

# Dinamične meritve pri kalibraciji sile

Oliver Avsec<sup>1</sup>, Gaber Begeš<sup>1</sup>, Miha Hiti<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, Tržaška 25, 1000 Ljubljana

<sup>2</sup>Zavod za gradbeništvo Slovenije (ZAG), Dimičeva ulica 12, 1000 Ljubljana

E-pošta: miha.hiti@zag.si

## Dynamic measurements in force calibration

**Abstract.** This study explores suitable procedures to extend the static calibration methods to dynamic conditions, for which no clear guidelines currently exist. By examining various excitation examples, measurement systems, and data acquisition methods, we aim to identify potential directions for implementing dynamic force calibration standards. Our primary objective is to evaluate the impact of dynamic conditions on measurement results, enabling the generation of comparable datasets under varying influences. Different measurement scenarios were analyzed, including various signal amplifiers, low-pass filters, sampling frequencies, and measurement channels. Signal synchronization and data processing were performed using cross-correlation, interpolation, and resampling techniques to align and refine measurements. Results indicate that synchronization and signal processing methods can significantly reduce discrepancies between datasets, even under varying dynamic conditions. This work lays the foundation for developing robust dynamic force calibration procedures.

## 1 Uvod

Postopki kalibriranja meril sile pri statičnih pogojih so že dobro definirani in uveljavljeni, dejanski pogoji uporabe merilnikov sile v praksi v industrijskem in raziskovalnem okolju pa so večinoma dinamične narave, kjer se sila spreminja s časom, npr. določanje natezne trdnosti materiala z naraščanjem natezne sile do pretrga, utrujanje materialov s sinusnim nihanjem sile, simuliranje potresnih obremenitev itd. Takšni dinamični pogoji vnesejo dodatno kompleksnost, saj je potrebno zagotoviti ustrezno časovno usklajenost meritev za praktično primerjavo in obdelavo podatkov pri kalibraciji. Časovno neuskklajeni signali vodijo v napačne izračune in nepravilne rezultate.

Ugotoviti želimo, kateri postopki bi bili primerni, da bi lahko kalibracijo merilnikov sil razširili tudi na dinamične pogoje, za katere še ni sprejetih jasnih smernic ali vodil. Z analizo različnih primerov dinamičnega vzbujanja, merilnih sistemov in metod zajema podatkov želimo identificirati potencialne smernice, ki bi lahko bile osnova za prihodnje standardizirane postopke.

Ključni cilj je oceniti vplive dinamičnih pogojev na rezultate meritev in omogočiti pridobivanje medsebojno primerljivih nizov podatkov.

## 2 Merilna oprema

Kalibracijski stroj Zwick Z600E, ki ga na Zavodu za gradbeništvo (ZAG) uporabljajo kot referenčni stroj za statične razmere za sile do 600 kN je bil uporabljen za obremenjevanje merilnega pretvornika sile HBM U10M, kapacitete 25 kN za dinamične sile in 50 kN za statične sile, slika 1. Kalibracijski stroj omogoča generiranje tlačnih in nateznih obremenitev, vendar smo se v tej raziskavi osredotočili zgolj na tlačne obremenitve.



Slika 1. Merilni pretvornik sile HBM U10M v kalibracijskem stroju Zwick Z600E

Merilni pretvornik HBM U10M ima vgrajena dva ločena merilna mostiča z dvema ločenima izhodoma, kar omogoča zajem podatkov pri enakih obremenitvenih profilih z dvema ločenima sistemoma hkrati [1]. Izhoda merilnega pretvornika sta bila povezana na modularni merilni sistem HBM MGCplus s štirimi analognimi ojačevalniki, dvema tipa HBM ML55B, enim tipa HBM ML38B in enim tipa HBM ML10B, slika 2.

