

Analiza vpliva zamenjave merilnih ojačevalnikov na rezultat kalibracije pretvornika sile

Miha Hiti

Laboratorij za metrologijo, Zavod za gradbeništvo Slovenije (ZAG), Dimičeva ulica 12, 1000 Ljubljana
E-pošta: miha.hiti@zag.si

Analysis of exchanging of measuring amplifiers on force transducer calibration results

Abstract. The paper presents the influence of different measuring amplifiers on the calibration result of the same force transducer. The calibrations of a 1000 N force transducer of type HBM Z30A were performed on a 1000 N deadweight force calibration machine of ZAG which offers 0,01 % expanded calibration uncertainty and force generation repeatability better than 0,005 %. For the analysis, high precision measuring amplifiers of following types were employed: carrier frequency 225 Hz (HBM DMP41, HBM ML38B and HBM DK38), carrier frequency 4800 Hz (HBM ML55B) and DC excitation type (HBM ML10B). Results are presented for the calibration of transducer-amplifier measuring chain, and for additional evaluation of contribution of replacing the measuring amplifier by calibration of each measuring amplifier using an HBM K3608 calibrator unit.

1 Uvod

Pri merjenju mehanskih veličin kot so sila, navor in tlak, najpogosteje uporabljamo pretvornike z uporovnimi lističi v kombinaciji z merilnimi ojačevalniki, ki zagotovijo ustrezno električno vzbujanje uporovnega mostiča ter zajemajo izhodno napetost, ki je sorazmerna z vnosom mehanske obremenitve. Pri tem uporabljamo različne tipe merilnih ojačevalnikov z različnimi napetostmi in frekvencami vzbujanja.

Menjava pretvornika in merilnega ojačevalnika z vidika električne priključitve običajno ne predstavlja večjih težav. Tako lahko isti pretvornik enostavno priključimo na različne tipe merilnih ojačevalnikov, kar v praksi prinaša mnogo praktičnih prednosti, kot so uporaba istih pretvornikov s preciznimi laboratorijskimi stacionarnimi ojačevalniki in tudi z enostavnimi prenosnimi ročnimi merilnimi ojačevalniki, poljubno kombiniranje nabora pretvornikov z naborem ojačevalnikov, kalibracija industrijskih pretvornikov v kalibracijskih laboratorijih brez potrebe demontaže pripadajočih merilnih ojačevalnikov in drugo.

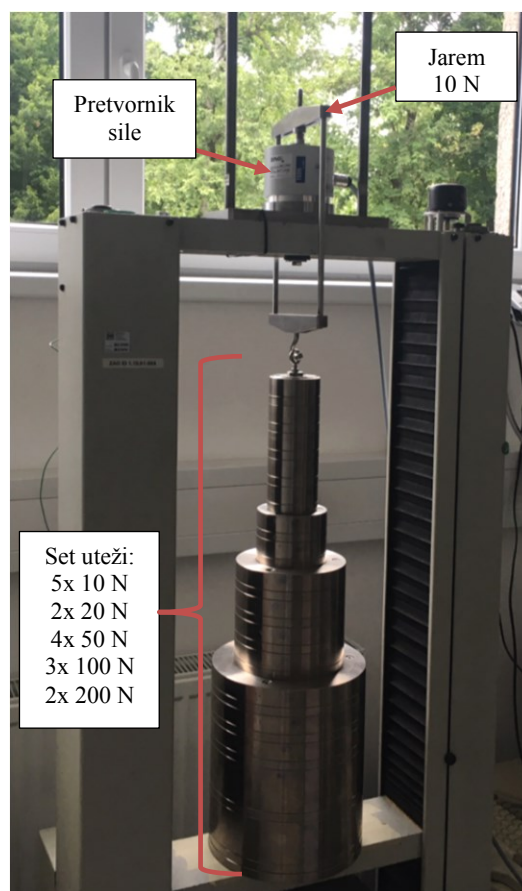
Vendar pa moramo pri menjavi merilnih ojačevalnikov zagotoviti ustrezno meroslovno sledljivost s kalibracijo vsakega merilnega ojačevalnika in hkrati upoštevati možen vpliv različnih tipov ojačevalnikov na rezultat meritev, kjer poleg različnih

nivojev napajalnih napetosti na rezultat lahko vpliva tudi frekvenca vzbujanja mostiča pretvornika [1].

