

Određivanje mase utega referentnog etalona sile nazivne vrijednosti 1000 N

Josić, Antonijo

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:931737>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-16**

Repository / Repozitorij:

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





S v e u č i l i š t e u Z a g r e b u
Fakultet strojarstva i brodogradnje



ZAVRŠNI RAD

Antonijo Josić

Zagreb, 2022



Sveučilište u Zagrebu



Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Dr. Sc. Željko Alar

Student:

Antonijo Josić

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem se mentoru izv. prof. dr. sc. Željku Alaru, asistentu Danielu Pustičkom te tehničarima Laboratorija za ispitivanje mehaničkih svojstava Ivanu Martinku i Romanu Divjaku za pomoć pruženu prilikom izrade eksperimentalnog dijela rada. Najveće zahvale mojoj obitelji, roditeljima Ivi i Slavici te braći Dariu i Andreju na bezuvjetnoj potpori tijekom cijelog studija.

Antonijo Josić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
 Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
 proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
 materijala i mehatronika i robotika

| | |
|--|--------|
| Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje | |
| Datum | Prilog |
| Klasa: 602 – 04 / 22 – 6 / 1 | |
| Ur.broj: 15 - 1703 - 22 - | |

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Antonijo Josić** JMBAG: **0035211245**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Određivanje mase utega referentnog etalona sile nazivne vrijednosti 1000 N**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Determination of the dead weights mass for the reference force standard with the nominal capacity of 1000 N**

Opis zadatka:

Mjerenje sile je osnova za određivanje mehaničkih svojstava materijala, a sljedivost rezultata mjerenja sile se osigurava neprekinutim lancem usporedbi sve do primarnog etalona sile. Primarni etaloni sile su uređaji s utezima preko kojih je ostvarena određena sila direktno bez intervenirajućih mehanizama. Masa ovih utega se određuje kroz usporedbe sa referentnim etalonima mase koji se mogu povezati sa primarnim etalonima za masu.

U radu je potrebno sljedeće:

1. Opisati vrste etalona sile i iz literaturnih izvora dati njihove mjerne sposobnosti.
2. Opisati mjernu sljedivost mjerenja mase.
3. Eksperimentalno, usporednim mjerenjima odrediti masu utega referentnog etalona sile nazivne vrijednosti 1000 N nakon dugogodišnje primjene.
4. Analizirati dobivene rezultate i dati zaključke.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2021.

Datum predaje rada:

1. rok: 24. 2. 2022.
2. rok (izvanredni): 6. 7. 2022.
3. rok: 22. 9. 2022.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 28. 2. – 4. 3. 2022.
2. rok (izvanredni): 8. 7. 2022.
3. rok: 26. 9. – 30. 9. 2022.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:


 Izv. prof. dr. sc. Željko Alar


 Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | UVOD | 8 |
| 2 | MJERENJE SILE | 9 |
| 2.1 | Općenito o sili | 9 |
| 2.2 | Metode mjerenja sile | 10 |
| 2.3 | Uređaji za mjerenje sile | 11 |
| 2.4 | Sljedivost mjerenja sile | 12 |
| 2.5 | Etaloni sile | 15 |
| 2.5.1 | Općenito o etalonima sile | 15 |
| 2.5.2 | Prijenosni etaloni sile | 17 |
| 3 | Mjerenje mase | 23 |
| 3.1 | Realizacija definicije kilograma | 23 |
| 3.2 | Područje usporedbenih mjerenja | 24 |
| 3.3 | Struktura usporedbenih mjerenja | 24 |
| 3.4 | Tipovi usporedbenih mjerenja | 26 |
| 3.5 | Protokol usporedbenih mjerenja | 27 |
| 4 | Eksperimentalni dio | 28 |
| 4.1 | Plan eksperimenta | 28 |
| 4.2 | Postupak mjerenja težine utega | 28 |
| 4.3 | Postupak mjerenja | 32 |
| 4.4 | Rezultati mjerenja | 35 |
| 4.5 | Postupak umjeravanja | 36 |
| 5 | Analiza | 42 |
| 6 | Zaključak | 45 |
| 7 | Literatura | 46 |

POPIS SLIKA

| | |
|--|----|
| Slika 1. Dijelovi kidalice [8] | 11 |
| Slika 2. Hidraulična preša [9]..... | 12 |
| Slika 3. Piramida sljedivosti [10] | 13 |
| Slika 4. Piramida sljedivosti etalona u Hrvatskoj s pripadnim proširenjima mjernim nesigurnostima [11] | 14 |
| Slika 5. Primarni etalon za silu nazivne sile 1MN, PTB, Njemačka [13] | 16 |
| Slika 6. Kompletan pribor prijenosnog etalona [15] | 18 |
| Slika 7. Dinamometar [16] | 19 |
| Slika 8. Tipovi elastičnih elemenata s dopuštenim opterećenjima [2] | 20 |
| Slika 9. Tipovi DMS traka [2]..... | 20 |
| Slika 10. Primjer indirektnog mjerenja sile pomoću DMS traka [13]..... | 21 |
| Slika 11. Položaj DMS mjernih traka u Wheatstoneovom mostu [2] | 21 |
| Slika 12. Dinamometri prijenosnih etalona LIMS-a [10]..... | 22 |
| Slika 13. Nacionalni etalon kilograma Republike Hrvatske [17]..... | 23 |
| Slika 14. Organizacijska shema ključnih usporedbi [19] | 25 |
| Slika 15. Uteg nazivne vrijednosti 10 N..... | 30 |
| Slika 16. Uteg nazivne vrijednosti 20 N..... | 30 |
| Slika 17. Uteg nazivne vrijednosti 50 N..... | 30 |
| Slika 18. Uteg nazivne vrijednosti 100 N..... | 30 |
| Slika 19. Dinamometar HBM Z30A 200 N..... | 32 |
| Slika 20. Dinamometar HBM U1 500 N..... | 33 |
| Slika 21. Dinamometar HBM Z6FC3 1000 N..... | 33 |
| Slika 22. Pojačalo HBM DMP 40 | 34 |
| Slika 23. Kidalica Laboratorija za mehanička ispitivanja Fakulteta strojarstva i brodogradnje | 34 |
| Slika 24. Interpolacija vrijednosti umjeravanja utega do 200 N | 37 |
| Slika 25. Inverzna interpolacija vrijednosti umjeravanja utega do 200 N..... | 37 |
| Slika 26. Interpolacija vrijednosti umjeravanja utega do 500 N | 38 |
| Slika 27. Inverzna interpolacija vrijednosti umjeravanja utega do 500 N..... | 39 |
| Slika 28. Interpolacija vrijednosti umjeravanja utega do 1000 N | 40 |
| Slika 29. Inverzna interpolacija vrijednosti umjeravanja utega do 1000N..... | 40 |
| Slika 30. Kompletan sustav umjeravanja utega..... | 41 |
| Slika 31. Odstupanje od nominalne vrijednosti utega 20 N | 42 |
| Slika 32. Odstupanje od nominalne vrijednosti utega 50 N | 42 |
| Slika 33. Certifikat umjeravanja dinamometra Z30A 200 N..... | 43 |
| Slika 34. Certifikat umjeravanja dinamometra U1 500 N..... | 43 |
| Slika 35. Usporedba pogreške odstupanja 200 N..... | 44 |
| Slika 36. Usporedba pogreške odstupanja 500 N..... | 44 |

POPIS TABLICA

| | |
|---|----|
| Tablica 1. Tipovi referentnih etalona prema mehanizmima opterećenja i njihove pripadne najbolje mjerne sposobnosti [14] | 17 |
| Tablica 2. Vrijednosti konvencionalne mase i težine utega | 29 |
| Tablica 3. Koraci dodavanja primjerenih utega | 31 |
| Tablica 4. Izmjerene vrijednosti težine pripremljenih utega | 35 |
| Tablica 5. Rezultati umjeravanja utega do 200 N | 36 |
| Tablica 6. Rezultati umjeravanja utega do 500 N | 38 |
| Tablica 7. Rezultati umjeravanja utega do 1000 N | 39 |

POPIS OZNAKA

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|---------------|----------------|---|
| a | m/s^2 | Ubrzanje |
| b' | % | Relativna ponovljivost |
| ε | mm/mm | Istezanje |
| F | N | Sila |
| $F(i)$ | N | Izmjerene vrijednosti sile u i-tom mjernom nizu |
| fc | % | Relativna pogreška interpolacije |
| g | m/s^2 | Ubrzanje sile teže |
| m | kg | Masa |
| R | Ω | Električni otpor |
| U | V | Napon |
| X_i | mV/V | Vrijednost pri rastućoj sili u i-tom mjernom nizu |
| X_{sr} | mV/V | Srednja vrijednost izmjerenih vrijednosti pri rastućoj sili |

SAŽETAK

Postupak umjeravanja jedan je od osnovnih alata za održavanje mjerne slijedivosti, a time i točnosti i preciznosti uređaja za ispitivanje mehaničkih svojstava. U radu su promatrani rezultati dobiveni prilikom umjeravanja pomoću umjernih utega različitih vrijednosti. U literaturi je prikaz postupaka održavanja mjerne slijedivosti uređaja za mjerenje sile i mase.

U eksperimentalnom dijelu provedena je usporedba rezultata težine zadanih utega mjerenih na vagi te pomoću dinamometra. Utezi su potom iskorišteni za umjeravanje dinamometara po mjernim točkama sukladno normi HRN EN ISO 376:2011. Korišteni su dinamometri vrijednosti od 200, 500 i 1000 N kako bi se dobila bolja rezolucija rezultata pri manjim vrijednostima sile. Analizirani su dobiveni rezultati umjeravanja pomoću utega te su dati određeni zaključci.

Ključne riječi: utezi, umjeravanje sile, dinamometar

SUMMARY

The calibration procedure is one of the basic tools for maintaining the measurement traceability, and thus the accuracy and precision of devices for testing mechanical properties. The paper observes the results obtained during calibration using weights of different values. The literature presents the procedures for maintaining the measurement traceability of devices for measuring force and mass.

In the experimental part, a comparison of the results of the given weights measured on a scale and with a force transducer was performed. The weights were then used to calibrate the force transducer at measuring points in accordance with the standard HRN EN ISO 376: 2011. 200, 500 and 1000 N force transducers were used to obtain better resolution results at lower force values. The obtained results of weight calibration were analyzed and certain conclusions were given.

Keywords: weights, force calibration, force transducer

1 UVOD

Prve naznake o mjerenju sile vuče korijene još iz 15. stoljeća, kada je Leonardo da Vinci proveo istraživanje opterećenja savijanjem, koje je proizišlo iz pokušaja pojašnjenja savijanja užeta preko koluta. Približno stotini godina nakon toga Galileo Galilei provodi ispitivanje nosivosti grede koja je pričvršćene za zid jednostrano te dobivene rezultate formuliše u rečenici: “Čvrstoća raste proporcionalno širini, ali s kvadratom visine grede“ [1].

Sila je u mnogim znanstvenim disciplinama, tehnologiji i tehnici jedna od temeljnih fizikalnih veličina. To je vektorska fizikalna veličina pomoću koje se opisuje svaki utjecaj na promjenu strukture i oblika tijela te promjenu brzine tijela ili čestice odnosno međudjelovanje fizikalnih sustava ili međudjelovanje polja i sustava. Sila je vektorska veličina i to znači da ima određeni smjer djelovanja i iznos. Osnovna mjerna jedinica sile je njutn (N). Klasična fizika izdvaja četiri temeljne sile: slabu i jaku nuklearnu, gravitacijsku i elektromagnetsku, a sve ostale sile proizlaze iz navedenih [2,3].

Masa je osnovno fizikalno svojstvo svih tijela, to je veličina koja karakterizira količinu tvari u tijelu. To je zapravo otpor koji tijelo pruža promjeni svoje brzine ili položaja nakon primijene sile. Što je veća masa tijela, manja je promjena koju stvara primjenjena sila. Masa i težina se često zamjenjuju što nije ispravno jer su te dvije fizikalne veličine različite. Masa je apsolutna i izražava se u kilogramima (kg) dok težina zavisi o gravitaciji i izražava se u njutnima (N). Masu nekog tijela možemo odrediti vaganjem tako da se masa tijela usporedi s poznatom masom utega [4,5].

2 MJERENJE SILE

2.1 Općenito o sili

Kada se silom djeluje na određeno tijelo može doći do različitih posljedica. Ovisno o obliku i izvoru sile kojom se djeluje na određeno tijelo mogu biti:

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

Djelovanje sile na tijelo se u znanostima o materijalima prvenstveno proučava radi promatranja ponašanja materijala tijela i pomoću tih promatranja se određuju mnoga mehanička svojstva pojedinih materijala, koja su blisko povezana uz promjenu oblika materijala, tj. ispitnog tijela. S obzirom na to da je sila vektorska veličina, sile kojima se djeluje na materijale mogu se razlikovati u iznosima i mogu različitim načinima djelovati na materijal. Prema tome razlikujemo nekoliko različitih opterećenja na materijal: tlak, vlak, torzija, smik, savijanje, potom dugotrajno te kratkotrajno opterećenje, dinamičko te statičko opterećenje itd [6].

