

Implementacija postupka umjeravanja aksijalnih umaralica sukladno normi ISO 4965-1:2012

Bilonić, Marko

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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:235:112891>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-30**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Marko Bilonić

Zagreb, 2024. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**IMPLEMENTACIJA POSTUPKA
UMJERAVANJA AKSIJALNIH
UMARALICA SUKLADNO NORMI
ISO 4965-1:2012**

Mentori:

Prof. dr. sc. Željko Alar, dipl. ing.

Student:

Marko Bilonić

Zagreb, 2024. godina.

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

Zahvaljujem se svom mentoru prof. dr. sc. Željku Alaru na pomoći i danim savjetima tokom pisanja ovog rada. Također, zahvaljujem se svojoj obitelji na podršci tokom svim godina moga školovanja.

Marko Bilonić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
Proizvodno inženjerstvo, inženjerstvo materijala, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
mehatronika i robotika, autonomni sustavi i računalna inteligencija

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 24 - 06 / 1	
Ur.broj: 15 - 24 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Marko Bilonić**

JMBAG: 0035225861

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Implementacija postupka umjeravanja aksijalnih umaralica sukladno normi ISO 4965-2:2012**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Implementation of the Calibration Process for Axial Fatigue Testers According to Standard ISO 4965-2:2012**

Opis zadatka:

Dinamička ispitivanja materijala predstavljaju ključan korak u razumijevanju ponašanja materijala pod cikličkim promjenljivim opterećenjem, a posebno kada želimo simulirati stvarne radne uvjete u cilju određivanja otpornosti na umor materijala. Razumijevanje fenomena umora materijala ključno je za dugovječnost i pouzdanost materijala i komponenti u industrijskoj primjeni, kao i analizu mehaničkih svojstava samih materijala. Uređaji koji se koriste za provedbu ovih ispitivanja nazivaju se umaralice koje su znatno kompliciranije sustavi od klasičnih kidalica za ispitivanje materijala, a posebno su dizajnirane kako bi ostvarivale ciklička promjenljiva opterećenja na uzorke materijala ili komponenti kroz duži vremenski period.

U radu je potrebno:

- opisati važnost dinamičkih ispitivanja te pojavu umora materijala
- dati pregled vrsta umaralica te principa ostvarivanja cikličkog promjenljivog opterećenja
- Dati pregled metoda umjeravanja umaralica te napraviti usporedbu sa statičkim metodama umjeravanja
- eksperimentalno provesti umjeravanje umaralice sukladno normi ISO 4965-2:2012
- definirati utjecajne veličine na proces umjeravanja umaralice
- analizirati dobivene rezultate i dati određene zaključke.

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

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

26. rujna 2024.

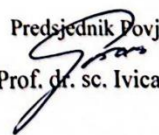
28. studeni 2024.

5., 6. i 9. prosinca 2024.

Zadatak zadao:


Prof. dr.sc. Zeljko Alar

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Ivica Garašić

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. Ispitivanje materijala.....	2
1.2. Umor materijala	5
1.3. Materijali s velikom otpornošću prema umoru materijala	9
2. UMARALICE, PRINCIP RADA	14
2.1. Princip rada.....	14
2.2. Vrste umaralica	16
3. UMJERAVANJE UMARALICA.....	22
3.1. O umjeravanju	22
3.2. Umjeravanje umaralica	24
4. EKSPERIMENTALNI DIO	25
4.1. Plan provedbe eksperimentalnog dijela	25
4.2. Opis umjeravane opreme.....	25
4.2.1. Umaralice.....	25
4.3. Opis opreme za umjeravanje	27
4.3.1. Senzori sile (dinamometri)	27
4.3.2. Mjerna pojačala.....	29
4.4. Norme za umjeravanje	31
4.4.1 Norma HRN EN ISO 7500-1:2018.....	31
4.4.2 Norma ISO 4965-1:2012	33
4.4.2.1. Uvod	33
4.4.2.2. Postupak.....	35
4.5. Provedba umjeravanja.....	37
4.5.1. Provedba norme HRN EN ISO 7500-1:2018	37
4.5.1.1. Provedba norme HRN EN ISO 7500-1:2018 na pneumatskoj umaralici STEPLAB UD08	38
4.5.1.2. Provedba norme HRN EN ISO 7500-1:2018 na visokofrekventnoj umaralici AMSLER.....	38

4.5.2. Provedba norme ISO 4965-1:2012	39
4.5.2.1. Provedba norme ISO 4965-1:2012 – Pneumatska umaralica STEPLAB UD08 40	
4.5.2.2. Provedba norme ISO 4965-1:2012 – Visokofrekventna umaralica AMSLER43	
5. ANALIZA I OBRADA PODATAKA.....	46
5.1 Analiza i obrada podataka norme HRN EN ISO 7500-1:2018	46
5.1.1. Analiza i obrada podataka norme HRN EN ISO 7500-1:2018 – Pneumatska umaralica STEPLAB UD08	46
5.1.2. Analiza i obrada podataka norme HRN EN ISO 7500-1:2018 –Visokofrekventna umaralica AMSLER.....	48
5.2. Analiza i obrada podataka norme ISO 4965-1:2012	50
5.2.1. Analiza i obrada podataka norme ISO 4965-1:2012 – Pneumatska umaralica STEPLAB UD08	50
5.2.2. Analiza i obrada podataka norme ISO 4965-1:2012 – Visokofrekventna umaralica AMSLER.....	51
5.2.2.1. Analiza i obrada podataka norme ISO 4965-1:2012 – Visokofrekventna umaralica AMSLER – 116 Hz.....	51
5.2.2.2 Analiza i obrada podataka norme ISO 4965-1:2012 – Visokofrekventna umaralica AMSLER – 116 Hz.....	53
6. ZAKLJUČAK.....	56
7. LITERATURA	57

POPIS SLIKA

Slika 1. Vojni brod „Liberty“ prepolovljen uslijed umora materijala [1]	1
Slika 2. Potpuni lom konstrukcije broda uslijed umora materijala [1]	2
Slika 3. Ispitivanje materijala na vlak [2]	3
Slika 4. Nerazorno ispitivanje materijala ultrazvukom [3]	4
Slika 5. Mjerenje tvrdoće [4]	4
Slika 6. Nastajanje i širenje pukotine uslijed umora materijala [6]	6
Slika 7. Prikaz loma materijala uslijed umora materijala [7]	6
Slika 8. Wöhlerova krivulja [8]	8
Slika 9. Shematski prikaz nastanka loma od umora materijala [11]	9
Slika 10. Lom zupčanika [12]	10
Slika 11. Željeznička nesreća u Njemačkoj [13]	11
Slika 12. Ovisnost dinamičke izdržljivosti o stanju površine [10]	12
Slika 13. Prikaz loma lopatice parne turbine uslijed umora materijala [14]	13
Slika 14. Promjenjivo naprezanje sinusoidnog karaktera [11]	14
Slika 15. Moderni tip umaralice [15]	15
Slika 16. Srednjefrekventna umaralica [17]	16
Slika 17. Niskofrekventna umaralica [19]	17
Slika 18. Visokofrekventna umaralica [21]	18
Slika 19. Aksijalna umaralica [23]	19
Slika 20. Torzijska umaralica [25]	20
Slika 21. Radijalna umaralica [27]	21
Slika 22. Prikaz odnosa točnosti i preciznosti mjerenja [28]	22
Slika 23. Lanac sljedivosti [32]	23
Slika 24. Umaralica STEPLAB UD08	25
Slika 25. Umaralica AMSLER	26
Slika 26. Dinamometri spojeni na pojačalo	27
Slika 27. Dinamometar od umaralice	28
Slika 28. Referentni dinamometar	29
Slika 29. Mjerno pojačalo HBM AB12 [34]	30
Slika 30. Mjerno pojačalo HBM DMP40 [35]	30
Slika 31. Oblik signala pri frekvenciji 3 Hz (slika preuzeta iz programa CATMAN V5)	40
Slika 32. Oblik signala pri frekvenciji 5 Hz (slika preuzeta iz programa CATMAN V5)	41

Slika 33. Oblik signala pri frekvenciji 5 Hz (slika preuzeta iz programa CATMAN V5)	41
Slika 34. Oblik signala pri frekvenciji 15 Hz (slika preuzeta iz programa CATMAN V5)	42
Slika 35. Oblik signala pri frekvenciji 20 Hz (slika preuzeta iz programa CATMAN V5)	42
Slika 36. Oblik signala pri frekvenciji 116 Hz (slika preuzeta iz programa CATMAN V5) ..	44
Slika 37. Oblik signala pri frekvenciji 116 Hz (slika preuzeta iz programa CATMAN V5) ..	45
Slika 38. Dijagramski prikaz vrijednosti parametara q , b , v , a i U o sili F za visokofrekventnu umaralicu	47
Slika 39. Suma $q + U$ u ovisnosti o sili	47
Slika 40. Dijagramski prikaz vrijednosti parametara q , b , v , a i U o sili F za visokofrekventnu umaralicu	49
Slika 41. Suma $q + U$ u ovisnosti o sili	49
Slika 42. Ovisnost vrijednosti pogreški o frekvenciji	51
Slika 43. Kretanje iznosa sile očitane na referentnom dinamometru i dinamometru umaralice kroz određeni broj mjerenja gornjih sila.....	53
Slika 44. Kretanje iznosa sile očitane na referentnom dinamometru i dinamometru umaralice u ovisnosti o broju mjerenja	55

POPIS TABLICA

Tablica 1. Specifikacije umaralice STEPLAB UD08 [33]	26
Tablica 2. Klasifikacija opreme	32
Tablica 3. Vrijednosti očitane i izračunate pri provedbi norme ISO 7500 – Umaralica STEPLAB UD08	38
Tablica 4. Podaci inducirane i stvarne sile te vrijednosti pogreški	39
Tablica 5. Vrijednosti inducirane i stvarne sile te pogreška	43
Tablica 6. Sile očitane na uređaju za dinamičko umjeravanje te vrijednosti sile očitane sa dinamometra umaralice	45
Tablica 7. Podaci dobivene provedbom ispitivanja po normi HRN EN ISO 7500-1:2018 na pneumatskoj umaralici.....	46
Tablica 8. Podaci dobiveni provedbom ispitivanja po normi HRN EN ISO 7500-1:2018 na visokofrekventnoj umaralici	48
Tablica 9. Podaci o mjernoj pogrešci i očitanih sila.....	52
Tablica 10. Podaci o mjernoj pogrešci i očitanim silama	54

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
a	%	Relativna rezolucija
v	%	Relativna pogreška histereze
σ_d	N/mm ²	Donje naprezanje
σ_g	N/mm ²	Gornje naprezanje
σ_{sr}	N/mm ²	Srednje naprezanje
b	%	Relativna pogreška ponovljivosti
f	Hz	Frekvencija
$F(l)$	kN	Inducirana sila
f_0	%	Relativna pogreška nule
F_i	kN	Sila očitana na mjerilu sile
N	/	Broj ciklusa
N_g	/	Granični broj ciklusa do pojave loma
q	%	Vrijednost mjerne pogreške
S	N/mm ²	Amplituda naprezanja
U	%	Proširena mjerna nesigurnost
X_i	mVV	Vrijednost očitavanja stvarne sile
X_1, X_2, X_3	mVV	Vrijednost očitana na prijenosnom etalonu sile koja odgovara stvarnoj rastućoj sili
X_2'	mVV	Vrijednost očitana na prijenosnom etalonu sile koja odgovara stvarnoj opadajućoj sili
X_c	mVV	Vrijednost koja odgovara stvarnoj rastućoj sili očitana na prijenosnom etalonu sile za dodatni niz mjerenja
X_i	mVV	Vrijednost koja odgovara sili očitanoj na umjeravanom mjerilu
X_{sr}	mVV	Aritmetička sredina izmjerenih vrijednosti
r	kN	Rezolucija
F_{DCD}	kN	Vrijednost sile očitana na referentnom dinamometru
F_{HFP}	kN	Vrijednost sile očitana na dinamometru umaralice
F_{MAX}	kN	Maksimalna vrijednost očitanih sila na dinamometru
F_{MIN}	kN	Minimalna vrijednost očitanih sila na dinamometru
$FSREDNJE$	kN	Srednja vrijednost očitanih sila na dinamometru
$FZADANA$	kN	Zadana sila

SAŽETAK

Ovaj diplomski rad bavi se postupkom umjeravanja uređaja za ispitivanje otpornosti materijala na umor (umaralice). Također u diplomskom radu dati će se prikaz teorijskog dijela vezanog uz umor materijala, ali i samih vrsta umaralica. Praktični dio ovog rada baziran je na postupku umjeravanja umaralice po normi ISO 4965-1:2012. Postupno je opisan svaki korak koji je obavljen prilikom umjeravanja. Umjeravanje je izuzetno bitan postupak u pogledu osiguravanja točnosti i pouzdanosti mjerenja.

Ključne riječi: umjeravanje, umor, umaralice, točnost

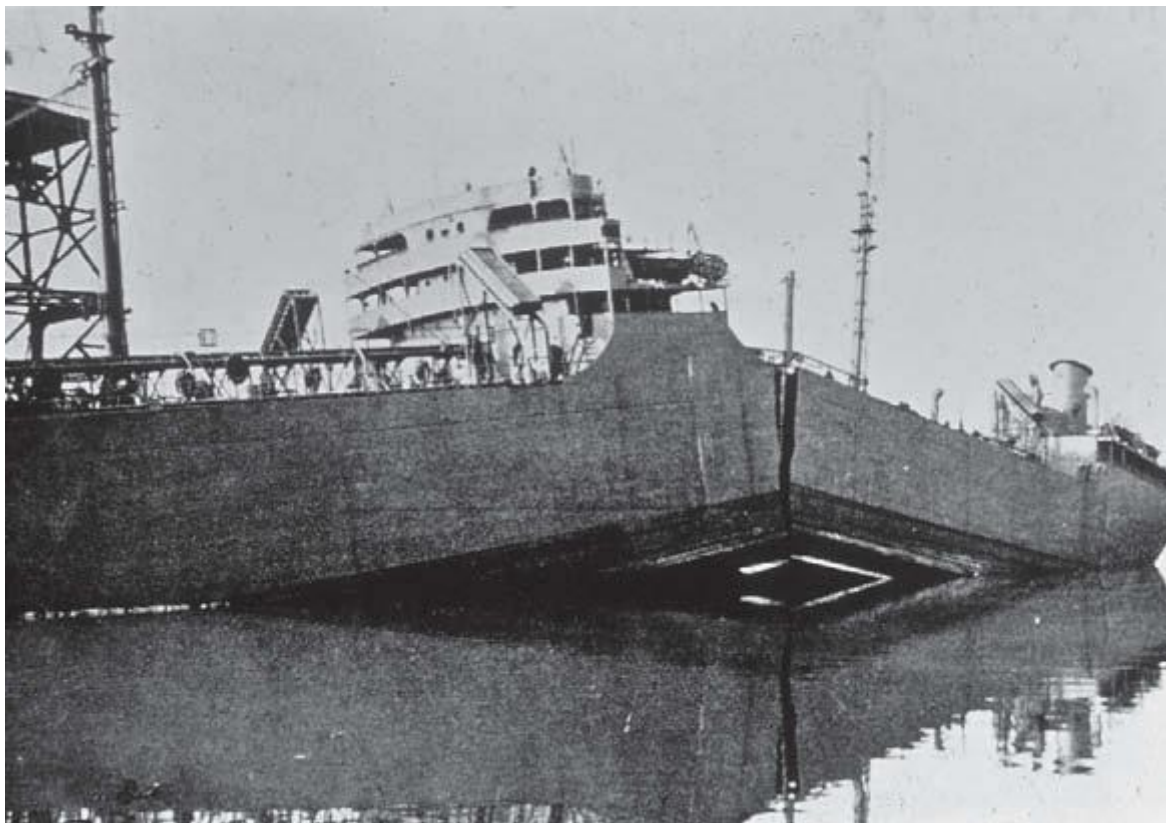
SUMMARY

This thesis deals with the process of calibrating the machine for testing the resistance of materials to fatigue. The thesis will also present the theoretical part related to material fatigue, as well as the types of fatigue machines themselves. The practical part of this work will be based on the calibration procedure of the fatigue machine according to norm ISO 4965-1:2012. Each step performed during calibration is described step by step. Calibration is an extremely important procedure in terms of ensuring the accuracy and reliability of measurements.

Key words: calibration, fatigue, fatigue machine, accuracy

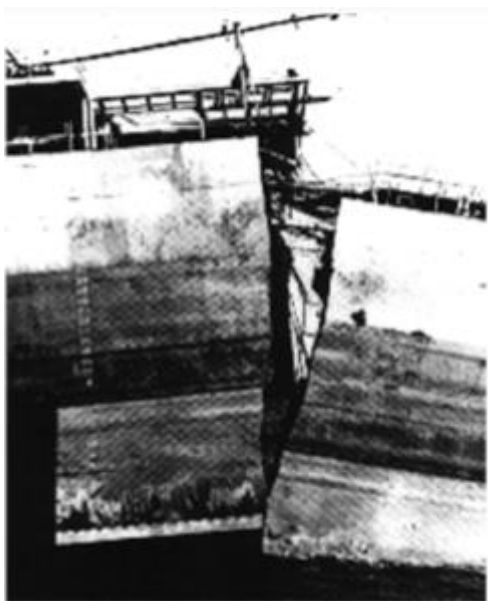
1. UVOD

U današnje vrijeme, gdje se proizvođači trude uz što manje novca i što kraće vrijeme dobiti proizvod prihvatljive tržišne cijene događaju se pojave koje otežavaju, a nekad i onemogućuju takvu ideju. Takve pojave mogu biti u kontekstu strojeva za proizvodnju (otkaz stroja, nedovoljna preciznost stroja i slično), a mogu biti i u kontekstu materijala korištenog za izradu nekog proizvoda. Ovaj diplomski rad bazirati će se na nepoželjne pojave vezane uz materijal nekog proizvoda. To su na primjer lom materijala uzrokovan pojavama kod kojih materijal ne pokazuje nikakvu deformaciju prije samog loma, odnosno lom nastupa iznenadno. Pored takvih pojava, puzanje materijala se često događa u eksploataciji gdje dolazi do rastezanja materijala uslijed dugotrajnog izlaganja konstantnoj sili pri nekoj povišenoj temperaturi. Uz puzanje tu je i umor materijala kod kojeg dolazi do postupnog oštećenja materijala uslijed dugotrajnih cikličkih promjenjivih opterećenja. Obzirom da je u modernoj industriji proizvodnje, ali i u eksploataciji samih dijelova, teško postići konstantnu silu, umor materijala jedna je od najčešćih nepoželjnih pojava kod materijala, odnosno dijelova. Slika 1. prikazuje slučaj umora materijala.



Slika 1. Vojni brod „Liberty“ prepolovljen uslijed umora materijala [1]

Na slici 1. imamo primjer američkih brodova „Liberty“ koji su inače prvi brodovi američke proizvodnje potpuno zavarene strukture. Pukotine nastale umorom materijala započele su svoj rast na samim kutovima spojeva (oni ujedno predstavljaju koncentratore naprezanja) te je došlo do prodiranja s površine materijala u sami materijal što je rezultiralo krhkim lomom. Na slici 2. vidi se potpuni lom konstrukcije broda „Liberty“ uslijed umora materijala.



Slika 2. Potpuni lom konstrukcije broda uslijed umora materijala [1]

1.1. Ispitivanje materijala

Kod nepoželjnih pojava važan faktor u sprječavanju ponavljanja takvih pojava su ispitivanja materijala. Osim što daju uvid o svojstvima materijala te osiguravaju konkretne brojke životnog vijeka nekog proizvoda, ispitivanja su vrlo važna i kod analize nesreća i otkaza dijelova. Naime, čest je slučaj da nakon određene nesreće oštećene strane zatražuju nadoknadu štete koju su pretrpjeli (oštećenje dijelova tijela, psihičko oštećenje, materijalna šteta i slično). U tom trenutku najčešće postoji nekoliko strana uključenih u nesreću i u sve ono što nakon nje slijedi, a to su: proizvođač određenog dijela ili proizvoda, poslodavac, eventualna osiguravajuća kuća te sama oštećena privatna ili pravna osoba. Važnost ispitivanja materijala nastaje kod određivanja odgovornosti za nastalu štetu. Takva ispitivanja zahtjevaju potpunu neovisnost i koncentraciju te u takvom slučaju osiguravaju rješenje nastalog spora. Postoji više vrsta ispitivanja materijala, razorno i nerazorno ispitivanje materijala. Razorno ispitivanje materijala podrazumijeva oštećenje materijala tokom ispitivanja (ispitivanje na vlak, tlak, savijanje,

uvijanje). Nerazorna ispitivanja materijala su ispitivanja kod kojih ne dolazi do oštećenja materijala (na primjer ultrazvučno ispitivanje, vizualni pregled). Za ispitivanje materijala važan je faktor ispitni uzorak koja se ispituje. Ispitni uzorci su definirani odgovarajućom normom (točno određene dimenzije, točno određenog oblika i normiranog stupnja obrade površine). Važnost normiranja ispitnog uzorka i postupka općenito je u univerzalnosti ispitivanja u cijelom svijetu. Dakle, ako su neka ispitivanja koja su provedena po određenoj normi dala rezultate, jasno je u kojim uvjetima su ti rezultati nastali (kojih dimenzija je ispitni uzorak, kojom jačinom i koliko dugo se ispitni uzorak opteretio, kakvi su okolišni uvjeti u trenutku ispitivanja i slično). Univerzalnost postupaka ispitivanja omogućuje suradnje različitih laboratorija iz različitih zemalja, na istom projektu. Ispitivanje materijala također vrši se prije plasiranja nekog proizvoda na tržište. Tako se na primjer neki važni dijelovi (sigurnosno važne konstrukcije, sigurnosni dijelovi automobila, teretnog vozila ili zrakoplova) ciklički opterećuju do krajnjih granica, odnosno do otkaza tih dijelova. Time stručne osobe raspolažu sa konkretnim brojkama, odnosno razinama opterećenja, duljini vremena i slično, koje su potrebne da bi došlo do otkaza nekog dijela. Te vrijednosti su kritične vrijednosti nekog dijela te ih u eksploataciji treba strogo izbjevati. Na slikama 3., 4. i 5. prikazane su neke vrste ispitivanja materijala.



