

Stabilnost merilnih ojačevalnikov za merilne pretvornike z merilnimi lističi

Miha Hiti

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

Stability of measurement amplifiers for use with strain gauge transducers

In the paper we present an analysis of stability of high precision measuring amplifiers for measurement with strain gauge bridge transducers, such as force, torque, pressure transducers and others. Selected measurement amplifiers are widely used in calibration and testing laboratories around the world. The analysis includes HBM MGCplus system with ML55B and ML38B amplifier modules as well as HBM DMP41 measurement amplifier. The measurements were performed with an HBM K3608 calibrator unit. The results are present for measurement duration of 120 minutes during stable environmental conditions as typically required for calibration. Selected measurement points were +2 mV/V, 0 mV/V and -2 mV/V voltage ratio values.

1 Uvod

Pri merjenju in kalibriranju mehanskih veličin, kot so sila, moment sile, tlak idr., se za pretvorbo mehanske veličine v električno običajno uporabljajo merilni pretvorniki, ki delujejo na principu merjenja deformacije materiala z merilnimi uporovnimi lističi [1]. Takšni pretvorniki potrebujejo za meritev merilni ojačevalnik, ki signal z merilnih lističev ustrezno zazna in prilagodi za prikaz. Ker lastnosti merilnih ojačevalnikov vplivajo na rezultat meritev, je potrebno ovrednotiti njihov prispevek k negotovosti rezultata meritve. V prispevku je predstavljena analiza stabilnosti merilnih ojačevalnikov na primeru precizijskih merilnih ojačevalnikov, ki se uporabljajo za najrazličnejše meritve v industriji, preskusnih in kalibracijskih laboratorijih in nacionalnih meroslovnih inštitutih.

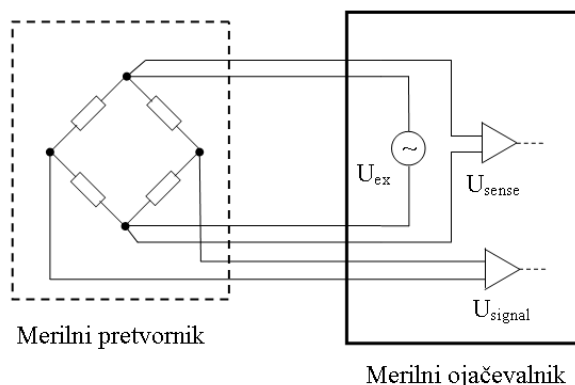
2 Merjenje mehanskih veličin

Osnovno električno vezje, ki se najpogosteje uporablja za merjenje mehanskih veličin, sestavljajo uporovni merilni lističi v kombinaciji z Wheatstonovim merilnim mostičem [2]. Uporovni merilni lističi spremenijo pri obremenitvi oz. mehanski deformaciji električno upornost, pri čemer je relativna sprememba električne upornosti sorazmerna z obremenitvijo. Za zaznavanje sprememb električne upornosti uporovnih lističev jih vežemo v Wheatstonov merilni mostič. Ta na podlagi vzbujanja z enosmerno ali izmenično napetostjo na

izhodu generira električno napetost, ki je sorazmerna z relativno spremembo upornosti v vejah mostiča. Razmerje med izhodno napetostjo in napetostjo vzbujanja pri nazivni obremenitvi oz. spremembi upornosti pretvornika je podano kot napetostno razmerje v enoti mV/V.

Komercialni merilni pretvorniki, poleg uporovnih merilnih lističev in Wheatstonovega mostiča, med drugim vsebujejo še dodatne upore za kompenzacijo linearnosti in vpliva temperature. Za praktično uporabo potrebujejo zunanji vir napetosti za vzbujanje mostiča in ustrezni merilnik za meritev izhodne napetosti. Nazivna občutljivost merilnih pretvornikov je odvisna od proizvajalca in namena uporabe, običajno pa pri nazivni obremenitvi znaša med 1,5 mV/V in 10 mV/V.

V večini primerov sta napetostni vir in merilnik napetosti združena v istem instrumentu, ki ga imenujemo merilni ojačevalnik. Digitalni merilni ojačevalniki omogočajo enostavno merjenje z merilnimi pretvorniki z uporovnimi lističi. Merilni ojačevalniki določijo napetostno razmerje med napetostjo vzbujanja in izhodom mostiča ter zagotovijo ustrezno ojačanje merilnega signala, kompenzacijo upornosti priključnih vodnikov, obdelavo signala (filtriranje), pretvorbo v poljubne enote (npr. mV/V, N, kg), prikaz rezultata in prenos izmerjenih vrednosti [3].



