

Utjecaj brzine opterećivanja na rezultate umjeravanja prijenosnog etalona sile

Dupko, Domagoj

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:235:418979>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-09-19**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Domagoj Dupko

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Željko Alar

Student:

Domagoj Dupko

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Željku Alaru i asistentu Danielu Pustičkom, mag. ing. mech. na pruženoj pomoći, savjetima i uputama prilikom izrade ovog rada.

Veliko hvala dečkima iz LIMS-a, Romanu Divljaku i Marku Bači, mag. ing. mech. na provođenju eksperimentalnog djela, pojašnjenju svih procesa eksperimenta i opreme, te pomoći pri obradi podataka.

Također, zahvaljujem se svojoj obitelji i svim svojim prijateljima na podršci.

Domagoj Dupko



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: **Domagoj Dupko** JMBAG: **0082057990**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj brzine opterećivanja na rezultate umjeravanja prijenosnog etalona sile**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Influence of loading speed on the calibration results of the force-proving instrument**

Opis zadatka:

Prijenosni etaloni sile služe za umjeravanje opreme za određivanje mehaničkih svojstva materijala. Pri umjeravanju etalona sile postoji čitav niz izvora nesigurnosti, a jedan od njih je i brzina opterećivanja.

U radu je potrebno:

1. Dati literaturni pregled različitih prijenosnih etalona sile
2. Opisati metodu umjeravanja prijenosnog etalona sile
3. Eksperimentalno provesti umjeravanje prijenosnog etalona sile i okarakterizirati pojedine utjecajne veličine
4. Provesti dodatna umjeravanja s različitim brzinama opterećivanja
5. 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.

Predvideni datumi obrane:

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

Zadatak zadao:

Izv.prof. dr. sc. Željko Alar

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD	1
2. SILA I MJERENJE SILE	2
2.1. Općenito o sili	2
2.2. Mjerenje sile	3
2.3. Sljedivost mjerenja sile	4
3. ETALONI SILE	8
3.1. Primarni – nacionalni etalon	8
3.2. Referentni etalon	9
3.3. Prijenosni etalon	11
3.3.1. Deformacijsko tijelo (dinamometar)	12
4. PRETVORNICI SILE	13
4.1. Pretvornici sile s mjernim trakama	16
4.1.1. Instrumenti za mjerenje promjene otpora tenzometra (Wheatstoneov mjerni most)	22
4.2. Piezoelektrični pretvornici sile	23
4.3. Hidraulički i pneumatski pretvornici sile	24
4.4. Ostale vrste sustava za mjerenje sile	25
4.4.1. Elastični uređaji	25
4.4.2. Vibrirajući elementi	25
4.4.3. Magnetno – elastični uređaji	26
4.4.4. Uređaji za dinamičku ravnotežu	26
4.4.5. Plastična deformacija	26
5. UMJERAVANJE PRIJENOSNIH ETALONA SILE PREMA NORMI HRN EN ISO 376:2012	27
5.1. Karakteristike prijenosnih etalona	27
5.2. Priprema za umjeravanje	27
5.3. Rezolucija	28
5.4. Minimalna sila	28
5.5. Postupak umjeravanja	28
5.6. Kriterij ocjenjivanja prijenosnog etalona sile	30
5.7. Klasifikacija prijenosnih etalona	31
5.8. Potvrda o umjeravanju	32
6. EKSPERIMENTALNI DIO	33

6.1. Plan eksperimenta.....	33
6.1.1. Referentni etalon.....	33
6.1.2. Umjeravani etalon.....	35
6.1.1. Proces umjeravanja pri različitim brzinama opterećivanja	36
6.2. Rezultati umjeravanja dinamometra AEP TCE – TM prema normi HRN EN ISO 376:2012	39
6.3. Rezultati umjeravanja dinamometra AEP TCE – TM različitim brzinama	45
6.3.1. Redukcija 10:1	45
6.3.2. Redukcija 100:1	52
7. Analiza rezultata umjeravanja	59
7.1. Analiza rezultata umjeravanja dinamometara HBM Z30A i AEP TCE – TM sukladno normi HRN EN ISO 376:2012	59
7.1.1. Rezultati umjeravanja dinamometra HBM Z30A prema normi HRN EN ISO 376:2012.....	59
7.1.2. Usporedba rezultata dinamometara HBM Z30A i AEP TCE – TM.....	60
7.2. Analiza rezultata umjeravanja dinamometra AEP TCE – TM različitim brzinama ...	66
8. ZAKLJUČAK.....	68
LITERATURA.....	69

POPIS SLIKA

Slika 1. Isaac Newton [3].....	2
Slika 2. Piramida sljedivosti etalona sile [6].....	6
Slika 3. Piramida sljedivosti etalona sile za Republiku Hrvatsku [6]	7
Slika 4. Primarni - nacionalni etalon sile 1 MN u PTB-u, Njemačka [6].....	9
Slika 5. Referentni etalon sile 500 kN u LIMS-u, FSB, Hrvatska	10
Slika 6. Prijenosni etalon sile s kompletnom opremom [6]	11
Slika 7. Dinamometri [5]	12
Slika 8. Različiti oblici elastičnih elemenata s dopuštenim naprezanjima [1].....	14
Slika 9. Dijagram elastičnog elementa pretvornika sile [1]	15
Slika 10. Dijagram istežanje – naprezanje žilavih materijala [10].....	16
Slika 11. Deformacija žice uslijed djelovanja vlačnog opterećenja [10]	17
Slika 12. Različite izvedbe elektrootpornih mjernih traka i rozeta [10].....	19
Slika 13. Lijepljenje mjerne trake na ispitni objekt [10]	19
Slika 14. Vrste mjernih rozeta [10]	21
Slika 15. Wheatstoneov puni mjerni most [10].....	23
Slika 16. Piezoelektrični pretvornik sile [1]	24
Slika 17. Presjeci hidrauličnog i pneumatskog pretvornika [9]	24
Slika 18. Pozicije dinamometra tijekom umjeravanja [11].....	29
Slika 19. Dinamometar HBM Z30A 10kN.....	33
Slika 20. Nacionalni etalon ESZ 20kN [12]	34
Slika 21. Certifikat umjeravanja dinamometra Z30A 10 kN	35
Slika 22. Dinamometar AEP TCE – TM.....	36
Slika 23. Reduktori različitih omjera.....	36
Slika 24. Način montiranja dinamometara prilikom umjeravanja različitim brzinama	37
Slika 25. Mjerno pojačalo HBM MCGplus AB22A	38
Slika 26. Kompletan sustav za provođenje umjeravanja različitim brzinama	38
Slika 27. Krivulja interpolacije dinamometra AEP TCE – TM.....	42
Slika 28. Inverzna krivulja interpolacije dinamometra AEP TCE – TM	42
Slika 29. Ulazno mjerenje za redukciju 10:1	45
Slika 30. Sila i signal od predopterećenja do nazivne sile dinamometara HBM i AMP za redukciju 10:1	46
Slika 31. Brzina prirasta sile dinamometra HBM za redukciju 10:1	47
Slika 32. Krivulja interpolacije redukcije 10:1	50
Slika 33. Inverzna krivulja interpolacije redukcije 10:1.....	50
Slika 34. Ulazno mjerenje za redukciju 100:1	52
Slika 35. Sila i signal od predopterećenja do nazivne sile dinamometara HBM i AMP za redukciju 100:1	53
Slika 36. Brzina prirasta sile na dinamometra HBM za redukciju 100:1	54
Slika 37. Krivulja interpolacije redukcije 100:1	56
Slika 38. Inverzna krivulja interpolacije redukcije 100:1.....	56
Slika 39. Relativne pogreške a) ponovljivosti bez rotacije dinamometara HBM Z30A i AEP TCE – TM, b) Razlika pogrešaka	61
Slika 40. Relativne pogreške a) obnovljivosti s rotacijom dinamometara HBM Z30A i AEP TCE – TM, b) Razlika pogrešaka	62
Slika 41. Relativne pogreške a) histereze dinamometara HBM Z30A i AEP TCE – TM, b) Razlika pogrešaka	63

Slika 42. Relativne pogreške a) interpolacije dinamometara HBM Z30A i AEP TCE – TM, b) Razlika pogrešaka	64
Slika 43. Mjerne nesigurnosti dinamometara HBM Z30A i AEP TCE – TM i razlika mjerne nesigurnosti	65
Slika 44. Relativne pogreške ponovljivosti bez rotacije dinamometra AEP za normu HRN EN ISO 376:2012 i redukcije 10:1 i 100:1	66
Slika 45. Relativne pogreške interpolacije dinamometra AEP za normu HRN EN ISO 376:2012 i redukcije 10:1 i 100:1	67

POPIS TABLICA

Tablica 1. Najveće mjerne sposobnosti ovisno o tipu referentnih etalona [5].....	10
Tablica 2. Vrste i karakteristike pretvornika [1]	13
Tablica 3. Karakteristike materijala od kojih su izrađene mjerne trake [10].....	18
Tablica 4. Klase etalona i minimalne sile [11].....	28
Tablica 5. Karakteristike prijenosnih etalona sile [11].....	32
Tablica 6. Karakteristike HBM Z30A 10kN dinamometra	34
Tablica 7. Karakteristike nacionalnog etalona ESZ 20kN [12]	34
Tablica 8. Karakteristike dinamometra AEP TCE – TM	35
Tablica 9. Izmjerene vrijednosti i relativna pogreška nule kod predopterećenja dinamometra AEP TCE – TM.....	39
Tablica 10. Izmjerene vrijednosti pri opterećivanju u mjernim nizovima X1, X2, X3, X5 i pri rasterećivanju u mjernim nizovima X4', X6' dinamometra AEP TCE - TM.....	40
Tablica 11. Ostatak i relativna pogreška nule nakon rasterećivanja u mjernim nizovima dinamometra AEP TCE – TM	40
Tablica 12. Izračunate vrijednosti pogrešaka dinamometra AEP TCE – TM	41
Tablica 13. Interpolirane vrijednosti u ovisnosti o opterećenju dinamometra AEP TCE – TM	43
Tablica 14. Klasifikacija i pripadajuća najmanja relativna mjerna nesigurnost umjeravanja dinamometra AEP TCE – TM	44
Tablica 15. Rezultati umjeravanja kroz tri niza opterećivanja za redukciju 10:1	48
Tablica 16. Izračunate vrijednosti pogrešaka za redukciju 10:1	49
Tablica 17. Interpolirane vrijednosti u ovisnosti o opterećenju za redukciju 10:1	51
Tablica 18. Pripadajuća mjerna nesigurnost umjeravanja za redukciju 10:1	52
Tablica 19. Rezultati umjeravanja kroz tri niza opterećivanja za redukciju 100:1	54
Tablica 20. Izračunate vrijednosti pogrešaka za redukciju 100:1	55
Tablica 21. Interpolirane vrijednosti u ovisnosti o opterećenju za redukciju 100:1	57
Tablica 22. Pripadajuća mjerna nesigurnost umjeravanja za redukciju 100:1	58
Tablica 23. Izračunate vrijednosti pogrešaka dinamometra HBM Z30A.....	59
Tablica 24. Klasifikacija i pripadajuća najmanja relativna mjerna nesigurnost umjeravanja dinamometra HBM Z30A.....	60
Tablica 25. Relativne pogreške obnovljivosti s rotacijom i ponovljivosti bez rotacije dinamometara HBM Z30A i AEP TCE – TM.....	61
Tablica 26. Relativne pogreške interpolacije i histereze dinamometara HBM Z30A i AEP TCE – TM.....	63
Tablica 27. Mjerne nesigurnosti dinamometara HBM Z30A i AEP TCE – TM.....	65

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
a	m/s^2	Ubrzanje
A	mm^2	Površina poprečnog presjeka
A_0	mm^2	Početna površina poprečnog presjeka
ΔA	mm^2	Promjena površine poprečnog presjeka
b	%	Relativna pogreška obnovljivosti s rotacijom
b'	%	Relativna pogreška ponovljivosti bez rotacije
d	-	Konstanta kristala
d	m	Promjer
d_0	m	Početni promjer
Δd	m	Promjerna promjera
E	N/mm^2	Youngov modul elastičnosti
F	N	Sila
F_f	N	Nazivna sila dinamometra
F_{min}	N	Minimalna sila primjenjena na dinamometru
F_N	N	Maksimalna sila umjeravanja
f_c	%	Relativno interpolacijsko odstupanje
f_0	%	Relativno odstupanje nul vrijednosti
g	m/s^2	Lokalno gravitacijsko ubrzanje Zemlje
i_f	mV/V	Očitanje na indikatoru nakon rasterećenja
i_0	mV/V	Očitanje na indikatoru prije opterećenja
k	-	Faktor pokrivanja
l	m	Duljina
l_0	m	Početna duljina
Δl	m	Promjena duljine
m	kg	Masa
r	N	Rezolucija indikatora
R	Ω	Električni otpor
R_0	Ω	Početni električni otpor
ΔR	Ω/Ω	Promjena električnog otpora
R_e	N/mm^2	Granica razvlačenja
R_m	N/mm^2	Vlačna čvrstoća
U_0	V	Ulazni napon
U_M	V	Mjereni izlazni napon
Q	C	Količina naboja
v	m/s	Brzina
v	%	Relativna pogreška histereze
W	%	Proširena mjerna nesigurnost

X	mV/V	Izmjerene vrijednost pri rastućoj sili
X'	mV/V	Izmjerena vrijednost pri padajućoj sili
X_a	mV/V	Interpolirana vrijednost otklona
X_{\max}	mV/V	Maksimalna izmjerena vrijednost iz nizova 1, 3 i 5
X_{\min}	mV/V	Minimalna izmjerena vrijednost iz nizova 1, 3 i 5
X_N	mV/V	Otklon koji odgovara maksimalnoj sili umjeravanja
$\overline{X_r}$	mV/V	Srednja vrijednost očitavanja kod opterećivanja pri različitom položaju
$\overline{X_{wr}}$	mV/V	Srednja vrijednost očitavanja kod opterećivanja pri istom položaju
ν	-	Poissonov koeficijent
y	mV/V	Interpolirana vrijednost otklona
σ	N/mm ²	Naprezanje
ε	N/mm ²	Istezanje, duljinska deformacija
ε_q	N/mm ²	Poprečna deformacija
ρ	Ωm	Specifičan otpor žice

SAŽETAK

U okviru ovog rada najviše će se govoriti o prijenosnim etalonima sile koji služe za umjeravanje sustava za mjerenje sile. Pri umjeravanju prijenosnih etalona sile postoji čitav niz izvora nesigurnosti, a jedan od njih je i brzina opterećivanja. U ovom završnom radu pokazan je utjecaj brzine opterećivanja na rezultate umjeravanja prijenosnog etalona sile. Bitno je da se umjeravanje sustava za mjerenje sile (npr. kidalice) provede prijenosnim etalonima što veće klase točnosti, jer oni osiguravaju mjernu sljedivost prema nacionalnom etalonu sile, a rezultat toga će biti mjerenja velike preciznosti i točnosti sustava za mjerenje sile.

U teorijskom dijelu dan je opis sile kao vektorske veličine, postupci mjerenja sile te mjerna sljedivost sile. Detaljno je opisana i napravljena podjela prijenosnih etalona prema izvedbi, odnosno načinu na koji se detektira primijenjena sila koja se zatim pretvara u drugi oblik izlazne veličine koja se očitava.

Eksperimentalni dio proveden je u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstva (LIMS) te su korištena dva tipa prijenosnih etalona sile, HBM Z30A i AEP TCE – TM, oba nazivnih vrijednosti 10 kN. Dinamometar HBM Z30A odabran je kao referentni etalon, a dinamometar AEP TCE – TM je umjeravani etalon. Umjeravanje je provedeno s dvije brzine s kontinuiranim prirastom sile, a rezultati umjeravanja su uspoređeni s rezultatima umjeravanja po normi HRN EN ISO 376:2012. Na kraju su analizirani dobiveni rezultati i dani su određeni zaključci.

Ključne riječi: sila, prijenosni etalon, dinamometar, umjeravanje, brzina

SUMMARY

When calibrating portable force standards, there are a number of sources of uncertainty, and one of them is the loading speed. In this final paper, the influence of loading speed on the results of calibration of the portable force standard was demonstrated. It is essential that the calibration of the force measuring system (e.g. tear-off device) is carried out with portable standards of the highest possible accuracy class, because they ensure measurement traceability according to the national force standard, and the result will be measurements of high precision and accuracy of the force measuring system.

In the theoretical part, force is described as a vector quantity, force measurement procedures, and force measurement traceability. It is described in detail and the division of portable standards according to the design, i.e. the way in which the applied force is detected, which is then converted into another form of the output quantity that is read, is made.

The experimental part was carried out in the Laboratory for Testing Mechanical Properties (LIMS) and two types of portable force standards were used, HBM Z30A and AEP TCE – TM, both nominal values of 10 kN. The HBM Z30A transducer was chosen as the reference standard, and the AEP TCE-TM transducer was the moderate standard. Calibration was carried out at two speeds with a continuous increase in force, and the calibration results were compared with the calibration results according to HRN EN ISO 376:2012. At the end, the obtained results were analyzed and certain conclusions were given.

Key words: force, transfer standard, transducer, calibration, speed

1. UVOD

Sila, što je zapravo sila? Sila je jedna od najznačajnijih i najosnovnijih fizikalnih veličina. Bez njenog postojanja ili ne poznajući njezin princip djelovanja i aksiome, svijet i život kakav danas poznajemo bio bi znatno drugačiji. Silu se može opisati kao mjeru interakcije među tijelima, te njezina mjerna jedinica je 1 Newton.

Sila i mjerenje sile javlja se u raznim znanostima i tehničkim područjima. U strojarstvu postoje mnogobrojne sile koje djeluju unutar i između dijelova mehanizma i sustava. Poznavanje i mjerenje tih sila važno je za sigurnost, konstrukciju i eksploatacijske karakteristike uređaja, te za određivanje brojnih mehaničkih svojstva materijala ili proizvoda.

Sustavi za mjerenje sila imaju važnu ulogu u mjerenju sile te moraju osigurati pouzdanost i točnost mjerenja te se to postiže umjeravanjem. To podrazumijeva da moraju biti „uspoređeni“ s mjernim sustavom na višoj mjeriteljskoj razini.

2. SILA I MJERENJE SILE

2.1. Općenito o sili

Kao što je spomenuto u uvodnom djelu sila je vektorska veličina definirana kao mjera interakcije među tijelima [1]. Njome se opisuje svaki utjecaj na promjenu oblika i strukture tijela, promjenu brzine tijela ili čestice odnosno međudjelovanje fizikalnih sustava ili međudjelovanje sustava i polja. Pošto je sila vektorska veličina određena je iznosom i smjerom u kojem djeluje. Oznaka za silu je F uz pripadajuću mjernu jedinicu 1 Newton. Sila se javlja u mnogim oblicima, no može se reducirati na četiri temeljne sile [2] :

- gravitacijska sila,
- elektromagnetska sila,
- slaba nuklearna sila, te
- jaka nuklearna sila.

Osnovna podjela sila [2] :

- Kontaktne sile – posljedica su fizičkog dodira dvaju sustava (npr. aktivne, pasivne, sila trenja, itd.).
- Beskontaktne sile – djeluju na daljinu u prostoru uz postojanje polja sila, te ovisi djeluje li sustav prema izvoru sile ili obratno (npr. elektromagnetska, gravitacijska, itd.).

Svakog od nas riječ sila prvo asocira na Newtonove zakone gibanja. Njih je otkrio Isaac Newton (25.prosinca.1642. – 20.ožujaka.1727.) koji je bio jedan od najznačajnijih znanstvenika. Njemu u čast nazvana je mjerna jedinica za silu Newton [3]. Na slici 1. prikazan je fizičar Isaac Newton.



Slika 1. Isaac Newton [3]

Newtonovi zakoni gibanja definiraju silu i njeno djelovanje. Postoje tri Newtonova zakona gibanja [4] :

- **I. Newtonov zakon gibanja** : Tijelo zadržava stanje mirovanja ili jednoliko gibanje po pravcu, sve dok neka vanjska sila to ne promjeni.
- **II. Newtonov zakon gibanja** : Ubrzanje tijela nastaje djelovanjem sile na tijelo određene mase, te zadržava smjer u kojem djeluje sila.

Ovo je fundamentalni zakon gibanja i najčešće ga nalazimo napisanog u sljedećem obliku jednadžbe (1):

$$F = m \cdot a . \quad (1)$$

- **III. Newtonov zakon gibanja** : Ako jedno tijelo djeluje silom na drugo tijelo, ono istovremeno djeluje silom istog iznosa ali suprotnog predznaka na prvo.

$$F_{12} = -F_{21} . \quad (2)$$

Prema SI sustavu mjerna jedinica za silu je 1 Newton i to je ona sila koja bi masi od 1 kg dala ubrzanje od 1 m/s². U praksi je vrlo teško ostvariti ubrzanje od 1 m/s² djelujući na tijelo mase 1 kg da bi se ostvarila sila od 1 Newtona. Umjesto toga, standard sile od 1 Newtona postiže se preko II. Newtonovog zakona gibanja, gdje se tijelo poznate mase (m) podvrgava učinku lokalnog gravitacijskog polja Zemlje (g) ostvarujući poznatu silu na potporu danom jednadžbom (1). Mehanički sustavi u kojima se ostvaruju takve sile nazivaju se uređaji direktno opterećivani utezima [1].

2.2. Mjerenje sile

Mjerenje sile je najbitnija stavka za određivanje svojstva nekog materijala, proizvoda, dijela ili čitavog uređaja. Mehanička svojstva materijala određuju kvalitetu nekog materijala i predstavljaju bitnu ulogu u dimenzioniranju dijelova strojeva i uređaja. Mjerenje sile u strojevima ključno je za razumijevanje i praćenje rada stroja. Sila se utvrđuje na uređajima za mjerenje sile. Ti uređaji su pretežito kidalice različitih oblika i tipova koje tijekom korištenja s vremenom gube točnost i preciznost. Zbog toga se kroz jedno umjereno razdoblje vrši periodička kontrola i umjeravanje uređaja za mjerenje sile s ciljem da bi mjerenja i dalje bila pouzdana i točna [5],[6].