Slika 3. Ispitivanje materijala na vlak [2]



Slika 4. Nerazorno ispitivanje materijala ultrazvukom [3]

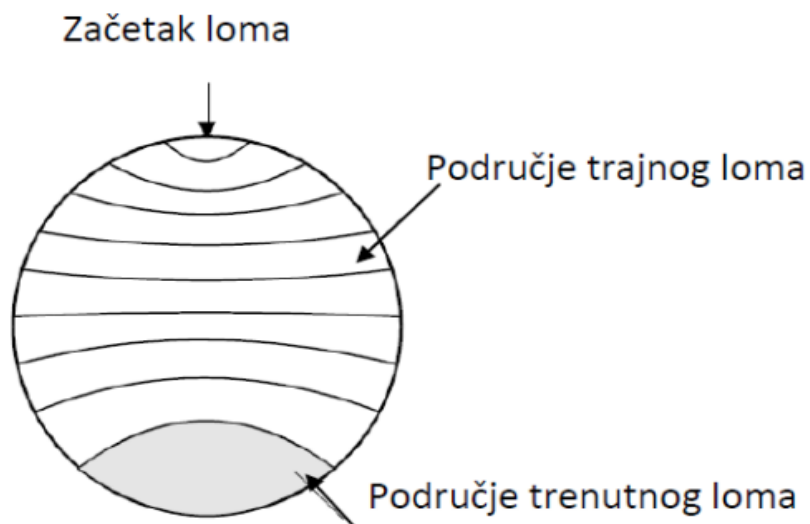


Slika 5. Mjerenje tvrdoće [4]

Ispitivanje materijala, kako je i rečeno, često nastupa nakon neke nesreće kao način utvrđivanja razloga nesreće te sprječavanja ponavljanja iste.

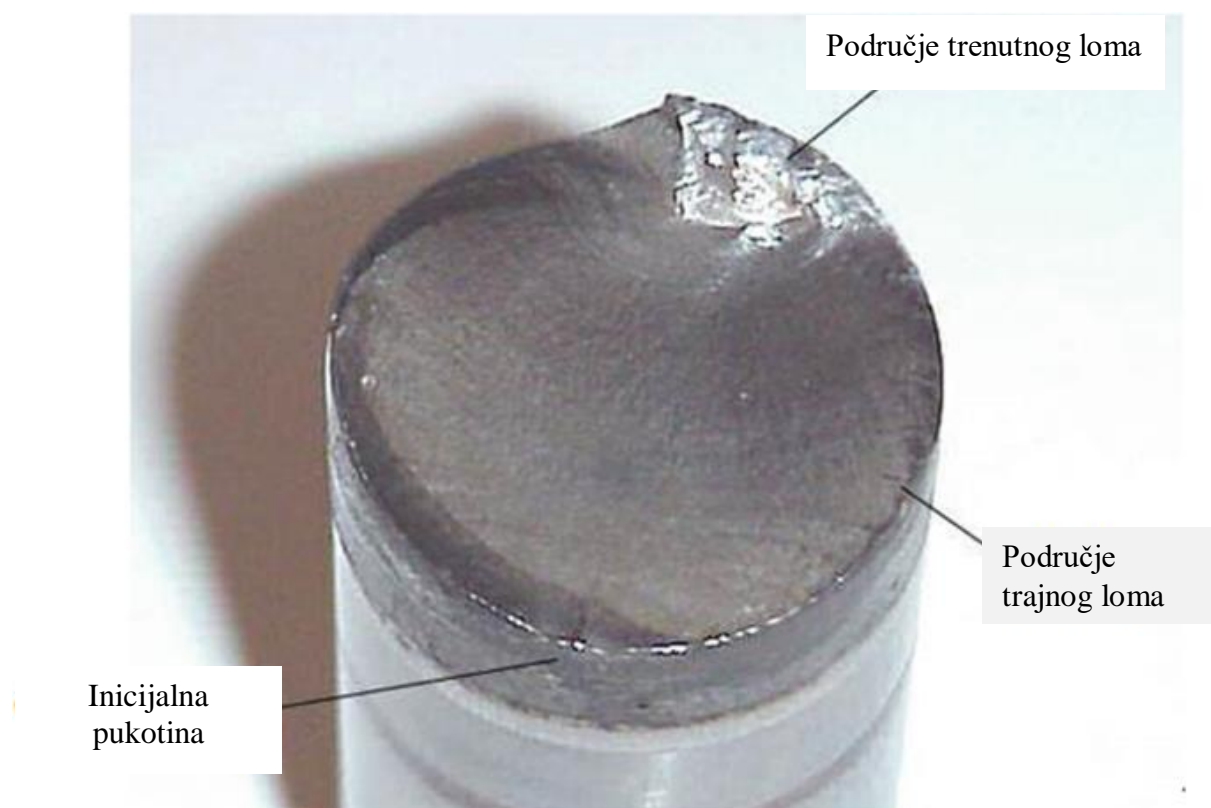
1.2. Umor materijala

Čest razlog otkaza nekog dijela, pogona, proizvoda i slično je upravo umor materijala. Od svih lomova materijala, čak 90 % ima karakteristike loma uslijed umora materijala. Umor materijala po svojoj definiciji je pojava postupnoga razaranja materijala zbog dugotrajnog djelovanja promjenljivog (dinamičkog) naprezanja. Na opterećenim konstrukcijskim dijelovima nastaje inicijalna pukotina na mjestu gdje je zbog koncentracije naprezanja došlo do naprezanja koje je veće od vlačne čvrstoće materijala. Ovaj proces opisuje kako materijal postepeno puca uslijed dugotrajnog i ponavljano opterećenja. Pukotina se širi dok se površina materijala ne smanji toliko da preostali dio više ne može izdržati naprezanje, što rezultira naglim lomom. Površina prijeloma ima karakterističan izgled: jedan dio je gladak i svijetao, sa tragovima uzrokovanim ponovljenim opterećenjem (trajni lom), dok je drugi dio hrapav i označava trenutni lom. Uzroci početnih pukotina mogu biti nedostaci u konstrukciji, greške tokom proizvodnje, ili, rjeđe, problemi koji nastanu tokom upotrebe. [5]. Konstrukcijski koncentratori naprezanja su primjerice mjesta s nedovoljno velikim radijusom zaobljenosti (osovine i vratila). Tehnološki koncentratori su primjerice problemi pri samom lijevanju nekog dijela (nedovoljno ispunjene kalupne šupljine, nastaju pore koje su ujedno koncentror naprezanja). Eksploatacijski koncentratori naprezanja su najčešće uzrokovani nestručnim rukovanjem (udarci pri montaži ili demontaži), ali može doći i do korozije koja također spada u eksploatacijske koncentratore naprezanja. Pukotine se mogu pojaviti na različitim vrstama materijala i objektima kao što su: zrakoplovi, brodovi, mostovi, reaktorskim posudama, tornjevi, stupovi, jarboli i slično. Slika 6. prikazuje nastajanje i širenje pukotine uslijed umora materijala.



Slika 6. Nastajanje i širenje pukotine uslijed umora materijala [6]

Ovako prikazano širenje pukotine uslijed umora materijala u konkretnom slučaju, odnosno dijelu izgleda kao na slici 7.

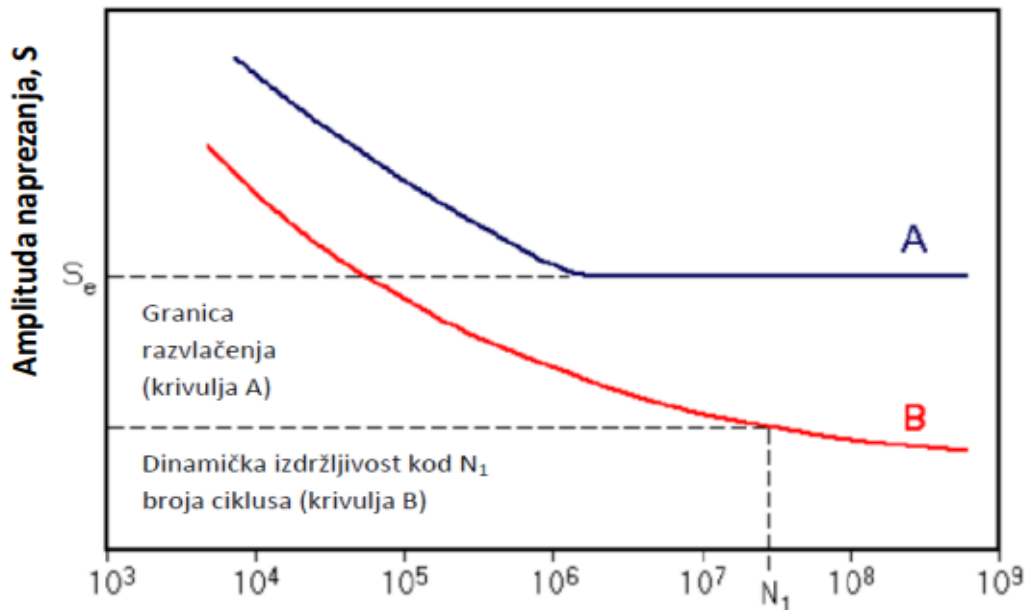


Slika 7. Prikaz loma materijala uslijed umora materijala [7]

Kod loma uzrokovanog umorom materijala karakteristično je da nema vidljivih znakova plastične deformacije, čak ni kod žilavih materijala. Površina prijeloma podijeljena je na dva dijela: prvi je gladak i svijetao, s brazdama koje prikazuju kako je pukotina postupno napredovala. Ovaj dio, poznat kao područje trajnog loma, nastaje je kroz dulje vrijeme. Drugi dio, područje trenutnog loma, je hrapav, tamniji i zrnat. Nastaje u trenutku kada naprezanje, povećano zbog smanjenja nosive površine, dosegne granicu vlačne čvrstoće materijala. Omjer i raspored ovih dijelova prijeloma ovise o vrsti i intenzitetu dinamičkog opterećenja te o intenzitetu koncentracije naprezanja [7]. Postoje dvije vrste loma, krhki i žilavi. Lom materijala nastao umorom je iznenađan i ima katastrofalne posljedice. Postoje mehanička svojstva koja definiraju otpornost materijala na umor. Obzirom da je umor materijala način dinamičkog opterećenja, ključno mehaničko svojstvo materijala za otpornost prema umoru je dinamička izdržljivost. Dinamička izdržljivost je zapravo najveće moguće dinamičko opterećenje koje materijal može podnijeti dulje vrijeme bez loma. Prva sustavna ispitivanja lomova zbog promjenjivog opterećenja, u razdoblju 1850-tih do 1860-tih godina, provodio je August Wöhler, vezano uz probleme učestalih lomova konstrukcije, odnosno željezničkih osovina. [8]. U čast njemu, krivulja koja daje odnos između broja ciklusa naprezanja do loma N i raspona nazivnog naprezanja $\Delta\sigma$ naziva se Wöhlerova krivulja [Slika 8.]. Dinamička izdržljivost se može ocijeniti pomoću tri metode:

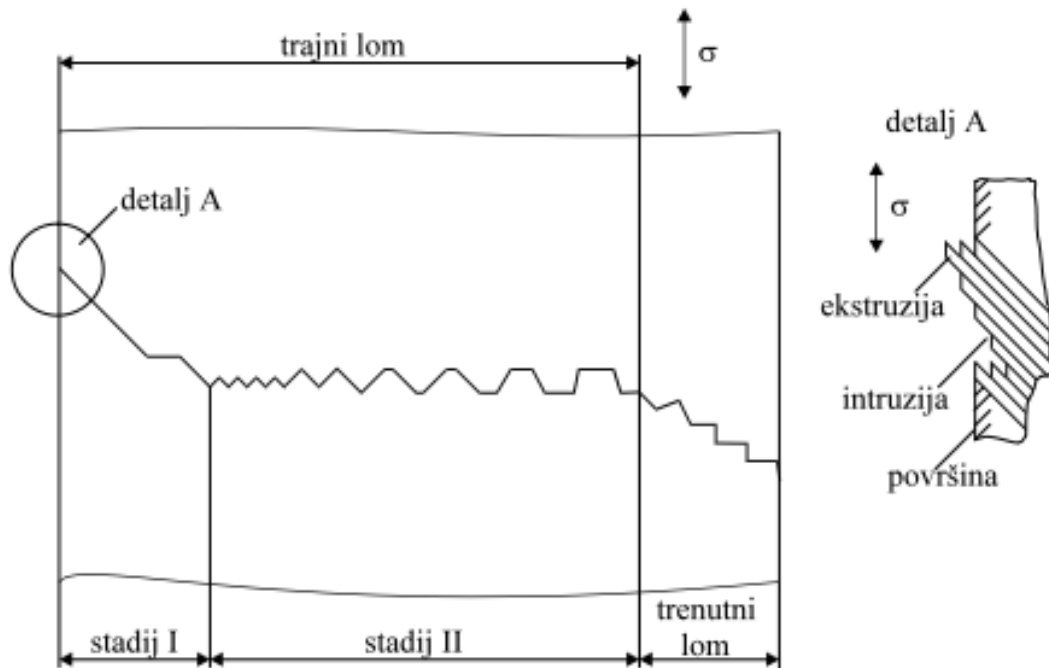
- S-N krivulje (Wöhlerova krivulja)
- Testiranje prototipa
- Mehanika loma

Najčešća metoda koja se koristi u inženjerskoj praksi je metoda S-N krivulja. Testiranje prototipa rijetko se koristi zbog svoje velike cijene, dok se princip mehanike loma koristi kao napredni postupak samo onda kada je potrebno procijeniti koliko dugo će pukotina propagirati. Princip mehanike loma relativno je kompliciran [9].



Slika 8. Wöhlerova krivulja [8]

Wöhlerove krivulje dobivaju se ispitivanjem uzoraka koji se izlažu promjenjivom naprezanju s konstantnom amplitudom sve do loma. Životni vijek uzorka definira se brojem ciklusa koje izdrži prije nego što dođe do loma. Najveće promjenjivo naprezanje koje uzorak može podnijeti bez loma nakon praktički beskonačnog broja ciklusa, označenog kao N_g , naziva se dinamička izdržljivost. Kod konstrukcijskih čelika, Wöhlerova krivulja postupno se približava vrijednosti dinamičke izdržljivosti kako broj ciklusa raste. Standardna granica ciklusa za čelik je $N_g = 10^7$ ciklusa. Svaka konstrukcijska komponenta ima specifične Wöhlerove krivulje, koje se određuju za nju pojedinačno [7]. Idealno glatki ispitni uzorak, bez koncentrata naprezanja, ima klicu loma koja nastaje uslijed lokalne nehomogene deformacije. Ova deformacija dovodi do formiranja pločastih tvorevina koje stvaraju izbočine (ekstruzije) i udubine (intruzije) na površini. Takve neravnine, posebice udubine, predstavljaju koncentratore naprezanja i potencijalna mjesta za inicijalne pukotine. Kada pukotina nastane, širi se pod kutem od 45° u odnosu na normalno naprezanje, u smjeru maksimalnog smičnog naprezanja, ali samo unutar nekoliko kristalnih zrna. Brzina širenja pukotine ovisi o okolnom mediju; u zraku, ona iznosi oko 10^{-7} mm po ciklusu naprezanja. U slučajevima s promjenjivim naprezanjem ili koncentrorima naprezanja, prvi stadij širenja pukotine može izostati [10]. Na slici 9. prikazan je shematski prikaz nastanka loma od umora materijala.



Slika 9. Shematski prikaz nastanka loma od umora materijala [11]

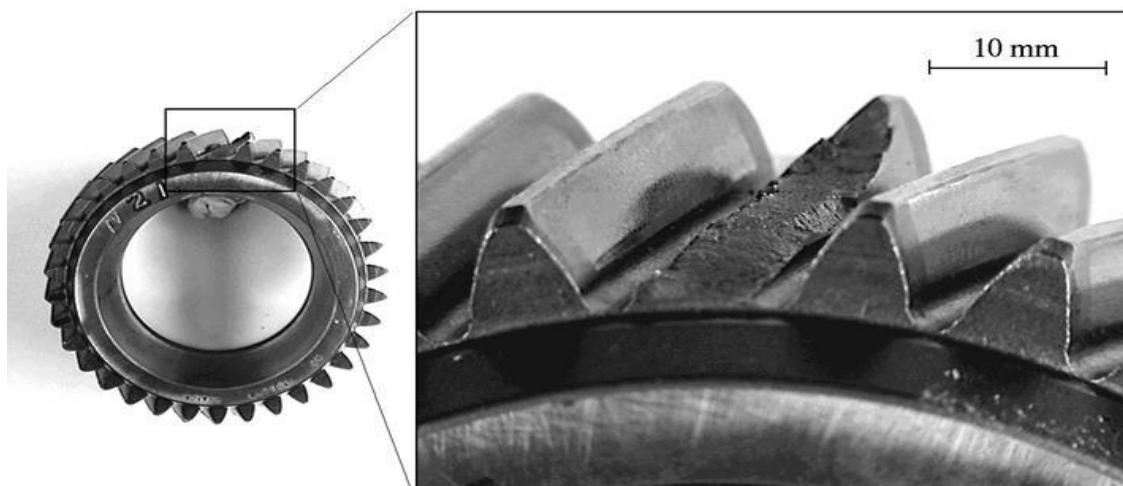
Širenje pukotine može biti transkristalno. Upravo je to slučaj u stadiju II, gdje se pukotina širi okomito na smjer djelovanja normalnog naprezanja. Uslijed širenja pukotine nastaju brazde kao na slici. Što je udaljenost između brazdi veća, brzina širenja pukotine je veća [11].

1.3. Materijali s velikom otpornošću prema umoru materijala

Kao i kod svake nepoželjne pojave, postoje materijali koji su više ili manje po svojoj prirodi otporni na umor materijala. Vođeni tim razmišljanjem, za konstrukcije i dijelove koji će većinu svoga vijeka biti izloženi umoru inženjeri biraju upravo te, otpornije materijale. Postoji više čimbenika koji određuju otpornost materijala na umor [6]:

- Dimenzije
- Okoliš (npr. korozija)
- Koncentratori naprezanja
- Osjetljivost na zareze
- Završna obrada površine
- Temperatura

Ovi čimbenici podosta utječu na otpornost materijala na umor, posebno valja istaknuti temperaturu. Nedvojbeno, temperatura je jedan od najvažnijih čimbenika kod pojave i propagacije umora materijala. Dugotrajnost uzorka od pod istim ukupnim rasponom naprezanja na 1000 °C je gotovo 50% niža od one na 950 °C. To se smanjenje potencijalno pripisuje većoj plastičnoj deformaciji i većem stupnju oksidacije na 1000 °C [10]. Dakle, sa 50 stupnjeva više, životni vijek uzorka se skratio za 50%. Završna obrada također je jako važna obzirom da loše odrađena površina nekog dijela znači da će na površini postojati koncentratori naprezanja. Loše odrađeni zarezni također predstavljaju mjesto začetka pukotine. Čelik ima razinu dinamičke izdržljivosti koja iznosi oko 50% vlačne čvrstoće, dok željezo, aluminij, bakar te njihove legure imaju dinamičku izdržljivost oko 40% vlačne čvrstoće [8]. Polimeri imaju jako lošu dinamičku izdržljivost. Ove vrijednosti nastale su u laboratorijskim uvjetima (idealni, glatki ispitni uzorak). Naravno da u praksi, uslijed grublje površine, lošijih okolišnih uvjeta i ostalih čimbenika, ti rezultati biti će dosta manji. Valja napomenuti kako pored važnosti odabira materijala, važan je i oblik dijela koji će biti izložen umoru. Poznato je kako su jedni od dijelova koji su najčešće izloženi umoru zupčanici. Slika 10. prikazuje jedan zupčanik izložen umoru materijala.



