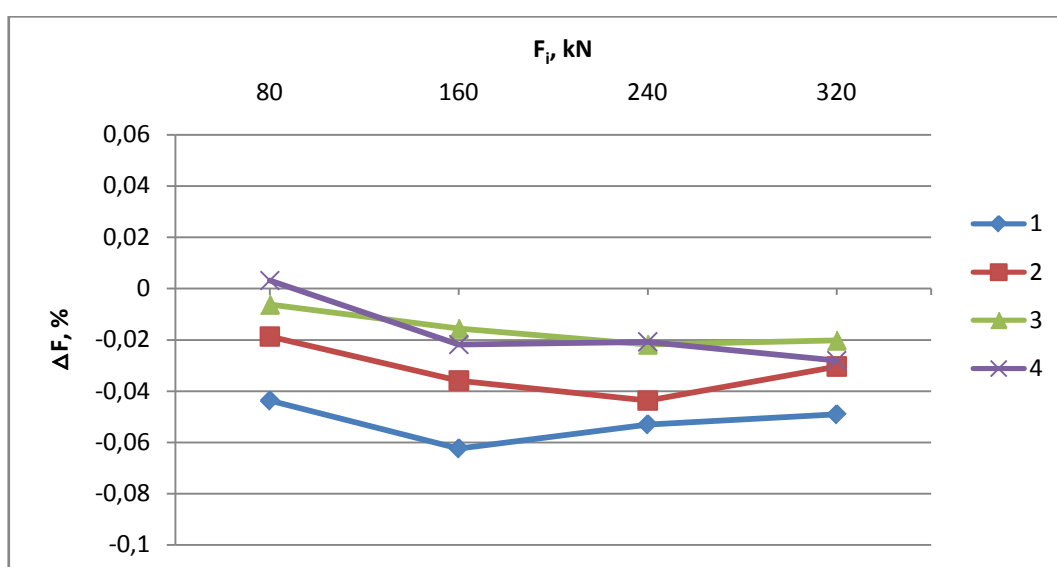
**Slika 39 Relativno odstupanje između stvarne i inducirane sile za padajući niz**

Na slici 40 prikazana je promjena mjernog signala izmjenog u rastućim nizovima uz jedno, dva ili više predopterećenja u odnosu na vrijednost izmjerenu bez predopterećenja. Radi se o relativno malim promjenama mjernog signala, maksimalnog iznosa od samo 0,03%. Najmanja promjena zabilježena je kod umjeravanja s jednim predopterećenjem. Umjeravanje s dva i više predopterećenja uzrokuje neznatni porast stvarne sile na svim mjernim točkama umjeravanja. Iz slike je jasno vidljivo da su najveća relativna odstupanja zabilježena pri vrijednostima diskretnih sila 160 kN i 320 kN, dok je za mjerne točke 80 kN i 240 kN relativna razlika nešto manja, a najmanja je kod 400 kN i to neovisno o broju provedenih predopterećenja.



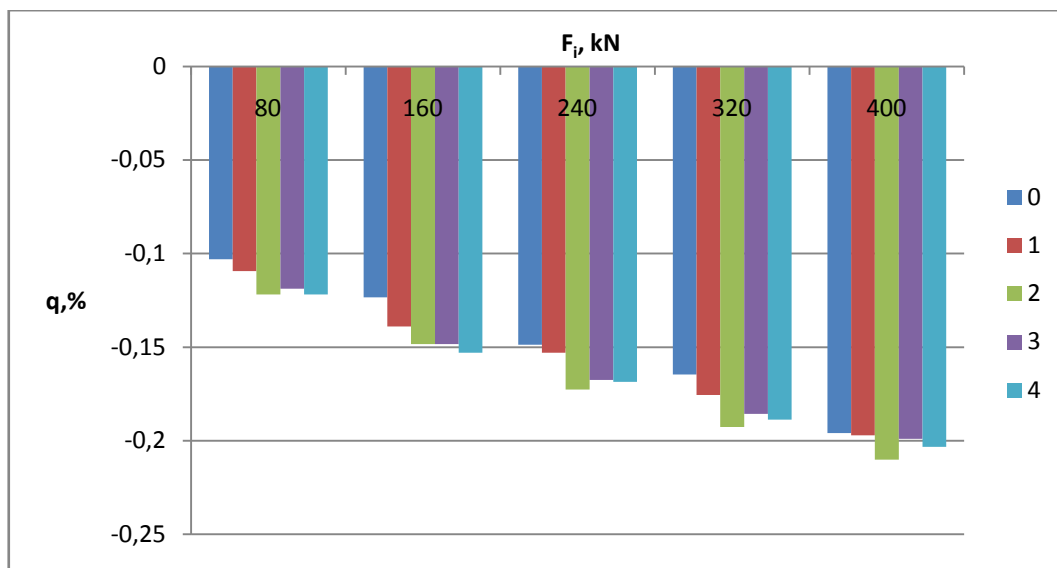
**Slika 40 Relativna promjena stvarne sile inducirana predopterećenjem, rastući niz**