Silu i djelovanje sile opširnije se definiraju pomoću tri Newtonova zakona:

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 koja djeluje na tijelo, a zbiva se u smjeru djelovanja sile.

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

Kada je rezultantna sila F koja djeluje na određeno tijelo mase m različita od nule, tada će se to tijelo gibati ubrzanjem a . II. Newtonov zakon se prikazuje formulom:

$$F = m \times a \quad (1)$$

Na II. Newtonovom zakonu temelji se i definicija mjerne jedinice za silu, no on ipak nije prikladan kao primarni princip za mjerenje sile, nego se većina mjerenja izvršava na tijelima koja su u ravnoteži [7].

2.2 Metode mjerenja sile

Svojstva nekog dijela, materijala ili čitavog stroja temelje se preko mjerenja sile, stoga je mjerenje sile vrlo važno. Mjerenje sile vrlo je važno i radi sigurnosti strojeva, njihovoj montaži i mogućnosti njihovih primjena, kao i zbog razumijevanja i nadziranja radnji za koje je stroj konstruiran. Mjerenja koja su u skladu s propisanim zahtjevima imaju i izniman ekonomski utjecaj na neki proces ili uređaj te jamče pouzdanost uređaja.

Najvažnija, prilikom svakog mjerenja sile, je točnost mjerila i mjerenja te njihova usklađenost s mjerenjima drugih korisnika i istovrsnim mjerilima, neovisno o razlikama u lokaciji i vremenu mjerenja. Mogućnost toga ostvarena je postojanjem raznih etalona za silu, njihovim umjeravanjem i osiguranjem sljedivosti te postizanjem odgovarajućih mjernih nesigurnosti. Sumnja u rezultat mjerenja naziva se mjerna nesigurnost. Ona je pokazatelj koliko izmjereni rezultat odstupa od stvarne vrijednosti mjerene veličine. To je jedan od ključnih faktora za osiguranje mjerne sljedivosti [5].

Mjerenje sile provodi se jednom od dviju metoda: direktna ili indirektna.

Direktna metoda objedinjuje izravnu usporedbu s poznatom gravitacijskom silom utega normirane mase. Vrijednosti gravitacije i mase moraju biti precizno znane. Direktnu metodu primjenjuju uređaji nazvani vagama za mjerenje sile, a njihova osjetljivost ovisi o konstrukcijskim parametrima.

Indirektna metoda uključuje mjerenje učinka sile na određeno tijelo. Metoda se primjenjuje prilikom:

- mjerenja akceleracije tijela poznate mase koje je izloženo djelovanju sile
- mjerenje deformacije kada se silom djeluje na elastične elemente.

Metoda mjerenja akceleracije u primjeni je vrlo ograničena. Uzrok toga je što sila koja se određuje zastupa rezultatnu silu koja se sastoji od više komponenti nepoznatih sila. Iz toga proizlazi da se vrijednosti svake komponente nepoznate sile ne mogu odrediti.

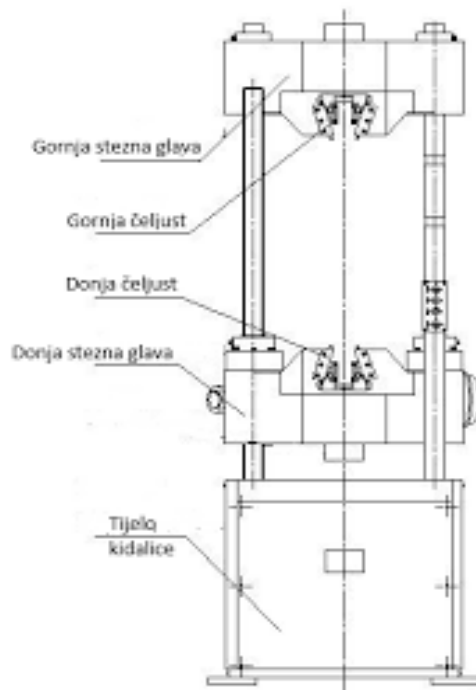
Veća mogućnost primjene javlja se kod metode s elastičnim elementima. Najčešći elastični elementi su nosači, prstenovi, opruge, jednoosno opterećeni članci te razne vrste i tipovi mjernih ćelija.

Veliku važnost prilikom mjerenja sile prinosi aksijalnost. Svaka sila koja djeluje na tijelo može se kao vektorska veličina rastaviti na tri komponente prema Kartezijevom koordinatnom sustavu,

a njihova ravnoteža se može promatrati zasebno u smjeru svake od tri osi sustava. Mnogi mjerni sustavi često reagiraju pravilno samo na sile uzduž glavne osi mjernog sustava, a ako aktivne sile imaju i komponente u drugim smjerovima, rezultati mjerenja mogu biti netočni [5].

2.3 Uređaji za mjerenje sile

Uređaji za mjerenje sile, osim što se razlikuju po metodi mjerenja sile, razlikuju se i po konstrukciji i po načinu ostvarivanja opterećenja, a jedna od važnijih razlika je namjena uređaja. Za namjenu opreme za mjerenje sile, potrebno je razlikovati umjernu opremu i opremu za mjerenje sile. Oprema za mjerenje sile obuhvaća sve uređaje kojima se na korištenom uzorku primjenom određenoga mehanizma opterećivanja postiže i evidentira određena vrijednost sile. Tu spadaju razne vrste preša i kidalice. Umjerna oprema je prije svega namijenjena za umjeravanja te je njezina preciznost ključna jer su mjerna sposobnost i točnost uvijek za klasu više ispravniji od opreme koja se umjerava. Poveznica tih dviju skupina je postupak umjeravanja jer se mjerna sljedivost mjerenja sile ostvaruje na taj način. Umjerna oprema se također koristi za mjerenje vrijednosti određenih sila [1]. Slika 1 prikazuje dijelove kidalice, a slika 2 prikazuje hidrauličnu prešu.



Slika 1. Dijelovi kidalice [8]



Slika 2. Hidraulična preša [9]

2.4 Sljedivost mjerenja sile

Mjeriteljska sljedivost je svojstvo mjernoga rezultata preko kojih se taj rezultat povezuje s navedenom referencijom dokumentiranom neprekinutim lancem umjeravanja, od kojih svako pridonosi utvrđenoj mjernoj nesigurnosti. Primarni etalon za silu je onaj od kojega sljedivost uređaja za mjerenje sile te njihovih rezultata mjerenja počinje. Pošto je jedinica za silu njutn (N) izvedena jedinica u SI sustavu mjernih jedinica, proizlazi da međunarodnoga primarnog etalona za silu nema, već postoje primarni etaloni za silu za određeno mjeriteljsko područje ili za određenu državu [1].

Osnovni elementi određivanja sljedivosti su:



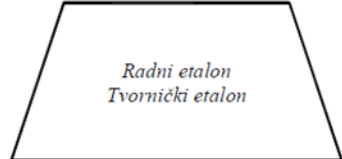
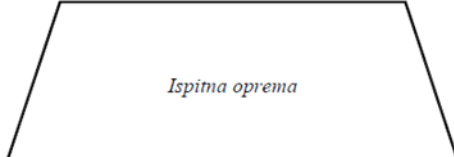
- upućivanje na SI jedinice,
- dokumentacija za svaki korak u lancu,
- mjerodavnost laboratorija i tijela koji provode neke korake u lancu mora biti potkrijepljena dokazima,
- mjerna nesigurnost (za svaki dio lanca te za čitav lanac),
- neprekinuti lanac usporedbi kojim se može doći do etalona najviše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

- ponovna umjeravanja u određenim vremenskim periodima.

Ovisno o korištenim etalonima i mjerilima, te ovisno o njihovom položaju u lancu usporedbi, sljedivost se može ostvariti na nekoliko načina:

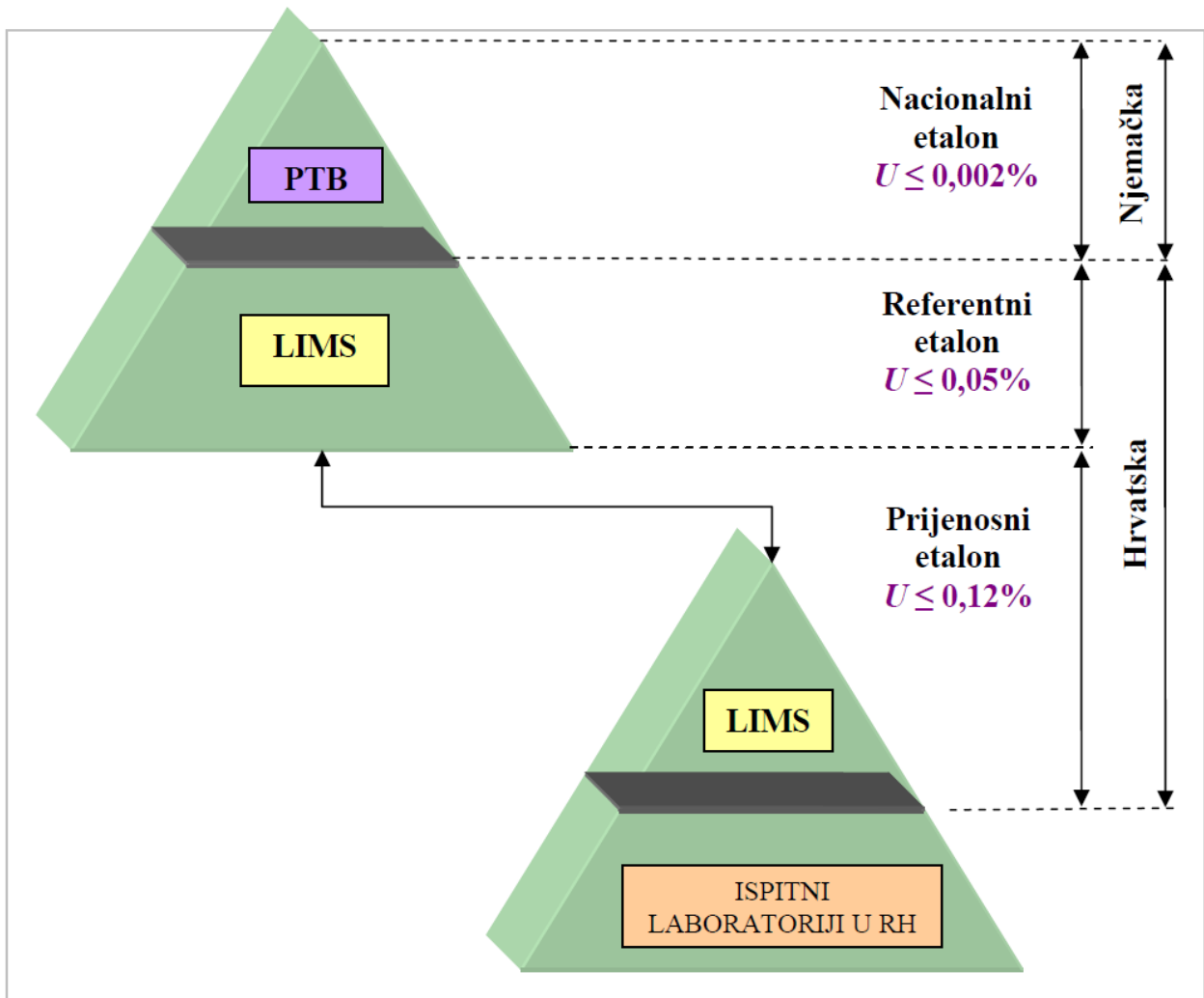
- do definicijskog etalona,
- do međunarodnog etalona,
- preko državne mjeriteljske ustanove,
- preko ovlaštenog laboratorija,
- preko umjernog laboratorija same tvrtke [6].

Neprekinuti lanac usporedbi koji osigurava sljedivost određuje piramidu sljedivosti. Etaloni i mjerni uređaji u piramidi su posloženi hijerarhijski prema svojoj mjeriteljskoj kakvoći. Korištenjem etalona više razine vrši se umjeravanje etalon niže razine i tako nadalje do mjerila i ispitne opreme kao što je npr. kidalica, koja se nalazi na najnižoj razini piramide. Stoga, umjeravanje se vrši od vrha piramide prema dnu [6]. Slika 3 prikazuje piramidu sljedivosti posloženu hijerarhijski prema svojoj mjeriteljskoj kakvoći.

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

Slika 3. Piramida sljedivosti [10]

Republika Hrvatska nema nacionalnog etalona za silu, već se odgovarajući nacionalni etalon u našem dijelu Europe nalazi u njemačkom nacionalnom mjeriteljskom institutu PTB (Physikalisch–Technische Bundesanstalt). Ali s obzirom na to Laboratorij za ispitivanje mehaničkih svojstava Fakulteta strojarstva i brodogradnje ovlašten je laboratorij za umjeravanje u kojem se nalazi referentni etalon za silu [6]. Slikom 4 prikazana je piramida sljedivosti etalona za silu za Republiku Hrvatsku.