Slika 10. Lom zupčanika [12]

Vidljivo je kako se dio zupčanika odlomio na mjestu najvećeg promjenjivog i cikličkog naprezanja, a to je zub zupčanika. Jedna od željezničkih nesreća u Njemačkoj dogodila se početkom 1998. upravo zbog umora materijala jednog kotača. U nesreći uzrokovanoj umorom materijala život je izgubila 101 osoba. Na slici 11. prikazana je željeznička nesreća.

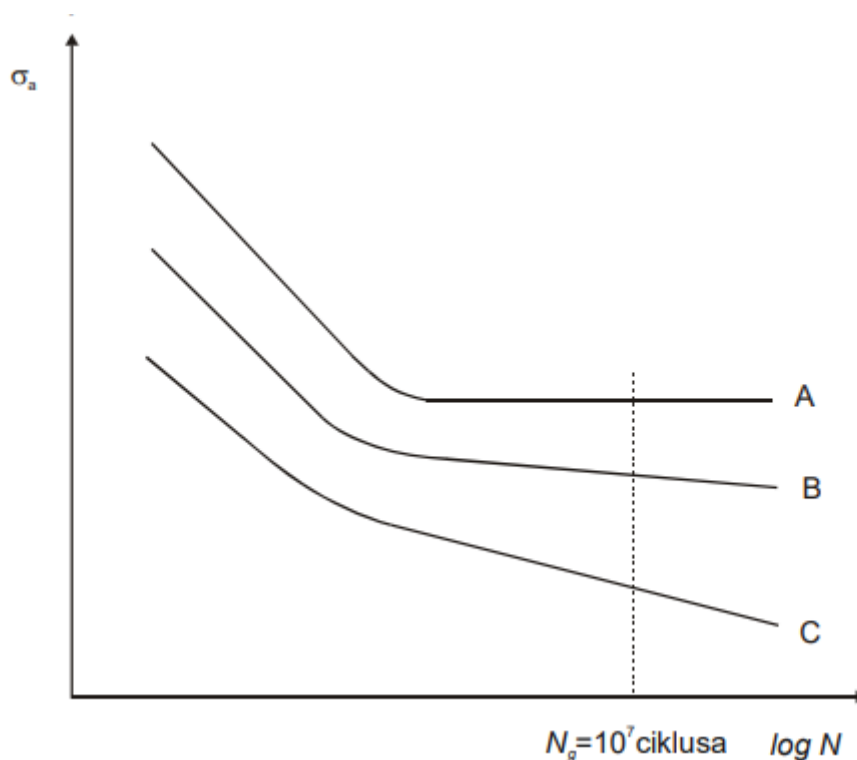


Slika 11. Željeznička nesreća u Njemačkoj [13]

Kako je već spomenuto, umor materijala je izuzetno opasan, jer lom koji nastaje uslijed umora materijala je iznenađan i katastrofalan. Kao zaključak ovog poglavlja nameće se činjenica kako dobru otpornost na umor materijala pokazuju čelik, bakar i njegove legure, ali i laki metali te njihove legure. Već prije naglašeno je kako je N_g granični broj ciklusa do pojave loma. Ovo su neke od vrijednosti N_g :

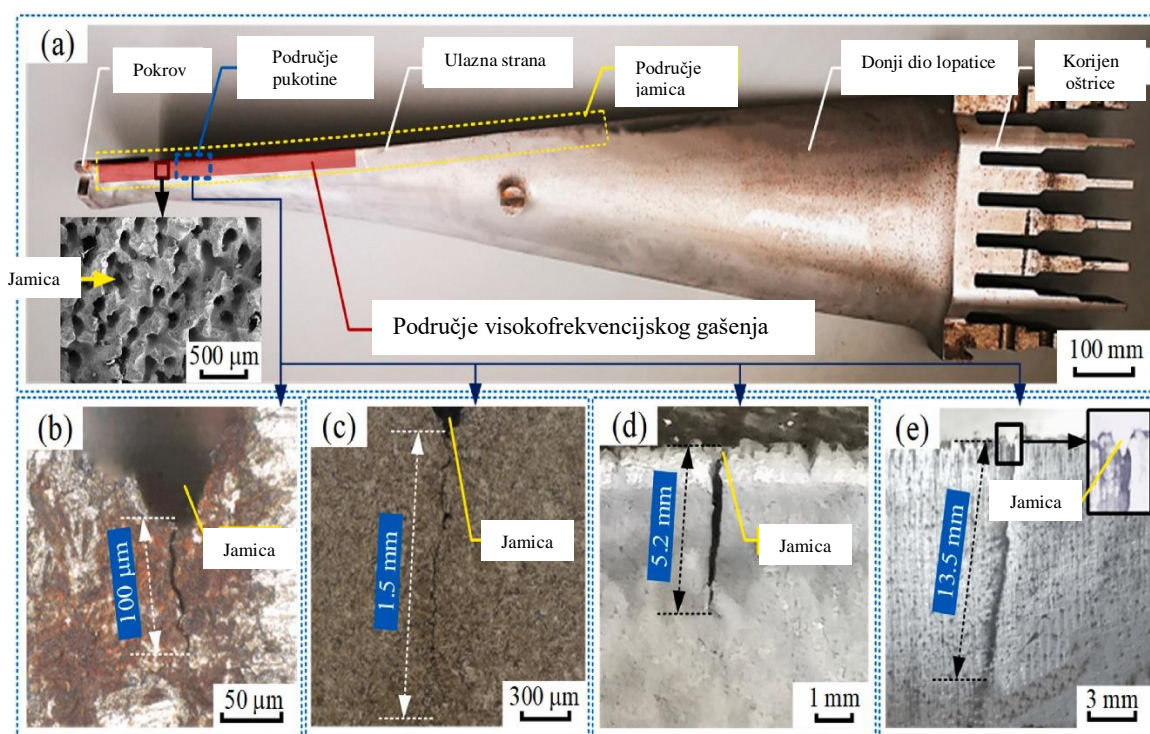
- za čelik : $N_g=10^7$ ciklusa;
- za bakar i bakrene legure : $N_g =5 \cdot 10^7$ ciklusa;
- za lake metale i njihove legure : $N_g =10^8$ ciklusa.

Za sprječavanje same pojave umora materijala i sprječavanje katastrofalnih posljedica svakako je važno ispravno odabrati materijal koji će se koristiti u izradi neke konstrukcije, proizvoda i slično. Važno je da sama proizvodnja materijala i konačnog proizvoda bude ispravna i bez pogreški (pogreške kod lijevanja, nedovoljno ispunjanje kalupne šupljine, velika razlika u temperaturi kalupa i taline i slično). Također poželjno je da rukovanje proizvedenim dijelom ili konstrukcijom bude pažljivo (bez udaraca i greški pri montaži). Kod sprječavanja pojave umora treba voditi računa i o projektiranju konstrukcije, odnosno treba izbjegavati nagle prijelaze, utore i zarez, kada god je to moguće. Tokom eksploatacije, umor se može spriječiti redovnim pregledima (vizualni pregled kritičnih mjesta, odnosno mjesta koja su pogodna za inicijalnu pukotinu, na primjer zavari, utori, zarez i slično). Također, valja analizirati okolinu u kojoj se neka konstrukcija nalazi, je li došlo do promjene u okolišu (povećanje korozijskog potencijala, veći godišnji prosjek jačine udara vjetra i slično). Često se zanemaruje važnost stanja površine. Površinu ispitnog uzorka ili strojnog dijela potrebno je brusiti i polirati. Na slici 12. prikazana je ovisnost dinamičke izdržljivosti o stanju površine [11]. Sve ove smjernice mogu dovesti do manje vjerojatnosti za pojavu umora i tako spriječiti eventualne nesreće.



Slika 12. Ovisnost dinamičke izdržljivosti o stanju površine [10]

Krivulja A pokazuje otpornost materijala s poliranom površinom, krivulja označena slovom B pokazuje otpornost materijala s korodiranom površinom dok je slovom C označena krivulja koja predstavlja površinu s interkristalnom korozijom. Prikazani graf vrijedi za konstrukcijski čelik. Vidljivo je kako najveći pozitivni utjecaj na dinamičku izdržljivost materijala pokazuje polirana površina (nema poroziteta, neravnina, udubljenja i slično), odnosno nema pogodnih mjesta za formiranje inicijalne pukotine. Korodirana površina pokazuje negativan utjecaj na dinamičku izdržljivost za isti broj ciklusa. Interkristalna korozija pak pokazuje najnegativniji utjecaj na dinamičku izdržljivost te za praktički isti broj ciklusa, takav ispitni uzorak puca pri dosta manjem opterećenju. Ovaj graf dokazuje tvrdnju kako je stanje površine itekako važno u pogledu pojave umora materijala. Na slici 13. prikazan je primjer umora materijala u uvjetima korozije. Radi se o lopatici parne turbine. Naime lopatica je izložena visokim temperaturama i visokom vlažnosti te je uslijed takvih uvjeta pogodnih za koroziju i promjenjivih opterećenja došlo do loma materijala [14].



Slika 13. Prikaz loma lopatice parne turbine uslijed umora materijala [14]

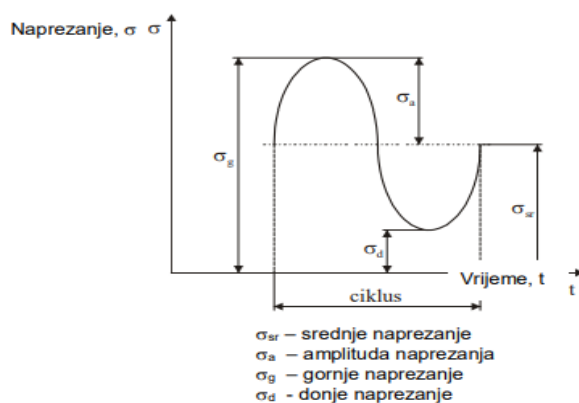
Na slici 13. prikazana je lopatica parne turbine. Također manje fotografije prikazuju mikroskopski prikaz jamica nastalih uslijed korozije koja je dovela do umora materijala. Te jamice nalaze se na površini same lopatice i predstavljaju početak pukotine.

2. UMARALICE, PRINCIP RADA

Umaralice su uređaji koji služe ispitivanju dinamičke izdržljivosti nekog uzorka. Umaralice omogućuju promjenljivo ("titrajno") opterećivanje ispitnog uzorka ili strojnih dijelova.

2.1. Princip rada

Same umaralice mogu raditi servohidraulički, hidraulički ili na principu elektromagnetske rezonancije. Novije i modernije umaralice mogu omogućiti različite načine promjenjivog naprezanja. Svrha umaralice je da kod ispitivanja nastoje ostvariti uvjete kakvi vladaju u eksploataciji nekog dijela, odnosno ostvariti promjenjivo i cikličko opterećenje. Na umaralicama mogu se ispitivati dinamičke izdržljivosti ispitnih uzoraka, strojnih dijelova, a u nekim slučajevima i cijelih konstrukcija. Ukoliko se radi o ispitivanju dinamičke izdržljivosti ispitnog uzorka, ispitni uzorak je uvijek normiranih dimenzija i završne obrade. To znači kako prilikom ispitivanja ispitnog uzorka na umaralici izostaju koncentratori naprezanja, što kod ispitivanja nekog konkretnog strojnog dijela nije slučaj. Na osnovu načina prihvata odnosno načina opterećivanja na umaralicama projektira se oblik i dimenzije ispitni uzorak. Za vlačno - tlačna ispitivanja ispitni uzorci su okruglog ili četvrtastog poprečnog presjeka. Za obično savijanje koriste se ispitni uzorci četvrtastog poprečnog presjeka, dok za rotacijsko savijanje koriste se ispitni uzorci okruglog poprečnog presjeka. Ispitni uzorci koje se koriste kod ispitivanja uvijanjem su okruglog poprečnog presjeka. Poželjno je također da uvjeti u kojim se ispituje dinamička izdržljivost budu što sličniji onima u eksploataciji, bilo da se radi o povišenoj ili sniženoj temperaturi, korozivnim medijima i slično. Tokom ispitivanja moguće su različite vrste naprezanja [11]. Najčešće se radi o promjenjivom naprezanju sinusoidnog karaktera koje je prikazano na slici 12. [11].



Slika 14. Promjenjivo naprezanje sinusoidnog karaktera [11]

Sama frekvencija sinusoide može se razlikovati, pa se tako niskofrekventno ispitivanje smatra ono čije su frekvencije do 5 Hz, srednje frekventno ispitivanje sa frekvencijama od 5 do 30 Hz, te visokofrekventno ispitivanje sa frekvencijama većim od 30 Hz. Iz same slike sinusoide naprezanja daju se izvući formula srednjeg naprezanja ali i formula amplitude naprezanja (jed. 1.1 i 1.2). Iz toga proizlazi da srednje naprezanje iznosi:

$$\sigma_{sr} = \frac{\sigma_g + \sigma_d}{2} [11]. \quad (1.1)$$

Amplituda naprezanja iznosi:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_g - \sigma_d}{2} [11]. \quad (1.2)$$

Kao i statičko naprezanje, tako i dinamičko naprezanje može biti na tlak i vlak, ali i kao kombinacija te dvije vrste opterećenja. Na slici 15. prikazan je moderna izvedba umaralice.



Slika 15. Moderni tip umaralice [15]

2.2. Vrste umaralica

Kao što je rečeno, umaralice su uređaji koji služe za određivanje dinamičke izdržljivosti odnosno za određivanje otpornosti na umor. Postoji više vrsta umaralica. Obzirom na frekvenciju opterećivanja dijele se na nisko, srednje i visokofrekventne umaralice. Obzirom na vrstu opterećenja dijele se na aksijalne, radijalne i torzijske. Određenim redoslijedom svaka od njih biti će ukratko opisana.

Srednjefrekventna umaralica

Princip rada ove vrste umaralica omogućuje kontrolu naprezanja kojim se opterećuje uzorak. Kod srednjefrekventnih umaralica frekvencija opterećenja nalazi se u rasponu od 5 do 30 Hz. Takva kontrola služi kako se ne bi došlo do naprezanja većeg od specificiranog. Ovaj princip rada često se koristi kod ispitivanja dijelova koji u svojoj eksploataciji neće biti opterećeni sa većim naprezanjem od specificiranog [16]. Na slici 16. prikazana je srednjefrekventna umaralica s kontrolom naprezanja.



Slika 16. Srednjefrekventna umaralica [17]

Niskofrekventna umaralica

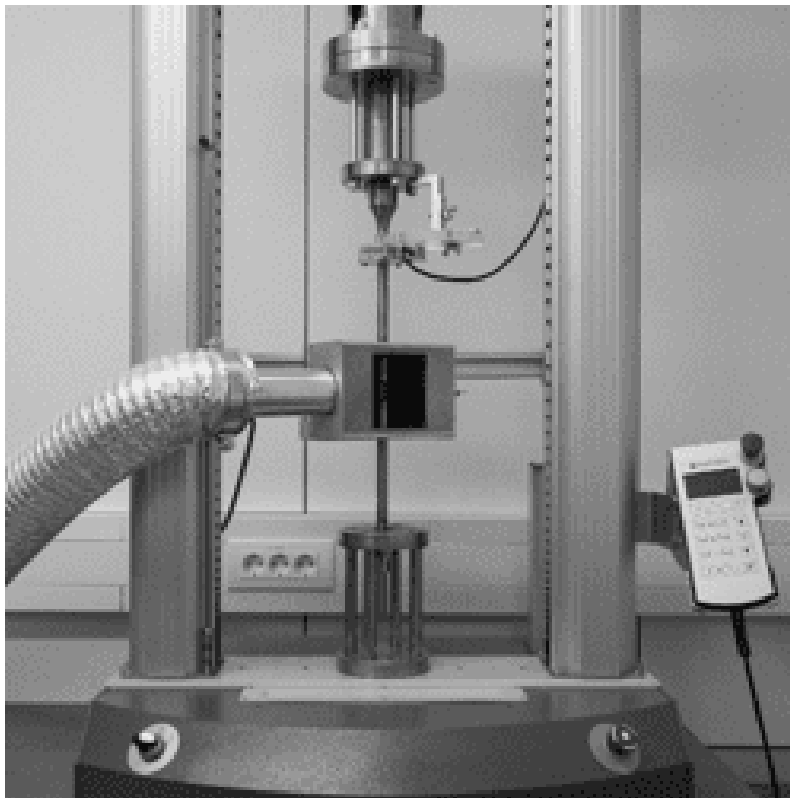
Ova vrsta umaralice koristi se kod opterećenja visoke amplitude, ali malim frekvencijama (radi se o frekvencijama do 5 Hz). Ovakvim principom opterećenja omogućili smo plastično i elastično naprezanje strojnog dijela ili ispitnog uzorka. Ovakvo ispitivanje na umaralici s malim frekvencijama koristi se kod broja ciklusa koji nije veći od 10^5 . Dijelovi koji se ispituju na ovakvim uređajima obično su dijelovi nekih cjevovoda, parni izolacijski ventili, dijelovi nuklearnih elektrana i slično. Također, ovakav tip umaralice koristi se kod ispitivanja lopatica turbine koje su u svom radu izložene centrifugalnim i toplinskim naprezanjima. Upravo ta naprezanja predstavljaju opterećenja s malim brojem ciklusa opterećenja [18]. Na slici 17. prikazana je niskofrekventna umaralica.



Slika 17. Niskofrekventna umaralica [19]

Visokofrekventna umaralica

Veliki broj ciklusa koristi se kada se želi dobiti oblik Wöhlerove krivulje (S-N krivulja). Radi se o frekvencijama većim od 30 Hz. Umaralice s kontrolom opterećenja i velikim iznosom frekvencije opterećenja česta su pojava u automobilske industriji za procjenu trajnosti komponenti podvrgnutih velikom broju ciklusa. Općenito, ova se metodologija oslanja na procjenu kritičnih točaka naprezanja dijelova, obično pomoću analize konačnih elemenata, nakon čega slijedi procjena vijeka trajanja uz pomoć S–N krivulja materijala komponente [20]. Slika 18. prikazuje visokofrekventnu umaralicu.



Slika 18. Visokofrekventna umaralica [21]

Ove tri vrste umaralica bile su umaralice kojima konstrukcija i parametri nisu striktno određeni za neku vrstu dijela, vrstu ispitnog uzorka i slično. Vrste umaralica koje će biti obrađene u nastavku imaju svrhu za ispitivanje otpornosti na umor konkretno određenu vrstu strojnog dijela.

Aksijalna umaralica

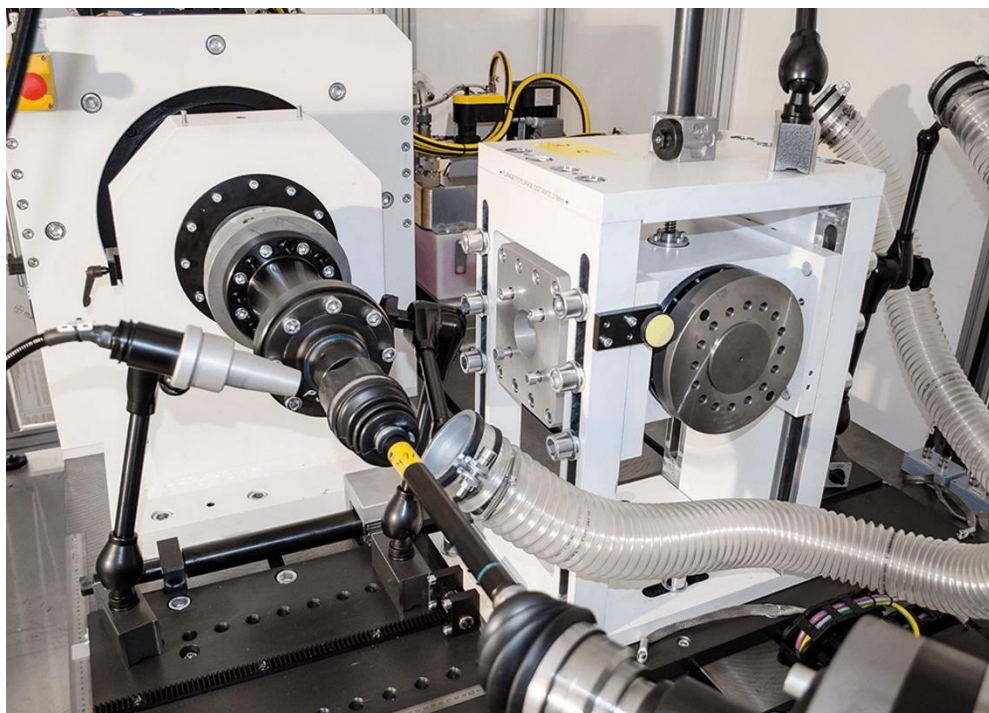
Aksijalna umaralica, kao i sve umaralice do sada, služi kako bi se ispitala otpornost nekog materijala na umor, odnosno kako bi se dobila informacija o dinamičkoj izdržljivosti materijala. Međutim, aksijalna umaralica svoje ime nosi zbog načina opterećenja uzorka koji se ispituje. Opterećenje kod ove vrste umaralica je čisto aksijalno. Aksijalna umaralica često se koristi za aksijalno opterećenje osovina, zupčanika ali i preklopnih spojeva s kutnim zavarima. Kako bi aksijalna umaralica primijenila aksijalnu silu na uzorke, u području stezanja uzoraka često se nalaze rupe. Koriste se za pričvršćivanje ploča na krajeve uzoraka, koje se zatim koriste kao učvršćenja stroja za hvatanje uzoraka. Nakon što se uzorak učvrsti, primjenjuje se aksijalna sila [22]. Na slici 19. prikazana je aksijalna umaralica.