Za razliku od rastućih nizova gdje se vrijednost stvarne sile povećava provođenjem predopterećenja i to na svim mjernim točkama, situacija je sasvim drugačija pri padajućoj ispitnoj sili, slika 41. Vrijednosti izmjerene u padajućem nizu u principu se smanjuju uvođenjem predopterećenja. Stoga je relativna razlika između stvarne sile izmjerene uz jedno ili više predopterećenja i stvarne sile određene umjeravanjem bez predopterećenja negativnog predznaka. I ovdje se radi o vrlo malim postotnim razlikama maksimalnog iznosa do 0,06%. Najmanja odstupanja zabilježena su kod umjeravanja s tri odnosno četiri predopterećenja. Nešto veća odstupanja induciraju se uz dva predopterećenja, a najnepovoljnije je umjeravanje s jednim predopterećenjem. Neovisno o broju provedenih predopterećenja najmanje relativno smanjenje stvarne sile zabilježeno je na prvoj mjernoj točki 80 kN.



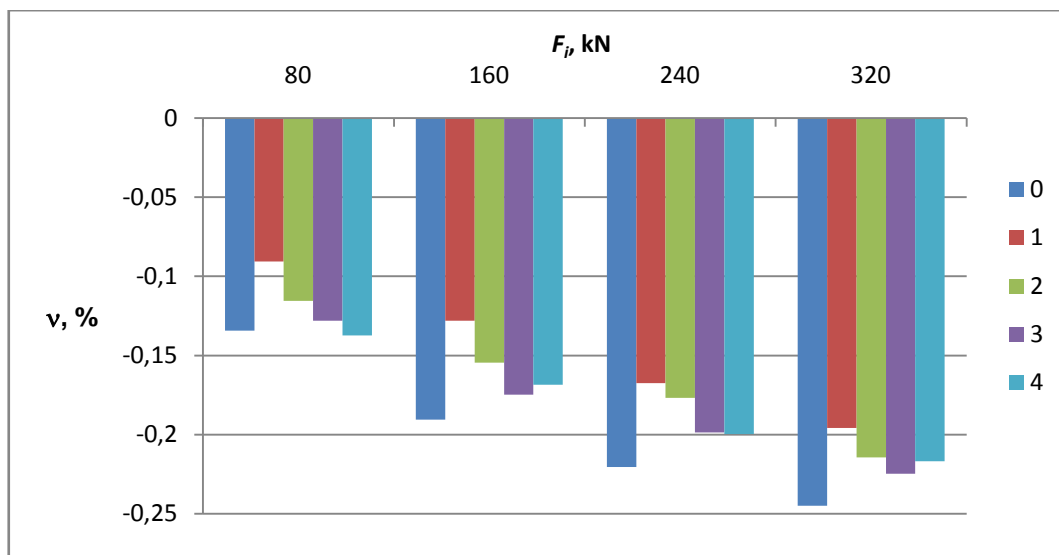
**Slika 41** Relativna promjena stvarne sile inducirana predopterećenjem, padajući niz