Sila se može mjeriti direktnom ili indirektnom metodom.

Direktnom metodom sila se mjeri na uređajima zvanim vage za mjerenje sile, a princip mjerenja se bazira na direktnoj usporedbi sile s poznatom gravitacijskom silom utega standardne mase, pri čemu gravitacija i masa moraju biti jasno definirane.

Postoje dva primjera indirektnih metoda, kojom se mjeri djelovanje sile na promatrano tijelo :

- mjerenjem akceleracije tijela poznate mase koje je izloženo djelovanju sile
- mjerenjem deformacije elastičnog elementa koje je izloženo djelovanju sile

Indirektnu metodu mjerenja akceleracije karakterizira ograničena primjena. Problem predstavlja sila koje se pritom određuje pošto se ona sastoji od više nepoznatih komponenti koje se ne mogu sve odrediti. Zbog toga, indirektna metoda s elastičnim elementima je najčešće u primjeni [5].

Bitan faktor kod mjerenja sile ima aksijalnost. Prema Kartezijevom koordinatnom sustavu sila se može kao vektorska veličina rastaviti na tri komponente. Sustavi za mjerenje sile će točno reagirati samo na komponentu uzduž glavne osi mjernog sustava, no ako postoje i komponente u drugim smjerovima, postoji mogućnost da će se generirati pogrešan rezultat [1],[6].

Postoje različiti tipovi uređaja za mjerenje sile te se oni razlikuju prema metodi mjerenja sile, načinu ostvarivanja opterećenja, konstrukciji i namjeni.

Prema namjeni mjerni uređaji mogu biti :

- ispitni – koriste se za mjerenje sile (kidalice i preše).
- etalonski – koriste se za umjeravanje (prijenosni, referentni i nacionalni etaloni sile).

U različitim industrijskim pogonima i laboratorijima prisutni su ispitni uređaji koji su nazočni pri nastanku nekog proizvoda (npr. istraživanje, testiranje, proizvodnja, itd.). Ispitni uređaji zauzimaju posljednje mjesto u lancu mjerne sljedivosti. Etaloni služe za umjeravanje ispitnih uređaja, a karakterizira ih viša klasa točnosti od uređaja koji se umjeravaju. Tako se osigurava mjerna sljedivost sile [5],[6].

2.3. Sljedivost mjerenja sile

Mjerna sljedivost sile se može opisati kao : „svojstvo mjernog rezultata ili vrijednosti kojeg etalona po kojemu se on može dovesti u vezu s navedenim referencijskim etalonima neprekinutim lancem usporedba koje imaju utvrđene nesigurnosti“ [5]. Neprekinutim nizom prijenosa vrijednosti neke veličine tj. umjeravanjem ostvaruje se mjerna sljedivost, počevši od

etalona najviše mjeriteljske kakvoće (primarnog). Da bi neki sustav za mjerenje sile bio pouzdan, cilj ga je povezati s primarnim etalonom sile [6].

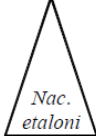
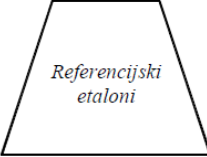
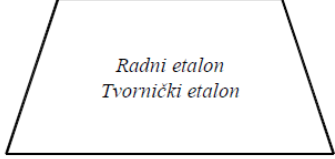
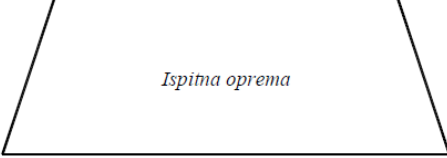
Temeljni elementi koji definiraju sljedivost su :

- kontinuirani lanac usporedbi koji vodi do etalona najviše mjeriteljske kakvoće,
- mjerna sigurnost (kako za svaki segment lanca tako i za kompletan lanac),
- dokumentacija za svaki potez u lancu,
- mjerodavnost laboratorija i tijela koji provode neke korake u lancu mora biti popraćena dokazima,
- pozivanje na SI jedinice,
- sistemska umjeravanja u propisanim vremenskim intervalima.

Ovisno o primjenjivanim etalonima ili mjerilima, te njihovom položaju u lancu usporedbi, sljedivost se može ostvariti na sljedeće načine [5]:

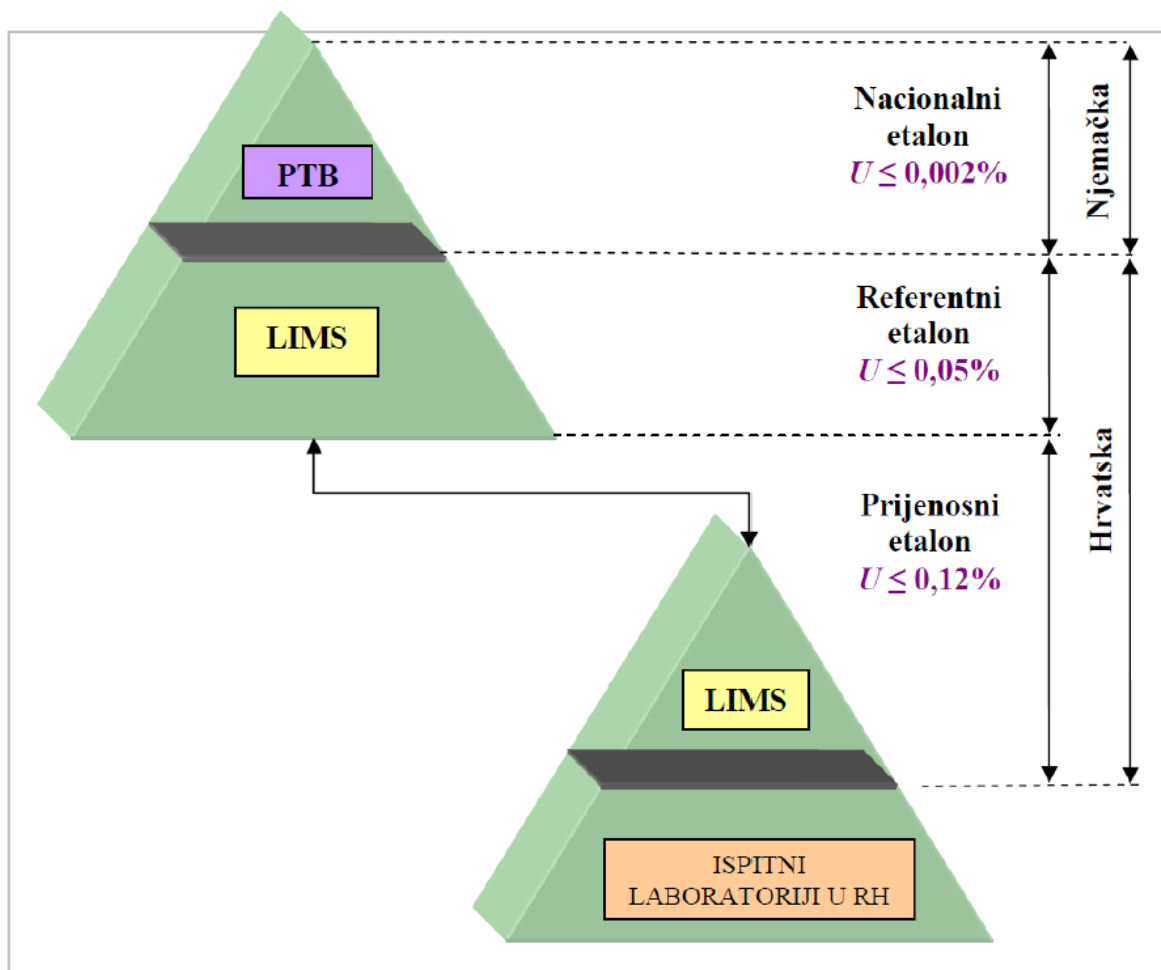
- pomoću umjerenog laboratorija te tvrtke,
- pomoću akreditiranog laboratorija,
- pomoću državne ustanove,
- do međunarodnog etalona,
- do definicijskog etalona.

Piramidu sljedivosti formira kontinuirani lanac usporedbi koji osigurava sljedivost. Mjerni uređaji i etaloni hijerarhijski su posloženi u piramidi sljedivosti sukladno svojoj mjeriteljskoj kakvoći. Umjeravanje se provodi tako da se etalonom više mjeriteljske razine umjerava etalon niže mjeriteljske razine, te tako sve do najniže razine u piramidi sljedivosti koju zauzimaju ispitni uređaji (npr. kidalice i preše) [6]. Na slici 2. prikazana je piramida sljedivosti.

<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>
 <i>Nac. etaloni</i>	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
 <i>Referencijski etaloni</i>	Laboratoriji ovlašteni za umjeravanje	Čuvanje metrološke infrastrukture države	Potvrda o umjeravanju od državnoga metrološkog instituta ili drugog ovlaštenog laboratorija	Potvrda o umjeravanju referencijskih etalona
 <i>Radni etalon Tvornički etalon</i>	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
 <i>Ispitna oprema</i>	Svi dijelovi tvrtke	Mjerenje i ispitivanje kao dio mjera osiguranja kakvoće	Potvrda o tvorničkome umjeravanju, oznaka umjeravanja ili slično	Ispitni znak ili slično

Slika 2. Piramida sljedivosti etalona sile [6]

Republika Hrvatska ne posjeduje nacionalni etalon sile, već odgovarajući za ovo područje Europe se nalazi u njemačkom mjernom institutu PBT (Physikalische – Technische Bundesanstalt). Laboratorij za ispitivanje mehaničkih svojstva (LIMS) akreditirani je umjerni laboratorij te posjeduje GTM referentni etalon sile od 2005. godine [6]. Na slici 3. prikazana je piramida sljedivosti etalona sile za Republiku Hrvatsku.



Slika 3. Piramida sljedivosti etalona sile za Republiku Hrvatsku [6]

3. ETALONI SILE

Općenito mjerni etalon se može opisati kao : „stvarna mjera, mjerilo, referentna tvar ili mjerni sustav namijenjen za određivanje, ostvarivanje, čuvanje ili obnavljanje jedinice jedne ili više vrijednosti neke veličine kako bi mogao poslužiti kao referenca“. Etalon je ostvarenje definicije dane veličine s iskazanom vrijednošću veličine i mjerne nesigurnosti [7]. Bitno je napomenuti da kod sile etalon je mjerilo, a ne materijalizirana mjera (kao npr. 1 kilogram) [6].

Etaloni se mogu podijeliti na nekoliko osnovnih tipova [5],[7]:

- primarni etalon – etalon najviše mjeriteljske kakvoće, te se njegove vrijednosti usvajaju bez upućivanja na ostale etalone iste kakvoće.
- sekundarni etalon – etalon čija vrijednost je određena umjeravanjem u odnosu na primarni etalon identične veličine.
- međunarodni etalon – etalon odabran međunarodnim sporazumom da bi služio za dodjeljivanje vrijednosti drugim etalonima zadane veličine na međunarodnoj osnovi.
- nacionalni (državni) etalon – etalon prihvaćen državnom odlukom da bi služio za dodjeljivanje vrijednosti ostalim etalonima zadane veličine unutar te države.
- referentni etalon – etalon općenito najviše mjeriteljske kakvoće na danom području, od kojeg se provode daljnja mjerenja na danom području.
- prijenosni etalon – etalon uglavnom specifičnih izvedbi, namijenjen je prijenosu na različite lokacije.
- radni etalon – etalon koji prvenstveno služi za umjeravanje i/ili provjeru mjerila ili mjernih sustava.

3.1. Primarni – nacionalni etalon

Primarni etalon sile zapravo je etalon najviše mjeriteljske kakvoće, zbog toga mjerna sljedivost sustava za mjerenje sile i njihovih rezultata kreće od njega. Kako je jedinica za silu Newton izvedena jedinica prema SI sustavu proizlazi da nema međunarodnog primarnog etalona sile, nego postoje primarni – nacionalni etaloni sile za određenu državu ili mjeriteljsko područje. Ovi etaloni sile su uređaji s utezima pomoću kojih je ostvarena određena sila direktno bez intervenirajući mehanizama kao što su poluge, hidraulični pojačivači i slično, a masa utega je utvrđena pomoću komparacije s referentnim etalonima. Također, relativna mjerna nesigurnost kod ovih etalona je $\leq 2 \cdot 10^{-5}$ [5].

Na slici 4. prikazan je primarni – nacionalni etalon sile nazivne sile 1 MN smješten u PTB-u, Njemačka.



Slika 4. Primarni - nacionalni etalon sile 1 MN u PTB-u, Njemačka [6]

3.2. Referentni etalon

Referentni etaloni sile su u piramidi sljedivosti odmah ispod nacionalnih etalona sile i nalaze se u akreditiranim umjernim laboratorijima. Karakterizira ih najviša mjeriteljska kakvoća za promatrano područje pošto su umjereni u odnosu na nacionalni etalon sile i osiguravaju mjernu sljedivost između nacionalnog etalona sile i ostalih uređaja za mjerenje sile. Najveće mjerne sposobnosti mjerenja kod referentnih etalona sile ovisi o tipu realizacije sile odnosno mehanizmu opterećivanja. U tablici 1. dane su najveće mjerne sposobnosti ovisno o tipu mehanizma opterećivanja kod referentnih etalona. Mjerne nesigurnosti s kojom se postižu vrijednosti sile ostvarene pomoću uređaja s izravnim opterećivanjem utezima mogle bi biti izračunate i po principu koji nudi nacionalni etalon sile te bi mogle iznositi manje od $5 \cdot 10^{-5}$. Međutim, ako je uvjetovana mjerna sljedivost prema nacionalnom etalonu sile ili ju je potrebno potvrditi usporedbom s nacionalnim etalom sile, postizanje mjerne sljedivosti manje od $5 \cdot 10^{-5}$ može biti ili tehnički neizvedivo ili preskupo. No u većini slučajeva zahtjevi umjernog laboratorija bit će ispunjeni ako je ostvarena mjerna sljedivost od $1 \cdot 10^{-4}$. To dozvoljava umjerenom laboratoriju umjeravanje opreme za mjerenje sile najviše klase određene normom HRN EN ISO 376:2012 [5],[8].

Tablica 1. Najveće mjerne sposobnosti ovisno o tipu referentnih etalona [5]

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

Na slici 5. prikazan je referentni etalon sile nazivne sile 500 kN u LIMS-u, FSB, Hrvatska.



Slika 5. Referentni etalon sile 500 kN u LIMS-u, FSB, Hrvatska

3.3. Prijenosni etalon

Prijenosni etaloni sile su uglavnom mjerila sile s elastičnim elementom. Posebnih su konstrukcija pošto služe za prijenos vrijednosti sile na različite lokacije. Prijenosnim etalonima sile umjeravaju se ostali etaloni ili sustavi za mjerenje sile (npr. kidalice), koji se nalaze na nižoj mjeriteljskoj razini u odnosu na referentne etalone, a sami prijenosni etaloni umjereni su u odnosu na referentni etalon (ili rjeđe primarni).

Prijenosni etaloni sile uglavnom se sastoje od sljedećih komponenti :

- deformacijskog tijela (dinamometra),
- mjernog pojačala,
- uređaja za očitavanje, te
- kablova za povezivanje komponenti.

Razvojem tehnologije, danas su uglavnom mjerno pojačalo i uređaj za očitavanje jedna komponenta tj. uređaj. Također, mjerno pojačalo se može povezati s računalom i pomoću programa (npr. *Catman*) prikupljati i obrađivati rezultate što uvelike olakšava i ubrzava proces mjerenja [5],[6]. Na slici 6. prikazan je prijenosni etalon sile s kompletnom opremom.



Slika 6. Prijenosni etalon sile s kompletnom opremom [6]

3.3.1. Deformacijsko tijelo (dinamometar)

Dinamometar je ključna komponenta prijenosnih etalona sile i predstavlja mjerni uređaj koji omogućuje mjerenje sile. Postoje različite podjele dinamometara ovisno prema vrsti deformacije, prema smjeru opterećenja i prema izvedbi [5],[6],[9]. Podjela prema izvedbi bit će obrađena u idućem poglavlju.

Vrste deformacija su :

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

Vrste opterećenja su :

- vlačno,
- tlačno,
- univerzalno (vlačno i tlačno).

Dinamometar se pretežito sastoji od tri glavna djela :

- kućišta,
- elastičnog elementa i
- elementa s određenim električnim otporom (npr. tenzometarske trake).

Kućišta dinamometra ima nekoliko bitnih zadaća, a to su :

- osigurati adekvatan prijenos sile,
- omogućiti montiranje dinamometra na drugi uređaj,
- zaštititi mehaničke elemente od nepovoljnih okolišnih uvjeta, te
- onemogućiti ometanje mjerenja nepoželjnim silama .

Slika 7. prikazuje neke vrste dinamometra.



Slika 7. Dinamometri [5]

4. PRETVORNICI SILE

U ovom poglavlju bit će opisana i napravljena podjela dinamometara prema izvedbi, točnije prema načinu na koji se mjeri deformacija uzrokovana primijenjenom silom, koja se zatim pretvara u neki drugi oblik izlazne veličine i očitava se. Zbog toga, radi lakšeg razumijevanja i prema literaturnoj terminologiji, izraz deformacijsko tijelo (dinamometar) zamijenjen je izrazom pretvornik sile ili mjerna ćelija.

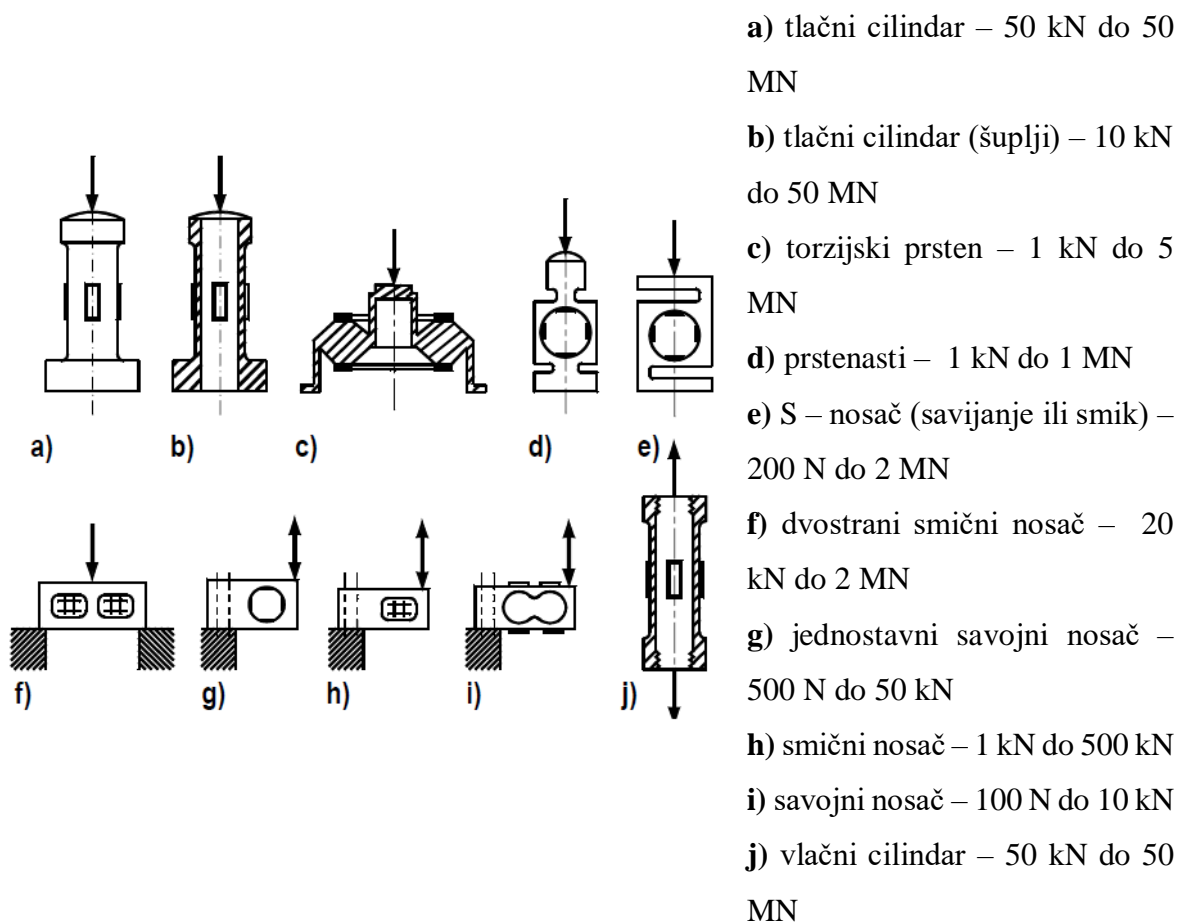
Postoji mnogo tipova pretvornika sile (npr. s mjernim trakama, piezoelektrični, hidraulični, magnetno – elastični, vibrirajući itd.) koji se koriste s instrumentima različite složenosti. Prilikom konstruiranja ili definiranja sustava za mjerenje sile, bitno je razumjeti princip rada pretvornika koji se koristiti. Tipovi pretvornika i instrumenta opisani su redoslijedom komercijalne važnosti počevši od tipa koji je najkorišteniji. U tablici 2. dani je sažetak karakteristika različitih pretvornika.