Ojačevalnik HBM ML55B je ojačevalni modul s frekvenco vzbujanja mostiča 4,8 kHz in dosega razred točnosti 0.03 [2]. Tudi ojačevalnik HBM ML10B dosega razred točnosti 0.03, razlikuje se v temu, da vzbuja mostič z enosmerno napetostjo [3]. Zadnji je ojačevalnik HBM ML38B, to je visoko precizijski mostični ojačevalnik z višjim razredom točnosti 0.0025, ki je najboljši izmed treh uporabljenih ojačevalnikov [4]. Deluje na principu frekvence vzbujanja 225 Hz. Zaradi optimalne frekvence vzbujanja ima manjši šum v

primerjavi preostalima tipoma ojačevalnikov in lahko zagotovi višji razred točnosti. Zaradi nižje frekvence vzbujanja ima tudi manjšo pasovno širino, se počasneje odziva na spremembe in je namenjen predvsem zelo natančnem merjenju statičnih veličin. Za nastavitev parametrov merilnih ojačevalnikov in zajemanje podatkov smo uporabili programsko opremo HBM Catman Professional.

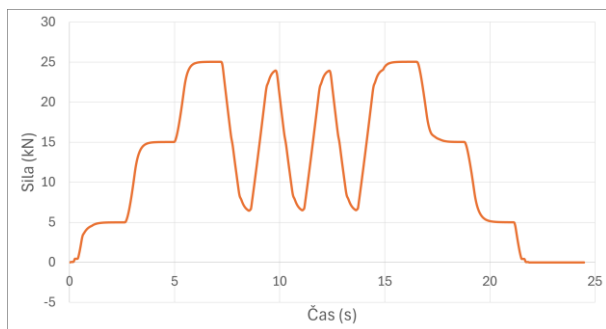


Slika 2. Merilni sistem HBM MGCplus z uporabljenimi ojačevalnimi moduli ML10B, ML38B in ML55B

### 3 Merilni postopek

Proces kalibracije tlačne sile je bil razdeljen na tri dele, slika 3:

- statično stopničasto obremenjevanje s 5 kN, 15 kN in 25 kN (vsaka stopnica je trajala nekaj sekund),
- dinamični cikli obremenjevanja in razbremenjevanja med 5 kN in 25 kN,
- postopno razbremenjevanje pretvornika z enakimi parametri kot v prvem delu.



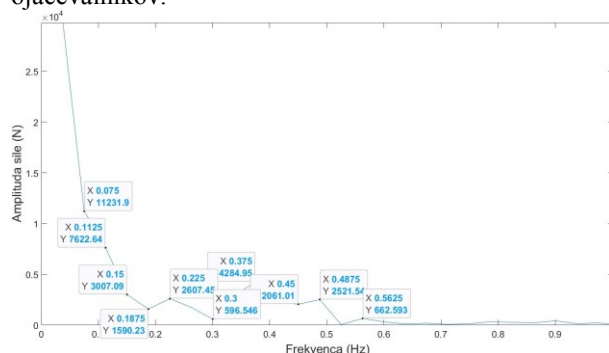
Slika 3. Testni profil obremenjevanja

Statični deli služijo kot referenčne točke za primerjavo in zagotavljajo sledljivost sile, dinamični del pa omogoča analizo vpliva frekvenčnih komponent na merilne rezultate. Fourierjeva analiza je pokazala, da je glavna frekvenca dinamičnega obremenjevanja približno 0,375 Hz, kar ustreza nizkofrekvenčnemu dinamičnemu pojavu, slika 4.

Na podlagi tega lahko zagotovimo, da je tudi precizijski ojačevalnik zmožen dovolj hitro zajemati signal. Z namenom analize vplivov dinamičnega obremenjevanja so bile meritve razdeljene v štiri različne sklope:

- sklop s kombinacijo različnih merilnih ojačevalnikov,
- sklop s kombinacijo različnih nizkoprepustnih filtrov,

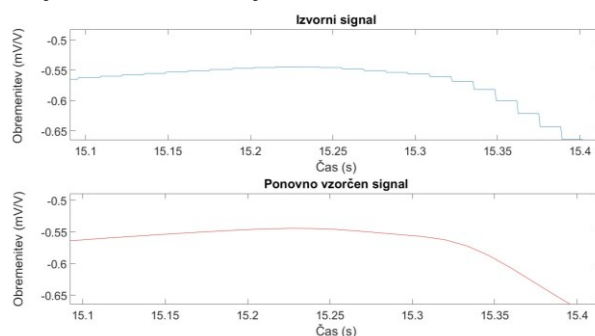
- sklop s kombinacijo različnih vzorčnih frekvenc in
- sklop s kombinacijo zamenjanih kanalov ojačevalnikov.