V prispevku je predstavljena primerjava kalibracije merilnega pretvornika za silo z različnimi tipi merilnih ojačevalnikov z različnimi frekvencami vzbujanja mostiča z vidika primerljivosti kalibracijskih vrednosti.

2 Merilna oprema

Kalibracije pretvornika so bile izvedene na primarnem kalibracijskem stroju za silo z neposrednim obremenjevanjem na uteži do 1000 N, slika 1. Stroj predstavlja enega od referenčnih strojev, ki so na voljo v Laboratoriju za metrologijo ZAG za realizacijo sile v območju od 0,1 N do 2000 kN [2].



Slika 1. Kalibracija pretvornika na referenčnem kalibracijskem stroju za silo z neposrednim obremenjevanjem z uteži za območje 10 N do 1000 N

Območje referenčne sile, ki jo stroj lahko zagotovi, je od 10 N do 1000 N za natezno in tlačno obremenjevanje z razširjeno merilno negotovostjo sile 0,01 %, pri čemer pa je ponovljivost generirane sile stroja boljša od 0,005 %. Sledljivost generirane sile je zagotovljena preko kalibracije mase uteži pri Uradu Republike Slovenije za meroslovje in meritvi težnostnega pospeška na lokaciji stroja ($g_{LOC}=9,8061621 \text{ ms}^{-2} \pm 0,0000003 \text{ ms}^{-2}$), ki so ga določili predstavniki Fakultete za gradbeništvo s prenosom vrednosti z relativnim gravimetrom z nacionalne gravimetrične mreže.

Pretvornik sile, ki je bil vključen v merilno verigo, je precizni pretvornik sile z uporovnimi lističi proizvajalca HBM, tip Z30A, nazivne obremenitve 1000 N in izhodnim signalom 2 mV/V pri nazivni obremenitvi. Čeprav merilni pretvornik omogoča obremenjevanje tako v tlačni kot v natezni smeri, so bile vse meritve izvedene z obremenjevanjem izključno v tlačni smeri, brez vmesnega obremenjevanja pretvornika v natezni smeri, kar bi lahko negativno vplivalo na rezultate meritev.

Merilni ojačevalniki, na katere je bil priključen pretvornik sile, so bili izbrani iz nabora merilnih ojačevalnikov, ki se uporabljajo pri kalibriranju v Laboratoriju za metrologijo ZAG. V analizo so bili vključeni različni merilni ojačevalniki z napetostjo vzbujanja mostiča 5 V in nazivnim območjem do 2,5 mV/V. Uporabljeni merilni ojačevalnik so bili:

- merilni ojačevalnik HBM DMP41 z izmenično frekvenco vzbujanja 225 Hz in ločljivostjo 1 nV/V
- merilni ojačevalni modul HBM ML38B v sistemu HBM MGCplus z izmenično frekvenco n vzbujanja 225 Hz in ločljivostjo 1 nV/V,
- merilni ojačevalni HBM DK38 z izmenično frekvenco vzbujanja 225 Hz in ločljivostjo 10 nV/V,
- merilni ojačevalni modul HBM ML55B v sistemu HBM MGCplus z izmenično frekvenco vzbujanja 4800 Hz in ločljivostjo 10 nV/V,
- merilni ojačevalni modul HBM ML10B v sistemu HBM MGCplus z enosmerno frekvenco vzbujanja in ločljivostjo 10 nV/V.

Na ojačevalnikih so bile izbrane ustrezne nastavitve filtra za stabilno odčitavanje vrednosti (filter 0,5 Hz Bessel, ali primerljivo, kjer so ojačevalnik to omogočali).

Vsi merilni ojačevalniki so bili pred meritvami kalibrirani. Za kalibracijo merilnih ojačevalnikov je bila uporabljena kalibracijska enota HBM K3608, ki omogoča kalibriranje merilnih ojačevalnikov z enosmerno napetostjo vzbujanja (DC) in izmenično napetostjo vzbujanja do 5 kHz. Enota je bila kalibrirana za območje 2 mV/V za DC vzbujanje in frekvenco vzbujanja 225 Hz in 4800 Hz.