Tablica 2. Vrste i karakteristike pretvornika [1]

Tipovi pretvornika	Raspon kapaciteta	Odstupanje (%)	Temperaturna osjetljivost (%) i područje primjene
Pretvornici s mjernim trakama :			
Poluvodičke trake	1 N do 10 kN	$\pm 0,2$ do ± 1	0,2 do 0,5 (-40 °C do +80 °C)
„Thin film“ trake	0,1 N do 100 N	$\pm 0,02$ do ± 1	0,02 (-40 °C do +80 °C)
Trake od folije	5 N do 50 MN	$\pm 0,02$ do ± 1	0,0015 (-40 °C do +80 °C)
Piezoelektrični kristali	1,5 mN do 120 MN	$\pm 0,3$ do ± 1	0,02 (-190 °C do +200 °C)
Hidraulički	500 N do 5 MN	$\pm 0,25$ do ± 5	0,02 do 0,1 (5 °C do 40 °C)
Pneumatski	10 N do 500 kN	$\pm 0,1$ do ± 2	0,02 do 0,1 (5 °C do 40 °C)
LVDT, kapacitivni, vibrirajući	10 mN do 1 MN	$\pm 0,02$ do ± 2	0,02 do 0,05 (-40 °C do +80 °C)
Magnetno-elastični	2 kN do 50 MN	$\pm 0,5$ do ± 2	0,03 do 0,05 (-40 °C do +80 °C)
Žiroskopski	50 N do 250 N	$\pm 0,001$	0,0001 (-10 °C do +40 °C)

Uglavnom pretvornici sile upotrebljavaju definirani oblik elastičnog nosivog elementa ili varijaciju elemenata. Otklon elastičnog elementa izaziva primijenjena sila, koji se potom očitava i pretvara (npr. tenzometarskim trakama) u izlaznu vrijednost. Izlazna vrijednost može biti u obliku električnog signala kao kod mjernih traka i LVDT mjernih ćelija ili mehaničkih indikacija kao kod mjernih prstenova i vaga s oprugama. Općenito pretvornici s elastičnim elementom su poznati kao elastični uređaji i najčešće su korišteni.

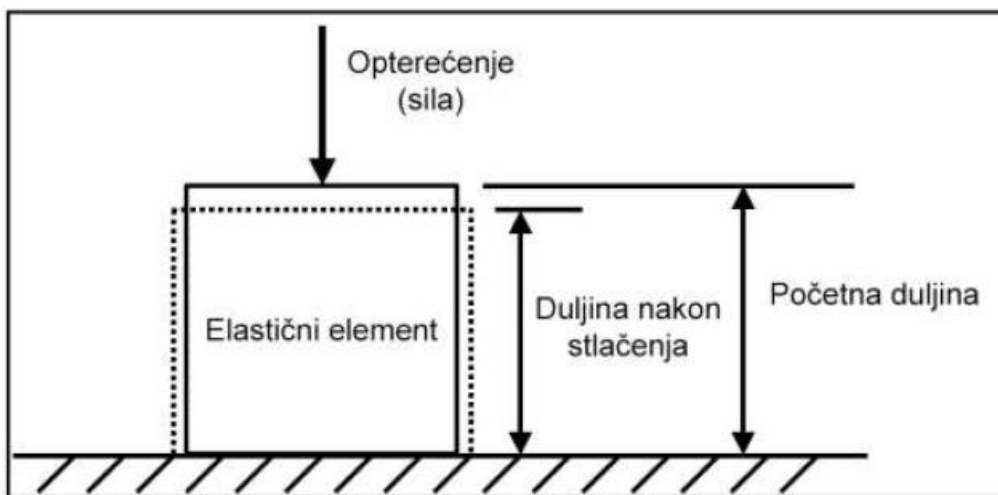
Elastični element : Na odabir oblika elastičnog elementa koji će se koristiti u mjernim ćelijama ovisi o sljedećim čimbenicima: rasponu sile, dimenzijskim ograničenjima, konačnim karakteristikama i troškovima izrade. Različiti oblici elastičnih elemenata i njihovi karakteristični nazivni kapaciteti prikazani su slikom 8. Svaki element je dizajniran da mjeri silu koja djeluje uzduž njegove glavne osi, te da eliminira ostale sile koje bi ometale mjerenje. Također, na slici 8. strelicama su označene glavne osi pojedinog elementa.



Slika 8. Različiti oblici elastičnih elemenata s dopuštenim napreznjima [1]

Elastični elementi uglavnom su izrađeni od materijala kao što su nehrđajući čelici, alatni čelici, aluminij ili berilijev bakar. Bitan zahtjev je elastičnost samog materijala, jer to predstavlja linearan odnos između deformacije i naprežanja. Također materijal mora osigurati visoku razinu ponovljivosti između ciklusa opterećivanja silom, kako bi mjerna ćelija jamčila pouzdanost i ne smije izaći iz područja elastične deformacije.

Primjer elastičnog uređaja prikazan je na slici 9. U ovom slučaju elastični element je kružni čelični cilindar. Primjenom sile na rub cilindra, nastaje deformacija koja se određuje kao razlika između komprimirane i početne duljine. Također, prilikom tlačenja dolazi do ekspanzije cilindra u smjeru okomitom od djelovanja sile, pri čemu je omjer uzdužne kompresije i vanjske ekspanzije određen prirodom materijala (preko Poissonovog omjera).

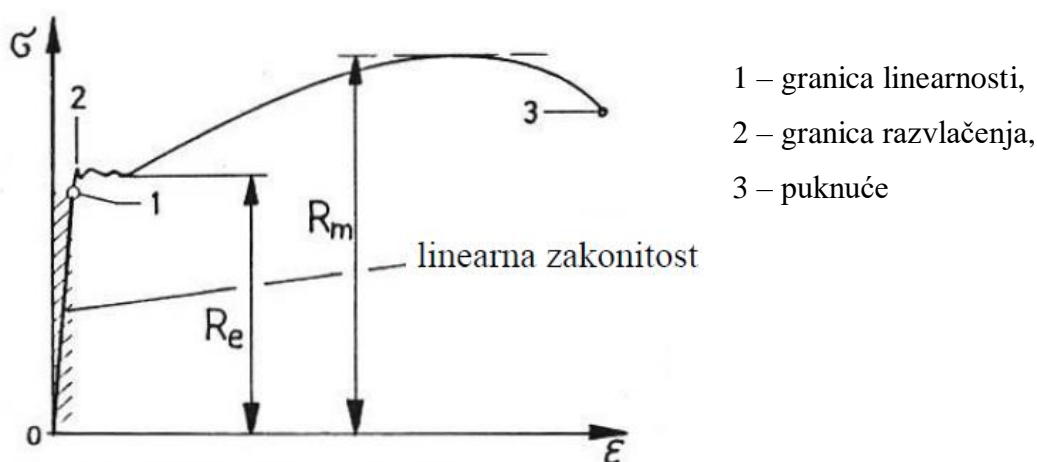


Slika 9. Dijagram elastičnog elementa pretvornika sile [1]

Ovaj princip je zajednički svim elastičnim uređajima, no metoda mjerenja deformacije elastičnog elementa značajno varira od tipa do tipa pretvornika sile. Metoda mjerenja uzdužnog i poprečnog naprežanja najčešće je korištena metoda, te kada se ona provodi pomoću mjerenja električnog otpora mjernih traka, takva mjerna ćelija je poznata kao pretvornik sile s mjernim trakama i komercijalno je najdostupniji i najkorišteniji tip.

4.1. Pretvornici sile s mjernim trakama

Kod ovih pretvornika mjerne trake su elektrootporni tenzometri ili kreće tenzometarske trake. Svaki pretvornik se sastoji od elastičnog elementa na koji su pričvršćene mjerne trake. U električnom smislu, sve mjerne trake su vodljivi materijali određene dužine, poput žice [1]. Mjernim trakama se mjeri deformacija na osnovi koje se određuje vrijednost primijenjene sile. Da bi to bilo izvedivo ovisnost između deformacije i sile mora biti linearna. Zbog toga, ova mjerenja provode se u linearno – elastičnom području tj. u području važenja Hookeova zakona što je prikazano slikom 10. Hookeov zakon opisuje ovisnost naprezanja i istežanja te ta ovisnost odgovara direktnoj vezi između deformacije i sile.



Slika 10. Dijagram istežanje – naprezanje žilavih materijala [10]

Linearna zakonitost definirana je Hookeovim zakonom :

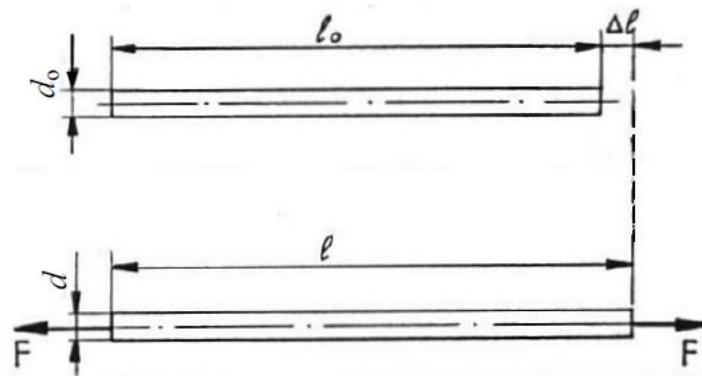
$$\sigma = E \cdot \varepsilon . \quad (3)$$

Mjerenje pomoću tenzometarskih traka nije moguće u elastično – plastičnom području koje nastupa od granice razvlačenja (R_e), jer tu prestaje linearnost između naprezanja i istežanja.

Osnovni princip mjerenja tenzometarskim trakama bazira se na činjenici da se deformacijom mjernih traka, koje prate deformaciju elastičnog elementa mijenja električni otpor, te uslijed promjene otpora određuje se deformacija i primijenjena sila (opterećenje).

Mjerna traka tj. žica uslijed djelovanja vlačnog opterećenja paralelno se produljuje i sužava (slika 11.) te se ovisnost između duljinske (ε) i poprečne deformacije (ε_q) može opisati sljedećim izrazima :

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} , \varepsilon_q = -\nu \cdot \varepsilon = \frac{\Delta d}{d_0} . \quad (4)$$



Slika 11. Deformacija žice uslijed djelovanja vlačnog opterećenja [10]

Električni otpor žice u početnom (nedeformiranom) stanju određen je izrazom :

$$R_0 = \rho \cdot \frac{l_0}{A_0}, \quad (5)$$

$$A_0 = \frac{\pi \cdot d_0^2}{4}. \quad (6)$$

Promjenom duljine žice mijenja se i njezin električni otpor koji se izračunava preko izraza :

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} = \rho \cdot l \cdot \frac{4}{\pi \cdot d^2}. \quad (7)$$

Kada se žica produlji za iznos Δl , istodobno se njezin poprečni presjek smanji za ΔA , a električni otpor će se promijeniti za ΔR . Relativna promjena električnog otpora žice može se opisati sljedećom relacijom :

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta A}{A} \quad (8)$$

ili se može prikazati pomoću umnoška konstante (k) i deformacije (ε) :

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon. \quad (9)$$

Deformacija mjerne trake (ε) identična je deformaciji elastičnog elementa na tom mjestu i izračunava se sljedećim izrazom :

$$\varepsilon = \frac{1}{k} \cdot \frac{\Delta R}{R}. \quad (10)$$

U praksi se najčešće upotrebljavaju mjerne trake s vrijednostima faktora k :

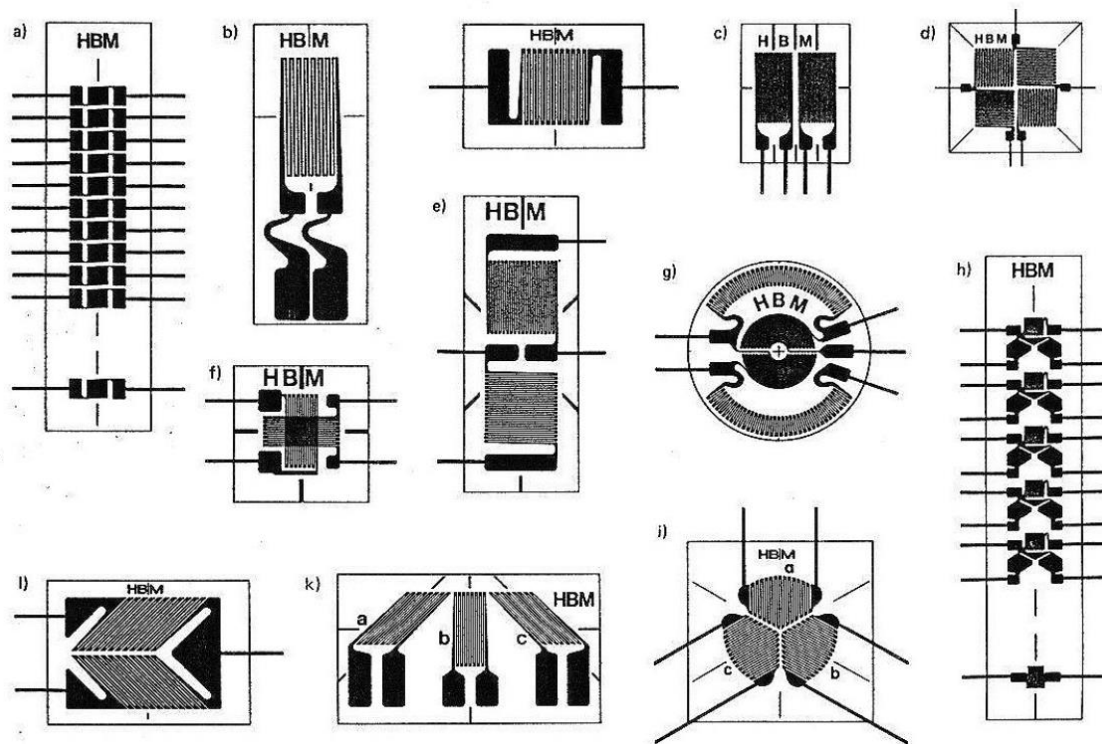
- kod metalnih žica : $k = 2,0 - 2,10$,
- kod poluvodiča : $k \approx 120$.

Uglavnom žica mjerne trake konstantnog je promjera oko 20 μm , te je velike duljine zbog čega je vijugavo savijena. U takvom se stanju lijepi na papirnatu podlogu ili na podlogu između dva komadića plastične folije, stoga u praksi duljina mjerne trake iznosi od 0,6 mm do 120 mm i više. Tenzometarske trake upotrebljavaju su u mjernom rasponu od $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Žice mjernih traka mogu biti električnog otpora od 120 Ω , 350 Ω ili 600 Ω . Najviše se upotrebljavaju mjerne trake napravljene od materijala konstantana, te su duljina između 6 – 10 mm i električnog otpora od 120 Ω . U tablici 3. dani je sastav materijala od kojih su izrađene žice mjernih traka.

Tablica 3. Karakteristike materijala od kojih su izrađene mjerne trake [10]

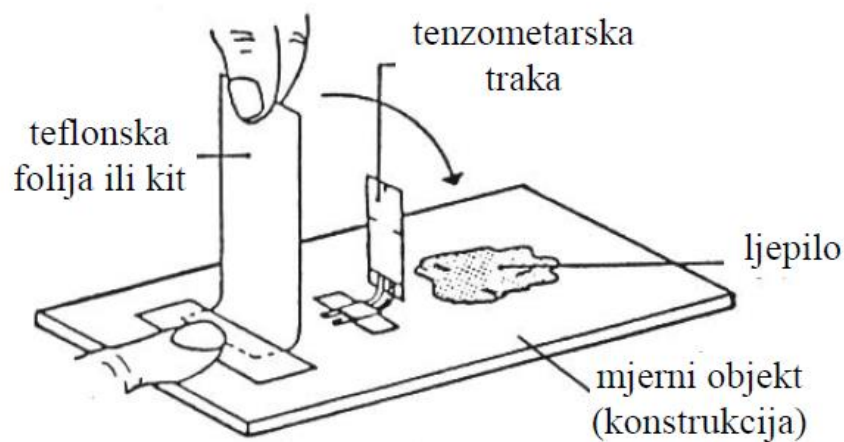
Oznaka	Sastav	k – faktor	Napomena
Konstantan	57 – 60 % Cu, 40 – 30 % Ni	2,0 – 2,1	najčešće u upotrebi
Nichrome V	80 % Ni, 20 % Cr	2,2	za temperature do 650°C
Chromel C	65 % Ni, 20 % Fe, 15 % Cr	2,5	
Karma	74 % Ni, 20 % Cr, 3 % Fe, 3 % Al	2,0	vrlo stabilan
Izoelastik	52 % Fe, 36 % Ni, 8 % Cr, V, 0,5 % Mo, 3,5 % Mn, Si, Cu	3,6	za dinamička mjerenja
Poluvodič	Silicij, p – tip	110 – 130	za laboratorijska mjerenja
Poluvodič	Silicij, n – tip	-80 – (-100)	

Na slici 12. prikazane su najčešće izvedbe mjernih traka poznatog njemačkog proizvođača mjerne opreme i pribora Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM).



Slika 12. Različite izvedbe elektrooptičkih mjernih traka i rozeta [10]

Mjerna traka montira se na očišćenu površinu mjernog objekta (elastičnog elementa) posebnim ljepilom što je prikazano slikom 13. Montiranje mjerne trake ovisi o pravcu djelovanja deformacije na površini objekta koji se ispituje. Kod jednoosnih mjernih traka treba voditi računa da glavno naprezanje djeluje uzduž trake [9],[10].



Slika 13. Lijepljenje mjerne trake na ispitni objekt [10]

Mjerne trake od žice su bile izvorni tip mjernih traka, iako su sada zamijenjene jeftinijim i dostupnijim mjernim trakama od folije ili „*Thin film*“ trakama. Međutim, mjerna traka od žice i dalje se uvelike koristi za visokotemperaturne pretvornike i analizu naprezanja, a može biti izrađena od širokog raspona materijala kao što je i prikazano u gore navedenoj tablici 3.

Osim mjerne trake od žice, postoje i poluvodičke trake, „*Thin film*“ trake, te trake od folije.

Mjerna traka od folije izrađuje se od tanko – valjane metalne folije, debljine 2 – 5 μm , koja se montira na nosač ili podlogu debljine 10 – 30 μm . Najčešći materijali za izradu podloga su poliimid i epoksidna fenolna smola obogaćena staklom. Električnu izolaciju između elastičnog elementa i tanko – valjane metalne folije osigurava nosač. Ponekad se mjerna traka proizvodi s podlogom koja sadrži ljepljivi sloj, čime se smanjuje potrebno rukovanje i vrijeme. Veliki izbor mjernih traka od folije sada je komercijalno dostupan proizvođačima pretvornika i korisnicima. Poluvodičke mjerne trake proizvode se od traka poluprovodljivog silicija u 'n' ili 'p' obliku. Izlaza vrijednost poluvodičke mjerne trake je vrlo visoka u usporedbi s izlaznom vrijednošću mjerne trake od žice ili folije. Faktor mjerne trake (k) je mjera izlaza za određeno naprezanje i obično je 100 – 150 za poluvodič, a za žicu i foliju je 2 – 4. Izlazna vrijednost poluvodičkih mjernih traka je nelinearna s naprezanjem, ali ona u suštini ne pokazuju puzanje ili histerezu te ima izuzetno dug vijek trajanja. Ova vrsta tenzometarskih traka naširoko se koristi u „malim“ pretvornicima kao što su pretvornici sile, akcelerometri i senzori tlaka.

„*Thin film*“ mjerne trake proizvode se raspršivanjem ili isparavanjem tankih filmova metala ili legura na elastični element. Proizvodnja ovih mjernih traka proći će kroz nekoliko faza isparavanja i raspršivanja te može imati do osam slojeva materijala. Postoji brojni pretvornici sile s „*thin film*“ tenzometarskim trakama u rasponu od 0,1 N do 100 N u obliku jednostruke ili dvostruko savijene grede. Ovi su uređaji vrlo isplativi kada se proizvode u velikim količinama zbog uključenih proizvodnih tehnika i to ih čini idealnima za upotrebu u proizvodima velikih količina kao što su trgovačke vage i pretvornici tlaka [1].

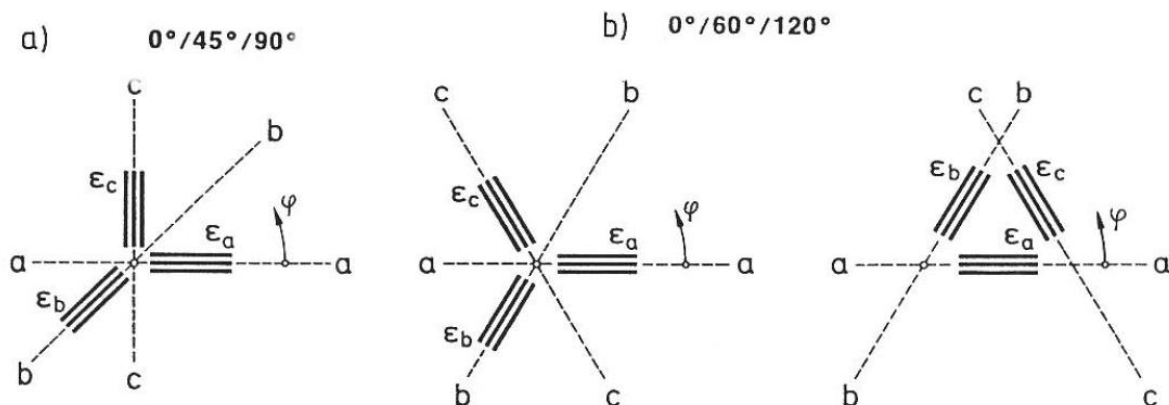
Pri provođenju mjerenja na nekoliko lokacija konstrukcije, bitno je na preklopnik povezati sve mjerne lokacije. On omogućava da se jedna po jedna mjerna traka aktivira u spoj mjernog mosta i zatim se kod promatrane vrijednosti opterećenja zapisuju vrijednosti deformacija. One se zatim zbrajaju ili oduzimaju s nul vrijednostima koje su zabilježene u neopterećenom stanju konstrukcije i na tom principu se određuju vrijednosti deformacije na svim lokacijama konstrukcije.

