

Avtomatizacija sistema za umerjanje merilnikov napetostnega razmerja

Ana Mandeljc¹, Miha Hiti², Gaber Begeš¹

¹ Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, Tržaška c. 25, 1000 Ljubljana

² Zavod za gradbeništvo Slovenije (ZAG), Laboratorij za metrologijo, Dimičeva 12, 1000 Ljubljana

E-pošta: ana.mandeljc@fe.uni-lj.si

Automation of system for calibration of voltage ratio meters

Abstract. Our objective was to develop a control circuit in combination with a suitable drive for changing the position of the switches for a voltage ratio meter calibration system. It has two rotary switches, each switch allowing nine positions. At the same time, it was also necessary to establish communication between the computer and the voltage ratio meter, so that the computer could automatically obtain and store the measured values for each of the selected combination of switches.

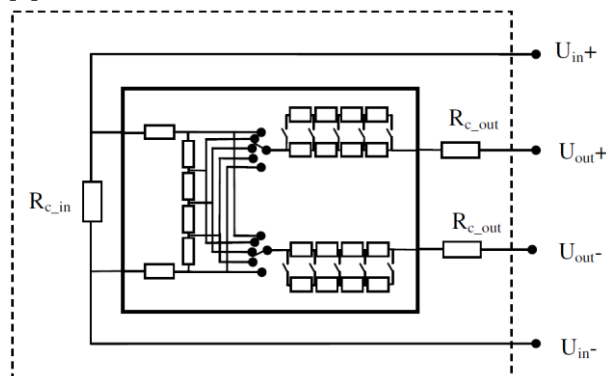
1 Uvod

Za umerjanje merilnikov napetostnega razmerja lahko kot referenčne etalone uporabljamo simulatorje mostičev z uporovnimi lističi. Ti omogočajo izbor različnih napetostnih delilnih razmerij, s čimer v izbranem območju merilnika lahko ugotovimo odstopanje prikaza od referenčnih vrednosti. Pri umerjanju simulatorjev nacionalni meroslovni inštituti in umerjevalni laboratoriji dosegajo najboljše vrednosti negotovosti umerjanja od 10 nV/V oziroma 20 nV/V navzgor, kar pa v primeru nizkih merjenih vrednosti še vedno pomeni preveliko relativno negotovost umerjanja za mnoge končne uporabnike. Negotovost umerjanja merilnikov napetostnega razmerja pri nizkih vrednostih lahko bistveno izboljšamo z uporabo simulatorja, ki preverja linearnost merilnika po postopku kombinatornega umerjanja [1].

V postopku kombinatornega umerjanja uporabljamo več med seboj neodvisnih etalonov, katerih vrednosti lahko seštevamo in preko tega tvorimo nove referenčne vrednosti. S tem dobimo večje število referenčnih vrednosti, kar nam omogoči ovrednotenje pogreška linearosti instrumenta. Tega ovrednotimo na podlagi porazdelitve razlike med izračunanimi ter izmerjenimi vsotami združenih etalonov, pri čemer ni nujno, da poznamo vrednosti osnovnih etalonov. Za izvedbo kombinatornega umerjanja lahko uporabimo simulator na osnovi uporovnega napetostnega delilnika, ki ob konstantni vhodni in izhodni upornosti omogoča prosto združevanje posameznih izhodnih napetosti, tako na posameznem uporju kot tudi poljubni kombinaciji zaporedno vezanih uporov v delilniku [1].

Električno vezje simulatorja (Slika 1) sestoji iz napetostnega delilnika, ki ima med napetostne napajalne sponke zaporedno vezane upore, stikalnega vezja s

stikali, ki so priključena v vozlišča prej omenjene uporovne verige in dveh kompenzacijskih uporovnih vezij, ki sta zaporedno vezani v izhodni veji delilnika [1].



Slika 1: Skica vezja v simulatorju [1].