Dijagram na slici 42 prikazuje relativnu pogrešku točnosti ( $q$ ) za pojedine mjerne točke i različiti broj predopterećenja. Za cijelo mjerno područje vrijednost pogreške točnosti je negativna, a njena apsolutna vrijednost se povećava s povećanjem diskretne sile. Na svakoj mjernoj točki najmanje vrijednosti pogreške točnosti zabilježene su kod umjeravanja bez predopterećenja. Uvođenjem jednog ili više predopterećenja pogreška se pogoršava. Za sva provedena umjeravanja i sve mjerne točke vrijednost pogreške točnosti ne prelazi 0,21 % što je ispod granične vrijednost 0,5 % koliko je propisano za klasu mjernog područja kidalice 0,5.



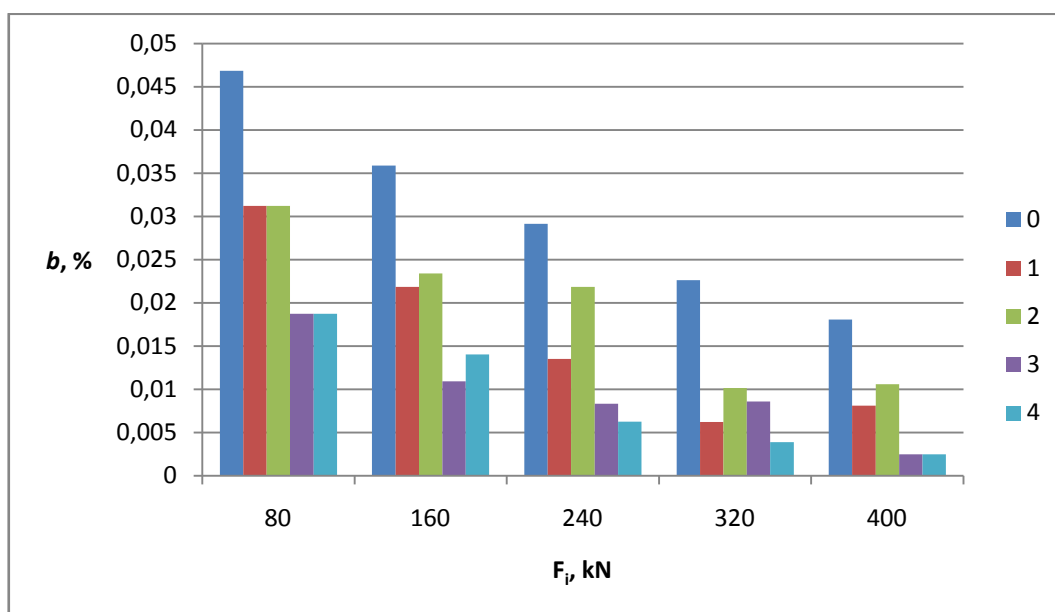
**Slika 42 Relativna pogreška točnosti po mjernim točkama  
za različit broj predopterećenja**

Relativna pogreška reverzibilnosti ( $v$ ) prikazana na slici 43 varira po mjernim točkama ovisno o vrijednosti diskretne sile i broju predopterećenja. Najviše apsolutne vrijednosti zabilježene su kod umjeravanja bez predopterećenja zbog relativno velikog mjernog signala izmjerenog pri padajućoj sili. Umjeravanje s jednim predopterećenjem rezultira značajnim smanjenjem vrijednosti ove pogreške. Daljnjim povećanjem broja predopterećenja pogreška reverzibilnosti raste i to na svim točkama na kojima je ispitivanje provedeno s rastućom i padajućom silom. Također je očito da se povećanjem diskretne sile povećava i vrijednost pogreške za promatrani broj predopterećenja. Ukupno gledajući vrijednost ove pogreške nije veća od 0,245 % i time ne prelazi granicu od 0,75 % koliko je dozvoljeno za klasu 0,5.