Kod konstrukcija u kojima vlada ravninsko stanje naprezanja (npr. plašt cilindričnog oblika), za provedbu mjerenja potrebno je koristiti minimalno dva tenzometra koji su postavljeni okomito u odnosu jedan na drugi i to kada su poznati glavni pravci naprezanja. Mjerenjem glavnih deformacija ε_1 i ε_2 , preko Hookeovog zakona moguće je odrediti glavna naprezanja σ_1 i σ_2 u mjerenoj točki koristeći izraze :

$$\sigma_1 = \frac{E}{1 - \nu^2} \cdot (\varepsilon_1 + \nu \cdot \varepsilon_2), \quad (11)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1 - \nu^2} \cdot (\varepsilon_2 + \nu \cdot \varepsilon_1). \quad (12)$$

Ako u nekoj točki konstrukcije u kojoj također vlada ravninsko stanje naprezanja, a pravci glavnih naprezanja su nepoznati, deformaciju treba mjeriti u tri smjera. Pritom se koriste dva tipa mjernih rozeta : $0^\circ/45^\circ/90^\circ$ ili $0^\circ/60^\circ/120^\circ$, slika 14. Tri zasebna tenzometra spojeni su u rozetu pod određenim međusobnim kutovima.



Slika 14. Vrste mjernih rozeta [10]

Vrijednosti glavnih naprezanja σ_1 i σ_2 , te pravci glavnih naprezanja u mjernoj točki objekta, izračunavaju se na temelju izmjerenih deformacija ε_a , ε_b i ε_c u smjerovima a, b, c mjernih traka korištenih rozeta [9][10]:

a) rozeta $0^\circ/45^\circ/90^\circ$:

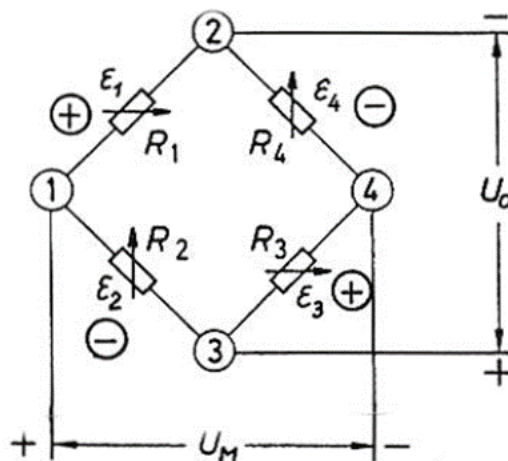
$$\sigma_{1,2} = \frac{E}{1-\nu} \cdot \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c}{2} \pm \frac{E}{(1-\nu)\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_c)^2 + (\varepsilon_c - \varepsilon_b)^2}, \quad (13)$$

b) rozeta $0^\circ/60^\circ/120^\circ$:

$$\sigma_{1,2} = \frac{E}{1-\nu} \cdot \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_b + \varepsilon_c}{3} \pm \frac{E}{1+\nu} \cdot \sqrt{\left(\frac{2\varepsilon_a - \varepsilon_b - \varepsilon_c}{3}\right)^2 + \frac{1}{3}(\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2}. \quad (14)$$

4.1.1. Instrumenti za mjerenje promjene otpora tenzometra (Wheatstoneov mjerni most)

Promjenu otpora tenzometarskih traka (ΔR) moguće je izmjeriti koristeći najčešće dva instrumenta : mjerni most i potenciometar. Mjerni signal pretvornika (tenzometarske trake) dovodi se u mosni spoj, kako bi se izmjerila vrijednost promjene napona, a ona se izračunava iz razlike potencijala između spojišta grana mjernog mosta. U upotrebi je najčešće Wheatstoneov mjerni most (slika 15.), iako se u tu svrhu mogu upotrebljavati svi električni mosni spojevi koji služe za mjerenje električnog otpora. Wheatstoneov mjerni most ima dodatnu prednost, a to je da učinke nastale okolišnim promjenama kao što je temperatura, koja djeluje podjednako na sve mjerne trake, svodi na minimalnu razinu. Izlazni napon iz mosta kada je pobuđen ulaznim naponom, linearno je povezan s promjenom otpora tenzometarske trake i stoga je funkcija sile primijenjene na element. Može se reći da je izlazni napon matematički produkt deformacije i ulaznog napona. Ovisno o broju aktivnih mjernih traka u Wheatstoneovom mjernom mostu postoje sljedeće kombinacije, a to su puni most (4 aktivne trake), polu – most (2 aktivne trake) i četvrtinski most (1 aktivna traka). Najčešće se koristi puni most s 4 aktivne mjerne trake koje su spojene tako da dvije grane u mostu sadrže tlačno opterećene, a ostale dvije grane vlačno opterećene tenzometarske trake [1],[10].



Slika 15. Wheatstoneov puni mjerni most [10]

Primjenom Kirchhoffovih zakona za Wheatstoneov mjerni most slijedi izraz za izlazni napon (U_M) koji je ovisan o ulaznome naponu (U_0):

$$U_M = U_0 \cdot \frac{R_1 \cdot R_3 - R_2 \cdot R_4}{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)}. \quad (15)$$

Izraz za računanje izlaznog napona (U_M) Wheatstoneovog punog mjernog mosta glasi [10]:

$$U_M = U_0 \cdot \frac{k}{4} \cdot 4\epsilon = U_0 \cdot k \cdot \epsilon. \quad (16)$$

4.2. Piezoelektrični pretvornici sile

Piezoelektrični pretvornici sile rade na principu piezoelektričnog efekta koji su prvi otkrili braća Curie. Oni su zapazili da se generira određeni električni naboj ako se mehanički djeluje na dielektrični materijal koji posjeduje monokristalnu strukturu. Piezoelektricitet nastaje zbog deformacije kristalne rešetke koju uzrokuje sila, a napon se mjeri pomoću elektroda koje se nalaze na površini kristala. Elektricitet se može odrediti sljedećom formulom :

$$Q = d \cdot F. \quad (17)$$

Prvi piezoelektrični pretvornici upotrebljavali su prirodno uzgojeni kvarc, ali danas se pretežito upotrebljava umjetni kvarc. Radi toga se često nazivaju i kvarcni pretvornici sile.

Ovi pretvornici su aktivni senzorski elementi jer ne zahtijevaju napajanje, generiraju signal već kod vrlo malih deformacija što je korisno u visokofrekventnom području mjernog sustava zbog nekorištenja geometrijskih promjena prilikom mjerenja sile. Piezoelektrični pretvornici omogućuju mjerenje sile u području vlaka i tlaka, te su vrlo prikladni za dinamička mjerenja, dok ne mogu provesti prava statička mjerenja.

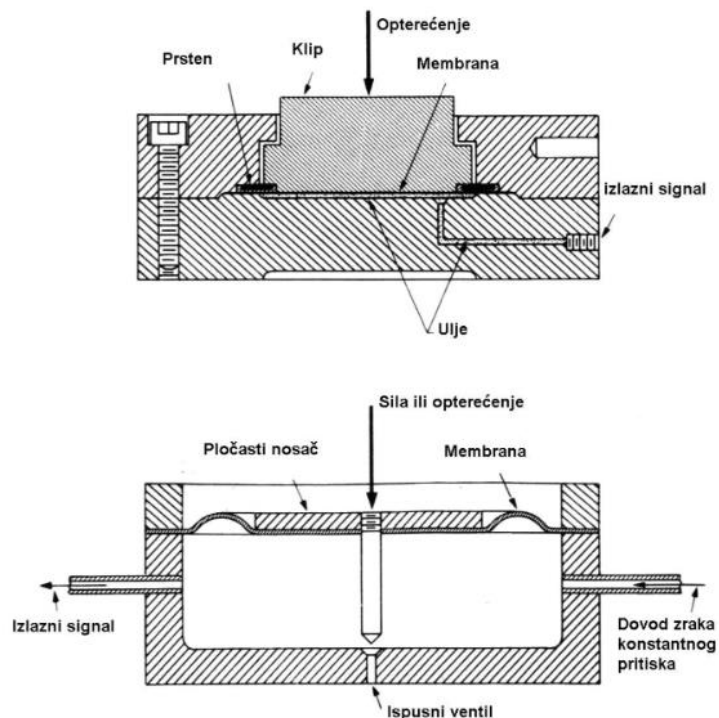
Pogodni su za korištenje u laboratorijima i u industrijskim primjenama. Karakterizira ih široki raspon mjerenja, velika izdržljivost preopterećenja, upotrebljivost na temperaturama do 350° C, a malo i izdržljivo kućište čine ih jednostavnima za uporabu [1],[9]. Na slici 16. prikazan je piezoelektrični pretvornik sile.



Slika 16. Piezoelektrični pretvornik sile [1]

4.3. Hidraulički i pneumatski pretvornici sile

Princip rada hidrauličkih i pneumatskih pretvornika sile vrlo je sličan. Na jednoj strani klipa odnosno membrane djeluje primjenjivana sila, gdje na drugoj strani nastaje određeni pritisak, a cilj je postići ravnotežu sila. Hidraulični pretvornici sile koriste kao medij tekućinu (uglavnom ulje) i klipove kao mehanizam, dok pneumatski pretvornici plin (zrak) i membrane [1],[9]. Princip rada ovih pretvornika prikazan je slikom 17.



Slika 17. Presjeci hidrauličnog i pneumatskog pretvornika [9]

4.4. Ostale vrste sustava za mjerenje sile

4.4.1. Elastični uređaji

Opterećenje stupca je najjednostavniji elastični uređaj, a to je zapravo metalni cilindar na koji djeluje sila duž njegove osi. Ove pretvornike karakterizira jednostavnost i izdržljivost, no jedina mana im je da promjena temperature utječe na izlaznu vrijednost. Koriste se za praćenje sila u temeljima zgrada i u srodnim primjenama.

Linearni varijabilni diferencijalni pretvornik (LVDT) koristi se za mjerenje pomaka elastičnog elementa unutar pretvornika sile, umjesto uporabe mjernih traka. LVDT predstavlja transformator koji stvara izlazni napon električne izmjenične struje kao funkciju pomaka pomične magnetske jezgre. Jezgra male mase i manjak trenja omogućuju nisku histerezu i visoku rezoluciju što čini LVDT pogodnim za korištenje pri dinamičkim mjerenjima.

Kapacitivna mjerna ćelija koristi kapacitivni senzor za detektiranje pomaka elastičnog elementa. Djelovanjem sile na kapacitivni senzor koji sadrži dvije paralelne ploče, dolazi do promjene razmaka između njih, a analogno time i do promjene električnog kapaciteta.

Optička mjerna traka sadrži optička vlakna koja je moguće oblikovati vrlo slično kao mjerne trake od žice. Djelovanjem sile na elastični element na koji je montirana optička mjerna traka, uzrokovat će njegov otklon, a time će se i promijeniti duljina optičkih vlakna.

Interferencijsko – optička mjerna ćelija koristi metodu mjerenja pomaka visoke rezolucije. Djelovanjem sile dolazi do deformacije opruge u obliku vilice, te se promjena zazora vilice očitava Michelsonovim interferometrom. Ove pretvornike karakterizira vrlo malo puzanje i niska histereza, a temperaturno područje primjene je od 5° C do 40° C.

4.4.2. Vibrirajući elementi

Pretvornik sile s vibrirajućom žicom koristi napetu feromagnetsku žicu koja se pogonskom zavojnicom pobuđuje na poprečne vibracije, dok se pomoću sabirne zavojnice očitavaju te vibracije. Obje zavojnice imaju jezgre od permanentnog magneta. Za ostvarivanje samooscilirajućeg sustava potrebno je preko pojačala spojiti dvije sabirnice koje će održavati rezonantnu frekvenciju pobuđene žice. Svaka rezonantna frekvencija mjera je napetosti žice, a time i primjenjivane sile u datom trenutku. Ova metoda je zastupljena kod mjerenja sile u pretvornicima tlaka i razine naprezanja u građevinarstvu.

4.4.3. Magnetno – elastični uređaji

Magnetno – elastični pretvornik sile temelji se na učinku da kada se feromagnetski materijal podvrgne mehaničkom naprezanju, magnetska svojstva materijala se mijenjaju, a promjena je proporcionalna primijenjenom naprezanju (sili). Ove pretvornike karakterizira izdržljiva konstrukcija, mali unutarnji otpor i visoka razina signala, a zbog toga mogu se upotrebljavati u električno defektnim okruženjima kao što su valjaonice. Uglavnom, ovi pretvornici su nazivnih kapaciteta od 2 kN do 5 MN.

4.4.4. Uređaji za dinamičku ravnotežu

Žiroskopski pretvornik sile iskorištava svojstvo osjetljivosti na silu žiroskopa montiranog u kardan ili u kućište sustava. Žiroskopska mjerna ćelija se sastoji od dinamički izbalansiranog rotora na vretenu, koji je postavljen u kućište s dva kardana. Sustav ima tri osi rotacijske slobode međusobno pod pravim kutom i ima ishodišnu os u težištu rotora. Sila koju treba izmjeriti pretvornik primjenjuje se kroz donji zakretni dio, a spreg sila koji se proizvodi na unutarnjem okviru uzrokuje precesiju kardana. Vrijeme potrebno vanjskom kardanu da izvrši jedan okretaj je mjera primijenjene sile. Žiroskopska mjerna ćelija je u biti digitalni pretvarač koji brzo reagira i inherentno je bez histereze i pomaka.

4.4.5. Plastična deformacija

Plastična deformacija je metoda mjerenja primijenjene sile kod koje se vrijednost sile trajno bilježi. Sila djeluje na metalni element malih dimenzija koji ima sposobnost da tolerira trajnu deformaciju. Kako ime govori ovi pretvornici djeluju van elastičnog područja materijala [1].

5. UMJERAVANJE PRIJENOSNIH ETALONA SILE PREMA NORMI HRN EN ISO 376:2012

Norma HRN EN ISO 376:2012 definira pravila za umjeravanje etalona, koji služe za umjeravanje jednoosnih ispitnih uređaja (npr. kidalica) u području vlačnog i tlačnog naprezanja. Mjerenje sile pomoću ovih etalona bazira se na mjerenju elastične deformacije dinamometra, odnosno mjeri se indirektno.

Ovom normom pojam etalon opisan je kao čitav sklop sastavljen od sljedećih komponenata : dinamometra, pretvornika signala te uređaja za očitavanje.

Umjeravanje prijenosnih etalona obuhvaća djelovanje točno poznatih sila na pretvornik sile i bilježenje podataka na indikatoru.

5.1. Karakteristike prijenosnih etalona

Sve komponente prijenosnog etalona sile (uključujući i kablove za povezivanje) moraju biti pojedinačno identificirane (npr. proizvođačem, modelom i serijskim brojem). Vrlo je važno naznačiti nazivnu silu za pretvornike sile tj. dinamometre.

Dinamometar kao i njegova oprema za opterećenje mora biti projektirana tako da osigurava aksijalno djelovanje sile , bilo u području vlaka ili tlaka.

Mehanički, optički ili električki samo su neki od načina na koje se može provesti mjerenje otklona opterećenog elastičnog elementa dinamometra uz odgovarajuću točnost i stabilnost. Klasifikacija prijenosnih etalona sile uvelike ovisi o rezultatima mjerenja, tj. o vrsti i kvaliteti mjerenja otklona (deformacije).

5.2. Priprema za umjeravanje

Preliminarnim testovima, poput testa predopterećenja, potrebno je provjeriti može li se prijenosni etalon uopće umjeriti. U testu preopterećenjem prijenosni etalon podvrgava se četiri puta zaredom preopterećenju većem od nazivne sile od 8 % do 12 %, u trajanju od 1 do 1,5 minute. Proizvođač mora barem jedan takav test provesti prije nego što se etalon počne koristiti.

Dalje potrebno je osigurati :

- prilikom vlačnog ispitivanja da priključni dijelovi omoguće aksijalnu silu,
- prilikom tlačnog ispitivanja da nema interakcije između dinamometra i njegovog oslonca na uređaju koji se pritom umjeruje .

Kod električnih uređaja koji zahtijevaju električno napajanje treba provjeriti da varijacija mrežnog napona od $\pm 10\%$ neće imati bitniji utjecaj na umjeravanje.

5.3. Rezolucija

Rezolucija se definira kao minimalna promjena ulazne veličine za koju se još detektira promjena izlazne veličine.

Kod analogne skale udaljenosti susjednih oznaka na skali moraju biti ujednačene, a debljina kazaljke i oznaka približno ista. Rezolucija se dobiva iz omjera širine kazaljke i središnje udaljenosti između dviju susjednih oznaka na skali, pri čemu su preporučeni omjeri 1:2, 1:5 ili 1:10. Rezolucija kod digitalne skale se smatra jednim povećanjem zadnje aktivne znamenke na brojčanom indikatoru. Rezolucija se treba pretvoriti u mjernu jedinicu za silu.

5.4. Minimalna sila

Uzimajući u obzir točnost s kojom je moguće očitati otklon na uređaju prilikom umjeravanja ili tijekom njegove daljnje upotrebe, potrebno je da minimalna sile (F_{min}) koja se primjenjuje na prijenosni etalon ispuni dva kriterija :

1. Za određenu klasu, sila mora iznositi :

Tablica 4. Klase etalona i minimalne sile [11]

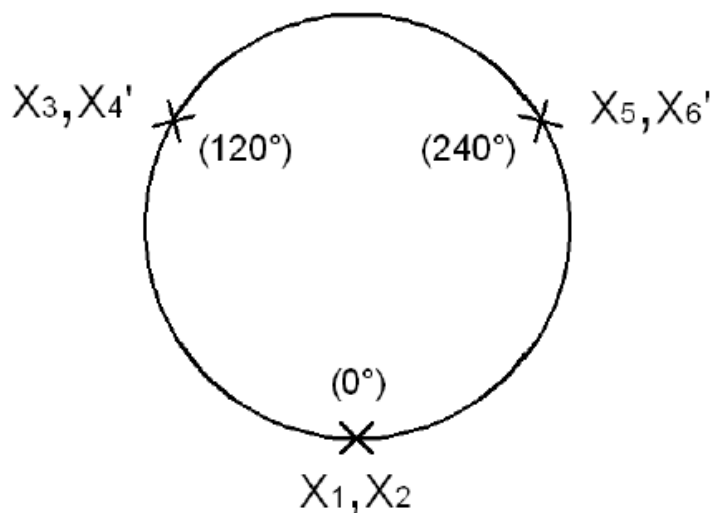
Klasa etalona	F_{min}
00	$\geq 4000 \times r$
0,5	$\geq 2000 \times r$
1	$\geq 1000 \times r$
2	$\geq 500 \times r$

2. Minimalna sila mora biti $\geq 0,02 F_f$.

5.5. Postupak umjeravanja

Prije nego što se etalon optereti silama za umjeravanje u zadanom smjeru (tlak ili vlak), potrebno ga je preopteretiti. Na etalon se treba primijeniti maksimalna sila tri puta za redom, svaki puta u trajanju od 1 do 1,5 minute. Predopterećenja i opterećenje etalona moraju imati isto usmjerenje te djelovati na identičnom položaju. Prije svake promjene smjera opterećenja tijekom umjeravanja, potrebno je preopteretiti etalon u tom novom smjeru.

Silama za umjeravanje prijenosni etalon ukupno se opterećuje kroz šest mjernih nizova (slika 18.). Prva dva niza sila (X_1 i X_2) su nizovi rastućih vrijednosti sila, bez rotacije dinamometra (položaj na 0°). Potom slijede još četiri niza opterećenja. Rastući treći niz (X_3) i padajući četvrti (X_4') istog su koraka te se određuju se za položaj dinamometra zarotiranog za 120° s obzirom na početni položaj. Zatim se dinamometar rotira za kut 240° od početnog položaja te se opterećuje petim nizom rastućih sila (X_5) i šestim nizom padajućih sila (X_6') [11].



Slika 18. Pozicije dinamometra tijekom umjeravanja [11]

Za određivanje interpolacijske krivulje rezultata umjeravanja, bitno je po svakom mjernom nizu imati barem osam mjernih točaka sila različitih iznosa, koje trebaju biti što ujednačenije raspoređene unutar raspona mjernog niza.

Nulta očitavanja (kad ne djeluje sila) bilježe se u svakom mjernom nizu i to prije početka djelovanja sile te najmanje 30 sekundi nakon djelovanja sile. Između susjednih nizova mjerenja potrebno je pričekati minimalno 3 minute. Do značajnije promjene nultih očitavanja može doći zbog plastične deformacije uslijed preopterećenja dinamometra. Vremenski intervali između mjernih točaka unutar jednog mjernog niza trebaju biti što sličniji, a minimalno 30 sekundi od početka djelovanja opterećenja potrebno je zabilježiti očitavanja.

U toku umjeravanja potrebno je barem jednom rastaviti uređaje s odvojivim dijelovima, uglavnom između drugog i trećeg mjernog niza, a nakon sastavljanja potrebno je najmanje tri puta ponovno preoptereti uređaj maksimalnom silom.

Umjeravanje se provodi na temperaturi od 18°C do 28°C sa stabilnom promjenom unutar $\pm 1^\circ\text{C}$. Potrebno je određeno vrijeme da se etalon prilagodi i postigne stabilnu temperaturu.

5.6. Kriterij ocjenjivanja prijenosnog etalona sile

Relativna pogreška obnovljivosti s rotacijom (b) :

Na temelju mjernih nizova 1, 3 i 5, računa se za svaku silu umjeravanja pomoću sljedećih izraza :

$$b = \left| \frac{x_{max} - X_{min}}{\bar{X}_r} \right| \cdot 100, \quad (18)$$

pri čemu je

$$\bar{X}_r = \frac{X_1 + X_3 + X_5}{3}. \quad (19)$$

Relativna pogreška ponovljivosti bez rotacije (b') :

Također se računa za svaku silu umjeravanja, na osnovu nizova 1 i 2, pomoću sljedećih izraza :

$$b' = \left| \frac{x_2 - X_1}{\bar{X}_{wr}} \right| \cdot 100, \quad (20)$$

pri čemu je

$$\bar{X}_{wr} = \frac{X_1 + X_2}{2}. \quad (21)$$

Relativno interpolacijsko odstupanje (f_c) :

Ova pogreška određuje se polinomom 1., 2., ili 3. stupnja koji određuje ovisnost izlaznih podataka o sili, a dobiva se iz rezultata mjerenja. Iz te vrijednosti moguće je procijeniti koliko dobro točke interpolirane polinomom aproksimiraju stvarne podatke umjeravanja. Ova pogreška se računa izrazom :

$$f_c = \frac{\bar{X}_r - X_a}{X_a} \cdot 100. \quad (22)$$

Relativno odstupanje nul vrijednosti (f_0) :

Nul vrijednost se očitava prije i poslije svakog mjernog niza, i to otprilike 30 sekundi nakon rasterećenja te se računa prema izrazu :

$$f_0 = \frac{i_f - i_0}{X_N} \cdot 100. \quad (23)$$

Najveće odstupanje nul vrijednosti uzima se u obzir kod klasifikacije etalona.