3 Kalibracijski postopek

Postopek kalibracije pretvornika temelji na mednarodno veljavnem standardu za kalibriranje pretvornikov sile ISO 376 [3], pri čemer so bile meritve izvedene le pri začetni rotaciji pretvornika. Pri vseh meritvah je bil pretvornik sile nameščen v kalibracijski stroj v istem položaju, da bi izločili čim več morebitnih mehanskih vplivov na spremembe izmerjenih vrednosti sile. Po predobremenitvi do nazivne vrednosti je sledilo osem kalibracijskih točk od 100 N do 1000 N. Za vsak ojačevalnik je bila kalibracija izvedena z dvema serijama naraščajočih vrednosti sile.

Izmerjene vrednosti so bila nato preračunane glede na dejansko občutljivost z odštevanjem ničelne vrednosti pri vsaki seriji. Za vsak ojačevalnik je bila izračunana srednja vrednost preračunanih vrednosti in podana kot kalibrirana vrednost za posamezno kalibracijsko točko.

Vsak ojačevalnik je bil priključen na pretvornik vsaj eno uro, za temperaturno stabilizacijo. Prav tako je bil vsak ojačevalnik pred meritvijo kalibriran s kalibrirno enoto HBM K3608 pri 0 mV/V in nazivni vrednosti območja 2 mV/V.

Kalibracija ojačevalnika je osnova za zagotovitev primerljivosti saj določa dejansko občutljivost ojačevalnika. Na osnovi kalibracije ojačevalnika lahko upoštevamo linearno korekcijo rezultatov glede na občutljivost ojačevalnika:

$$X_{kor} = X_{amp} \cdot \frac{S_{cal}}{S_{amp}} \quad (1)$$

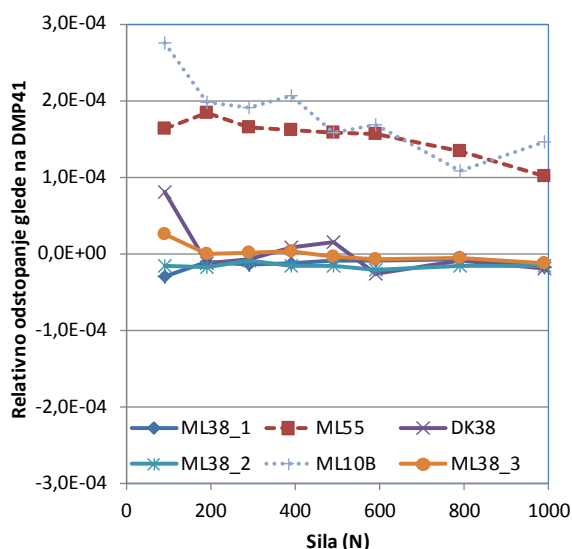
kjer je X_{kor} korigirana vrednost prikaza ojačevalnika X_{amp} glede na razmerje kalibrirane vrednosti občutljivosti kalibrirne enote pri 2 mV/V S_{cal} ter rezultata kalibracije občutljivosti ojačevalnika pri 2 mV/V S_{amp} .

Za primerjavo rezultatov predstavljajo referenčno vrednost rezultati kalibracije pretvornika z ojačevalnikom DMP41, kot najboljšim možnim ojačevalnikom [4]. Rezultati ostalih ojačevalnikov so predstavljeni relativno glede na kalibracijo z ojačevalnikom DMP41.

Kalibracija pretvornika z ojačevalnikom ML38B je bila izvedena trikrat za oceno dolgotrajne stabilnosti primerjave.

4 Rezultati

Rezultati meritev istega pretvornika sile z različnimi merilnimi ojačevalniki so prikazani na sliki 2. Slika prikazuje relativno odstopanje vrednosti za posamezni merilni ojačevalnik od merilnega ojačevalnika DMP41. V tem primer so vrednosti za posamezni ojačevalnik samostojne in neodvisne in predstavljajo rezultat kalibracije za posamezno merilno verigo pretvornik-ojačevalnik.



