

# Umjeravanje referentnog etalona sile

---

Videc, Mia

Master's thesis / Diplomski rad

2008

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:162409>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-29**

Repository / Repozitorij:

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



Sveučilište u Zagrebu  
**Fakultet strojarstva i brodogradnje**

# **DIPLOMSKI RAD**

Mia Videc

Zagreb, 2008.

Sveučilište u Zagrebu  
**Fakultet strojarstva i brodogradnje**

# **DIPLOMSKI RAD**

Voditelj rada:  
Prof.dr.sc.Vinko Ivušić

Mia Videc

Zagreb, 2008.

## **IZJAVA**

Izjavljujem da sam ovaj diplomski rad izradila samostalno, pomoću znanja stečenog tijekom studija, uz navedenu literaturu i konzultacije. Zahvaljujem se na stručnoj pomoći dr.sc. Željku Alaru, dipl.ing. Tamari Aleksandrov te prof.dr.sc. Mladenu Franzu.

Studentica

Mia Videc

# SAŽETAK

U ovom diplomskom radu teorijski i eksperimentalno obrađeno je umjeravanje referentnog etalona sile Laboratorija za ispitivanje mehaničkih svojstava Fakulteta strojarstva i brodogradnje.

U teorijskom dijelu dane su neke značajke sile kao fizikalne veličine te osnove mjerenja sile. Također, dan je osvrt na značenje sljedivosti mjerenja sile te su opisani različiti etaloni sile i umjeravanje istih, kao važni elementi sljedivosti. Pri tome je detaljnije obrađeno umjeravanje referentnog etalona sile komparatornog tipa, uz prihvaćeni postupak procjene odgovarajućih mjernih nesigurnosti.

U eksperimentalnom dijelu rada provedeno je umjeravanje referentnog etalona sile Laboratorija za ispitivanje mehaničkih svojstava Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Detaljnije je razrađen matematički model umjeravanja uređaja komparatornog tipa prema kojemu su obrađeni rezultati umjeravanja. Time su dobivene, a potom i analizirane, pojedinačne i kombinirane mjerne nesigurnosti, kao i proširena mjerna nesigurnost koja ukazuje na mjernu sposobnost i moguću primjenu umjeravanog uređaja.

# SADRŽAJ

|   |            |
|---|------------|
| <b>Popis slika.....</b>   | <b>I</b>   |
| <b>Popis tablica.....</b>   | <b>III</b> |
| <b>Popis oznaka.....</b>  | <b>IV</b>  |
| <br>  |            |
| <b>1. Uvod.....</b>   | <b>1</b>   |
| <b>2. Mjerenje sile.....</b>  | <b>2</b>   |
| 2.1. Sila kao fizikalna veličina.....   | 2          |
| 2.2. Osnove mjerenja sile.....  | 3          |
| 2.3. Karakteristike sustava za mjerenje sile.....   | 4          |
| <b>3. Sljedivost, etaloni i umjeravanje etalona sile.....</b>                                       | <b>7</b>   |
| 3.1. Sljedivost mjerenja sile.....  | 7          |
| 3.1.1. Mjerna nesigurnost.....  | 10         |
| 3.2. Etaloni sile.....  | 11         |
| 3.3. Umjeravanje etalona sile.....  | 16         |
| 3.4. Umjeravanje referentnog etalona sile (FCM – a).....  | 19         |
| 3.4.1. Plan umjeravanja referentnog etalona sile.....   | 19         |
| 3.4.2. Procjena mjernih nesigurnosti i najbolje mjerne sposobnosti<br>referentnog etalona sile..... | 20         |
| <b>4. Eksperimentalni dio.....</b>  | <b>24</b>  |
| 4.1. Plan umjeravanja referentnog etalona sile LIMS – a.....  | 24         |
| 4.2. Matematički model umjeravanja referentnog etalona sile LIMS – a.....                           | 25         |
| 4.3. Osnovni podaci o referentnom etalonu sile LIMS – a.....  | 28         |

|  |           |
|--|-----------|
| 4.4. Osnovni podaci o posredničkim etalonima.....                | 30        |
| 4.5. Rezultati umjeravanja.....                                  | 31        |
| 4.5.1. Rezultati mjerenja.....                                   | 31        |
| 4.5.2. Procjena nesigurnosti umjeravanja.....                    | 32        |
| 4.6. Analiza rezultata umjeravanja referentnog etalona sile..... | 37        |
| <b>5. Zaključak.....</b>   | <b>49</b> |
| <b>Literatura.....</b>   | <b>51</b> |

## POPIS SLIKA

|  |    |
|--|----|
| Slika 1: Idealizirani prikaz ponašanja sustava za mjerenje sile.....   | 5  |
| Slika 2: Piramida sljedivosti.....   | 9  |
| Slika 3: Piramida sljedivosti za mjernu veličinu sile u Hrvatskoj s pripadnim proširenim mjernim nesigurnostima.....         | 9  |
| Slika 4: Primarni nacionalni etalon sile u PTB – u nazivne sile 1 MN.....  | 13 |
| Slika 5: Referentni etalon sile s direktnim opterećenjem utezima nazivne sile 100 kN proizvođača GTM smješten u PTB – u..... | 14 |
| Slika 6: Referentni etalon sile s polužnim mehanizmom opterećenja proizvođača GTM smješten u EIM – u (Grčka).....            | 14 |
| Slika 7: Referentni etalon sile s hidrauličnim mehanizmom opterećenja proizvođača GTM smješten u LBF – u (Njemačka).....     | 15 |
| Slika 8: Referentni etalon sile komparatornog tipa nazivne sile 500 kN proizvođača GTM smješten u LIMS – u.....              | 15 |
| Slika 9: Posrednički etalon sile tipa Z4A nazivne sile 20 kN proizvođača HBM.....  | 16 |
| Slika 10: Općenita shema umjeravanja.....  | 16 |
| Slika 11: Piramida sljedivosti i shema umjeravanja etalona sile, uz pridružene mjerne nesigurnosti.....                      | 18 |
| Slika 12: Referentni etalon sile u LIMS – u.....   | 28 |
| Slika 13: Dvostruko složeni dinamometri referentnog etalona sile LIMS – a.....   | 29 |
| Slika 14: Umjeravanje referentnog etalona LIMS – u s posredničkim etalom Z4 500 kN.....                                      | 29 |
| Slika 15: Posrednički etalon Z4 500 kN pri umjeravanju referentnog etalona LIMS - a.....                                     | 30 |
| Slika 16: Relativna razlika srednjih vrijednosti očitavanja PTB – a i LIMS – a za mjerno područje od 10 kN do 500 kN.....    | 39 |
| Slika 17: Relativna devijacija rezultata umjeravanja u LIMS – u u odnosu na PTB za mjerno područje od 10 do 20 kN.....       | 39 |
| Slika 18: Relativna devijacija rezultata umjeravanja u LIMS – u u odnosu na PTB za mjerno područje od 20 do 100 kN.....      | 40 |
| Slika 19: Relativna devijacija rezultata umjeravanja u LIMS – u u odnosu na PTB za mjerno područje od 100 do 200 kN.....     | 40 |



|  |    |
|--|----|
| Slika 20: Relativna devijacija rezultata umjeravanja u LIMS – u u odnosu na PTB<br>za mjerno područje od 200 do 500 kN.....  | 40 |
| Slika 21: Relativna devijacija rezultata umjeravanja u LIMS – u u odnosu na PTB<br>za čitavo mjerno područje referentnog etalona od 10 do 500 kN.....                            | 41 |
| Slika 22: Usporedni prikaz relativne nesigurnosti ponovljivosti mjerenja s rotacijom<br>za mjerno područje od 10 do 20 kN.....   | 41 |
| Slika 23: Usporedni prikaz relativne nesigurnosti ponovljivosti mjerenja s rotacijom<br>za mjerno područje od 20 do 100 kN.....  | 42 |
| Slika 24: Usporedni prikaz relativne nesigurnosti ponovljivosti mjerenja s rotacijom<br>za mjerno područje od 100 do 200 kN.....   | 42 |
| Slika 25: Usporedni prikaz relativne nesigurnosti ponovljivosti mjerenja s rotacijom<br>za mjerno područje od 200 do 500 kN.....   | 42 |
| Slika 26: Prikaz udjela relativne nesigurnosti ponovljivosti mjerenja referentnog<br>etalona LIMS – a i nacionalnog etalona PTB – a.....   | 43 |
| Slika 27: Histerezne razlike mjernih nizova $X_3$ i $X_4'$ .....   | 44 |
| Slika 28: Histerezne razlike mjernih nizova $X_5$ i $X_6'$ .....   | 44 |
| Slika 29: Relativna devijacija histereze nizova $X_3$ i $X_4'$ te nizova $X_5$ i $X_6'$ .....  | 45 |
| Slika 30: Ponašanje pojedinih mjernih nesigurnosti u ovisnosti o sili.....   | 45 |
| Slika 31: Značaj pojedinih mjernih nesigurnosti u kombiniranoj nesigurnosti<br>odstupanja pri ostvarivanju sljedivosti.....  | 46 |
| Slika 32: Značaj pojedinih mjernih nesigurnosti u kombiniranoj relativnoj nesigurnosti<br>referentnog etalona LIMS – a.....  | 46 |
| Slika 33: Kombinirana nesigurnost odstupanja pri ostvarivanju sljedivosti, kombinirana<br>relativna nesigurnost referentnog etalona i odgovarajuća proširena<br>nesigurnost..... | 47 |

## POPIS TABLICA

|  |    |
|--|----|
| Tablica 1: Pregled potencijalnih zahtjeva za sustav mjerenja sile.....   | 6  |
| Tablica 2: Najveća mjerna sposobnost referentnog etalona s obzirom na realizaciju sile   | 13 |
| Tablica 3: Proširene relativne nesigurnosti nacionalnih etalona.....   | 21 |
| Tablica 4: Osnovne karakteristike referentnog etalona sile LIMS – a.....   | 28 |
| Tablica 5: Osnovne karakteristike posredničkih etalona korištenih pri umjeravanju referentnog etalona LIMS – a.....  | 30 |
| Tablica 6: Rezultati umjeravanja posredničkih etalona u nacionalnom etalonu PTB – a  | 31 |
| Tablica 7: Rezultati umjeravanja referentnog etalona LIMS – a pomoću posredničkih etalona.....   | 32 |
| Tablica 8: Relativne nesigurnosti ponovljivosti mjerenja uz rotaciju za referentni etalon LIMS – a i nacionalni etalon PTB – a.....  | 33 |
| Tablica 9: Relativna devijacija rezultata umjeravanja u LIMS – u u odnosu na rezultate PTB – a.....  | 34 |
| Tablica 10: Relativna devijacija histereze rezultata umjeravanja.....  | 35 |
| Tablica 11: Vrijednosti kombinirane nesigurnosti pri ostvarivanju sljedivosti, relativne mjerne nesigurnosti i proširene mjerne nesigurnosti referentnog etalona LIMS – a..... | 36 |
| Tablica 12: Maksimalni iznosi mjernih nesigurnosti.....  | 36 |
| Tablica 13: Nesigurnosti umjeravanja referentnog etalona LIMS – a.....   | 37 |

## POPIS OZNAKA

| Oznaka                            | Mjerna jedinica | Značenje   |
|-----------------------------------|-----------------|--|
| $a$                               | $\text{m/s}^2$  | Ubrzanje   |
| $a_{\text{drift}}$                |                 | Poluširina relativne varijacije drifta   |
| $a_{\text{hys}}$                  |                 | Poluširina relativne varijacije histereze  |
| $a_{\text{rep}}$                  |                 | Poluširina relativne varijacije ponovljivosti  |
| $a_{\text{rel-dev}}$              |                 | Poluširina relativne varijacije devijacije rezultata umjeravanja                                 |
| $c_{\text{temp}}$                 |                 | Relativna promjena rezultata umjeravanja zbog promjene temperature                               |
| $d_{\text{hys}}$                  | $\text{mV/V}$   | Histerezna razlika   |
| $F$                               | $\text{N}$      | Sila   |
| $F_{\text{FCM}}$                  | $\text{N}$      | Sila primjenjena na referentnom etalonu  |
| $F_{\text{FSM}}$                  | $\text{N}$      | Sila primjenjena na nacionalnom etalonu  |
| $g$                               | $\text{m/s}^2$  | Lokalno gravitacijsko ubrzanje   |
| $k$                               |                 | Faktor pokrivanja  |
| $K_{\text{TS}}$                   | $\text{NV/mV}$  | Koeficijent umjeravanja posredničkog etalona   |
| $m$                               | $\text{kg}$     | Masa   |
| $n$                               |                 | Broj rotacijskih položaja  |
| $U$                               | %               | Proširena mjerna nesigurnost referentnog etalona   |
| $W_{\text{BMC}}$                  | %               | Najbolja mjerna sposobnost referentnog etalona   |
| $w(c_{\text{temp}})$              | %               | Relativna nesigurnost zbog promjene temperature  |
| $w(\text{FCM})$                   | %               | Kombinirana relativna nesigurnost referentnog etalona  |
| $W(\text{FCM})$                   | %               | Proširena mjerna nesigurnost referentnog etalona   |
| $w(F_{\text{FCM}})$               | %               | Relativna nesigurnost ponovljivosti referentnog etalona  |
| $w(F_{\text{FSM}})$               | %               | Relativna nesigurnost ponovljivosti nacionalnog etalona  |
| $W(\text{FSM})$                   | %               | Proširena mjerna nesigurnost nacionalnog etalona   |
| $w(K_{\text{TS}})$                | %               | Kombinirana relativna nesigurnost posredničkog etalona   |
| $w_{\text{realization-FCM}}$      | %               | Kombinirana relativna nesigurnost realizacije sile na referentnom etalonu                        |
| $W_{\text{realization-FCM}}$      | %               | Proširena relativna nesigurnost realizacije sile na referentnom etalonu                          |
| $w_{\text{RT}}$                   | %               | Relativna nesigurnost referentnog etalona  |
| $w_{\text{RV}}$                   | %               | Kombinirana relativna nesigurnost referentnih vrijednosti  |
| $W_{\text{RV}}$                   | %               | Proširena relativna nesigurnost referentnih vrijednosti  |
| $W_{\text{TS}}$                   | %               | Proširena relativna nesigurnost posredničkih etalona   |
| $w(\Delta_{\text{drift}})$        | %               | Relativna nesigurnost dugoročnog drifta  |
| $w(\Delta_{\text{hys}})$          | %               | Relativna devijacija histereze   |
| $w(\Delta_{\text{realization}})$  | %               | Relativna nesigurnost realizacije sile nacionalnog etalona                                       |
| $w(\Delta_{\text{rel-dev}})$      | %               | Relativna devijacija rezultata umjeravanja   |
| $w(\Delta_{\text{traceability}})$ | %               | Kombinirana relativna nesigurnost odstupanja pri ostvarivanju sljedivosti do nacionalnog etalona |
| $X$                               | $\text{mV/V}$   | Očitanje   |
| $X_i$                             | $\text{mV/V}$   | Očitanje pri rastućoj sili u $i$ -tom mjernom nizu   |
| $X'_i$                            | $\text{mV/V}$   | Očitanje pri padajućoj sili u $i$ -tom mjernom nizu  |
| $X_{\text{sr}}$                   | $\text{mV/V}$   | Srednja vrijednost više očitavanja   |

|                                |  |  |
|--------------------------------|--|--|
| $\Delta_{\text{drift}}$        |  | Relativni dugoročni drift umjeravanja  |
| $\Delta_{\text{hys}}$          |  | Relativna histereza umjeravanja  |
| $\Delta_{\text{realization}}$  |  | Relativna promjena realizacije sile u nacionalnom etalonu                            |
| $\Delta_{\text{rel-dev}}$      |  | Relativna razlika srednjih vrijednosti sile između referentnog i nacionalnog etalona |
| $\Delta_{\text{traceability}}$ |  | Odstupanje pri ostvarivanju sljedivosti do nacionalnog etalona                       |

## **1. UVOD**

Jedna od općenito najvažnijih fizikalnih veličina je sila. Ona predstavlja iznimno važan pojam u strojarstvu i u drugim granama tehnike i znanosti. Pojavljuje se u različitim oblicima u svim mehanizmima i sustavima te je njeno poznavanje i mjerenje nužno za konstrukciju, izvedbu, primjenu i sigurnost raznih uređaja, kao i za određivanje brojnih svojstava različitih materijala.

Za različite sustave potrebne su različite točnosti mjerenja sile. Da bi se ostvarilo pouzdano i točno mjerenje, treba koristiti pravilne mjerne tehnike i uređaje. Da bi mjerila sile pružala zadovoljavajuću kvalitetu mjerenja, moraju biti umjerena. To znači da moraju biti „uspoređena“ s mjerilom na višoj mjeriteljskoj razini.

U ovome radu bit će objašnjena važnost i načini mjerenja sile te oni elementi mjeriteljstva koji osiguravaju pouzdanost i točnost mjerenja. Najviše će biti riječi o sljedivosti mjerenja sile, o etalonima sile te umjeravanju istih, a detaljnije će biti razrađeno umjeravanje referentnih etalona sile. U eksperimentalnom će se dijelu provesti umjeravanje referentnog etalona sile Laboratorija za ispitivanje mehaničkih svojstava (LIMS – a) Fakulteta strojarstva i brodogradnje, koji je uređaj komparatornog tipa te podržava raspon sile od 10 kN do 500 kN. On će se umjeravati pomoću četiri posrednička etalona tipa Z4 nazivnih sila 20 kN, 100 kN, 200 kN i 500 kN, s obzirom na nacionalni etalon njemačkog Physikalische Technische Bundesanstalt – a (PTB – a). Podaci umjeravanja bit će obrađeni prema odgovarajućem matematičkom modelu, kako bi se naposljetku dobila proširena mjerna nesigurnost umjeravanja referentnog etalona LIMS - a.

## 2. MJERENJE SILE

### 2.1. Sila kao fizikalna veličina

**Sila** je jedna od temeljnih fizikalnih veličina u brojnim znanstvenim disciplinama te tehnici i tehnologiji. Silu se kao fizikalnu veličinu može definirati kao mjeru interakcije među tijelima [1]. Ona je vektorska veličina, što znači da ima određeni iznos, ali i smjer djelovanja. Sila se pojavljuje u različitim oblicima – gravitacijska, elektromagnetska, atomska itd, ali teže ju je zamisliti nego masu ili duljinu, te je za razliku od mase treba stvoriti.

Djelovanje sile na neko tijelo može uzrokovati različite posljedice. Ovisno o porijeklu i obliku sile koja djeluje na promatrano tijelo, to mogu biti:

- promjena građe tijela,
- promjena oblika tijela,
- promjena položaja, tj. gibanje tijela.

U znanosti o materijalima, djelovanje sile na tijelo proučava se prije svega zbog promatranja ponašanja materijala tijela, a pomoću toga određuju se brojna mehanička svojstva pojedinih materijala, koja su prije svega vezana uz promjenu oblika materijala, tj. ispitnog tijela. Sile kojima se djeluje na materijale mogu imati različite iznose te mogu djelovati na različite načine na materijal, s obzirom da je sila vektorska veličina. Prema tome razlikuju se različita opterećenja na materijal – vlak, tlak, smik, savijanje, torzija, zatim statičko i dinamičko opterećenje, kratkotrajno i dugotrajno opterećenje itd.

Silu i njezino djelovanje pobliže definiraju tri osnovna zakona – Newtonova zakona[2]:

**I. Newtonov zakon:** Svako tijelo ostaje u stanju mirovanja ili jednolikog gibanja po pravcu, sve dok neka sila koja djeluje na njega to ne promijeni.

**II. Newtonov zakon:** Ubrzanje je proporcionalno sili što djeluje na tijelo, a zbiva se u smjeru djelovanja sile ( $F = m \times a$ ).

**III. Newtonov zakon:** U međusobnom djelovanju dvaju tijela, ona djeluju jednakim, ali suprotno usmjerenim silama.

Mjerna jedinica za silu prema SI sustavu je **Njutn [N]**. To je izvedena SI jedinica, što znači da nema međunarodno dogovorene vrijednosti za etalon kao npr. 1 metar ili 1 kilogram. Definicija 1 Njutna proizlazi iz II. Newtonovog zakona: 1 Njutn je ona sila koja masi od 1 kg daje ubrzanje od  $1 \text{ m/s}^2$  [2]. U praksi je teško dobiti 1 N iz ovakve definicije, jer je teško postići ubrzanje od baš  $1 \text{ m/s}^2$ , tako da se standardno sile ostvaruju na temelju II. Newtonovog zakona primjenjenog u gravitacijskom polju Zemlje. Odnosno, tijelo poznate mase ( $m$ ) podvrgava se djelovanju lokalnog gravitacijskog ubrzanja ( $g$ ) te poznatom silom djeluje na potporu ( $F = m \times g$ ). Na ovaj način silu ostvaruju uređaji direktno opterećivani utezima (deadweight machines), koji su upravo mjerila sile na najvišoj mjeriteljskoj razini.