Relativna pogreška histereze (v) :

Računa se pri svakom umjeravanju koje se izvodi s rastućim i padajućim silama. Razlika između vrijednosti očitanih za obje serije s rastućim i padajućim silama omogućuje izračunavanje relativne pogreške histereze sljedećim izrazima :

$$v_1 = \frac{X'_4 - X_3}{X_3} \cdot 100, \quad (24)$$

$$v_2 = \frac{X'_6 - X_5}{X_5} \cdot 100, \quad (25)$$

a konačna vrijednost relativne pogreške histereze predstavlja aritmetičku sredinu v_1 i v_2 :

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2}. \quad (26)$$

5.7. Klasifikacija prijenosnih etalona

Kako bi se odredilo mjerno područje za koji se klasificira etalon potrebno je u obzir uzeti svaku mjernu točku umjeravanja, krenuvši od maksimalne pa sve do minimalne. Raspon klasifikacije prestaje kod zadnje sile za koju su još zadovoljeni uvjeti klasifikacije, a on bi trebao obuhvatiti područje od barem 50 – 100 % nazivne sile (F_N).

Etalon se može klasificirati za točno određene vrijednosti sila ili za interpolirane vrijednosti.

Kriteriji za klasifikaciju etalona za točno određene vrijednosti sile su :

- relativna pogreška obnovljivosti i ponovljivosti,
- relativno odstupanje nul vrijednosti,
- relativna pogreška histereze.

Kriteriji za klasifikaciju etalona za interpolirane vrijednosti sile su :

- relativne pogreške obnovljivosti i ponovljivosti,
- relativno interpolacijsko odstupanje,
- relativno odstupanje nul vrijednosti,
- relativna pogreška histereze.

Pripadnost umjeravanog prijenosnog etalona jednoj od 4 moguće klase određuje se prema iznosima zadanih kriterija. Kako bi etalon u nekom mjernom području pripadao određenoj klasi, moraju istodobno biti ispunjeni svi kriteriji. U slučaju da jedan kriterij nije ispunjen, onda će etalon pripasti klasi koja je određena tim kriterijem.

U tablici 5. prikazane su četiri moguće klase umjerenih prijenosnih etalona .

Tablica 5. Karakteristike prijenosnih etalona sile [11]

Klasa	Relativne pogreške (%)					Nesigurnost primijenjene sile umjeravanja ($k = 2$), (%)
	b	b'	f_c	f_0	v	
00	0,05	0,025	$\pm 0,025$	$\pm 0,012$	0,07	$\pm 0,01$
0,5	0,10	0,05	$\pm 0,05$	$\pm 0,025$	0,15	$\pm 0,02$
1	0,20	0,10	$\pm 0,10$	$\pm 0,050$	0,30	$\pm 0,05$
2	0,40	0,20	$\pm 0,20$	$\pm 0,10$	0,50	$\pm 0,10$

5.8. Potvrda o umjeravanju

Ako je prijenosni etalon zadovoljio kriterije u postupku umjeravanja, prema ovoj normi izdaje se potvrda o umjeravanja koja treba sadržavati sljedeće informacije :

- podatke o svim komponentama prijenosnog etalona, kao i podatke o uređaju na kojem je umjeravanje provedeno,
- način primjene sile (vlak ili tlak),
- potvrda da je prijenosni etalon u skladu sa zahtjevima preliminarnih testova,
- klasu i mjereno područje uporabe etalona,
- datum i rezultate umjeravanja, a po potrebi i interpolacijsku krivulju,
- temperaturu na kojoj je umjeravanje provedeno.

Prema ovoj normi izdaje se važeća potvrda na najviše 26 mjeseci, nakon čega je potrebno ponovno provesti umjeravanje prijenosnog etalona. Također, etalon je potrebno umjeriti i ranije ako je bio opterećen silom većom od one sile u testu preopterećenja, te nakon eventualnog kakvog popravka [11].

6. EKSPERIMENTALNI DIO

6.1. Plan eksperimenta

Cilj ovoga rada je prikazati kako brzina opterećivanja utječe na rezultate umjeravanja između nekonvencionalnog načina umjeravanja prijenosnog etalona sile, prirastom opterećenja različitim brzinama, i konvencionalnog načina određenog normom HRN EN ISO 376:2012. Eksperimentalni dio proveden je u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstva (LIMS) Fakulteta strojarstva i brodogradnje te su korištena dva dinamometra HBM Z30A i AEP TCE – TM oba nazivnih vrijednosti 10 kN. Dinamometar HBM je odabran kao referentni etalon, a dinamometar AEP kao umjeravani etalon. Također analiza i usporedba ova dva dinamometra bit će obrađena da se pokaže zašto je dinamometar HBM odabran kao referentni etalon u ovom eksperimentu. Umjeravanje s različitim brzinama će se provesti s dvije brzine s konstantnim prirastom sile, a sva mjerenja bit će isključivo u području tlačnog opterećenja. U ovom eksperimentu baziramo se jedino na etalon AEP koji se umjerava.

Nakon umjeravanja različitim brzinama provesti će se analiza i usporedba rezultata s rezultatima umjeravanja prema normi HRN EN ISO 376:2012 da bi se utvrdilo kakav utjecaj ima brzina opterećivanja na rezultate umjeravanja prijenosnog etalona sile.

6.1.1. Referentni etalon

Dinamometar HBM Z30A 10 kN umjeren je prema normi HRN EN ISO 376:2012 na nacionalnom etalonu ESZ 20 kN koji se nalazi u Češkom nacionalnom mjeriteljskom institutu u Pragu. Na slici 19. prikazan je dinamometar HBM Z30A 10 kN.



Slika 19. Dinamometar HBM Z30A 10kN

Osnovne karakteristike dinamometra HBM Z30A 10 kN dane su u tablici 6.

Tablica 6. Karakteristike HBM Z30A 10kN dinamometra

Proizvođač	Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH
Model	Z30A 10 kN
Nazivna sila	0 – 10 kN
Karakteristika	2 mV/V
Serijski broj	#164030033

Na slici 20. prikazan je nacionalni etalon ESZ 20 kN, a u tablici 7. dane su njegove karakteristike.



Slika 20. Nacionalni etalon ESZ 20kN [12]

Tablica 7. Karakteristike nacionalnog etalona ESZ 20kN [12]

Model	ESZ
Mjerno područje	150 N – 20 kN
Mjerna nesigurnost	$5 \cdot 10^{-5}$
Način opterećenja	opterećivanje direktno utezima

Na slici 21. prikazan je certifikat o umjeravanju dinamometra HBM Z30A 10 kN Češkog nacionalnog mjeriteljskog instituta.



Slika 21. Certifikat umjeravanja dinamometra Z30A 10 kN

6.1.2. Umjeravani etalon

Dinamometar AEP TCE – TM prikazan je na slici 22., a u tablici 8. dane su njegove osnovne karakteristike. Umjeravanje ovog dinamometra prema normi HRN EN ISO 376:2012 obrađeno je u poglavlju 0.

Tablica 8. Karakteristike dinamometra AEP TCE – TM

Proizvođač	AEP transducers
Model	TCE – TM 10 kN
Nazivna sila	10 kN
Karakteristika	2 mV/V
Serijski broj	SN 627331



Slika 22. Dinamometar AEP TCE – TM

6.1.1. Proces umjeravanja pri različitim brzinama opterećivanja

Umjeravanje različitim brzinama s konstantnim prirastom opterećenja provedeno je na uređaju koji može opterećivati u području vlaka ili tlaka. Uređaj posjeduje pet različitih reduktora koji se postavljaju na sam pogon uređaja i time se mogu postići različite brzine kontinuiranog opterećivanja. Reduktori koje uređaj posjeduje su sljedećih omjera 10:1, 100:1, 1000:1, 10000:1 i 100000:1, te su prikazani slikom 23.



Slika 23. Reduktori različitih omjera

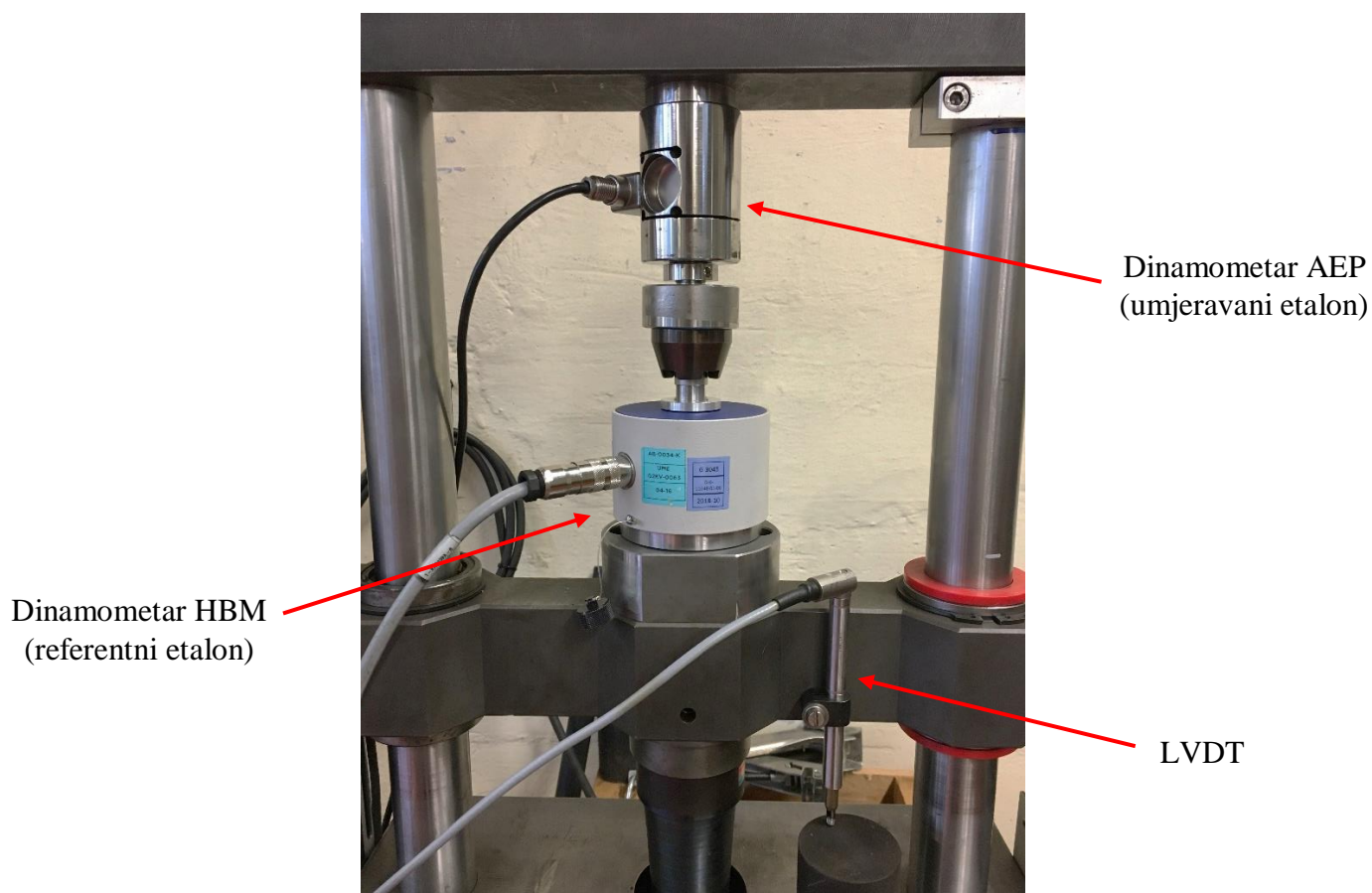
Umjeravanje je provedeno s dvije brzine opterećivanja i korištene su dvije redukcije 10:1 i 100:1. Za svaku brzinu umjeravanja provedena su tri niza opterećivanja.

Zbog ograničenosti uređaja kod umjeravanja različitim brzinama nije rađena rotacija dinamometra i nisu mjerene padajuće sile.

Navedene približne brzine prirasta opterećenja za svaku od redukcija su izračunate po aritmetičkoj sredini od tri niza :

- a) $v \approx 56,7450$ N/s za redukciju 10:1,
- b) $v \approx 4,5541$ N/s za redukciju 100:1.

Na slici 24. prikazan je način na koji su dinamometri postavljeni prilikom umjeravanja različitim brzinama.



Slika 24. Način montiranja dinamometara prilikom umjeravanja različitim brzinama

Također, korištena je i LVDT mjerna ćelija koja mjeri pomake i pretvara ih u električni izlazni signal u mV/V koji se očitavaju na mjernom pojačalu.

Korišteno je mjerno pojačalo HBM MGCplus AB22A (slika 25.) koje je ujedno i uređaj za očitavanje vrijednosti.

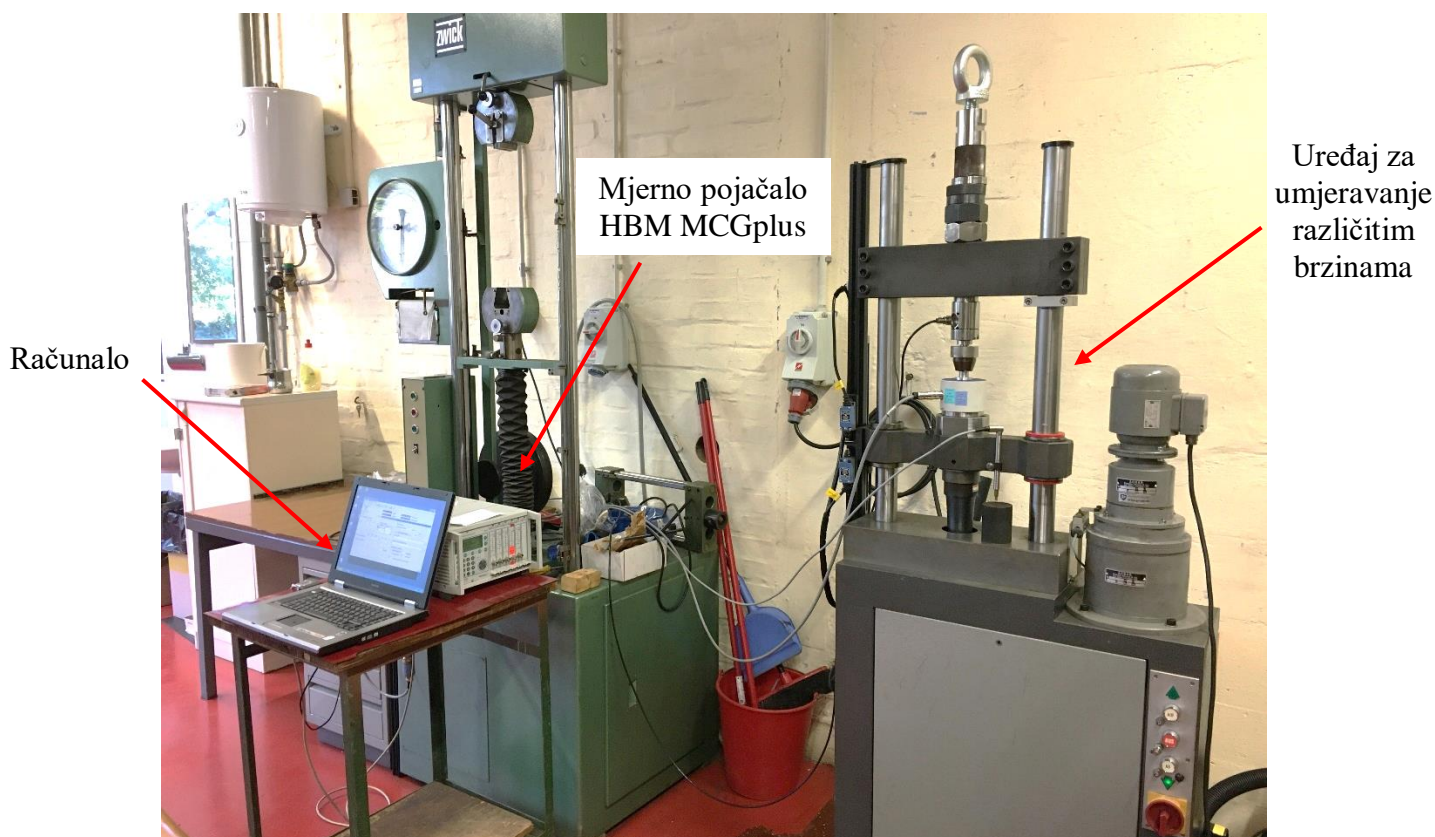
Na mjerno pojačalo povezani su umjeravani etalon, referentni etalon i LVDT. Umjeravani etalon (dinamometar AEP) spojen je na kanal br. 4, referentni etalon (dinamometar HBM) spojen je na kanal br. 3 i LVDT mjerna ćelija spojena je na kanal br. 5.

Mjerno pojačalo povezano je na računalo kako bi se lakše pratilo, očitavalo i pohranjivalo vrijednosti umjeravanja.

Kompletan sustav umjeravanja prijenosnog etalona različitim brzinama prikazan je na slici 26.



Slika 25. Mjerno pojačalo HBM MCGplus AB22A



Slika 26. Kompletan sustav za provođenje umjeravanja različitim brzinama

6.2. Rezultati umjeravanja dinamometra AEP TCE – TM prema normi HRN EN ISO 376:2012

Umjeravanje dinamometra AEP TCE – TM sukladno normi HRN EN ISO 376:2012 provedeno je u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstva (LIMS). Dinamometar je umjeren pomoću utega LIMS, a oznake umjeravanja su 12187 PTB 13 i 12188 PTB 13.

Prije provedbe mjernih nizova, dinamometar je tri puta predopterećen do iznosa nazivne sile 10 kN pri čemu su zabilježena očitavanja kod nazivne vrijednosti kao i očitavanja prije opterećenja i nakon rasterećenja. U tablici 9. prikazani su rezultati mjerenja kod preopterećivanja s pripadnom vrijednošću relativne pogreške nule, izračunate prema izrazu (23).

Tablica 9. Izmjerene vrijednosti i relativna pogreška nule kod predopterećenja dinamometra AEP TCE – TM

F (kN)	0° I	0° II	0° III	120°	240°
0	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
10	2,009470	2,003360	2,003370	2,00360	2,004290
0	0,000110	0,000020	0,000020	0,000010	-0,000010
f_0 (%)	0,005	0,001	0,001	0,000	0,000

U tablici 10. prikazani su rezultati umjeravanja prijenosnog etalona sile AEP TCE – TM. Kako je korak sile iznosio 10% nazivne sile, svaki mjerni niz sadrži po 10 mjernih točaka.

Tablica 10. Izmjerene vrijednosti pri opterećivanju u mjernim nizovima X1, X2, X3, X5 i pri rasterećivanju u mjernim nizovima X4', X6' dinamometra AEP TCE - TM

F (kN)	X_1 (mV/V) 0°	X_2 (mV/V) 0°	X_3 (mV/V) 120°	X_4' (mV/V)	X_5 (mV/V) 240°	X_6' (mV/V)
1	0,20034	0,20034	0,20025	0,20043	0,20052	0,20058
2	0,40060	0,40062	0,40055	0,40080	0,40089	0,40099
3	0,60090	0,60093	0,60087	0,60116	0,60124	0,60135
4	0,80125	0,80128	0,80120	0,80155	0,80163	0,80172
5	1,00161	1,00165	1,00157	1,00189	1,00204	1,00209
6	1,20199	1,20205	1,20196	1,20231	1,20248	1,20253
7	1,40235	1,40241	1,40237	1,40269	1,40291	1,40295
8	1,60271	1,60278	1,60284	1,60307	1,60332	1,60339
9	1,80310	1,80316	1,80323	1,80339	1,80375	1,80382
10	2,00345	2,00354	2,00359	-	2,00429	-

Da bi se umjeravani prijenosni etalon mogao klasificirati iz rezultata mjerenja izračunati su kriteriji za klasifikaciju. U tablici 11. prikazan je ostatak i relativno odstupanje nul vrijednosti (f_0) za mjerne nizove X_1 , X_2 , X_3/X_4' i X_5/X_6' , dobiveno prema izrazu (23).

Tablica 11. Ostatak i relativna pogreška nule nakon rasterećivanja u mjernim nizovima dinamometra AEP TCE – TM

	X_1 0°	X_2 0°	X_3/X_4' 120°	X_5/X_6 240°
ostatak (mV/V)	0,00003	0,00005	0,00007	0,00005
f_0 (%)	0,001	0,002	0,003	0,002

U tablici 12. prikazani su iznosi ostalih kriterija: relativne greške ponovljivosti bez rotacije (b') prema izrazu (20), relativne greške obnovljivosti s rotacijom (b) prema izrazu (18), relativne greške histereze (v) prema izrazu (26) i relativnog interpolacijskog odstupanja (f_0) prema izrazu (22). Za svaki iznos sile od 1 do 10 kN s korakom od 1 kN dane su i srednje vrijednosti očitavanja (X_r i X_{wr}) prema izrazima (19) i (21).