Slika 4. Frekvenčni spekter testnega signala

### 4 Sinhronizacija in obdelava signala

Kot osnovo metod za obdelavo signalov, ki jih želimo primerjati, smo uporabil nekatere postopke, ki so bili v istem laboratoriju uporabljeni v [5,6,7] za sinhronizacijo dinamičnih meritev sile. Prevzeti postopki vključujejo minimizacijo funkcije križne korelacije med signaloma za časovno uskladitev in linearno interpolacijo za nadvzorčenje signala z nižjo vzorčno frekvenco. Signale je potrebno časovno uskladiti zaradi več razlogov: začetki meritev niso bili sinhronizirani med seboj in imajo lahko posledično nekaj več ali manj vzorcev pred začetkom procesa obremenjevanja, uporaba različnih nizkopasovnih filtrov medsebojno časovno zakasni signale in različne inherentne vzorčne frekvence ojačevalnikov. Nadvzorčenje je bilo uporabljeno za zagotovitev ujemanja vzorčne frekvence signalov z nižjo vzorčno frekvenco. Preizkušeno je bilo tudi nadvzorčenje za povečanje ločljivosti in bolj fino nastavitev zamika med signali, a v našem primeru se je izkazalo, da se je z nadvzorčenjem dveh zelo podobnih signalov na višjo vzorčno frekvenco, zamik med signaloma zgolj skaliral s faktorjem nadvzorčenja in ni izboljšal pogreška med signaloma. Poleg teh postopkov smo morali uporabiti tudi metodo ponovnega vzorčenja [8], saj je bila najvišja vzorčna frekvenca ojačevalnika ML38B (80 Hz) manjša od frekvence zajemanja sistema (1200 Hz) in je bil vzorčen signal posledično stopničast, ker je sistem večkrat zajel isti vzorec, slika 5.



Slika 5. Primerjava originalnega signala in ponovno vzorčenega signala

Tehnike, ki jih uporabimo za sinhronizacijo signalov so odvisne predvsem od podobnosti oz. različnosti sistemov na katerih zajemamo podatke. Nadzorčenje v našem primeru ni bilo učinkovito, najverjetneje sta si signala preveč podobna, a je bilo pokazano kot učinkovito v [5], kjer so se lastnosti sistemov za zajemanje bolj razlikovale.

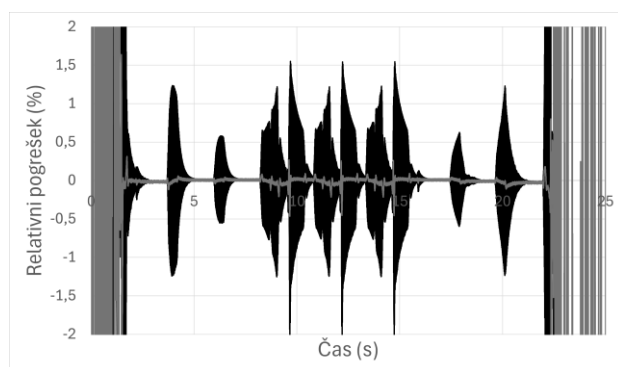
Vse meritve so bile izvedene po enakem, prej opisanem postopku vzbujanja. Ker kalibracijski stroj med dinamičnim nihanjem za doseganja dovolj velike frekvence nihanja vodimo po pomiku namesto po sili, prihaja med posameznimi serijami do razlik v dejanskem poteku in vrednosti sil in zato rezultati izven iste serije meritev niso povsem primerljivi v dinamičnem delu.

