

# Sinhronizacija dinamičnih meritev pri kalibraciji sile

Andraž Jerman<sup>1</sup>, Gaber Begeš<sup>1</sup>, Miha Hiti<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Zavod za gradbeništvo Slovenije, Dimičeva 12, 1000 Ljubljana

E-pošta: miha.hiti@zag.si

## Synchronization of dynamic force calibration measurements

**Abstract.** The work focuses on the development of an algorithm for signal synchronization in dynamic force measurements. The algorithm is based on cross-correlation function calculation for time delay estimation. The document describes the equipment used, the measurement procedure, outlines the algorithmic steps, and presents the results. The results are presented first for a continuous calibration with an increasing and decreasing force ramp where the time delay between channel data acquisition produces an error and where other methods were used for determination of time correction in the past. In the second part, dynamic measurements with a 25 kN force transducer in a testing machine with 1 Hz, 5 Hz, and 10 Hz sinusoidal excitation are presented and evaluated. The proposed method can enable realistic error estimation for out-of-sync non-static force calibration applications which would otherwise need to be either manually synchronised or reacquired with better synchronization.

## 1 Uvod

Laboratorij za metrologijo Zavoda za gradbeništvo Slovenije (ZAG), kot vodilni kalibracijski laboratorij na področju sile, se sooča z izzivom nadgradnje postopkov kalibriranja meril sile pri dinamičnih pogojih. Čeprav je laboratorij že vrsto let akreditiran za kalibriranje merilnikov in sistemov za merjenje sile pri statičnih pogojih, se sedaj osredotoča na razširitev tega področja na dinamična merjenja. Specifičen izziv predstavlja sinhronizacija zajetih signalov pri dinamičnih vzburjanjih, kot so impulzi ali periodična nihanja.

Poseben poudarek je na sinhronizaciji signalov pri dinamičnih vzburjanjih merilnikov sile, ki omogočajo vpogled v obnašanje gradbenih struktur ob različnih obremenitvah, kot so impulzi ali periodična nihanja. Cilj razvoja je preučiti, ali je mogoče obstoječe merilnike sile prilagoditi in uporabiti za dinamična merjenja in kako lahko pridobljene rezultate povežemo z že izvedenimi statičnimi meritvami ter s tem zagotovimo meroslovno sledljivost. S tem se odpirajo možnosti za izboljšanje zanesljivosti in natančnosti meritev v gradbeništvu in tudi drugih panogah.

Raziskave so nadaljevanje evropskega meroslovnega raziskovalnega projekta EMPIR ComTraForce [1], kjer je Laboratorij za metrologijo ZAG sodeloval kot projektni partner pri razvoju novih metod za razširitev

meroslovne sledljivosti s statičnih pogojev sile na zvezne (kontinuirane) in dinamične (periodične) pogoje pri kalibriranju meril sile in preskusnih strojev.

## 2 Merilna oprema in postopek merjenja

Meritve so bile izvedene na dva načina, ki ponazarjata kasnejšo uporabo v praktičnih postopkih kalibriranja. Prvi primer je kalibriranje merilnikov sile v kalibracijskih strojih, drugi primer pa je kalibriranje preskusnih strojev s temi merilniki.

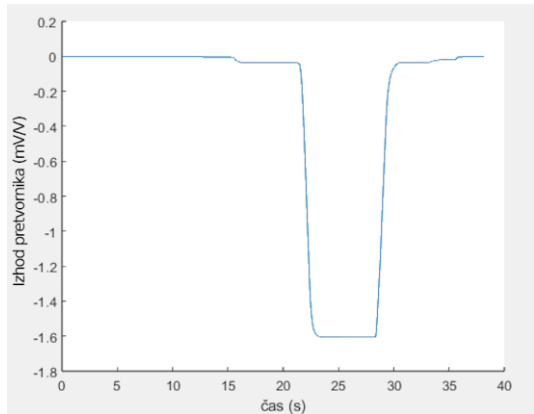
Meritve kalibriranja pretvornika sile so bile izvedene na referenčnem preizkusnem stroju za silo Zwick 600E, kjer smo obremenjevali merilni pretvornik sile HBM U10M (slika 1). V ta namen je bila uporabljena posebna izvedba merilnika sile z dvema merilnima mostičema in dvema merilnima izhodoma, s katerim lahko zajemamo enak obremenitveni profil istočasno z dvema ločenima merilnima kanaloma. Obremenjevanje je potekalo impulzno z zvezno naraščajočimi in padajočimi silami od 0 do 20 kN (slika 2). Pretvornik je bil obremenjen in razbremenjen le enkrat. Signal je bil zajet s frekvenco vzorčenja 75 Hz.