Slika 1. Shema merilne verige z merilnim pretvornikom in merilnim ojačevalnikom

Slika 1 prikazuje shemo merilne verige, ki jo sestavljata merilni pretvornik z merilnimi lističi v Wheatstonovem mostiču in merilni ojačevalnik z virom napetosti vzbujanja (U_{ex}), zajemom signala izhoda mostiča (U_{signal}) ter kompenzacijo upornosti napajalnih vodnikov z meritvijo dejanske napetosti vzbujanja na mostiču (U_{sense}).

Da lahko zagotovimo kakovost meritev, mora biti merilna veriga ustrezno kalibrirana. Kalibracijo merilnega pretvornika lahko izvedemo skupaj z merilnim ojačevalnikom, kjer primerjamo prikazano vrednost na merilnem ojačevalniku z referenčno vrednostjo obremenitve pretvornika. V tem primeru je uporaba merilnega pretvornika možna le z istim merilnim ojačevalnikom, saj so v rezultatih kalibracije zajeti tako vplivi merilnega pretvornika kot ojačevalnika.

Kalibracijo pa lahko izvedemo tudi ločeno za merilni pretvornik in ločeno za merilni ojačevalnik. Pri kalibraciji merilnega pretvornika določimo napetostno razmerje na izhodu pretvornika pri referenčnih obremenitvah. Pri kalibraciji merilnega ojačevalnika pa s simulatorjem/kalibratorjem napetostnih razmerij (napetostni delilnik) preverimo prikaz vrednosti na merilnem ojačevalniku.

Merilni ojačevalnik je pomemben del merilne verige in predstavlja pri vsakem merjenju vir negotovosti, ki ga moramo ovrednotiti, ter glede na zahtevnost meritve tudi upoštevati.

3 Merilni ojačevalniki in simulator napetostnega razmerja

V industriji in raziskovalnih inštitucijah se uporabljajo različni tipi merilnih ojačevalnikov, ki se razlikujejo po načinu delovanja, območju, točnosti in namenu uporabe. V nadaljevanju so predstavljene bistvene značilnosti treh precizijskih ojačevalnikov, pri katerih smo izvedli analizo stabilnosti:

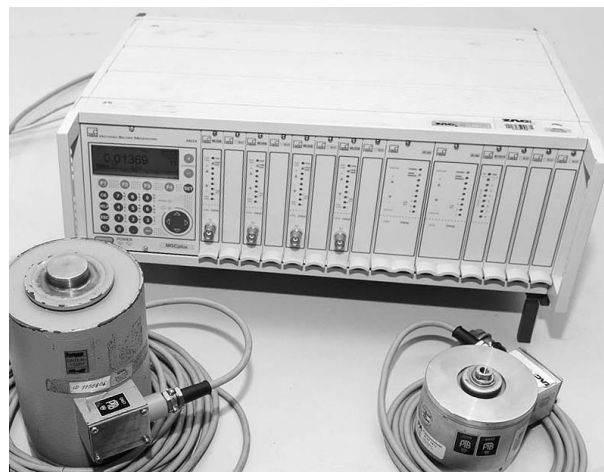
- Merilni ojačevalni modul ML55B vgrajen v sistem HBM MGCplus, slika 2.
- Merilni ojačevalni modul ML38B vgrajen v sistem HBM MGCplus, slika 2.
- Merilni ojačevalnik HBM DMP41 [5], slika 3.

Merilni ojačevalni modul HBM ML55B [4] je ojačevalnik točnostnega razreda 0,03, z merilnim območjem do ± 15 mV/V, z izmenično napetostjo vzbujanja 1 V, 2,5 V ali 5 V in frekvenco vzbujanja 4800 Hz. Namenjen je meritvam s pretvorniki z uporovnimi lističi v polni ali polovični mostični vezavi, z upornostjo med 50 Ω in 5000 Ω . Razločljivost prikaza je 0,00001 mV/V. Zaradi visoke frekvence vzbujanja mostiča je primeren tudi za meritve dinamičnih veličin.

Merilni ojačevalni modul HBM ML38B [4] je merilni ojačevalnik točnostnega razreda 0,0025, z merilnim območjem do ± 10 mV/V, z izmenično napetostjo vzbujanja 2,5 V ali 5 V in frekvenco vzbujanja 225 Hz. Namenjen je za meritve s pretvorniki z uporovnimi lističi v polni mostični vezavi, z upornostjo med 30 Ω in 4000 Ω . Razločljivost ojačevalnika je 1000000 razdelkov v izbranem območju. Ojačevalnik je primeren predvsem za merjenje statičnih veličin z visoko točnostjo, npr. kalibriranje meril.