Slika 19. Aksijalna umaralica [23]

Torzijska umaralica

Torzijska umaralica služi za ispitivanje otpornosti nekog uzorka na pojavu umora uz promjenjivo i cikličko torzijsko opterećenje. Ova vrsta umaralica izuzetno je važna kod ispitivanja kvalitete nekog proizvoda. Obzirom na oblik torzijskog opterećenja, ova umaralica ispituje strojne dijelove koji se pri svojoj eksploataciji okreću oko svoje osi dok istovremeno ostvaruju dodir s nekim drugim dijelom. U tu skupinu spadaju svrdla, vijci, medicinska oprema, neki drugi pričvrtni elementi i slično. Glavna značajka je da može testirati dvije strane istog uzorka istovremeno pomoću visokopreciznog električnog sustava i sustava upravljanja. Ta značajka uvelike skraćuje vrijeme potrebno za ispitivanje nekog uzorka. Osnovno načelo metode torzijskog ispitivanja pod normalnim uvjetima naprezanja je da se poprečno naprezanje ravnomjerno primjenjuje na uzorak. Vertikalno opterećenje sustava za ispitivanje materijala, odnosno umaralice najčešće je pretvoreno u okretni moment pomoću zupčaste letve i zupčanika, tako da je cilindrični uzorak u stanju opterećenja na tlak ali i smicanje. Povećanjem zakretnog momenta posmično naprezanje premašuje posmičnu čvrstoću samog materijala i dolazi do pojave pukotine pri čemu se uzorak postupno razara [24]. Torzijskom umaralicom također se ispituju i poluosovine te dijelovi diferencijala automobila. Na slici 20. prikazana je torzijska umaralica.



Slika 20. Torzijska umaralica [25]

Radijalna umaralica

Radijalnom umaralicom ispitujemo otpornost određenog uzorka na pojavu umora materijala pri radijalnom opterećenju. Ova vrsta opterećenja najčešće u eksploataciji je prisutna kod automobilskih kotača i općenito kod kotača na svakoj vrsti vozila (kamion, bager, viličar, motokultivator i slično). Upravo se u svrhu ispitivanja kotača najviše koriste radijalne umaralice. Ispitivanje radijalnog umora namijenjeno je utvrđivanju strukturnih performansi kotača za normalnu upotrebu na cesti ili drugoj površini kojom se vozilo kreće. Kotač mora izdržati ponovljeno radijalno opterećenje tijekom određenog broja ciklusa kako bi prošao ispitivanje. Životni vijek kotača podvrgnutog cikličkom opterećenju izračunava se iz vrijednosti naprezanja dobivenih statičkom analizom. Točnost vrijednosti naprezanja ovisi o različitim parametrima (modeliranje gume, metode simulacije, primjene opterećenja i slično) [26]. Na slici 21. prikazana je radijalna umaralica. Ove vrste umaralice često su izvedene tako da istovremeno mogu ispitivati više uzoraka (kotača) u isto vrijeme.

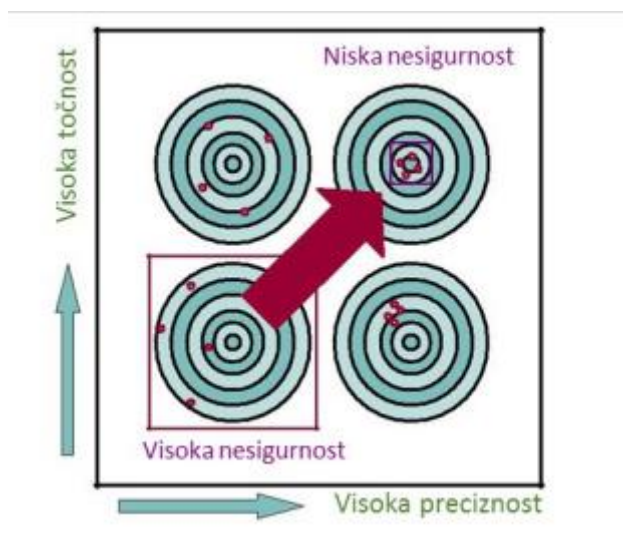


Slika 21. Radijalna umaralica [27]

3. UMJERAVANJE UMARALICA

3.1. O umjeravanju

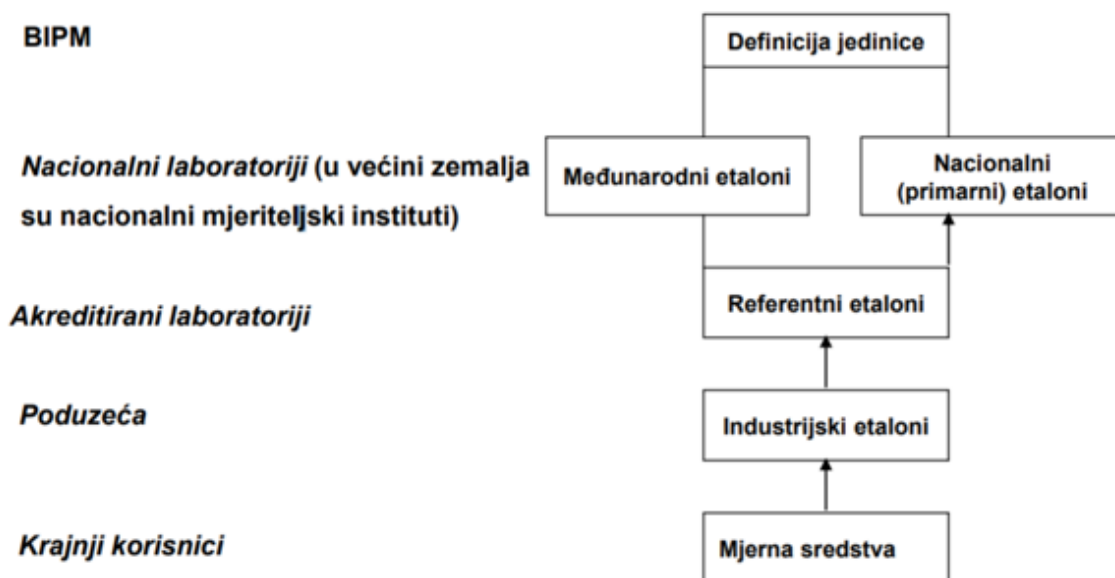
U svijetu i industriji općenito, svaki uređaj kojim se nešto mjeri ima svoj razred točnosti. Prolaskom vremena i korištenjem tih uređaja (utjecaji vlage, temperature, istrošenosti, pogrešnog rukovanja i slično) oni se više često ne nalaze u svom razredu točnosti te u tom trenutku dolazi do sumnje u rezultate samog mjerenja. Kod mjerenja neke veličine općenito valja razlikovati točnosti mjerenja i preciznost mjerenja. Točnost mjerenja znači odstupanje rezultata mjerenja od prave vrijednosti mjerene fizikalne veličine, dok preciznost mjerenja podrazumijeva širinu intervala unutar kojeg se nalazi prava vrijednost mjerene fizikalne veličine (slika 22.).



Slika 22. Prikaz odnosa točnosti i preciznosti mjerenja [28]

Također uz pojmove točnost i preciznost mjerenja, valja spomenuti i pouzdanost mjerenja koja je povezana sa širinom intervala unutar kojeg se nalazi prava vrijednost mjerene fizikalne veličine. Ukoliko imamo samo slučajne pogreške, višestrukim ponavljanjem mjerenja pouzdanost se povećava [29]. Kvaliteta proizvoda i usluga koju neka tvrtka može pružiti ovisi o točnosti i pouzdanosti mjerenja, provjeri proizvodnog procesa i kontrolama koje se vrše nad nekim postupkom ili krajnjim proizvodom. Točnost mjerenja praktički nije moguće osigurati bez redovitog umjeravanja mjerne odnosno ispitne opreme. Umjeravanje je proces podešavanja postavki instrumenta za pružanje rezultata unutar prihvatljivog raspona. Uklanjanje ili minimiziranje čimbenika koji uzrokuju netočna mjerenja temeljni je zadatak kod izrade instrumenata. Iako se točan postupak umjeravanja može razlikovati od proizvoda do proizvoda,

postupak umjeravanja općenito uključuje korištenje etalona [30]. Spomenuti etalon je po definiciji materijalizirana mjera, mjerilo, referencijska tvar ili mjerni sustav namijenjen za određivanje, ostvarivanje, čuvanje ili obnavljanje jedinice jedne ili više vrijednosti kakve veličine da bi mogli poslužiti kao referencija. Kod umjeravanja važan je i pojam sljedivosti. Sljedivost je svojstvo mjernog rezultata ili vrijednosti nekog etalona po kojemu se on može dovesti u vezu s navedenim referentnim etalonima (obično državnim ili međunarodnim) neprekinutim lancem umjeravanja, pri čemu svako umjeravanje doprinosi krajnjoj mjernoj nesigurnosti [31]. Na slici 23. prikazan je jedan lanac sljedivosti. Između svakog koraka odrađeno je umjeravanje.



Slika 23. Lanac sljedivosti [32]

Ovaj lanac umjeravanja prolaze svi mjerni instrumenti, neovisno o tome koju mjernu veličinu mjere. Kod svakog mjernog instrumenta ili stroja postoje razredi točnosti, pa i njih treba uzeti u obzir prilikom analize dobivenih rezultata.

3.2. Umjeravanje umaralica

Već je spomenuto kako je umjeravanje skup postupaka kojima se u određenim uvjetima uspostavlja odnos između vrijednosti mjernih veličina koje pokazuje neka usporedbena tvar i odgovarajućih vrijednosti. Umjeravanje umaralica provodi se kako ne bi došlo do pogreški prilikom obavljanja ispitivanja otpornosti nekog materijala na umor. Pogreška koja se često može dogoditi je netočna vrijednost sile kojom se opterećuje uzorak. U prijevodu, to znači da se pri dinamičkom ispitivanju nekog uzorka može dogoditi da je sila kojom se opterećuje uzorak može biti potpuno drugačija od one sile koja je naznačena u opisu ispitivanja. Takav slučaj dovodi do potpuno pogrešnih rezultata i zaključaka o otpornosti nekog uzorka na umor, što može prouzročiti katastrofalne posljedice (potpuno drugačiji životni vijek nekog dijela u eksploataciji od onog koji je naznačen i slično). Iz tog razloga provodi se umjeravanje umaralica.

4. EKSPERIMENTALNI DIO

4.1. Plan provedbe eksperimentalnog dijela

Eksperimentalnom dijelu ovog diplomskog rada pristupiti će se sustavno po određenom planu koraka izvođenja kako slijedi:

- a) Upoznavanje s opremom koja se umjerava, i opremom kojom se provodi umjeravanje
- b) Pregled korištenih normi prilikom izvođenja umjeravanja i opis istih
- c) Provođenje umjeravanja dvije umaralice (pneumatske i visokofrekventne)
- d) Obrada rezultata koji su dobiveni tokom ispitivanja

4.2. Opis umjeravane opreme

U poglavlju opis opreme dan je pregled opreme koja se koristila prilikom ispitivanja, te osnovi podaci iste.

4.2.1. Umaralice

Prva umaralica koja će se umjeravati ima oznaku i model STEPLAB UD08. Radi se o pneumatskoj umaralici sa vlastitim mjernim pojačalom. Slika 24. prikazuje navedenu umaralicu a tablica 1. prikazuje njene tehničke podatke.



Slika 24. Umaralica STEPLAB UD08

Tablica 1. Specifikacije umaralice STEPLAB UD08 [33]

Marka i model uređaja	STEPLAB UD08
Maks. Dinamička sila (sinusoidna sila) [kN]	8.0
Maks. Statička sila [kN]	5.8
Maks. Brzina ispitivanja [m/s]	2.0
Maks. Frekvencija ispitivanja [Hz]	250
Standardni hod [mm]	80
Duljina aktuatora [mm]	870
Dubina aktuatora [mm]	155
Širina aktuatora [mm]	400
Duljina sa klipom [mm]	1020
Vrsta hlađenja	Zrak
Temperatura rada [°C]	5-30

Druga umaralica je starije godine proizvodnje. Proizvođač je AMSLER a radi na principu elektromagnetske rezonancije. Kao i kod umaralice STEPLAB UD08, tako i umaralicu marke AMSLER treba umjeriti po istim koracima. Ova umaralica za razliku od prethodne je visokofrekventna. Slika 25. prikazuje umaralicu AMSLER.

**Slika 25. Umaralica AMSLER**

4.3. Opis opreme za umjeravanje

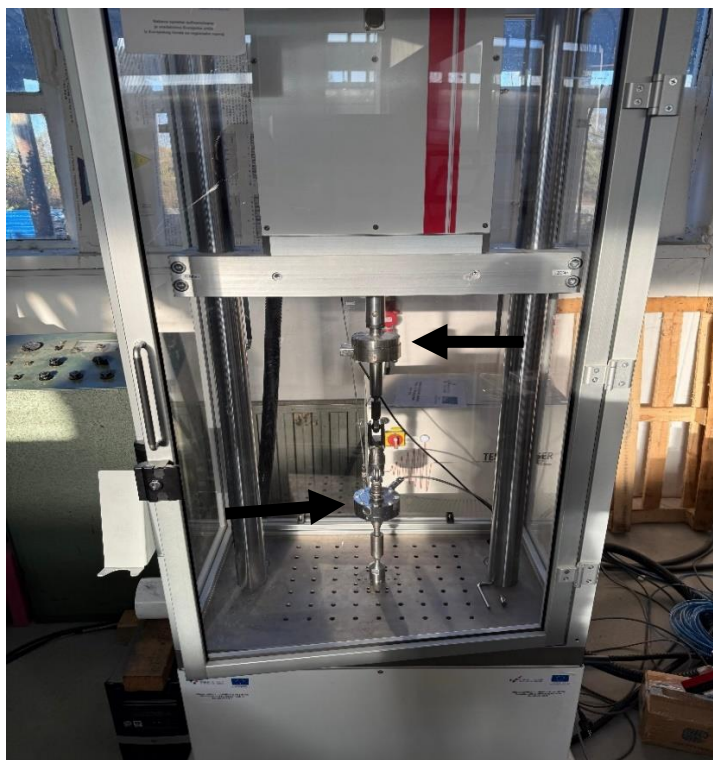
Za umjeravanje sila opterećivanja kod umaralica koristio se mjerni lanac koji se sastoji od senzora sile (dinamometra) i mjernog pojačala.

4.3.1. Senzori sile (dinamometri)

Dinamometri se, prema svojoj namjeni, dijele u dvije osnovne skupine:

- Dinamometri za industrijska mjerenja sile
- Dinamometri za laboratorijska precizna mjerenja

Ključni dio svakog dinamometra je središnji elastični element, na koji su pričvršćene mjerne trake. Čvrsto kućište dinamometra štiti elastični element od bočnih sila i izolira ga od vanjskih utjecaja, čime se osigurava točnost mjerenja. Oblik i dimenzije elastičnog elementa pažljivo su dizajnirani kako bi omogućili ravnomjernu raspodjelu naprezanja u zoni gdje se nalaze mjerne trake. Mjerne trake djeluju kao senzori, pretvarajući naprezanje u električni signal koji se šalje pojačalu za daljnju obradu. Korišteni dinamometri pri ispitivanju u svrhu ovog diplomskog rada prikazani su na slikama 26., 27. i 28.



Slika 26. Dinamometri spojeni na pojačalo

Slika 26. prikazuje način na koji su dinamoimetri postavljeni na umjeravanu pneumatsku umaralicu STEPLAB UD08. Donji dinamoimetar je dinamoimetar same umaralice, dok je gornji

dinamometar referentni. Oba dinamometra povezani su sa pojačalima. Dinamometar umaralice spojen je na njeno vlastito mjerno pojačalo dok je referentni dinamometar spojen na vanjsko mjerno pojačalo.



Slika 27. Dinamometar od umaralice

Na slici 27. prikazan je dinamometar visokofrekventne umaralice AMSLER. Obzirom da u ovom slučaju umaralica ne posjeduje vlastito mjerno pojačalo, dinamometar je spojen na vanjsko mjerno pojačalo. Slika 28. prikazuje referentni dinamometar proizvođača AEP koji je primjenjiv za mjerenja statičkih i dinamičkih sila. Linearnost i histerezna značajka su mu manje od 0.05 %



Slika 28. Referentni dinamometar

4.3.2. Mjerna pojačala

Mjerno pojačalo je jedan od izuzetno važnih elemenata mjernog sustava. Mjerna pojačala služe za pojačanje izlaznih signala iz različitih senzora, mjernih mostova i općenito električnih detektora koji na svom izlazu daju obično vrlo male promjene električnih veličina. Kako bi se te male električne promjene mogle detektirati (napon, struja, otpor, induktivnost, kapacitivnost), očitati i dalje obrađivati, nužno ih je prethodno pojačati mjernim pojačalima koja u tu svrhu moraju biti dizajnirana za što vjernije praćenje mjerene veličine, bez unošenja dodatnih izobličenja, šumova ili kašnjenja. Osnovni zahtjevi, koji se postavljaju pred mjerna pojačala su: osiguravanje napona (struje) na izlazu koji su proporcionalni veličinama napona (struje) na ulazu pojačala, što manja vlastita potrošnja, što vjernije praćenje promjene mjerene veličine (prenošenje signala bez dodatnih šumova). Slike 29. i 30. pokazuju korištena mjerna pojačala.



Slika 29. Mjerno pojačalo HBM AB12 [34]

Mjerno pojačalo HBM AB12 je kompatibilno sa širokim rasponom senzora i pretvarača. Ulazni signal ovog mjernog pojačala je analogni, dok mu je raspon pojačanja podesiv. Služi za registriranje dinamičkih signala visokih frekvencija. Posjeduje i filtre za smanjenje šuma i poboljšanje signala. Način povezivanja s računalom prilikom provođenja ispitivanja bio je putem RS232 kabela.



Slika 30. Mjerno pojačalo HBM DMP40 [35]

Mjerno pojačalo HBM DMP40 ima raspon mjerenja obično +/- 10V, također služi za registriranje dinamičkih signala visokih frekvencija. Način povezivanja s računalom prilikom provođenja ispitivanja kao i kod prvog pojačala bio je putem RS232 kabela.

4.4. Norme za umjeravanje

U ovom dijelu dati će se pregled korištenih normi te opis svake od njih. Norme koje su korištene u ovom diplomskom radu prilikom umjeravanja su norma HRN EN ISO 7500-1:2018 te norma ISO 4965-1:2012.

4.4.1 Norma HRN EN ISO 7500-1:2018

ISO (eng. *International Organization for Standardization*) je svjetska organizacija nacionalnih normizacijskih tijela. Pripreme međunarodnih normi provode se preko ISO-a tehničke komisije. Sami članovi tehničke komisije mogu biti međunarodne organizacije, vladine i nevladine organizacije i slično. Glavni zadatak tehničke komisije je priprema međunarodnih normi. Nacrt međunarodnih normi usvojenih od strane tehničke komisije šalju se tijelima članicama na glasovanje. Međunarodna norma zahtjeva odobrenje od najmanje 75 % tijela članova koja daju glas. Norma ISO 7500 nezaobilazna je prilikom umjeravanja uređaja za ispitivanje umora, odnosno umaralica. Norma se sastoji od sljedećih dijelova

- Dio 1: Uređaji za ispitivanje naprezanja/tlaka - Provjera i umjeravanje uređaja za mjerenje sile
- Dio 2: Uređaji za ispitivanje puzanja - Provjera primijenjene sile.

Provjera primijenjene sile provodi se pomoću instrumenata za određivanje sile naprezanja. Ovi instrumenti moraju biti u skladu s normom ISO 376. Klasa instrumenta za određivanje sile mora biti jednaka ili bolja od klase kojom je određen za uređaj za ispitivanje puzanja. Provjerom primijenjene sile određuje se raspon sile za koji se traži verifikacija klase točnosti. Prvi korak je dovesti opterećenje na vrijednost koja je zanemariva pri izračunu, odnosno koja se nalazi unutar naznačene klase točnosti. Potrebno je ostaviti dovoljno vremena da oprema za provjeru postigne stabilnu temperaturu. Temperatura se zabilježava na početku i kraju primjene svakog niza sila. Niz sila treba odabrati kao niz od najmanje pet približno jednako raspoređenih sila.