**Slika 43 Relativna pogreška reverzibilnosti po mjernim točkama za različit broj predopterećenja**

Dijagram na slici 44 prikazuje relativnu pogrešku ponovljivosti ( $b$ ) po mjernim točkama za različit broj predopterećenja. Iz dijagrama je vidljivo da se pogreška ponovljivosti smanjuje porastom inducirane sile. Najviše vrijednosti ove pogreške zabilježene su kod umjeravanja bez predopterećenja. Višestrukim predopterećivanjem pogreška ponovljivosti kontinuirano opada. Općenito vrijednosti ove pogreške su vrlo niske te se nalaze daleko ispod granične vrijednosti od 0,5% deklarirane za klasu 0,5.

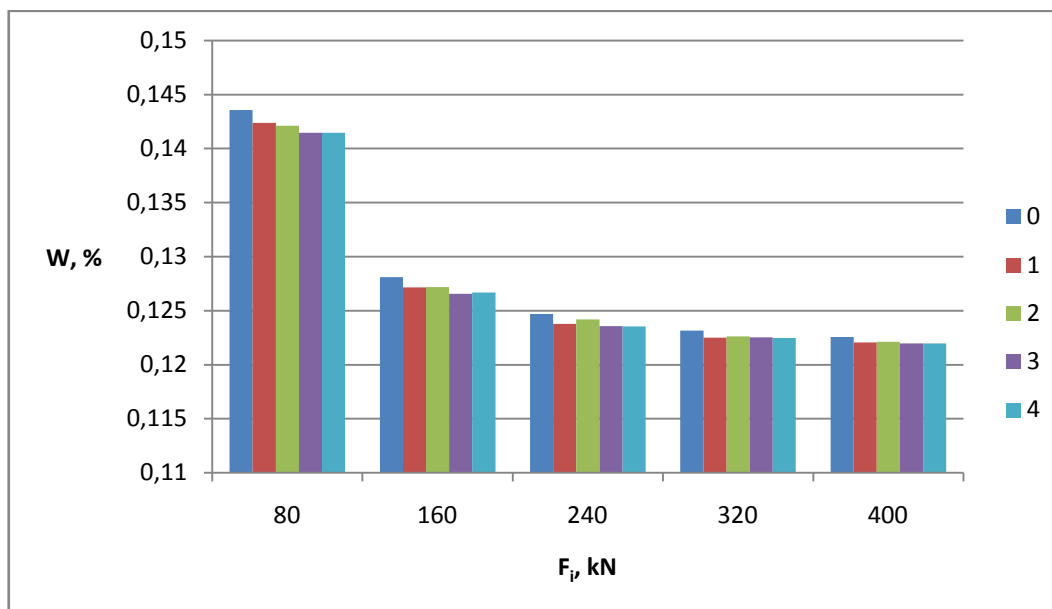


**Slika 44 Relativna pogreška ponovljivosti po mjernim točkama za različit broj predopterećenja**

U tablici 9 navedene su vrijednosti proširene mjerne nesigurnosti ( $W$ ) po mjernim točkama umjeravanja uz različit broj predopterećenja. Grafički prikaz dan je na slici 45. Vrijednosti proširene mjerne nesigurnosti dobivene su uz faktor pokrivanja  $k=2$  koji jamči razinu povjerenja od 95 %. Najveća mjerna nesigurnost rezultata umjeravanja zabilježena je na prvoj mjernoj točki 80 kN i iznosi oko 0,14 %. Kod ostalih mjernih točaka nesigurnost je nešto manja. Iz slike proizlazi da broj predopterećenja u postupku umjeravanja ne utječe na mjernu nesigurnost iskazanih rezultata.