S pomočjo kompenzacijskih uporov v kompenzacijskih vezjih, izhodna upornost napetostnega delilnika ostaja nespremenjena, ne glede na aktivirane upore v delilniku. Ob premiku para stikal za izbiro vozlišč v napetostnem delilniku, se aktivirata tudi odgovarjajoča para stikal v kompenzacijskih vezjih, s čimer se vrednosti ustreznih uporov v teh vezjih zmanjšajo na polovično vrednost v vsaki veji. S tem se ohrani konstantna vsota upornosti v izhodni zanki. Razporeditev elementov zagotavlja tudi simetrično konfiguracijo vezja. Vse to nam omogoča izbor padcev napetosti na posameznem uporju in poljubni kombinaciji zaporedno vezanih uporov delilnika [1].

Vezje omenjenega simulatorja je sestavljeno iz 8 osnovnih uporov, kar pomeni 36 možnih kombinacij uporov, posledično pa tudi 36 vrednosti delilnega razmerja. Te vrednosti so razporejene preko celotnega območja uporabe simulatorja, zaradi česar lahko enakomerno preverimo linearnost instrumenta.

Meritev, ki vključuje preverjanje vseh 36 možnih kombinacij uporov, se trenutno opravlja ročno. To je zaradi velikega števila potrebnih preklapov stikal in časa, potrebnega za ustalitev izmerjene vrednosti med posamezno meritvijo, utrujajoče in monotono opravilo za operaterja. Ta mora stikala preklapljati po vnaprej določenem protokolu, izmerjene vrednosti pa prav tako beležiti ročno, kar v meritev vnaša možnost napak. Dotikanje stikal lahko vpliva tudi na dvig temperature v simulatorju, hkrati pa je ta izpostavljen še drugim negativnim zunanjim vplivom okolja kot so vlaga, tresljaji in podobno.

Prav zaradi tega avtomatizacijo postopka preverjanja linearnosti merilnikov napetostnega razmerja vidimo kot smotno rešitev za razbremenitev operaterja, zmanjšanje števila potencialnih napak in posledično izboljšanje kakovosti opravljenih meritev. Avtomatizacija postopka bi prav tako omogočila, da simulator lahko zapremo v komoro, s čimer bi izločili vpliv motečih zunanjih faktorjev. Nenazadnje pa avtomatizacija postopka pomeni konstantne ter ponovljive časovne intervale preklpov stikal ter zajema izmerjenih vrednosti, kar omogoči uporabo tudi bolj kompleksnih merilnih protokolov in večjo primerljivost rezultatov.

Namen članka je predstaviti postopek avtomatizacije sistema za preverjanje linearnosti, ki je del postopka za umerjanje merilnikov napetostnega razmerja. Podoben problem je že obravnaval Schäck, ki pa je za aktivacijo stikal, namesto para rotacijskih stikal z več stikalnimi ploščami, uporabil releje [2].