Slika 2. Primerjava rezultatov kalibracije za merilno verigo pretvornik-ojačevalnik

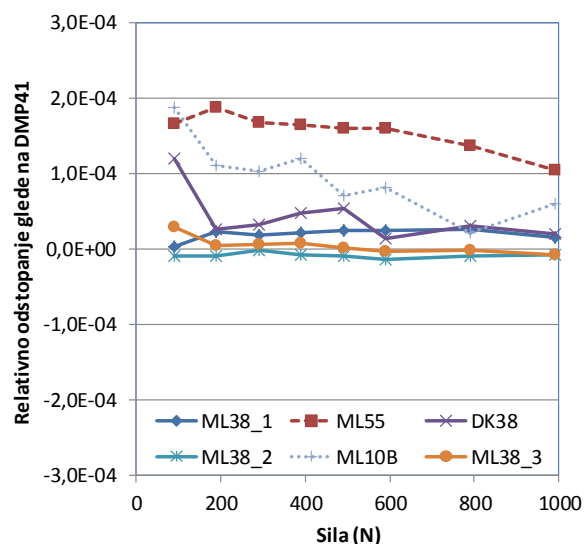
Na videz dobro ujemanje rezultatov v tem primeru kaže na dokaj dobro nastavitve občutljivosti merilnih ojačevalnikov, vendar pa sledljivost rezultatov samih ojačevalnikov ni zagotovljena, zato dobro ujemanje lahko smatramo kot naključje. Tudi če bi bila odstopanja bistveno večja, bi bili rezultati enako veljavni in korektni, saj je rezultat kalibracije neodvisen od tipa ojačevalnika ali njegovega pogreška.

Rezultat je veljaven le za celotno merilno verigo, saj vpliva pretvornika ni mogoče ločiti od vpliva ojačevalnika. Merilna negotovost kalibracije za celotno merilno verigo znaša od v tem primeru 0,01 % do 0,02 %. Na podlagi rezultatov lahko za uporabljene ojačevalnike zagotovimo zamenljivost z enotnimi referenčnimi vrednostmi (npr. vrednosti kalibracije z ojačevalnikom DMP41), če upoštevamo, da pri tem lahko povzročimo pogrešek do 0,03 %. Druga možnost je korekcija rezultatov (ali justiranje ojačevalnikov), s katero bi prilagodili kazanje različnih ojačevalnikov na enake referenčne vrednosti. V vsakem primeru rezultati in ugotovitve veljajo samo za ojačevalnike, ki so bili predmet analize, rezultati drugih ojačevalnikov istega tipa bi lahko bili popolnoma različni zaradi drugačne nastavitve občutljivosti ojačevalnika.

Če želimo v splošnem na ustrezen način primerjati rezultate ojačevalnikov, tudi v primeru, da uporabimo ojačevalnik, ki ni bil vključen v analizo, moramo najprej vsakega izmed njih kalibrirati s kalibracijsko enoto za napetostno razmerje. Na ta način lahko vrednotimo ojačevalnike ločeno od pretvornika.

Primerjavo rezultatov kalibracije pretvornika z različnimi ojačevalniki, kjer upoštevamo rezultate kalibracije posameznega ojačevalnika, prikazuje slika 3. V rezultatih je vključena korekcija odstopanja vrednosti vsakega ojačevalnika, s čimer zagotovimo, da so rezultati primerljivi in kažejo dejanski vpliv merilnega ojačevalnika na rezultat merilne verige. S tem izpolnimo predpogoj za njihovo zamenjavo, ki bi veljala na splošno, za katerikoli kalibriran ojačevalnik.

Iz slike je razvidno, da se rezultati ojačevalnikov ML38B in DK38 dejansko dobro ujemanjo z ojačevalnikom DMP41. Ker imajo vsi trije ojačevalniki enako izmenično napetost vzbujanja mostiča s frekvenco 225 Hz, je rezultat v skladu s pričakovanji. Ujemanje ojačevalnikov ML38B in DMP41 je znotraj odstopanja 0,003 %, tudi po trikratni ponovitvi kalibracije. Odstopanje ojačevalnika DK38 je nekoliko večje, predvsem v spodnjem delu območja na račun slabše ločljivosti, vendar pa ostaja v večjem delu območja znotraj meje 0,005 %.