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

Izhoda merilnega pretvornika je bil povezan na merilni sistem HBM MGCplus z dvema ojačevalnima moduloma HBM ML38B (slika 3). Ta tip ojačevalnika je zelo razširjen v kalibracijskih laboratorijih, ki se ukvarjajo s kalibracijo in merjenjem mehanskih veličin, saj zagotavlja zelo dobro točnost in stabilnost in je

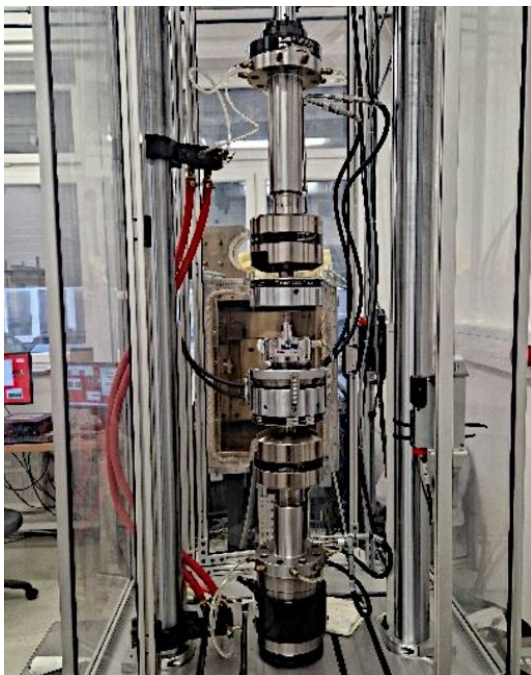
primarno namenjen merjenju statičnih sil. Signala z obeh modulov smo zajemali istočasno s programsko opremo HBM Catman Professional z hitrostjo zajemanja 70 Hz.



Slika 2. Profil obremenjevanja z enakomerno naraščajočo in padajočo silo (pulzno) obremenjevanje do 1,6 mV/V (20 kN)

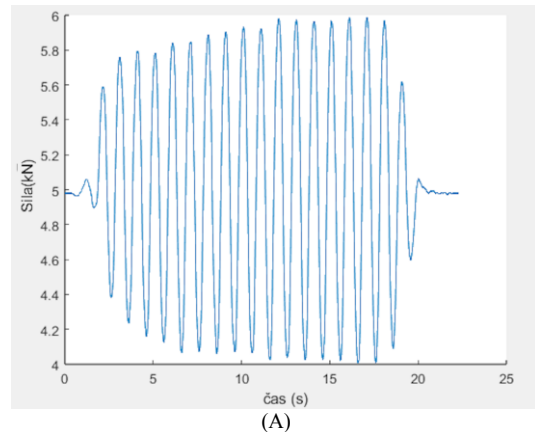


Slika 3. Merilni sistem HBM MGCplus z ojačevalnimi moduli HBM ML38B in HBM ML55B

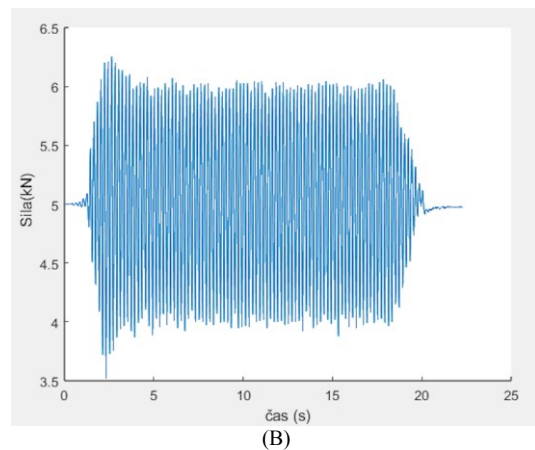


Slika 4. Merilni pretvornik sile HBM U10M v preizkusnem stroju MTS Bionix.