## **2.2. Osnove mjerenja sile**

Mjerenje sile vrlo je važno jer se na temelju toga određuju svojstva nekog materijala, dijela ili čitavog stroja. Mehanička svojstva materijala određuju kvalitetu nekog materijala, mogućnost njegove primjene te su važna za dimenzioniranje strojnih dijelova. Mjerenje sile u strojevima važno je zbog sigurnosti, montaže stroja i mogućnosti njegove primjene, kao i zbog razumijevanja i praćenja radnji za koje je stroj konstruiran. Dobra mjerenja imaju i značajan ekonomski utjecaj na neki proces ili uređaj te omogućuju pouzdanost uređaja. Da bi mjerenja bila pouzdana i točna, potrebno je koristiti odgovarajuće mjerne metode i uređaje, koji su pravilno umjereni, te se pridržavati propisanih zahtjeva.

Iako se definicija jedinice sile odnosi na ubrzanje tijela neke mase, zbog praktičnosti se velika većina mjerenja sile provodi na tijelima u ravnoteži, koja se ne gibaju. Osim toga, svaka sila je vektor te se može rastaviti na tri komponente, no većina mjernih sustava sile pravilno može reagirati na samo jednu od tih komponenti, i to onu duž svoje glavne osi. Stoga je važno pri mjerenjima sile zadržati aksijalnost, kako bi mjerenje bilo što točnije.

Osnovne metode mjerenja sile su sljedeće:

- **direktna** i
- **indirektna**, koja može biti:
  - **mjerenje akceleracije** tijela poznate mase na kojeg djeluje sila,
  - **mjerenje deformacije** elastičnog elementa na kojeg djeluje sila [3].

Direktnom se metodom sila mjeri na vagama za mjerenje sile, čiji je princip mjerenja izravno uspoređivanje sile s poznatom gravitacijskom težinom utega standardne mase, pri čemu su točno poznate masa i gravitacija. Indirektna metoda mjerenja akceleracije vrlo je ograničena, jer se sila koja se pri tom određuje sastoji od više nepoznatih komponenti koje se ne mogu sve odrediti. Zbog toga je u praksi najčešća metoda mjerenja deformacije elastičnih elemenata, koji mogu biti opruge, jednoosno opterećeni članci, nosači, prstenovi ili mjerne ćelije. Princip djelovanja elastičnih elemenata temelji se na pojavi deformacije elementa uslijed djelovanja sile te pretvorbi deformacije u neki drugi oblik (npr. promjenu napona), kako bi se mogla lakše očitati, odnosno izmjeriti.

Uređaji za mjerenje sile razlikuju se prema metodi mjerenja, konstrukciji, načinu ostvarivanja opterećenja i namjeni. Prema namjeni mogu biti:

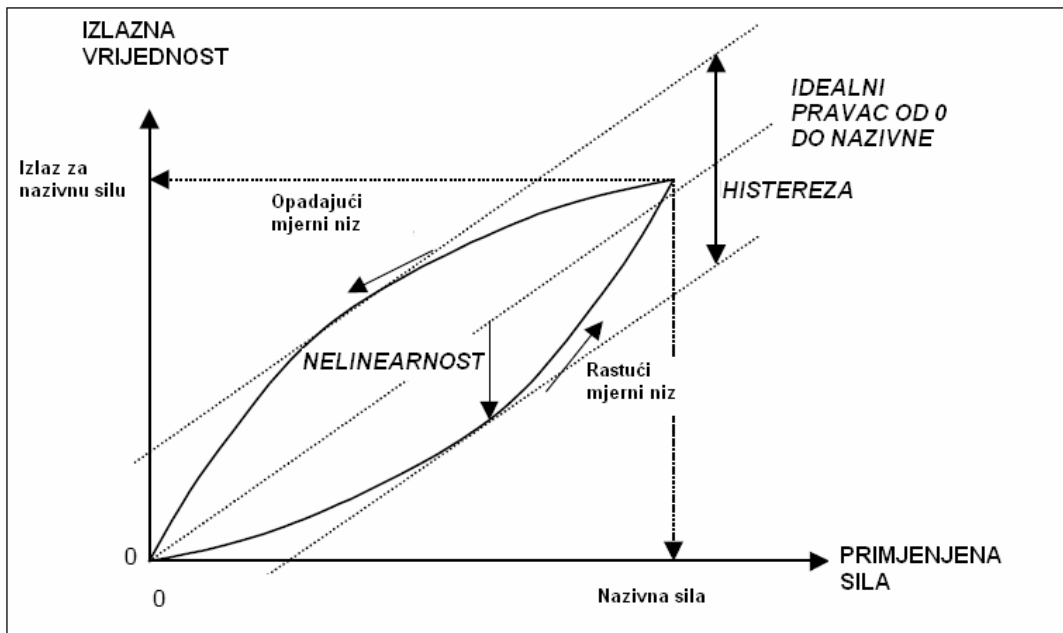
- **ispitni uređaji**, tj. oprema za mjerenje sile: kidalice i preše,
- **etalonski uređaji**, tj. oprema za umjeravanje: nacionalni, referentni i prijenosni etaloni.

Ispitni uređaji koriste se u različitim industrijama, prisutni su u gotovo svim fazama nastanka nekog proizvoda: istraživanju i razvoju, procesu proizvodnje, montaži, ispitivanju i testiranju proizvoda i strojeva, kontroli kvalitete. Etaloni se koriste isključivo za umjeravanje, kako ispitnih uređaja, tako i drugih etalona niže mjeriteljske razine. U radu će kasnije biti detaljnije opisana upravo oprema za umjeravanje, a posebno referentni etaloni sile.

### **2.3. Karakteristike sustava za mjerenje sile**

Sustav za mjerenje sile sastoji se od mjernog tijela (npr. elastično tijelo) i dodatnih dijelova: za dobivanje očitavanja (npr. pojačalo), za povezivanje komponenti sustava (kabeli), za stabilnost sustava (nosači, antivibracijski temelji) itd. Ponašanje sustava pri mjerenju može se prikazati grafički kao odnos izlazne veličine – očitavanja i ulazne veličine – narinute sile. Takav idealizirani prikaz dan je slikom 1, gdje se narinuta sila povećava od 0 do nazivne sile te potom smanjuje opet do 0.





Slika 1: Idealizirani prikaz ponašanja sustava za mjerenje sile [1]

Iz danog prikaza mogu se vidjeti neke osnovne karakteristike mjernog sustava za silu:

- **Nelinearnost** je karakteristika svakog mjernog sustava koja pokazuje devijaciju položaja mjernih točaka od idealnog pravca koji povezuje silu od 0 i nazivnu silu sustava.
- **Histereza** je razlika očitavanja rastućeg i opadajućeg mjernog niza kod iste narinute sile.
- **Pogreška** mjerenja je razlika između očitane vrijednosti i stvarne vrijednosti sile. [1]

Osim već navedenih, svaki mjerni sustav ima i sljedeće karakteristike:

- **Ponovljivost** je usko slaganje između rezultata uzastopnih mjerenja istih sila u istim mjernim uvjetima.
- **Obnovljivost** je rasipanje rezultata mjerenja istih sila, ali uz promjenu nekog mjernog uvjeta (npr. mjeritelja, metode mjerenja i sl.).
- **Puzanje** je promjena izlaznih podataka uslijed porasta sile ovisna o vremenskom periodu promjene sile.
- **Povrat puzanja** je promjena izlaznih podataka uslijed smanjenja sile ovisna o vremenskom periodu promjene sile.
- **Drift** je slabljenje mjeriteljskih značajki mjernog sustava. [1]

Na mjerni sustav i njegovo djelovanje mogu utjecati brojni faktori:

- dugoročna stabilnost samog mjernog sustava koja je određena brojnim faktorima (stabilnost mjernog tijela, zaštićenost pojedinih dijelova sustava, skladištenje, transport i upotreba mjernog sustava),
- uvjeti opterećenja: promjena distribucije sile na površinama i dijelovima na koje djeluje opterećenje, narušena aksijalnost djelovanja sile, nepropisno dinamičko opterećenje sustava,
- okolišni uvjeti: temperatura, vlaga i tlak zraka, promjene u naponskoj mreži, radio signal i drugo. [1]

Ovisno o namjeni i vrsti sustava za mjerenje sile, postoje uvijek određeni zahtjevi za sustav, koji se moraju zadovoljiti kako bi sustav pravilno funkcionirao i davao zadovoljavajuće rezultate mjerenja. Pregled takvih potencijalnih zahtjeva dan je u tablici 1.

Tablica 1: Pregled potencijalnih zahtjeva za sustav mjerenja sile [1]

| <b>Primjenjena sila</b>         | <b>Uvjeti opterećenja</b>         | <b>Umjeravanje</b>                          |
|---------------------------------|-----------------------------------|---|
| Najveća dopuštena sila          | Otklon                            | Umjeravanje dinamometra                     |
| Radni raspon sile               | Orijentacija dinamometra          | Umjeravanje sustava                         |
| Nulti pomak sile                | Promjene orijentacije dinamometra | Direktno/indirektno umjeravanje             |
| Preopterećenje                  |                                   |   |
| Statičko/dinamičko opterećenje  | Jednoliki raspored opterećenja    | Posrednički etaloni za umjeravanje          |
| Zahtjevana nesigurnost          | Broj točaka opterećenja           | Umjeravanje utezima                         |
| Bočno opterećenje               | Točke fiksiranja                  | Umjeravanje dodatnih komponenti sustava     |
| Koso opterećenje                | Direktno opterećenje              |   |
| Dvosmjerno opterećenje          | Potporni                          |   |
| Višeosno opterećenje            |                                   |   |
| Razina umora                    |                                   |   |
| Razina vibracija                |                                   |   |
| <b>Okolišni uvjeti</b>          | <b>Dodatni instrumenti</b>        | <b>Konfiguracija sustava</b>                |
| Temperatura                     | Analogni/digitalni                | Razvodna kutija                             |
| Vlaga                           | Rezolucija                        | Jednostruki most                            |
| Tlak                            | Vrsta displeja                    | Mehanička/električna raspodjela opterećenja |
| Prašina                         | Dovod struje                      |   |
| Potreba za dodatnim brtvljenjem | Kućište instrumenata              | Povezivanje kablovima/konektorima           |
|                                 | Naponska osjetljivost             |   |
| Korozivnost atmosfere           | Izlazni signali                   | Dodatni instrumenti                         |
| Opasne tvari u okolišu          | Električni šum                    |   |
| Čistoća radne okoline           | Dužina kablova                    |   |
|                                 | Moguće opasnosti                  |   |

### **3. SLJEDIVOST, ETALONI I UMJERAVANJE ETALONA SILE**

Općenito je u mjeriteljstvu važna mogućnost uspoređivanja različitih rezultata mjerenja iste fizikalne veličine, pa tako i uspoređivanje različitih mjerenja sile. Kako bi takve usporedbe bile moguće i imale smisla, teži se postizanju mjernog jedinstva. **Mjerno jedinstvo** može se definirati kao „mjeriteljsko stanje u kojem su mjerni rezultati izraženi u zakonitim jedinicama koje se mogu, s utvrđenim mjernim nesigurnostima dovesti u vezu s referentnim etalonima“ [4]. Osnovne sastavnice mjernog jedinstva su [4]:

- međunarodni sustav jedinica SI,
- etaloni,
- umjeravanje,
- sljedivost,
- mjeriteljska infrastruktura.

Prije svega je za usporedbu važno da su rezultati različitih mjerenja iskazani u istim mjernim jedinicama pa se zato koriste isključivo SI mjerne jedinice, bilo temeljne, bilo izvedene kao za silu. Time je ostvaren prvi uvjet mjernog jedinstva. Drugi uvjet postiže se postojanjem odgovarajućih etalona, umjeravanjem etalona i mjerila te osiguranjem sljedivosti. Etaloni, umjeravanje, sljedivost i mjeriteljska infrastruktura usko su povezani te ih je nemoguće ostvariti ili nemaju smisla bez postojanja ostalih sastavnica mjernog jedinstva. U sljedećim poglavljima objašnjeni su detaljnije, uz prikaz njihove uloge u mjerenju sile.

#### **3.1. Sljedivost mjerenja sile**

**Sljedivost** se može definirati kao: „svojstvo mjernog rezultata ili vrijednosti etalona po kojemu se on može dovesti u vezu s navedenim referentnim etalonima (obično državnim ili međunarodnim) neprekinutim lancem usporedbi koje imaju utvrđene mjerne nesigurnosti“ [4]. Sljedivost se ostvaruje neprekinutim nizom prijenosa vrijednosti neke veličine (umjeravanjem), počevši od etalona najviše mjeriteljske kakvoće. Drugim riječima, da bi neko mjerilo za silu bilo valjano, mora se moći direktno povezati s primarnim etalom sile.

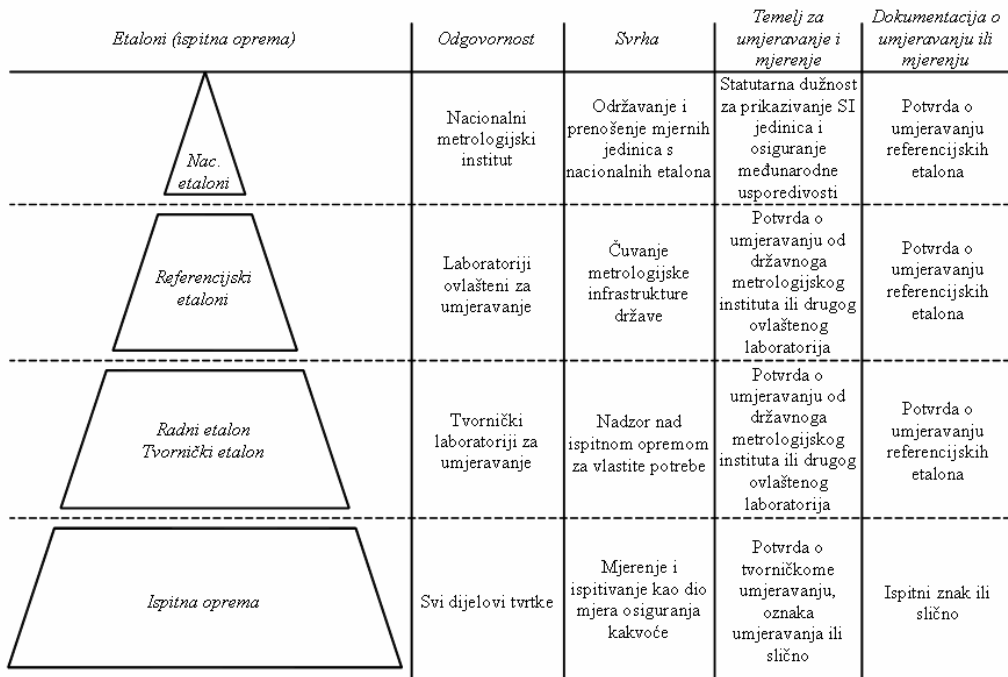
Osnovni elementi koji određuju sljedivost su [3]:

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

Sljedivost se osigurava umjeravanjem, ali ovisno o kakvim se mjerilima ili etalonima radi, te na kojem su oni položaju u lancu usporedbi, moguće ju je ostvariti na više načina [3]:

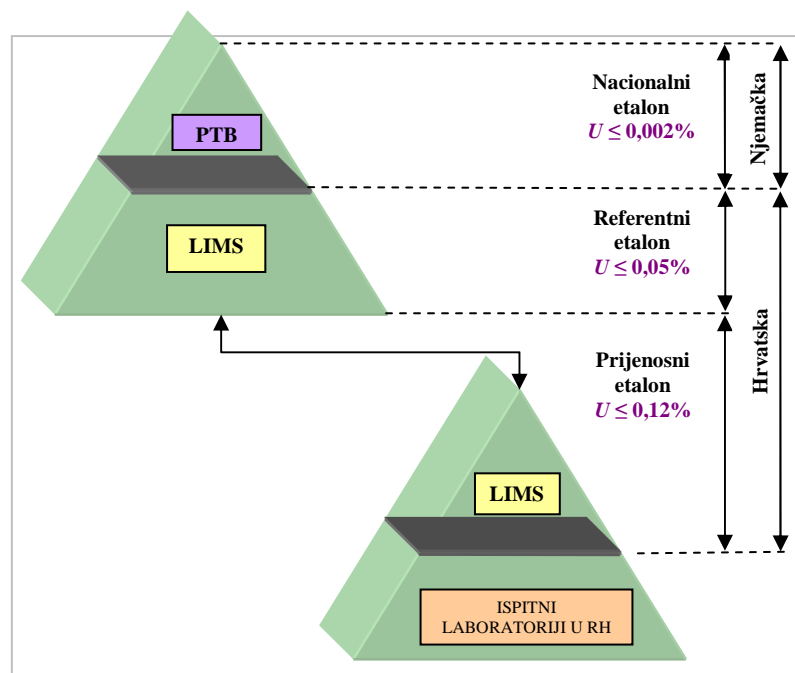
- preko umjernog laboratorija same tvrtke,
- preko ovlaštenog laboratorija,
- preko državne mjeriteljske ustanove,
- do međunarodnog etalona, i to: izravnim vezivanjem na međunarodni etalon, vezivanjem na državni etalon neke druge države ili vezivanjem na etalon stranog ovlaštenog umjernog laboratorija zadovoljavajuće mjeriteljske kakvoće,
- do definicijskog etalona.

Neprekinuti lanac usporedbi koji osigurava sljedivost određuje i shemu, tj. **piramidu sljedivosti**. U toj piramidi etaloni i mjerni uređaji posloženi su hijerarhijski prema svojoj mjeriteljskoj kakvoći. Pomoću etalona više razine umjerava se etalon niže razine i tako sve do mjerila i ispitne opreme kao što je npr. kidalica, koja je na najnižoj razini piramide. Dakle, umjeravanje ide s vrha prema dnu piramide. Piramida sljedivosti prikazana je slikom 2.



Slika 2: Piramida sljedivosti [3]

Što se tiče etalona za silu, u Hrvatskoj nema nacionalnog etalona, već je odgovarajući nacionalni etalon u ovom dijelu Europe u njemačkom nacionalnom mjeriteljskom institutu Physikalische Technische Bundesanstalt – u (PTB - u). No Laboratorij za ispitivanje mehaničkih svojstava (LIMS) Fakulteta strojarstva i brodogradnje ovlaštene je laboratorij za umjeravanje u kojem se nalazi referentni etalon za silu. Piramida sljedivosti etalona sile za Hrvatsku prikazana je slikom 3.



Slika 3: Piramida sljedivosti za mjernu veličinu sile u Hrvatskoj s pripadnim proširenim mjernim nesigurnostima [5]

### **3.1.1. Mjerna nesigurnost**

Pri svakom mjerenju neke fizikalne veličine, pa tako i sile, cilj je mjeritelja dobiti izmjerenu vrijednost te veličine koja je što bliža stvarnoj vrijednosti, s obzirom da su potpuno točna mjerenja neostvariva. Koliko će ta izmjerena vrijednost biti blizu stvarnoj vrijednosti ovisi o brojnim faktorima [6]:

- nepotpunoj definiciji mjerene veličine,
- nesavršenoj realizaciji definicije mjerene veličine,
- nedovoljno reprezentativnom uzorku mjerenja,
- nedovoljnom poznavanju okolišnih uvjeta ili njihovom nesavršenom mjerenju,
- pristranosti mjeritelja,
- rezoluciji ili pragu pokretljivosti mjerila,
- netočnim referentnim vrijednostima,
- netočnim vrijednostima konstanti i drugih parametara,
- aproksimacijama i pretpostavkama uključenim u mjernu metodu i proceduru,
- varijacijama u ponovljenim mjerenjima pod istovjetnim uvjetima.

Zbog djelovanja navedenih utjecajnih faktora pojavljuje se određena mjerna nesigurnost. **Mjerna nesigurnost** može se definirati kao sumnja u rezultat mjerenja te upravo ona pokazuje koliko je izmjerena vrijednost blizu stvarnoj vrijednosti mjerene veličine [6]. Proračun, tj. procjena mjerne nesigurnosti jedna je od osnovnih faza umjeravanja referentnog etalona sile. Ukupna mjerna nesigurnost koja se pri tome traži sastavljena je od više pojedinačnih nesigurnosti koje proizlaze iz najvažnijih utjecaja na sam postupak umjeravanja referentnog etalona. Detaljno je procjena mjernih nesigurnosti za referentni etalon opisana u poglavljima 3.4. i 4.2.

Nekoliko se različitih pojmova vezanih za nesigurnost pojavljuje u proračunima te se oni mogu definirati na sljedeći način [6]:

- **Mjerna nesigurnost** (općenito) je parametar povezan s rezultatom mjerenja, koji pokazuje rasipanje vrijednosti koje bi se mogle razumno pripisati mjerenoj veličini.
- **Standardna mjerna nesigurnost** je nesigurnost mjerenja izražena kao standardna devijacija mjerene veličine te ima istu mjernu jedinicu kao mjerena veličina.

- **Relativna standardna mjerna nesigurnost** jednaka je omjeru standardne nesigurnosti i procjenjene vrijednosti mjerene veličine te je bezdimenzijska.
- **Proširena mjerna nesigurnost** je prošireni interval vrijednosti koje se mogu pripisati mjerenoj veličini uz određenu vjerojatnost, a dobiva se kao umnožak standardne nesigurnosti i faktora pokrivanja. U slučaju normalne raspodjele rezultata mjerenja uzima se da je faktor pokrivanja jednak 2, čime je osigurana vjerojatnost od 95 %, a to će biti zadovoljavajuće i kod umjeravanja referentnog etalona sile.