2 Merilni sistem in postopek avtomatizacije

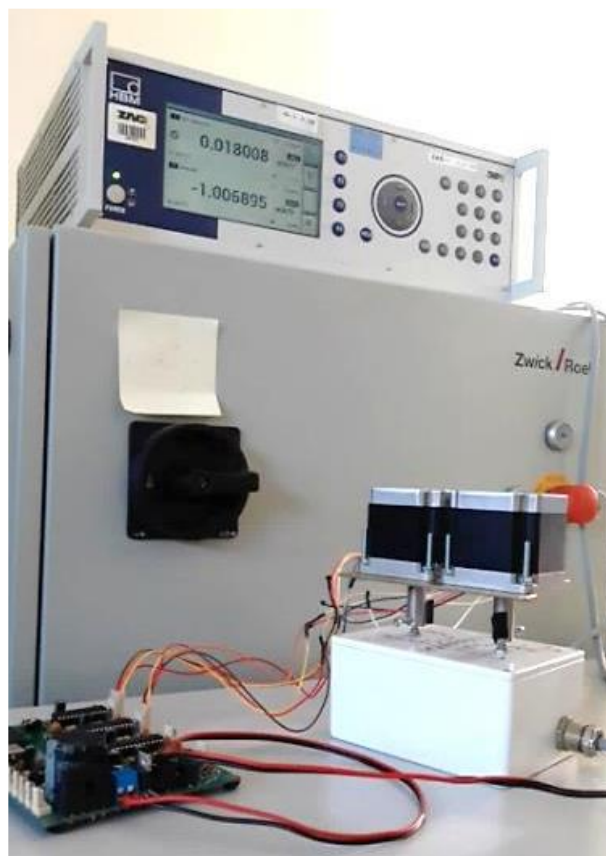
2.1 Merilni sistem

Merilni sistem sestoji iz merilnika napetostnega razmerja z resolucijo ranga nV/V, simulatorja pretvornika z uporabnimi lističi, krmilnika ter računalnika. Simulator in merilnik sta med seboj povezana s 6 žilnim kablom. Da bi preklapljanje stikal simulatorja lahko avtomatizirali, smo se odločili za uporabo 2 dvofaznih koračnih motorjev, proizvajalca Sanyodenki, model 103H7126-0740. Osnovni korak motorja je 1.8° . Razlika med sosednjima položajema stikala je 30° , kar pomeni, da mora motor za en preklap stikala opraviti 17 korakov. Za krmiljenje motorjev smo uporabili 4 kanalno krmilno ploščico K8097, proizvajalca Velleman. Po uspešni pritrditvi vseh komponent na ploščico, ta preko USB povezave z računalnikom omogoča krmiljenje do 4 koračnih motorjev s pomočjo programske opreme, dostopne na spletu. Merilnik in računalnik med seboj komunicirata preko pošiljanja SCPI ukazov. Merilni sistem, z izjemo računalnika, je prikazan na Sliki 2.

Koračna motorja smo na nastavka za stikala pritrdili tako, da smo nanju privili kovinski puši, ki sta na drugi strani povezani z osema motorjev. Da se ohišji motorjev med vrtenjem osi ne bi premikali, smo ju privili na skupno kovinsko ploščico. Tak način povezave osi motorjev z nastavki za stikala omogoča enostavno namestitve in snemanje, zato manipulacijo s stikali zlahka spreminjamo iz ročne v avtomatizirano in obratno.

2.2 Program

Izkazalo se je, da že obstoječa programska oprema ne ustreza našim potrebam, saj smo morali za vsak premik motorja posebej poslati ukaz preko uporabniškega



Slika 2: Merilni sistem - merilnik napetostnega razmerja (zgoraj), simulator pretvornika z nameščenima koračnima motorjema (spodaj desno) in krmilnik (spodaj levo).

vmesnika. Zato smo se odločili razviti svoj program za krmiljenje motorjev.

Najprej smo s pomočjo programske opreme »Device Monitoring Studio«, proizvajalca HDD Software Ltd., zajeli ukaze, ki jih je že obstoječi program preko uporabniškega vmesnika pošiljal krmilni ploščici ter jih analizirali. Ugotovili smo, da posamezen ukaz sestoji iz 56 heksadecimalnih vrednosti – 4 končnih, 4 namenjenih preverjanju pravilnosti zapisa ukaza ter po 12 vrednosti za vsakega izmed 4 motorjev, ki podajajo informacijo o številu korakov, hitrosti ter smeri vrtenja. Ker smo uporabljali le 2 motorja, smo morali vrednosti za neuporabljen motorja nastaviti na 0. Na podlagi teh ugotovitev smo oblikovali ukaze, preko katerih krmilnik lahko sočasno ali posamično zavrti enega ali oba motorja hkrati, vsakega v poljubno smer, pri poljubni hitrosti in številu korakov.

V nadaljevanju smo v razvojnem okolju PyCharm, specifično namenjenega programiranju v jeziku Python, oblikovali program, ki je omogočal komunikacijo ter izmenjavo krmilnih ukazov med računalnikom in krmilnikom. Kasneje smo program dopolnili tako, da omogoča še komunikacijo z merilnikom, uvoz celotnega seznama ukazov za premike stikal iz tekstovne datoteke ter beleženje izmerjenih vrednosti v novo tekstovno datoteko.