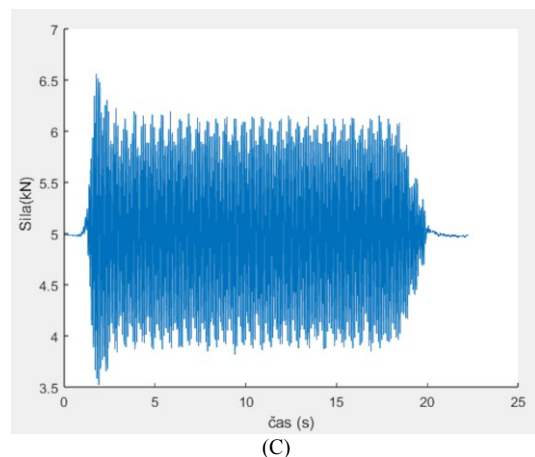
Rezultati meritev in težave pri vrednotenju pogreškov zaradi neidealne časovne sinhronizacije zajema z obeh modulov so bili predstavljeni že v [2], kjer je bil analiziran tudi možen ročni način sinhronizacije z izvedbo dodatnih meritev in s tem izboljšanja rezultatov. Rezultate osnovnih meritev smo uporabili za ponovno analizo in za preizkus novega predlaganega algoritma za avtomatizirano sinhronizacijo brez dodatnih meritev.



(A)



(B)



(C)

Slika 5. Izmerjen signal pri periodičnem vzbujanju s silo  $5 \text{ kN} \pm 1 \text{ kN}$  in frekvencami 1 Hz (A), 5 Hz (B) in 10 Hz (C)

Drugi del meritev – kalibriranje preskusnega stroja - smo izvedli na dinamičnem preizkusnem stroju MTS Bionix z vgrajenim pretvornikom sile MTS 662.20H-05 (slika 4). Za kalibracijo preskusnega stroja smo prav tako uporabili merilni pretvornik sile HBM U10M, ki smo ga uporabili pri analizi postopka zvezne kalibracije v kalibracijskem stroju. V primeru kalibracije preskusnega stroja smo uporabili le en izhod merilnega pretvornika in ga povezali na merilni sistem HBMplus z ojačevalnim modulom HBM ML55B in programsko opremo HBM Catman Professional. Hitrost zajema podatkov z merilnega pretvornika je bila 1200 Hz.

Preskusni stroj je merilni pretvornik obremenil s statično tlačno silo 5 kN in nato pričel s periodičnim nihanjem sile od 4 kN do 6 kN in tremi različnimi frekvencami vzbujanja: 1 Hz, 5 Hz in 10 Hz, slika 5. Takšni načini obremenjevanja so tipični pri uporabi stroja za preskušanje lastnosti materialov.

Zajem signal sile s preskusnega stroja (pretvornik sile MTS 662.20H-05) je potekal preko programske opreme stroja s hitrostjo zajema 1024 Hz.

### 3 Sinhronizacija meritev

Meritve opisane v poglavju 2 so v neobdelani obliki neuporabe za izračun pogreška, saj časovno zakasneni signali, za razliko od statičnih signalov, med seboj niso neposredno primerljivi. Osnovna naloga pri kalibraciji s kontinuiranimi in dinamičnimi-periodičnimi silami je torej sinhronizacija merjenih signalov. Idealna sinhronizacija že v fazi meritev je pogosto nemogoča (ločeni merilni sistemi), draga (novi ali dodatni merilni sistemi) ali le omejeno učinkovita (glede na frekvenco vzbujanja vplivajo že zakasnitve reda 10  $\mu$ s) in tako v vsakem primeru potrebujemo dodatno obdelavo podatkov po izvedenih meritvah. Cilj raziskave je bil razviti algoritem, ki bi izvedel optimalno sinhronizacijo izmerjenih signalov.

Algoritem temelji na določitvi optimalnega potrebnega časovnega zamika med signaloma s pomočjo izračuna funkcije diskretne križne korelacije v časovnem prostoru. Algoritem sinhronizacije je sestavljen iz več korakov:

- V prvem koraku je potrebno uskladiti frekvenci vzorčenja signalov. Običajno gre pri kalibraciji merilnikov sile za ločene sisteme, ki podajo izmerjeno vrednost veličine ločeno en od drugega. Prav tako pa sistemi običajno ne zajemajo podatkov z isto frekvenco zajema. Algoritem v tem delu izvede povečanje frekvence vzorčenja signalov z linearno interpolacijo med posameznimi točkami za vsak signal, pri interval med posameznimi vzorci pri prvem signalu razdeli glede na frekvenco zajema drugega signala in pri drugem signalu glede na frekvenco zajema prvega signala. S tem povečamo frekvenco vzorčenja signalov za boljšo ločljivost časovnega zamika, hkrati pa izenačimo frekvenci vzorčenja, kar je nujni pogoj pred izračunom križne korelacije.

- Pred izračunom križne korelacije oba signala normiramo, algoritem v tej točki normira oba signala na območje od -1 do +1. Ta korak je predviden za

primerjavo signalov z različnimi enotami in amplitudnimi razmerji.