Slika 4. Piramida sljedivosti etalona u Hrvatskoj s pripadnim proširenjima mjernim nesigurnostima [11]

2.5 Etaloni sile

2.5.1 Općenito o etalonima sile

Etalon se općenito definira kao materijalizirana mjera, mjerilo, referencijska tvar ili mjerni sustav namijenjen za ostvarivanje, određivanje, obnavljanje ili čuvanje jedinice jedne ili više vrijednosti veličine da bi mogli poslužiti kao referencija [12]. Etalon služi kako bi se pomoću njega uspoređivale sukladne mjere ili mjerila te kako bi posljednji korisnik dobio zadovoljavajuću pouzdanost mjerenja i točnost. Važno u slučaju sile je da etalon nije materijalizirana mjera (kao npr. 1 kilogram), nego mjerilo.

Etalon najviše mjeriteljske kakvoće koristi se kao primarni etalon i to isključivo prilikom usporedbi s referentnim ili rezervnim etalom te se ne koristi za izravna mjerenja. Vrijednosti primarnog etalona prihvaćaju se bez apeliranja na druge etalone iste kakvoće.

Radi činjenice da je Newton izvedena jedinica u SI sustavu, primarni etalon na međunarodnoj razini kod etalona za silu ne postoji, nego su primarni nacionalni etaloni za silu na najvišoj razini mjeriteljstva. Oni zastupaju osnovu pomoću koje se utvrđuju vrijednosti ostalih etalona, jer su oni na najvišoj razini piramide sljeđivosti. Oni se radi toga ne mogu sami umjeriti u nekom drugom etalonu, već se njihova mjeriteljska kakvoća provjerava putem programa međulaboratorijskih usporednih ispitivanja. Kod primarnih nacionalnih etalona sila se ostvaruje izravno, isključivo preko utega, a ne putem poluga ili sličnih elemenata, prilikom čega je masa utega određena preko referentnih etalona mase, a posljedica toga je relativna nesigurnost mjerenja manja ili jednaka 2×10^{-5} [6]. Slika 5 prikazuje primarni etalon za silu nazivne sile 1 MN u PTB-u.



Slika 5. Primarni etalon za silu nazivne sile 1MN, PTB, Njemačka [13]

U piramidi sljedivosti referentni etaloni se nalaze na jednoj razini niže od nacionalnih etalona, a posjeduju najvišu mjeriteljsku kakvoću na određenom području, u kojem se koriste za sva mjerenja, te se tako osigurava sljedivost između nacionalnog etalona te ostalih etalona i mjerila. Referentni etaloni se nalaze u akreditiranim umjernim laboratorijima. To su stabilni uređaji za mjerenje sile, različitih najboljih mjernih sposobnosti, koje ovise o mehanizmu opterećenja [6]. U tablici 1 prikazani su tipovi referentnih etalona prema mehanizmu opterećivanja uz njihove pripadajuće nesigurnosti, te se može vidjeti kako je mjerna nesigurnost najmanja kod opterećenja utezima (što je ujedno i razlog da se sila tako ostvaruje kod primarnih etalona).

Tablica 1. Tipovi referentnih etalona prema mehanizmima opterećenja i njihove pripadne najbolje mjerne sposobnosti [14]

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

2.5.2 Prijenosni etaloni sile

Prijenosni etaloni koriste se prilikom prijenosa vrijednosti sile na različita mjesta, ponekad su zbog toga i posebne konstrukcije. Oni se koriste za umjeravanje drugih etalona ili uređaja za mjerenje sile koji se nalaze na nižoj mjeriteljskoj razini u odnosu na referentni etalon, a sami se umjeravaju pomoću referentnih etalona, a ponekad i primarnih.

Prijenosni etaloni pretežito pripadaju mjerilima sile s elastičnim elementom te se sastoje od četiri osnovne komponente:

- dinamometar određenog razreda sile,
- mjerno pojačalo,
- uređaj za očitavanje,
- kablovi kojima se ostvaruje fizička veza između komponenti.

Mjerno pojačalo te uređaj za očitavanje najčešće čine jedan sklop. Cijeli skup može zajedno biti priključen i na računalo, pomoću kojega se znatno ubrzava i olakšava prikupljanje i obrada podataka umjeravanja [6]. Slika 6 prikazuje kompletan pribor za umjeravanje prijenosnim etalomom.



Slika 6. Kompletan pribor prijenosnog etalona [15]

Dinamometri se razlikuju prema vrsti deformacije i prema smjeru opterećenja.

Moguće deformacije su:

- promjena volumena,
- promjena duljine,
- magnetna ili električna promjena.

Opterećenje može biti:

- tlak,
- vlak,
- univerzalno (tlak i vlak).

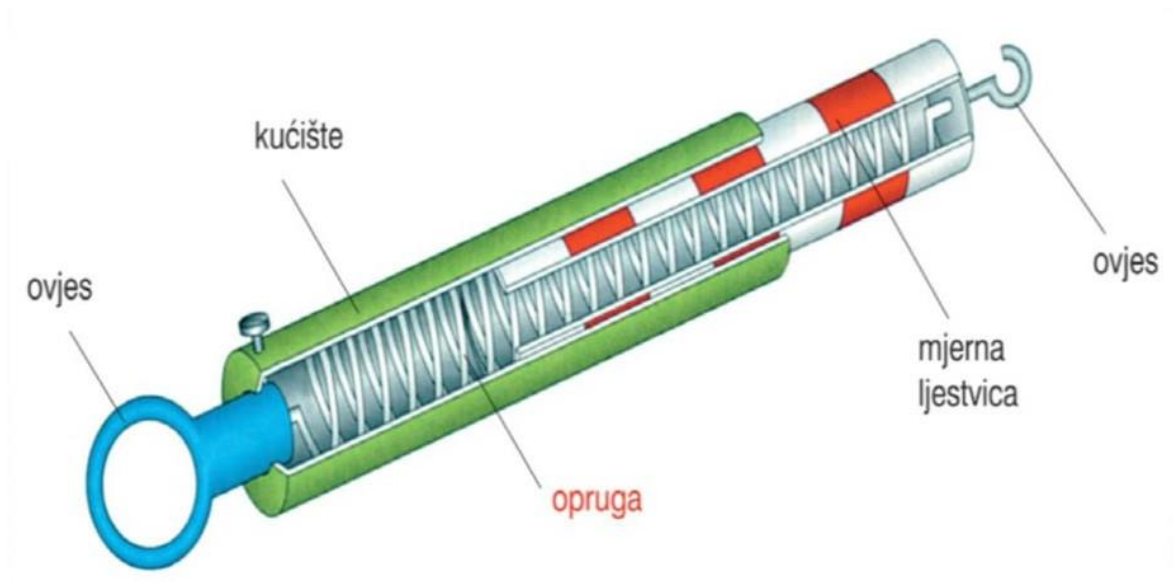
Dinamometar se sastoji od tri osnovna elementa: kućišta, elastičnog elementa te elementa s određenim električnim otporom, npr. DMS mjerne trake učvršćene na elastični element.

Primarne funkcije kućišta su:

- onemogućiti ometanje mjerenja nepoželjnim silama,
- štititi unutarnje elemente od vanjskih utjecaja,
- omogućiti pravilan prijenos sile,

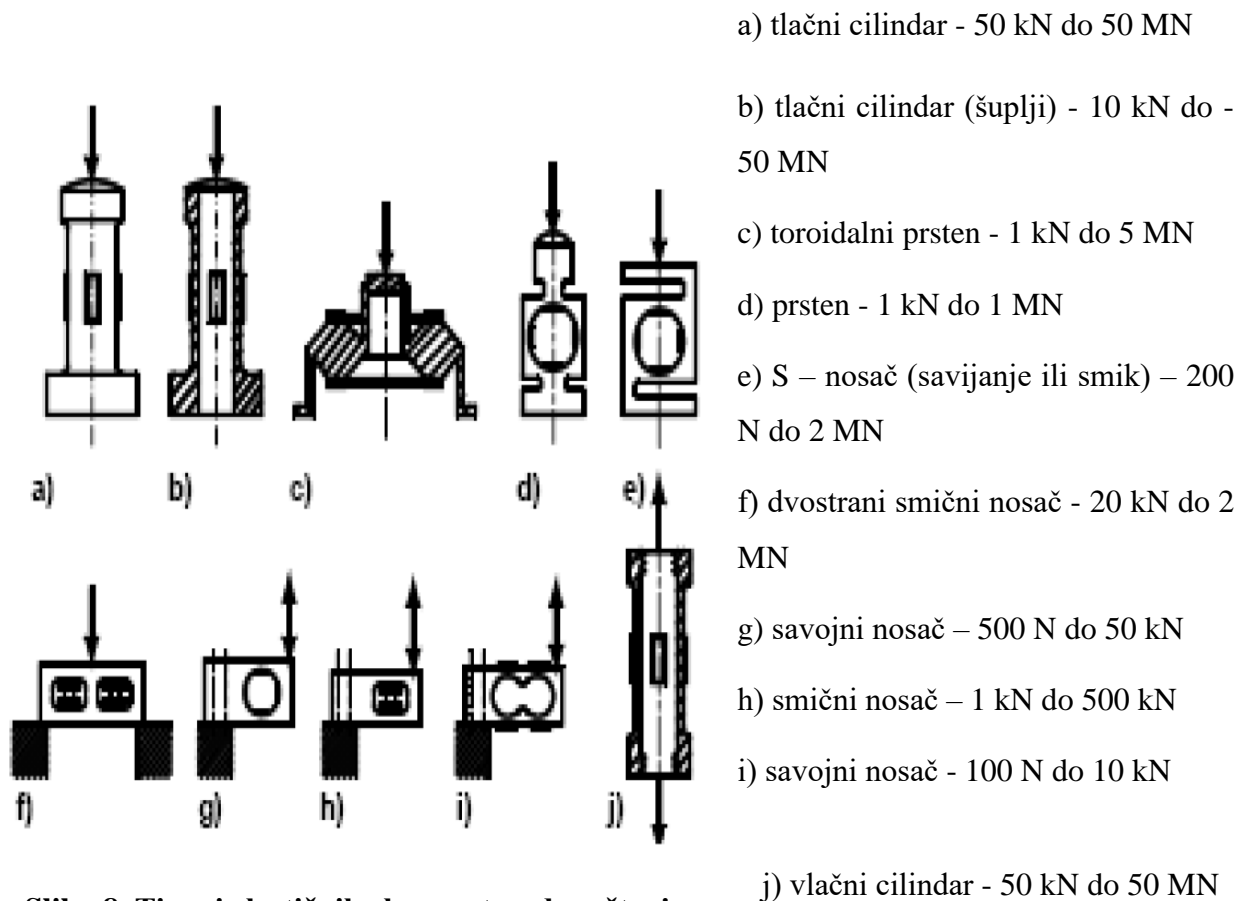
- omogućiti montažu dinamometra u drugi uređaj [6].

Slikom 7 prikazan je primjer dinamometra s označenim dijelovima.

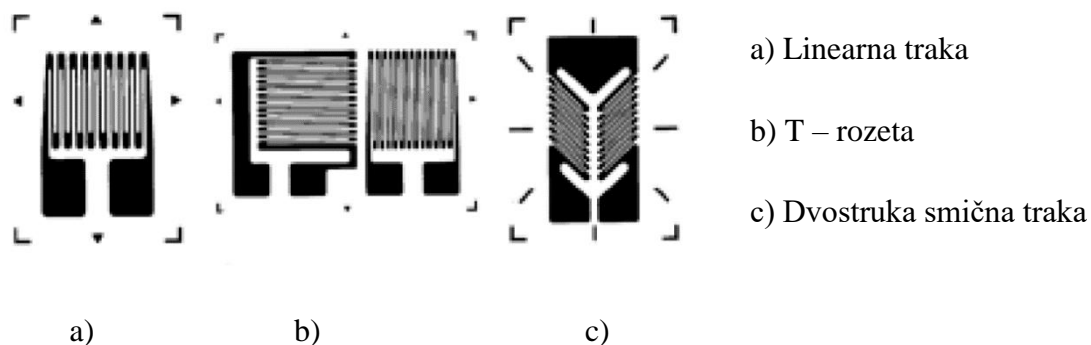


Slika 7. Dinamometar [16]

Elastični elementi mogu biti mjerne ćelije, opruge, prstenovi itd. U odnosu na mehaničke elemente, njihova prednost je veća preciznost povezana s manjom masom. Mjerenje sile se izvršava indirektno pomoću takvih elemenata [2]. Slika 8 prikazuje neke od oblika elastičnih elemenata. Slika 9 prikazuje neke od tipova DMS traka.