V končni obliki program deluje tako, da najprej preveri ali sta stikali simulatorja v začetnih položajih – na mestih A0 in B0. Nato odpre serijska vrata za komunikacijo s krmilnikom in merilnikom, s slednjim preko pošiljanja konfiguracijskih ukazov omogoči komunikacijo ter preveri njegovo identifikacijo, uvozi datoteko z ukazi in ustvari datoteko za shranjevanje izmerjenih vrednosti. Datoteka z ukazi ima v vsaki vrstici zapisan en ukaz oziroma željen položaj stikal, v obliki »A1B4« – to pomeni stikalo A na položaju 1 in stikalo B na položaju 4, kar aktivira verigo uporov od R2 do R4. Program za vsako vrstico v datoteki izračuna razliko v položajih stikal glede na predhodni in trenutni ukaz. Glede na vrednost razlike, program pošlje krmilniku ustrezno število ukazov za vrtenje posameznega stikala v levo ali desno. Namreč, vsak izmed širih možnih ukazov – stikalo A levo/desno in stikalo B levo/desno, spremeni položaj stikala le za eno mesto v levo ali desno, kar posnema ročno upravljanje stikal. Na podlagi empiričnih opazovanj smo ugotovili, da je, glede na izbrano hitrost in kot zasuka, potrebno med dvema ukazoma pustiti 0,1 s časa, da krmilna ploščica uspe izvesti predhodni ukaz ter sprejeti novega. Po tem, ko sta stikali na novih položajih, program izvede premor, da se vrednost na merilniku ustali. Nato izbere ustrezen kanal na merilniku, ga prebere, iz prebranih podatkov izlušči izmerjeno vrednost in jo zapiše v novo vrstico tekstovne datoteke, namenjene shranjevanju. Ko program prebere prazno vrstico v tekstovni datoteki z ukazi, to smatra kot konec datoteke, zapre vrata za serijsko komunikacijo ter zaključi z izvajanjem.

3 Meritve

Da bi preverili uspešnost avtomatizacije postopka preverjanja linearnosti, smo s sistemom izvedli več meritev. Pri tem smo uporabili tri različne protokole – protokol s pozitivno polariteto (»POZ«), pri katerem se stikalo A premakne v naslednji položaj po tem, ko se stikalo B premakne preko vseh možnih položajev; protokol z obratno polariteto (»NEG«), pri katerem je gibanje stikal ravno obratno kot pri prvem protokolu (»POZ«) in rezultira v negativnih vrednostih napetostnega razmerja; ter izmenični protokol (»ALT«), pri katerem se zaporedno izmenjata položaja stikal A in B za pozitivno in negativno polariteto za vsako kombinacijo. Tako postopek preverjanja linearnosti merilnika zajema meritve izhoda simulatorja z merilnikom napetostnega razmerja pri vseh možnih kombinacijah.

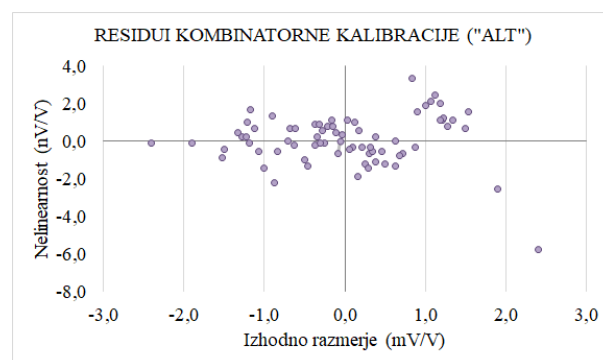
Meritve so se, poleg izbora merilnega protokola, med seboj razlikovale tudi glede na vrsto in frekvenco uporabljenega filtra na merilniku. Predvsem frekvenca filtra močno vpliva na hitrost ustalitve merjene vrednosti, zato moramo temu primerno prilagoditi čas trajanja premora izvajanja programa pred odčitavanjem vrednosti. Zaradi tega smo v začetnih meritvah najprej preverjali, kolikšen čas je potreben za ustalitev merjene vrednosti pri posamezni kombinaciji vrste in frekvence filtra. Pri končnih meritvah, katerih rezultate smo primerjali tudi z ročno izvedbo merilnega protokola,

smo izbrali Bessel filter, frekvence 0,1 Hz ter s trajanjem premora pred zajemom vrednosti 30 s.