U mjerenjima teži se uvijek postizanju što manje mjerne nesigurnosti. Ona se redovito iskazuje uz rezultat nekog mjerenja, kako bi se međusobno mogli uspoređivati rezultati mjerenja različitih uređaja ili laboratorija, te kako bi potencijalni korisnici mogli procijeniti prikladnost nekog uređaja ili laboratorija za njihove potrebe.

### **3.2. Etaloni sile**

Općenito se **etalon** može definirati kao „materijalizirana mjera, mjerilo, referencijska tvar ili mjerni sustav namijenjen za određivanje, ostvarivanje, čuvanje ili obnavljanje jedinice jedne ili više vrijednosti kakve veličine da bi mogli poslužiti kao referencija“ [4]. Drugim riječima, etalon služi da bi se s njime uspoređivale sukladne mjere ili mjerila, kako bi krajnji korisnik dobio zadovoljavajuću točnost i pouzdanost mjerenja. Važno je da u slučaju sile etalon nije materijalizirana mjera (kao npr. 1 kilogram), već mjerilo.

Osnovni tipovi etalona su [3, 4] :

- **Primarni etalon** ima najvišu mjeriteljsku kakvoću i njegove se vrijednosti prihvaćaju bez upućivanja na druge etalone iste veličine.
- **Sekundarni etalon** ima vrijednost dodijeljenu usporedbom s primarnim etalom iste veličine.
- **Međunarodni etalon** je prihvaćen međunarodnim sporazumom kao međunarodna osnova za utvrđivanje vrijednosti svih ostalih etalona određene veličine.
- **Nacionalni/državni etalon** priznat je državnom odlukom da u nekoj državi služi kao osnova za dodjeljivanje vrijednosti ostalim etalonima određene veličine.

- **Referentni etalon** ima općenito najveću mjeriteljsku kakvoću na nekome području te služi za dodjeljivanje vrijednosti ostalim etalonima tog područja za određenu veličinu.
- **Posrednički etalon** upotrebljava se kao posrednik pri usporedbi drugih etalona te veličine (npr. usporedba nacionalnog i referentnog etalona).
- **Prijenosni etalon** je etalon takve izvedbe da se može prenositi na različita mjesta.
- **Radni etalon** redovito se upotrebljava za umjeravanje i provjeru mjera, mjerila ili referencijskih tvari.

Neki etalon može se istovremeno svrstati u više različitih tipova etalona, a to je čest slučaj upravo kod etalona za silu. Npr. PTB – ov etalon sile istovremeno je primarni, ali i nacionalni etalon, a posrednički etaloni često su i prijenosni etaloni. No svaki etalon mora se moći direktnim lancem usporedbi povezati baš sa primarnim etalom, tj. mora imati svoje mjesto u piramidi sljedivosti.

Budući da je Njtn izvedena jedinica u SI sustavu, kod etalona za silu ne postoji primarni etalon na međunarodnoj razini, nego su na najvišoj mjeriteljskoj razini **primarni nacionalni etaloni za silu** (Force Standard Machines – **FSM**) (slika 4). Oni predstavljaju osnovu za utvrđivanje vrijednosti svih ostalih etalona, jer su na najvišoj razini piramide sljedivosti. Zbog toga se oni ne mogu sami umjeriti u nekom drugom etalonu, već se njihova mjeriteljska kakvoća provjerava u programima međulaboratorijskih usporednih ispitivanja. Kod primarnih nacionalnih etalona sila se ostvaruje direktno, isključivo preko utega, a ne polugama i sličnim elementima. Pri tome je masa utega određena preko referentnih etalona mase, a gravitacija je izvedena veličina koja se može izmjeriti s nesigurnošću reda  $10^{-6}$ . Iz toga i načina ostvarivanja sile utezima, proizlazi relativna nesigurnost mjerenja primarnih nacionalnih etalona manja ili jednaka  $2 \times 10^{-5}$  [1, 3].





Slika 4: Primarni nacionalni etalon sile u PTB – u nazivne sile 1 MN [7]

Sljedeću razinu u mjerenju sile predstavljaju **referentni etaloni sile** (Force Calibration Machines – **FCM**), koji su osnova za vrednovanje etalona i mjerila određenog područja, a nalaze se u akreditiranim laboratorijima. Oni predstavljaju vezu između primarnog nacionalnog etalona sile i ostalih etalona i mjerila sile, jer se sami umjeravaju s obzirom na nacionalni etalon, a ostali se umjeravaju u njima. Referentni etaloni su stabilni uređaji za mjerenje sile, a mogu realizirati silu na četiri osnovna načina o kojima ponajviše ovisi i njihova najveća mjerna sposobnost (tablica 2).

Tablica 2: Najveća mjerna sposobnost referentnog etalona s obzirom na realizaciju sile [3]

| <i>Tipovi referentnih etalona prema mehanizmu opterećivanja</i> | <i>Najbolja mjerna sposobnost (proširena relativna mjerna nesigurnost)</i> |
|---|--|
| Mehanizam opterećivanja direktno utezima                        | $5 \times 10^{-5}$ do $1 \times 10^{-4}$                                   |
| Hidraulični mehanizam opterećivanja                             | $1 \times 10^{-4}$ do $5 \times 10^{-4}$                                   |
| Polužni mehanizam opterećivanja                                 | $1 \times 10^{-4}$ do $5 \times 10^{-4}$                                   |
| Komparatorni sustav   | do $5 \times 10^{-3}$  |

Iako bi se nesigurnosti mjerenja uređaja s direktnim opterećenjem utezima mogle računati slično kao za nacionalni etalon te bi tako mogle ispasti i manje, zbog trenutnih tehnoloških mogućnosti i troškova pri pokušaju postizanja manje mjerne nesigurnosti, za referentne

etalone tog tipa uzima se kao najmanja moguća nesigurnost  $5 \times 10^{-5}$ . Općenito je u većini slučajeva zadovoljavajuća najveća mjerna sposobnost referentnog etalona nekog laboratorija  $1 \times 10^{-4}$  [3]. Na slikama 5, 6, 7 i 8 prikazani su referentni etaloni različitih načina realizacije sile.



*Slika 5: Referentni etalon sile s direktnim opterećenjem utezima nazivne sile 100 kN proizvođača GTM smješten u PTB – u [8]*



*Slika 6: Referentni etalon sile s polužnim mehanizmom opterećenja proizvođača GTM smješten u EIM – u (Grčka) [8]*



Slika 7: Referentni etalon sile s hidrauličnim mehanizmom opterećenja proizvođača GTM smješten u LBF – u (Njemačka) [8]



Slika 8: Referentni etalon sile komparatornog tipa nazivne sile 500 kN proizvođača GTM smješten u LIMS – u [5]

Za prijenos sile na različita mjesta koriste se **posrednički etaloni sile** (Transfer Standards – **TS**) (slika 9). Oni služe za umjeravanje referentnog etalona u nacionalnom (kao što će se koristiti za potrebe ovog rada), te za umjeravanje etalona niže mjeriteljske razine i mjerila sile u referentnom. Uglavnom se radi o uređajima s elastičnim elementom (dinamometrom), gdje pri djelovanju sile dolazi do deformacije elastičnog elementa te

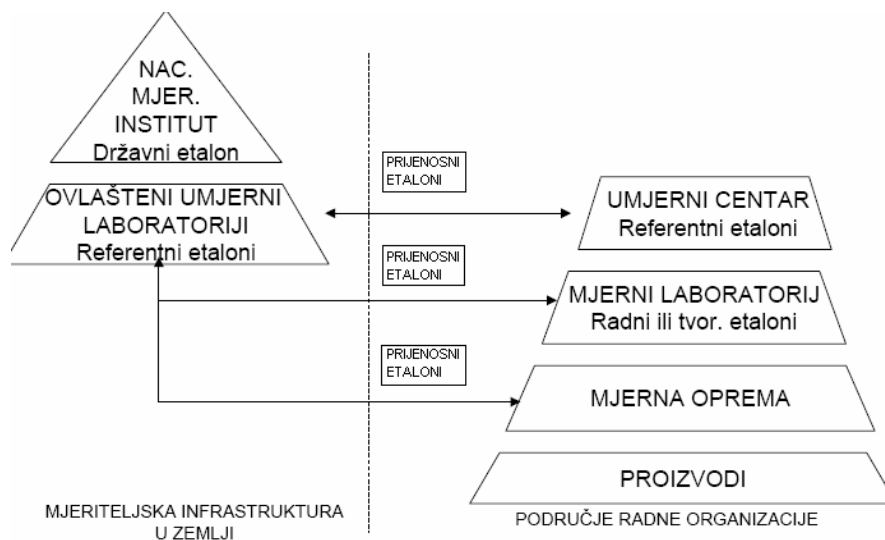
promjene otpora na električnim elementima etalona, pa je samo očitavanje izraženo kao promjena napona (u mV/V).



Slika 9: Posrednički etalon sile tipa Z4A nazivne sile 20 kN proizvođača HBM [9]

### 3.3. Umjeravanje etalona sile

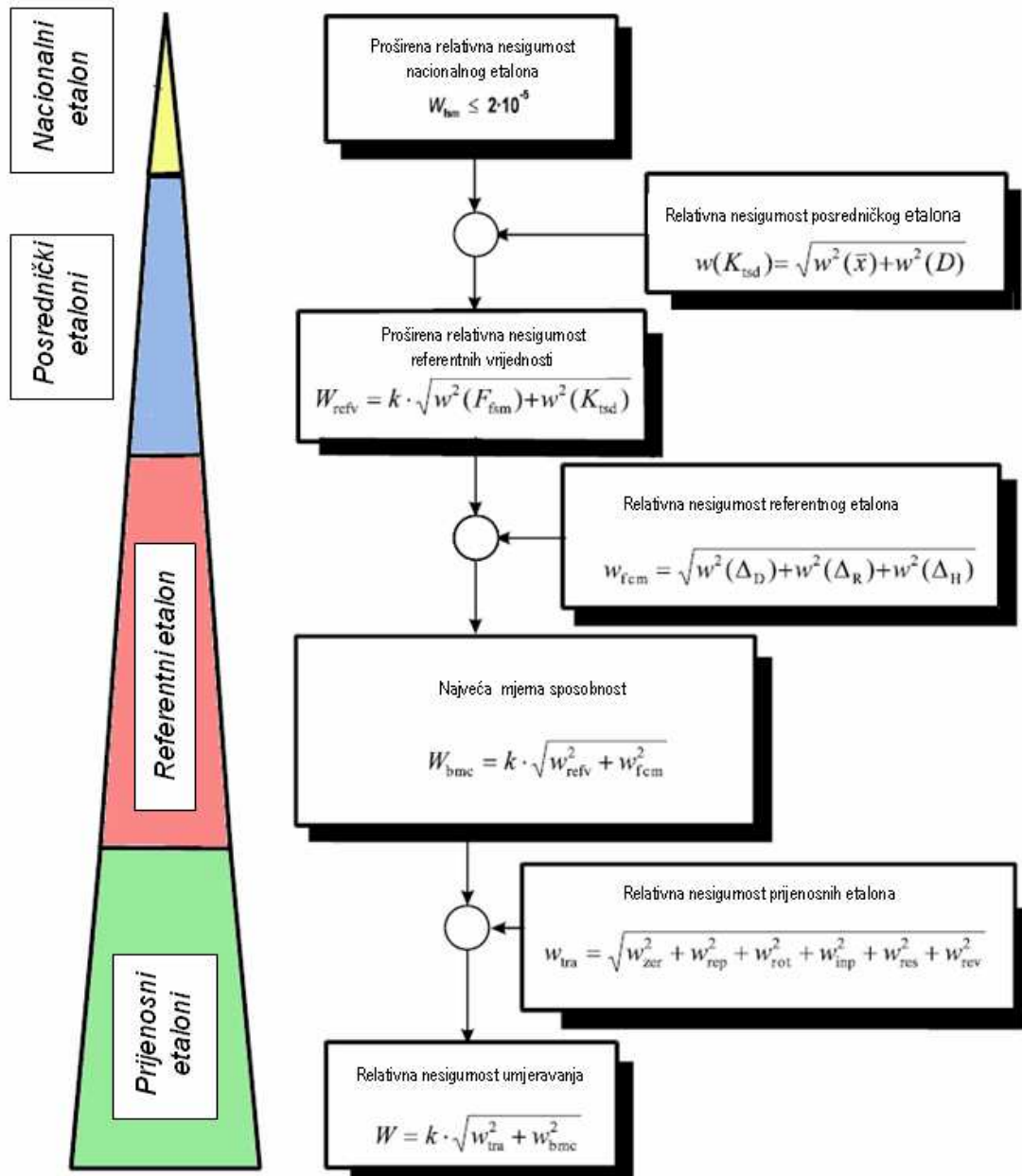
Općenito se **umjeravanje** može definirati kao „skup postupaka kojima se u određenim uvjetima uspostavlja odnos između vrijednosti veličina koje pokazuje neko mjerilo ili mjerni sustav ili vrijednosti koje pokazuje neka materijalizirana mjera ili neka referencijska tvar i odgovarajućih vrijednosti ostvarenih etalonima“ [4]. Drugim riječima, umjeravanje je postupak kojim se određuje odnos između veličine koju pokazuje mjerilo ili etalon sile niže mjeriteljske razine i odgovarajuće vrijednosti ostvarene etalom sile više mjeriteljske razine. Svaki etalon ili mjerilo uvijek se umjerava s etalom na višoj razini u piramidi sljedivosti prema općenitoj shemi na slici 10.



Slika 10: Općenita shema umjeravanja [4]

U toku uporabe uređaji za mjerenje sile gube na svojoj mjeriteljskoj kvaliteti zbog oštećenja, kvarova, preopterećenja, istrošenja nekih dijelova itd. Umjeravanje se zato mora vršiti u određenim vremenskim periodima kako bi se redovito kontrolirala ispravnost i zadovoljavajuća mjerna nesigurnost mjerila i etalona. Umjeravanje svakog uređaja mora se vršiti u skladu s odgovarajućom normom jer jedino je na taj način moguće usklađivati i uspoređivati rezultate različitih mjerenja izvršenih od strane različitih mjeritelja na različitim mjernim uređajima. Umjeravanje mjerila i etalona sile nužno je, da se osigura odgovarajuća preciznost mjerila i traženi stupanj nesigurnosti, kako bi korisnik imao povjerenje u rezultat mjerenja. Redovitim umjeravanjem etalona i mjerila osigurava se sljedivost. Upravo su postupci umjeravanja ono što dovodi neko mjerilo ili etalon niže razine u direktnu vezu s primarnim etalom.

Osnovna ideja umjeravanja je usporedba poznatih ulaznih veličina kojima se opterećuje etalon ili mjerilo s izlaznim vrijednostima koje se očitavaju na njemu. Pri tome se pokušava uvijek procijeniti nesigurnost rezultata mjerenja. Na rezultate mjerenja i njihovu mjernu nesigurnost mogu utjecati različiti faktori, među kojima i nesigurnost ulazne veličine, ali najviše možda mjerna nesigurnost samog uređaja. Nju je iz toga razloga potrebno odrediti kako bi se odredio i položaj uređaja u piramidi sljedivosti (slika 11).



Slika 11: Piramida sljedivosti i shema umjeravanja etalona sile, uz pridružene mjerne nesigurnosti [10]

Uređaji za mjerenje sile mogu se umjeravati sljedećim metodama [3]:

- standardnim utezima,
- izbalansiranim polugama i standardnim utezima,
- elastičnim uređajima,
- kontrolnim epruvetama.

Umjeravanje standardnim utezima te polugama i utezima koristi se prije svega za umjeravanje kidalica, kontrolne epruvete koriste se kod međulaboratorijskih usporedbi rezultata mjerenja sile, ali ne i za umjeravanje, dok su elastični uređaji svakako najviše primjenjivana metoda,

posebno za umjeravanje etalona sile. Upravo je ta metoda primjenjena i u ovome radu za umjeravanje referentnog etalona LIMS – a, gdje su korišteni posrednički (prijenosni) etaloni s elastičnim elementima.

### **3.4. Umjeravanje referentnog etalona sile (FCM-a)**

Neke međunarodne norme propisuju određene kriterije i zahtjeve vezane uz nesigurnost mjerenja koje etaloni sile moraju zadovoljiti za pojedinu klasu, no ne propisuju točnu proceduru kojom bi se odredila mjerna nesigurnost rezultata umjeravanja referentnog etalona sile. Ipak, postoje prihvaćene smjernice [6, 10] prema kojima se najčešće provodi umjeravanje referentnih etalona i određivanje kako mjernih nesigurnosti, tako i najboljih mjernih sposobnosti mjerenja sile, a sve u skladu sa zadanim normama. Ovaj rad usmjeren je najviše na umjeravanje referentnog etalona komparatornog tipa pa će dalje biti detaljnije opisan postupak umjeravanja takvih referentnih uređaja.

#### **3.4.1. Plan umjeravanja referentnog etalona sile**

Plan umjeravanja referentnog etalona sile obuhvaća pet osnovnih koraka koje je potrebno poduzeti kako bi se dobili podaci potrebni za pravilno određivanje mjerne nesigurnosti:

1. odabir posredničkih etalona potrebnih za umjeravanje,
2. umjeravanje posredničkih etalona u etalonu više razine od umjeravanog referentnog etalona, tj. u nacionalnom etalonu (FSM – u),
3. umjeravanje referentnog etalona (FCM – a) pomoću posredničkih etalona,
4. usporedba dobivenih rezultata mjerenja,
5. ponovno umjeravanje posredničkih etalona u nacionalnom. [10]

Za umjeravanje referentnog etalona sile uvijek je potrebno odabrati više posredničkih etalona, s obzirom da oni moraju pokriti cijeli raspon sila koje podržava referentni etalon. Pri tome je uobičajeni raspon radnih sila posredničkog etalona od 40 % do 100 % njegove nazivne sile. Time se smanjuje utjecaj interakcije, a pri tim rasponima posrednički etaloni pokazuju najmanje pogreške. S obzirom na to, najčešće je potrebno tri do pet posredničkih etalona da pokriju cijeli raspon sila referentnog etalona te oni uglavnom pripadaju najvišoj

klasi takvih uređaja. Kod umjeravanja i na vlak i na tlak, ponekad je potrebno imati različite posredničke etalone za svaki smjer djelovanja opterećenja.

Nakon odabira pogodnih posredničkih etalona, provodi se njihovo umjeravanje u nacionalnom etalonu sile čime se dobivaju referentne vrijednosti za umjeravanje. U samom postupku mjerenja, na posrednički etalon djeluje se u nekoliko mjernih nizova poznatom ulaznom silom (u N, tj. kN) te se bilježe očitavanja posredničkog etalona (npr. kao promjena napona na pojačalu u mV/V). Postupak se provodi u skladu s normom EN ISO 376 za umjeravanje prijenosnih etalona sile. Ona propisuje umjeravanje u barem tri različita rotacijska položaja etalona i ponavljanje mjernog niza u barem jednom od njih. Time se dobivaju podaci prema kojima se može vidjeti značaj histereze prilikom umjeravanja i utjecaj rotacije etalona. Nakon toga, uz ista pravila i na jednak način, posrednički se etaloni umjeravaju i u referentnom etalonu.

Dobiveni rezultati mjerenja za nacionalni i referentni etalon sile međusobno se uspoređuju. Za svaki korak sile uzimaju se srednje vrijednosti dobivenih očitavanja te se određuju relativne devijacije između referentnih vrijednosti umjeravanja dobivenih na nacionalnom etalonu i vrijednosti umjeravanja referentnog etalona. Također, uspoređuju se i utjecaji rotacije i histereze prilikom umjeravanja. Iz dobivenih veličina dalje se računa relativna mjerna nesigurnost umjeravanog referentnog etalona te je moguće izračunati i sposobnost mjerenja i umjeravanja akreditacijskog laboratorija.

### **3.4.2. Procjena mjernih nesigurnosti i najbolje mjerne sposobnosti referentnog etalona sile**

Prema preporukama dokumenata EAL – G22 [10] i EAL – R2 [6], procjena relativne i proširene relativne mjerne nesigurnosti i najbolje mjerne sposobnosti provodi se u nekoliko osnovnih koraka:

- procjena proširene relativne nesigurnosti referentnih vrijednosti,
- procjena proširene relativne nesigurnosti realizacije sile na referentnom etalonu,
- procjena najbolje mjerne sposobnosti referentnog etalona.



**Procjena proširene relativne nesigurnosti referentnih vrijednosti [10]****1. Određivanje proširene relativne nesigurnosti realizacije sile na nacionalnom etalonu (FSM-u) –  $W(\text{FSM})$** 

Proširena relativna nesigurnost nacionalnog etalona ovisi najviše o tipu samog uređaja. Za uređaje s utezima ona je uobičajeno najmanja, dok je za hidraulične i polužne uređaje nešto veća. Najčešće vrijednosti dane su u tablici 3.