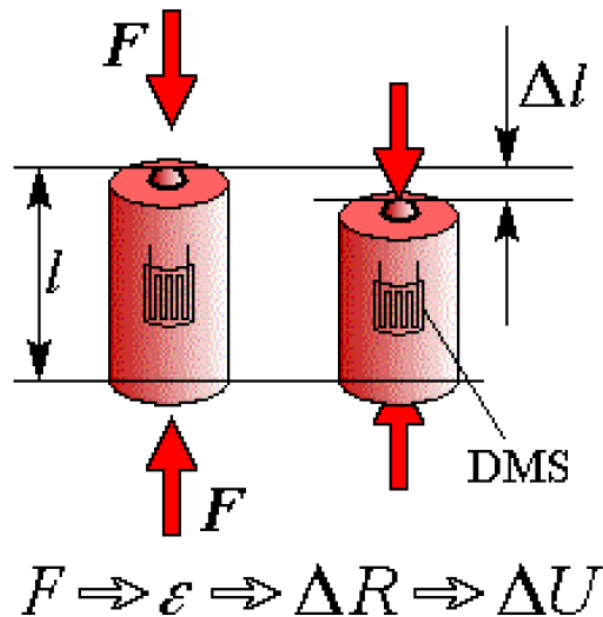
Slika 8. Tipovi elastičnih elemenata s dopuštenim opterećenjima [2]



Slika 9. Tipovi DMS traka [2]

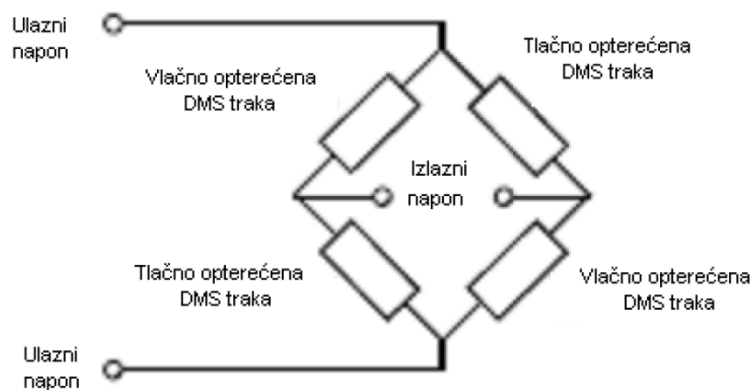
Mjerenja sile prijenosnim etalonom opisan je sljedećim principom:

Prilikom djelovanja određene sile na dinamometar, odnosno na deformacijsko tijelo, on će se skraćivati ili produljivati, ovisno o smjeru primijenjene sile. Zajedno uz njega će se deformirati i DMS trake. DMS trake su zavojnice od metalne trake ili folije koje imaju određeni električni otpor koji je u ovisnosti o njihovim dimenzijama. Prilikom stezanja ili širenja traka, mijenja se i njihov otpor [6]. Slika 10 prikazuje primjer indirektnog mjerenja sile pomoću DMS traka.



Slika 10. Primjer indirektnog mjerenja sile pomoću DMS traka [13]

DMS trake povezuju se u Wheatstoneov most. Preko promjene otpora traka dobiva se promjena napona u mostu koju je jednostavnije zabilježiti i očitati. Ona se izražava jedinicom mV/V. Slika 11 prikazuje položaj DMS mjernih traka u Wheatstoneovom mostu.



Slika 11. Položaj DMS mjernih traka u Wheatstoneovom mostu [2]

Promjena otpora proporcionalna je promjeni sile, a promjena napona je proporcionalna promjeni otpora pa je automatski i napon proporcionalan sa silom. Slika 12 prikazuje neke od dinamometara prijenosnih etalona Laboratorija za ispitivanje mehaničkih svojstava.



Slika 12. Dinamometri prijenosnih etalona LIMS-a [10]

3 Mjerenje mase

3.1 Realizacija definicije kilograma

Definicija kilograma se realizira u Laboratoriju za masu i gustoću, u sklopu Državnog zavoda za mjeriteljstvo. Kilogram nije definiran pomoću prirodnih konstanti, već pomoću nekog fizičkog artefakta te je on posljednja jedinica SI sustava koja je tako definirana. Pri definiranju se koriste artefakti kilograma, odnosno etaloni mase [17]. Slika 13 prikazuje nacionalni etalon kilograma Republike Hrvatske.



Slika 13. Nacionalni etalon kilograma Republike Hrvatske [17]

3.2 Područje usporedbenih mjerenja

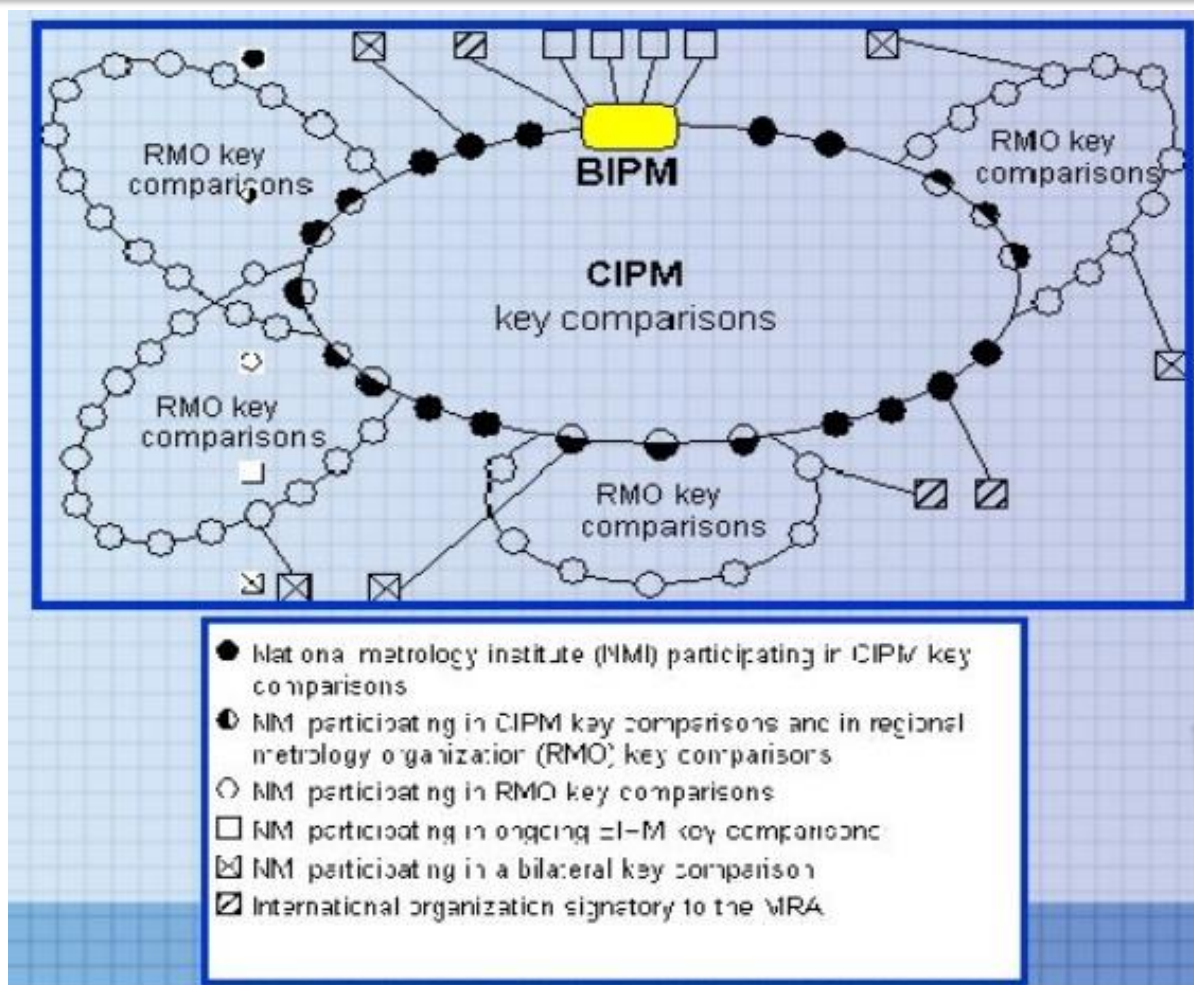
Izjave o mjernoj sposobnosti (CMC) pojedinog nacionalnog mjeriteljskog instituta dobivene su preko rezultata procesa usporedbenog mjerenja. Njihove sposobnosti nalaze se u bazi podataka ključnih usporedbi BIPM, koja je poznatija i kao KCDB baza [18].

Grane usporedbenih mjerenja za masu:

- Gustoća
- Viskozitet
- Tečnost fluida
- Pritisak
- Sila
- Gravitacija
- Mjeriteljstvo materijala
- Standardi mase
- Tvrdoća
- Torzija

3.3 Struktura usporedbenih mjerenja

Prilikom izrade Sporazuma o međusobnom priznavanju (MRA) Međunarodni odbor za utege i mjere (CIPM) kreirao je shemu za organizaciju ključnih usporedbi. Shema je poznata kao i shema Mickey-evih ušiju radi njenog neobičnog oblika [18]. Slika 14 prikazuje organizacijsku shemu ključnih usporedbi.



Slika 14. Organizacijska shema ključnih usporedbi [19]

Regionalne mjeriteljske organizacije (RMO) su od velike važnosti u Sporazumu o međusobnom priznavanju (MRA) izdanom od strane Međunarodne komisije za utege i mjere (CIPM). Njihova odgovornost je provođenje ključne usporedbe na razini svoje regije, objavljivanje dodatnih usporedbi i drugih akcija kako bi podržali međusobno povjerenje u ispravnost certifikata za umjeravanje i mjerenje svojih članova. Odgovornost im obuhvaća i koordinaciju ulaska svojih članica, nacionalnih instituta u „Dodatak C“ sporazuma o međusobnom priznavanju koji se odnosi na mjeriteljske sposobnosti i umjeravanja te sve to kroz Zajednički odbor regionalnih mjeriteljskih organizacija i BIPM-a (JCRB). „Dodatak C“ zastupa alat pomoću kojega se mogu pretraživati baze podataka svih radova iz područja mjeriteljstva te se nalazi na BIPM-ovim stranicama [17-19].

3.4 Tipovi usporedbenih mjerenja

Ključne usporedbe mjerenja dijele na dvije vrste:

- CIPM ključne usporedbe, međunarodnog opsega, provođene od strane sudionika koji posjeduju najvišu razinu vještine mjerenja i ograničeni su na laboratorije država članica. One pružaju „referentnu vrijednost“ odabrane ključne veličine.
- RMO ključne usporedbe, regionalnog opsega, organizirane su na regijskoj razini (premda dodatni sudionici iz drugih regija mogu biti uključeni) te su dostupne državama članicama i laboratorijima suradnicima. Te temeljne usporedbe pružaju dopunske informacije bez izmjene referentne vrijednosti [17].

Dodatna usporedbena mjerenja ili pilot studije često se navodi kao treća vrsta usporedbenih mjerenja.

Razlika između regionalnih i međunarodnih usporedbenih mjerenja je osim okvira u kojem se odvijaju i u rezultatima. Do referentne vrijednosti ključne usporedbe (key comparison reference value) dolazi se preko međunarodnih usporedbenih mjerenja. Iskazivanje referentnih vrijednosti se provodi na osnovi mjerenja provedenih u usporedbi zajedno s pripadnom standardnom nesigurnosti. Za ključne usporedbe koje se odvijaju na regionalnoj razini, veza na referentnu vrijednost se izražava kao poveznica na rezultate instituta koji sudjeluju i u međunarodnim ključnim usporedbama. Metoda određivanja referentne vrijednosti dio je protokola usporedbe te je određena od strane Savjetodavnog odbora ili nadležne radne grupe kojoj je Savjetodavni odbor udijelio zadatak [17,18].

Stupanj u kojem je izmjerena vrijednost u skladu s referentnom vrijednosti naziva se faktor slaganja.

Regionalne i međunarodne usporedbe nisu jedine, postoje još i dodatne usporedbe, a njih najčešće provode regionalne mjeriteljske organizacije kako bi zadovoljile specifične potrebe koje ključnim usporedbama nisu pokriveno. Kada je broj sudionika sposobnih za provođenje određenog mjerenja mali ili kada je distribucija uzoraka mjerenja ograničena, savjetodavni odbori mogu pokrenuti i dodatnu usporedbu [18].

3.5 Protokol usporedbenih mjerenja

Savjetodavni odbori odabiru međunarodne ključne usporedbe koje će biti provedene. U svim područjima mjeriteljstva odabire se određeni broj ključnih usporedbi pomoću kojih se nastoje testirati glavne tehnike mjerenja.

Procedura koju odbori koriste prilikom odabira, vrednovanja i izvođenja ključnih usporedbi, osmišljene su načinom da:

- Usporedbe testiraju sve glavne mjerne tehnike u odgovarajućem području.
- Dobiveni rezultati budu jasni i nedvojbjeni.
- Dobiveni rezultati budu robusni.
- Dobiveni rezultati budu usporedivi s rezultatima usporedbi koji će biti izvođeni na regionalnoj razini.
- Budu dostatne u učestalosti i rasponu za demonstrirati i održati jednakost između laboratorija koji sudjeluju u CIPM MRA-u [17].

Svi laboratoriji koji imaju tehničko znanje te iskustvo imaju otvoreni pristup za sudjelovanje u međunarodnoj ključnoj usporedbi (CIPM key comparison). To su obično laboratoriji članovi odgovarajućih savjetodavnih odbora. Laboratoriji koji nisu nacionalni mjeriteljski instituti i oni koji nisu članovi savjetodavnih odbora moraju biti nominirani od strane određenog nacionalnog mjeriteljskog instituta koji je zadužen za pripadajuće nacionalne mjerne etalone. Savjetodavni odbori prilikom procesa odabira sudionika trebaju uzeti u obzir odgovarajuću regionalnu zastupljenost. Zbog tehničkih razloga broj laboratorija sudionika u međunarodnim ključnim usporedbama može biti ograničen.