Tablica 12. Izračunate vrijednosti pogrešaka dinamometra AEP TCE – TM

<i>F</i> (kN)	<i>X</i> ₁ , <i>X</i> ₂		<i>X</i> ₁ , <i>X</i> ₃ , <i>X</i> ₅				
	0°		0°, 120°, 240°				
	<i>X</i> _{wr} (mV/V)	<i>b</i> ' (%)	<i>X</i> _r (mV/V)	<i>b</i> (%)	<i>X</i> _a (mV/V)	<i>f</i> _c (%)	<i>v</i> (%)
1	0,20034	0,000	0,20037	0,135	0,20033	0,022	0,060
2	0,40061	0,005	0,40068	0,085	0,40067	0,004	0,044
3	0,60092	0,005	0,60100	0,062	0,60102	-0,002	0,033
4	0,80127	0,004	0,80136	0,054	0,80138	-0,002	0,027
5	1,00163	0,004	1,00174	0,047	1,00175	-0,001	0,018
6	1,20202	0,005	1,20214	0,043	1,20214	0,000	0,017
7	1,40238	0,004	1,40254	0,040	1,40254	0,001	0,013
8	1,60275	0,004	1,60296	0,038	1,60294	0,001	0,009
9	1,80313	0,003	1,80336	0,036	1,80336	0,000	0,006
10	2,00350	0,004	2,00378	0,042	2,00379	0,000	-

Rezultati mjerenja ukazuju na vezu između primijenjene sile i očitane promjene napona, a ona se prikazuje polinomom određenog stupnja. Za dobivanje odgovarajućeg polinoma koristi se metoda najmanjih kvadrata koja dobro kompenzira i neke nesavršenosti koje mogu utjecati na oblik interpolacijske krivulje.

Jednadžba interpolacije izračunata pomoću metode najmanjih kvadrata na temelju srednjih vrijednosti glasi :

$$X = -5,03789884 \cdot 10^{-8}F^3 + 6,29920719 \cdot 10^{-6}F^2 + 0,200320583F,$$

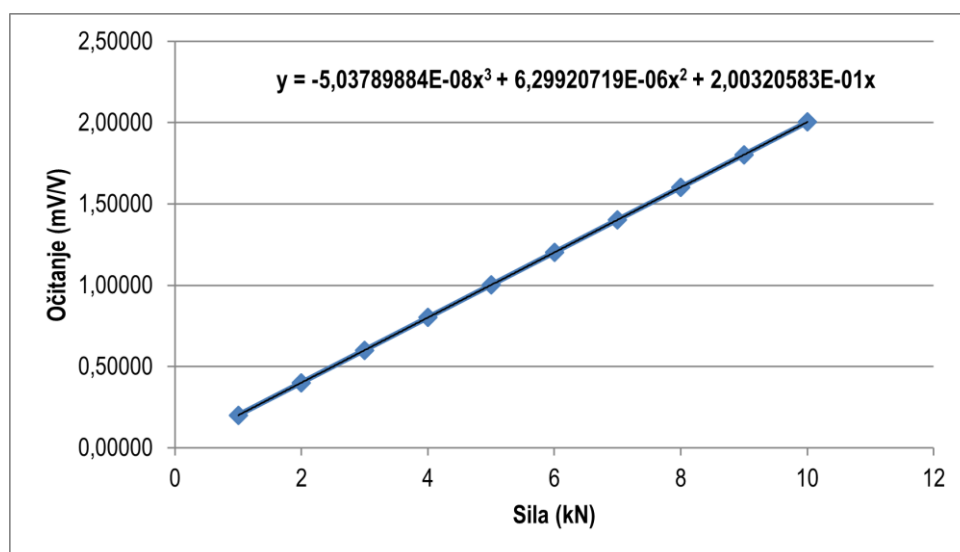
gdje je *F* u N.

Inverzna jednadžba interpolacije za proračun vrijednosti sile na temelju vrijednosti očitavanja *X* glasi:

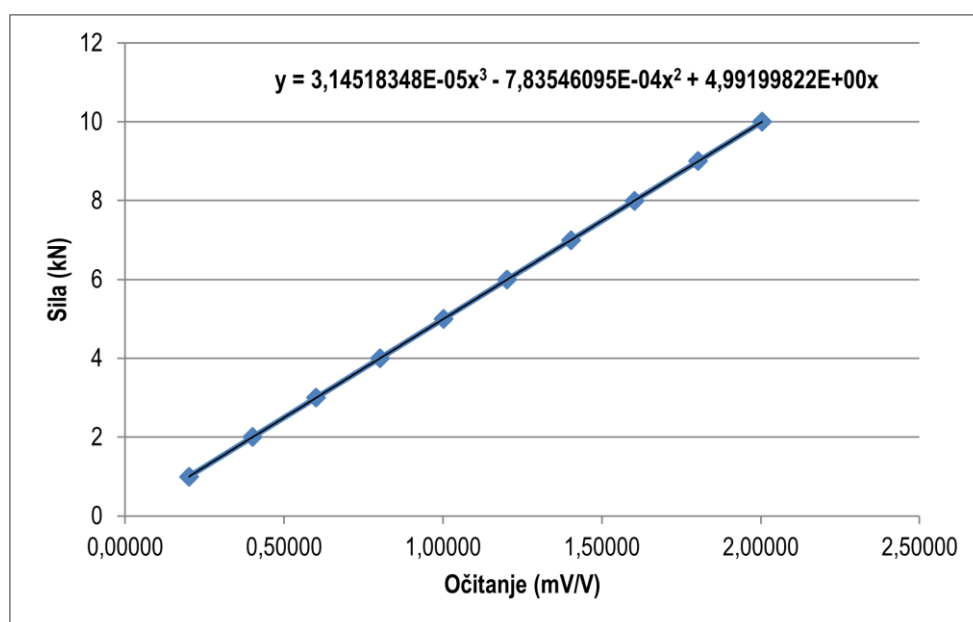
$$F = 3,14518348 \cdot 10^{-5}X^3 - 7,83546095 \cdot 10^{-4}X^2 + 4,99199822X,$$

gdje je *X* u mV/V.

Na slici 27. prikazana je krivulja interpolacije, a na slici 28. inverzna krivulja interpolacije.



Slika 27. Krivulja interpolacije dinamometra AEP TCE – TM



Slika 28. Inverzna krivulja interpolacije dinamometra AEP TCE – TM

U tablici 13. prikazane su vrijednosti promjene izlaznog signala u mV/V dobivene interpolacijom polinoma 3. stupnja za sile u mjernom području od 1 do 10 kN s korakom od 500 N.

Tablica 13. Interpolirane vrijednosti u ovisnosti o opterećenju dinamometra AEP TCE – TM

F (kN)	0	1	2	3	4
1	0,20033	0,22036	0,24039	0,26043	0,28046
1,5	0,30049	0,32053	0,34056	0,36060	0,38063
2	0,40067	0,42070	0,44074	0,46077	0,48080
2,5	0,50084	0,52088	0,54091	0,56095	0,58098
3	0,60102	0,62105	0,64109	0,66112	0,68116
3,5	0,70120	0,72123	0,74127	0,76131	0,78134
4	0,80138	0,82142	0,84145	0,86149	0,88153
4,5	0,90157	0,92160	0,94164	0,96168	0,98172
5	1,00175	1,02179	1,04183	1,06187	1,08191
5,5	1,10195	1,12198	1,14202	1,16206	1,18210
6	1,20214	1,22218	1,24222	1,26226	1,28230
6,5	1,30234	1,32238	1,34242	1,36246	1,38250
7	1,40254	1,42258	1,44262	1,46266	1,48270
7,5	1,50274	1,52278	1,54282	1,56286	1,58290
8	1,60294	1,62298	1,64302	1,66307	1,68311
8,5	1,70315	1,72319	1,74323	1,76327	1,78332
9	1,80336	1,82340	1,84344	1,86349	1,88353
9,5	1,90357	1,92361	1,94366	1,96370	1,98374
10	2,00379	2,02383	2,04387	2,06392	2,08396

Da bi se umjeravani dinamometar mogao klasificirati, iz rezultata mjerenja izračunati su kriteriji za klasifikaciju. U tablici 14. prikazana je najmanja mjerna nesigurnost te klasa koja je zadovoljena prilikom različitih opterećenja.

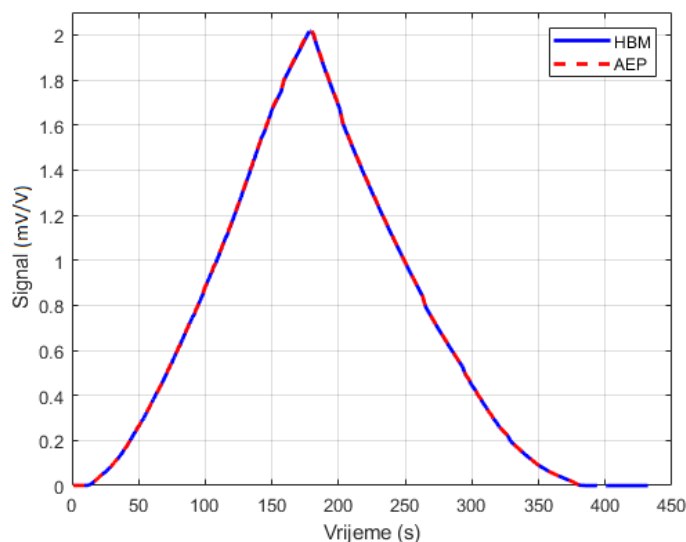
Tablica 14. Klasifikacija i pripadajuća najmanja relativna mjerna nesigurnost umjeravanja dinamometra AEP TCE – TM

Opterećenje – tlak (kN)	Klasa	Najmanja mjerna nesigurnost, W (%)		
		Rastuće sile	Rastuće/padajuće sile	Ukupno
1	1	0,103784	0,124724	0,114254123
2	1	0,098657	0,117269	0,107962961
3	1	0,093529	0,109815	0,101671798
4	1	0,088401	0,102360	0,095380636
5	1	0,083273	0,094906	0,089089473
6	1	0,078145	0,087451	0,082798311
7	1	0,073017	0,079997	0,076507148
8	1	0,067889	0,072543	0,070215986
9	1	0,062762	0,065088	0,063924823
10	1	0,057634	0,057634	0,057633661

6.3. Rezultati umjeravanja dinamometra AEP TCE – TM različitim brzinama

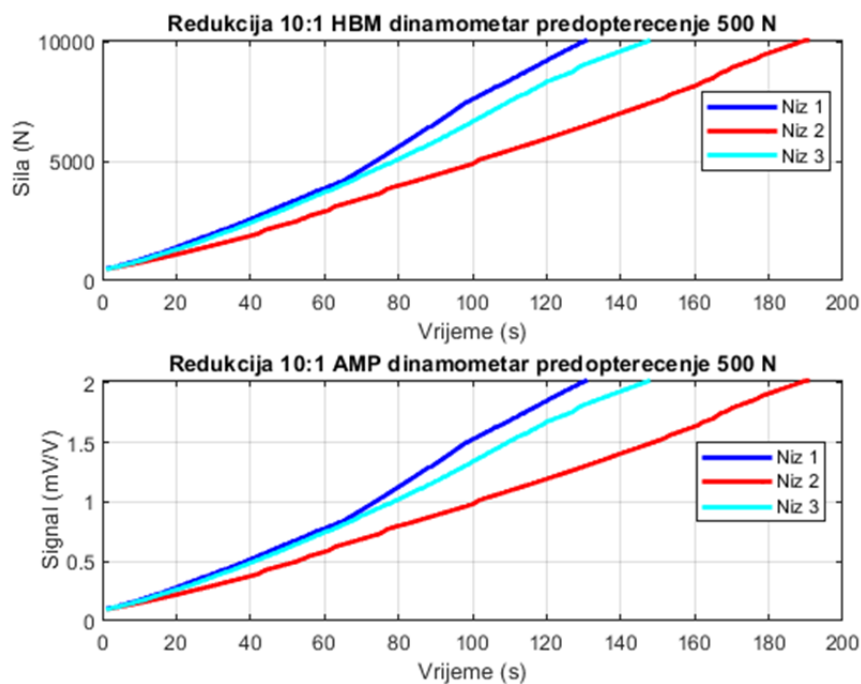
6.3.1. Redukcija 10:1

Prvi korak za dobivanje rezultata kod umjeravanja različitim brzinama je snimka ulaznog signala u ovisnosti o vremenu. Pošto su provedena tri niza opterećivanja postoje i tri snimke sirovog signala koje su vrlo slične, stoga će biti prikazana samo snimka za jedan od tri niza. Snimka ulaznog signala jednog niza za redukciju 10:1 prikazana je slikom 29.



Slika 29. Ulazno mjerenje za redukciju 10:1

Slijedi obrada ulaznih signala i uvodi se sila predopterećenja zbog toga što se mjeri vrijeme. Izmjereno vrijeme ne bi bilo isto u svakom nizu ako bi mjerenje bilo započeto od 0 N, zato što se zračnost između dinamometara razlikuje od niza do niza. Stoga se vrijeme počinje kontinuirano mjeriti od sile predopterećenja koja iznosi 500 N da se izbjene eventualno rasipanje rezultata. Mjerenje vremena od sile predopterećenja do nazivne sile dinamometra za redukciju 10:1 prikazano je slikom 30.

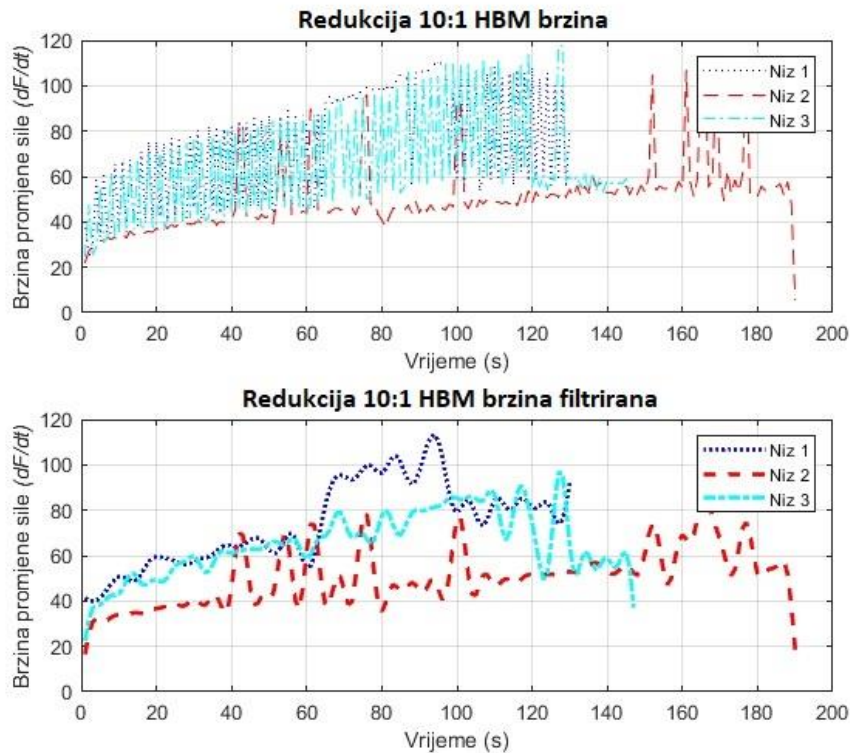


Slika 30. Sila i signal od predopterećenja do nazivne sile dinamometara HBM i AMP za redukciju 10:1

Prikazuje stvarna brzina u svakom trenutku umjeravanja za sva tri niza. Dodatno se brzina filtrira niskopropusnim filterom za dobivanje jasnijeg prikaza. Slika 31. prikazuje brzinu sva tri niza s i bez filtera za redukciju 10:1.

Brzina u svakom nizu je :

- $v_1 = 73,8546 \text{ N/s}$ za niz 1,
- $v_2 = 50,5168 \text{ N/s}$ za niz 2,
- $v_3 = 45,8636 \text{ N/s}$ za niz 3.



Slika 31. Brzina prirasta sile dinamometra HBM za redukciju 10:1

Kako bi se odredio izlazni signal u mV/V umjeravanog etalona (dinamometra AEP) pri određenoj vrijednosti sile koristi se referentni etalon (dinamometar HBM). Pomoću karakteristike dinamometra HBM određuje se njegov izlazni signal pri određenoj vrijednosti sile, te se zapisuje vrijeme. Pri tom vremenu očitava se izlazni signal umjeravanog etalona (dinamometra AEP) pošto je vrijeme jedina konstanta koja povezuje ova dva etalona tj. dinamometra. U tablici 15. dani su rezultati umjeravanja dinamometra AEP kroz tri niza redukcijom 10:1.

Tablica 15. Rezultati umjeravanja kroz tri niza opterećivanja za redukciju 10:1

HBM F (kN)	AEP		
	X_1 (mV/V)	X_2 (mV/V)	X_3 (mV/V)
1	0,200448525862752	0,199995080289264	0,200862432221603
2	0,400802487680082	0,400090766083294	0,401392414491407
3	0,601240026553388	0,600292595405733	0,602011834000157
4	0,801610067128036	0,800556466539578	0,802365894885023
5	1,00203137726984	1,00067779178935	1,00279196247270
6	1,20240884207990	1,20100335193379	1,20321433648854
7	1,40278501747066	1,40128567694979	1,40369108314372
8	1,60323211890247	1,60134973864778	1,60411889023392
9	1,80365366612078	1,80163096167211	1,80456797754366
10	2,00404809251669	2,00190782240586	2,00500226160848

U tablici 16. prikazani su iznosi ostalih kriterija umjeravanjem redukcijom 10:1, a to su: relativne greške ponovljivosti bez rotacije (b') prema izrazu (20), relativne greške obnovljivosti s rotacijom (b) prema izrazu (18), i relativnog interpolacijskog odstupanja (f_c) prema izrazu (22). Za svaki iznos sile od 1 do 10 kN s korakom od 1 kN dane su i srednje vrijednosti očitavanja (X_r i X_{wr}) prema izrazima (19) i (21).

Tablica 16. Izračunate vrijednosti pogrešaka za redukciju 10:1

F (kN)	X_1, X_2, X_3					
	X_{wr} (mV/V)	b' (%)	X_r (mV/V)	b (%)	X_a (mV/V)	f_c (%)
1	0,20022	0,226	0,20066	0,206	0,20059	0,033
2	0,40045	0,178	0,40110	0,147	0,40111	-0,004
3	0,60077	0,158	0,60163	0,128	0,60159	0,006
4	0,80108	0,132	0,80199	0,094	0,80202	-0,005
5	1,00135	0,135	1,00241	0,076	1,00244	-0,002
6	1,20171	0,117	1,20281	0,067	1,20283	-0,002
7	1,40204	0,107	1,40324	0,065	1,40323	0,000
8	1,60229	0,117	1,60368	0,055	1,60364	0,002
9	1,80264	0,112	1,80411	0,051	1,80408	0,002
10	2,00298	0,107	2,00453	0,048	2,00456	-0,002

Jednadžba interpolacije za redukciju 10:1 glasi :

$$X = 2,12304689 \cdot 10^{-6} F^3 - 3,81516836 \cdot 10^{-5} F^2 + 0,200624814 F ,$$

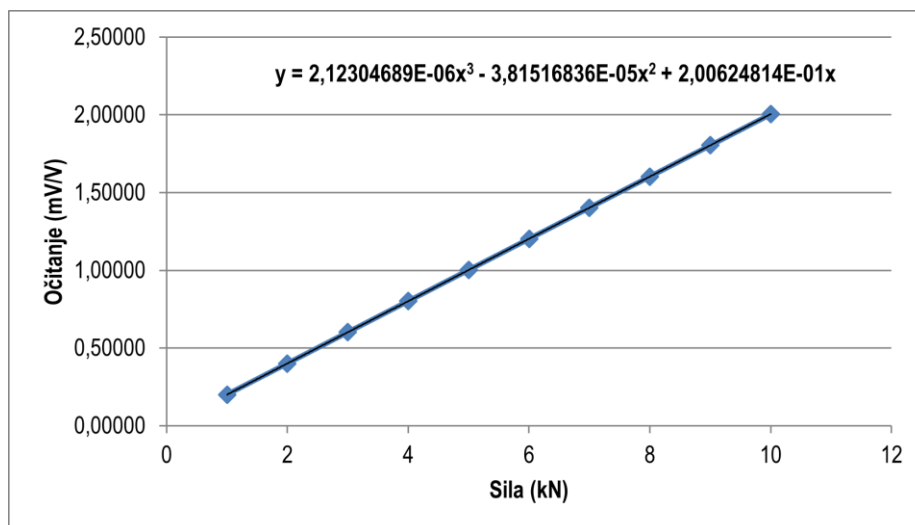
gdje je F u N.

Inverzna jednadžba interpolacije za redukciju 10:1 glasi :

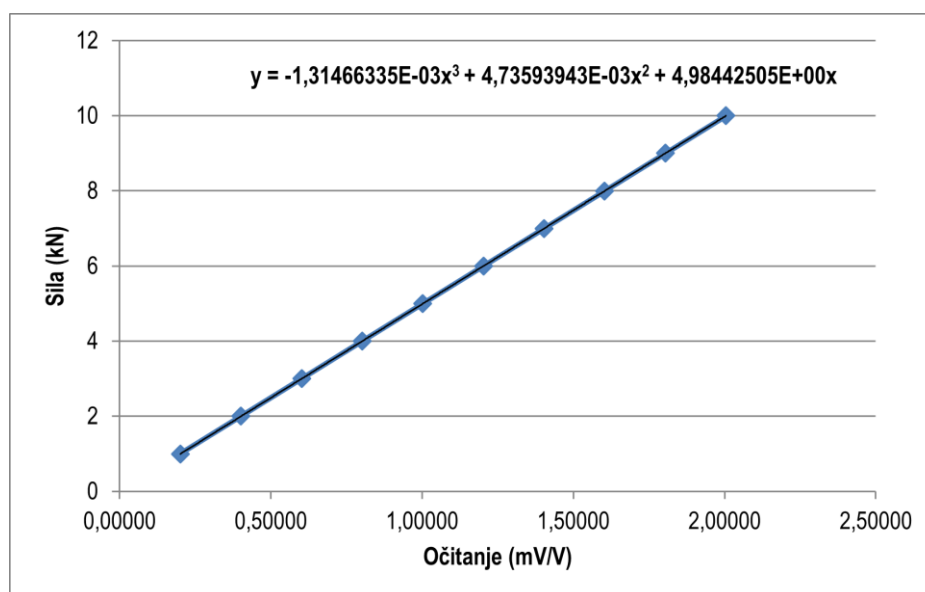
$$F = -1,31466335 \cdot 10^{-3} X^3 + 4,73593943 \cdot 10^{-3} X^2 + 4,98442505 X ,$$

gdje je X u mV/V.