Tablica 3: Proširene relativne nesigurnosti nacionalnih etalona

| Tip FSM uređaja | s utezima          | hidraulični i polužni                    |
|-----------------|--------------------|--|
| $W(\text{FSM})$ | $2 \times 10^{-5}$ | $1 \times 10^{-4}$ do $2 \times 10^{-4}$ |

**2. Određivanje proširene relativne nesigurnosti umjeravanja posredničkih etalona u nacionalnom –  $W_{\text{TS}}$** 

Pri umjeravanju posredničkih etalona u nacionalnom određuje se njihov koeficijent umjeravanja  $K_{\text{TS}}$  koji je jednak omjeru primjenjene sile  $F_{\text{FSM}}$  i očitavanja na pojačalu posredničkog etalona  $X$ :

$$K_{\text{TS}} = \frac{F_{\text{FSM}}}{X}. \quad (3.1)$$

Kako bi se uklonio utjecaj rotacije na rezultate umjeravanja, vrijednost  $X$  ustvari je srednja vrijednost od  $n$  izmjerenih vrijednosti za istu silu u različitim rotacijskim položajima:

$$X_{\text{sr}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i. \quad (3.2)$$

Relativna varijanca srednje vrijednosti očitavanja za pojedini korak sile iznosi:

$$w^2(F_{\text{FSM}}) = \frac{1}{n} \frac{a_{\text{rep}}^2}{3X_{\text{sr}}^2}. \quad (3.3)$$

Pri tome se pretpostavljaju jednake varijance očitavanja u različitim rotacijskim položajima. Varijanca je procijenjena iz poluširine  $a_{\text{rep}}$  najveće moguće varijacije ponovljivosti, uz pravokutnu raspodjelu vjerojatnosti.

Također, potrebno je uzeti u obzir i utjecaj drifta i to prema izrazu:

$$w^2(\Delta_{\text{drift-TS}}) = \frac{a^2_{\text{drift}}}{6}. \quad (3.4)$$

Vrijednost se ovdje procjenjuje iz trokutaste raspodjele vjerojatnosti poluširine  $a_{\text{drift}}$  relativne varijacije osjetljivosti, uz pretpostavku da su usporedna umjeravanja posredničkog etalona provedena u relativno kratkom vremenskom periodu, od oko mjesec dana. U slučaju da drift ne ovisi o vremenu, umjesto trokutaste, uzima se pravokutna razdioba.

Iz varijanci dobivenih izrazima (3.3) i (3.4), računa se kombinirana relativna nesigurnost vrijednosti sila očitanih na posredničkom etalonu:

$$w(K_{\text{TS}}) = \sqrt{w^2(F_{\text{FSM}}) + w^2(\Delta_{\text{drift-TS}})}. \quad (3.5)$$

Uz faktor pokrivanja  $k$  proširena relativna nesigurnost posredničkog etalona  $W_{\text{TS}}$  iznositi će:

$$W_{\text{TS}} = k \times w(K_{\text{TS}}). \quad (3.6)$$

### 3. Određivanje proširene relativne nesigurnosti referentnih vrijednosti – $W_{\text{RV}}$

Iz relativne nesigurnosti nacionalnog etalona i kombinirane relativne nesigurnosti posredničkih etalona umjerenih u nacionalnom etalonu, računa se proširena relativna nesigurnost referentnih vrijednosti prema izrazu:

$$W_{\text{RV}} = k \times \sqrt{w^2(\Delta_{\text{realization-NS}}) + w^2(K_{\text{TS}})} \quad (3.7)$$

Time je zaokruženo umjeravanje posredničkih etalona sile u nacionalnom etalonu.

### **Procjena proširene relativne nesigurnosti realizacije sile na referentnom etalonu [10]**

Nesigurnosti realizacije sile na referentnom etalonu ovisit će o:

- relativnoj devijaciji između referentnih vrijednosti sile (realiziranih na FSM-u) i vrijednosti realiziranih na referentnom etalonu (FCM-u),
- ponovljivosti realizacije sile na referentnom etalonu uz rotaciju,
- relativnoj devijaciji histereze nacionalnog i referentnog etalona.

Relativna varijanca devijacije srednjih vrijednosti sila  $w(\Delta_{\text{rel-dev}})$  računa se (uz trokutastu raspodjelu) prema izrazu:

$$w^2(\Delta_{\text{rel-dev}}) = \frac{a_{\text{rel-dev}}^2}{6}. \quad (3.8)$$

Relativna varijanca ponovljivosti uz rotaciju  $w(F_{\text{FCM}})$  (uz pravokutnu razdiobu) računa se prema izrazu:

$$w^2(F_{\text{FCM}}) = \frac{a_{\text{rep}}^2}{3}. \quad (3.9)$$

Relativna varijanca histereze  $w(\Delta_{\text{hys}})$  (uz pravokutnu razdiobu) računa se prema izrazu:

$$w^2(\Delta_{\text{hys}}) = \frac{a_{\text{hys}}^2}{3}. \quad (3.10)$$

Iz toga slijedi kombinirana standardna relativna nesigurnost realizacije sile na referentnom etalonu  $w_{\text{realization-FCM}}$ :

$$w_{\text{realization-FCM}} = \sqrt{w^2(\Delta_{\text{rel-dev}}) + w^2(F_{\text{FCM}}) + w^2(\Delta_{\text{hys}})}. \quad (3.11)$$

Uz faktor pokrivanja  $k$ , proširena relativna nesigurnost realizacije sile referentnog etalona

$W_{\text{realization-FCM}}$  je:

$$W_{\text{realization-FCM}} = k \times w_{\text{realization-FCM}}. \quad (3.12)$$

### **Procjena najbolje mjerne sposobnosti referentnog etalona [10]**

Najbolja mjerna sposobnost referentnog etalona ovisi o relativnoj nesigurnosti referentnih vrijednosti i o relativnoj nesigurnosti realizacije sile na referentnom etalonu. Kod uređaja komparatornog tipa potrebno je osim toga uzeti u obzir i utjecaj nesigurnosti samog referentnog etalona  $w_{\text{RT}}$  i procijenjenu dugoročnu nestabilnost referentnog etalona  $w(\Delta_{\text{drift-RT}})$ . Iz toga, najbolja mjerna sposobnost referentnog etalona komparatornog tipa  $W_{\text{BMC}}$  računa se prema izrazu:

$$W_{\text{BMC}} = k \times \sqrt{w_{\text{RV}}^2 + w_{\text{realization-FCM}}^2 + w_{\text{RT}}^2 + w^2(\Delta_{\text{drift-RT}})}. \quad (3.13)$$

## **4. EKSPERIMENTALNI DIO**

### **4.1. Plan umjeravanja referentnog etalona sile LIMS – a**

U eksperimentalnom dijelu rada provedeno je umjeravanje referentnog etalona sile LIMS – a koji je uređaj komparatornog tipa proizvođača GTM. Pri tome korišteni su posrednički etaloni s dinamometrom tipa Z4 nazivnih sila 20 kN, 100 kN, 200 kN i 500 kN opterećeni na tlak. Prvo je provedeno umjeravanje posredničkih etalona u nacionalnom etalonu PTB – a, a potom i u referentnom etalonu LIMS – a gdje je korišteno integrirano pojačalo GTM - ovog uređaja LWL - DMS.

Sama umjeravanja provedena su u skladu s normom EN ISO 376. Svaki posrednički etalon prvo je bio tri puta predopterećen na iznos svoje nazivne sile, i to u početnoj poziciji na  $0^\circ$ , zatim zakrenut za  $120^\circ$  i  $240^\circ$ . Nakon toga izmjereno je 6 mjernih nizova:  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$  i  $X_5$  za rastuće vrijednosti sila te  $X_4'$  i  $X_6'$  za opadajuće. Nakon svaka dva niza dinamometar je zarotiran za  $120^\circ$ , kako bi se dobila očitavanja u tri različita rotacijska položaja. Između predopterećenja i mjernih nizova bilježene su i nul – vrijednosti očitavanja na pojačalu. Mjerni nizovi etalona Z4 100 kN, Z4 200 kN i Z4 500 kN sadrže po deset mjernih točaka od 10 % do 100 % nazivne sile, dok mjerni nizovi etalona Z4 20 kN sadrže po šest mjernih točaka od 50 % do 100 % nazivne sile. Korak promjene sile u nizu je konstantan i iznosi 10 % nazivne sile posredničkog etalona. Očitavanja su izražena kao promjena napona na pojačalu u mV/V.

Nakon provedenih postupaka umjeravanja posredničkih etalona u PTB – u i u LIMS – u, dobiveni podaci dalje su obrađeni kako bi se dobili različiti utjecaji na mjernu nesigurnost, te kao konačan cilj, proširena mjerna nesigurnost referentnog etalona LIMS – a. Procjena nesigurnosti napravljena je u skladu s preporukama EAL – R2 [6] i EAL – G22 [10], uz primjenu odgovarajućeg matematičkog modela za referentni uređaj komparatornog tipa prema literaturi [11]. Postupak procjene nesigurnosti detaljnije je opisan u poglavlju 4.2. Izračunate devijacije i mjerne nesigurnosti prikazane su i grafički za PTB (kao FSM) i LIMS (kao FCM), kako bi se lakše mogli analizirati rezultati umjeravanja.

## 4.2. Matematički model umjeravanja referentnog etalona sile

### LIMS –a

Matematički model umjeravanja baza je za račun svih nesigurnosti mjerenja koja utječu na ukupnu mjernu nesigurnost referentnog etalona, kao i na njegovu mjernu sposobnost. Modeli se razlikuju s obzirom na tip uređaja kojeg se umjerava, a njima se izražava sila generirana na uređaju. Za komparatorni tip referentnog etalona matematički model je oblika [11]:

$$F_{FCM} = F_{RT} \times (1 - \Delta_{\text{drift-RT}}) \times (1 - c_{\text{temp}}) \times (1 - \Delta_{\text{traceability}}). \quad (4.1)$$

Pri tome je  $\Delta_{\text{traceability}}$ :

$$\Delta_{\text{traceability}} = \frac{F_{FCM} \times (1 - \Delta_{\text{rel-dev}}) \times (1 - \Delta_{\text{hys-FCM}}) - F_{FSM} \times (1 - \Delta_{\text{drift-TS}}) \times (1 - \Delta_{\text{realization}})}{F_{FSM} \times (1 - \Delta_{\text{drift-TS}}) \times (1 - \Delta_{\text{realization}})} \quad (4.2)$$

$$\approx \frac{F_{FCM} \times (1 - \Delta_{\text{rel-dev}}) \times (1 - \Delta_{\text{hys-FCM}})}{F_{FSM}} - 1 + \Delta_{\text{drift-TS}} + \Delta_{\text{realization}}$$

Iz prethodnih izraza vidljive su sve veličine koje utječu na generiranu silu referentnog etalona:

- $F_{RT}$  – rezultat umjeravanja referentnog etalona,
- $\Delta_{\text{drift-RT}}$  – relativni dugoročni drift umjeravanja referentnog etalona sile,
- $c_{\text{temp}}$  – relativna promjena rezultata umjeravanja s obzirom na promjenu temperature,
- $\Delta_{\text{traceability}}$  – odstupanje pri ostvarivanju sljedivosti do nacionalnog etalona,
- $F_{FCM}$  – srednja vrijednost očitavanja sile umjeravanja u referentnom etalonu (FCM-u),
- $F_{FSM}$  – srednja vrijednost očitavanja sile umjeravanja u nacionalnom etalonu (FSM-u),
- $\Delta_{\text{drift-TS}}$  – relativni dugoročni drift posredničkog etalona,
- $\Delta_{\text{realization}}$  – relativna standardna nesigurnost realizacije sile u nacionalnom etalonu (PTB – u),
- $\Delta_{\text{hys-FCM}}$  – relativna histereza referentnog etalona s obzirom na histerezu posredničkih etalona umjerenih u nacionalnom,
- $\Delta_{\text{rel-dev}}$  – relativna razlika srednjih vrijednosti očitavanja sile između referentnog i nacionalnog etalona.

Prema navedenim utjecajima, dobivaju se pojedinačne relativne nesigurnosti na sljedeći način [11]:

- Relativna nesigurnost ponovljivosti s rotacijom za referentni etalon –  $w(F_{FCM})$

$$w^2(F_{FCM}) = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_{sr})^2}{n(n-1) \times X_{sr}} \right]_{FCM} = \left[ \frac{(X_1 - X_{sr})^2 + (X_3 - X_{sr})^2 + (X_5 - X_{sr})^2}{6 \times X_{sr}^2} \right]_{FCM} \quad (4.3)$$

gdje je:  $X_1, X_3, X_5$  – očitavanja za nizove  $X_1, X_3$  i  $X_5$  za određenu silu pri umjeravanju posredničkih etalona u referentnom etalonu LIMS – a;

$$X_{sr} - \text{srednja vrijednost od } X_1, X_3 \text{ i } X_5: \quad X_{sr} = \frac{X_1 + X_3 + X_5}{3} \quad (4.4)$$

- Relativna nesigurnost ponovljivosti s rotacijom za primarni etalon –  $w(F_{FSM})$

$$w^2(F_{FSM}) = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_{sr})^2}{n(n-1) \times X_{sr}} \right]_{FSM} = \left[ \frac{(X_1 - X_{sr})^2 + (X_3 - X_{sr})^2 + (X_5 - X_{sr})^2}{6 \times X_{sr}^2} \right]_{FSM} \quad (4.5)$$

gdje je:  $X_1, X_3, X_5$  – očitavanja za nizove  $X_1, X_3$  i  $X_5$  za određenu silu pri umjeravanju posredničkih etalona u nacionalnom etalonu PTB – a;

$$X_{sr} - \text{srednja vrijednost od } X_1, X_3 \text{ i } X_5: \quad X_{sr} = \frac{X_1 + X_3 + X_5}{3} \quad (4.6)$$

- Relativna devijacija rezultata umjeravanja u PTB – u i u LIMS – u –  $w(\Delta_{rel-dev})$

$$w^2(\Delta_{rel-dev}) = \frac{a_{rel-dev}^2}{6} = \frac{(X_{sr-FCM} - X_{sr-FSM})^2}{24 \times X_{sr-FSM}^2} \quad (4.7)$$

Pri tome  $X_{sr-FCM}$  i  $X_{sr-FSM}$  odgovaraju izrazima (4.4) i (4.6).

- Relativna devijacija histereze referentnog etalona LIMS – a u odnosu na PTB –

$w(\Delta_{hys-FCM})$

o za nizove  $X_3$  i  $X_4'$ :

$$w_{34}^2(\Delta_{hys-FCM}) = \frac{a_{hys-FCM-34}^2}{3} = \frac{((X_4' - X_3)_{FCM} - (X_4' - X_3)_{FSM})^2}{12 \times (X_3^2)_{FSM}} \quad (4.8)$$

o za nizove X5 i X6':

$$w_{56}^2(\Delta_{\text{hys-FCM}}) = \frac{a_{\text{hys-FCM-56}}^2}{3} = \frac{((X'_6 - X_5)_{\text{FCM}} - (X'_6 - X_5)_{\text{FSM}})^2}{12 \times (X_5^2)_{\text{FSM}}} \quad (4.9)$$

Za svaku se silu za daljnji račun kao  $w(\Delta_{\text{hys-FCM}})$ , uzima veća vrijednost između  $w_{34}(\Delta_{\text{hys-FCM}})$  i  $w_{56}(\Delta_{\text{hys-FCM}})$ .

- Relativna nesigurnost dugoročnog drifta posredničkih etalona:  $w(\Delta_{\text{drift-TS}}) = \text{konst.}$
- Relativna nesigurnost realizacije sile u PTB-u:  $w(\Delta_{\text{realization}}) = \text{konst.}$
- Relativna nesigurnost zbog promjene temperature pri umjeravanju:  $w(c_{\text{temp}}) = \text{konst.}$
- Relativna nesigurnost dugoročnog drifta referentnog etalona sile:  $w(\Delta_{\text{drift-RT}}) = \text{konst.}$

Pod pretpostavkom da navedeni utjecaji nisu u međusobnoj korelaciji, kombinirana relativna nesigurnost  $w(\mathbf{FCM})$  referentnog etalona komparatornog tipa računa se prema izrazu [11]:

$$w(\mathbf{FCM}) = \sqrt{w^2(\Delta_{\text{drift-RT}}) + w^2(c_{\text{temp}}) + w^2(\Delta_{\text{traceability}})}. \quad (4.10)$$

Uz faktor pokrivanja  $k = 2$ , odgovarajuća proširena mjerna nesigurnost  $W(\mathbf{FCM})$  računa se prema izrazu:

$$W(\mathbf{FCM}) = k \times w(\mathbf{FCM}) = 2 \times w(\mathbf{FCM}). \quad (4.11)$$

Pri tome, relativna nesigurnost odstupanja pri ostvarivanju sljedivosti do nacionalnog etalona  $w(\Delta_{\text{traceability}})$  određena je izrazom [11]:

$$w(\Delta_{\text{traceability}}) = \sqrt{w^2(F_{\text{FCM}}) + w^2(F_{\text{FSM}}) + w^2(\Delta_{\text{rel-dev}}) + w^2(\Delta_{\text{hys-FCM}}) + w^2(\Delta_{\text{drift-TS}}) + w^2(\Delta_{\text{realization}})} \quad (4.12)$$

### 4.3. Osnovni podaci o referentnom etalonu sile LIMS – a

Referentni etalon sile Laboratorija za ispitivanje mehaničkih svojstava Fakulteta strojarstva i brodogradnje uređaj je njemačkog proizvođača GTM, nazivne sile 500 kN. Prilikom instalacije uređaja osigurani su i potrebni okolišni uvjeti: odgovarajući smještaj uređaja, mogućnost stalne kontrole i regulacije temperature, praćenje promjene vlage i tlaka zraka te antivibracijski temelji. Referentni etalon LIMS – a prikazan je slikom 12, a njegove osnovne karakteristike dane su tablicom 4.



Slika 12: Referentni etalon sile u LIMS – u [5]

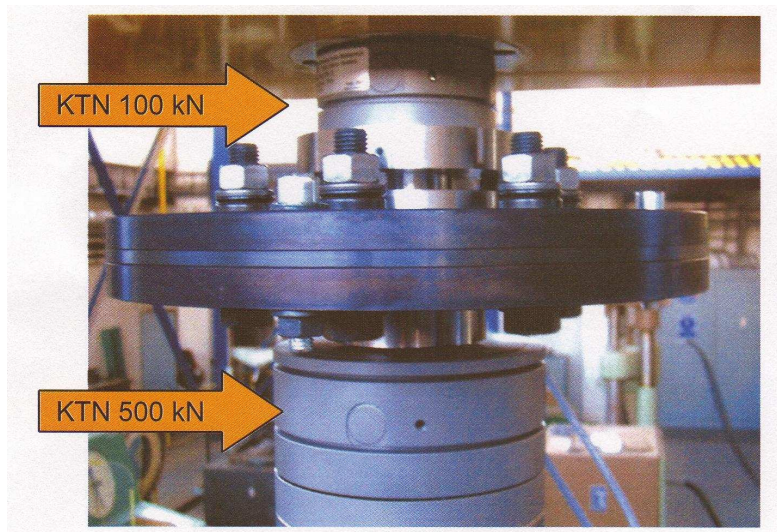
Tablica 4: Osnovne karakteristike referentnog etalona sile LIMS – a [5]

| <b>Karakteristike referentnog etalona sile</b> |  |
|--|--|
| Proizvođač                                     | GTM, Njemačka                                  |
| Mjerno područje                                | 10 – 500 kN                                    |
| Nazivna sila                                   | 500 kN   |
| Način opterećenja                              | hidraulički                                    |
| Smjer opterećenja                              | Vlak, tlak                                     |
| Ponovljivost                                   | $1 \times 10^{-04}$                            |
| Očekivana mjerna nesigurnost                   | < 0,05 %                                       |
| Mjerni sustav                                  | mjerno pojačalo, dvostruko složeni dinamometri |

Mjerni sustav referentnog etalona komparatornog je tipa, što znači da uređaj ima deformacijsko tijelo čija se deformacija uslijed djelovanja sile pretvara u izlazni električni signal. Osnovne komponente uređaja su dinamometri i mjerno pojačalo. Dinamometri su



visokoprecizni i dvostruko složeni tipa KTN 100 kN i KTN 500 kN (slika 13). Time je omogućena mjerna sposobnost etalona sile manja od 0,05 %, kao i široko mjerno područje.



*Slika 13: Dvostruko složeni dinamometri referentnog etalona sile LIMS – a [5]*

Referentni etalon sile prikazan je i slikom 14, prilikom umjeravanja posredničkog etalona Z4 500 kN za potrebe ovog rada.



*Slika 14: Umjeravanje referentnog etalona LIMS – a s posredničkim etalomom Z4 500 kN*

#### 4.4. Osnovni podaci o posredničkim etalonima

Za umjeravanje referentnog etalona LIMS – a korištena su četiri posrednička etalona nazivnih sila 20 kN, 100 kN, 200 kN i 500 kN, opterećena na tlak. S obzirom da je mjerno područje referentnog etalona 10 – 500 kN, posrednički etaloni korišteni su uglavnom u mjernim područjima od 40 – 100 % nazivne sile, gdje je nesigurnost mjerenja najmanja. Posrednički etaloni proizvođača su HBM GmbH s dinamometrom tipa Z4. Posredničkim etalom smatra se uvijek sklop dinamometra i mjernog pojačala, no u ovome umjeravanju nije korišteno vanjsko pojačalo, već pojačalo LWL – DMS integrirano u uređaju referentnog etalona. Osnovne karakteristike posredničkih etalona dane su u tablici 5, a etalon Z4 500 kN prikazan je slikom 15.

Tablica 5: Osnovne karakteristike posredničkih etalona korištenih pri umjeravanju referentnog etalona LIMS – a [9]

| Tip  | Z4    |     |     |     |
|--|-------|-----|-----|-----|
|  | 20    | 100 | 200 | 500 |
| Nazivna sila, kN   |       |     |     |     |
| Smjer opterećenja  | TLAK  |     |     |     |
| Relativno odstupanje nul-vrijednosti, %                      | 0,004 |     |     |     |
| Relativna greška ponovljivosti s rotacijom, %                | 0,008 |     |     |     |
| Relativna greška obnovljivosti bez rotacije, %               | 0,003 |     |     |     |
| Relativno interpolacijsko odstupanje (polinom 3. stupnja), % | 0,002 |     |     |     |
| Nominalna osjetljivost, mV/V                                 | 2     |     |     |     |
| Referentna temperatura, °C                                   | +22   |     |     |     |
| Klasa  | 00    | 00  | 00  | 00  |



Slika 15: Posrednički etalon Z4 500 kN pri umjeravanju referentnog etalona LIMS - a

## 4.5. Rezultati umjeravanja

### 4.5.1. Rezultati mjerenja

Kao početni korak eksperimentalnog dijela rada provedeno je umjeravanje posredničkih etalona Z4 20 kN, Z4 100 kN, Z4 200 kN i Z4 500 kN u nacionalnom etalonu PTB – a, a potom je pomoću njih umjeren referentni etalon LIMS - a. Rezultati mjerenja potrebni za daljnji račun, procjene nesigurnosti i analizu umjeravanja prikazani su tablicom 6 i tablicom 7.

Tablica 6: Rezultati umjeravanja posredničkih etalona u nacionalnom etalonu PTB – a

|           | $F$ , kN | $X_1$ , mV/V | $X_3$ , mV/V | $X_4'$ , mV/V | $X_5$ , mV/V | $X_6'$ , mV/V |
|-----------|----------|--------------|--------------|---------------|--------------|---------------|
| Z4 20 kN  | 10       | 0,99958      | 0,99960      | 0,99992       | 0,99958      | 0,99990       |
|           | 12       | 1,19947      | 1,19949      | 1,19978       | 1,19946      | 1,19976       |
|           | 14       | 1,39933      | 1,39935      | 1,39961       | 1,39932      | 1,39957       |
|           | 16       | 1,59917      | 1,59921      | 1,59939       | 1,59915      | 1,59934       |
|           | 18       | 1,79899      | 1,79901      | 1,79912       | 1,79895      | 1,79906       |
|           | 20       | 1,99875      | 1,99878      | 1,99878       | 1,99871      | 1,99871       |
| Z4 100 kN | 20       | 0,39981      | 0,39980      | 0,39985       | 0,39979      | 0,39984       |
|           | 30       | 0,59972      | 0,59970      | 0,59976       | 0,59969      | 0,59975       |
|           | 40       | 0,79963      | 0,79961      | 0,79966       | 0,79960      | 0,79966       |
|           | 50       | 0,99955      | 0,99952      | 0,99957       | 0,99951      | 0,99956       |
|           | 60       | 1,19945      | 1,19941      | 1,19946       | 1,19941      | 1,19945       |
|           | 70       | 1,39937      | 1,39934      | 1,39937       | 1,39933      | 1,39937       |
|           | 80       | 1,59930      | 1,59926      | 1,59929       | 1,59926      | 1,59928       |
|           | 90       | 1,79924      | 1,79919      | 1,79920       | 1,79919      | 1,79919       |
|           | 100      | 1,99917      | 1,99911      | 1,99911       | 1,99911      | 1,99911       |
| Z4 200 kN | 100      | 1,02113      | 1,02124      | 1,02149       | 1,02127      | 1,02151       |
|           | 120      | 1,22526      | 1,22534      | 1,22559       | 1,22540      | 1,22560       |
|           | 140      | 1,42951      | 1,42960      | 1,42960       | 1,42963      | 1,42967       |
|           | 160      | 1,63374      | 1,63381      | 1,63377       | 1,63383      | 1,63373       |
|           | 180      | 1,83802      | 1,83810      | 1,83804       | 1,83809      | 1,83803       |
|           | 200      | 2,04222      | 2,04233      | 2,04233       | 2,04229      | 2,04229       |
| Z4 500 kN | 200      | 0,80056      | 0,80058      | 0,80019       | 0,80063      | 0,80024       |
|           | 250      | 1,00075      | 1,00079      | 1,00040       | 1,00085      | 1,00046       |
|           | 300      | 1,20081      | 1,20087      | 1,20044       | 1,20093      | 1,20053       |
|           | 350      | 1,40093      | 1,40100      | 1,40056       | 1,40105      | 1,40064       |
|           | 400      | 1,60100      | 1,60105      | 1,60067       | 1,60112      | 1,60074       |
|           | 450      | 1,80107      | 1,80113      | 1,80086       | 1,80122      | 1,80095       |
|           | 500      | 2,00105      | 2,00108      | 2,00108       | 2,00112      | 2,00112       |

Tablica 7: Rezultati umjeravanja referentnog etalona LIMS – a pomoću posredničkih etalona

|           | $F$ , kN | $X_1$ , mV/V | $X_3$ , mV/V | $X_4'$ , mV/V | $X_5$ , mV/V | $X_6'$ , mV/V |
|-----------|----------|--------------|--------------|---------------|--------------|---------------|
| Z4 20 kN  | 10       | 0,99938      | 0,99934      | 0,99985       | 0,99943      | 0,99988       |
|           | 12       | 1,19929      | 1,19926      | 1,19964       | 1,19934      | 1,19970       |
|           | 14       | 1,39889      | 1,39889      | 1,39933       | 1,39893      | 1,39938       |
|           | 16       | 1,59873      | 1,59874      | 1,59915       | 1,59879      | 1,59917       |
|           | 18       | 1,79827      | 1,79827      | 1,79868       | 1,79834      | 1,79869       |
|           | 20       | 1,99800      | 1,99801      | 1,99801       | 1,99807      | 1,99807       |
| Z4 100 kN | 20       | 0,39961      | 0,39964      | 0,39971       | 0,39961      | 0,39970       |
|           | 30       | 0,59946      | 0,59948      | 0,59956       | 0,59947      | 0,59954       |
|           | 40       | 0,79920      | 0,79924      | 0,79932       | 0,79922      | 0,79930       |
|           | 50       | 0,99901      | 0,99905      | 0,99913       | 0,99904      | 0,99910       |
|           | 60       | 1,19883      | 1,19888      | 1,19896       | 1,19887      | 1,19894       |
|           | 70       | 1,39866      | 1,39871      | 1,39878       | 1,39870      | 1,39875       |
|           | 80       | 1,59853      | 1,59860      | 1,59864       | 1,59858      | 1,59861       |
|           | 90       | 1,79837      | 1,79844      | 1,79845       | 1,79840      | 1,79842       |
|           | 100      | 1,99823      | 1,99833      | 1,99833       | 1,99828      | 1,99828       |
| Z4 200 kN | 100      | 1,02088      | 1,02085      | 1,02115       | 1,02092      | 1,02127       |
|           | 120      | 1,22500      | 1,22503      | 1,22523       | 1,22506      | 1,22532       |
|           | 140      | 1,42924      | 1,42926      | 1,42940       | 1,42934      | 1,42952       |
|           | 160      | 1,63348      | 1,63351      | 1,63355       | 1,63359      | 1,63368       |
|           | 180      | 1,83766      | 1,83768      | 1,83769       | 1,83779      | 1,83783       |
|           | 200      | 2,04190      | 2,04192      | 2,04192       | 2,04204      | 2,04204       |
| Z4 500 kN | 200      | 0,80040      | 0,80035      | 0,80008       | 0,80033      | 0,80008       |
|           | 250      | 1,00057      | 1,00051      | 1,00018       | 1,00050      | 1,00018       |
|           | 300      | 1,20066      | 1,20060      | 1,20022       | 1,20059      | 1,20023       |
|           | 350      | 1,40072      | 1,40066      | 1,40028       | 1,40064      | 1,40028       |
|           | 400      | 1,60088      | 1,60082      | 1,60047       | 1,60082      | 1,60048       |
|           | 450      | 1,80089      | 1,80081      | 1,80057       | 1,80083      | 1,80058       |
|           | 500      | 2,00098      | 2,00091      | 2,00091       | 2,00093      | 2,00093       |

Iako su posrednički etaloni, osim etalona Z4 20 kN, umjereni za sile od 10 % do 100 % nazivne, za daljnji račun nisu korišteni svi rezultati mjerenja svakog etalona, već oni u gornjem dijelu mjernog raspona, i to tako da se dobro pokrije čitav mjerni raspon samog referentnog etalona, od 10 kN do 500 kN.

#### 4.5.2. Procjena nesigurnosti umjeravanja

Iz dobivenih rezultata umjeravanja posredničkih etalona u PTB – u i u LIMS – u prema odgovarajućem matematičkom modelu (poglavlje 4.2.) procijenjene su pojedinačne mjerne nesigurnosti za sve utjecajne faktore.

Prema izrazima (4.4) i (4.6) dobivene su aritmetičke sredine očitavanja nizova  $X_1$ ,  $X_3$  i  $X_5$  za umjeravanje posredničkih etalona u LIMS – u i u PTB – u. Pomoću tih vrijednosti i prema izrazima (4.3) i (4.5) izračunate su relativne nesigurnosti ponovljivosti mjerenja uz rotaciju za LIMS ( $w(F_{FCM})$ ) i za PTB ( $w(F_{FSM})$ ). Prema izrazu (4.7) izračunata je relativna devijacija rezultata umjeravanja u LIMS – u u odnosu na rezultate PTB – a ( $w(\Delta_{rel-dev})$ ). Dobivene vrijednosti prikazane su tablicama 8 i 9.

Tablica 8: Relativne nesigurnosti ponovljivosti mjerenja uz rotaciju za referentni etalon LIMS – a i nacionalni etalon PTB - a

| $F$ , kN | $X_{sr-FCM}$ , mV/V | $w^2(F_{FCM})$ | $w(F_{FCM})$       | $X_{sr-FSM}$ , mV/V | $w^2(F_{FSM})$ | $w(F_{FSM})$       |
|----------|---------------------|----------------|--------------------|---------------------|----------------|--------------------|
| 10       | 0,99938             | 6,81460E-10    | <b>2,61048E-05</b> | 0,99959             | 4,44812E-11    | <b>6,66942E-06</b> |
| 12       | 1,19930             | 3,60345E-10    | <b>1,89827E-05</b> | 1,19947             | 5,40598E-11    | <b>7,35254E-06</b> |
| 14       | 1,39890             | 1,07840E-10    | <b>1,03846E-05</b> | 1,39933             | 3,97204E-11    | <b>6,30241E-06</b> |
| 16       | 1,59876             | 1,65729E-10    | <b>1,28736E-05</b> | 1,59918             | 1,21653E-10    | <b>1,10296E-05</b> |
| 18       | 1,79830             | 1,90956E-10    | <b>1,38187E-05</b> | 1,79898             | 9,61305E-11    | <b>9,80462E-06</b> |
| 20       | 1,99803             | 9,25067E-11    | <b>9,61804E-06</b> | 1,99875             | 1,02907E-10    | <b>1,01443E-05</b> |
| 20       | 0,39962             | 7,60584E-10    | <b>2,75787E-05</b> | 0,39980             | 2,08542E-10    | <b>1,44410E-05</b> |
| 30       | 0,59947             | 9,55483E-11    | <b>9,77488E-06</b> | 0,59970             | 2,16263E-10    | <b>1,47059E-05</b> |
| 40       | 0,79922             | 3,00779E-10    | <b>1,73430E-05</b> | 0,79961             | 1,21645E-10    | <b>1,10293E-05</b> |
| 50       | 0,99903             | 1,60637E-10    | <b>1,26743E-05</b> | 0,99953             | 1,44581E-10    | <b>1,20242E-05</b> |
| 60       | 1,19886             | 1,74490E-10    | <b>1,32095E-05</b> | 1,19942             | 1,23576E-10    | <b>1,11165E-05</b> |
| 70       | 1,39869             | 1,17733E-10    | <b>1,08505E-05</b> | 1,39935             | 7,37650E-11    | <b>8,58865E-06</b> |
| 80       | 1,59857             | 1,93626E-10    | <b>1,39150E-05</b> | 1,59927             | 6,95076E-11    | <b>8,33712E-06</b> |
| 90       | 1,79840             | 1,45153E-10    | <b>1,20479E-05</b> | 1,79921             | 8,58095E-11    | <b>9,26334E-06</b> |
| 100      | 1,99828             | 2,01123E-10    | <b>1,41818E-05</b> | 1,99913             | 1,00087E-10    | <b>1,00044E-05</b> |
| 100      | 1,02088             | 4,03312E-10    | <b>2,00826E-05</b> | 1,02121             | 1,73665E-09    | <b>4,16731E-05</b> |
| 120      | 1,22503             | 2,10796E-10    | <b>1,45188E-05</b> | 1,22533             | 1,09524E-09    | <b>3,30945E-05</b> |
| 140      | 1,42928             | 4,46319E-10    | <b>2,11263E-05</b> | 1,42958             | 6,36102E-10    | <b>2,52211E-05</b> |
| 160      | 1,63352             | 4,25981E-10    | <b>2,06393E-05</b> | 1,63379             | 2,78893E-10    | <b>1,67001E-05</b> |
| 180      | 1,83771             | 5,10828E-10    | <b>2,26015E-05</b> | 1,83807             | 1,87460E-10    | <b>1,36916E-05</b> |
| 200      | 2,04195             | 4,68326E-10    | <b>2,16408E-05</b> | 2,04228             | 2,47748E-10    | <b>1,57400E-05</b> |
| 200      | 0,80036             | 5,64024E-10    | <b>2,37492E-05</b> | 0,80059             | 6,76086E-10    | <b>2,60016E-05</b> |
| 250      | 1,00053             | 4,05929E-10    | <b>2,01477E-05</b> | 1,00080             | 8,43101E-10    | <b>2,90362E-05</b> |
| 300      | 1,20061             | 3,59665E-10    | <b>1,89648E-05</b> | 1,20087             | 8,32126E-10    | <b>2,88466E-05</b> |
| 350      | 1,40067             | 2,50160E-10    | <b>1,58165E-05</b> | 1,40099             | 6,17038E-10    | <b>2,48402E-05</b> |
| 400      | 1,60084             | 1,84917E-10    | <b>1,35984E-05</b> | 1,60106             | 4,72466E-10    | <b>2,17363E-05</b> |
| 450      | 1,80085             | 1,87058E-10    | <b>1,36769E-05</b> | 1,80114             | 5,85678E-10    | <b>2,42008E-05</b> |
| 500      | 2,00094             | 8,81722E-11    | <b>9,39001E-06</b> | 2,00108             | 1,02667E-10    | <b>1,01324E-05</b> |



Tablica 9: Relativna devijacija rezultata umjeravanja u LIMS-u u odnosu na rezultate PTB-a

| $F$ , kN | $X_{sr-FCM}$ ,<br>mV/V | $X_{sr-FSM}$ ,<br>mV/V | $w^2(\Delta_{rel-dev})$ | $w(\Delta_{rel-dev})$ |
|----------|------------------------|------------------------|-------------------------|-----------------------|
| 10       | 0,99938                | 0,99959                | 1,70292E-09             | <b>4,12665E-05</b>    |
| 12       | 1,19930                | 1,19947                | 9,04633E-10             | <b>3,00771E-05</b>    |
| 14       | 1,39890                | 1,39933                | 3,90571E-09             | <b>6,24957E-05</b>    |
| 16       | 1,59876                | 1,59918                | 2,89358E-09             | <b>5,37920E-05</b>    |
| 18       | 1,79830                | 1,79898                | 6,09614E-09             | <b>7,80778E-05</b>    |
| 20       | 1,99803                | 1,99875                | 5,37351E-09             | <b>7,33042E-05</b>    |
| 20       | 0,39962                | 0,39980                | 8,23049E-09             | <b>9,07221E-05</b>    |
| 30       | 0,59947                | 0,59970                | 6,47218E-09             | <b>8,04499E-05</b>    |
| 40       | 0,79922                | 0,79961                | 1,00492E-08             | <b>1,00246E-04</b>    |
| 50       | 0,99903                | 0,99953                | 1,02477E-08             | <b>1,01231E-04</b>    |
| 60       | 1,19886                | 1,19942                | 9,11613E-09             | <b>9,54784E-05</b>    |
| 70       | 1,39869                | 1,39935                | 9,26026E-09             | <b>9,62303E-05</b>    |
| 80       | 1,59857                | 1,59927                | 8,08991E-09             | <b>8,99439E-05</b>    |
| 90       | 1,79840                | 1,79921                | 8,32085E-09             | <b>9,12187E-05</b>    |
| 100      | 1,99828                | 1,99913                | 7,52716E-09             | <b>8,67592E-05</b>    |
| 100      | 1,02088                | 1,02121                | 4,37826E-09             | <b>6,61684E-05</b>    |
| 120      | 1,22503                | 1,22533                | 2,58225E-09             | <b>5,08158E-05</b>    |
| 140      | 1,42928                | 1,42958                | 1,83549E-09             | <b>4,28426E-05</b>    |
| 160      | 1,63352                | 1,63379                | 1,12975E-09             | <b>3,36118E-05</b>    |
| 180      | 1,83771                | 1,83807                | 1,58086E-09             | <b>3,97601E-05</b>    |
| 200      | 2,04195                | 2,04228                | 1,06619E-09             | <b>3,26526E-05</b>    |
| 200      | 0,80036                | 0,80059                | 3,40700E-09             | <b>5,83695E-05</b>    |
| 250      | 1,00053                | 1,00080                | 3,00417E-09             | <b>5,48103E-05</b>    |
| 300      | 1,20061                | 1,20087                | 1,90236E-09             | <b>4,36161E-05</b>    |
| 350      | 1,40067                | 1,40099                | 2,20098E-09             | <b>4,69146E-05</b>    |
| 400      | 1,60084                | 1,60106                | 7,75281E-10             | <b>2,78439E-05</b>    |
| 450      | 1,80085                | 1,80114                | 1,11668E-09             | <b>3,34168E-05</b>    |
| 500      | 2,00094                | 2,00108                | 2,16951E-10             | <b>1,47293E-05</b>    |

Prema izrazima (4.8) i (4.9) izračunata je relativna devijacija histereze umjeravanja u LIMS – u u odnosu na umjeravanje u PTB – u za mjerne nizove  $X_3$  i  $X_4'$  te nizove  $X_5$  i  $X_6'$ . Za svaku silu uspoređene su obje vrijednosti devijacije histereze ( $w_{34}(\Delta_{hys-FCM})$  i  $w_{56}(\Delta_{hys-FCM})$ ) te je veća vrijednost izdvojena kao konačna veličina devijacije histereze ( $w(\Delta_{hys-FCM})$ ) koja će se primjeniti u daljnjim procjenama nesigurnosti. Rezultati su prikazani tablicom 10.

Tablica 10: Relativna devijacija histereze rezultata umjeravanja

| $F$ , kN | $w_{34}^2(\Delta_{\text{hys-FCM}})$ | $w_{56}^2(\Delta_{\text{hys-FCM}})$ | $w^2(\Delta_{\text{hys-FCM}})_{\text{max}}$ | $w(\Delta_{\text{hys-FCM}})$ |
|----------|-------------------------------------|-------------------------------------|---|------------------------------|
| 10       | 2,98141E-09                         | 1,28366E-09                         | 2,98141E-09                                 | <b>5,46023E-05</b>           |
| 12       | 4,49039E-10                         | 2,52609E-10                         | 4,49039E-10                                 | <b>2,11905E-05</b>           |
| 14       | 1,45732E-09                         | 1,66910E-09                         | 1,66910E-09                                 | <b>4,08547E-05</b>           |
| 16       | 1,59157E-09                         | 1,17651E-09                         | 1,59157E-09                                 | <b>3,98945E-05</b>           |
| 18       | 2,22556E-09                         | 1,47081E-09                         | 2,22556E-09                                 | <b>4,71758E-05</b>           |
| 20       | 1,17502E-10                         | 8,77144E-10                         | 8,77144E-10                                 | <b>2,96166E-05</b>           |
| 30       | 1,81845E-10                         | 5,94237E-11                         | 1,81845E-10                                 | <b>1,34850E-05</b>           |
| 40       | 8,81004E-11                         | 3,34284E-11                         | 8,81004E-11                                 | <b>9,38618E-06</b>           |
| 50       | 1,14283E-10                         | 1,63829E-11                         | 1,14283E-10                                 | <b>1,06903E-05</b>           |
| 60       | 5,21711E-11                         | 3,33998E-11                         | 5,21711E-11                                 | <b>7,22296E-06</b>           |
| 70       | 9,01049E-11                         | 9,59065E-12                         | 9,01049E-11                                 | <b>9,49236E-06</b>           |
| 80       | 4,70041E-12                         | 8,35261E-12                         | 8,35261E-12                                 | <b>2,89009E-06</b>           |
| 90       | 4,13003E-13                         | 7,44469E-12                         | 7,44469E-12                                 | <b>2,72850E-06</b>           |
| 100      | 2,39706E-10                         | 1,01648E-09                         | 1,01648E-09                                 | <b>3,18823E-05</b>           |
| 120      | 1,34163E-10                         | 2,33125E-10                         | 2,33125E-10                                 | <b>1,52684E-05</b>           |
| 140      | 7,30558E-10                         | 7,86121E-10                         | 7,86121E-10                                 | <b>2,80379E-05</b>           |
| 160      | 2,30334E-10                         | 1,12548E-09                         | 1,12548E-09                                 | <b>3,35482E-05</b>           |
| 180      | 1,34837E-10                         | 2,13042E-10                         | 2,13042E-10                                 | <b>1,45959E-05</b>           |
| 200      | 1,81643E-09                         | 2,39735E-09                         | 2,39735E-09                                 | <b>4,89628E-05</b>           |
| 250      | 2,40784E-10                         | 4,26441E-10                         | 4,26441E-10                                 | <b>2,06504E-05</b>           |
| 300      | 1,65993E-10                         | 9,15070E-11                         | 1,65993E-10                                 | <b>1,28838E-05</b>           |
| 350      | 1,50792E-10                         | 9,69843E-11                         | 1,50792E-10                                 | <b>1,22797E-05</b>           |
| 400      | 3,58254E-11                         | 6,93727E-11                         | 6,93727E-11                                 | <b>8,32903E-06</b>           |
| 450      | 1,70955E-11                         | 1,38221E-11                         | 1,70955E-11                                 | <b>4,13468E-06</b>           |

Iznosi ostalih pojedinačnih nesigurnosti konstantni su za sve iznose sile, te uz faktor pokrivanja  $k = 1$ , iznose:

- Relativna nesigurnost dugoročnog drifta posredničkih etalona:

$$w(\Delta_{\text{drift-TS}}) = 2,00\text{E-05}$$

- Relativna nesigurnost realizacije sile u PTB-u:

$$w(\Delta_{\text{realization}}) = 1,00\text{E-05}$$

- Relativna nesigurnost zbog promjene temperature pri umjeravanju:

$$w(c_{\text{temp}}) = 5,00\text{E-05}$$

- Relativna nesigurnost dugoročnog drifta referentnog etalona sile:

$$w(\Delta_{\text{drift-RT}}) = 2,00\text{E-05}$$

Iz dobivenih relativnih nesigurnosti prema izrazu (4.12) izračunata je kombinirana nesigurnost odstupanja pri ostvarivanju sljedivosti referentnog etalona ( $w(\Delta_{\text{traceability}})$ ), a potom prema izrazu (4.10) i kombinirana relativna nesigurnost referentnog etalona LIMS – a

( $w(\text{FCM})$ ). Uz faktor pokrivanja  $k = 2$  prema (4.11) konačno je dobivena i proširena mjerna nesigurnost ( $W(\text{FCM})$ ). Dobivene vrijednosti prikazane su tablicom 11.