Svi članovi regionalnih mjeriteljskih organizacija te druge institucije koje zadovoljavaju pravila regionalnih organizacija i koje imaju tehničku sposobnost odgovarajuću za određenu usporedbu imaju otvoreni pristup sudjelovanju u regionalnim ključnim usporedbama. Za sudjelovanje u dodatnim regionalnim usporedbama vrijede jednaka pravila [17,18].

4 Eksperimentalni dio

4.1 Plan eksperimenta

U eksperimentalnom dijelu projekta proveden je postupak mjerenja težine utega, koji su prethodno bili podloženi postupku nitriranja radi njihove zaštite od adhezijskog trošenja prilikom budućeg korištenja. Dobiveni rezultati mjerenja su obrađeni te je provedena analiza rezultata. Pomoću dinamometra HBM Z30A 200 N i pojačala HBM DMP40 izmjerene su četiri vrste utega nazivne sile 10 N, 20 N, 50 N i 100 N.

Umjeravanje utega izvršeno je na kidalici Erichsen Krasftmessgeräte – Prüfmaschinen tipa: 474 – 2KN, broja: 71114

Umjeravanje je planirano postupno s varijacijama pripremljenih dostupnih utega da se zadovolji umjeravanje po 10% vrijednosti 1000 N.

4.2 Postupak mjerenja težine utega

Utezi koji su odabrani za planirano umjeravanje, podvrgnuti su 2016. godine postupku umjeravanja mase u Nacionalnom umjernom laboratoriju za masu i gustoću, Zagreb, Potvrda o umjeravanju: 01Int/16. U tablici 2 prikazane su vrijednosti konvencionalne mase i težine označenih utega dobivene umnoškom s referentnom vrijednosti ubrzanja zemljine sile teže Laboratorija za ispitivanje mehaničkih svojstva u vrijednosti od $g=9,80663 \text{ m/s}^2$.

Tablica 2. Vrijednosti konvencionalne mase i težine utega

| Oznaka | Konvencionalna masa, mg | Težina, N |
|--------------|-------------------------|------------|
| Nosač 10 N-0 | 1020052 | 10,0032725 |
| 10-1 | 1019880 | 10,0015858 |
| 20-1 | 2040040 | 20,0059175 |
| 20-2 | 2040003 | 20,0055546 |
| 20-3 | 2040070 | 20,0062117 |
| 20-4 | 2040245 | 20,0079278 |
| 20-5 | 2039940 | 20,0049368 |
| 20-6 | 2040198 | 20,0074669 |
| 20-7 | 2040103 | 20,0065353 |
| 20-8 | 2040097 | 20,0064764 |
| 20-9 | 2040265 | 20,0081239 |
| 50-1 | 5098462 | 49,9987304 |
| 50-2 | 5098865 | 50,0026825 |
| 50-3 | 5097957 | 49,9937780 |
| 50-4 | 5097917 | 49,9933858 |
| 50-5 | 5097870 | 49,9929249 |
| 50-6 | 5098567 | 49,9997601 |
| 50-7 | 5099063 | 50,0046242 |
| 50-8 | 5099030 | 50,0043006 |
| 50-9 | 5098850 | 50,0025354 |

Uteg vrijednosti 10 N, 9 utega vrijednosti 20 N, 9 utega vrijednosti 50 N i 4 utega vrijednosti 100 N prvotno su bili nitrirani u Laboratoriju za toplinsku obradu Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Nakon toplinske obrade utezi su bili ručno počišćeni te naknadno umjereni. Slike 15, 16, 17 i 18 prikazuju utege nakon procesa čišćenja.



Slika 15. Uteg nazivne vrijednosti 10 N



Slika 16. Uteg nazivne vrijednosti 20 N



Slika 17. Uteg nazivne vrijednosti 50 N



Slika 18. Uteg nazivne vrijednosti 100 N

Postupak umjeravanja isplaniran je postepeno s varijacijama pripremljenih dostupnih utega da se zadovolji umjeravanje po 10% vrijednosti 1000 N. Za postupak umjeravanja pripremljeno je 23 utega od kojih je svaki po potrebi označen brojkom od 1 do maksimalno 9 (20-1 do 20-9, 50-1 do 50-9 te 100-1 do 100-4). Uz utege se dodatno pridodaje baza na koju se utezi stavljaju u vrijednosti od 10 N. U tablici 2 prikazani su koraci dodavanja primjerenih utega da se zadovolji umjeravanje po 10% vrijednosti 1000 N.

Tablica 3. Koraci dodavanja primjerenih utega

| Nazivna vrijednost, N | Baza, N | Uteg 10 N | Uteg 20 N | Uteg 50 N | Uteg 100 N |
|-----------------------|---------|-----------|-----------|-----------|------------|
| 20 | 10 | 10-1 | | | |
| 40 | | | 20-1 | | |
| 60 | | | 20-2 | | |
| 80 | | | 20-3 | | |
| 100 | | | 20-4 | | |
| 120 | | | 20-5 | | |
| 140 | | | 20-6 | | |
| 160 | | | 20-7 | | |
| 180 | | | 20-8 | | |
| 200 | | | 20-9 | | |
| 250 | | | | 50-1 | |
| 300 | | | | 50-2 | |
| 350 | | | | 50-3 | |
| 400 | | | | 50-4 | |
| 450 | | | | 50-5 | |
| 500 | | | | 50-6 | |
| 550 | | | | 50-7 | |
| 600 | | | | 50-8 | |
| 700 | | | | | 100-1 |
| 800 | | | | | 100-2 |
| 900 | | | | | 100-3 |
| 1000 | | | | | 100-4 |

4.3 Postupak mjerenja

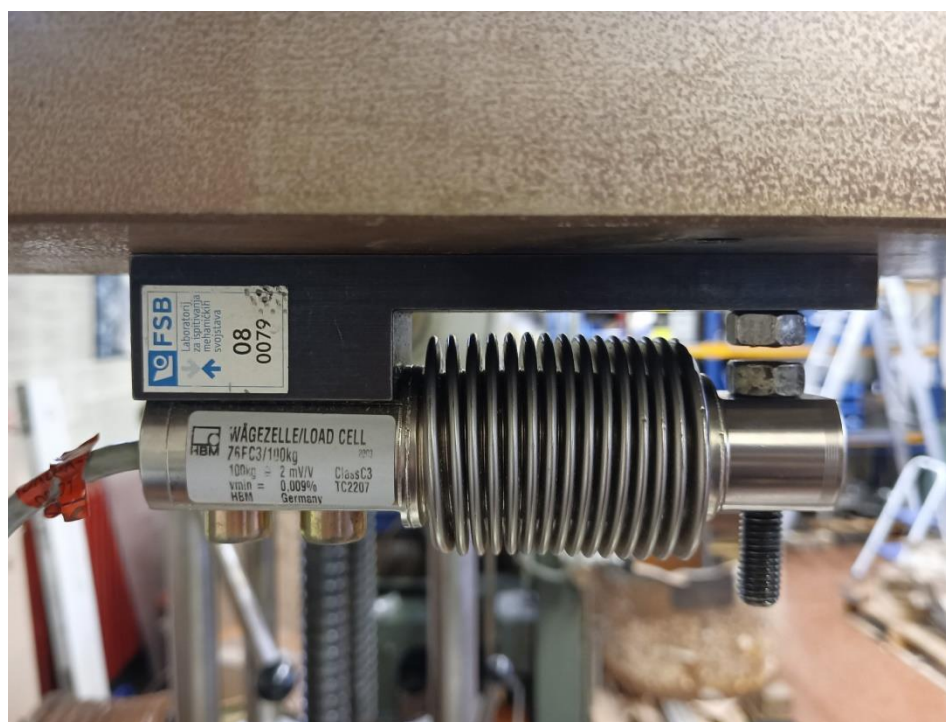
Utezi su mjereni pomoću dinamometara HBM Z30A 200 N, HBM U1 500 N, HBM Z6FC3 1000 N i mjernog pojačala HBM DMP 40. Nakon spajanja pojačala na dinamometar te dinamometra na kidalicu, na bazu mjerenja postavilo se nekoliko utega kako bi se dinamometar opteretio te je provedeno nekoliko testnih mjerenja kako bi se cijeli sustav mogao pravilno kalibrirati. Nakon kalibracije svaki uteg se pojedinačno stavljao na bazu te se pričekalo nekoliko sekundi kako bi se pojačalo stabiliziralo na određenoj vrijednosti. Vrijednost se evidentirala, uteg se maknuo, ponovno se pričekalo nekoliko sekundi da pojačalo prikaže početnu nulu te se nakon toga stavljao drugi uteg i tako se proces ponavljao dok svim pripremljenim utezima nisu bile izmjerene vrijednosti. Slike 19, 20, 21, 22 i 23 prikazuju navedene dinamometre, pojačalo i kidalicu.



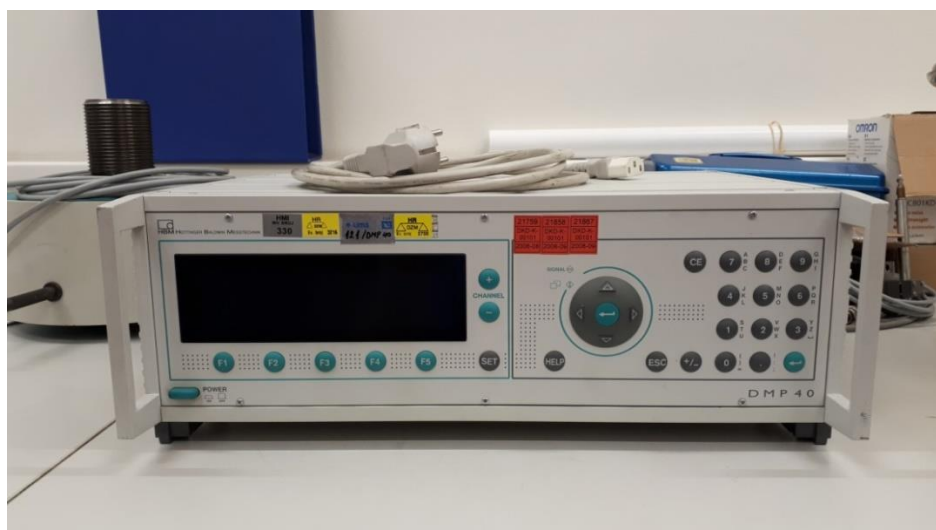
Slika 19. Dinamometar HBM Z30A 200 N



Slika 20. Dinamometar HBM U1 500 N



Slika 21. Dinamometar HBM Z6FC3 1000 N



Slika 22. Pojačalo HBM DMP 40



Slika 23. Kidalica Laboratorija za mehanička ispitivanja Fakulteta strojarstva i brodogradnje

4.4 Rezultati mjerenja

Nakon navedenog postupka mjerenja dobivene su vrijednosti težine svakog pojedinačnog utega u njutnima te se uz njih izračunalo odstupanje izmjerenih vrijednosti od očekivanih izraženih u postotcima. U tablici 4 prikazani su rezultati mjerenja težine utega u njutnima i njihova odstupanja u postotcima.

Tablica 4. Izmjerene vrijednosti težine pripremljenih utega

| Oznaka | Očekivana vrijednost, N | Težina, N | Odstupanje, % |
|------------|-------------------------|-----------|---------------|
| Nosač 10 N | 10 | 10,003 | 0,03 |
| 10-1 | 10 | 9,914 | 0.86 |
| 20-1 | 20 | 19,957 | 0.22 |
| 20-2 | 20 | 19,977 | 0.12 |
| 20-3 | 20 | 19,986 | 0.07 |
| 20-4 | 20 | 19,982 | 0.09 |
| 20-5 | 20 | 19,995 | 0.03 |
| 20-6 | 20 | 19,993 | 0.04 |
| 20-7 | 20 | 19,991 | 0.05 |
| 20-8 | 20 | 19,984 | 0.08 |
| 20-9 | 20 | 19,993 | 0.04 |
| 50-1 | 50 | 49,963 | 0.07 |
| 50-2 | 50 | 49,972 | 0.06 |
| 50-3 | 50 | 49,962 | 0.08 |
| 50-4 | 50 | 49,962 | 0.08 |
| 50-5 | 50 | 49,960 | 0.08 |
| 50-6 | 50 | 49,846 | 0.31 |
| 50-7 | 50 | 49,687 | 0.63 |
| 50-8 | 50 | 49,971 | 0.06 |
| 50-9 | 50 | 49,661 | 0.68 |
| 100-1 | 100 | 99,973 | 0.03 |
| 100-2 | 100 | 99,956 | 0.04 |
| 100-3 | 100 | 99,901 | 0.09 |
| 100-4 | 100 | 99,947 | 0.05 |

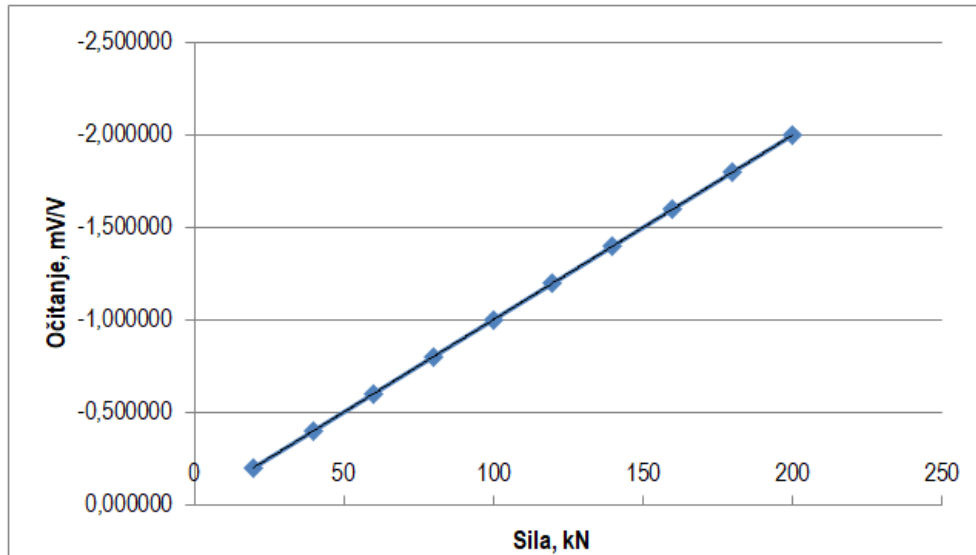
4.5 Postupak umjeravanja

Prema planiranom postupku da se zadovolji umjeravanje po 10% vrijednosti 1000 N vidimo kako moramo iskoristiti sve pripremljene utege osim jednog utega nazivne vrijednosti 50 N te je odlučeno da uteg 50-9 koji ima najveće odstupanje neće biti korišten u umjeravanju. Prije planiranog umjeravanja 1000 N pomoću pripremljenih utega izvršeno je umjeravanje po 10% vrijednosti 200 N pomoću dinamometra HBM Z30A 200 N, umjeravanje po 10% vrijednosti 500 N pomoću dinamometra HBM U1 500 N te finalno umjeravanje po 10% vrijednosti 1000 N pomoću dinamometra HBM Z6FC3 1000 N kako bi se zadovoljilo preklapanje rezultata te povećala rezolucija pri manjim silama mjerenja. Za sva izvršena umjeravanja na mjernom pojačalu očitane su vrijednosti umjeravanja X u 2 niza izražene u mV/V. Izračunata je vrijednost relativne ponovljivosti b' te ukupna relativna pogreška interpolacije fc koja je dobivena pomoću jednadžbe polinoma kojom se očitavanje može izraziti kao funkciju sile umjeravanja prikazana u narednim stranicama. Srednje vrijednosti svakog mjerenja X_{sr} preračunate su pomoću formula interpolacije kako bi iz mV/V dobili vrijednosti u N čija je oznaka $F(i)$ koja predstavlja izmjerene vrijednosti sile u i -tom mjernom nizu. U tablici 5 prikazani su rezultati umjeravanja utega 20 N po 10% vrijednosti 200 N.

Tablica 5. Rezultati umjeravanja utega do 200 N

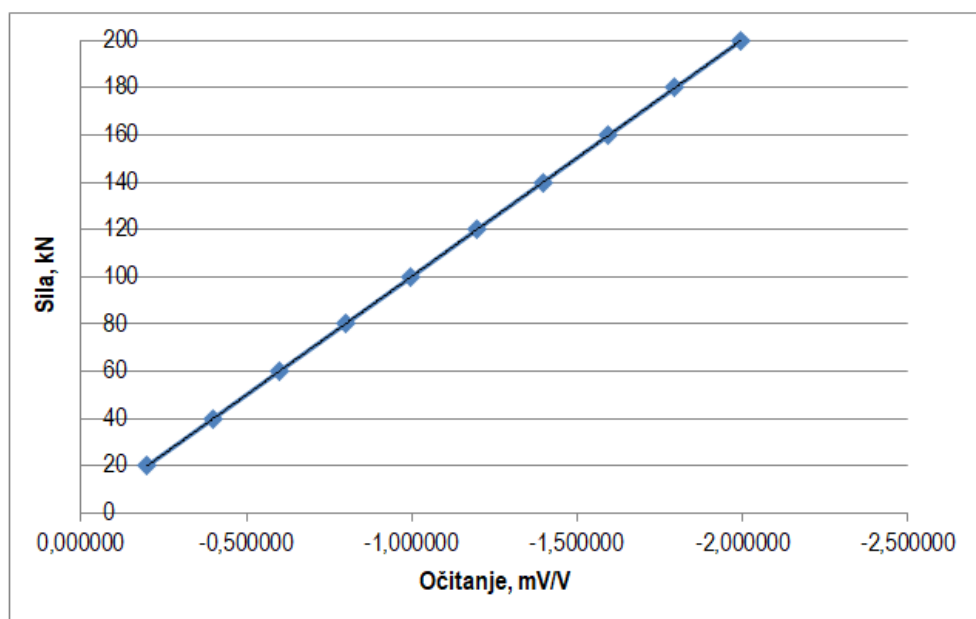
| F, N | $X1, mV/V$ | $X2, mV/V$ | $X_{sr}, mV/V$ | $b', \%$ | $fc, \%$ | $F(i), N$ |
|--------|------------|------------|----------------|----------|----------|-----------|
| 20 | -0,199715 | -0,199712 | -0,199714 | 0,002 | -0,050 | 19,9840 |
| 40 | -0,399165 | -0,399137 | -0,399151 | 0,007 | -0,081 | 39,9402 |
| 60 | -0,598775 | -0,598759 | -0,598767 | 0,003 | -0,076 | 59,9141 |
| 80 | -0,798445 | -0,798468 | -0,798457 | 0,003 | -0,071 | 79,8955 |
| 100 | -0,998104 | -0,998131 | -0,998118 | 0,003 | -0,073 | 99,8742 |
| 120 | -1,195853 | -1,195895 | -1,195874 | 0,004 | -0,156 | 119,6627 |
| 140 | -1,395665 | -1,395663 | -1,395664 | 0,000 | -0,148 | 139,6552 |
| 160 | -1,595240 | -1,595358 | -1,595299 | 0,007 | -0,150 | 159,6328 |
| 180 | -1,794960 | -1,795037 | -1,794999 | 0,004 | -0,155 | 179,6176 |
| 200 | -1,994752 | -1,994718 | -1,994735 | 0,002 | -0,163 | 199,6071 |

Jednadžba interpolacije izračunata pomoću metode najmanjih kvadrata na temelju srednjih vrijednosti glasi: $X = -1,38289786E-09F^3 + 4,12133731E-07F^2 - 1,00008791E-02F$, X u mV/V, F u N



Slika 24. Interpolacija vrijednosti umjeravanja utega do 200 N

Inverzna jednadžba interpolacije za proračun vrijednosti sile na temelju vrijednosti očitavanja X glasi: $F = 1,39608652E-01X^3 + 4,14971769E-01X^2 - 9,99907504E+01X$, X u mV/V, F u N



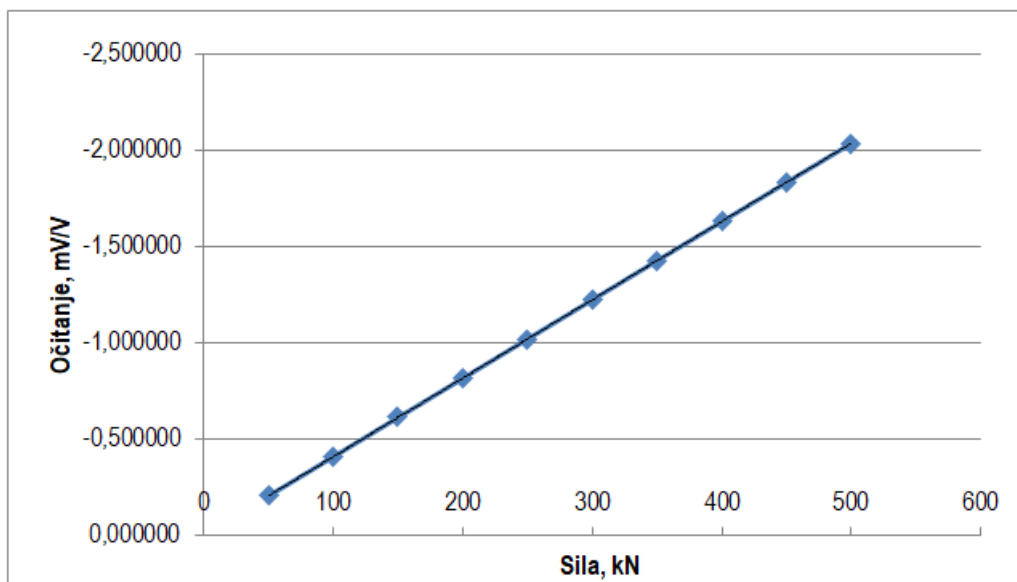
Slika 25. Inverzna interpolacija vrijednosti umjeravanja utega do 200 N

U tablici 6 prikazani su rezultati umjeravanja utega 50 N po 10% vrijednosti 500 N.

Tablica 6. Rezultati umjeravanja utega do 500 N

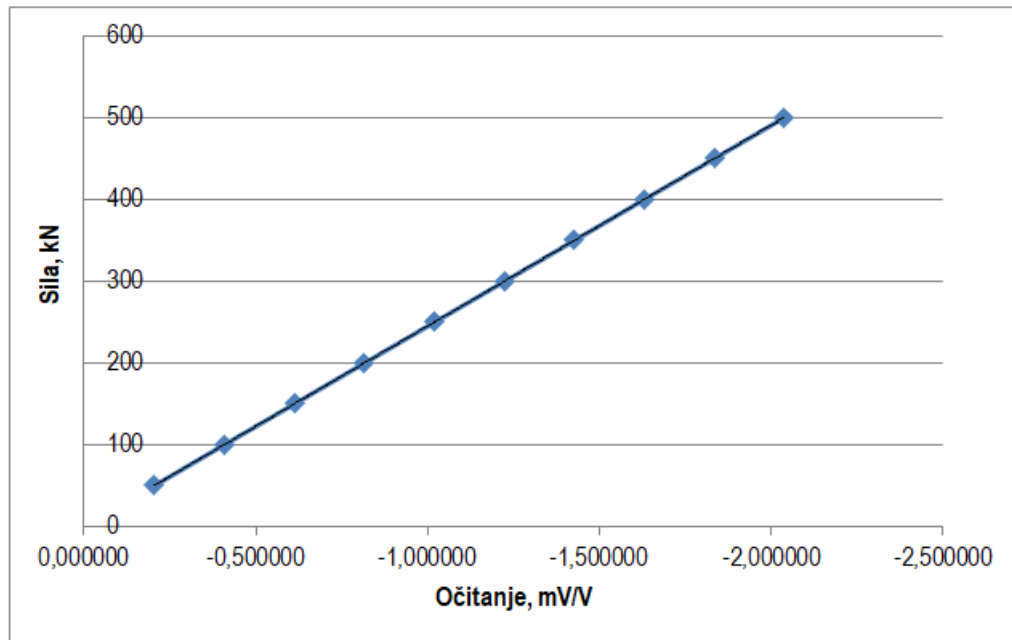
| F, N | $X1, mV/V$ | $X2, mV/V$ | $Xsr, mV/V$ | $b', \%$ | $fc, \%$ | $F(i), N$ |
|--------|------------|------------|-------------|----------|----------|-----------|
| 50 | -0,204044 | -0,203998 | -0,204021 | 0,023 | 0,019 | 50,0158 |
| 100 | -0,407946 | -0,407930 | -0,407938 | 0,004 | -0,007 | 100,0001 |
| 150 | -0,612008 | -0,611924 | -0,611966 | 0,014 | 0,001 | 150,0065 |
| 200 | -0,815893 | -0,815956 | -0,815925 | 0,008 | -0,004 | 199,9915 |
| 250 | -1,019933 | -1,019866 | -1,019900 | 0,007 | -0,006 | 249,9768 |
| 300 | -1,223877 | -1,223820 | -1,223849 | 0,005 | -0,010 | 299,9529 |
| 350 | -1,427397 | -1,427215 | -1,427306 | 0,013 | -0,049 | 349,8064 |
| 400 | -1,630241 | -1,630123 | -1,630182 | 0,007 | -0,115 | 399,5161 |
| 450 | -1,834297 | -1,834297 | -1,834297 | 0,000 | -0,099 | 449,5288 |
| 500 | -2,037045 | -2,036844 | -2,036945 | 0,010 | -0,159 | 499,1820 |

Jednadžba interpolacije izračunata pomoću metode najmanjih kvadrata na temelju srednjih vrijednosti glasi: $X = 4,20987272E-11F^3 - 9,98629041E-09F^2 - 4,07951102E-03F$, X u mV/V, F u N



Slika 26. Interpolacija vrijednosti umjeravanja utega do 500 N

Inverzna jednadžba interpolacije za proračun vrijednosti sile na temelju vrijednosti očitavanja X glasi: $F = -1,53446748E-01X^3 - 1,49827045E-01X^2 - 2,45128613E+02X$, X u mV/V, F u N



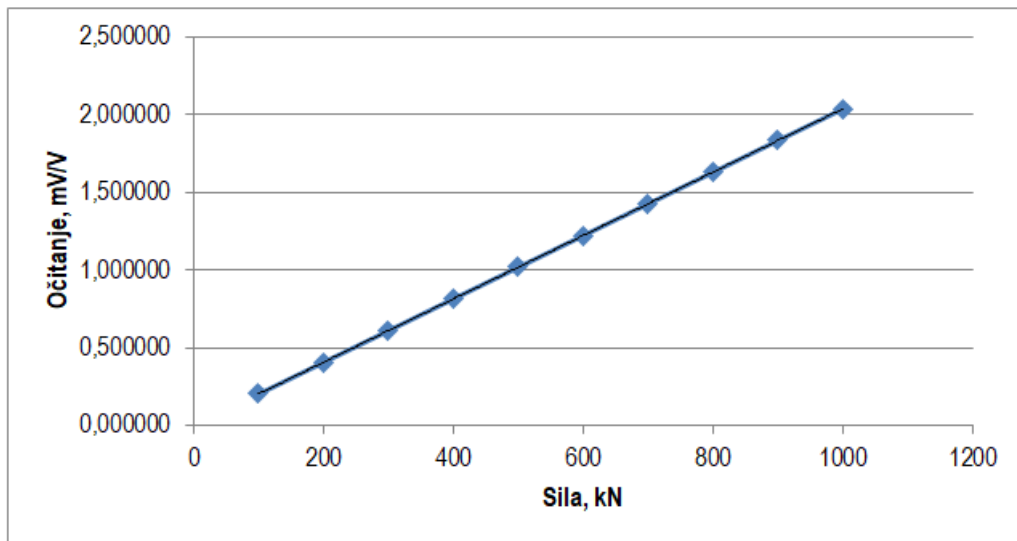
Slika 27. Inverzna interpolacija vrijednosti umjeravanja utega do 500 N

U tablici 7 prikazani su rezultati umjeravanja svih pripremljenih utega po 10% vrijednosti 1000 N.

Tablica 7. Rezultati umjeravanja utega do 1000 N

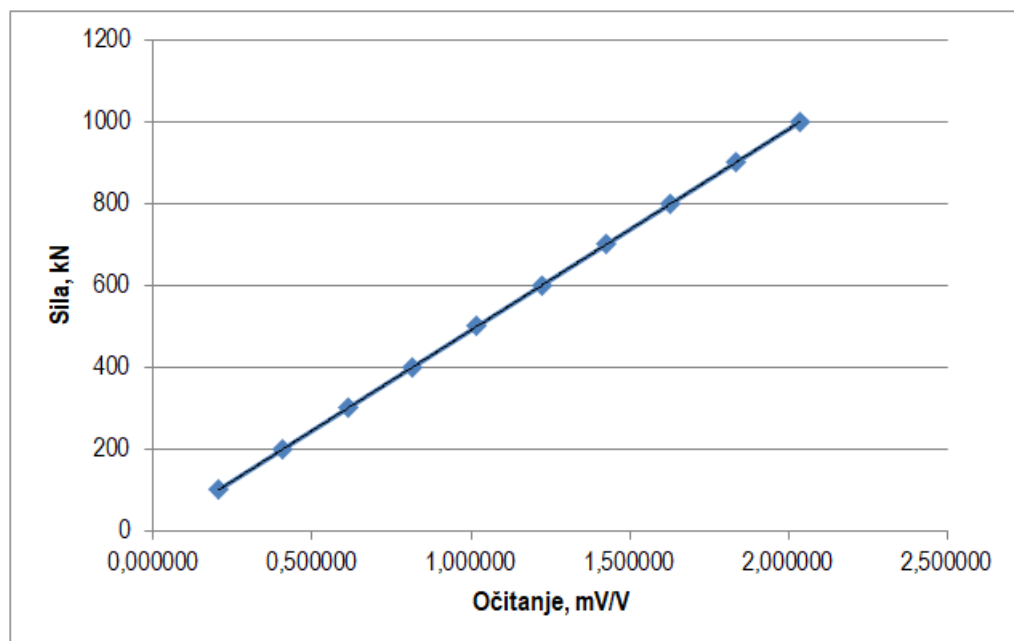
| F , N | $X1$, mV/V | $X2$, mV/V | X_{sr} , mV/V | b' , % | f_c , % | $F(i)$, N |
|---------|-------------|-------------|-----------------|----------|-----------|------------|
| 100 | 0,203936 | 0,203793 | 0,203865 | 0,070 | 0,029 | 99,9807 |
| 200 | 0,407791 | 0,407472 | 0,407632 | 0,078 | 0,042 | 199,9034 |
| 300 | 0,611797 | 0,611356 | 0,611577 | 0,072 | 0,034 | 299,9022 |
| 400 | 0,815873 | 0,815278 | 0,815576 | 0,073 | 0,028 | 399,9149 |
| 500 | 1,019163 | 1,018318 | 1,018741 | 0,083 | 0,067 | 499,5051 |
| 600 | 1,223001 | 1,222190 | 1,222596 | 0,066 | 0,066 | 599,4187 |
| 700 | 1,426745 | 1,426046 | 1,426396 | 0,049 | 0,070 | 699,2892 |
| 800 | 1,630592 | 1,629235 | 1,629914 | 0,083 | 0,083 | 799,0043 |
| 900 | 1,834764 | 1,833062 | 1,833913 | 0,093 | 0,082 | 898,9368 |
| 1000 | 2,037405 | 2,036641 | 2,037023 | 0,038 | 0,105 | 998,4139 |

Jednadžba interpolacije izračunata pomoću metode najmanjih kvadrata na temelju srednjih vrijednosti glasi: $X = 2,00995661E-13F^3 - 1,96692040E-09F^2 + 2,03894456E-03F$, X u mV/V, F u N



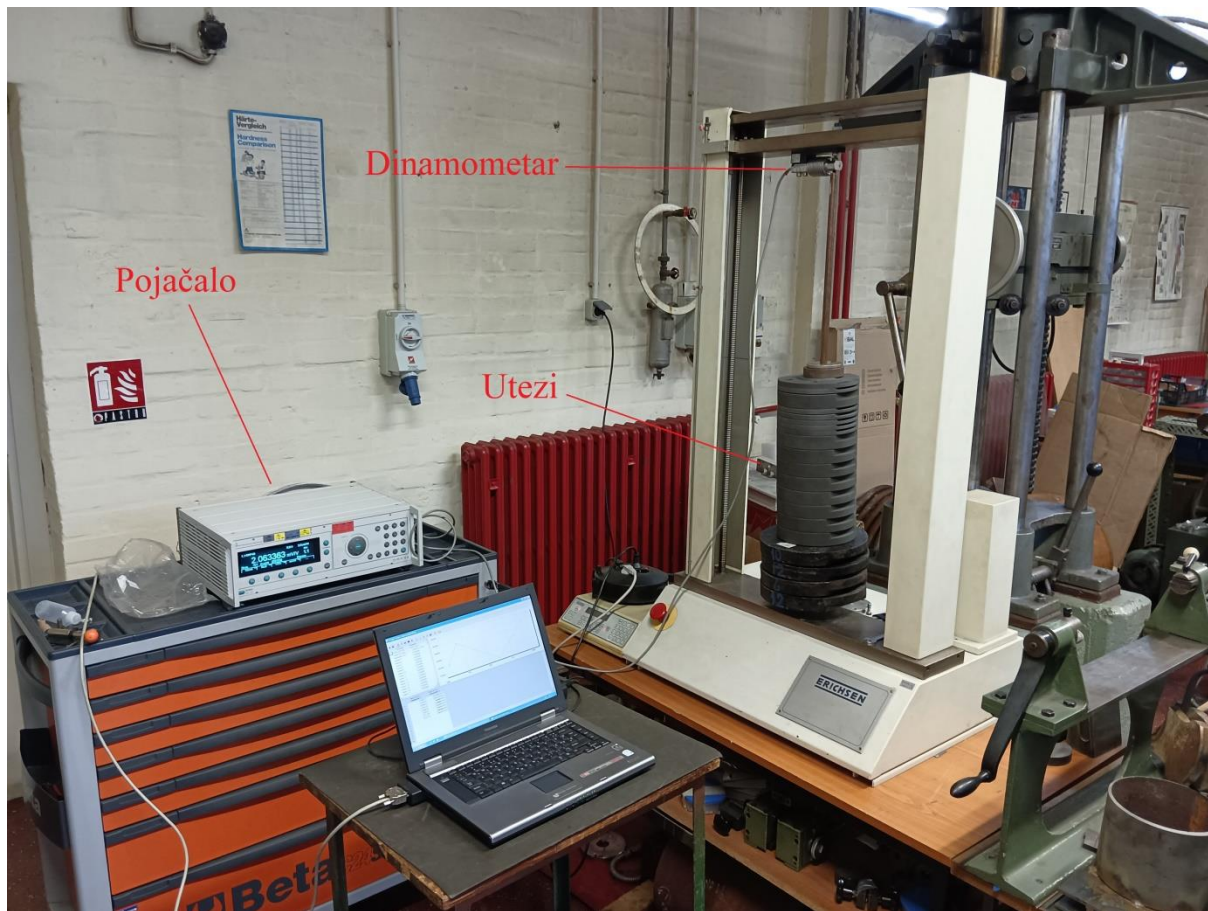
Slika 28. Interpolacija vrijednosti umjeravanja utega do 1000 N

Inverzna jednadžba interpolacije za proračun vrijednosti sile na temelju vrijednosti očitavanja X glasi: $F = -1,15844610E-02X^3 + 2,32317139E-01X^2 + 4,90449728E+02X$, X u mV/V, F u N



Slika 29. Inverzna interpolacija vrijednosti umjeravanja utega do 1000N

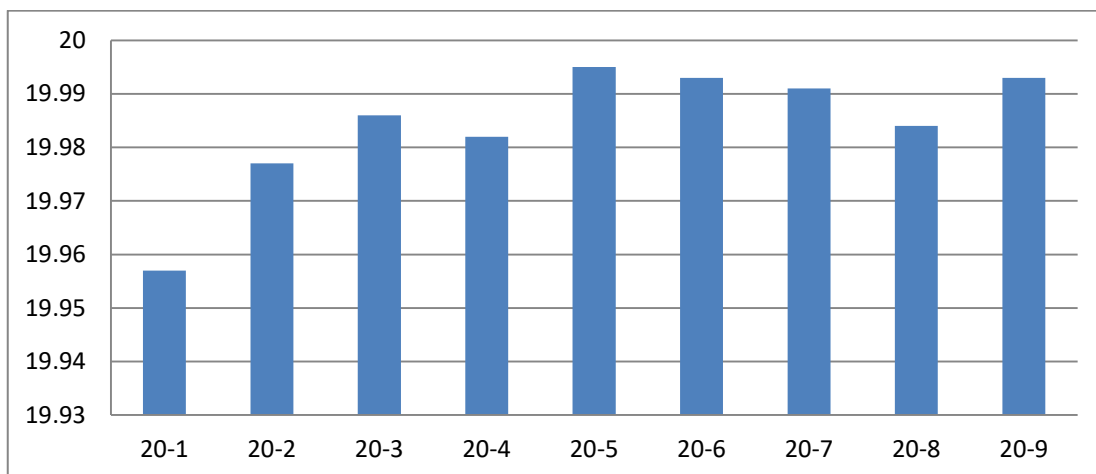
Na slici 30 prikazan je kompletan sustav umjeravanja utega koji se sastoji od pojačala povezanog na računalo. Računalo obrađuje dobivene podatke, ono je povezano i s dinamometrom koji mjeri rezultate. Na dinamometar je povezana baza koja je potrebna kao podloga za postavljanje utega.



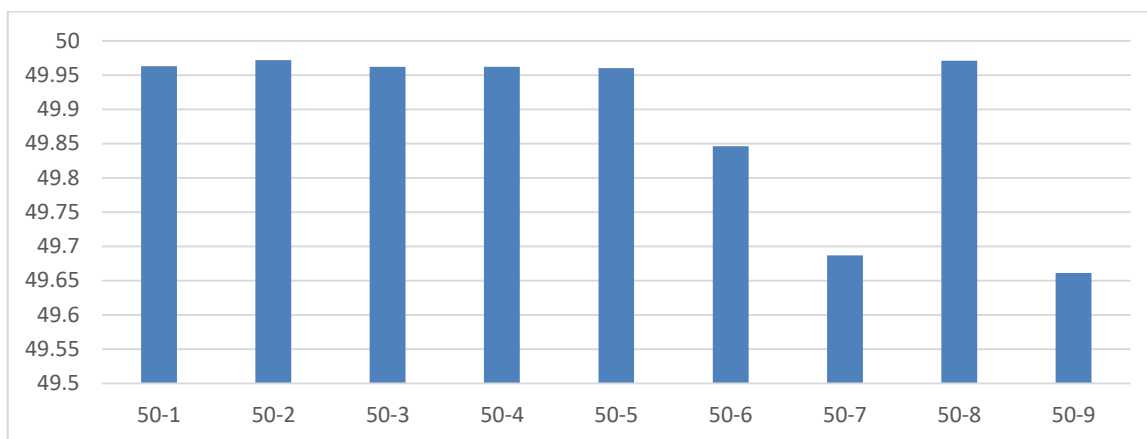
Slika 30. Kompletan sustav umjeravanja utega

5 Analiza

Umjeravanje referentnog etalona dinamometra HBM Z30A 200 N te dinamometra HBM U1 500 N provedeno je u češkom nacionalnom mjeriteljskom institutu prema normi HRN EN ISO 376:2011 [20] te se dobivene rezultate uspoređivalo s rezultatima umjeravanja pomoću pripremljenih utega iz Laboratorija za mehanička ispitivanja Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Odstupanja od nominalne vrijednosti pojedinih utega prikazana su grafovima. Slikom 31 prikazana su nominalna odstupanja utega 20 N, a slikom 32 nominalna odstupanja utega 50 N.



Slika 31. Odstupanje od nominalne vrijednosti utega 20 N



Slika 32. Odstupanje od nominalne vrijednosti utega 50 N

Iz grafova se može primijetiti kako su utezi od 20 N i 50 N izgubili dio mase nakon postupka nitiranja, te od nominalne vrijednosti ne odstupaju više od 1%

Slikom 33 prikazan je certifikat o umjeravanju dinamometra HBM Z30A 200 N češkog nacionalnog mjeriteljskog instituta.

Czech Metrology Institute
 Ochrana 31, 638 00 Brno, Czech Republic
 phone: +420 545 556 111
 www.cmi.cz

ISO/IEC 17025:2017
 Calibration laboratory No. 2202 accredited by the Czech Accreditation Institute according to ISO/IEC 17025:2017
 Laboratory: Laboratory of fundamental metrology Praha, V Botanice 4, 150 72 Praha 5
 Department of force and torque, tel. +420 257 288 309, fax +420 257 288 077

CERTIFICATE OF CALIBRATION
8011-KL-F0034-21

Date of issue: March 25, 2021 Page 1 of 8

Customer: Laboratory for Testing Mechanical Properties
 Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture
 University of Zagreb
 Ivana Lučića 5
 10000 Zagreb Croatia

Measuring instrument: Force transducer
 Manufacturer: Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH
 Type: Z30A
 Serial number: # 160130180
 Id. number: 28722
 Nominal force: 200 N
 Impact direction: Tension, compression
 Output indicator: Measuring amplifier MGCplus - ML55B, s.n. 801246171
 Indicator manufacturer: Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH

The results of the calibration have been obtained following the procedures reported in this Certificate and are related only to the date, place and conditions of the calibration.

Date of calibration: 22.3.2021 and 23.3.2021

Calibrated by: *Jaroslav Riedl* Head of the Department: *Ing. Lukáš Vavrečka, PhD.*

Jaroslav Riedl *Ing. Lukáš Vavrečka, PhD.*

This document may only be reproduced in full, except with the prior written permission by the issuing laboratory.

Slika 33. Certifikat umjeravanja dinamometra Z30A 200 N

Slikom 34 prikazan je certifikat o umjeravanju dinamometra HBM U1 500 N češkog nacionalnog mjeriteljskog instituta.

Czech Metrology Institute
 Ochrana 31, 638 00 Brno, Czech Republic
 phone: +420 545 556 111
 www.cmi.cz

ISO/IEC 17025:2017
 Calibration laboratory No. 2202 accredited by the Czech Accreditation Institute according to ISO/IEC 17025:2017
 Laboratory: Laboratory of fundamental metrology Praha, V Botanice 4, 150 72 Praha 5
 Department of force and torque, tel. +420 257 288 309, fax +420 257 288 077

CERTIFICATE OF CALIBRATION
8011-KL-F0033-21

Date of issue: March 25, 2021 Page 1 of 8

Customer: Laboratory for Testing Mechanical Properties
 Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture
 University of Zagreb
 Ivana Lučića 5
 10000 Zagreb Croatia

Measuring instrument: Force transducer
 Manufacturer: Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH
 Type: U1
 Serial number: 53575 K
 Nominal force: 500 N
 Impact direction: Tension, compression
 Output indicator: Measuring amplifier MGCplus - ML3K, s.n. 817167
 Indicator manufacturer: Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH

The results of the calibration have been obtained following the procedures reported in this Certificate and are related only to the date, place and conditions of the calibration.

Date of calibration: 12.3.2021 and 15.3.2021

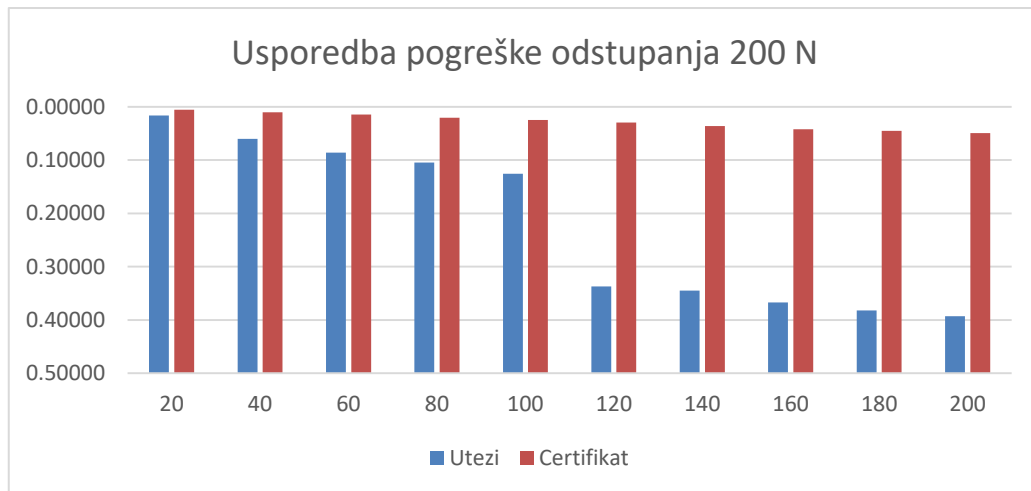
Calibrated by: *Jaroslav Riedl* Head of the Department: *Ing. Lukáš Vavrečka, PhD.*

Jaroslav Riedl *Ing. Lukáš Vavrečka, PhD.*

This document may only be reproduced in full, except with the prior written permission by the issuing laboratory.

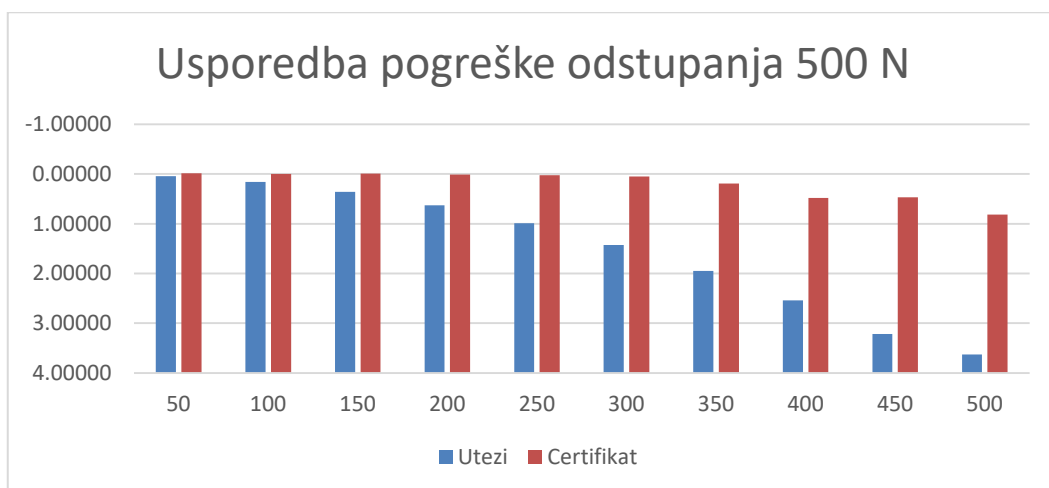
Slika 34. Certifikat umjeravanja dinamometra U1 500 N

Ukupna odstupanja na državnom etalonu koja su u eksperimentalnom dijelu uspoređena s umjeravanjem pomoću pripremljenih utega prikazana su grafovima. Slikom 35 prikazana je usporedba rezultata umjeravanja dinamometra HBM Z30A 200 N prikazana u certifikatu o umjeravanju na referentnom etalonu te rezultata njegovoga umjeravanja pomoću pripremljenih utega.



Slika 35. Usporedba pogreške odstupanja 200 N

Slikom 36 prikazana je usporedba rezultata umjeravanja dinamometra HBM U1 500 N na certifikatu te rezultata njegovoga umjeravanja pomoću pripremljenih utega.



Slika 36. Usporedba pogreške odstupanja 500 N

Iz priloženih grafova jasno je vidljivo kako vrijednosti iz certifikata imaju puno manju grešku odstupanja u odnosu na umjeravanja pomoću utega. Isto tako se može primijetiti kako povećanjem sile pogreške odstupanja rastu i u jednom i u drugom slučaju umjeravanja.

6 Zaključak

Na temelju provedenih ispitivanja doneseni su sljedeći zaključci:

- Umjeravanje mjerila sile pomoću utega je puno složenija metoda osiguravanja sljedivosti od mjerenja sile u odnosu na komparatornu metodu. Vidljivo je iz analize rezultata umjeravanja dinamometara kako se povećanjem vrijednosti sile povećalo i ukupno odstupanje, što je bilo očekivano, pošto se ukupna mjerna pogreška pojedinačnih utega sumira.
- Ukupne pogreške interpolacije prilikom umjeravanja dinamometara pomoću utega, a samim time i mjerna nesigurnost dobivenih rezultata daje naslutiti kako bi buduća umjeravanja preciznim utezima mogla dati zadovoljavajuće rezultate i smanjiti ukupnu mjernu nesigurnost sustava što je dobar put prema izradi „Deadweight“ uređaja koji bi bio stabilniji od drugih vrsta opterećivanja.
- Usporedba rezultata mjerenja težine utega na preciznoj vagi i preko dinamometra pokazala je kako je došlo do određenog gubitka mase. Svaka promjena stanja utega izaziva povećanje nesigurnosti što je i dokazano kroz provedbu toplinske obrade nitriranjem koja je imala samo svrhu poboljšavanja zaštite površinskih dijelova utega.
- Iz provedenih istraživanja može se još zaključiti da je nakon bilo koje aktivnosti na utezima potrebno naknadno rekabriranje kako bi se potvrdilo da li je ta aktivnost imala utjecaja na masu utega.

7 Literatura

- [1] Mjeriteljstvo sile u Republici Hrvatskoj, dr. sc. Željko Alar i dr. sc. Mladen Franz <https://www.svijet-kvalitete.com/index.php/mjeriteljstvo/2112-mjeriteljstvo-sile-u-republici-hrvatskoj> (pristupljeno 12.12. 2021.)
- [2] Guide to the Measurement of Force, The Institute of Measurement and Control, 1998.
- [3] <https://enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=55937> (pristupljeno 12.12.2021.)
- [4] <https://enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=39248> (pristupljeno 12.12. 2021.)
- [5] <https://www.britannica.com/science/mass-physics> (pristupljeno 12.12. 2021.)
- [6] Videc M. Postupak umjeravanja prijenosnih etalona sile (završni rad), Zagreb, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2007.
- [7] O. Muftić: Mehanika I (Statika), Tehnička knjiga, Zagreb, 1983.
- [8] Šojat A. Statičko vlačno ispitivanje pri sniženim temperaturama (završni rad), Zagreb, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2019
- [9] <https://metal-kovis.hr/shop/cijena/hidraulicna-presa-hidroliksan-100t> (pristupljeno 20.12.2021)
- [10] Ž. Alar: Procjenjivanje nesigurnosti rezultata mjerenja sile, magistarski rad, Zagreb, 2001.
- [11] Ž. Alar, M. Franz, T. Aleksandrov: Mjerna sposobnost referentnog etalona sile instaliranog u LIMS-u, Matrib '06
- [12] S. Mahović: Teorija i tehnika mjerenja, podloge za predavanja, FSB, ak.god. 2006/2007.
- [13] www.ptb.de (pristupljeno 14.1. 2022.)
- [14] EURAMET cg-4 Version 2.0 (03/2011)
- [15] <https://mhforce.com/> (pristupljeno 14.1. 2022.)
- [16] <https://slideplayer.gr/amp/15645832/> (pristupljeno 16.1. 2022.)
- [17] Predavanja iz kolegija Mjeriteljstvo, B. Runje, Zagreb, 2013.
- [18] Dežulović M. Organizacija i provedba usporedbenih mjerenja (diplomski rad), Zagreb,

Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2012.

[19] Predavanja iz kolegija Mjeriteljstvo, V. Mudronja

[20] HRN EN ISO 376:2011