Za svaki raspon sila primjenjuje se serija sila uzlaznim redoslijedom i tako se ponavlja svaka serija kako bi se dobila tri ispitivanja (tri serije opterećenja). Nakon svake serije opterećenja treba potpuno ukloniti silu. Nakon što su obavljena 3 ispitivanja u određenom rasponu sila uzima se srednja vrijednost dobivenih rezultata sile, te se provjerava odstupanje svake od vrijednosti sile sa stvarnom vrijednošću. Nakon usporedbe, pomoću te dvije vrijednosti sile (stvarne i izmjerene) lako se proračuna o koliko odstupanju, u postotcima se radi. Ukoliko taj postotak u makar jednoj vrijednosti sile odstupa od navedene klase točnosti uređaja, uređaj nije

zadovoljio klasu točnosti [44]. Tablica 2. prikazuje klasifikaciju opreme, odnosno maksimalno dozvoljeni iznos odstupanja za svaku klasu. Ukoliko je ijedan parametar izvan svojih granica za određenu klasu, oprema više ne pripada toj klasi.

Tablica 2. Klasifikacija opreme

	DOZVOLJENO OdstUPANJE, %				
	q	b	v	a	$f(0)$
Klasa 0,5	0,5	0,5	0,75	0,25	0,05
Klasa 1	1,0	1,0	1,50	0,50	0,10
Klasa 2	2,0	2,0	3,00	1,00	0,20
Klasa 3	3,0	3,0	4,50	1,50	0,30

Svi parametri iz tablice se izračunavaju. U nastavku biti će određenim redoslijedom napisane formule (jed. 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5) po kojima se izračunavaju navedeni parametri.

$$q = \frac{X_{1,2,3...N} - X_i}{X_{1,2,3...N}} * 100 [\%], \quad (4.1)$$

gdje je: X_i – vrijednost očitavanja stvarne sile, mV/V

$X_{1,2,3...N}$ – vrijednosti očitavanja na prijenosnom etalonu sile koja odgovara stvarnoj rastućoj sili, mV/V

q – vrijednost mjerne pogreške, %

$$b = \frac{\max(X_{1,2,3...N}) - \min(X_{1,2,3...N})}{X_{sr}} * 100[\%], \quad (4.2)$$

gdje je:

$X_{1,2,3...N}$ – vrijednosti očitavanja na prijenosnom etalonu sile koja odgovara stvarnoj rastućoj sili, mV/V

b – vrijednost ponovljivosti, %

X_{sr} – aritmetička sredina izmjerenih vrijednosti, mV/V

$$v = \frac{x_2 - x'_2}{x_{sr}} * 100 [\%], \quad (4.3)$$

gdje je:

X_{sr} – aritmetička sredina izmjerenih vrijednosti, mV/V

X_2 - vrijednosti očitavanja na prijenosnom etalonu sile koja odgovara stvarnoj rastućoj sili, mV/V

X'_2 - vrijednosti očitavanja na prijenosnom etalonu sile koja odgovara stvarnoj opadajućoj sili, mV/V

$$a = \frac{r}{F_i} * 100 [\%], \quad (4.4)$$

gdje je:

a – relativna rezolucija, %

r – rezolucija, kN

F_i – sila očitana na mjerilu sile, kN

$$f_0 = \frac{F_{i0}}{F_N} * 100 [\%]. \quad (4.5)$$

gdje je:

f_0 – relativna pogreška nule, %

F_{i0} - ostatak sile očitana na umjeravanom mjerilu nakon rasterećenja, kN

F_N - najveća vrijednost indikatora sile umaralice, kN

4.4.2 Norma ISO 4965-1:2012

4.4.2.1. Uvod

Međunarodna norma ISO 4965-1:2012 sastoji se od testiranja sustava, te instrumentacije uređaja za umjeravanje dinamičkih sustava (umaralice). U dinamičkom ispitivanju, sila kojom se djeluje na ispitni komad može se značajno razlikovati od naznačene i predviđene sile testiranja. Dinamičke pogreške, odnosno razlike u stvarnoj i predviđenoj sili proizlaze iz inercijskih sila koje djeluju na pretvarač sile i bilo koje druge dinamičke pogreške u sustavu za indicaciju sile (pogreški) pri montaži, neispravan prihvata uzorka i slično). Inercijske sile jednake su masi hvatišta (između pretvarača sile i ispitnog komada) pomnoženo s njegovom akceleracijom i stoga inercijske sile ovise o:

- a) amplitudi kretanja,
- b) frekvenciji gibanja, i

c) masi

Amplituda gibanja će pak ovisiti o primijenjenoj sili i mehaničkoj konfiguraciji ispitivanja. U svrhu ovog dijela ISO 4965-1:2012, mora postojati linearni odnos između primijenjene sile i pomaka aktuatora. Korištenjem metode A i izračunatog faktora korekcije, sustav mjerenja sile bit će dinamički kalibriran na unutar 1 % raspona primijenjene sile. Korištenjem Metode B i dva uređaja za dinamičko umjeravanje različite usklađenosti, sustav mjerenja sile bit će dinamički kalibriran na unutar 1 % raspona primijenjene sile, ako stvarni ispitni komad ima usklađenost između onih dvaju uređaja za dinamičko umjeravanje. Metoda A (metoda replike ispitnog komada) koristi se za umjeravanje sustava dinamičkog ispitivanja s uređajem za dinamičko umjeravanje, dopuštajući ispravljanje pogrešaka do 10 % u naznačenom rasponu sile, korištenjem generiranog faktora korekcije. Uređaj za dinamičko umjeravanje mora imati istu sukladnost i masu kao uzorci koji se ispituju, a cijeli niz opterećenja mora biti isti kao onaj koji će se koristiti za stvarno ispitivanje. Prije početka nove serije dinamičkih ispitivanja, faktor korekcije koji se odnosi na naznačeni raspon sile do raspona sile ispitnog komada može se odrediti pomoću replike uzorka za mjerenje naprezanja. Ovaj se faktor može primijeniti ili kao korekcija rezultata ili za modificiranje sile koju primjenjuje sustav ispitivanja, smanjujući dinamičku pogrešku sile na manje od 1 %. Ovaj faktor korekcije ovisi o učestalosti ispitivanja i stoga će se morati odrediti za cijeli raspon predviđenih frekvencija ispitivanja. Metoda B (metoda sukladnosti) koristi se za umjeravanje sustava za dinamičko ispitivanje za korištenje s različitim konfiguracijama ispitnog komada, koristeći dva uređaja za dinamičko umjeravanje različite sukladnosti. Uređaj za dinamičko umjeravanje niske sukladnosti trebao bi imati usklađenost nižu od bilo kojeg ispitnog komada koji se ispituje, a uređaj za dinamičko umjeravanje visoke sukladnosti trebao bi imati usklađenost veću od bilo kojeg ispitnog komada. Za sustav ispitivanja može se uspostaviti povezanost sukladnosti ispitnog komada u odnosu na učestalost dinamičke pogreške koje se događaju unutar 1 % raspona primijenjene sile. Pretpostavlja se da je usklađenost niza opterećenja beznačajna u usporedbi s usklađenošću bilo kojeg uređaja za dinamičko umjeravanje. Ako to nije slučaj, a uređaj će se koristiti s različitim vrijednostima usklađenosti niza opterećenja, morat će se izvršiti dodatne kalibracijske preinake. Prije svakog testiranja, norma ISO 4965-1:2012 zahtjeva određivanje odnosno verifikaciju klase točnosti umaralice po normi HRN EN ISO 7500-1;2018 [45].

4.4.2.2. Postupak

Svrha ove provjere je odrediti raspon frekvencija na kojima se ispitni sustav može verificirati. Jedna od tehnika koje se mogu koristiti za provjeru dinamike cijelog mjernog sustava je lomljenje krhkog ispitnog komada (pod kontrolom pomaka) i snimanje promjene u signalu sile. Još jedna tehnika koja se može koristiti za određivanje valjanih frekvencijskih raspona je izvođenje frekvencijskog pregleda – to pomaže identificirati lokalizirana područja pogreške koja ne slijede opći trend, zbog prisutnosti značajnih rezonantnih frekvencija. Polako povećavajte učestalost ispitivanja, s cikličkim rasponom sile fiksiranim na umjerenu amplitudu, na kontinuirani način ili u malim koracima od minimuma do maksimuma raspona kalibracije ispitne frekvencije, sa uređajem za dinamičko umjeravanje montiranim u niz opterećenja. Nakon toga očitaju se i zabilježe vršne vrijednosti izlaza uređaja za dinamičko umjeravanje ili izlaz akcelerometra fiksiranog unutar niza opterećenja, na svakoj ispitnoj frekvenciji. Nakon toga, crta se amplituda izmjerenih vrijednosti za svaku frekvenciju, krivulja se prilagodi podatkovnim točkama i identificiraju se pojedinačne vrijednosti koje odstupaju od temeljnog trenda za više od 5 % svoje vrijednosti – prolazne varijacije mogu ukazivati na rezonanciju sustava. Ako se otkriju bilo kakve prolazne varijacije, smanjuje se raspon ispitnih frekvencija koje treba provjeriti kako bi se izbjegle rezonantne frekvencije sustava. Rezultirajući frekvencijski raspon ne smije obuhvaćati niti jednu rezonantnu frekvenciju sustava. Preporuča se da se ispitivanje frekvencije izvede uz kontrolu sile kako bi se osigurala dovoljna rezolucija kontrole. Kako bi se izbjegla rezonancija sustava, ispitni sustavi mogu se verificirati u više od jednog ispitnog frekvencijskog raspona, čime se izbjegavaju kritične rezonantne frekvencije sustava. Naknadna stvarna ispitivanja također će izbjeći te kritične rezonantne frekvencije sustava. Na primjer, ispitni sustav može se verificirati između frekvencija od 0 Hz i 23 Hz i između 37 Hz i 100 Hz kako bi se izbjegla kritična rezonantna frekvencija sustava od 30 Hz. Tada ne bi bilo dopušteno stvarno testiranje u rasponu od 23 Hz do 37 Hz, frekvencijskom rasponu unutar kojeg izlaz značajno odstupa od temeljnog trenda. Nakon toga treba utvrditi ponovljivost primijenjene sile za sustav dinamičkog ispitivanja mjereno vlastitim sustavom mjerenja sile. Pri svakoj učestalosti provjere, treba kružiti sustavom za dinamičko ispitivanje najmanje 50 puta i zabilježiti odgovarajuće vršne i nizine krajnje razine svakog ciklusa, kako je izmjereno sustavom za mjerenje sile. Ove krajnje razine ne smiju varirati za više od 1 % ukupnog raspona sile koja se primjenjuje na svim učestalostima provjere. Zatim slijedi kalibracija uređaja za dinamičko umjeravanje. Treba statički umjeriti uređaj za dinamičko umjeravanje prema indikatoru sustava za dinamičko ispitivanje, koristeći utvrđeni raspon sile

polaganim cikliziranjem sile između odabrane gornje i donje razine sile najmanje tri puta i zatim održavanjem sile konstantnom na sustavu za ispitivanje i očitavanjem indikacija uređaja za dinamičko umjeravanje. Očitavaju se četiri sljedeće vrijednosti statičke sile:

- a) vršna sila + 5 % raspona sile ($= [str+5]$);
- b) vršna sila – 5 % raspona sile ($= [str-5]$);
- c) dolinska sila + 5 % raspona sile ($= [v+5]$);
- d) dolinska sila – 5 % raspona sile ($= [v-5]$).

Kada je raspon dinamičke sile do nule [tj. vlačno (pozitivno) i tlačno (negativno) opterećenje], koriste se gornje krajnje razine. Kada je raspon dinamičke sile samo na napetost i vrijednost [sile u minimalnoj točki – 5 % raspona sile] ispod nule, treba koristiti nultu vrijednost sile. Kada je raspon dinamičke sile samo tlačne prirode i vrijednost vršne sile + 5 % raspona sile je iznad nule, treba koristiti nultu vrijednost sile. Nakon toga uzimaju se očitavanja vrha i doline s indikatora sile sustava za dinamičko ispitivanje na svakoj od pet rastućih ispitnih frekvencija približno jednako raspoređenih (bilo linearno ili logaritamski) u već određenom rasponu i na četiri padajuće ispitne frekvencije približno na sredini između ovih ispitnih frekvencija. Ako se sustav umjeri u više od jednog raspona, zbog prisutnosti rezonantnih frekvencija sustava, tri rastuće i dvije padajuće ispitne frekvencije primijenit će se u svakom rasponu. Amplituda sile ispitivanja treba biti ona koja je već prije određena. Sustav za testiranje treba pustiti da se smiri na svakoj novoj frekvenciji prije očitavanja ekstremnih vrijednosti (maksimalne i minimalne). Zatim se izračunavaju vrijednosti sile na uređaju za dinamičko umjeravanje na svakom dinamičkom vrhu i dolu. Nakon toga izračunava se raspon sile uređaja za dinamičko umjeravanje. Kao konačno izračunava se greška indikacije, na svakoj frekvenciji. Pogreške pokazivanja utvrđene pomoću dva uređaja za dinamičko umjeravanje iscertavaju se u odnosu na frekvenciju kako bi se definirao kalibrirani raspon unutar kojeg se sustav dinamičkog ispitivanja može koristiti za stvarno ispitivanje. Kalibrirani raspon ispitnog sustava je onaj u kojem nijedna greška dinamičke sile ne prelazi 1 % raspona primijenjene sile. Ako je razlika u usklađenosti između dva uređaja za dinamičko umjeravanje mala, vjerojatno je da će imati slične krivulje oblika. Ako postoji velika razlika između njihovih usklađenosti, tada jedan uređaj za dinamičko umjeravanje može imati pogrešku koja raste s povećanjem učestalosti, a drugi može imati pogrešku koja se smanjuje s povećanjem učestalosti. Granice stvarne frekvencije ispitivanja određuju se tako da pogreška ne prelazi 1 % dinamičkog raspona sile. Nije dopušteno stvarno ispitivanje ni na jednoj frekvenciji gdje pogreška za bilo koji uređaj za dinamičko umjeravanje prelazi 1 % dinamičkog raspona sile.

4.5. Provedba umjeravanja

Nakon pregleda opreme i upoznavanja sa normama pristupa se postupku umjeravanja. Kod obje umaralice prvi korak je provesti normu HRN EN ISO 7500-1:2018, te će iz tog razloga prvo biti opisan postupak provedbe te norme, za obje umaralice.

4.5.1. Provedba norme HRN EN ISO 7500-1:2018

Norma HRN EN ISO 7500-1:2018 detaljno je objašnjena u prethodnom poglavlju. Radi se o statičnom ispitivanju na vlak ili tlak. Bez provedbe te norme umjeravanje umaralice po normi ISO 4965-1:2012 nije valjano. Prvo što je odrađeno uključivanje oba dinamometra. Takvo stanje sa narinutim naponom na dinamometre treba održati barem pola sata. Prije umjeravanja mjerilo je tri puta opterećeno do nazivne sile umjeravanog mjernog područja. Potom je provedeno umjeravanje pri rastućoj sili uz tri ponavljanja unutar područja 20% do 100% nazivne vrijednosti sile na mjernom području. Umjeravanje je provedeno s konstantnim vrijednostima sile F_i očitane na pokazivaču sile mjerila. Nakon toga, bilježi se temperatura prostorije u kojoj se provodi norma HRN EN ISO 7500-1:2018. U konkretnom slučaju temperatura je bila 23°C. Zatim određujemo sile na kojima ćemo bilježiti očitavanja. Odabrane su različite vrijednosti za dvije umaralice koje će biti navedene u posebnom poglavlju. Nakon određivanja vrijednosti krenulo se sa statičkim opterećenjem na vlak, a u slučaju druge umaralice (AMSLER) na tlak. Dostizanjem vrijednosti sila koje su navedene, opterećenje se zaustavlja te se zabilježavaju očitavanja iz programa dinamometra umaralice te sa pojačala referentnog dinamometra sve dok se ne dostigne vrijednost vršnog statičkog opterećenja. Takvo ispitivanje obavlja se 3 puta, s tim da se u drugom ispitivanju opterećenje vrši i silazno (dakle sa vršnog opterećenja silazno se rasterećuje na minimalnu zadanu vrijednost kako bi se dobila vrijednost histereze). Nakon obavljena tri ispitivanja proračunava se pogreška koja je nastala, odnosno razlika između stvarnog i induciranog opterećenja. Ukoliko postotak pogreške ulazi u okvir klase točnosti umaralice, kreće se na idući korak, odnosno nastavak provedbe umjeravanja po normi ISO 4965-1:2012.

4.5.1.1. Provedba norme HRN EN ISO 7500-1:2018 na pneumatskoj umaralici STEPLAB UD08

Na umaralici STEPLAB UD08 obavljani su svi prethodno navedeni koraci. Sile koje su odabrane za ispitivanje su kako slijedi: 0,5, 1, 2, 3, 4 i 5 kN. Rezultati dobiveni ispitivanjem prikazani su u tablici 2.

Tablica 3. Vrijednosti očitane i izračunate pri provedbi norme ISO 7500 – Umaralica STEPLAB UD08

Inducirana sila		Stvarna sila						
F_i	X_i	X_1	X_2	X'_2	X_3			
kN	mV/V	mV/V	mV/V	mV/V	mV/V	q_1	q_2	q_3
						%	%	%
0,00	0,00000	0,00000	0,00000		0,00000	0	0	0
0,5	0,08133	0,08096	0,08041	0,08117	0,08080	-0,46	-1,14	-0,66
1,0	0,16270	0,16221	0,16222	0,16177	0,16195	-0,30	-0,30	-0,47
2,0	0,32556	0,32396	0,32413	0,32418	0,32393	-0,49	-0,44	-0,50
3,0	0,48854	0,48648	0,48706	0,48726	0,48723	-0,42	-0,30	-0,27
4,0	0,65162	0,64830	0,65027	0,65029	0,65070	-0,51	-0,21	-0,14
5,0	0,81479	0,81265	0,81169		0,81227	-0,26	-0,38	-0,31

U tablici 2. prikazani su očitani podaci te vrijednosti pogreški izračunate uz pomoć dobivenih podataka. Vidljivo je kako su vrijednosti pogreške u sva tri mjerenja unutar 1%.

4.5.1.2. Provedba norme HRN EN ISO 7500-1:2018 na visokofrekventnoj umaralici AMSLER

Također, kao i kod pneumatske umaralice, nakon odrađenih koraka koje zahtjeva norma HRN EN ISO 7500-1:2018 dobiveni su određeni rezultati te su izračunate vrijednosti pogreške. Dvije razlike su kod ispitivanja visokofrekventne umaralice u odnosu na STEPLAB UD08. Prva razlika je što zbog starije godine proizvodnje, AMSLER umaralica nema vlastito mjerno pojačalo već se moralo koristiti dva mjerna pojačala. Druga razlika je niz sila. Sile za provedbu

norme HRN EN ISO 7500-1:2018 odabrane su kako slijedi: : 2,5, 5, 7,5, 10 i 12,5 kN. Tablica 3 prikazuje podatke dobivene ispitivanjem.