Tablica 11: Vrijednosti kombinirane nesigurnosti pri ostvarivanju sljedivosti, relativne mjerne nesigurnosti i proširene mjerne nesigurnosti referentnog etalona LIMS – a

| $F$ , kN | $w(\Delta_{\text{traceability}})$ | $w(\text{FCM})$ | $W(\text{FCM})$ |
|----------|-----------------------------------|-----------------|-----------------|
| 10       | 7,68783E-05                       | 9,38630E-05     | 1,87726E-04     |
| 12       | 4,76243E-05                       | 7,18893E-05     | 1,43779E-04     |
| 14       | 7,88821E-05                       | 9,55111E-05     | 1,91022E-04     |
| 16       | 7,26122E-05                       | 9,04021E-05     | 1,80804E-04     |
| 18       | 9,54399E-05                       | 1,09585E-04     | 2,19169E-04     |
| 20       | 7,79033E-05                       | 9,47044E-05     | 1,89409E-04     |
| 20       | 1,02843E-04                       | 1,16089E-04     | 2,32179E-04     |
| 30       | 8,64051E-05                       | 1,01813E-04     | 2,03626E-04     |
| 40       | 1,05165E-04                       | 1,18151E-04     | 2,36303E-04     |
| 50       | 1,05675E-04                       | 1,18605E-04     | 2,37210E-04     |
| 60       | 9,98317E-05                       | 1,13430E-04     | 2,26860E-04     |
| 70       | 1,00209E-04                       | 1,13762E-04     | 2,27525E-04     |
| 80       | 9,41350E-05                       | 1,08450E-04     | 2,16900E-04     |
| 90       | 9,51801E-05                       | 1,09358E-04     | 2,18717E-04     |
| 100      | 9,12599E-05                       | 1,05964E-04     | 2,11928E-04     |
| 100      | 8,96365E-05                       | 1,04569E-04     | 2,09138E-04     |
| 120      | 6,79810E-05                       | 8,67261E-05     | 1,73452E-04     |
| 140      | 6,48385E-05                       | 8,42854E-05     | 1,68571E-04     |
| 160      | 5,88227E-05                       | 7,97503E-05     | 1,59501E-04     |
| 180      | 5,47009E-05                       | 7,67606E-05     | 1,53521E-04     |
| 200      | 4,77731E-05                       | 7,19880E-05     | 1,43976E-04     |
| 200      | 8,68589E-05                       | 1,02198E-04     | 2,04396E-04     |
| 250      | 7,19697E-05                       | 8,98868E-05     | 1,79774E-04     |
| 300      | 6,13200E-05                       | 8,16097E-05     | 1,63219E-04     |
| 350      | 6,09833E-05                       | 8,13570E-05     | 1,62714E-04     |
| 400      | 4,47441E-05                       | 7,00145E-05     | 1,40029E-04     |
| 450      | 4,90562E-05                       | 7,28458E-05     | 1,45692E-04     |
| 500      | 3,01296E-05                       | 6,17073E-05     | 1,23415E-04     |

Maksimalni iznosi svih mjernih nesigurnosti prikazani su u tablici 12.

Tablica 12: Maksimalni iznosi mjernih nesigurnosti

| Nesigurnost                      | Maksimum    | Nesigurnost                       | Maksimum    |
|----------------------------------|-------------|-----------------------------------|-------------|
| $w(F_{\text{FCM}})$              | 2,75787E-05 | $w(\Delta_{\text{traceability}})$ | 1,05675E-04 |
| $w(F_{\text{FSM}})$              | 4,16731E-05 | $w(\Delta_{\text{drift-RT}})$     | 2,00000E-05 |
| $w(\Delta_{\text{rel-dev}})$     | 1,01231E-04 | $w(c_{\text{temp}})$              | 5,00000E-05 |
| $w(\Delta_{\text{hys-FCM}})$     | 5,46023E-05 | $w(\text{FCM})$                   | 1,18605E-04 |
| $w(\Delta_{\text{drift-TS}})$    | 2,00000E-05 | $W(\text{FCM})$                   | 2,37210E-04 |
| $w(\Delta_{\text{realization}})$ | 1,00000E-05 |                                   |             |



## 4.6. Analiza rezultata umjeravanja referentnog etalona sile

Tablicom 13 prikazane su sve procijenjene nesigurnosti umjeravanja referentnog etalona LIMS – a - sve pojedinačne nesigurnosti, kombinirana nesigurnost te proširena mjerna nesigurnost referentnog etalona, za mjerno područje od 10 kN do 500 kN.

Tablica 13: Nesigurnosti umjeravanja referentnog etalona LIMS – a

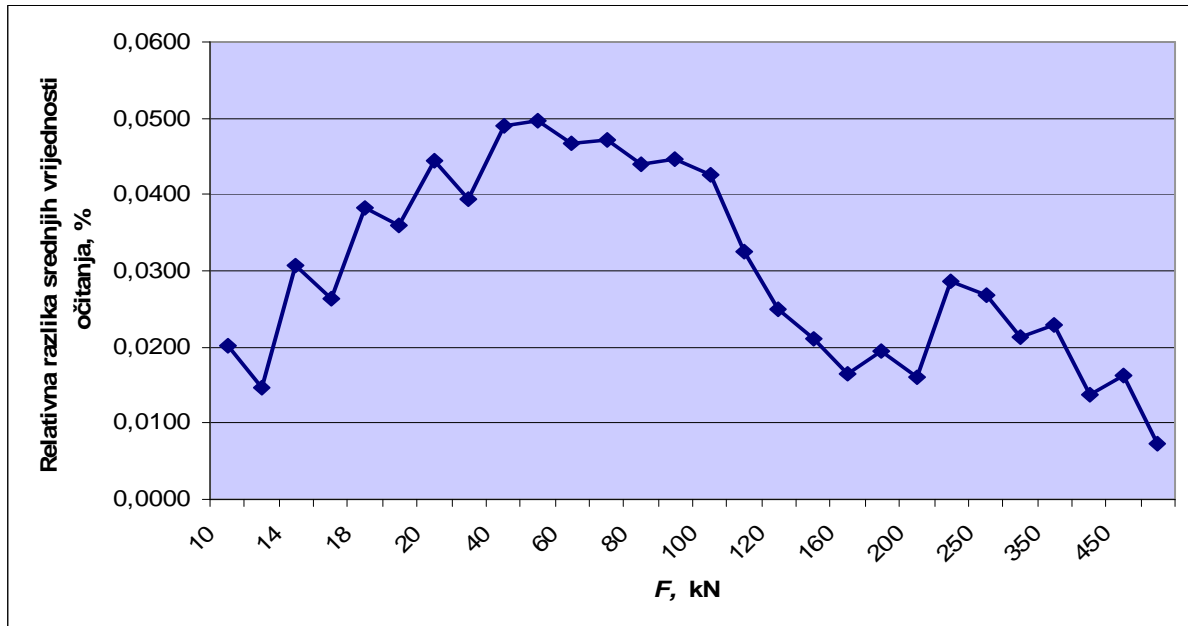
| $F, \text{kN}$ | $w(F_{\text{FCM}})$ | $w(F_{\text{FSM}})$ | $w(\Delta_{\text{rel-dev}})$ | $w(\Delta_{\text{hys-FCM}})$ | $w(\Delta_{\text{drift-TS}})$ | $w(\Delta_{\text{realization}})$ |
|----------------|---------------------|---------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| 10             | 2,61048E-05         | 6,66942E-06         | 4,12665E-05                  | 5,46023E-05                  | 2,00E-05                      | 1,00E-05                         |
| 12             | 1,89827E-05         | 7,35254E-06         | 3,00771E-05                  | 2,11905E-05                  | 2,00E-05                      | 1,00E-05                         |
| 14             | 1,03846E-05         | 6,30241E-06         | 6,24957E-05                  | 4,08547E-05                  | 2,00E-05                      | 1,00E-05                         |
| 16             | 1,28736E-05         | 1,10296E-05         | 5,37920E-05                  | 3,98945E-05                  | 2,00E-05                      | 1,00E-05                         |
| 18             | 1,38187E-05         | 9,80462E-06         | 7,80778E-05                  | 4,71758E-05                  | 2,00E-05                      | 1,00E-05                         |
| 20             | 9,61804E-06         | 1,01443E-05         | 7,33042E-05                  | 0,00000E+00                  | 2,00E-05                      | 1,00E-05                         |
| 20             | 2,75787E-05         | 1,44410E-05         | 9,07221E-05                  | 2,96166E-05                  | 2,00E-05                      | 1,00E-05                         |
| 30             | 9,77488E-06         | 1,47059E-05         | 8,04499E-05                  | 1,34850E-05                  | 2,00E-05                      | 1,00E-05                         |
| 40             | 1,73430E-05         | 1,10293E-05         | 0,000100246                  | 9,38618E-06                  | 2,00E-05                      | 1,00E-05                         |
| 50             | 1,26743E-05         | 1,20242E-05         | 0,000101231                  | 1,06903E-05                  | 2,00E-05                      | 1,00E-05                         |
| 60             | 1,32095E-05         | 1,11165E-05         | 9,54784E-05                  | 7,22296E-06                  | 2,00E-05                      | 1,00E-05                         |
| 70             | 1,08505E-05         | 8,58865E-06         | 9,62303E-05                  | 9,49236E-06                  | 2,00E-05                      | 1,00E-05                         |
| 80             | 1,39150E-05         | 8,33712E-06         | 8,99439E-05                  | 2,89009E-06                  | 2,00E-05                      | 1,00E-05                         |
| 90             | 1,20479E-05         | 9,26334E-06         | 9,12187E-05                  | 2,72850E-06                  | 2,00E-05                      | 1,00E-05                         |
| 100            | 1,41818E-05         | 1,00044E-05         | 8,67592E-05                  | 0,00000E+00                  | 2,00E-05                      | 1,00E-05                         |
| 100            | 2,00826E-05         | 4,16731E-05         | 6,61684E-05                  | 3,18823E-05                  | 2,00E-05                      | 1,00E-05                         |
| 120            | 1,45188E-05         | 3,30945E-05         | 5,08158E-05                  | 1,52684E-05                  | 2,00E-05                      | 1,00E-05                         |
| 140            | 2,11263E-05         | 2,52211E-05         | 4,28426E-05                  | 2,80379E-05                  | 2,00E-05                      | 1,00E-05                         |
| 160            | 2,06393E-05         | 1,67001E-05         | 3,36118E-05                  | 3,35482E-05                  | 2,00E-05                      | 1,00E-05                         |
| 180            | 2,26015E-05         | 1,36916E-05         | 3,97601E-05                  | 1,45959E-05                  | 2,00E-05                      | 1,00E-05                         |
| 200            | 2,16408E-05         | 1,57400E-05         | 3,26526E-05                  | 0,00000E+00                  | 2,00E-05                      | 1,00E-05                         |
| 200            | 2,37492E-05         | 2,60016E-05         | 5,83695E-05                  | 4,89628E-05                  | 2,00E-05                      | 1,00E-05                         |
| 250            | 2,01477E-05         | 2,90362E-05         | 5,48103E-05                  | 2,06504E-05                  | 2,00E-05                      | 1,00E-05                         |
| 300            | 1,89648E-05         | 2,88466E-05         | 4,36161E-05                  | 1,28838E-05                  | 2,00E-05                      | 1,00E-05                         |
| 350            | 1,58165E-05         | 2,48402E-05         | 4,69146E-05                  | 1,22797E-05                  | 2,00E-05                      | 1,00E-05                         |
| 400            | 1,35984E-05         | 2,17363E-05         | 2,78439E-05                  | 8,32903E-06                  | 2,00E-05                      | 1,00E-05                         |
| 450            | 1,36769E-05         | 2,42008E-05         | 3,34168E-05                  | 4,13468E-06                  | 2,00E-05                      | 1,00E-05                         |
| 500            | 9,39001E-06         | 1,01324E-05         | 1,47293E-05                  | 0,00000E+00                  | 2,00E-05                      | 1,00E-05                         |

| <b>F, kN</b> | <b>w(<math>\Delta_{\text{traceability}}</math>)</b> | <b>w(<math>c_{\text{temp}}</math>)</b> | <b>w(<math>\Delta_{\text{drift-RT}}</math>)</b> | <b>w(FCM)</b> | <b>W(FCM)</b> |
|--------------|---|--|---|---------------|---------------|
| 10           | 7,68783E-05   | 5,00E-05                               | 2,00E-05  | 9,38630E-05   | 1,87726E-04   |
| 12           | 4,76243E-05   | 5,00E-05                               | 2,00E-05  | 7,18893E-05   | 1,43779E-04   |
| 14           | 7,88821E-05   | 5,00E-05                               | 2,00E-05  | 9,55111E-05   | 1,91022E-04   |
| 16           | 7,26122E-05   | 5,00E-05                               | 2,00E-05  | 9,04021E-05   | 1,80804E-04   |
| 18           | 9,54399E-05   | 5,00E-05                               | 2,00E-05  | 1,09585E-04   | 2,19169E-04   |
| 20           | 7,79033E-05   | 5,00E-05                               | 2,00E-05  | 9,47044E-05   | 1,89409E-04   |
| 20           | 1,02843E-04   | 5,00E-05                               | 2,00E-05  | 1,16089E-04   | 2,32179E-04   |
| 30           | 8,64051E-05   | 5,00E-05                               | 2,00E-05  | 1,01813E-04   | 2,03626E-04   |
| 40           | 1,05165E-04   | 5,00E-05                               | 2,00E-05  | 1,18151E-04   | 2,36303E-04   |
| 50           | 1,05675E-04   | 5,00E-05                               | 2,00E-05  | 1,18605E-04   | 2,37210E-04   |
| 60           | 9,98317E-05   | 5,00E-05                               | 2,00E-05  | 1,13430E-04   | 2,26860E-04   |
| 70           | 1,00209E-04   | 5,00E-05                               | 2,00E-05  | 1,13762E-04   | 2,27525E-04   |
| 80           | 9,41350E-05   | 5,00E-05                               | 2,00E-05  | 1,08450E-04   | 2,16900E-04   |
| 90           | 9,51801E-05   | 5,00E-05                               | 2,00E-05  | 1,09358E-04   | 2,18717E-04   |
| 100          | 9,12599E-05   | 5,00E-05                               | 2,00E-05  | 1,05964E-04   | 2,11928E-04   |
| 100          | 8,96365E-05   | 5,00E-05                               | 2,00E-05  | 1,04569E-04   | 2,09138E-04   |
| 120          | 6,79810E-05   | 5,00E-05                               | 2,00E-05  | 8,67261E-05   | 1,73452E-04   |
| 140          | 6,48385E-05   | 5,00E-05                               | 2,00E-05  | 8,42854E-05   | 1,68571E-04   |
| 160          | 5,88227E-05   | 5,00E-05                               | 2,00E-05  | 7,97503E-05   | 1,59501E-04   |
| 180          | 5,47009E-05   | 5,00E-05                               | 2,00E-05  | 7,67606E-05   | 1,53521E-04   |
| 200          | 4,77731E-05   | 5,00E-05                               | 2,00E-05  | 7,19880E-05   | 1,43976E-04   |
| 200          | 8,68589E-05   | 5,00E-05                               | 2,00E-05  | 1,02198E-04   | 2,04396E-04   |
| 250          | 7,19697E-05   | 5,00E-05                               | 2,00E-05  | 8,98868E-05   | 1,79774E-04   |
| 300          | 6,13200E-05   | 5,00E-05                               | 2,00E-05  | 8,16097E-05   | 1,63219E-04   |
| 350          | 6,09833E-05   | 5,00E-05                               | 2,00E-05  | 8,13570E-05   | 1,62714E-04   |
| 400          | 4,47441E-05   | 5,00E-05                               | 2,00E-05  | 7,00145E-05   | 1,40029E-04   |
| 450          | 4,90562E-05   | 5,00E-05                               | 2,00E-05  | 7,28458E-05   | 1,45692E-04   |
| 500          | 3,01296E-05   | 5,00E-05                               | 2,00E-05  | 6,17073E-05   | 1,23415E-04   |

Relativna razlika srednjih vrijednosti očitavanja nacionalnog etalona PTB – a i referentnog etalona LIMS – a može se izraziti na sljedeći način:

$$\Delta_{\text{rel-dev}} = \left| \frac{X_{\text{sr-FSM}} - X_{\text{sr-FCM}}}{X_{\text{sr-FSM}}} \right| \times 100\% . \quad (4.13)$$

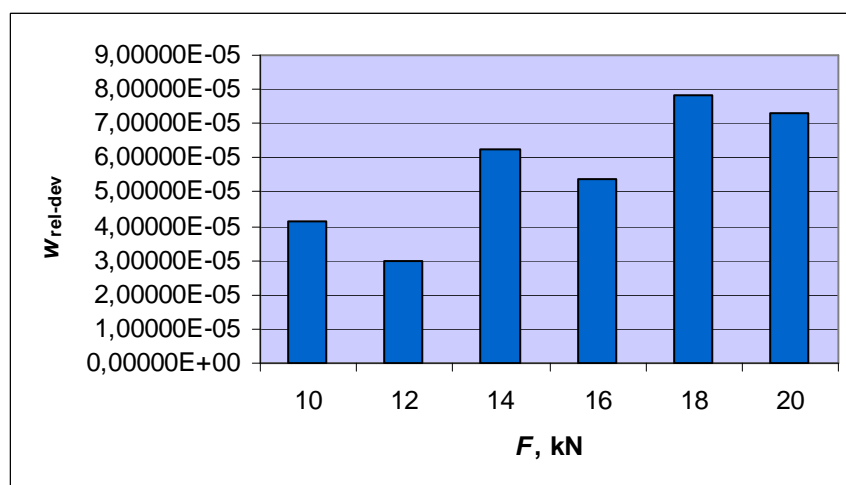
Za mjerno područje od 10 kN do 500 kN dobivene su vrijednosti  $\Delta_{\text{rel-dev}}$  prikazane grafički slikom 16.



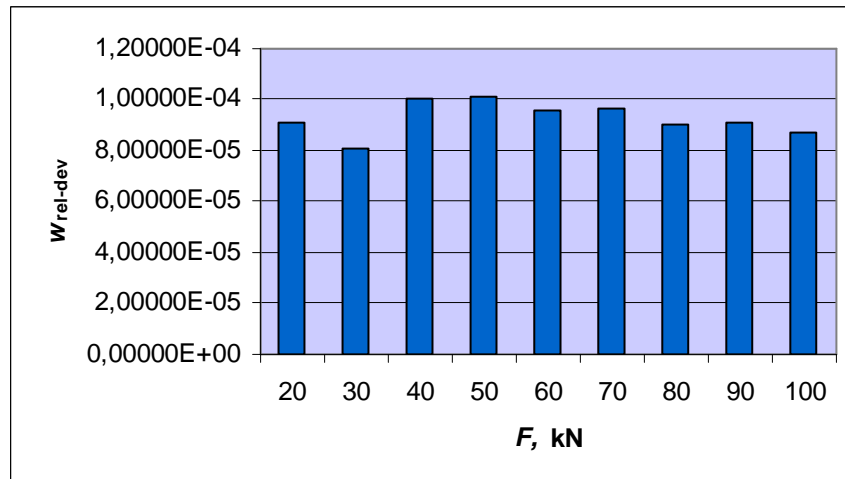
Slika 16: Relativna razlika srednjih vrijednosti očitavanja PTB – a i LIMS – a za mjerno područje od 10 kN do 500 kN

Može se primjetiti porast razlike srednjih vrijednosti očitavanja do sile od 60 kN, a potom njezino opadanje za više iznose sile. Općenito je dobivena relativna razlika znatno manja u području sile od 120 kN do 500 kN, nego u području od 10 kN do 100 kN, no nema uočljive matematičke zakonitosti prema kojoj bi se ona ponašala.