Na slici 32. prikazana je krivulja interpolacije redukcije 10:1, a na slici 33. inverzna krivulja interpolacije redukcije 10:1.



Slika 32. Krivulja interpolacije redukcije 10:1



Slika 33. Inverzna krivulja interpolacije redukcije 10:1

U tablici 17. prikazane su vrijednosti promjene izlaznog signala u mV/V dobivene interpolacijom polinoma 3. stupnja za sile u mjernom području od 1 do 10 kN s korakom od 500 N za redukciju 10:1.

Tablica 17. Interpolirane vrijednosti u ovisnosti o opterećenju za redukciju 10:1

F (kN)	0	1	2	3	4
1	0,20059	0,22064	0,24070	0,26075	0,28081
1,5	0,30086	0,32091	0,34096	0,36101	0,38106
2	0,40111	0,42116	0,44121	0,46126	0,48131
2,5	0,50136	0,52140	0,54145	0,56150	0,58154
3	0,60159	0,62163	0,64168	0,66172	0,68177
3,5	0,70181	0,72185	0,74190	0,76194	0,78198
4	0,80202	0,82207	0,84211	0,86215	0,88219
4,5	0,90223	0,92227	0,94231	0,96235	0,98240
5	1,00244	1,02248	1,04252	1,06256	1,08260
5,5	1,10264	1,12268	1,14272	1,16275	1,18279
6	1,20283	1,22287	1,24291	1,26295	1,28299
6,5	1,30303	1,32307	1,34311	1,36315	1,38319
7	1,40323	1,42327	1,44331	1,46335	1,48339
7,5	1,50344	1,52348	1,54352	1,56356	1,58360
8	1,60364	1,62369	1,64373	1,66377	1,68381
8,5	1,70386	1,72390	1,74395	1,76399	1,78404
9	1,80408	1,82413	1,84417	1,86422	1,88427
9,5	1,90431	1,92436	1,94441	1,96446	1,98451
10	2,00456	2,02461	2,04466	2,06471	2,08476

U tablici 18. prikazana je mjerna nesigurnost koja je zadovoljena prilikom različitih opterećenja za redukciju 10:1.

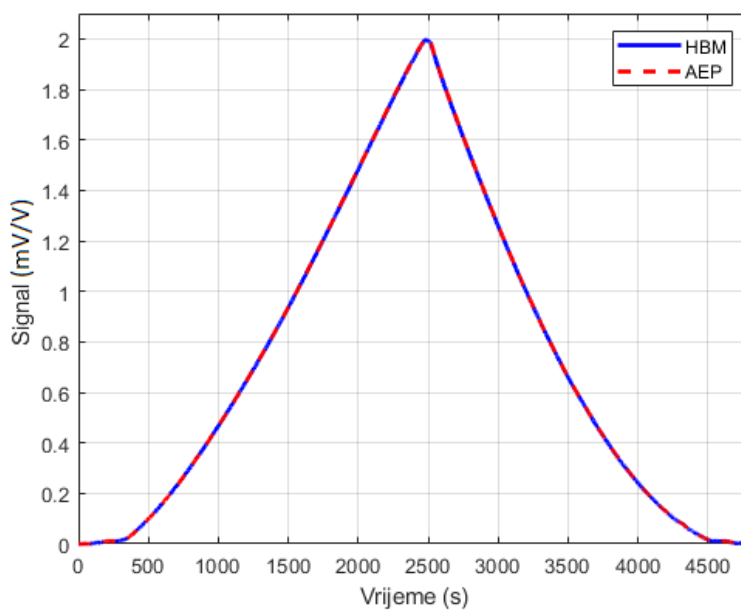
Tablica 18. Pripadajuća mjerna nesigurnost umjeravanja za redukciju 10:1

Opterećenje – tlak (kN)	Mjerna nesigurnost, W (%)
1	0,114254123
2	0,107962961
3	0,101671798
4	0,095380636
5	0,089089473
6	0,082798311
7	0,076507148
8	0,070215986
9	0,063924823
10	0,057633661

6.3.2. Redukcija 100:1

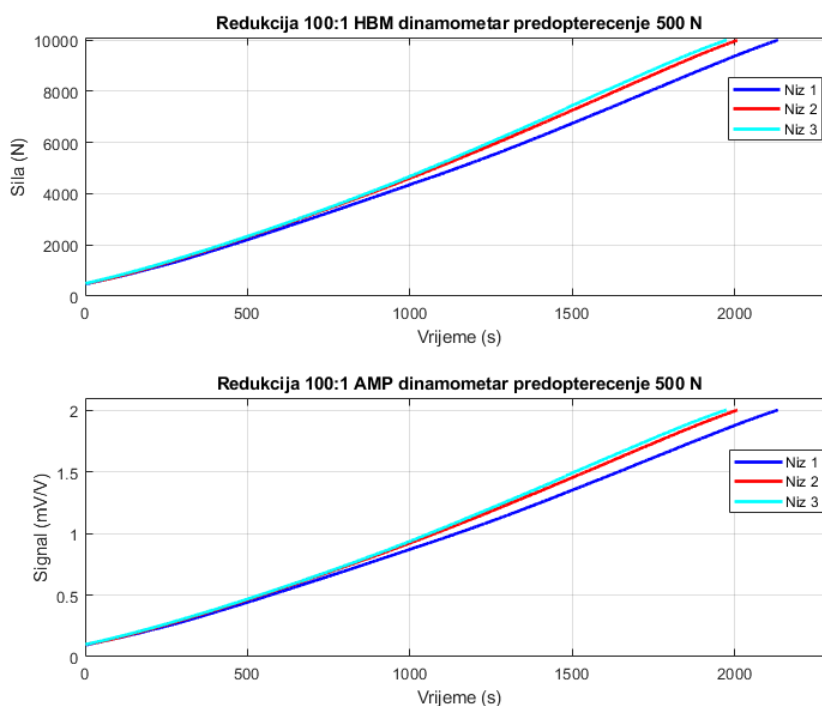
Dobivanje rezultata umjeravanja redukcijom 100:1 identično je kao kod redukcije 10:1, te će biti dani samo podaci bez detaljnijih opisa, pošto oni analogno vrijede i za ovu redukciju.

Snimka ulaznog signala jednog niza za redukciju 100:1 prikazana je slikom 34.



Slika 34. Ulazno mjerenje za redukciju 100:1

Mjerenje vremena od sile predopterećenja do nazivne sile dinamometra za redukciju 100:1 prikazano je slikom 35.

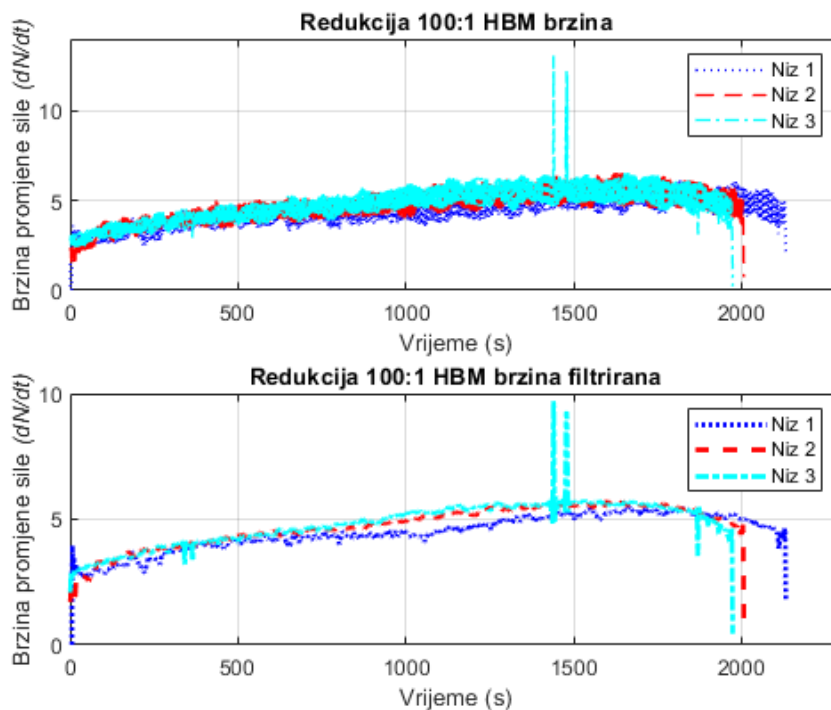


Slika 35. Sila i signal od predopterećenja do nazivne sile dinamometara HBM i AMP za redukciju 100:1

Slika 36. prikazuju brzinu sva tri niza s i bez filtera za redukciju 100:1.

Brzina u svakom nizu je :

- $v_1 = 4,4544$ N/s za niz 1,
- $v_2 = 4,7270$ N/s za niz 2,
- $v_3 = 4,8104$ N/s za niz 3.



Slika 36. Brzina prirasta sile na dinamometra HBM za redukciju 100:1

U tablici 19. dani su rezultati umjeravanja dinamometra AEP kroz tri niza redukcijom 100:1.

Tablica 19. Rezultati umjeravanja kroz tri niza opterećivanja za redukciju 100:1

HBM F (kN)	AEP		
	X_1 (mV/V)	X_2 (mV/V)	X_3 (mV/V)
1	0,200119157604036	0,200126517088380	0,200179129759408
2	0,400381669857992	0,400423677756026	0,400450252835761
3	0,600638815152445	0,600734037223383	0,600770225125355
4	0,800929930756303	0,801056239358197	0,801081229217164
5	1,00123997558510	1,00136826517348	1,00144966203721
6	1,20159833199749	1,20172426738855	1,20179314026301
7	1,40194540458575	1,40212331994622	1,40213478346831
8	1,60227486457548	1,60244339012284	1,60255153086496
9	1,80266504981076	1,80289083873367	1,80295517983438
10	2,00335709356591	2,00670581948199	2,00492936408253

U tablici 20. dani su iznosi ostalih kriterija umjeravanjem redukcijom 100:1, a to su: relativne greške obnovljivosti bez rotacije (b') prema izrazu (20), relativne greške ponovljivosti s rotacijom (b) prema izrazu (18), i relativnog interpolacijskog odstupanja (f_0) prema izrazu (22). Za svaki iznos sile od 1 do 10 kN s korakom od 1 kN dane su i srednje vrijednosti očitavanja (X_r i X_{wr}) prema izrazima (19) i (21).

Tablica 20. Izračunate vrijednosti pogrešaka za redukciju 100:1

F (kN)	X_1, X_2, X_3					
	X_{wr} (mV/V)	b' (%)	X_r (mV/V)	b (%)	X_a (mV/V)	f_c (%)
1	0,20012	0,004	0,20015	0,030	0,20028	-0,063
2	0,40040	0,010	0,40042	0,017	0,40051	-0,024
3	0,60069	0,016	0,60070	0,022	0,60074	-0,006
4	0,80099	0,016	0,80101	0,019	0,80097	0,004
5	1,00130	0,013	1,00134	0,021	1,00124	0,010
6	1,20166	0,010	1,20170	0,016	1,20157	0,010
7	1,40203	0,013	1,40204	0,014	1,40198	0,004
8	1,60236	0,011	1,60241	0,017	1,60249	-0,005
9	1,80278	0,013	1,80281	0,016	1,80313	-0,018
10	2,00503	0,167	2,00414	0,078	2,00393	0,011

Jednadžba interpolacije za redukcije 100:1 glasi :

$$X = 3,93515585 \cdot 10^{-6} F^3 - 3,02117887 \cdot 10^{-5} F^2 + 0,200301367 F ,$$

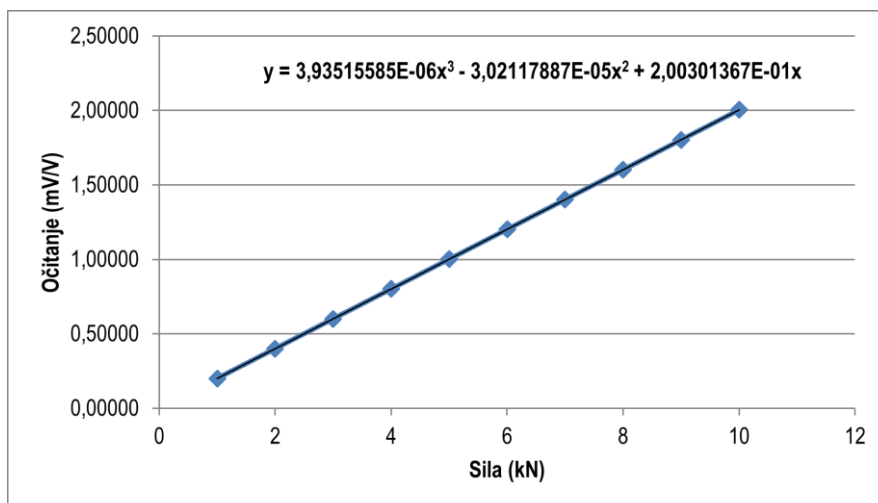
gdje je F u N.

Inverzna jednadžba interpolacije za redukcije 100:1 glasi :

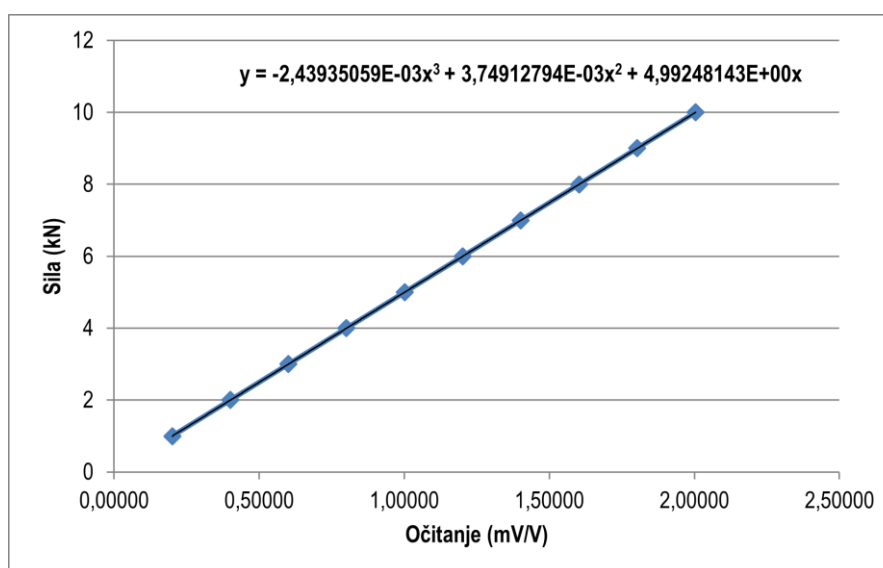
$$F = -2,43935059 \cdot 10^{-3} X^3 + 3,74912794 \cdot 10^{-3} X^2 + 4,99248143 X ,$$

gdje je X u mV/V.

Na slici 37. prikazana je krivulja interpolacije redukcije 100:1, a na slici 38. inverzna krivulja interpolacije redukcije 100:1.



Slika 37. Krivulja interpolacije redukcije 100:1



Slika 38. Inverzna krivulja interpolacije redukcije 100:1

U tablici 21. dane su vrijednosti promjene izlaznog signala u mV/V dobivene interpolacijom polinoma 3. stupnja za sile u mjernom području od 1 do 10 kN s korakom od 500 N za redukciju 100:1.

Tablica 21. Interpolirane vrijednosti u ovisnosti o opterećenju za redukciju 100:1

F (kN)	0	1	2	3	4
1	0,20028	0,22030	0,24032	0,26035	0,28037
1,5	0,30040	0,32042	0,34044	0,36047	0,38049
2	0,40051	0,42054	0,44056	0,46058	0,48060
2,5	0,50063	0,52065	0,54067	0,56069	0,58072
3	0,60074	0,62076	0,64078	0,66081	0,68083
3,5	0,70085	0,72088	0,74090	0,76092	0,78095
4	0,80097	0,82100	0,84102	0,86105	0,88108
4,5	0,90110	0,92113	0,94116	0,96119	0,98121
5	1,00124	1,02127	1,04130	1,06133	1,08137
5,5	1,10140	1,12143	1,14146	1,16150	1,18153
6	1,20157	1,22161	1,24164	1,26168	1,28172
6,5	1,30176	1,32180	1,34185	1,36189	1,38193
7	1,40198	1,42203	1,44207	1,46212	1,48217
7,5	1,50222	1,52227	1,54233	1,56238	1,58244
8	1,60249	1,62255	1,64261	1,66267	1,68273
8,5	1,70280	1,72286	1,74293	1,76299	1,78306
9	1,80313	1,82321	1,84328	1,86335	1,88343
9,5	1,90351	1,92359	1,94367	1,96376	1,98384
10	2,00393	2,02402	2,04411	2,06420	2,08429

U tablici 22. dana je mjerna nesigurnost koja je zadovoljena prilikom različitih opterećenja za redukciju 100:1.

Tablica 22. Pripadajuća mjerna nesigurnost umjeravanja za redukciju 100:1

Opterećenje – tlak (kN)	Mjerna nesigurnost, W (%)
1	0,114254123
2	0,107962961
3	0,101671798
4	0,095380636
5	0,089089473
6	0,082798311
7	0,076507148
8	0,070215986
9	0,063924823
10	0,057633661

7. Analiza rezultata umjeravanja

7.1. Analiza rezultata umjeravanja dinamometara HBM Z30A i AEP TCE – TM sukladno normi HRN EN ISO 376:2012

Svrha ove analize je usporedba rezultata umjeravanja prema normi HRN EN ISO 376:2012 između dinamometara HBM Z30A i AEP TCE – TM kako bi se pokazalo zašto je dinamometara HBM u ovom eksperimentu odabran za referentni etalon.

7.1.1. Rezultati umjeravanja dinamometra HBM Z30A prema normi HRN EN ISO 376:2012

Pošto je umjeravanje dinamometra HBM Z30A provedeno na nacionalnom etalonu u Češkoj, ovdje ćemo prikazati samo rezultate umjeravanja koji su potrebni da se napravi usporedba.

U tablici 23. dane su izračunate vrijednosti pogrešaka, dok u tablici 24. klasifikacija i najmanja relativna mjerna nesigurnost umjeravanja.

Tablica 23. Izračunate vrijednosti pogrešaka dinamometra HBM Z30A

<i>F</i> (kN)	X_1, X_2 0°		X_1, X_3, X_5 0°, 120°, 240°				
	X_{wr}	b'	X_r	b	X_a	f_c	ν
	(mV/V)	(%)	(mV/V)	(%)	(mV/V)	(%)	(%)
1	0,20004	0,000	0,20005	0,005	0,20005	0,000	0,022
2	0,40009	0,000	0,40010	0,002	0,40010	-0,001	0,020
3	0,60015	0,000	0,60016	0,003	0,60016	0,000	0,017
4	0,80022	0,001	0,80023	0,001	0,80023	0,000	0,014
5	1,00029	0,000	1,00029	0,001	1,00029	0,000	0,011
6	1,20037	0,000	1,20038	0,001	1,20037	0,001	0,008
7	1,40043	0,000	1,40044	0,001	1,40044	0,000	0,006
8	1,60051	0,001	1,60051	0,001	1,60052	0,000	0,004
9	1,80058	0,001	1,80059	0,002	1,80059	0,000	0,002
10	2,00066	0,000	2,00067	0,001	2,00067	0,000	-

Tablica 24. Klasifikacija i pripadajuća najmanja relativna mjerna nesigurnost umjeravanja dinamometra HBM Z30A

Opterećenje – tlak (kN)	Klasa	Najmanja mjerna nesigurnost, W (%)
1	00	0,0068
2	00	0,0055
3	00	0,0048
4	00	0,0046
5	00	0,0043
6	00	0,0046
7	00	0,0043
8	00	0,0044
9	00	0,0044
10	00	0,0043

Iz priloženih tablica može se vidjeti da se radi o vrlo preciznom dinamometru koji je klase 00, a rezultat toga je njegovo umjeravanje na nacionalnom etalonu.

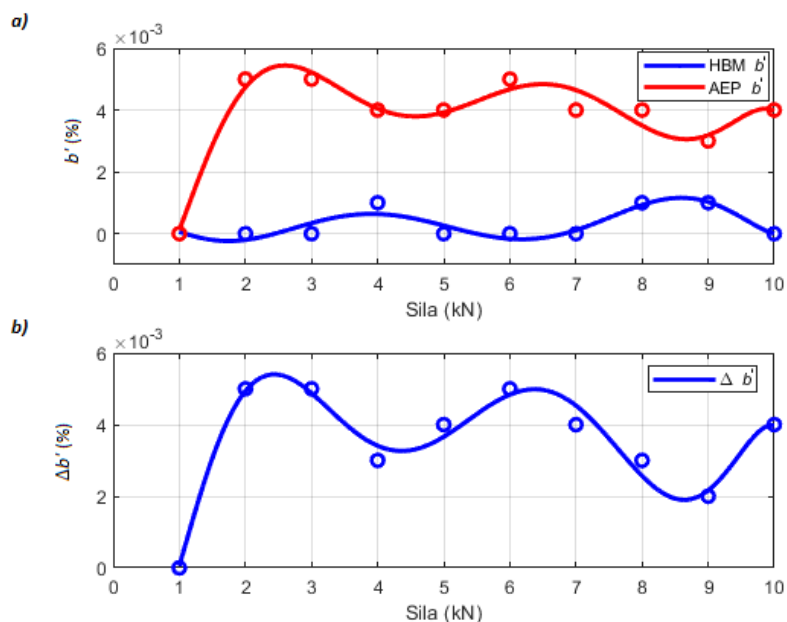
7.1.2. Usporedba rezultata dinamometara HBM Z30A i AEP TCE – TM

Usporedba rezultata bit će prikazana tablično i grafički. Vrijednosti koje će biti uspoređene su relativna pogreška obnovljivosti s rotacijom (b), relativna pogreška ponovljivosti bez rotacije (b'), relativna pogreška interpolacije (f_c), relativna pogreška histereze (v) i mjerna nesigurnost (W). Ove vrijednosti za dinamometar HBM su uzete iz tablica 23. i 24., a za dinamometar AEP iz tablica 12. i 14.