Merilni ojačevalnik DMP41 [5] je ojačevalnik točnostnega razreda 0,0005, za območje merjenja do

± 10 mV/V, z izmenično napetostjo vzbujanja mostiča 2,5 V, 5 V ali 10 V in frekvenco 225 Hz. Namenjen je meritvam s pretvorniki z uporovnimi lističi v polni mostični vezavi, z upornostjo med 75 Ω in 4000 Ω . Razločljivost ojačevalnika je 2000000 razdelkov v izbranem območju. Ojačevalnik se uporablja predvsem v nacionalnih meroslovnih inštitutih in raziskovalnih inštitutih, kjer je zahtevana največja točnost [6].



Slika 2. Merilni sistem HBM MGCplus z ojačevalnimi moduli ML38B in ML55B ter merilnimi pretvorniki sile

Vsi naštetni merilni ojačevalniki omogočajo možnost samodejne periodične interne kalibracije med merjenjem, s katero izboljšajo stabilnost meritev.



Slika 3. Merilni ojačevalnik HBM DMP41 in kalibrator HBM K3608

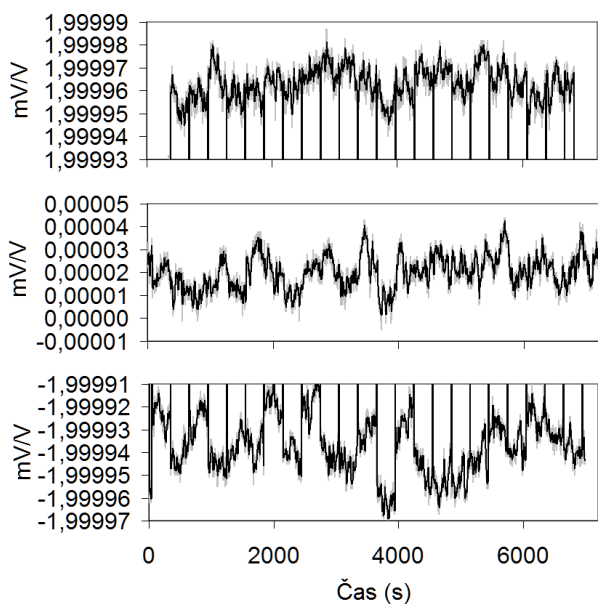
Za kalibriranje merilnih ojačevalnikov uporabljamo simulatorje mostičev z uporovnimi lističi (kalibratorje), ki omogočajo izbiro vrednosti referenčnega napetostnega razmerja in jih priključimo na merilni ojačevalnik namesto merilnega pretvornika. S primerjavo med izbrano referenčno vrednostjo in prikazom napetostnega razmerja na merilnem ojačevalniku lahko določimo odstopanje kazanja merilnega ojačevalnika. Poleg preverjanja odstopanja prikaza merilnega ojačevalnika od referenčne vrednosti,

omogočajo kalibratorji tudi ugotavljanje kratkotrajne in dolgotrajne stabilnosti merilnega ojačevalnika.

Za meritev stabilnosti omenjenih merilnih ojačevalnikov smo uporabili kalibrator HBM K3608 [7], ki omogoča simuliranje merilnih pretvornikov z uporovnimi lističi v polni mostični vezavi, z upornostjo 350 Ω ali 1000 Ω , za enosmerno ali izmenično napetost vzbujanja do 10 V. Najvišja dovoljena frekvenca izmenične napetosti vzbujanja je 5 kHz. Kalibrator omogoča izbiro referenčnih vrednosti napetostnega razmerja v območju od $\pm 0,1$ mV/V do ± 100 mV/V.

4 Rezultati meritev stabilnosti

S kalibratorjem K3608 smo preverili stabilnost posameznega ojačevalnika. Meritve smo izvedli za vsak ojačevalnik v treh merilnih točkah: pri simuliranih napetostnih razmerjih +2 mV/V, 0 mV/V in -2 mV/V. Za temperaturno stabilizacijo je bil vsak merilni ojačevalnik priključen na kalibrator K3608 vsaj eno uro pred pričetkom meritve. Kalibrator K3608 je bil nastavljen na vrednost interne upornosti 350 Ω , kar je običajna vrednost za merilne pretvornike sile.