Slika 3. Primerjava rezultatov kalibracije pretvornika sile za posamezni ojačevalnik

Kalibracija pretvornika sile z merilnim ojačevalnikom ML10B z enosmernim vzbujanjem izkazuje večje odstopanje od rezultatov ojačevalnika DMP41 kot ojačevalniki s frekvenco vzbujanja 225 Hz. Odstopanje za ta tip ojačevalnika je bilo v razponu od 0,002 % do 0,02 %.

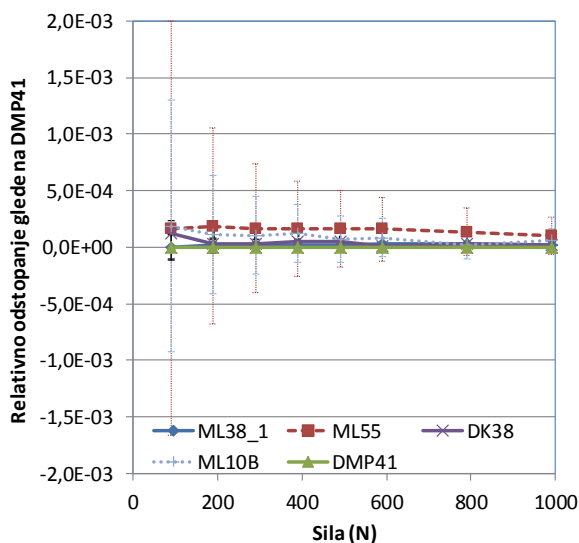
Tudi kalibracija pretvornika sile z merilnim ojačevalnikom ML55B z izmeničnim vzbujanjem 4800 Hz izkazuje večje odstopanje od rezultatov ojačevalnika DMP41 kot ojačevalniki s frekvenco vzbujanja 225 Hz. Odstopanje presega tudi odstopanje ojačevalnika ML10B in znaša od 0,01 % do 0,02 %.

Podobnost slike 2 in slike 3 izhaja iz preteklih kalibracij, vrednotenih in analiziranih ojačevalnikov [5,6]. Ojačevalniki so bili očitno v preteklosti ustrezno justirani, kar posledično omogoča majhna odstopanja na sliki 2. V primeru slabo nastavljenih ojačevalnikov bi bila razlika med slikama bistveno bolj izrazita.

Pri rezultatih slike 3 je potrebno dodatno upoštevati tudi prispevek merilne negotovosti kalibracije merilnih ojačevalnikov, kjer znaša že razširjena merilna negotovost kalibrirane enote 20 nV/V za frekvenco vzbujanja 225 Hz, 330 nV/V za frekvenco vzbujanja 4800 Hz in 200 nV/V za enosmerno napetost vzbujanja mostiča. To je tudi prevladujoč prispevek končne kalibracije ojačevalnikov.

Merilna negotovost pri menjavi ojačevalnikov je v vsakem primeru višja kot pri kalibraciji pretvornika sile skupaj z ojačevalnikom saj moramo upoštevati

prispevke merilne negotovosti kalibracije obeh ojačevalnikov – ojačevalnika, ki je bil uporabljen pri kalibraciji pretvornika in ojačevalnika, ki je uporabljen pri nadaljnjih meritvah. Posledično se negotovost rezultatov ojačevalnikov s frekvenco vzbujanja 225 Hz poveča približno za faktor 2 (predvsem zaradi povečane relativne merilne negotovosti pri spodnji kalibracijski vrednosti), pri ojačevalnikih s frekvenco vzbujanja 4800 Hz in enosmernim vzbujanjem pa je povečanje bistveno večje, kot kaže slika 4.



Slika 4. Relativno odstopanje pri menjavi merilnega ojačevalnika s pripadajočo merilno negotovostjo

Pri ojačevalnikih z enosmernim vzbujanjem doseže razširjena merilna negotovost več kot 0,1 %, pri ojačevalnikih s frekvenco vzbujanja 4800 Hz pa doseže merilna negotovost skoraj 0,2 %, kar je povečanje merilne negotovosti za faktor 10 glede na negotovost kalibracije merilne verige.