Tablica 4. Podaci inducirane i stvarne sile te vrijednosti pogreški

Inducirana sila		Stvarna sila						
F_i	X_i	X_1	X_2	X'_2	X_3	q_1	q_2	q_3
kN	mV/V	mV/V	mV/V	mV/V	mV/V	%	%	%
0,00	0,00000	0,00000						
2,5	-0,40811	-0,40741	-	-0,40734	-	-0,17	-0,26	-0,25
5,0	-0,81648	-0,81492	-	-0,81548	-	-0,19	-0,20	-0,11
7,5	-1,22496	-1,22354	-	-1,22401	-	-0,12	-0,14	-0,09
10,0	-1,63336	-1,63156	-	-1,63141	-	-0,11	-0,14	-0,08
12,5	-2,04153	-2,03938	-	-	-	-0,11	-0,12	-0,09

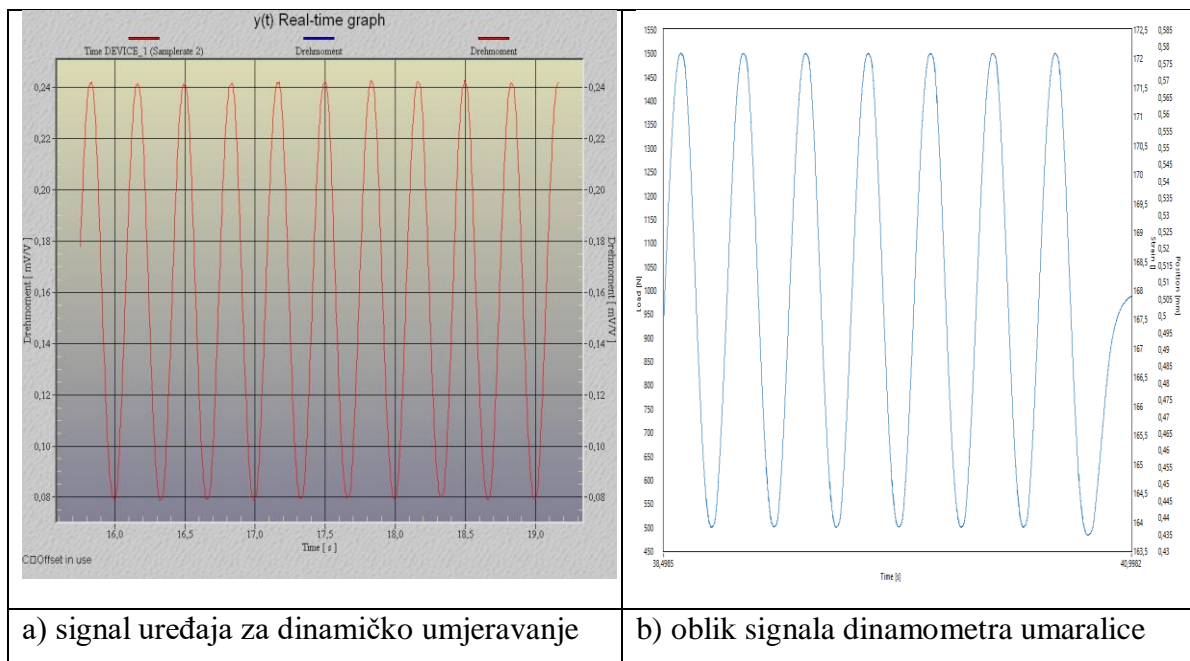
Vidljivo je kako su sve vrijednosti pogreški ispod 1%. Dakle, može se prijeći na idući korak umjeravanja po normi ISO 4965-1:2012.

4.5.2. Provedba norme ISO 4965-1:2012

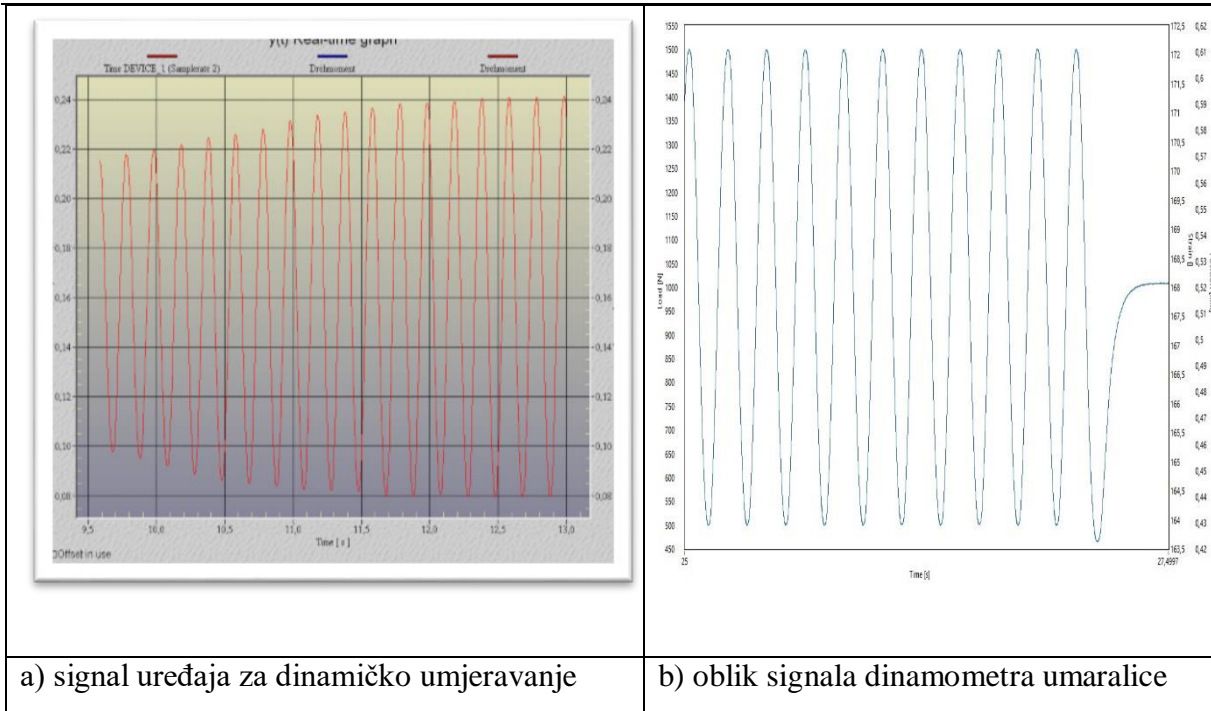
Nakon odrađenog prvog dijela slijedi drugi dio umjeravanja. U ovom dijelu princip je takav da će se uz određene frekvencije narinuti dinamičko opterećenje, a pratiti će se samo gornja sila. Razlog tomu je što su donje sile opterećivanja dosta niske za primijenjene dinamometre te bi došlo do pogrešaka senzora sile. Konkretno, promatrati će se ponašanje pri frekvencijama koje su odabrane različito za dvije umaralice. Gornje sile se također razlikuje za dvije umaralice. Nakon odrađenih ispitivanja za svaku frekvenciju odabiru se vrijednosti te se uspoređuju vrijednosti sile koja je inducirana te one stvarne sile.

4.5.2.1. Provedba norme ISO 4965-1:2012 – Pneumatska umaralica STEPLAB UD08

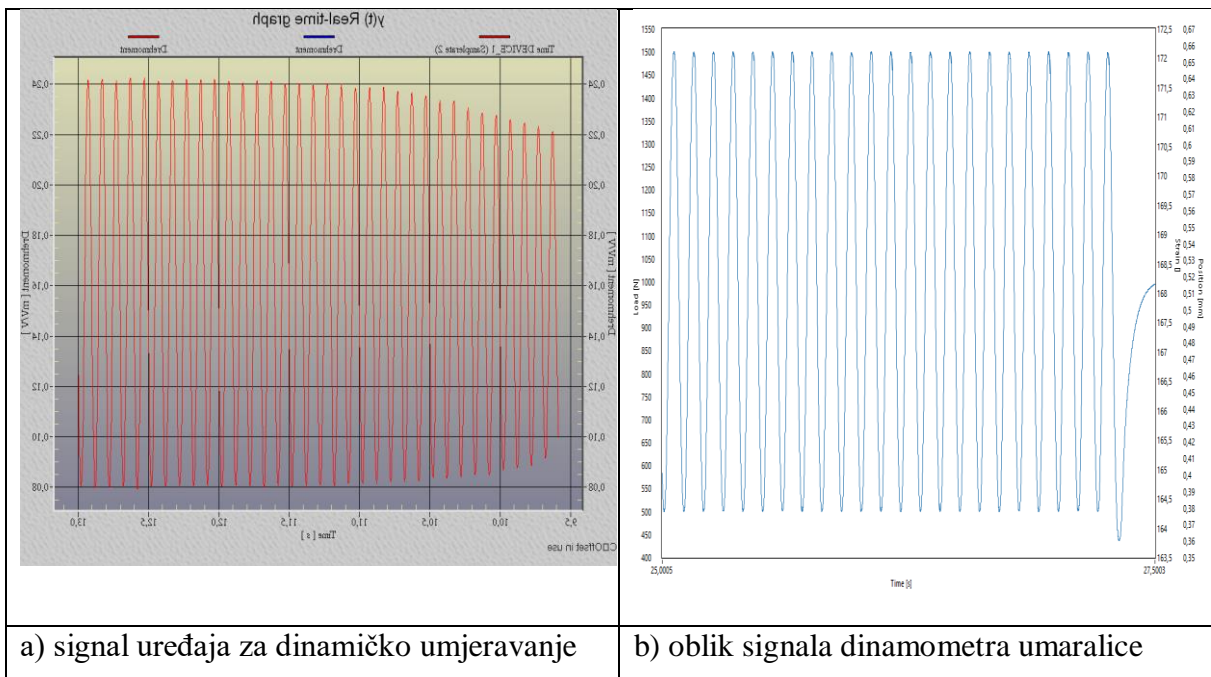
Raspon sila odabran za ovu umaralicu je od 0,5 do 1,5 kN, ali kako je prije navedeno pratit će se samo gornja vrijednost. Frekvencije na kojima će se pratiti podaci su kako slijedi: 3, 5, 10, 15 i 20 Hz. Prije rezultata biti će prikazane slike (slika 31., 32., 33., 34., 35.) signala dobivenih preko mjernog pojačala umaralice i uređaja za dinamičko kalibriranje, za svaku frekvenciju.



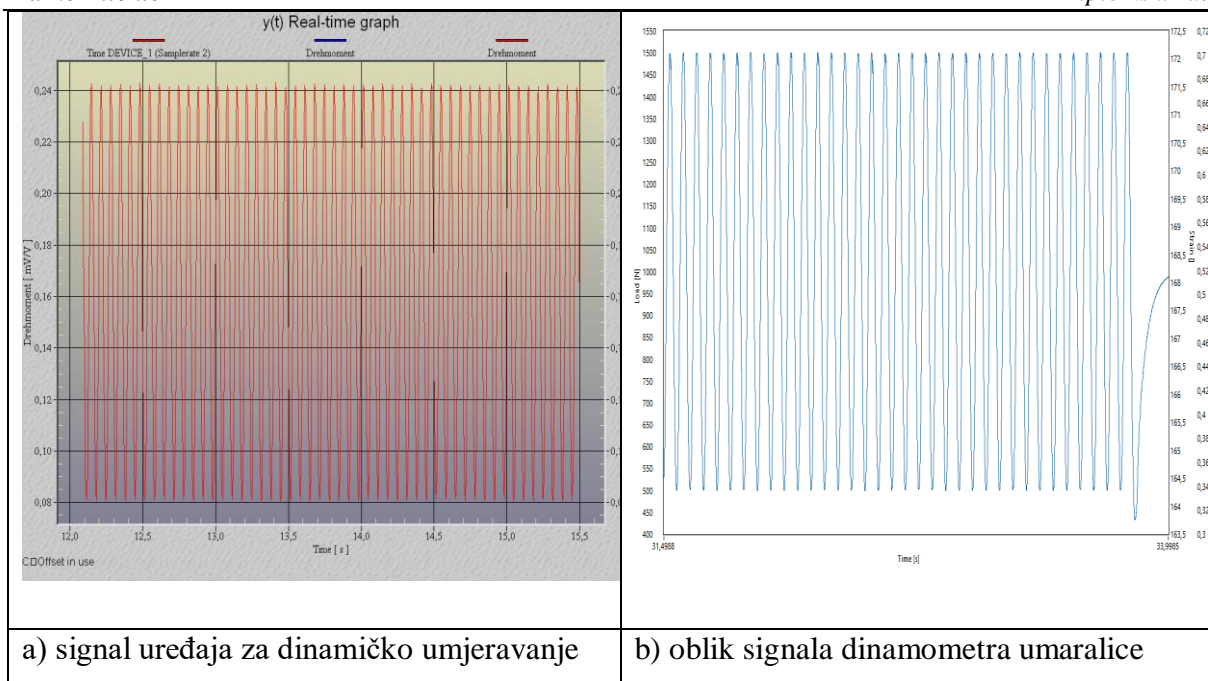
Slika 31. Oblik signala pri frekvenciji 3 Hz (slika preuzeta iz programa CATMAN V5)



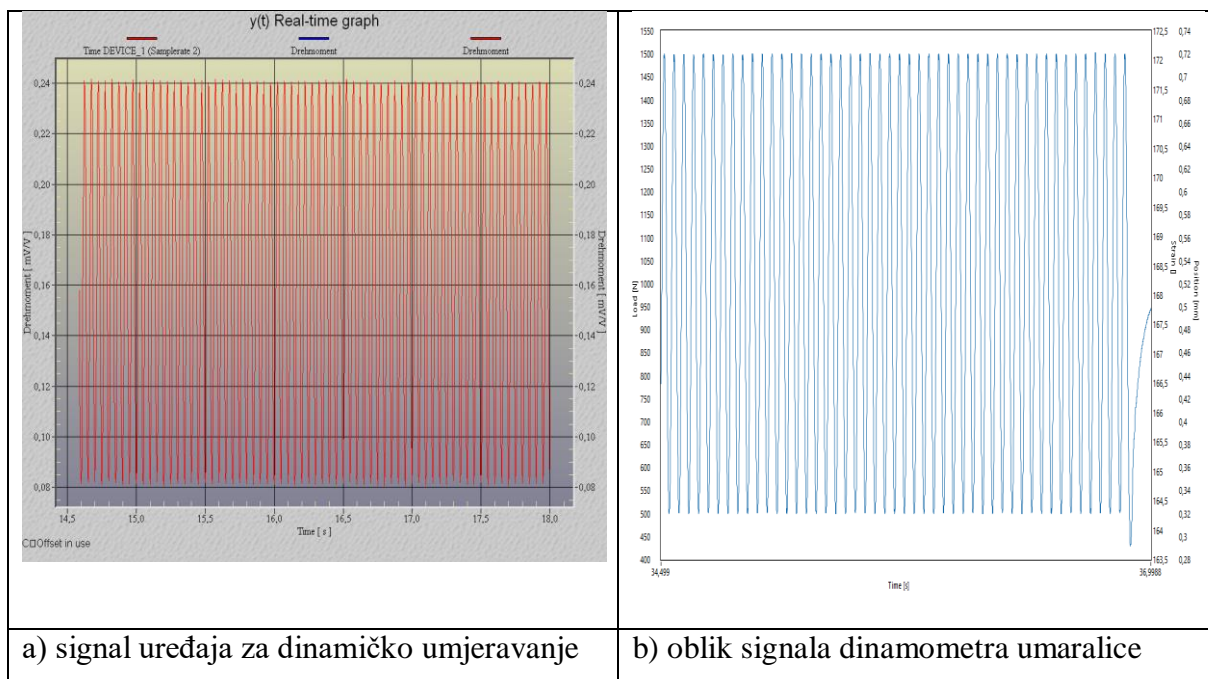
Slika 32. Oblik signala pri frekvenciji 5 Hz (slika preuzeta iz programa CATMAN V5)



Slika 33. Oblik signala pri frekvenciji 5 Hz (slika preuzeta iz programa CATMAN V5)



Slika 34. Oblik signala pri frekvenciji 15 Hz (slika preuzeta iz programa CATMAN V5)



Slika 35. Oblik signala pri frekvenciji 20 Hz (slika preuzeta iz programa CATMAN V5)

Vidljivo je kako se grafovi referentnog dinamometra i grafovi dinamometra umaralice razlikuju u ovisnosti o frekvenciji. Međutim ono što im je zajedničko svakako je raspon opterećenja, uvijek je isti bez obzira na frekvenciju. Tablica 5. prikazuje vrijednosti inducirane i stvarne sile te pogrešku, za svaku frekvenciju.

Tablica 5. Vrijednosti inducirane i stvarne sile te pogreška

Frekvencija	Očitanje na dinamometru umaralice	Očitanje na referentnom dinamometru	Pogreška
Hz	kN	kN	%
3	1,49726	1,47469	-1,53
5	1,49850	1,46313	-2,41
10	1,49991	1,47353	-1,7
15	1,44985	1,46525	1,05
20	1,50134	1,470683	-2,08

Za svaku frekvenciju odrađena su tri uzastopna mjerenja. Opterećenja koja su očitavana iz podataka nalaze se u jedinici mV/V. Ono što je bilo potrebno napraviti je pretvorba mV/V u kN. Ta pretvorba izvršila se uz pomoć polinoma trećeg stupnja, čija formula glasi:

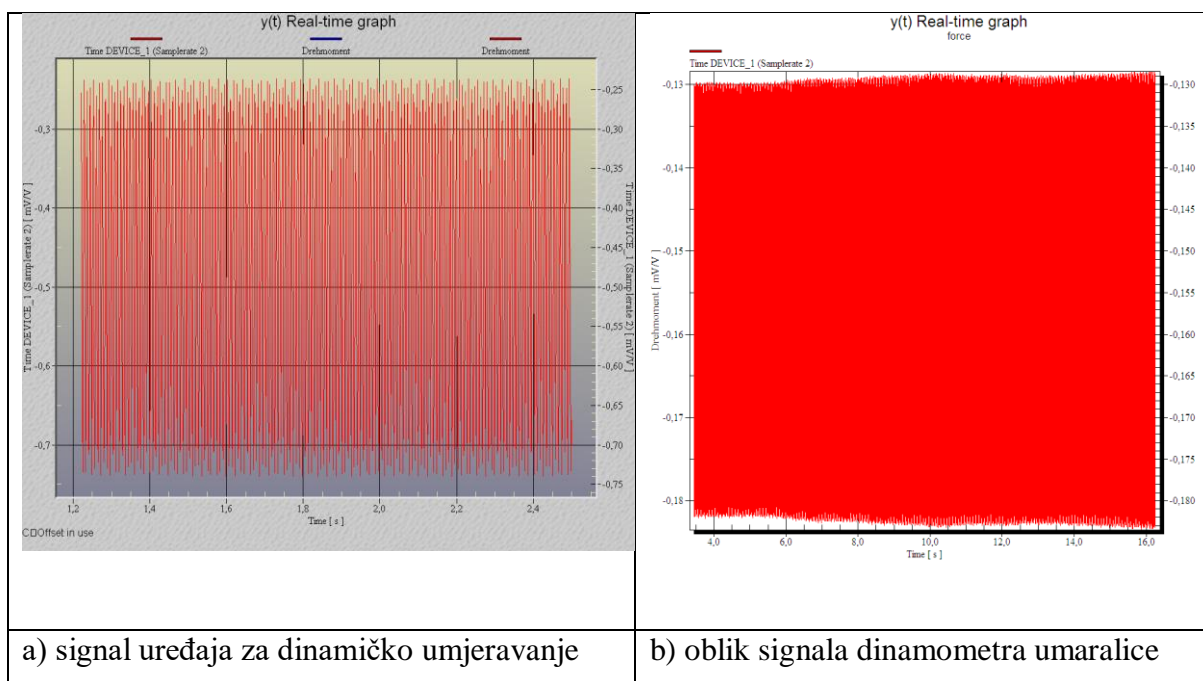
$$F (kN) = 6,0570176622x + 0,080683748411x^2 - 0,021859072464x^3,$$

gdje x predstavlja vrijednost očitavanja u mV/V. Nakon pretvorbi jedinica, odabiru se vrijednosti očitavanja u određenom trenutku te se uspoređuju razlike između inducirane i stvarne sile, za svaku frekvenciju. U tablici 5 su prikazane samo srednje vrijednosti očitavanja.