## 5 Rezultati posameznega sklopa

V nadaljevanju so v vsakem podpoglavju opisane specifične meritve, ki jih zaradi skupnih lastnosti oz. podobnih vplivov na meritve obravnavamo skupaj. Na vseh prikazanih grafih relativnega pogreška so na začetku in na koncu intervala vrednosti velike, saj je signal zelo majhen in včasih celo ničeln.

### 5.1 Primerjava različnih merilnih ojačevalnikov

Merilni ojačevalnik ML55B (006) smo primerjali z drugim ML55B (011), ML38B (014) in ML10B (017). Vse meritve v sklopu so bile narejene pri vzorčni frekvenci 1200 Hz in izbiri nizkopasovnega filtra tipa Butterworth z mejno frekvenco 10 Hz. Iz primerjave absolutnega in relativnega pogreška pridemo do naslednjih ugotovitev: enosmerni in hitrejši izmenični mostič, ki sta v istem točnostnem razredu, imata relativni pogrešek približno 0,02 %. Zelo podobno vrednost relativnega pogreška smo dobili pri medsebojni primerjavi dveh mostičev istega tipa ML55B (006 in 011), kar je pričakovano, saj so vsi naštetih ojačevalniki v istem točnostnem razredu.



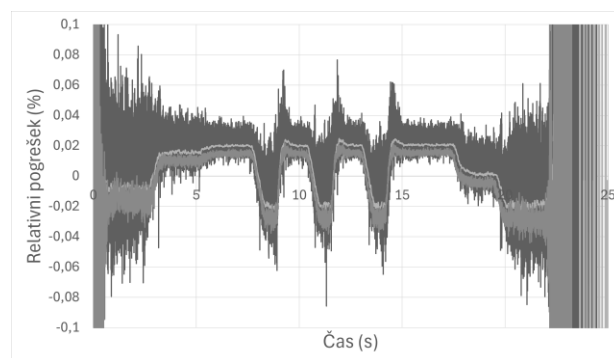
Slika 6. Relativni pogrešek ojačevalnika ML38B pred (črna) in po (siva) po nadzorčenju. Siva krivulja se ujema s pogreškom ostalih ojačevalnikov.

Precizijski merilni ojačevalnik, namenjen merjenju statičnih veličin, ima zelo majhen pogrešek, ko je sila v stabilnem stanju, ob prehodnih pojavih pa je možno zaznati večje hipne spremembe pogreška, ki tudi hitro izzvenijo, slika 6. Izven hitrih sprememb precizijski ojačevalnik za naše specifično vzbujanje brez težav sledi signalu in v primerjavi z ML55B kaže podobne

relativne razlike kot ostali primerjani ojačevalniki, če signal prevzorčimo na dejansko frekvenco zajemanja. Opažen je trend, ki se kasneje pojavlja tudi pri ostalih meritvah in sicer se, vključno s primerjavami enakih ojačevalnikov, pojavi pogrešek, ki je odvisen od poteka obremenjevanja pretvornika. V takih primerih bi pričakovali približno konstantno napako podobno šumu (kot na sliki 9). Napake tudi ni bilo možno zmanjšati s kalibracijo ojačevalnikov, poravnavanjem signalov in upoštevanjem korekcije pogreška s pretvorbo električne veličine v silo preko kalibracijskega polinoma.

### 5.2 Primerjava različni mejnih vrednosti nizkopasovnega filtra

V tem sklopu sta pri vseh meritvah uporabljena ojačevalnika istega tipa ML55B (006 in 011), med meritvami so različni zgolj nizkoprepustni filtri oz. njihova mejna frekvenca, ki jo spreminjamo med 10, 80 in 1000 Hz. Vsi filtri so tipa Butterworth. Po pričakovanjih je signal zajet z nizkoprepustnim filtrom pri višji frekvenci vseboval več šuma in signal z nižjo vzorčno frekvenco manj šuma. Pri najnižji vrednosti filtra pri obremenitvi 20 kN relativna napaka variira za približno 0,0005 %, pri srednji vrednosti filtra približno 0,003 % in pri najvišji vrednosti filtra za nekoliko manj kot 0,01 %, slika 7. Povprečne vrednosti signalov so si zelo podobne, torej bi lahko z naknadnim filtriranjem signala izboljšali podatke zajete z več vzorci na podobno raven šuma kot signali z manj vzorci.