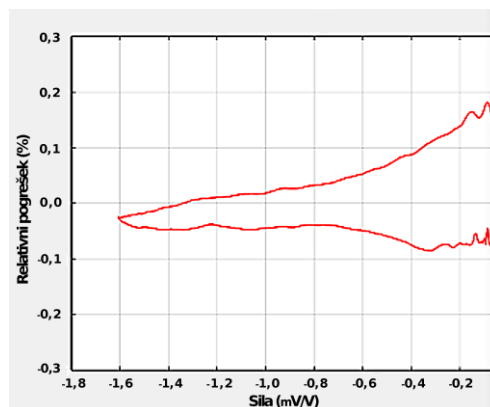
- Sledi dejanski izračun križne korelacije za različne zamike signalov. Zamik, pri katerem ima funkcija največjo vrednost, predstavlja optimalno ujemanje.

- V zadnjem koraku algoritem izvede časovni zamik signalov glede na rezultat optimalnega zamika števila vzorcev določenega iz funkcije križne korelacije.

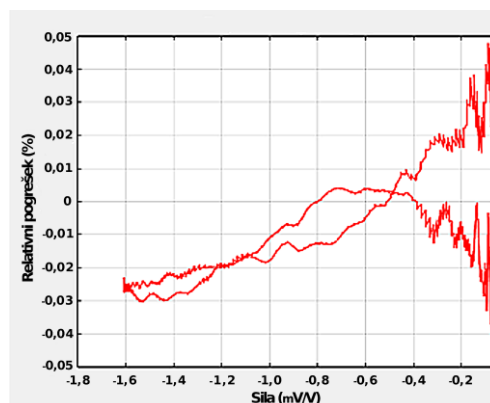
Algoritem kot rezultat poda graf relativnega pogreška merjenega signala glede na referenčnega, čas zakasnitve drugega signala glede na prvega ter graf sinhroniziranih signalov.

### 4 Rezultati

Za prvi del analize - kalibriranja merilnika sile - je rezultat pogreška med obema signaloma pred sinhronizacijo prikazan na sliki 6. Rezultat po časovni sinhronizaciji s pomočjo algoritma je prikazan na sliki 7. Algoritem je izračunal vrednost potrebne časovne korekcije med signaloma 210,67  $\mu$ s. V tem primeru sta bila oba signala zajeta z istim merilnim sistemom (z ločenimi kanali). Histereza v rezultatu pogreška, kot posledica časovnega zamika, je v primeru neobdelanih signalov v razponu od -0,1 % do +0,2 %, po sinhronizaciji signalov pa je v območju -0,05 % do +0,05 %, slika 7.

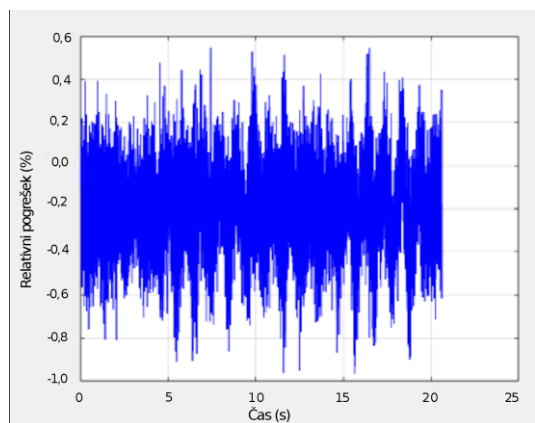


Slika 6. Pogrešek med signaloma v primeru kalibracije merilnika sile - pred sinhronizacijo

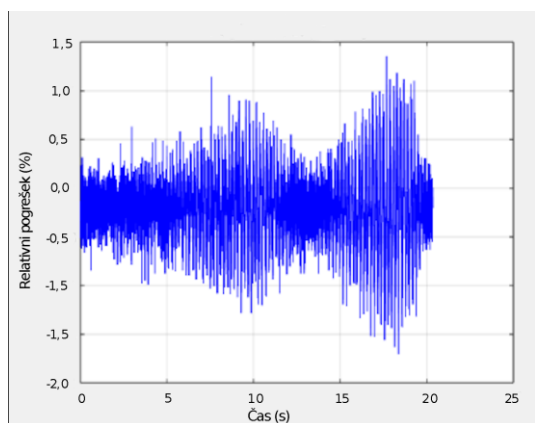


Slika 7. Pogrešek med signaloma v primeru kalibracije merilnika sile - po sinhronizaciji