Med izvajanjem meritev smo občasno opazili problem nepopolno opravljenega premika stikala pri protokolu »ALT« – meritve s takšno napako smo izključili iz nadaljnje obravnave. Problem je mehanske narave ter ga odpravimo s ponovno zategnitvijo vijakov – ker pri tem protokolu prihaja do večjega števila preklapov in večjih sprememb v položaju stikal nasploh, se občasno zgodi, da puša v manjši meri zdrsne z gredi motorja, ker se stiki med vijaki zrahljajo.

4 Rezultati

Ker pravih vrednosti osnovnih delilnih razmerij ne poznamo, pogrešek pri teh vrednostih določimo glede na regresijsko funkcijo vseh meritev. Pri ostalih vrednostih pa pogrešek kazanja določimo kot odstopanje kazanja vsote delilnih razmerij od izračunane vsote osnovnih delilnih razmerij za vsako točko. Standardno negotovost rezultata meritve linearnosti predstavlja standardna deviacija ostankov linearne regresije [1, 3]. Rezultate meritve nelinearnosti merilnika, torej odstopanje od »linearnega fita«, pri protokolu »ALT«, prikazuje Slika 3. Tem boljši rezultat pomeni tem manjše odstopanje in raztros vrednosti od 0 nV/V.



Slika 3: Nelinearnost umerjanega merilnika - protokol »ALT«.

Standardne negotovosti vseh meritev so zbrane v Tabeli 1 na naslednji strani. Kot zadovoljiv rezultat smatramo vrednosti standardne negotovosti ranga 10^{-6} in manj. Tak kriterij smo izbrali zato, ker je 10^{-6} razločljivost prikaza trenutno najboljšega komercialno dosegljivega merilnika napetostnega razmerja za mostiče z uporovnimi lističi HBM DMP41 [4], s katerim smo tudi sami izvajali meritve. Prav tako je laboratorij akreditiran za umerjanje z vrednostmi negotovosti 3×10^{-6} za ročni postopek kombinatornega umerjanja, zato mora biti standardna deviacija kombinatornega umerjanja ranga 10^{-6} ali manj. Standardna negotovost ranga 10^{-5} bi bila prevelika, in zanjo niti ne bi rabili kombinatornega postopka.

Iz Tabele 1 je razvidno, da je izbira dovolj dolgega premora pred zajemom vrednosti ključnega pomena za uspešnost meritev – pri uporabi obeh vrst filtrov je pri tem nižji frekvenci potreben tem daljši čas za ustalitev merjene vrednosti. Pri frekvenci 4 Hz tako zadošča 5 s premor, pri 1 Hz moramo počakati vsaj 10 s, pri 0,2 Hz

Tabela 1: Rezultati meritev.

	Filter		Premor (s)	Protokol	Standardna negotovost (nV/V)		Zadovoljiva negotovost
	Vrsta	Frekvenca (Hz)			+ polariteta	- polariteta	
1.	Butterworth	4,0	5	A-POZ	3,5	-	☒
2.	Butterworth	1,0	5	A-POZ	213,4	-	☒
3.	Butterworth	1,0	10	A-POZ	2,7	-	☒
4.	Butterworth	0,2	20	A-POZ	3,5	-	☒
5.	Butterworth	0,1	30	A-POZ	3,6	-	☒
6.	Butterworth	0,1	30	A-NEG	-	3,2	☒
7.	Bessel	0,1	20	A-POZ	106,7	-	☒
8.	Bessel	0,1	30	A-NEG	-	1,4	☒
9.	Bessel	0,1	30	A-ALT	3,1	2,4	☒
10.	Bessel	0,1	40	A-ALT	2,1	7,2	☒
11.	Bessel	0,1	60	A-ALT	2,5	2,9	☒
12.	Bessel	0,1	30	A-POZ	1,8	-	☒
13.	Bessel	0,1	30	A-POZ	1,6	-	☒
14.	Bessel	0,1	30	A-POZ	3,6	-	☒
15.	Bessel	0,1	30	A-POZ	1,5	-	☒
16.	Bessel	0,1	30	A-POZ	1,6	-	☒
17.	Bessel	0,1	30	A-NEG	-	0,8	☒
18.	Bessel	0,1	30	A-NEG	-	1,0	☒
19.	Bessel	0,1	30	A-NEG	-	1,7	☒
20.	Bessel	0,1	30	A-NEG	-	1,0	☒
21.	Bessel	0,1	30	A-NEG	-	1,2	☒
22.	Bessel	0,1	30	A-ALT	1,9	4,5	☒
23.	Bessel	0,1	30	A-ALT	2,1	5,4	☒
24.	Bessel	0,1	30	A-ALT	2,5	1,2	☒
25.	Bessel	0,1	30	A-ALT	2,0	1,6	☒
26.	Bessel	0,1	30	A-ALT	1,9	0,9	☒
27.	Bessel	0,1	30	R-POZ	3,0	-	☒
28.	Bessel	0,1	30	R-NEG	-	0,6	☒

20 s ter pri 0,1 Hz vsaj 30 s, da lahko zajamemo ustaljeno vrednost. Pri primerjavi rezultatov, pridobljenih z avtomatiziranimi (A-) ter ročnimi (R-) meritvami, ni opaziti razlik, vrednosti negotovosti pa so prav tako zadovoljive, zato proces avtomatizacije postopka preverjanja linearnosti sistema smatramo kot uspešnega.

5 Zaključek

Dosegli smo zastavljene cilje, poleg uspešne avtomatizacije sistem deluje enako dobro, kot če z njim upravljamo ročno. Dodana vrednost pri tem je seveda razbremenitev operaterja in možnost implementacije kompleksnejših ter dlje časa trajajočih merilnih protokolov – denimo, za izvedbo protokola »ALT«, pri uporabi 30 s premorov pred zajemom vrednosti, program potrebuje 40 minut.

Vidimo kar nekaj možnosti za izboljšavo. Program bi lahko nadgradili tako, da v določenem časovnem intervalu zajame večje število vrednosti ter na podlagi dovolj majhne razlike med njimi sam določi, da je vrednost na merilniku ustaljena in primerna za zajem. Poleg tega mora biti lista ukazov pripravljena vnaprej in je bila v našem primeru spisana ročno. Tako možnost

izboljšave vidimo tudi v samodejnem generiranju liste ukazov ali pa možnosti, da program v naključnem vrstnem redu sam izbere vsako izmed možnih kombinacij stikal.

Literatura

- [1] M. Hiti, "Simulator mostička z uporovnimi lističi za kombinatno kalibriranje merilnih ojačevalnikov," *Zbornik štiriindvajsete mednarodne Elektrotehniške in računalniške konference ERK 2015*, 21. - 23. september 2015.
- [2] M. M. Schäck, "Long term proven and optimized high-precision 225 Hz carrier frequency technology in a modern and universal data acquisition system," *Journal of Physics: Conference Series*, 1065(4), str. 042035, 2018.
- [3] D. R. White, M. T. Clarkson, P. Saunders in H. W. Yoon, "A general technique for calibrating indicating instruments," *Metrologia*, vol. 45, str. 199-210, 2008.
- [4] M. M. Schäck, "High-precision measurement of strain gauge transducers at the physical limit without any calibration interruptions," *IMEKO 22nd TC3, 12th TC5 and 3rd TC22 International Conferences*. 2014.