U tablici 25. dane su vrijednosti relativne pogreške obnovljivosti s rotacijom (b), relativne pogreške ponovljivosti bez rotacije (b') i njihova razlika, a grafički je prikazano na slikama 39. i 40.

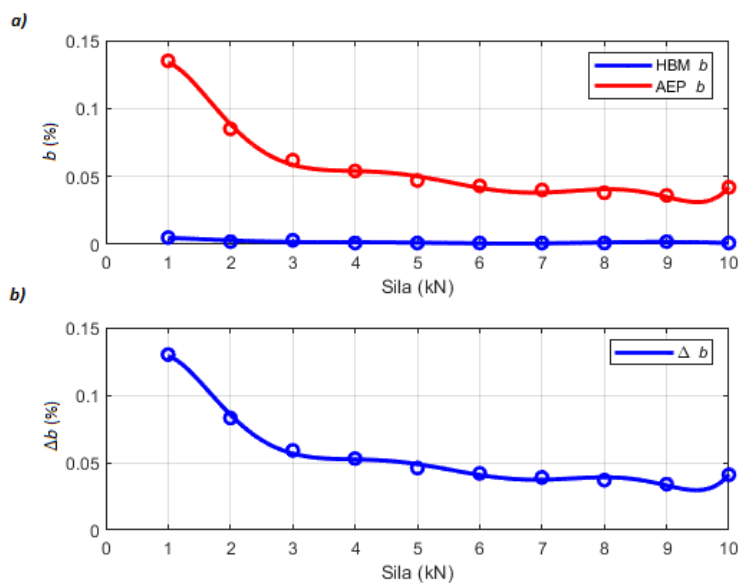
Tablica 25. Relativne pogreške obnovljivosti s rotacijom i ponovljivosti bez rotacije dinamometara HBM Z30A i AEP TCE – TM

F (kN)	HBM Z30A		AEP TCE – TM		$\Delta b'$	Δb
	b'	b	b'	b		
1	0,000	0,005	0,000	0,135	0	0,13
2	0,000	0,002	0,005	0,085	0,005	0,083
3	0,000	0,003	0,005	0,062	0,005	0,059
4	0,001	0,001	0,004	0,054	0,003	0,053
5	0,000	0,001	0,004	0,047	0,004	0,046
6	0,000	0,001	0,005	0,043	0,005	0,042
7	0,000	0,001	0,004	0,040	0,004	0,039
8	0,001	0,001	0,004	0,038	0,003	0,037
9	0,001	0,002	0,003	0,036	0,002	0,034
10	0,000	0,001	0,004	0,042	0,004	0,041



Slika 39. Relativne pogreške a) ponovljivosti bez rotacije dinamometara HBM Z30A i AEP TCE – TM, b) Razlika pogrešaka

Relativna pogreška ponovljivosti bez rotacije dinamometra AEP dosta visoka u odnosu na relativnu pogrešku ponovljivosti bez rotacije dinamometra HBM koja je linearnija i nema toliko velike oscilacije kao pogreška ponovljivosti dinamometra AEP.



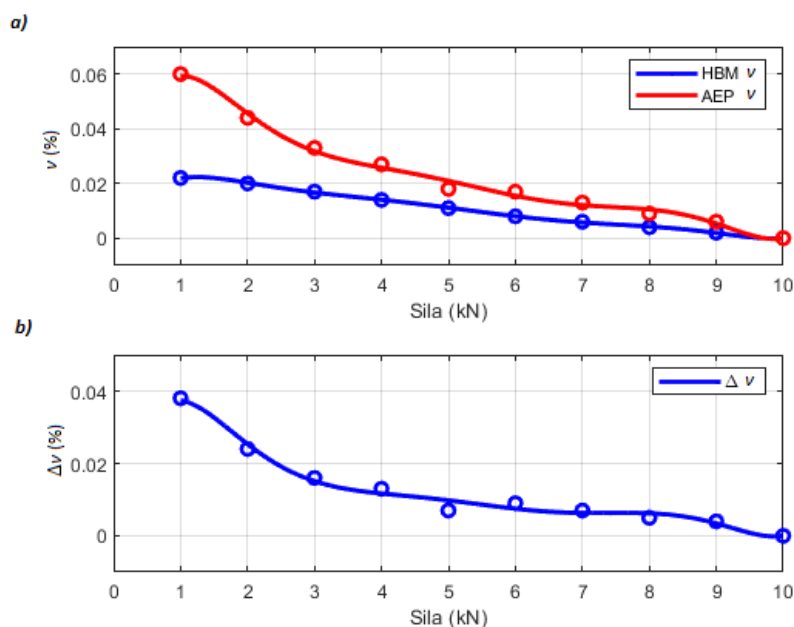
Slika 40. Relativne pogreške a) obnovljivosti s rotacijom dinamometara HBM Z30A i AEP TCE – TM, b) Razlika pogrešaka

Relativna pogreška obnovljivosti s rotacijom dinamometra AEP u početku za vrijednosti sile od 1 kN i 2 kN je vrlo visoka, pada velikom brzinom i približava se relativnog pogrešci obnovljivosti s rotacijom dinamometra HBM, a od vrijednosti sile od 3 kN nastavlja padati ali vrlo malom brzinom. Pogreška obnovljivosti dinamometra HBM je vodoravan pravac paralelan s os apscise i kontinuirana je za sve vrijednosti sile.

U tablici 26. dane su vrijednosti relativne pogreške interpolacije (f_c), relativne pogreške histereze (v) i njihova razlika, a grafički je prikazano na slikama 41. i 42.

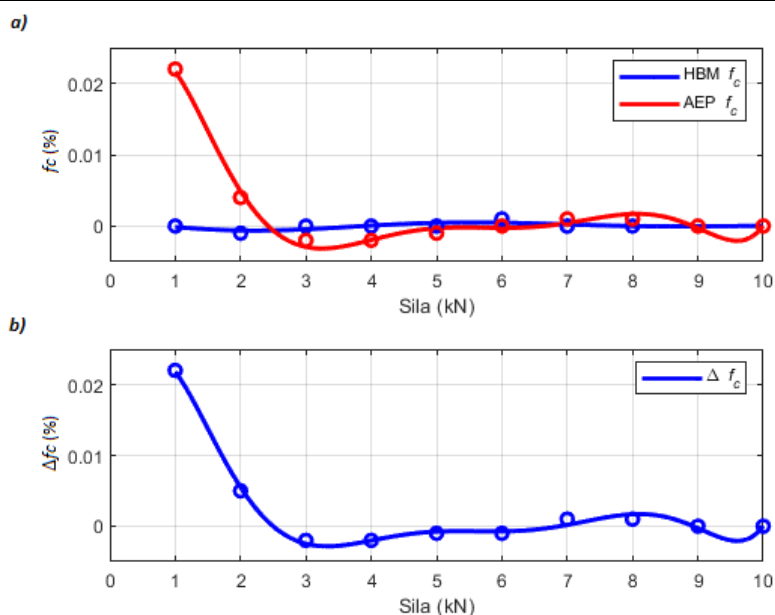
Tablica 26. Relativne pogreške interpolacije i histereze dinamometara HBM Z30A i AEP TCE – TM

F (kN)	HBM Z30A		AEP TCE – TM		Δf_c	Δv
	f_c	v	f_c	v		
1	0,000	0,022	0,022	0,060	0,022	0,038
2	-0,001	0,020	0,004	0,044	0,005	0,024
3	0,000	0,017	-0,002	0,033	-0,002	0,016
4	0,000	0,014	-0,002	0,027	-0,002	0,013
5	0,000	0,011	-0,001	0,018	-0,001	0,007
6	0,001	0,008	0,000	0,017	-0,001	0,009
7	0,000	0,006	0,001	0,013	0,001	0,007
8	0,000	0,004	0,001	0,009	0,001	0,005
9	0,000	0,002	0,000	0,006	0	0,004
10	0,000	-	0,000	-	0	-



Slika 41. Relativne pogreške a) histereze dinamometara HBM Z30A i AEP TCE – TM, b) Razlika pogrešaka

Relativna pogreška histereze dinamometra AEP u početku za vrijednosti sile od 1 kN i 2 kN je nešto viša u odnosu relativnu pogrešku histereze dinamometra HBM, a od vrijednosti sile 3 kN nastavlja linearno padati kao i pogreška histereze dinamometra HBM.



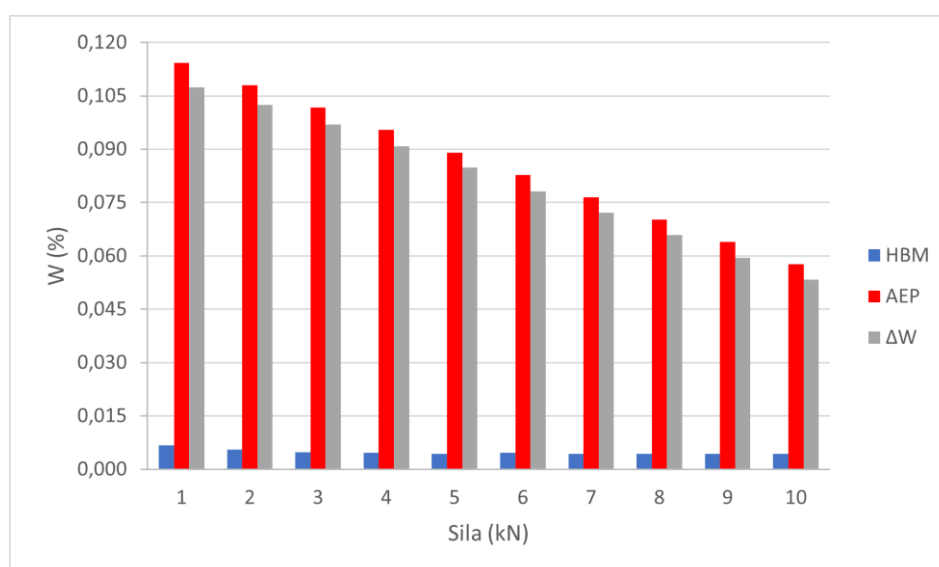
Slika 42. Relativne pogreške a) interpolacije dinamometara HBM Z30A i AEP TCE – TM, b) Razlika pogrešaka

Relativna pogreška interpolacije dinamometra AEP za vrijednost sile od 1 kN ima veliko odstupanje od relativne pogreške interpolacije dinamometra HBM. Za vrijednosti sile od 2,5 kN do 5 kN pogreška interpolacije dinamometra AEP poprima negativnu vrijednost, a od vrijednosti sile 5 kN do 7 kN praktički se podudara s pogreškom interpolacije dinamometra HBM. Za vrijednosti sile od 7 kN pogreška interpolacije dinamometra AEP počinje oscilirati od pogreške interpolacije dinamometra HBM. Relativna pogreška interpolacije dinamometra HBM je vodoravan pravac paralelan s os apscise i kontinuirana je za sve vrijednosti sile.

U tablici 27. dane su ukupne mjerne nesigurnosti (ΔW) i njihova razlika, a grafički je prikazano na slici 43.

Tablica 27. Mjerne nesigurnosti dinamometara HBM Z30A i AEP TCE – TM

F (kN)	HBM Z30A	AEP TCE – TM	ΔW
	W	W	
1	0,0068	0,114254123	0,107454123
2	0,0055	0,107962961	0,102462961
3	0,0048	0,101671798	0,096871798
4	0,0046	0,095380636	0,090780636
5	0,0043	0,089089473	0,084789473
6	0,0046	0,082798311	0,078198311
7	0,0043	0,076507148	0,072207148
8	0,0044	0,070215986	0,065815986
9	0,0044	0,063924823	0,059524823
10	0,0043	0,057633661	0,053333661



Slika 43. Mjerne nesigurnosti dinamometara HBM Z30A i AEP TCE – TM i razlika mjerne nesigurnosti

Mjerna nesigurnost dinamometra AEP je velika u odnosu na mjernu nesigurnost dinamometra HBM. Mjerna nesigurnost dinamometra AEP linearno pada i postepeno se približava mjernoj nesigurnosti dinamometra HBM. Mjerna nesigurnost dinamometra HBM je vrlo niska i kontinuirana je za sve vrijednosti sile.

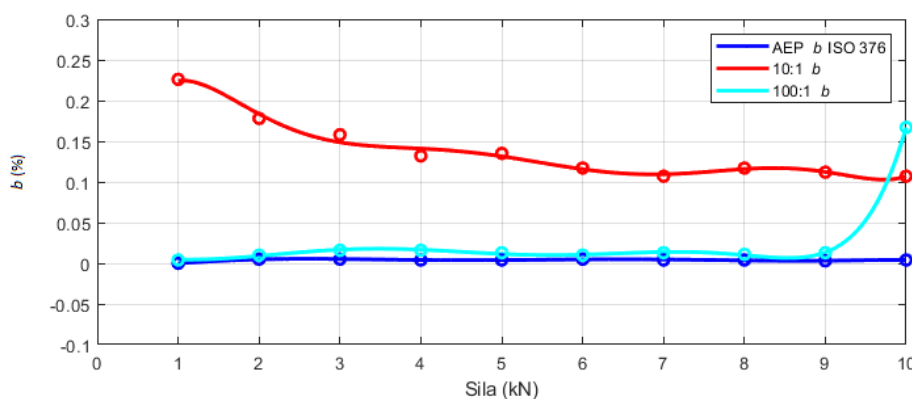
Nakon provedene analize može se vidjeti da je dinamometar HBM Z30A puno točniji i precizniji u odnosu na dinamometar AEP TCE – TM. Razlog tomu je njegovo umjeravanje na nacionalnom etalonu i mjerna sposobnost od 0,05 % ($5 \cdot 10^{-4}$), dok s druge strane dinamometar AEP TCE – TM ne posjeduje mjernu sposobnost koju ima dinamometar HBM. Zbog toga u ovom eksperimentu kao referentni etalon korišten je dinamometar HBM, no treba poštovati i mjernu sljedivost koja nam određuje da se umjeravanje provodi tako da se etalomom više mjeriteljske kakvoće umjerava etalon niže.

Prema tome dinamometar AEP TCE – TM je više namijenjen korištenju u industriji kao ispitni uređaj, dok dinamometar HBM Z30A za umjeravanje tj. etalonski uređaj.

7.2. Analiza rezultata umjeravanja dinamometra AEP TCE – TM različitim brzinama

Analiza rezultata umjeravanja dinamometra AEP TCE – TM različitim brzinama temelji se na usporedbi rezultata dobivenih umjeravanjem redukcijama 10:1 ($v \approx 56,7450$ N/s) i 100:1 ($v \approx 4,5541$ N/s) s rezultatima dobivenih umjeravanjem prema normi HRN EN ISO 376:2012. Vrijednosti koje će se uspoređivati su relativna pogreška ponovljivosti bez rotacije i relativna pogreška interpolacije.

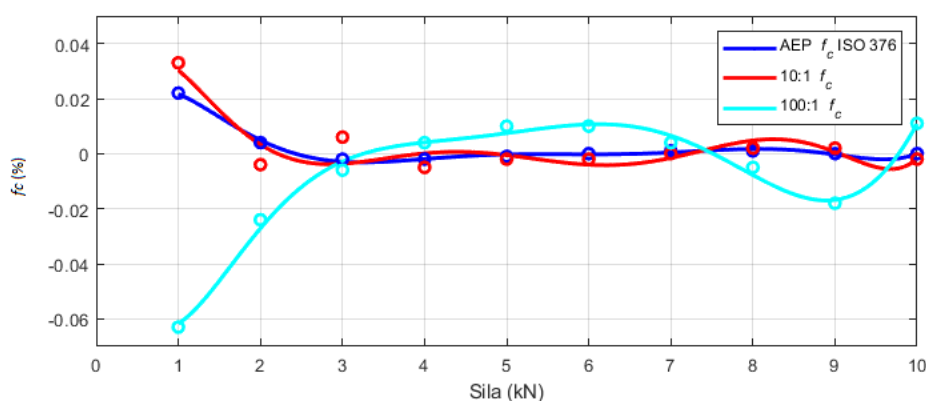
Na slici 44. prikazane su relativne pogreške ponovljivosti bez rotacije dinamometra AEP za umjeravanje po normi HRN EN ISO 376:2012 i umjeravanje redukcijama 10:1 i 100:1.



Slika 44. Relativne pogreške ponovljivosti bez rotacije dinamometra AEP za normu HRN EN ISO 376:2012 i redukcije 10:1 i 100:1

Relativna pogreška ponovljivosti bez rotacije za redukciju 10:1 dosta odstupa od relativnih pogrešaka ponovljivosti bez rotacije za redukciju 100:1 i normu ISO 376 jer su brzine fluktuirale $50 \text{ N/s} \pm 20 \text{ N/s}$ zato što sustav opterećivanja nije mogao osigurati bolje održavanje brzine. Pogreške ponovljivosti za redukciju 100:1 i normu ISO 376 vrlo su slične za sve vrijednosti sile, no jedno za vrijednost sile od 10 kN pogreška ponovljivosti za redukciju 100:1 ekstremno skoči u odnosu na pogrešku ponovljivosti za normu ISO 376.

Na slici 45. prikazane su relativne pogreške interpolacije dinamometra AEP za umjeravanje po normi HRN EN ISO 376:2012 i umjeravanje redukcijama 10:1 i 100:1.



Slika 45. Relativne pogreške interpolacije dinamometra AEP za normu HRN EN ISO 376:2012 i redukcije 10:1 i 100:1

Relativne pogreške interpolacije vrlo su slične za redukciju 10:1 i normu ISO 376, no ipak pogreška interpolacije za redukciju 10:1 ima male oscilacije, dok pogreška interpolacije za normu ISO 376 je linearna. Pogreška interpolacije za redukciju 100:1 dosta odskače od pogrešaka interpolacije za redukciju 10:1 i normu ISO 376, te na početku za vrijednosti sile od 1 kN i 2 kN poprima negativnu vrijednost, dok su pogreške interpolacije za redukciju 10:1 i normu ISO 376 pozitivne. Za vrijednosti sile od 3 kN do 7 kN pogreška interpolacije za redukciju 100:1 je najviše približena pogreškama interpolacije za redukciju 10:1 i normu ISO 376. Za vrijednost sile od 7,5 kN pogreška interpolacije za redukciju 100:1 opet poprima negativnu vrijednost i javlja se oscilacija.

8. ZAKLJUČAK

Na temelju provedenog eksperimentalnog djela i analize rezultata, doneseni su sljedeći zaključci :

- Analizom rezultata umjeravanja sukladno normi HRN EN ISO 376:2012 utvrđena je značajna razlika između prijenosnih etalona sile HBM Z30A i AEP TCE – TM. Prijenosni etalon sile HBM Z30A klasificiran je klasom 00 s vrlo dobrom mjernom sposobnošću i može se koristiti za umjeravanje mjerila sile. Dinamometar AEP TCE – TM je klase 1 i može se koristiti u industrijskim mjerenjima.
- Najveća odstupanja između dinamometara se pojavljuje kod pogrešaka ponovljivosti, obnovljivosti, interpolacije i proširene mjerne nesigurnosti. Kod sve četiri pogreške odstupanja su izraženija u prvoj trećini mjernog područja. Kod proširene mjerne nesigurnosti vidljiva su odstupanja u cijelom području što je jednim djelom uzrok različite mjerne sposobnosti umjernih etalona (nacionalni, referentni etalon sile).
- Na temelju rezultata mjerenja uočeno je da brzina opterećivanja može značajno utjecati na rezultate mjerenja. Kod svih parametara koji su provjeravani (ponovljivost i interpolacija) pokazalo se je da kod većih brzina ispitivanja dolazi do većih odstupanja mjerenja od onih referentnih koji su dobiveni umjeravanjem na nacionalnom ili referentnom etalonu sile.
- Kod pogreške interpolacije uočeno je da se pojavljuju veća odstupanja u pojedinim dijelovima mjernog područja, što ukazuje na manju linearnost sustava. Zbog toga bi u praksi trebalo razmotriti primijenu interpolirane vrijednosti ili vrijednosti bliske točki umjeravanja, pogotovo ako se radi od nekim graničnim vrijednostima sile.
- Prilikom uporabe industrijskih dinamometara treba voditi računa o utjecaju brzine opterećivanja na rezultate mjerenja sile, naročito pri većim brzinama opterećivanja. Ove brzine mogu pridonijeti velikim odstupanjima od stvarne vrijednosti, a time i povećati mjernu nesigurnost uređaja.

LITERATURA

- [1] Guide to the Measurement of Force, The Institute of Measurement and Control, 1998.
- [2] <https://enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=55937>
- [3] <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=43655>
- [4] <http://popularizacija.ifs.hr/wp-content/uploads/2015/10/mfl2-250-erjavec.pdf>
- [5] Alar Ž.: Procjenjivanje nesigurnosti rezultata mjerenja sile, magistarski rad, Zagreb, 2001.
- [6] Videc M.: Postupak umjeravanja prijenosnih etalona sile, završni rad, Zagreb, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2007.
- [7] Runje B.: Podloge za predavanje: Teorija i tehnika mjerenja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.
- [8] Uncertainty od force measurements, Calibration Guide, EURAMET cg-4, Version 2.0 (03/2011)
- [9] Čulina R.: Utjecaj senzora sile na kvalitetu rezultata mjerenja, diplomski rad, Zagreb, 2019.
- [10] https://sfsb.unisb.hr/ksk/cvrstoca/web_cvrstoca/N_eksperiment/N_d.pdf
- [11] ISO 376: Metallic materials – Calibration of force – proving instruments used for the verification of uniaxial testing machines, 2012.
- [12] http://resource.npl.co.uk/docs/science_technology/mass_force_pressure/euromet/presentations/kaspar1.pdf