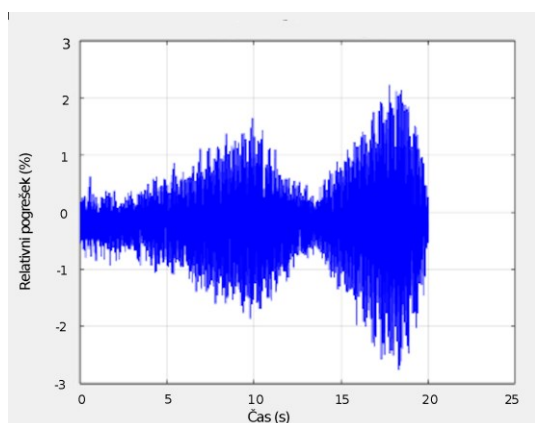
Pri drugem delu analize – kalibriranje preskusnega stroja - so rezultati izračuna pogreškov brez predhodne sinhronizacije neuporabni in napačni zaradi velikega časovnega zamika, neujemanje signalov je več kot perioda signala.



(A)



(B)



(C)

Slika 8. Izračunan relativni pogrešek pri periodičnem vzbujanju s silo  $5 \text{ kN} \pm 1 \text{ kN}$  in frekvencami 1 Hz (A), 5 Hz (B) in 10 Hz (C) - po sinhronizaciji s pomočjo križne korelacije

Pri izmerjenih signalih je bila pri periodičnem merjenju sile z 1 Hz potrebna časovna korekcija 1680,09 ms, pri vzbujanju s 5 Hz 1954,198 ms in pri

vzbujanju z 10 Hz 2260,91 ms. Rezultata pogreška pred sinhronizacijo ni smiselno prikazovati saj je odvisen od časovnega zamika in lahko preseže amplitudo nihanja - v konkretnem primeru za frekvence vzbujanja od 1 Hz do 10 Hz je znašal od 41 % do 55 % izmerjene vrednosti. Relativni pogrešek po sinhronizaciji s pomočjo križne korelacije pa daje bolj realne rezultate in je razviden iz slike 8.

Na sliki 8(A) za vzbujanje 1 Hz je pogrešek bolj kot ne enakomeren šum v območju med približno  $\pm 0,8 \%$  za celoten interval obremenjevanja. Šum je enak šumu pri statični obremenitvi na začetku merjenja. Pri vzbujanju 5 Hz, slika 8(B), poleg podobnega šuma kot pri vzbujanju 1 Hz, znotraj intervala merjenja vidimo tudi območja povečanih vrednosti pogreška, v območju  $\pm 1,5 \%$ . V primeru vzbujanja s periodičnim nihanjem 10 Hz je rezultat podoben kot za primer vzbujanja s 5 Hz, vendar pa so pogreški v območjih, ki odstopajo od osnovnega šuma v tem primeru še večji in dosega do  $\pm 2,5 \%$ , slika 8(C).

Rezultati iz slike 8 kažejo na učinkovito sinhronizacijo signalov, če za določitev optimalne korekcije uporabimo funkcijo diskretne križne korelacije. Iz rezultatov sicer lahko vidimo tudi določene dodatne, frekvenčno odvisne vplive, ki deloma povečajo izračunane pogreške. Ti zahtevajo dodatne korekcijske ukrepe, predvsem analizo dejanske frekvence zajemanja, saj odstopanje dejanske frekvence zajemanja od nominalne povzroči neusklajenost časovne baze obeh signalov in posledično optimalna sinhronizacija z zamikanjem signalov ni mogoča.

## 5 Zaključek

V članku je predstavljen postopek za sinhronizacijo signalov merilnih pretvornikov in sistemov za merjenje sile pri kalibriranju. Postopek je učinkovita osnova za sinhronizacijo signalov pri kalibriranju meril in sistemov za merjenje sile tako pri kontinuiranem naraščanju in padanju sil kot tudi pri vzbujanju s periodičnim nihanjem sile (dinamične razmere). Z računsko interpolacijo frekvence zajemanja hkrati omogoča kalibriranje naprav, kjer ne moremo zagotoviti identične frekvence zajemanja in bi bila z običajnim postopkom kalibracija nemogoča.

## Literatura

- [1] EMPIR 18SIB08 project webpage: <https://www.ptb.de/empir2019/comtraforce/home/>
- [2] M.Hiti »Vpliv nesinhroniziranega zajema signalov pri zveznem kalibriranju sile«, Zbornik dvaintridesete mednarodne Elektrotehniške in računalniške konference ERK 2023, 28. – 29. september 2023.

This work is a part of the project 18SIB08 which has received funding from the EMPIR programme co-financed by the Participating States and from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme.