

Merenje sile mernim trakama sa pobudom naizmeničnim naponom i primenom metode digitalnog lock-in pojačavača

Milica S. Stojanović
Katedra za merenja
Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet
Niš, Srbija
milica.stojanovic@elfak.ni.ac.rs,
orcid.org/0009-0000-5528-3675

Dragan B. Živanović
Katedra za merenja
Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet
Niš, Srbija
dragan.zivanovic@elfak.ni.ac.rs,
orcid.org/0000-0002-9880-2305

Jelena R. Đorđević Kozarov
Katedra za merenja
Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet
Niš, Srbija
kozarov@elfak.ni.ac.rs,
orcid.org/0000-0002-6941-4098

Milan M. Simić
Katedra za merenja
Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet
Niš, Srbija
milan.simic@elfak.ni.ac.rs,
orcid.org/0000-0003-2411-3571

Miroljub T. Pešić
Katedra za merenja
Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet
Niš, Srbija
miroljub.pesic@elfak.ni.ac.rs,
orcid.org/0009-0006-1909-6972

Abstract—Prilikom pobude mernog mosta sa mernim trakama jednosmernim naponom, mogu se javiti greške usled termoelektričnih napona u kolu mernog pretvarača, šumova niskih frekvencija, kao i usled ofset napona u mernom kolu, što smanjuje tačnost merenja. Ukoliko se merni most sa mernim trakama pobuđuje naizmeničnim signalom, ove greške se mogu eliminisati.

U radu je prikazan princip merenja sile korišćenjem mernih traka povezanih u merni most, koji se pobuđuje naizmeničnim naponom. Primenom metode digitalnog lock-in pojačavača, postiže se poboljšanje tačnosti i osetljivosti merenja.

Ključne reči—merenje sile, merne trake, digitalin pojačavač, lock-in pojačavač

UVOD

Senzori sile (load cells) su mehanički pretvarači koji na izlazu generišu električni signal, najčešće napon, linearno proporcionalan primenjenoj sili. Najčešće se izrađuju od aluminijuma ili nerđajućeg čelika, a osnova senzora se mašinski precizno obrađuje kako bi se omogućilo lokalizovano naprezanje, istezanje ili sabijanje, nakon delovanja sile. Na mestima gde je naprezanje najveće, pričvršćuju se osetljivi elementi. Iako postoje različite vrste senzora sile, hidraulični, pneumatski, kapacitivni i piezoelektrični, najzastupljeniji su senzori sa mernim trakama, zbog svoje tačnosti, pouzdanosti. Pod dejstvom sile dolazi do promene otpornosti mernih traka, koje se zatim konvertuju u električni signal proporcionalan sili. [1]

Merne trake se izrađuju od metalne žice, folije ili poluprovodničkih materijala, a karakterišu ih visoka osetljivost i gotovo linearan odnos između deformacije i promene otpornosti. Zahvaljujući tome, omogućavaju veoma precizno merenje, sa tačnošću od $\pm 0.1\%$ do $\pm 0.005\%$, što ih čini pogodnim za primenu u zahtevnim i industrijski izazovnim uslovima kao što su automobilska industrija, vazduhoplovstvo, automatizacija i medicinska oprema. [1]

Kako bi se i male promene otpornosti, koje se javljaju usled delovanja sile, konvertovale u električni signal, merne trake se vezuju u Vitstonov most. Najčešće se primenjuje konfiguracija punog mosta, u kojoj se za merenje sile koriste četiri merne trake. Kada su merne trake vezane u most koji je u ravnoteži i pobuđuje se jednosmernim ili naizmeničnim signalom, na izlazu mosta se javlja električni signal, napon, koji je direktno srazmeran naponu napajanja. [1]

Signal koji se dobija na izlazu mosta se najčešće vodi na pojačavač i A/D konvertor. U slučaju kada se merni most napaja jednosmernim signalom, na izlazu mosta se, pored korisnog signala, javljaju i signali greške. Greške kao što je ofset se mogu otkloniti kalibracijom, ali drift ofseta usled promene temperature se ne može otkloniti. Ukoliko se most napaja naizmeničnim signalom, polaritet signala na izlazu mosta, tj. na ulazu A/D konvertora se menja u zavisnosti od periode ulaznog signala, međutim, polaritet signala greške se ne menja jer se put signala kroz kolo ne menja. To znači da, kada je greška konstantna u toku pozitivne i negativne poluperiode, može se otkloniti izračunavanjem srednje razlike rezultata A/D konverzije u pozitivnoj i negativnoj poluperiodi. [2]

Precizno merenje signala u prisustvu šuma frekvencije u opsegu rada mernog pretvarača predstavlja čest izazov u nauci i inženjerskoj praksi. Klasični pojačavači često nisu dovoljno efikasni u ovakvim uslovima, jer ne mogu da izdvoje frekvencijske komponente koje su od interesa. Zbog toga dolazi do narušavanja odnosa signal-šum, signali reda mikrovolti se teško detektuju usled prisustva šuma čiji je nivo u milivoltima. [3]-[5]

Kako bi se rešio ovaj problem, najčešće se koristi lock-in pojačavač (LIA), koji pomoću fazno osetljive detekcije omogućava izdvajanje slabih signala iz pozadinskog šuma.

Napravljeni su tako da potpuno odbacuju smetnje kao što su ofset i šum na frekvencijama različitim od željene. Prvi put su predstavljani 1941. godine, a njihov princip rada zasniva se na

Ovaj rad je podržan od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije [broj ugovora 451-03-137/2025-03/200102]



modulaciji ulaznog signala na poznatoj referentnoj frekvenciji, nakon čega se željeni signal izdvaja primenom mešanja (miksovanja) i niskopropusnog filtriranja. [3]-[5]

Savremeni LIA sistemi koriste digitalnu obradu signala (DSP) ili programabilna logička kola (FPGA) kako bi postigli bolje performanse, naročito pri frekvencijama ispod 1 MHz. Ipak, pri višim frekvencijama implementacija lock-in metode često zahteva kombinovani analogno-digitalni pristup, usled ograničenja A/D konvertora. [3]-[5]

MERNI MOST SA AC NAPAJANJEM

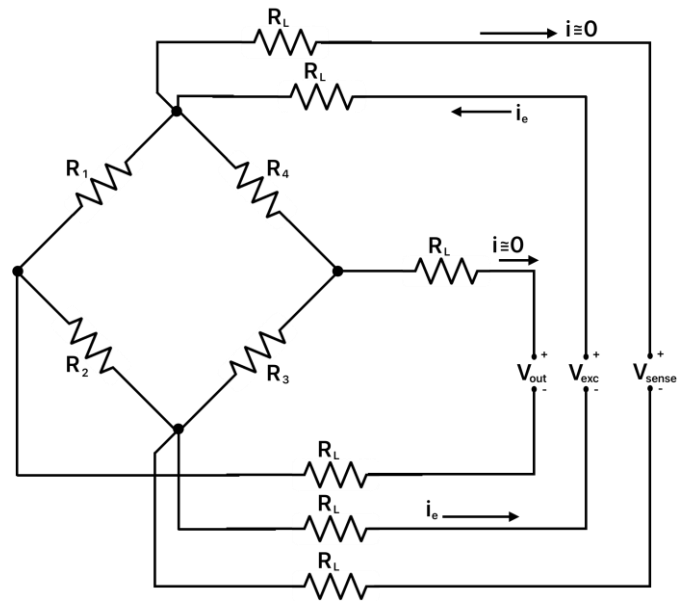
Konfiguracija Vitstonovog mosta sa četiri merne trake je prikazana na sl. 1. Povezivanje mosta sa ostatkom mernog kola se vrši sa četvorožičnim ili šestožičnim kablom, kao na sl. 1, da bi se izmerio stvarni napon napajanja mosta i tako kompenzovao njegov pad usled opterećenja, tj. struje mosta i otpornosti kablova. Kada sve četiri merne trake imaju istu vrednost otpornosti, most se nalazi u ravnoteži i izlazni napon V_{iz} je nula. Ako su merne trake postavljene tako da se, usled dejstva sile, R_1 i R_3 izdužuju, a R_2 i R_4 sabijaju, na izlazu će se javiti napon veći od nule. [6]

Jedan od najčešćih izvora greške merenja u kolu sa mernim trakama jeste ofset napon, koji nastaje usled varijacija u komponentama od kojih je kolo sastavljeno i menja se sa temperaturom. Prednost AC pobude jeste u tome što se taj DC ofset ne pojačava. Greške se javljaju i usled pojave šuma; sa smanjenjem frekvencije, šum raste. Visokofrekvencijski šum se lako može eliminisati primenom različitih filtera, ali niskofrekvencijski šum predstavlja ozbiljan problem. [6]

Ukoliko se jednosmerno napajanje zameni naizmeničnim, izlazni napon mosta će takođe biti naizmenični signal. U kolu sa AC signalom moguće je veoma lako eliminisati DC komponentu signala i vršiti dalju obradu samo AC signala. Na taj način se eliminišu greške koje se javljaju usled nestabilnosti DC napona. Nakon eliminacije DC ofseta, AC signal se pojačava, filtrira, ispravlja i usrednjava kako bi se dobio DC signal, koji predstavlja originalni signal niskog nivoa. [6]

DIGITALNI LOCK-IN POJAČAVAČ

Lock-in pojačavač je uređaj koji može izdvojiti željeni signal određene frekvencije iz signala koji, pored željenog signala, sadrži i značajan nivo šuma drugih frekvencija. Sinhronizovanjem izlaznog sa ulaznim signalom na određenoj frekvenciji i filtriranjem drugih frekvencija koje sadrže šum, LIA povećava odnos signal-šum sistema. Digitalni LIA radi tako što se izvrši digitalna konverzija signala poželjno sa 14 do 16 bitnim A/D konvertorom. Ako je radna frekvencija napajanja mosta 1kHz, onda A/D konvertor sa 1 MHz brzinom uzorkovanja omogućava računicu sa 1000 uzorka po periodu. Date matematičke operacije sa zatim vrše u digitalnom domenu. Ako se kalkulacije vrše standardnim mikrokontrolerima bez upotrebe DSP (digital signal procesing) kola, i nije moguće postići zahtevani protok matematičkih operacija, moguće je kalkulacije vršiti nad baferovanim signalima u samo pojedinim periodama mernog signala, to jest sa dovoljnim preskakanjem perioda. Na sl.2 su prikazane osnovne komponente LIA. [4],[5]



Sl. 1 Vitstonov most sa četiri merne trake

Ulazni signal se prvo pojačava, a zatim filtrira filtrom propusnikom opsega. Nakon filtriranja, signal se množi sa referentnim signalom i vodi do niskopropusnog filtra kako bi se otklonile visokofrekvencijske komponente i nakon filtriranja ostala samo DC komponenta. [4], [5]

LIA poseduje dva referentna signala, jedan signal ima istu fazu kao ulazni signal, a drugi je fazno pomeren za $\frac{\pi}{2}$. Periodični signal na ulazu LIA se množi sa referentnim signalom iste faze kako bi se dobila X komponenta, a sa referentnim signalom čija je faza pomeren za $\frac{\pi}{2}$ kako bi se dobila Y komponenta signala. X i Y se zatim vode do niskopropusnog filtra kako bi se eliminisale visokofrekvencijske komponente. [5]

Princip rada digitalnog LIP se može objasniti i na sledeći način. Ulazni signal se može opisati na sledeći način

$$V_{ul} = V_s \cos(\omega_{ref} t + \theta_s), \quad (1)$$

gde je V_{ul} ulazni signal, ω_{ref} kružna frekvencija ulaznog signala, a θ_s faza ulaznog signala. Referentni signali će imati oblik:

$$V_{refcos} = V_{ref} \cos(\omega_{ref} t + \theta_{ref}), \quad (2)$$

$$V_{refsin} = V_{ref} \sin(\omega_{ref} t + \theta_{ref}). \quad (3)$$

Nakon množenja (1) sa (2) i (3) i propuštanja signala kroz niskopropusni filter, dobija se

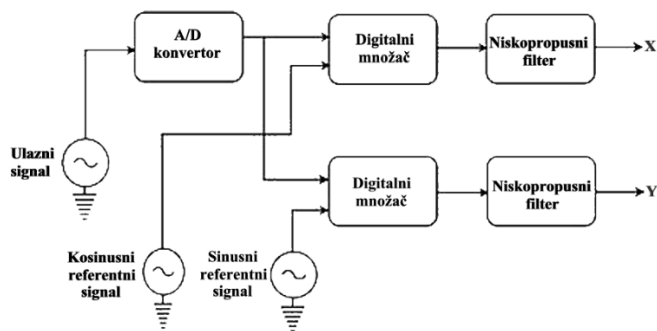
$$X = \frac{1}{2} V_s V_{ref} \cos(\theta_s - \theta_{ref}), \quad (4)$$

$$Y = \frac{1}{2} V_s V_{ref} \sin(\theta_s - \theta_{ref}). \quad (5)$$

Na osnovu (4) i (5), može se naći amplituda, (6), i faza izlaznog signala, (7). [5]

$$A = 2\sqrt{X^2 + Y^2}, \quad (6)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{Y}{X}. \quad (7)$$



Sl. 2 Blok Dijagram lock-in pojačavača [5]

ZAKLJUČAK

Tokom merenja se javljaju greške koje je neophodno u što većoj meri eliminisati. Greške uzrokovane nestabilnošću jednosmernog napona napajanja i ofsetom mogu se uspešno smanjiti primenom Vitstonovih mostova sa naizmeničnim napajanjem. Kada je neophodno precizno merenje u uslovima prisustva visokog nivoa šuma, posebno pri malim signalima, preporučljivo je koristiti lock-in pojačavač, koji omogućava selektivno izdvajanje signala željene frekvencije i efikasno potiskivanje smetnji. U ovom radu je prikazan osnovni princip rada ovih kola.

S obzirom na široku primenu merenja sile u industriji, potrebno je obezbediti što veću tačnost i pouzdanost mernog sistema. Imajući u vidu prednosti mosta sa AC napajanjem i digitalnog lock-in pojačavača, dalja istraživanja biće usmerena ka razvoju metode za merenje sile koja integriše ove tehnologije.

LITERATURA

- [1] Web site: https://www.a-tech.ca/Product/Information/2/Load_Cells_Force_Transducers/, pristupljeno 05.05.2025.
- [2] Application Note, Renesas, RX23E-B Group, Example of weight measurement using AC excited load cell, R01AN6517EJ0100 Rev.1.00, 19. oktobar, 2023
- [3] G. A. Stimpson, M. S. Skilbeck, R. L. Patel, B. L. Green and G. W. Morley, „An open-source high-frequency lock-in amplifier“, Rev. Sci. Instrum. 90, 094701 (2019); DOI: 10.1063/1.5083797.
- [4] A. J. Harvie and J. C. de Mello, “OLIA: An open-source digital lock-in amplifier”, Sec. Sensor Devices, vol. 4, 2023, DOI: 10.3389/fsens.2023.1102176.
- [5] S. Bhattacharyya, R. N. Ahmed, B. B. Purkayastha and K. Bhattacharyya, “Implementation of digital lock-in amplifier”, Journal of Physics: Conference Series 759 (2016) 012096, DOI: 10.1088/1742-6596/759/1/012096.
- [6] Group Four Transducers Inc, “The secret to designing high-resolution load cell electronics”, 1.800.419.1444,

ABSTRACT

When a strain gauge bridge is excited with a DC voltage, measurement errors may occur due to thermoelectric voltages in the transducer circuit, low-frequency noise, and offset voltages within the measurement circuit, all of which reduce measurement accuracy. If the strain gauge bridge is excited with an AC signal, these errors can be eliminated.

This paper presents the principle of force measurement using strain gauges connected in a Wheatstone bridge, excited by an AC voltage. By applying the digital lock-in amplifier method, an improvement in measurement accuracy and sensitivity is achieved.

FORCE MEASUREMENT USING STRAIN GAUGES WITH AC EXCITATION AND DIGITAL LOCK-IN AMPLIFIER METHOD

Milica S. Stojanović, Dragan B. Živanović, Jelena R. Đorđević
Kozarov, Milan M. Simić and Mirosljub T. Pešić