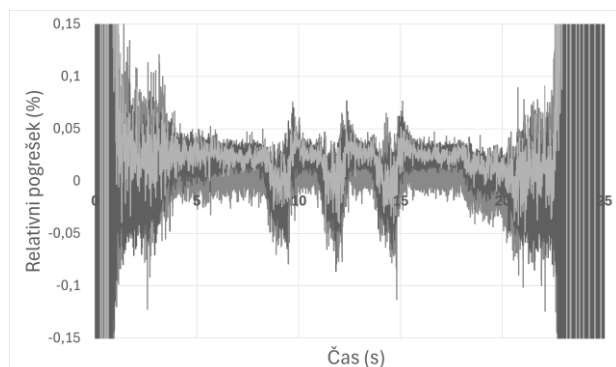
Slika 7. Primerjava relativnih pogreškov nizkoprepustnih filtrov: najtemnejša siva filter 1000 Hz, srednja siva filter 80 Hz, najsvetlejša siva filter 10 Hz

### 5.3 Primerjava različnih frekvenc vzorčenja

V tem sklopu sta ponovno pri vseh meritvah uporabljena ojačevalnika istega tipa ML55B (006 in 011), posamezne meritve se razlikujejo v vzorčni frekvenci. Pri dveh meritvah sta imela ojačevalnika enaki vzorčni frekvenci, najprej 100 Hz in nato 1200 Hz. V tretji meritvi sta se vzorčni frekvenci ojačevalnikov razlikovali, eden je zajemal podatke pri frekvenci 100 Hz, drugi pri 1200 Hz. Pričakovano imata relativna pogreška pri signalih z enako vzorčno frekvenco podobna poteka, tudi primer z mešanima frekvencama je primerljiv, a ima signal in tudi posledično pogrešek večjo varianco, slika 8.

Pri vzorčenju s frekvenco 1200 Hz in obremenitvi 20 kN variira šum za približno 0,015 %, pri vzorčenju s frekvenco 100 Hz podobno in pri različnih frekvencah

vzorčenja 0,03 %. Podobno kot pri prejšnjem sklopu bi tudi tukaj lahko z naknadnim filtriranjem signala zmanjšali šum izračunanega pogreška.

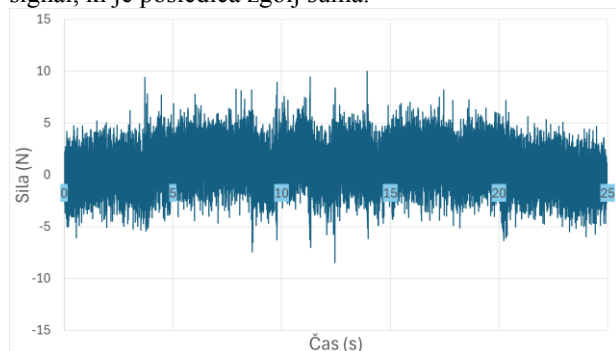


Slika 8. Relativni pogreški primerjave frekvenc vzorčenja: najtemnejša siva za 1200 Hz, srednja siva za kombinacijo 100 Hz in 1200 Hz, najsvetlejša siva za 100 Hz

#### 5.4 Primerjava s krožno zamenjavo ojačevalnih modulov

Zadnjo spremenljivko, ki smo jo želeli preveriti je, kako primerljiva sta signala, če uporabimo ojačevalnika enakega tipa (ML55B) in naredimo meritve enkrat običajno, pri naslednji meritvi ponovimo meritev z zamenjanima kanaloma. Pričakujemo, da bomo dobili zelo podoben signal v obeh primerih, saj je oprema za obe meritvi enakega tipa. Hipotezo smo potrdili z grafom absolutnega in relativnega pogreška, slika 9.

Za posamični meritvi in obremenitvi 20 kN je relativni pogrešek variiral za približno 0,01 %, pri razliki pogreškov je variacija večja, približno 0,02 %. Čeprav je pri posamezni meritvi mogoče zaznati nek enosmerni signal, se enak signal pojavi tudi pri drugi meritvi, le z nasprotno fazo, in, ker je prisoten pri obeh meritvah, se pri računanju razlike med meritvama izniči. Za razliko absolutnih pogreškov dobimo relativno majhen signal, ki je posledica zgolj šuma.



Slika 9. Razlika absolutnih pogreškov pri primerjavi križno zamenjanih kanalov ojačevalnikov

## 6 Zaključek

Z uporabo sinhronizacijskih tehnik in obdelave signalov smo uspeli bistveno zmanjšati pogreške med

podatkovnimi serijami, tudi pri različnih merilnih nastavitvah, kjer so bili podatki zajeti z različnimi ojačevalnimi moduli, različnimi nizkopasovnimi filtri, različnimi vzorčnimi frekvencami in različnimi kanali. Stopnja do katere lahko izboljšamo meritve vseeno zavisi od podobnosti oz. različnosti merilnih sistemov, ki jih želimo primerjati med seboj.

Pri razbremenjevanju bremenske celice se je v delu stopničastega razbremenjevanja pojavila nepričakovana razlika glede na stopničasto obremenjevanje v prvem delu meritve, pri enaki vrednosti sile je bil pogrešek različen. Tudi z upoštevanjem vpliva histereze so razlike bistveno večje kot so običajna pričakovana odstopanja. V prihodnje je potrebno razširiti raziskave na primere z bolj dinamičnim vzbujanjem, dodatnimi parametri, saj so nepojasnjene razlike v dinamičnih pogojih še vedno prisotne ter bi želeli opraviti še več meritev, kjer se nizkopasovni filtri med ojačevalniki razlikujejo.

V splošnem lahko zaključimo, da je z ustrezno časovno sinhronizacijo signala lahko zagotovimo dobro primerljivost signalov zajetimi z različnimi parametri vzorčenja in filtriranja. Ugotovitev je pomembna za bodoče standardizirane postopke za dinamično kalibriranje sile, saj pri praktičnem kalibracijskem delu težko zagotovimo identične parametre zajema in filtriranja signalov na referenčnem sistemu in sistemu, ki ga kalibriramo.

## Literatura

- [1] U10M Force Sensor, HBK World. <https://www.hbkworld.com/en/products/transducers/force/u10m>
- [2] Single-channel measurement card ML55B, HBK World, <https://media.hbkworld.com/m/8c8d82814c41c4df/origin/MGCplus-Data-Sheet-B00554.pdf>
- [3] Single-channel measurement card ML10B, HBK World. Pridobljeno: 8. januar 2025. [Na spletu]. Dostopno na: <https://media.hbkworld.com/m/8c8d82814c41c4df/origin/MGCplus-Data-Sheet-B00554.pdf>
- [4] Single-channel measurement card ML38B, HBK World, <https://media.hbkworld.com/m/8c8d82814c41c4df/origin/MGCplus-Data-Sheet-B00554.pdf>
- [5] A. Jerman, G. Begeš, in M. Hiti, „Sinhronizacija dinamičnih meritev pri kalibraciji sile“, Zbornik triintridesete mednarodne Elektrotehniške in računalniške konference ERK 2024: Portorož, Slovenija, 26. - 27. september 2024
- [6] M. Hiti, Force signals time alignment using cross-correlation, Measurement: Sensors, December 2024. DOI <https://doi.org/10.1016/j.measen.2024.101375>
- [7] M. Hiti, Analysis of loading profile effect on testing machine calibration results, Measurement: Sensors, Volume 18, December 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measen.2021.100131>
- [8] Signal Processing Toolbox »resample«. <https://www.mathworks.com/help/signal/ref/resample>