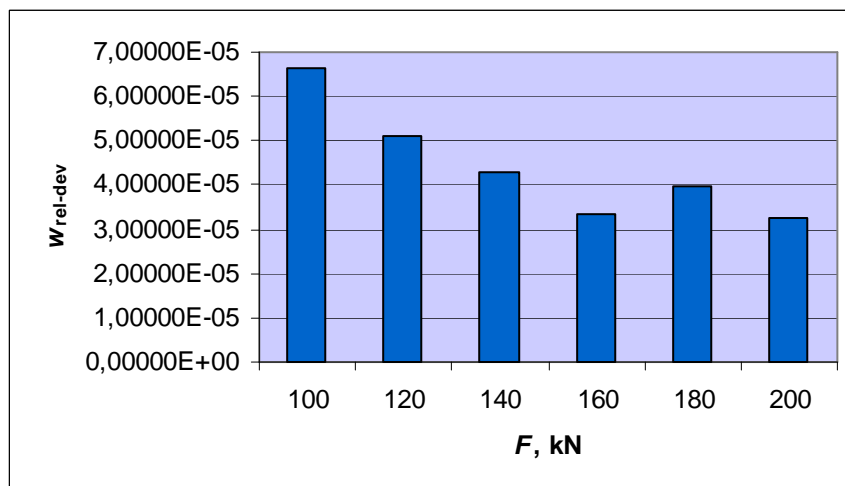
Slikama 17, 18, 19 i 20 prikazana je relativna devijacija rezultata umjeravanja u LIMS – u u odnosu na rezultate umjeravanja u PTB – u ( $w(\Delta_{\text{rel-dev}})$ ) i to zasebno za svaki posrednički etalon. Slikom 21 prikazana je relativna devijacija rezultata za čitavo mjerno područje referentnog etalona.



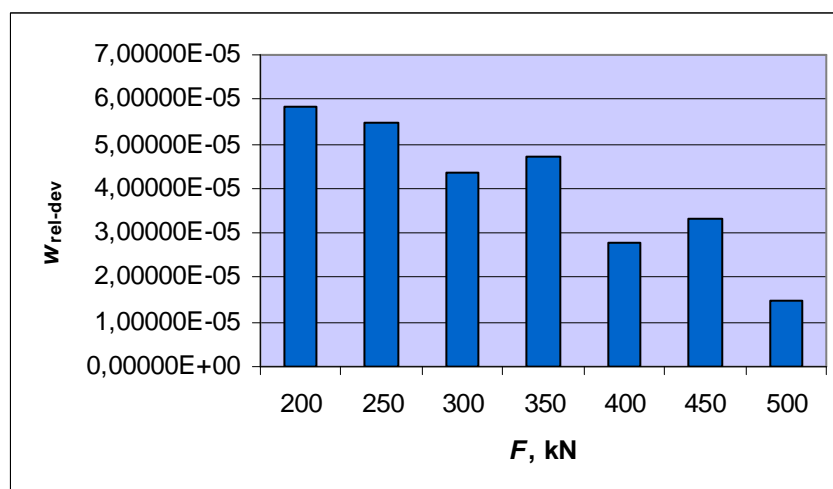
Slika 17: Relativna devijacija rezultata umjeravanja u LIMS – u u odnosu na PTB za mjerno područje od 10 do 20 kN



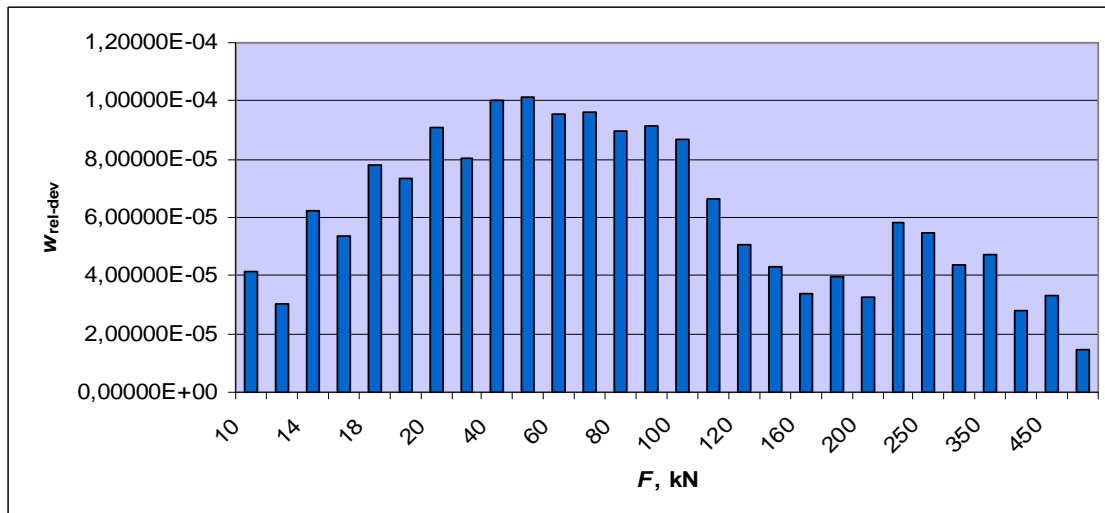
Slika 18: Relativna devijacija rezultata umjeravanja u LIMS – u u odnosu na PTB za mjerno područje od 20 do 100 kN



Slika 19: Relativna devijacija rezultata umjeravanja u LIMS – u u odnosu na PTB za mjerno područje od 100 do 200 kN



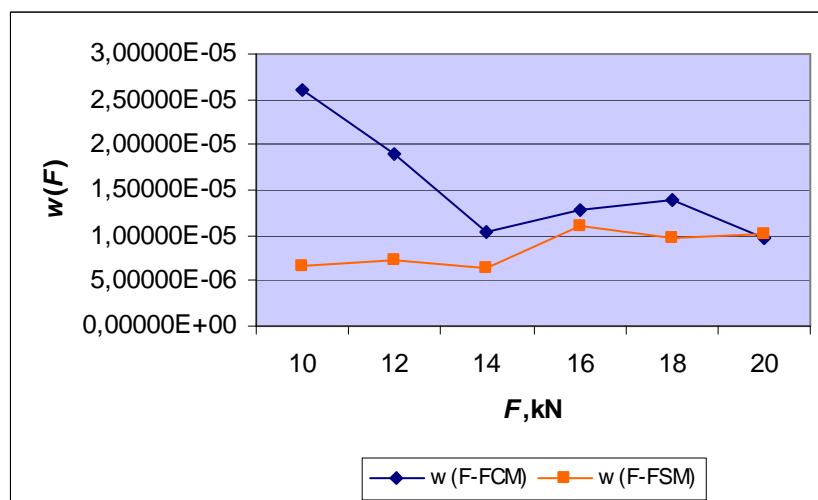
Slika 20: Relativna devijacija rezultata umjeravanja u LIMS – u u odnosu na PTB za mjerno područje od 200 do 500 kN



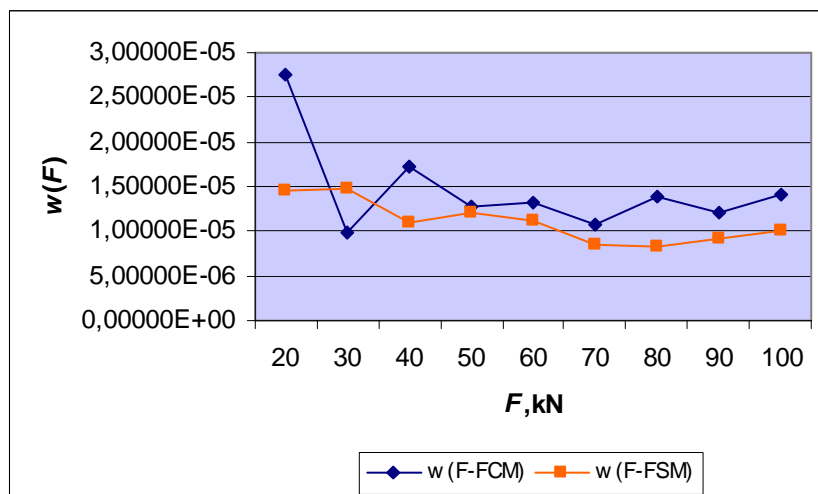
Slika 21: Relativna devijacija rezultata umjeravanja u LIMS – u u odnosu na PTB za čitavo mjerno područje referentnog etalona od 10 do 500 kN

Za pojedinačne posredničke etalone može se primjetiti da relativna devijacija ima različite tendencije: raste kod etalona Z4 20 kN, uglavnom stagnira kod Z4 100 kN, a pada kod Z4 200 kN i Z4 500 kN. Na čitavom mjernom području ponašanje relativne devijacije proporcionalno je ponašanju relativne razlike srednjih vrijednosti očitavanja (slika 16), tj. primjećuje se porast devijacije do sile od 60 kN, a nakon toga uglavnom njeno opadanje, što bi se moglo obrazložiti općenitom pojavom manjih nesigurnosti mjerenja pri većim silama umjeravanja.

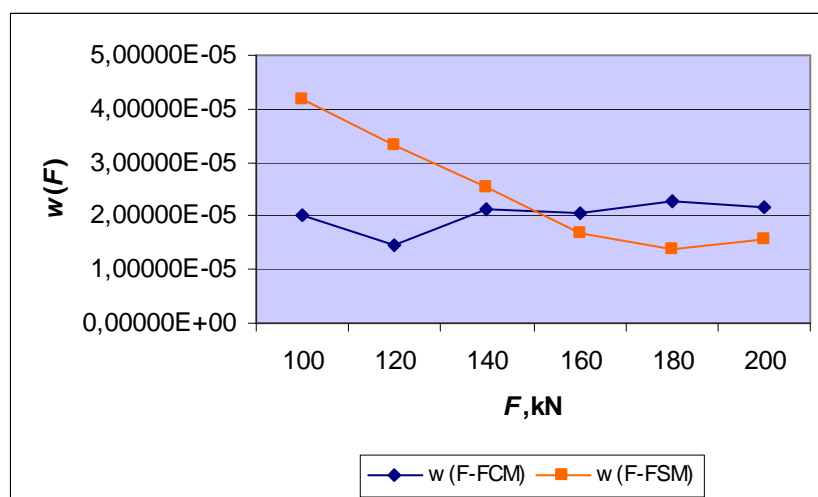
Relativne nesigurnosti ponovljivosti mjerenja s rotacijom prikazane su slikama 22, 23, 24 i 25, ponovno za sva četiri posrednička etalona i to usporedno za referentni etalon LIMS - a i nacionalni etalon PTB – a.



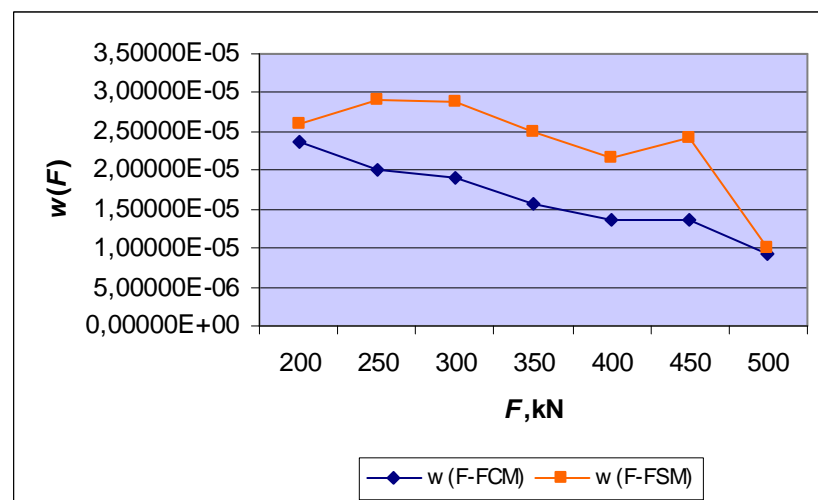
Slika 22: Usporedni prikaz relativne nesigurnosti ponovljivosti mjerenja s rotacijom za mjerno područje od 10 do 20 kN



Slika 23: Usporedni prikaz relativne nesigurnosti ponovljivosti mjerenja s rotacijom za mjereno područje od 20 do 100 kN

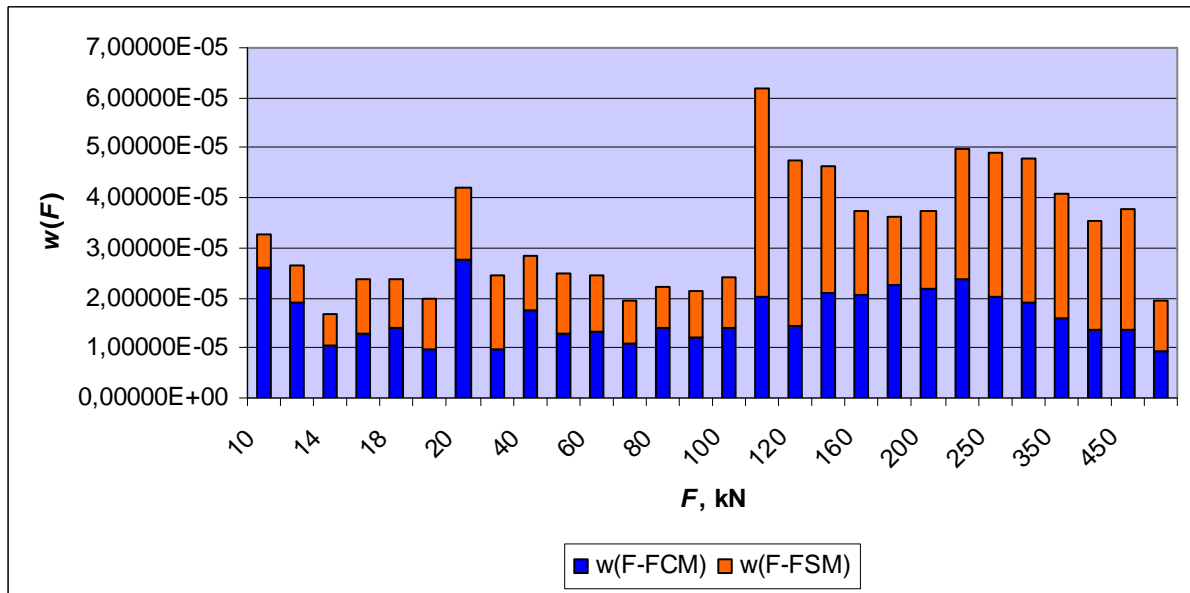


Slika 24: Usporedni prikaz relativne nesigurnosti ponovljivosti mjerenja s rotacijom za mjereno područje od 100 do 200 kN



Slika 25: Usporedni prikaz relativne nesigurnosti ponovljivosti mjerenja s rotacijom za mjereno područje od 200 do 500 kN

Iz usporednih prikaza relativne nesigurnosti ponovljivosti može se vidjeti da je ona uglavnom veća za referentni etalon kod manjih sila (za posredničke etalone Z4 20 kN i Z4 100 kN), a za nacionalni etalon je veća kod većih sila umjeravanja (za etalone Z4 200 kN i Z4 500 kN). Isto se može vidjeti i na prikazu nesigurnosti ponovljivosti za čitavo mjerno područje referentnog etalona, pri čemu su nesigurnosti prikazane tako da se vidi značaj udjela svake od njih (slika 26).



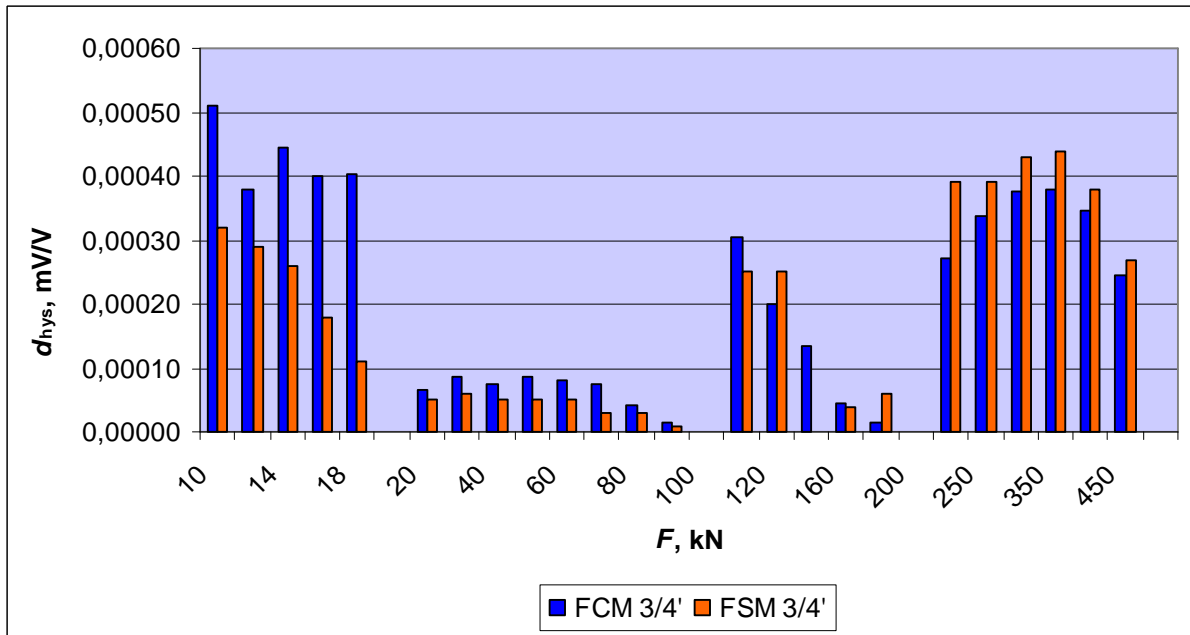
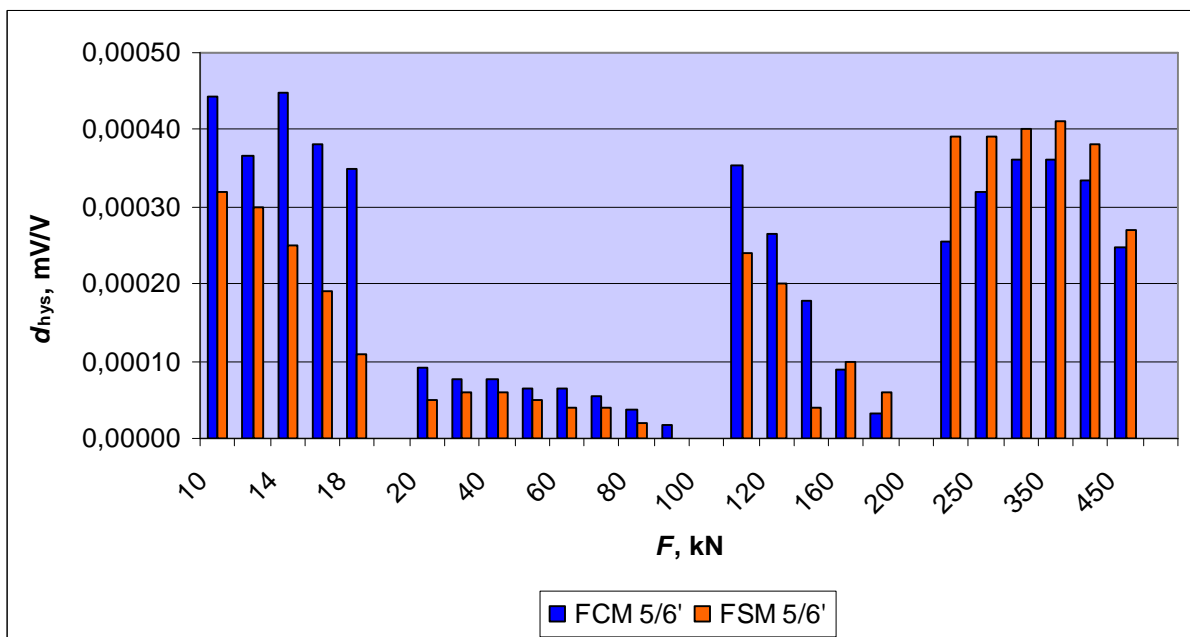
Slika 26: Prikaz udjela relativne nesigurnosti ponovljivosti mjerenja referentnog etalona LIMS – a i nacionalnog etalona PTB – a

Iz rezultata mjerenja za mjerne nizove  $X_3$  i  $X_4'$  te  $X_5$  i  $X_6'$ , mogu se međusobno usporediti histerezne razlike za referentni i nacionalni etalon. Ako se uzme da je histerezna razlika jednaka:

$$d_{\text{hys}} = |X_3 - X_4'| \text{ za nizove } X_3 \text{ i } X_4', \quad (4.14)$$

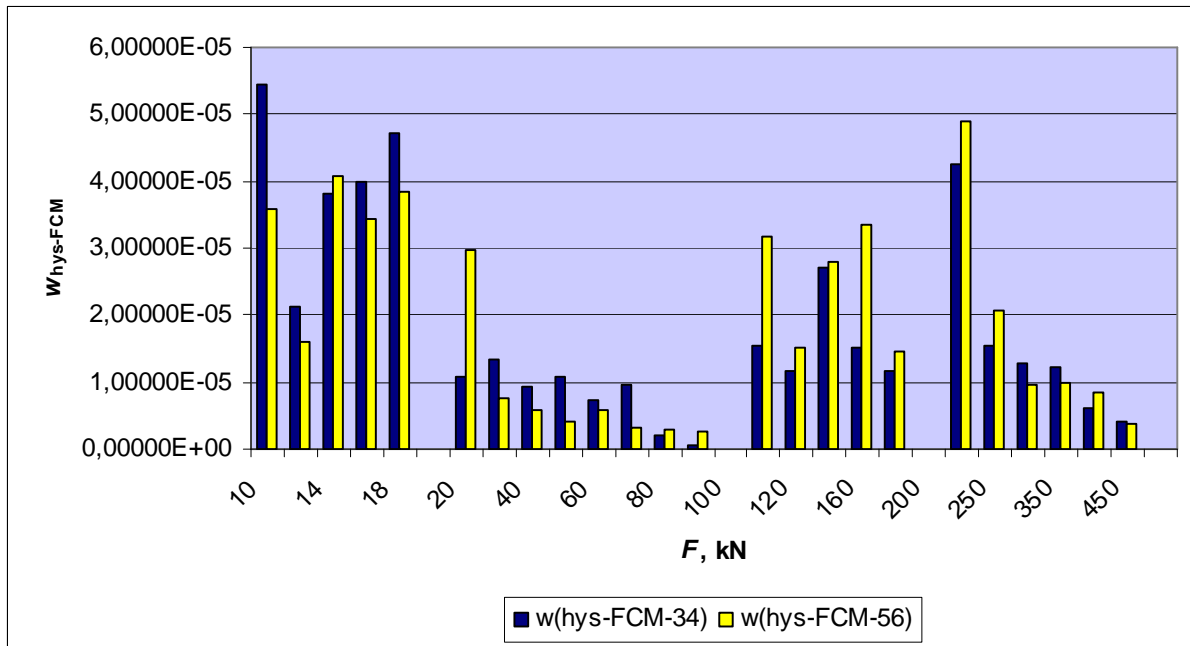
$$d_{\text{hys}} = |X_5 - X_6'| \text{ za nizove } X_5 \text{ i } X_6', \quad (4.15)$$

dobije se usporedni prikaz histereza prikazan slikama 27 i 28, iz kojeg se vidi da je histereza izraženija kod referentnog etalona LIMS – a pri manjim silama (do 200 kN), a kod nacionalnog etalona PTB – a pri većim silama.

Slika 27: Histerezne razlike mjernih nizova X<sub>3</sub> i X<sub>4</sub>'Slika 28: Histerezne razlike mjernih nizova X<sub>5</sub> i X<sub>6</sub>'

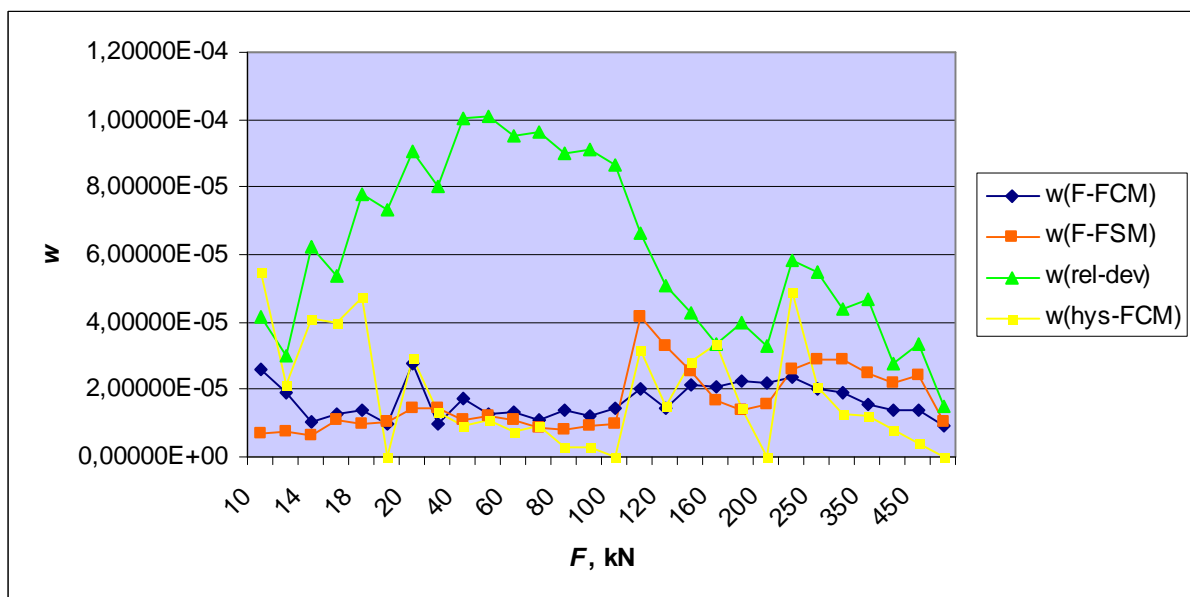
Osim toga može se usporediti i relativna devijacija histereze mjernih nizova X<sub>3</sub> i X<sub>4</sub>' s devijacijom nizova X<sub>5</sub> i X<sub>6</sub>' (slika 29). U tom slučaju nema nekog izraženog trenda ponašanja tih devijacija.





Slika 29: Relativna devijacija histereze nizova  $X_3$  i  $X_4'$  te nizova  $X_5$  i  $X_6'$

Iz pojedinačnih mjernih nesigurnosti može se promatrati ponašanje onih koje nisu konstantne za cijelo područje umjeravanja (slika 30).

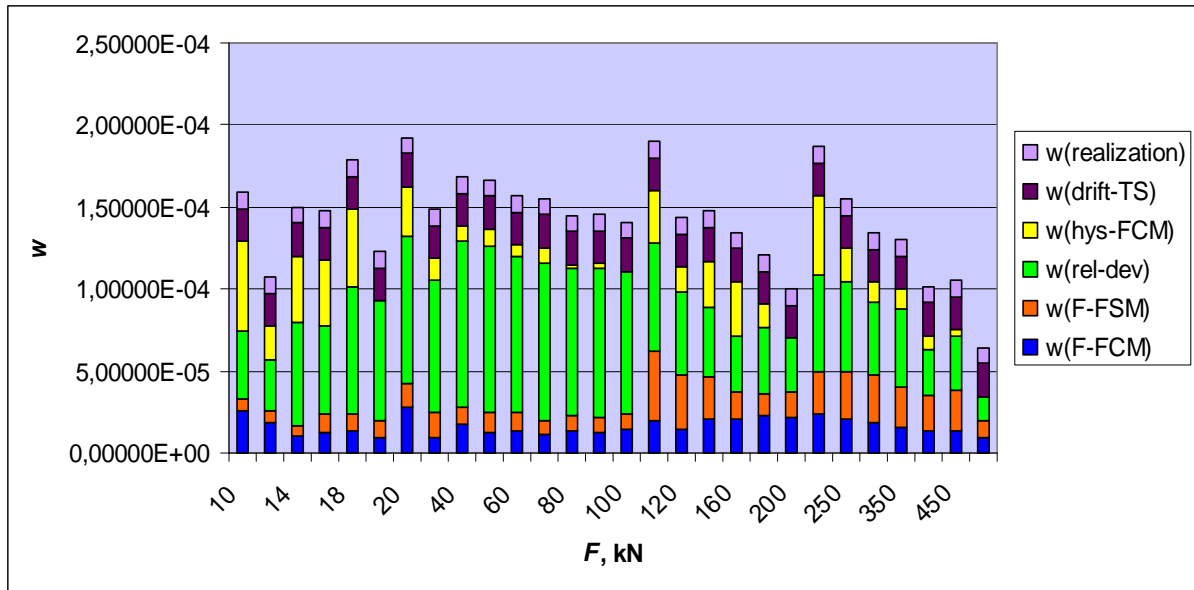


Slika 30: Ponašanje pojedinih mjernih nesigurnosti u ovisnosti o sili

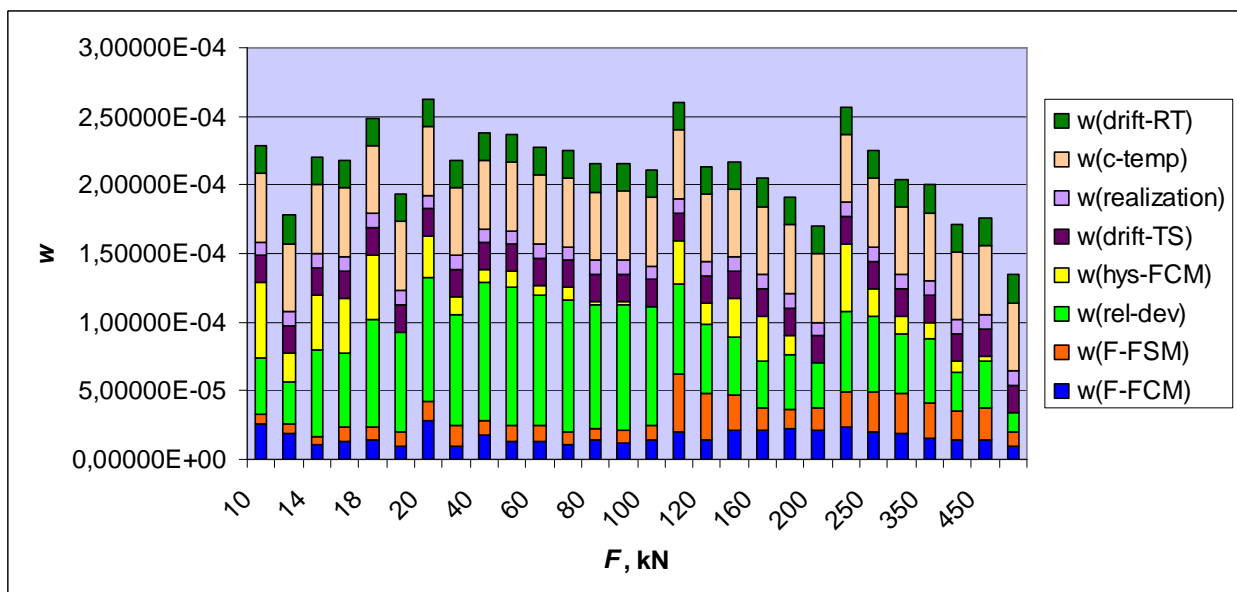
Relativna devijacija rezultata umjeravanja je najveća, te raste pri silama do 60 kN, potom uglavnom kontinuirano pada, uz jedan skok kod sile od 200 kN. Relativne nesigurnosti ponovljivosti s rotacijom ponašaju se jednoličnije, uglavnom su konstantne pri silama do 100

kN, potom malo rastu. Relativna devijacija histereze nema kontinuirani trend, s obzirom da se ne mogu međusobno povezati rasponi sile umjeravani različitim posredničkim etalonima.

Osim toga, može se promotriti i značaj pojedinih nesigurnosti u kombiniranoj nesigurnosti pri ostvarivanju sljedivosti do nacionalnog etalona (slika 31), kao i u kombiniranoj mjernoj nesigurnosti referentnog etalona sile (slika 32).



Slika 31: Značaj pojedinih mjernih nesigurnosti u kombiniranoj nesigurnosti odstupanja pri ostvarivanju sljedivosti

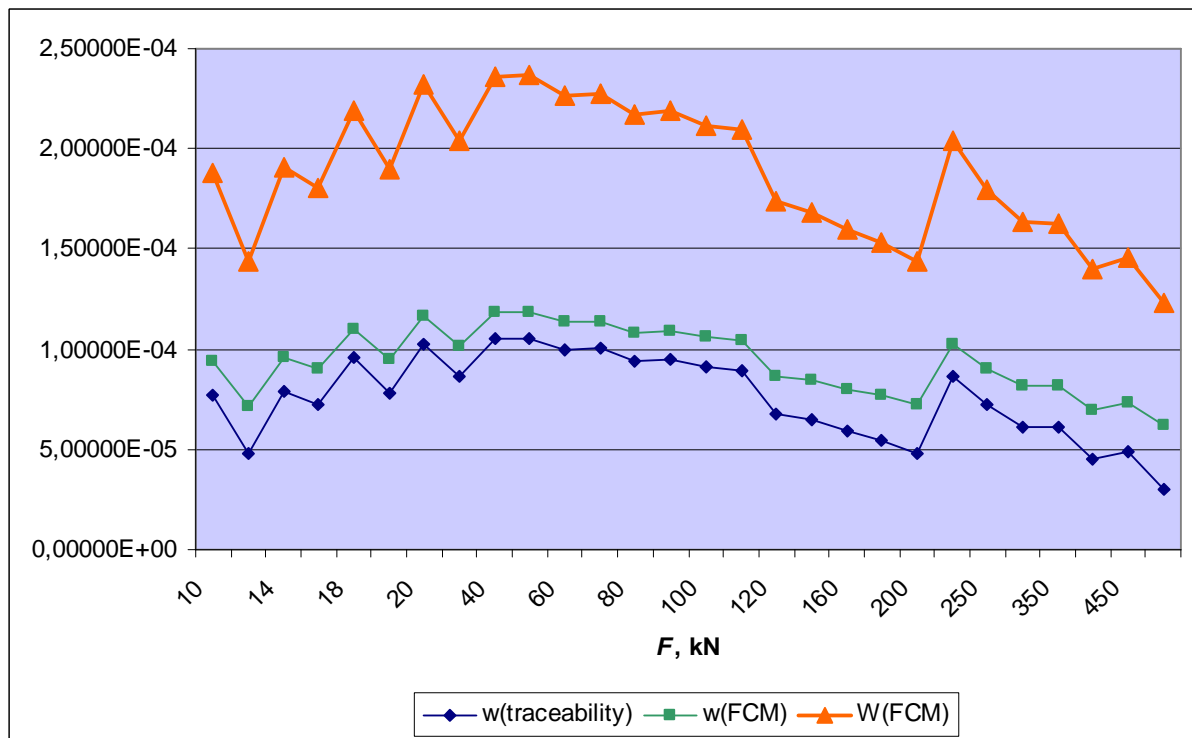


Slika 32: Značaj pojedinih mjernih nesigurnosti u kombiniranoj relativnoj nesigurnosti referentnog etalona LIMS - a

Na kombiniranu nesigurnost odstupanja pri ostvarivanju sljedivosti najveći utjecaj ima svakako relativna devijacija rezultata umjeravanja, s time da se taj utjecaj smanjuje s porastom sile. U nekim mjernim područjima (od 10 kN do 20 kN te od 120 kN do 250 kN) utjecaj histerese je također značajan, no to može ovisiti i o posredničkim etalonima primjenjenim u tim područjima. Nesigurnosti ponovljivosti mjerenja izraženije su pri većim silama, gdje više utječe nesigurnost nacionalnog etalona nego referentnog. Utjecaji realizacije sile i drifta posredničkih etalona konstantni su za sve sile, no njihov se značaj povećava pri većim silama.

U kombiniranoj mjernoj nesigurnosti referentnog etalona, ponovno je pri manjim silama (do 100 kN) istaknuta relativna devijacija rezultata umjeravanja, ali i relativna nesigurnost zbog promjene temperature, koja pri silama većim od 100 kN predstavlja najznačajniji utjecaj.

Ponašanje kombinirane nesigurnosti odstupanja pri ostvarivanju sljedivosti, kombinirane relativne nesigurnosti referentnog etalona i odgovarajuće proširene nesigurnosti prikazano je slikom 33.



Slika 33: Kombinirana nesigurnost odstupanja pri ostvarivanju sljedivosti, kombinirana relativna nesigurnost referentnog etalona i odgovarajuća proširena nesigurnost

Može se vidjeti da su trendovi ponašanja kombiniranih nesigurnosti te proširene nesigurnosti referentnog etalona isti, iz razloga što su dodatne dvije pojedinačne nesigurnosti ( $w(c_{\text{temp}})$  i  $w(\Delta_{\text{drift-RT}})$ ) konstantne, kao i faktor  $k$ , a preko njih su prikazane nesigurnosti međusobno matematički povezane. Opće pravilnosti u ponašanju tih veličina nema, iako nakon sile od 40 kN one uglavnom padaju, osim skoka kod sile od 200 kN, što bi se moglo obrazložiti prijelazom s posredničkog etalona Z4 200 kN na etalon Z4 500 kN. Pad tih veličina je logičan, s obzirom da su općenito mjerne nesigurnosti i pogreške kod umjeravanja manje za veće iznose sile.

## 5. ZAKLJUČAK

Iz dobivenih rezultata umjeravanja referentnog etalona sile LIMS – a i provedene analize procijenjenih pojedinih nesigurnosti, mogu se donijeti sljedeći zaključci:

- Relativna razlika srednjih vrijednosti očitavanja ( $\Delta_{\text{rel-dev}}$ ) između referentnog etalona LIMS – a i nacionalnog etalona PTB – a iznosi maksimalno 0,0496 % na mjernoj točki od 50 kN. Analizirajući iznose tih odstupanja na svim mjernim točkama uočeno je da su isti nešto veći u mjernom području od 10 do 100 kN, nego u mjernom području od 120 kN do 500 kN.
- Relativne nesigurnosti srednjih vrijednosti sila pri umjeravanju posredničkih etalona u mjernom području od 10 kN do 100 kN uglavnom su većeg iznosa na referentnom etalonu LIMS – a, dok su u području od 120 kN do 500 kN približno podjednako iznosa.
- Histerezna razlika odgovarajućih mjernih nizova ( $\Delta_{\text{hys}}$ ) je izraženija kod referentnog etalona LIMS – a i to u mjernom je području od 10 kN do 180 kN, dok je u području od 200 kN do 500 kN podjednaka kao i kod nacionalnog etalona PTB – a.
- Vrijednost mjerne nesigurnosti referentnog etalona LIMS – a pri umjeravanju posredničkih etalona pretpostavljeno je da će biti u granicama  $W(\text{FCM})_{\text{očekivano}} \leq 0,05$  %. Najveća procijenjena i izračunata proširena mjerna nesigurnost dobivena umjeravanjem posredničkih etalona sile u mjernom području od 10 do 500 kN iznosi  $W(\text{FCM})_{\text{umjereno}} = 0,0237$  %.

Sukladno normi EN ISO 376:

- u cijelom mjernom području referentnog etalona dobivena je nesigurnost manja od 0,05 % te je dostatna za umjeravanje prijenosnih etalona klase 1,
- u mjernom području od 120 kN do 500 kN dobivena je mjerna nesigurnost manja od 0,02 % te je dostatna za umjeravanje prijenosnih etalona klase 0,5.

- Najveći utjecaj na mjernu nesigurnost referentnog etalona sile predstavljaju relativna devijacija između rezultata umjeravanja PTB – a i LIMS - a i relativna nesigurnost zbog promjene temperature pri umjeravanju. Korištenjem posredničkih etalona više kvalitete mogu se ostvariti manje navedene nesigurnosti. Znanstvena istraživanja pokazuju da referentni uređaji komparatornog tipa mogu postići mjernu nesigurnost  $W(\text{FCM}) < 0,02 \%$ , što se može vidjeti i iz pojedinih rezultata dobivenih u ovome radu, pa bi se korištenjem drugih posredničkih etalona to moglo ostvariti i na čitavom mjernom području referentnog etalona LIMS – a.

## **LITERATURA**

- [1] Guide to the Measurement of Force, The Institute of Measurement and Control, 1998.
- [2] Muftić O.: Mehanika I (Statika), Tehnička knjiga, Zagreb, 1983.
- [3] Alar Ž.: Procjenjivanje nesigurnosti rezultata mjerenja sile, magistarski rad, Zagreb, 2001.
- [4] Mahović S.: Teorija i tehnika mjerenja, podloge za predavanja, FSB, ak.god. 2006/2007.
- [5] Alar Ž., Franz M., Aleksandrov T.: Mjerna sposobnost referentnog etalona sile instaliranog u LIMS-u, Matrib '06
- [6] EAL-R2: Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration, European co – operation for Accreditation, 1997.
- [7] [www.ptb.de](http://www.ptb.de)
- [8] [www.gtm-gmbh.com](http://www.gtm-gmbh.com)
- [9] [www.hbm.com](http://www.hbm.com)
- [10] EAL-G22: Uncertainty of Calibration Results in Force Measurements, European co – operation for Accreditation, 1996.
- [11] Sawla A.: Uncertainty Scope of the Force Calibration Machines, PTB
- [12] Franz M.: Mehanička svojstva materijala, FSB, Zagreb, 1998.
- [13] Videc M.: Postupak umjeravanja prijenosnih etalona sile, završni rad, Zagreb, 2007.
- [14] [www.npl.co.uk](http://www.npl.co.uk)