Izboljšanje končne razširjene merilne negotovosti v teh primerih bi lahko sicer dosegli z dodatnim vrednotenjem linearnosti ojačevalnikov, na primer z uporabo kombinatornega postopka kalibracije merilnih ojačevalnikov [7,8] ali drugih postopkov preverjanja linearnosti ojačevalnikov [9,10].

5 Zaključek

V prispevku so podani primeri kalibracije istega merilnega pretvornika sile z različnimi tipi merilnih ojačevalnikov. Rezultati so analizirani kot rezultat kalibracije merilne verige pretvornik-ojačevalnik in dodatno z upoštevanjem kalibracije posameznega ojačevalnika s kalibrirano enoto za napetostno razmerje.

Iz rezultatov kalibracije merilne verige je razvidno, da za primer uporabljenih ojačevalnikov je možna menjava ojačevalnika, vendar z upoštevanjem povečanega pogreška pri uporabi merilne verige. V primeru uporabe drugih ojačevalnikov ni možno

napovedati rezultatov brez predhodne kalibracije pretvornika z novim ojačevalnikom.

Pri splošnem primeru menjave ojačevalnikov pa moramo najprej zagotoviti kalibracijo posameznega ojačevalnika in upoštevati potrebne korekcije. Kalibrirna enota za napetostno razmerje mora biti kalibrirana za vse uporabljene frekvence vzbujana. Primerjava oziroma kalibracija ojačevalnikov z nekalibrirano enoto je sicer tudi možna, vendar samo za isto frekvenco vzbujanja in za primerjavo vseh ojačevalnikov z isto kalibrirno enoto in v kratkem časovnem obdobju.

V vsakem primeru moramo ovrednotiti dodatne prispevke merilne negotovosti, ki izhaja iz menjave merilnega ojačevalnika. Prispevek merilne negotovosti kalibracije ojačevalnika pri menjavi ojačevalnikov bistveno presega merilno negotovost pri kalibraciji merilne verige pretvornik-ojačevalnik.

Literatura

- [1] D. Schwind and T. Hahn, "Investigation of the influence of carrier frequency or direct current voltage in force calibrations", XIX IMEKO World congress, Lisbon, Portugal, 2009, pp. 201-204
- [2] M. Hiti: "Razvoj etalonskih strojev za kalibriranje meril sile", Zbornik šestindvajsete mednarodne Elektrotehniške in računalniške konference ERK 2017, 25. - 26. September 2017, Portorož, Slovenija
- [3] SIST EN ISO 376:2011 (ISO 376:2011)
- [4] Marco M. Schäck: "Long Term Proven and Optimized High-Precision 225 Hz Carrier Frequency Technology in a Modern And Universal Data Acquisition System", IMEKO 23rd TC3, 13th TC5 and 4th TC22 International Conference, 30 May to 1 June, 2017, Helsinki, Finland
- [5] M. Hiti: "Stabilnost merilnih ojačevalnikov za merilne pretvornike z merilnimi lističi", Zbornik triindvajsete mednarodne Elektrotehniške in računalniške konference ERK 2014, 22. - 24. September 2014, Portorož, Slovenija
- [6] M. Hiti: "Examples of strain-gauge amplifier linearity results using combinatorial calibration method", IMEKO TC3, TC5, TC22 Joint Conference, Helsinki, Finland, 30. May - 1. June 2017. Helsinki
- [7] M. Hiti, "Resistor network for linearity check of voltage ratio meters by combinatorial technique", *Meas. Sci Technol.*, Vol 26, No. 5, 2015
- [8] M. Hiti: "Reducing the uncertainty of strain gauge amplifier calibration", *Acta IMEKO*, Dec. 2017, vol. 6, no. 4, str. 69-74
- [9] A. Brüge, "Traceability of Bridge Amplifiers in Tarred Measurement Applications", IMEKO 23rd TC3, 13th TC5 and 4th TC22 International Conference, 30 May to 1 June, 2017, Helsinki, Finland
- [10] M. F. Beug, H. Moser, A. Kölling, "New Setup for Bridge Amplifier Linearity Investigation", in Proceedings of the Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM), Paris, France, July 2018.