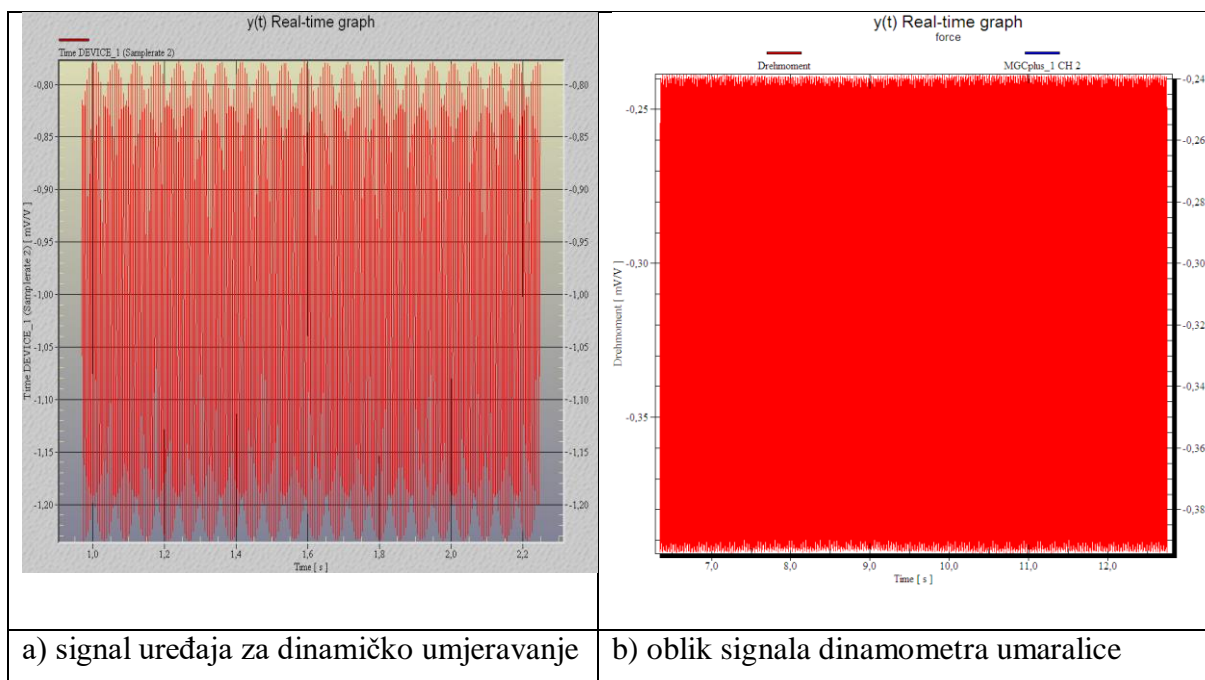
4.5.2.2. Provedba norme ISO 4965-1:2012 – Visokofrekventna umaralica AMSLER

Kod ispitivanja ove umaralice također postoje dva dinamometra međutim sama umaralica ne posjeduje vlastito mjerno pojačalo pa su se kod ispitivanja koristila dva pojačala. Jedno pojačalo je korišteno i kod ispitivanja prve umaralice, dok drugo pojačalo nije. Problem drugog pojačala je nemogućnost registriranja podataka frekvencije iznad 100 Hz. Kod umaralice STEPLAB UD08, frekvencija po kojoj će se dinamički opterećivati jednostavno se zadaje u softverskom programu. Kod umaralice AMSLER takav način nije moguć, obzirom da je riječ o umaralici starije godine proizvodnje. Način na koji se mijenja frekvencija opterećivanja kod ove vrste umaralice je dodavanje utega na samu umaralicu. U prvom ispitivanju frekvencija je bila 116 Hz sa masom utega u iznosu 80 kg. Ta vrijednost frekvencije izračunata je uz pomoć brojača

koji se nalazi na kontrolnom panelu umaralice te uz pomoć štoperice. Dakle pritiskom na štopericu kreće vrijeme, isto tako zabilježava se vrijednost na brojaču umaralice u tom trenutku. Nakon što prođe točno jedna minuta vrijeme se zaustavlja te se bilježi vrijednost koja je vidljiva na brojaču. Dvije vrijednosti brojača (krajnja i početna) se oduzmu te se taj iznos podijeli sa 60 (broj sekundi u jednoj minuti). Konačna vrijednost dijeljenja je frekvencija kojom se opterećuje. Dakle, izračunom postignute su frekvencije od 116 Hz te u drugom mjerenju 156 Hz (skok od 40 Hz postignut je uklanjanjem utega mase 40 kg). Kod starijih tipova umaralica za dobivanje kvalitetnih rezultata obavezno je predopterećenje. U slučaju sa 116 Hz predopterećenje umaralice je iznosilo 3 kN, dok je u drugom slučaju (frekvencija 156 Hz) predopterećenje iznosilo 3,2 kN. Kao i u slučaju prve umaralice tako su i ovdje podaci koji su iščitavani bili u jedinici mV/V. Ono što je odrađeno je pretvorba mV/V u kN pomoću već navedenog polinoma. U tablici 5. prikazani su podaci sile očitane na uređaju za dinamičko umjeravanje te vrijednosti sile očitane sa dinamometra umaralice. Za svaku frekvenciju odrađena su tri uzastopna mjerenja. Prije rezultata biti će prikazane slike (slika 36. i 37.) signala dobivenih preko mjernog pojačala umaralice i uređaja za dinamičko umjeravanje, za svaku frekvenciju. . Treba napomenuti da su ovdje primjene i različite gornje sile (10 kN za frekvenciju 116 Hz te 20 kN za frekvenciju 156 Hz).



Slika 36. Oblik signala pri frekvenciji 116 Hz (slika preuzeta iz programa CATMAN V5)



a) signal uređaja za dinamičko umjeravanje

b) oblik signala dinamometra umaralice

Slika 37. Oblik signala pri frekvenciji 116 Hz (slika preuzeta iz programa CATMAN V5)

U tablici 6. su prikazane samo srednje vrijednosti očitanih sila.

Tablica 6. Sile očitane na uređaju za dinamičko umjeravanje te vrijednosti sile očitane sa dinamometra umaralice

Frekvencija	Očitavanje na uređaju za dinamičko umjeravanje	Očitavanje na dinamometru umaralice	Pogreška
Hz	kN	kN	%
116	10,46372	10,97638	-4,8
156	23,54731	23,86124	-1,3

Iz tablice 6. vidljivo je da se radi o pogreškama koje dosežu odstupanja do skoro 5% između referentne i stvarne vrijednosti gornje sile.

5. ANALIZA I OBRADA PODATAKA

U ovom poglavlju obraditi će se podaci prikupljeni iz ispitivanja kako bi se mogao donijeti kvalitetan i smislen zaključak.

5.1 Analiza i obrada podataka norme HRN EN ISO 7500-1:2018

Provedba norme HRN EN ISO 7500-1:2018 dala je informacije o klasi točnosti umaralice pri statičkom opterećenju. Uz pogrešku, sada će se prikazati i vrijednosti histereze te ponovljivosti.

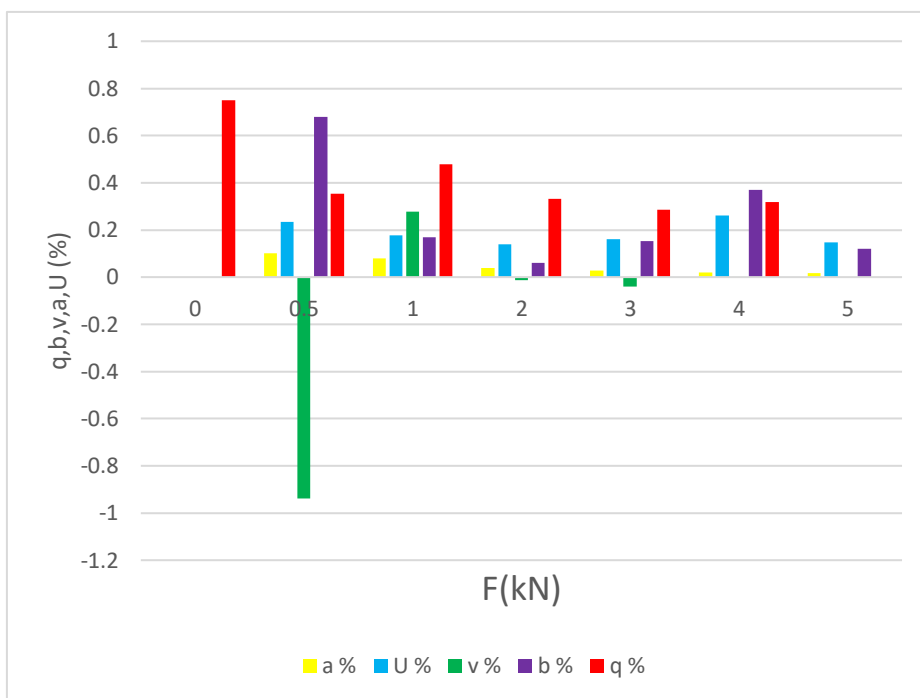
5.1.1. Analiza i obrada podataka norme HRN EN ISO 7500-1:2018 – Pneumatska umaralica STEPLAB UD08

Tablica 6. prikazuje podatke dobivene provedbom ispitivanja po normi HRN EN ISO 7500-1:2018 na pneumatskoj umaralici.

Tablica 7. Podaci dobivene provedbom ispitivanja po normi HRN EN ISO 7500-1:2018 na pneumatskoj umaralici

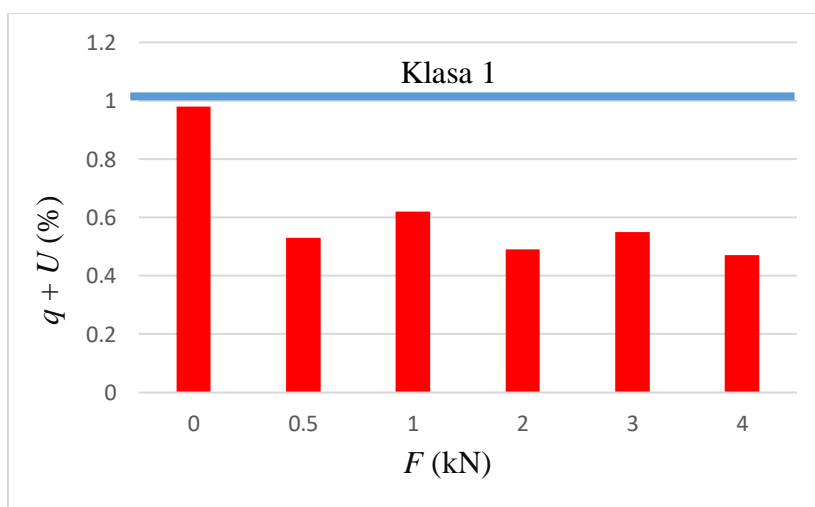
F_i	X_{sr}	q	b	v	a	U	
kN	mV/V	%	%	%	%	%	KLASA
0	0,00000	/	/	-	/	/	/
0,5	0,08072	0,75	0,68	-0,94	0,10	0,23	1,0
1	0,16213	0,35	0,17	0,28	0,08	0,18	1,0
2	0,32401	0,48	0,06	-0,01	0,04	0,14	1,0
3	0,48692	0,33	0,15	-0,04	0,03	0,16	0,5
4	0,64976	0,29	0,37	0,00	0,02	0,26	1,0
5	0,81220	0,32	0,12	-	0,02	0,15	0,5

Vidljivo je kako po podacima ova pneumatska umaralica po normi HRN EN ISO 7500-1:2018 upada u klasu 1,5, jer je barem jedna vrijednost ($q + U$) iznosila manje od 1%. Suma $q + U$ označava sumu mjerne pogreške i proširene mjerne nesigurnosti. Također valja primjetiti kako su vrijednosti pogreške ponovljivosti relativno niske što je svakako pozitivna činjenica. Vrijednosti histereze također nisu značajno visoke. Slika 38. prikazuje ovisnost parametara q , b , v , a i U o sili F .



Slika 38. Dijagramski prikaz vrijednosti parametara q, b, v, a i U o sili F za visokofrekventnu umaralicu

Na grafu 1. vidljivo je kako niti jedna individualna vrijednost koja se nalazi na ordinati ne prelazi iznos od 1%. Ono što je bitno je provjeriti vrijednosti sume $q + U$. Ta suma u ovisnosti o svom iznosu kazuje o kojem razredu točnosti se radi. Suma $q + U$ u ovisnosti o sili prikazana je na slici 39.



Slika 39. Suma $q + U$ u ovisnosti o sili

Pri svim vrijednostima sile, suma $q + U$ ne prelazi iznos 1, što znači da se radi o točnosti klase 1 za statičke uvjete. Važno je napomenuti da je umjeravanje provedeno bez originalnih naprava za provedbu umjeravanja kako je definirano normom HRN EN ISO 376:2012 pa stoga dolazi do velikog utjecaja prihvata na rezultate. To se vidi po povećanim odstupanjima pri malim silama. Uz primjenu originalnih naprava bi i klasifikacija bila bolja odnosno umaralica bi kroz cijelo mjerno područje mogla biti u klasi 0,5 kao što ju je i proizvođač umaralice deklarirao.

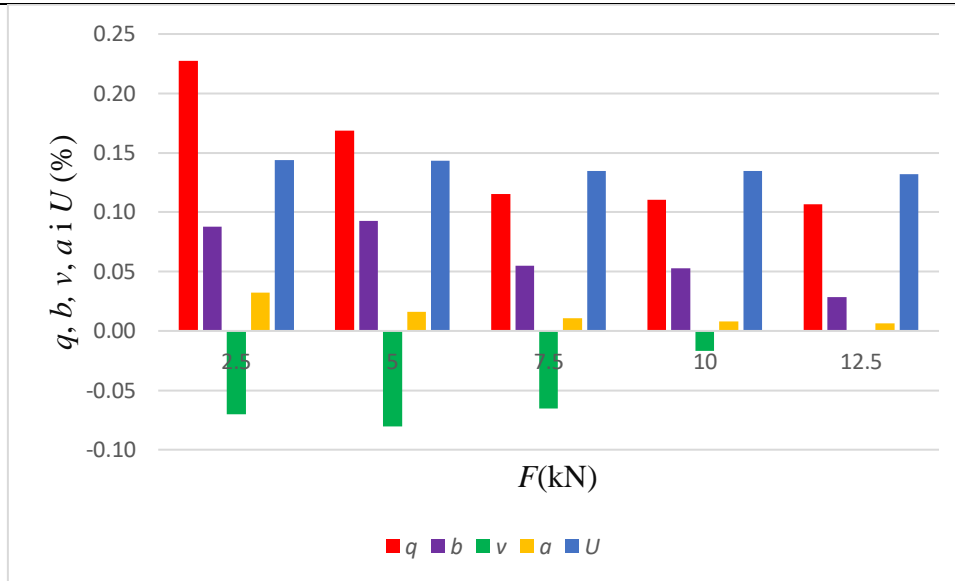
5.1.2. Analiza i obrada podataka norme HRN EN ISO 7500-1:2018 – Visokofrekventna umaralica AMSLER

Tablica 8. prikazuje podatke dobivene provedbom ispitivanja po normi HRN EN ISO 7500-1:2018 na visokofrekventnoj umaralici, dok slika 40. prikazuje dobivene parametre q , b , v , a i U o sili F za pojedine vrijednosti sila.

Tablica 8. Podaci dobiveni provedbom ispitivanja po normi HRN EN ISO 7500-1:2018 na visokofrekventnoj umaralici

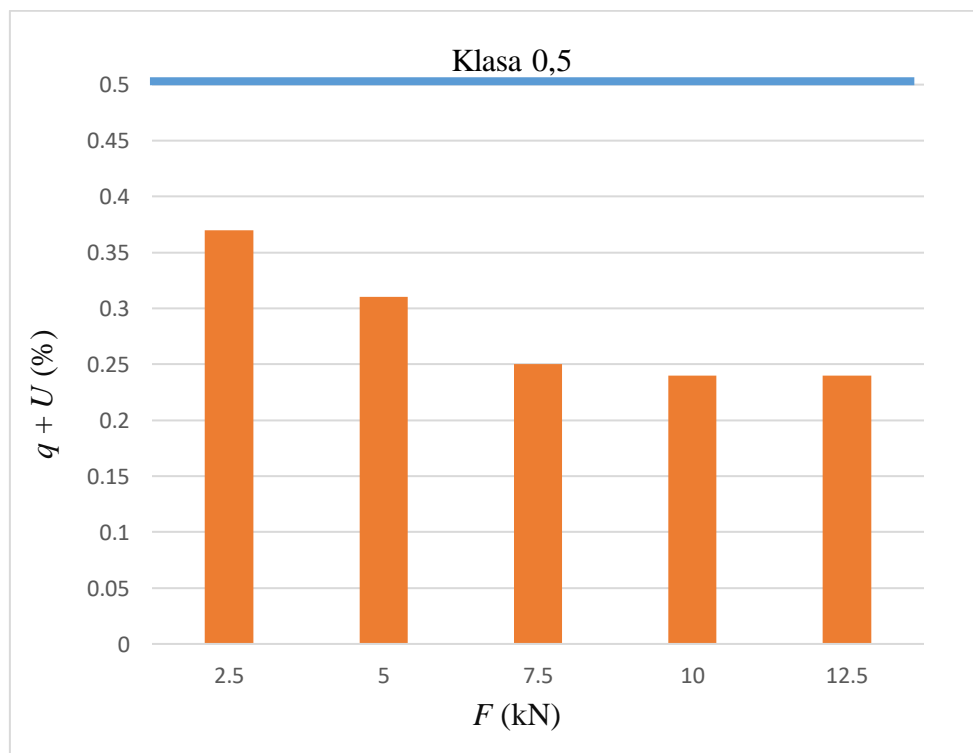
$F_{(i)}$	X_{sr}	q	b	v	a	U	
kN	mV/V	%	%	%	%	%	KLASA
0	0,00000	/	/	/	/	/	/
2,5	-0,40718	0,23	0,09	-0,07	0,03	0,14	0,5
5	-0,81511	0,17	0,09	-0,08	0,02	0,14	0,5
7,5	-1,22355	0,12	0,06	-0,07	0,01	0,13	0,5
10	-1,63156	0,11	0,05	-0,02	0,01	0,13	0,5
12,5	-2,03935	0,11	0,03	-	0,01	0,13	0,5

Iz tablice je vidljivo kako su vrijednosti mjerne pogreške, ponovljivosti i pogreške histereze relativno niske, što svakako upućuje na visoku točnost u statičkim uvjetima.



Slika 40. Dijagramski prikaz vrijednosti parametara q , b , v , a i U o sili F za visokofrekventnu umaralicu

U ovom slučaju da se zaključiti kako niti jedna individualna vrijednost ne prelazi 0,5%, bez obzira radi li se o pozitivnom ili negativnom iznosu. Na slici 41. je prikazan graf ovisnosti promjene sume mjerne pogreške i proširene mjerne nesigurnosti za pojedinu vrijednost sile.



Slika 41. Suma $q + U$ u ovisnosti o sili

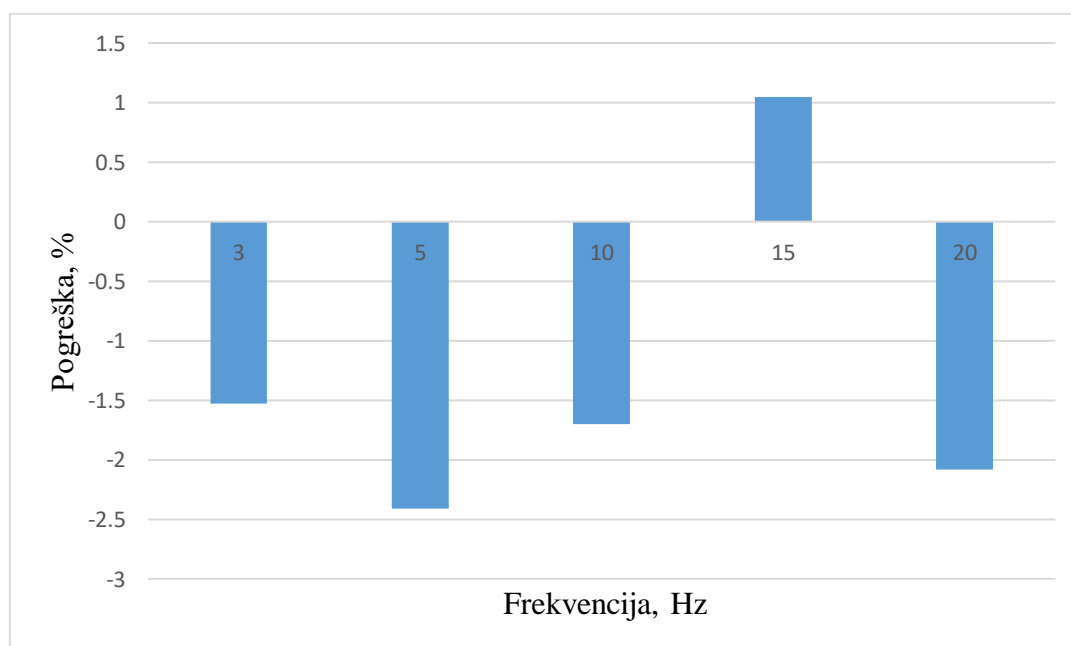
Suma mjerne pogreške i proširene mjerne nesigurnosti ni u jednom slučaju sile ne prelazi iznos 0,5, što znači da se radi o klasi 0,5 za statičke uvjete. Potrebno je napomenuti da je smjer opterećenja tlačni što ne zahtijeva dodatne prihvatne naprave kao kod vlačnog smjera opterećivanja te su i vrijednosti pogrešaka kod nižih sila manje u odnosu na sustav STEPLAB UD08 pa je i sama klasifikacija boljeg stupnja. Iz ove analize je vidljivo da kod statičkih umjeravanja dinamičkih sustava veliku ulogu mogu igrati smjer opterećenja, načini slaganja prihvatnih naprava kao i sama konstrukcija sustava.

5.2. Analiza i obrada podataka norme ISO 4965-1:2012

Podaci koji su iščitani prilikom provedbe norme ISO 4965-1:2012 dani su u poglavlju 4.4.2. Potrebno je osvrnuti se na veliku razliku između mjernih pogreški u statičkim i dinamičkim uvjetima kod obje umaralice.

5.2.1. Analiza i obrada podataka norme ISO 4965-1:2012 – Pneumatska umaralica STEPLAB UD08

U statičkim uvjetima vrijednost mjerne pogreške za 3 ispitivanja nije iznosila više od 0,6 %, dok u dinamičkim uvjetima ta pogreška doseže i do 2,5% kod vršnih opterećenja. Sama ta činjenica upućuje da umaralica STEPLAB UD08 ne pripada istoj klasi točnosti za statičke i za dinamičke uvjete opterećenja. Slika 42. prikazuje ovisnost vrijednosti pogreški o frekvenciji.