**Tablica 9 Vrijednosti proširene mjerne nesigurnosti**

Broj predopterećenja	Proširena mjerna nesigurnost (%) na mjernoj točki				
	80 kN	160 kN	240 kN	320 kN	400 kN
0	0,144	0,128	0,125	0,123	0,123
1	0,142	0,127	0,124	0,122	0,122
2	0,142	0,127	0,124	0,123	0,122
3	0,141	0,127	0,124	0,123	0,122
4	0,141	0,127	0,124	0,123	0,122



**Slika 45 Proširena mjerna nesigurnost po mjernim točkama za različit broj predopterećenja**

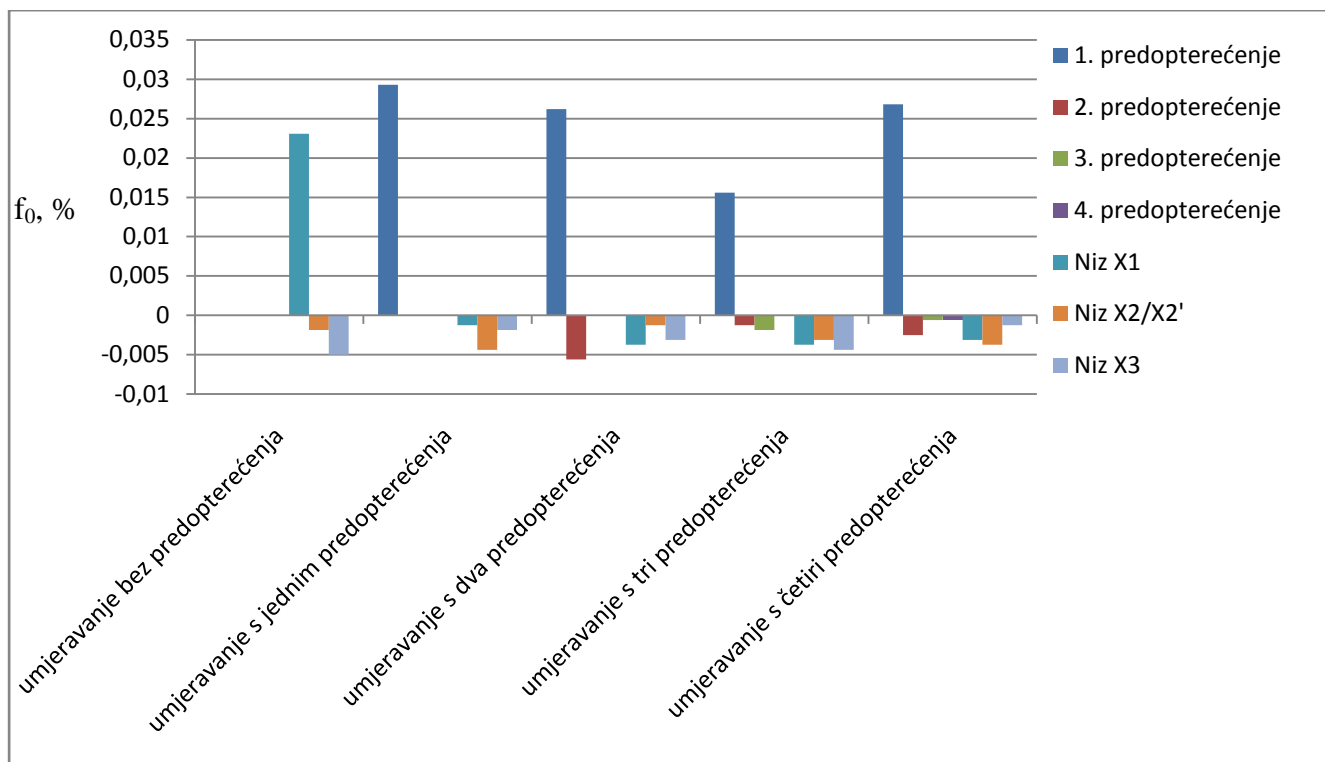
I na kraju na slici 46 prikazana je relativna pogreška nule, ali ne kidalice već etalonskog dinamometra. Vrijednosti relativne pogreške nule zabilježene su u mjernim nizovima umjeravanja odnosno u nizovima predopterećenja. Iz dijagrama je vidljiv jasan utjecaj predopterećenja na iznos ove pogreške. Naime, pogreška nule dinamometra uvijek je najveća pri prvom opterećivanju bilo da se radi o predopterećenju ili samom mjernom nizu. Na taj način uvođenjem samo jednog predopterećenja bitno se smanjuje pogreška nule što doprinosi većoj točnosti mjerenja. Relativna pogreška nule dinamometra izračunava se pomoću jednadžbe:

$$f_0 = \frac{i_f - i_0}{X_N} \times 100 \% \quad (41)$$

gdje je  $i_f$  vrijednost signala očitana 30 s nakon rasterećenja,  $i_0$  je iznos mjernog signala prije opterećenja, a  $X_N$  vrijednost signala koja odgovara maksimalnoj sili umjeravanja. U tablici 10 navedene su vrijednosti mjernog signala kod provedenih vlačnih predopterećenja na temelju kojih je izračunata relativna pogreška nule dinamometra u nizovima predopterećenja.

**Tablica 10 Vrijednosti mjernog signala kod vlačnih predopterećenja**

	Predopterećenje	$i_0$ mV/V	$X_N$ mV/V	$i_f$ mV/V
Umjeravanje s jednim predopterećenjem	1	0,00000	-1,60311	-0,00047
Umjeravanje s dva predopterećenja	1	0,00000	-1,60312	-0,00042
	2	0,00000	-1,60305	0,00009
Umjeravanje s tri predopterećenja	1	0,00000	-1,60302	-0,00025
	2	0,00000	-1,60272	0,00002
	3	0,00000	-1,60284	0,00003
Umjeravanje s četiri predopterećenja	1	0,00000	-1,60327	-0,00043
	2	0,00000	-1,60285	0,00004
	3	0,00000	-1,60305	0,00001
	4	0,00000	-1,60316	0,00001



**Slika 46** Relativna pogreška nule dinamometra

## 7.7. Zaključak

Provedena ispitivanja su pokazala da broj predopterećenja igra važnu ulogu kod umjeravanja kidalice. Jedno ili više predopterećenja mijenja vrijednost stvarne sile kako u rastućim tako i u padajućim nizovima čime se utječe na rezultate umjeravanja u vidu relativnih pogrešaka točnosti, reverzibilnosti i ponovljivosti.

Kad je riječ o relativnoj pogreški točnosti, povećanjem broja predopterećenja povećava se apsolutna vrijednost pogreške na svim mjernim točkama. U ovom slučaju nije prekoračena dozvoljena vrijednost za klasu mjernog područja kidalice 0,5.

Kod pogreške reverzibilnosti uočeno je drastično smanjenje uvođenjem jednog predopterećenja. Daljnjim povećavanjem broja predopterećenja pogreška ponovo raste, ali ne dostiže vrijednost karakterističnu za umjeravanje bez predopterećenja. Za provedena umjeravanja pogreška reverzibilnosti ne prelazi 0,245 % što je manje od 0,75 % koliko je propisano za razred 0,5.

Što se tiče pogreške ponovljivosti ona se smanjuje višestrukim predopterećivanjem na svim točkama na kojima je ispitivanje provedeno. Najmanje vrijednosti pogreške ponovljivosti

zabilježene su pri nazivnoj sili 400 kN. Vrijednosti ove pogreške vrlo su male i daleko ispod granice od 0,5 % za klasu 0,5.

Relativna pogreška nule kidalice za sve mjerne nizove umjeravanja jednaka je nuli neovisno o broju provedenih predopterećenja.

Iz dobivenih rezultata može se zaključiti da predopterećenja imaju pozitivan utjecaj na pogrešku reverzibilnosti ukoliko se radi o jednom predopterećenju te na pogrešku ponovljivosti, posebice ako je riječ o višestrukim predopterećenjima. Međutim, umjeravanja su pokazala negativan utjecaj većeg broja predopterećenja na relativnu pogrešku točnosti. Stoga u ovom slučaju nije moguće egzaktno odrediti broj predopterećenja u postupku umjeravanja već se traži kompromisno rješenje između više različitih zahtjeva.