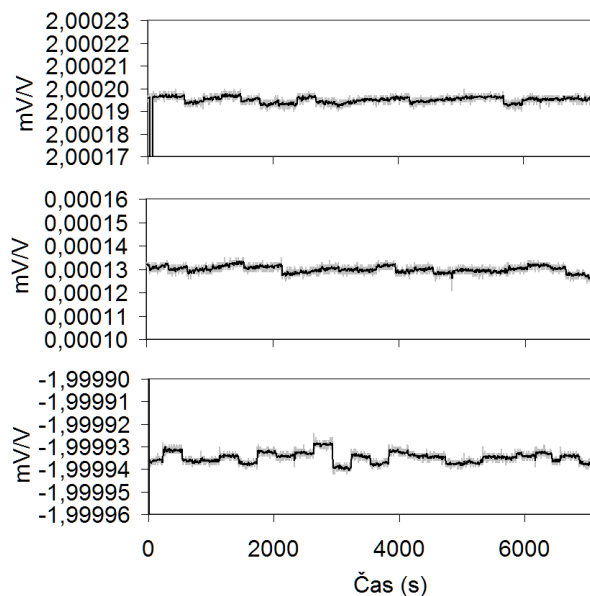


Slika 4. Stabilnost ojačevalnika HBM ML55B pri simuliranih vrednostih +2 mV/V, 0 mV/V in -2 mV/V. Izmerjene vrednosti (sivo) in drseča srednja vrednost (črna).

Parametri za nizkoprepustni filter so bili na vseh ojačevalnikih nastavljeni na vrednost med 1 Hz in 2 Hz, odvisno od zmožnosti ojačevalnika (1,25 Hz pri ML55B, 1,5 Hz pri ML38B in 1,0 Hz pri DMP41). Izbrali smo tip filtra Bessel. Na vseh ojačevalnikih je bila aktivna funkcija samodejne periodične interne kalibracije med merjenjem. Za vsako izbrano simulirano vrednost smo zajeli izmerjene vrednosti z ojačevalnika v intervalu 7200 sekund s frekvenco zajema 1 Hz. Temperaturni pogoji okolja med meritvami so bili v območju 24 $^{\circ}\text{C} \pm 2$ $^{\circ}\text{C}$, meritve pa smo izvedli v treh zaporednih dneh.

Na slikah 4, 5 in 6 so prikazani grafi izmerjenih vrednosti za posamezni ojačevalnik. Pri vsakem

ojačevalniku so podani rezultati meritev za simulirana napetostna razmerja +2 mV/V, 0 mV/V in -2 mV/V. Na grafih so izrisane izmerjene vrednosti (siva barva) in drseče srednje vrednosti izračunane iz 10 vzorcev meritev (črna barva). Za lažjo primerjavo stabilnosti posameznih ojačevalnikov pri vseh treh simuliranih vrednostih napetostnega razmerja, smo na vseh diagramih zajeli na ordinatni osi enak razpon vrednosti (0,00006 mV/V).

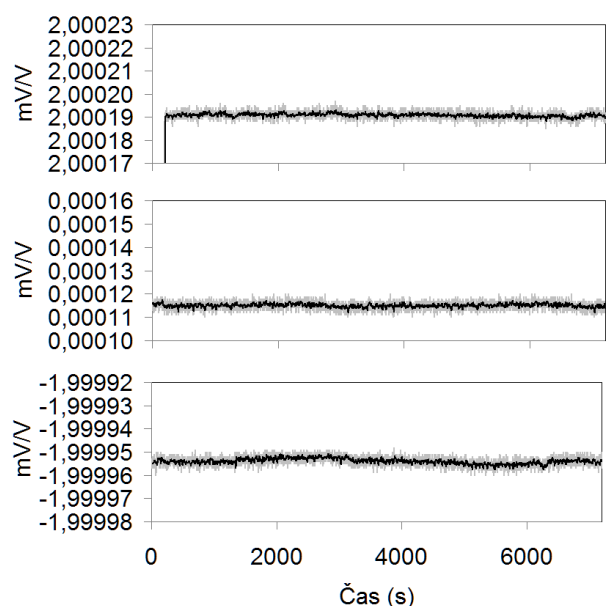


Slika 5. Stabilnost ojačevalnika HBM ML38B pri simuliranih vrednostih +2 mV/V, 0 mV/V in -2 mV/V. Izmerjene vrednosti (sivo) in drseča srednja vrednost (črna).

Na sliki 4 je predstavljena stabilnost merilnega ojačevalnika ML55B. Iz slike je razvidno, da je stabilnost v času 120 minut pri simuliranih napetostnih razmerjih +2 mV/V in 0 mV/V v območju $\pm 0,00002$ mV/V. Pri vrednosti -2 mV/V je stabilnost slabša in znaša $\pm 0,00004$ mV/V. Pri simuliranih napetostnih razmerjih -2 mV/V in +2 mV/V je samodejna interna kalibracija merilnega ojačevalnika povzročila napačni prikaz izmerjenih vrednosti med izvajanjem periodične kalibracije (v primeru meritev s slike 4 so bila odstopanja do 0,001 mV/V). Iz slike so razvidne tudi korekcije izmerjenih vrednosti v rednih intervalih po samodejni interni kalibraciji.

Na sliki 5 je predstavljena stabilnost merilnega ojačevalnika ML38B. Izmerjene vrednosti v času 120 minut so pri simuliranih napetostnih razmerjih +2 mV/V in 0 mV/V v območju $\pm 0,000005$ mV/V in pri simuliranem napetostnem razmerju -2 mV/V v območju $\pm 0,000009$ mV/V. Tudi v tem primeru so jasno vidne korekcije vrednosti po samodejni periodični interni kalibraciji merilnega ojačevalnika. Najbolj izrazite so korekcije pri simuliranem napetostnem razmerju -2 mV/V. Stabilnost drseče srednje vrednosti pri simuliranem napetostnem razmerju +2 mV/V in 0 mV/V je v območju $\pm 0,000003$ mV/V in pri simuliranem napetostnem razmerju -2 mV/V v območju $\pm 0,000006$ mV/V.

Na sliki 6 je predstavljena stabilnost merilnega ojačevalnika DMP41. Izmerjene vrednosti v času 120 minut so pri simuliranem napetostnem razmerju +2 mV/V in 0 mV/V v območju $\pm 0,000004$ mV/V ter pri simuliranem napetostnem razmerju -2 mV/V v območju $\pm 0,000006$ mV/V. Pri tem ojačevalniku, kljub samodejni interni kalibraciji, ne prihaja do očitnih skokov izmerjenih vrednosti. V primeru drseče srednje vrednosti je stabilnost boljša kot $\pm 0,000003$ mV/V pri simuliranih napetostnih razmerjih +2 mV/V in 0 mV/V ter boljša kot $\pm 0,000004$ mV/V pri simuliranem napetostnem razmerju -2 mV/V.



Slika 6. Stabilnost ojačevalnika HBM DMP41 pri simuliranih vrednostih +2 mV/V, 0 mV/V in -2 mV/V. Izmerjene vrednosti (sivo) in drseča srednja vrednost (črno).

5 Zaključek

Predstavljene meritve poudarjajo vpliv stabilnosti merilnih ojačevalnikov na rezultat meritev. Pri izvedenih meritvah je imela stabilnost ojačevalnika cca. 5-krat večji vpliv na rezultat meritev kot razločljivost ojačevalnika.

Kadarkoli so merilni ojačevalniki kalibrirani ločeno od merilnih pretvornikov, moramo, med izvedbo kalibracije ali po njej, ovrednotiti in po potrebi upoštevati tudi vpliv stabilnosti merilnega ojačevalnika kot prispevek k merilni negotovosti.

Izvedene meritve predstavljajo primer ovrednotenja stabilnosti merilnih ojačevalnikov s simulatorjem referenčnih napetostnih razmerij in kažejo stabilnost ojačevalnika v relativno kratkem časovnem obdobju 120 minut. Za dolgotrajno časovno stabilnost je potrebno merilne ojačevalnike redno kalibrirati v ustreznih kalibracijskih laboratorijih ali preverjati s kalibriranimi simulatorji napetostnega razmerja.

Literatura

- [1] E. Layer, K. Tomczyk: Measurements, Modeling and Simulation of Dynamic Systems, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010
- [2] S.A.Dyer: Wiley Survey of Instrumentation and Measurement, John Wiley and Sons, 2004
- [3] D.M.Stefanescu: Handbook of force transducers – Principle and components, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011
- [4] Measuring Amplifier System MGCplus Specifications, Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH; www.hbm.com
- [5] DMP41 Digital precision measuring devices; Datasheet, Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH; www.hbm.com
- [6] A. Schaefer, H. Kitzing: DMP41- A new chapter of ultra-precision instrument for strain gauge transducers, XX IMEKO Word Congress, 2012, Busan, Republic of Korea
- [7] Calibration Unit for measurement systems with strain gauge transducers; Operating manual; Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH; www.hbm.com