Slika 42. Ovisnost vrijednosti pogreški o frekvenciji

Pri manjim silama manja su odstupanja između referentnog dinamometra i dinamometra od umaralice za sve frekvencije. Također, iz slike 42. vidljivo je kako je najmanja pogreška nastala pri najmanjoj frekvenciji. Ovdje se postavlja pitanje zašto su odstupanja pri dinamičkom ispitivanju veća. Jedan od osnovnih problema je krutost cijelog sustava umjeravanja što ovdje nije bilo moguće osigurati jer to zahtijeva cijeli dodatni ustroj koji bi morao biti prilagođen konstrukciji umaralice. Nažalost to zahtijeva dodatne investicije i preinake na samoj umaralici. Neki primjeri takvih ustoja mogu se naći u literaturnim izvorima ali su jako ovisni o konstrukciji umaralice pa je teško definirati i kvantificirati njihov utjecaj što je jako bitno za procjenu i proračun mjerne nesigurnosti umjeravanja. Također bilo bi potrebno prije provesti određeno usklađivanje u pojedinim područjima frekvencije što je opisano u poglavlju 4.

5.2.2. Analiza i obrada podataka norme ISO 4965-1:2012 – Visokofrekventna umaralica AMSLER

Kod visokofrekventne umaralice AMSLER razlika u mjernim pogreškama između statičkih i dinamičkih uvjeta opterećenja je još drastičnija. U statičkim uvjetima vrijednost mjerne pogreške nije prelazila 0,5% dok u dinamičkim uvjetima ta vrijednost doseže gotovo 5%. Jedan od razloga tome može biti neprikladnost mjernog pojačala čiji je raspon praćenja signala do 100 Hz, a oba izvršena mjerenja bila na frekvencijama iznad 100 Hz (116 i 156 Hz). Isto kao i pneumatska umaralica, visokofrekventna umaralica AMSLER pokazuje različite klase točnosti u statičkim i dinamičkim uvjetima ispitivanja.

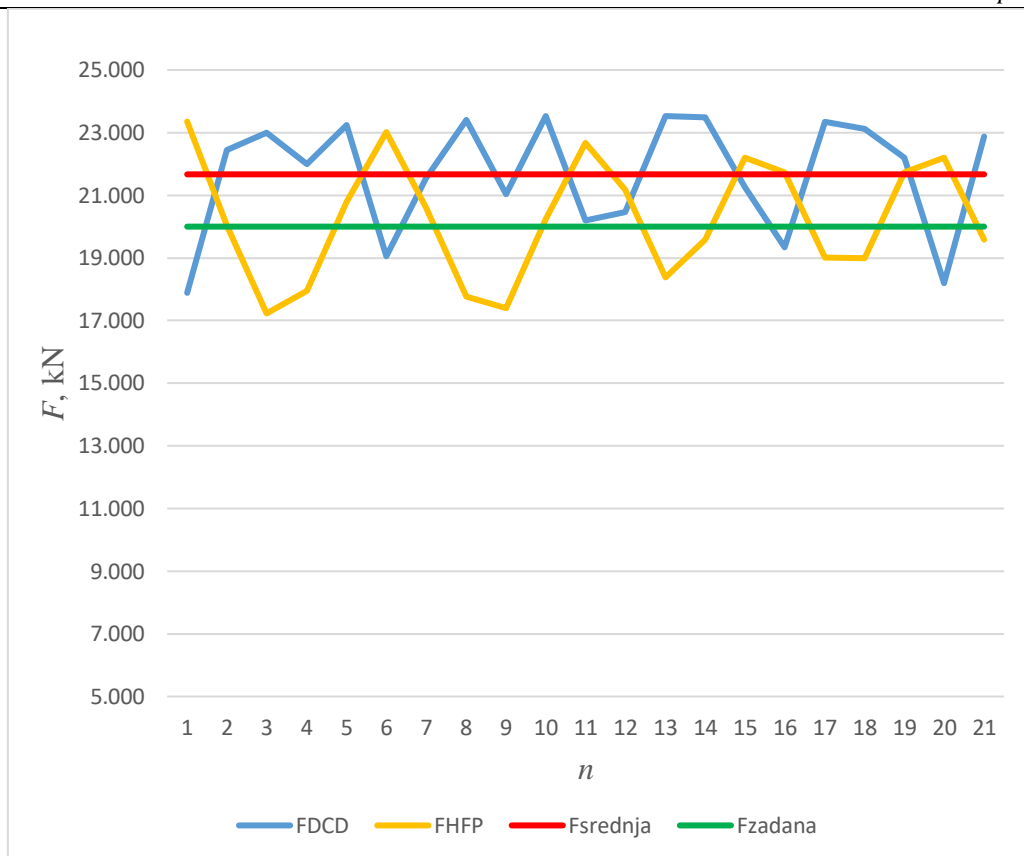
5.2.2.1. Analiza i obrada podataka norme ISO 4965-1:2012 – Visokofrekventna umaralica AMSLER – 116 Hz

Kao što je naglašeno već prije, ispitivanje uz frekvenciju 116 Hz podrazumijeva utege mase 40 kg kojima je opterećena umaralica. Tablica 9. prikazuje podatke o sili očitanoj na dinamometru umaralice, sili očitanoj na referentnom dinamometru te o mjernoj pogrešci. Postavljeno opterećenje je 20 kN

Tablica 9. Podaci o mjernoj pogrešci i očitanih sila

Redni broj, n	F_{DCD} , kN	F_{HFP} , kN	q , %
1.	17,886	23,352	-30,56
2.	22,437	20,043	10,67
3.	23,007	17,230	25,11
4.	21,990	17,957	18,34
5.	23,240	20,785	10,56
6.	19,049	23,010	-20,79
7.	21,542	20,603	4,36
8.	23,410	17,775	24,07
9.	21,032	17,404	17,25
10.	23,529	20,239	13,98
11.	20,200	22,676	-12,25
12.	20,473	21,185	-3,47
13.	23,527	18,371	21,91
14.	23,488	19,592	16,59
15.	21,263	22,210	-4,45
16.	19,331	21,738	-12,45
17.	23,348	19,003	18,61
18.	23,127	18,996	17,86
19.	22,192	21,723	2,11
20.	18,204	22,196	-21,93
21.	22,875	19,585	14,38
Srednja vrijednost sile	21,67	20,27	
Minimalna vrijednost sile	17,886	17,230	
Maksimalna vrijednost sile	23,529	23,010	

Slika 43. prikazuje kretanje iznosa sile očitane na referentnom dinamometru i dinamometru umaralice u ovisnosti o broju mjerenja.



Slika 43. Kretanje iznosa sile očitane na referentnom dinamometru i dinamometru umaralice kroz određeni broj mjerenja gornjih sila

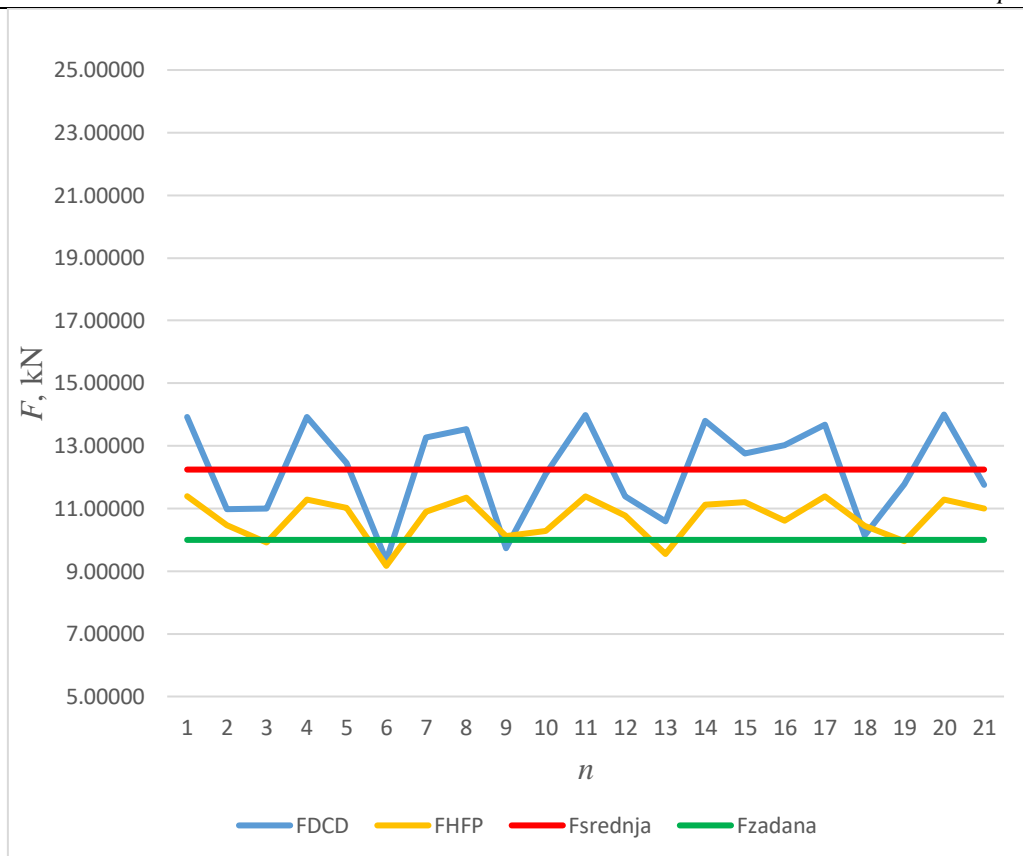
Sa slike 43. može se zaključiti kako je srednja vrijednost oba dinamometra iznad vrijednosti zadane sile. U većini mjerenja sile očitavane na referentnom dinamometru su veće vrijednosti nego li sile očitane na dinamometru umaralice. To dovodi do poticaja na sumnju u točnost same umaralice i bez računanja pogreške.

5.2.2.2 Analiza i obrada podataka norme ISO 4965-1:2012 – Visokofrekventna umaralica AMSLER – 116 Hz

Za frekvenciju u iznosu 156 Hz dana je tablica rezultata mjerenja (tablica 10.), a na slici 44. biti će prikazano kretanje iznosa sile očitane na referentnom dinamometru i dinamometru umaralice u ovisnosti o broju mjerenja.

Tablica 10. Podaci o mjernoj pogrešci i očitanim silama

	F_{DCD} , kN	F_{HFP} , kN	q , %
1.	13,92327	11,39368	18,17
2.	10,97638	10,46372	4,67
3.	11,00009114	9,926125	9,76
4.	13,91498873	11,2847	18,90
5.	12,46078167	11,01588	11,60
6.	9,342926447	9,170629	1,84
7.	13,27902573	10,89963	17,92
8.	13,52761119	11,35009	16,10
9.	9,728836263	10,12954	-4,12
10.	12,10922271	10,2821	15,09
11.	13,98535106	11,37915	18,64
12.	11,38103854	10,76886	5,38
13.	10,59419913	9,555635	9,80
14.	13,80234767	11,11759	19,45
15.	12,76511645	11,20478	12,22
16.	13,02683991	10,61629	18,50
17.	13,6846693	11,38642	16,79
18.	10,13300112	10,44193	-3,05
19.	11,76914373	9,947919	15,47
20.	14,0017814	11,29196	19,35
21.	11,74933495	11,00861	6,30
Srednja vrijednost sile	12,24552	10,69692	11,85
Minimalna vrijednost sile	9,34293	9,17063	-4,11869
Maksimalna vrijednost sile	14,00178	11,38642	19,45144



Slika 44. Kretanje iznosa sile očitane na referentnom dinamometru i dinamometru umaralice u ovisnosti o broju mjerenja

Samim pogledom na sliku 44. vidljivo je kako u slučaju 156 Hz postoje manja odstupanja nego li je to bio slučaj kod 116 Hz ali su također jako velika i jako osciliraju s obzirom na zadanu vrijednost. Opet, vrijednost očitavanja na referentnom dinamometru dosta odskače od zadane sile, što opet ukazuje na postojanje velikih iznosa pogreški. Također se uočava velika nestabilnost tijekom dinamičkog umjeravanja a ona se dosta odražava na referentni etalon a to primjećujemo kroz odstupanje pokazane vrijednosti na referentnom dinamometru od zadane vrijednosti sile. U svakom slučaju i ovdje možemo ustanoviti iste probleme kao i kod pneumatske umaralice s tim da je to kod visokofrekventnih umaralica još izraženije.

6. ZAKLJUČAK

Sva oprema koja služi za provedbu ispitivanja mehaničkih svojstava materijala podložna je periodičkim provjerama i umjeravanjima kako bi se postiglo povjerenje u njenu ispravnost te točnost pokazivanja. Tijekom istraživanja provedenih u ovom radu uočeno je da su umjeravanja dinamički opterećenih sustava mnogo složenija s velikim brojem utjecajnih veličina čije definiranje i kvantifikacija još uvijek nije na razini umjeravanja statički opterećenih sustava. Na temelju dobivenih rezultata umjeravanja dvije umaralice s različitim sustavima opterećivanja te provedene analize doneseni su sljedeći zaključci.

- Umjeravanja umaralice za veličinu sila sukladno normi HRN EN ISO 7500-1:2018 i ISO 4965-1:2012 su potpuno različite i pokazuje se da rezultati dobiveni statičkim umjeravanjem nisu pravi pokazatelj stanja i točnosti dinamički opterećenih sustava, u ovom slučaju umaralice.
- Za razliku od norme HRN EN ISO 7500-1:2018, gdje je jasno definiran način, procedura, parametri ocjene, klasifikacija te model procjene i proračuna mjerne nesigurnosti, pri umjeravanju sukladno normi ISO 4965-1:2012 većina toga nije u potpunosti ili nije uopće definirano. Ovo dovodi do različitih načina pristupa postupku umjeravanja umaralice što često ovisi i o načinu opterećivanja te primijenjenoj frekvenciji, pa se stoga javljaju različiti modeli umjeravanja koji stvaraju problem normizaciji procesa umjeravanja.
- Na temelju provedene analize osim načina opterećivanja i frekvencije kao utjecajnih faktora tu se pojavljuje kao veliki utjecaj krutost sustava koja stvara nesigurnosti kako na sustav očitavanja umaralice tako i na umjerni sustav što se jako odražava na rezultate umjeravanja i njihovu pouzdanost.
- Norma ISO 4965-1:2012 nema jasnu indentifikaciju svih utjecajnih izvora nesigurnosti na proces umjeravanja umaralice ili općenito dinamičkih sustava mjerenja mehaničkih svojstava materijala. Iz ovoga slijedi da ne postoji ni odgovarajući model za procjenu i proračun mjerne nesigurnosti umjeravanja umaralice što se odražava na mjerne rezultate ispitivanja dinamičke izdržljivosti i njihovu pouzdanost.

7. LITERATURA

- [1] <https://metallurgyandmaterials.wordpress.com/2015/12/25/liberty-ship-failures/>, pristupano 13.10.2024.
- [2] <https://www.tcradvanced.com/material-testing.html>, pristupano 14.10.2024.
- [3] <https://proinstal.hr/ispitivanje-bez-razaranja/>, pristupano 14.10.2024.
- [4] <https://yellshops.com/proizvod/merni-alat-za-ispitivanje-tvrdoce-met/>, pristupano 14.10.2024.
- [5] <https://tehnicki.lzmk.hr/clanak/umor-materijala>, pristupano 16.10.2024.
- [6] https://ag2019-2020.e-ucenje.unipu.hr/pluginfile.php/106117/mod_folder/content/0/Predavanja/7%20Umor%20materijala.pdf?forcedownload=1, pristupano 16.10.2024.
- [7] https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-84927-6_13
- [8] "Mechanics of Materials", Beer Ferdinand P., E. Russell Johnston, Jr., 1992.
- [9] Det Norske Veritasa, Classification Notes No.30.7 „Fatigue Assessment of Ship Structures“, February 2003.
- [10] Prof.dr.sc. Danko Ćorić, Prof.dr.sc. Željko Alar „ODABRANA POGLAVLJA IZ MEHANIČKIH SVOJSTAVA MATERIJALA - Predavanja - ak. god. 2016./17.
- [11] Bhadeliya A, Rehmer B, Fedelich B, Jokisch T, Skrotzki B, Olbricht J. Fatigue and fracture in dual-material specimens of nickel-based alloys fabricated by hybrid additive manufacturing. *Journal of Materials Research and Technology*. 2024;32(100):3737-3749. doi: doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.08.211
- [12] Vaishya M. and Houser D. R. (2000) Modelling and Analysis of Sliding Friction in Gears Dynamics, Proc. of DETC00 ASME 2000 Design Engineering Technical Conference and Computers and Information in Engineering Conference, Sept 10-13, Baltimore, Maryland
- [13] https://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/iss/kap_9/advanced/a9_1_2.html, pristupano 18.10.2024.
- [14] Gao J, Tang Z, Guo B, et al. Study of cracks in the last-stage rotor blade of a steam turbine and the corrosion fatigue properties of its materials. *Heliyon*. 2024;10(17):e36633-e36633. doi: doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36633
- [15] <https://www.aeroexpo.online/prod/zwick-gmbh-co-kg/product-182711-27274.html>, pristupano 19.10.2024.
- [16] <https://www.tescaglobal.com/blog/fatigue-testing-machine-types-suppliers/>, pristupano 19.10.2024.

- [17] <https://www.jfe-tec.co.jp/en/tech-consul/fatigue13.html>, pristupano 19.10.2024.
- [18] DING X, HUANG D, GUO Z, et al. Experimental investigations on combined high and low cycle fatigue: Material-level specimen design and strain response characteristics. *Chinese Journal of Aeronautics*. Published online September 2024. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cja.2024.09.022>
- [19] <https://www.instron.com/en/products/testing-systems/dynamic-and-fatigue-systems/high-temp-fatigue-testing-systems/lcf>, pristupano 20.10.2024.
- [20] L.A. Gonçalves, S. Jiménez, Cornejo A, Tedesco MM, Barbu LG. A high cycle fatigue numerical framework for component-level virtual fatigue testing: Application to a light-duty vehicle lower control arm. *Engineering Structures*. 2024;311:118198-118198. doi:<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118198>
- [21] <https://www.semanticscholar.org/paper/QT-steel-very-high-cycle-fatigue-testing-with-Mekaniikka-Korhonen/a35205473e289bf5a40220043f17d9ded75e80a1>, pristupano 21.10.2024.
- [22] Håkansson J, Zhu J, Barsoum I, Khurshid M. Fatigue strength assessment of cover plate joints subjected to axial and bending loading. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2023;46(5):1947-1968. doi:<https://doi.org/10.1111/ffe.13975>
- [23] https://www.utmchina.net/Fatigue_testing_machine/1522.html, pristupano 22.10.2024.
- [24] Xie J, Zhan Y, Wang Y. Analysis of a Methodology for Torsional Test under Normal Stress and Shear Performance for Asphalt Mixtures. *Advances in Civil Engineering*. 2019;2019:e7319379. doi:<https://doi.org/10.1155/2019/7319379>
- [25] <https://www.blum-novotest.com/us/products/test-engineering/drive-shaft-test-stands/torsional-fatigue/>, pristupano 22.10.2024.
- [26] Kamal MB, Oery T, Taruvai Sankaran R, Nesarikar AS. Simulation and Test Correlation of Wheel Radial Fatigue Test. *SAE Technical Paper Series*. Published online April 8, 2013. doi:<https://doi.org/10.4271/2013-01-1198>
- [27] <https://lmcworkholding.com/products/wheel-machines/wheel-testing-equipment/rrh-radial-fatigue-test/?L=0>, pristupano 22.10.2024.
- [28] https://mingo.gov.hr/UserDocsImages/NASLOVNE%20FOTOGRAFIJE%20I%20KORI%20C%20A0TENI%20LOGOTIPOVI/doc/uputa_za_procjenu_nesigurnosti.pdf, pristupano 23.10.2024.
- [29] http://www.phy.pmf.unizg.hr/~pzugec/FP/obrada_rezultata.pdf, pristupano 23.10.2024.
- [30] <https://www.aicompanies.com/education-training/knowledge-center/what-is-calibration/>, pristupano 23.10.2024.

-
- [31] Prof. dr. sc. Biserka Runje, Podloge za predavanja, ak. god. 2020./21.
- [32] https://step-lab.com/wp-content/uploads/2023/03/CatalogoMacchine_steplab-web.pdf
- [33] <https://usetronic.de/en/products/mj568-measuring-amplifier-system-hbm-ab12-mgc-bl01-03-mc55-ap01>
- [34] https://promarchive.ru/en/catalog/detection_-_measurement/inspection_and_monitoring/signal_conditioners/measurement_amplifier_digital_high-accuracy_-_225_hz_dmp40/
- [35] GEORGAKOPOULOS, D., WILLIAMS, J., KNOTT, A., ESWARD, T. and WRIGHT, P. Dynamic characterisation of the electronic instrumentation used in the calibration of fatigue testing machines. IEE Proc.- Sci. Meas. & Technol., 153 (6), pp 256-259, November 2006.
- [36] International Vocabulary of Terms in Legal Metrology (VIML), International Organization of Legal Metrology (OIML), 2013

PRILOZI

- I. CD-R disc
- II. Tehnička dokumentacija