Na temelju vrijednosti relativnih pogrešaka točnosti, ponovljivosti, reverzibilnosti i nule te vrijednosti relativne rezolucije pokazivača sile proizlazi da broj predopterećenja ne utječe na klasu mjernog područja ispitivane kidalice. Međutim kod nekih drugih kidalica kod kojih su vrijednosti karakterističnih pogrešaka na granici za ispitivanu klasu za pretpostaviti je da će variranjem broja predopterećenja zacijelo doći i do promjene klase mjernog područja što nikako ne treba zanemariti.

I na kraju treba istaknuti pozitivnu ulogu predopterećenja s gledišta povećanja točnosti mjerenja. Naime, analizom relativne pogreške nule etalonskog dinamometra utvrđeno je da je ova pogreška najveća kod prvog opterećivanja te je potrebno provesti barem jedno predopterećenje prije započinjanja mjernih nizova umjeravanja.



## 8 Literatura

- [1] M. Franz: Mehanička svojstva materijala, FSB, Zagreb, 1998.
- [2] Ž. Alar: Procjenjivanje nesigurnosti rezultata mjerenja sile, magistarski rad, Zagreb, 2001.
- [3] H. Kuhn, D. Medlin: ASM Handbook, Vol. 8: Mechanical Testing and Evaluation, ASM International, Materials Park, Ohio, 2000.
- [4] B.F. Dyson, M.S. Loveday, M.G. Gee: Materials Metrology and Standards for Structural Performance, Chapman and Hall, 1995.
- [5] [http://instruct1.cit.cornell.edu/courses/virtual\\_lab/chalktalks/materialtest/machine.pdf](http://instruct1.cit.cornell.edu/courses/virtual_lab/chalktalks/materialtest/machine.pdf)
- [6] J. M. Gere, B. J. Goodno: Mechanics of Materials, Toronto, 2009.
- [7] R. Dragojević: Utjecaj brzine opterećivanja na rezultate statičkog vlačnog ispitivanja, završni rad, Zagreb, 2009.
- [8] M. Videc: Postupak umjeravanja prijenosnih etalona sile, završni rad, Zagreb, 2007.
- [9] M. Videc: Umjeravanje referentnog etalona sile, diplomski rad, Zagreb, 2008.
- [10] S. Mahović: Teorija i tehnika mjerenja, podloge za predavanja, FSB, 2007.
- [11] <http://www.unze.ba/download/SkriptaMetrologija.pdf>
- [12] D. Ćorić: Procedure for estimating and calculating the measurement uncertainty in force testing machine calibration, FSB, Zagreb, 2005.
- [13] D. Ćorić: Work instruction for estimating and calculation of measurement uncertainty of force testing machine calibration, FSB, Zagreb, 2005.
- [14] M. Gobin: Utjecaj položaja dinamometra na rezultate umjeravanja kidalice, diplomski rad, Zagreb, 2008.
- [15] <http://www.hbm.com/>
- [16] ISO 376: Metallic materials – Calibration of force – proving instruments used for the verification of uniaxial testing machines, 2004.

- [17] EN ISO 7500-1, 2004, Metallic materials - Verification of static uniaxial testing machines – Part 1: Tension / compression testing machines - Verification and calibration of the force-measuring system
- [18] Ž. Alar: Traceability in Force Measurement in Republic of Croatia, 2002,
- [19] D. Ćorić: Influence of Force Transducer Position on Results of Testing Machine Calibration, Transactions of FAMENA, 2008.
- [20] Ž. Alar, M. Franz: Analiza promjena karakteristika prijenosnog etalona sile Z4-20 kN tijekom eksploatacije, MATRIB, 2005.
- [21] M. Franz, Ž. Alar, T. Aleksandrov: Implementation of the reference force standard in the Croatian metrology and intralaboratory comparison, IMECO TC3 & TC16 & TC22 International conference, 2007.
- [22] D. Ćorić, S. Trstenjak, T. Aleksandrov: Significance of preload in testing machine calibration procedure, 2009.