

Sistem za merenje faznog stava zasnovan na tajmerskim metodama

Sanja Mandić, *Member, IEEE*, Marjan Urekar, *Member, IEEE*, Đorđe Novaković, *Member, IEEE*, Dragan Pejić, *Member, IEEE*

Apstrakt—U ovom radu prikazana je analiza i realizacija sistema čija je uloga merenje faznog stava dva prostoperiodična signala, sa izlaza dvokanalnog izvora, upotrebom tajmerskih metoda. Kako u izlaznom stepenu dvokanalnog izvora dolazi do degradacije faznog stava, neophodno je vršiti korekciju, što zahteva poznavanje faznog stava signala u ulaznom stepenu izvora i merenje faznog stava signala u izlaznom stepenu izvora. Jedan od načina merenja faznog stava dva signala predstavlja merenje vremenskog intervala za koji su signali međusobno smaknuti, tajmerskim modulima. Pristup merenju faznog stava analognih prostoperiodičnih signala zasnovan na tajmerskim modulima zahteva konverziju visokog napona i struje u povorku impulsa, pogodnih za rad sa tajmerskim modulima, upotrebom komparatora. Iako se pokazuje da tajmerske metode daju vrhunske rezultate u merenju vremenskih intervala, njihova primena kod problema merenja faznog stava je retka usled nekoliko značajnih problema koji se javljaju u koraku konverzije analognih veličina u digitalne.

Kroz rad data su dva predloga rešenja datih problema, izvršena je simulaciona analiza navedenih pristupa, a zatim je hardverski realizovan sistem koji je kroz simulacionu analizu pokazao bolje performanse.

Ključne reči— Metode merenja; fazni stav; dvokanalni izvor; tajmerski modul; komparator; ofset; histerezis; filtriranje

I. UVOD

Merenje faznog stava značajno je sa stanovišta karakterizacije periodičnih signala, a izdvaja se nekoliko metoda merenja faznog stava koje podrazumevaju metode zasnovane na brojanju događaja (impulsa), metode zasnovane na modulaciji signala i metode zasnovane na odabiranju signala [1].

Motivacija ovog istraživanja jeste potreba za vrlo tačnim i preciznim merenjem faznog stava signala na naponskom i strujnom kanalu kod dvokanalnog izvora. Dvokanalni izvor na svojim izlazima generiše prostoperiodični strujni i naponski signal, na osnovu talasnih oblika čije se karakteristike zadaju u ulaznom stepenu. Moguće je izdvojiti nekoliko funkcionalnih celina dvokanalnih izvora: ulazni (niskonaponski) stepen, pojačavački stepen i izlazni stepen. Ulazni, niskonaponski, stepen čini digitalni dvokanalni funkcijski generator, baziran na mikroprocesoru, i u ovom stepenu vrši se generisanje dva talasna oblika, zadatih amplituda, frekvencija i faze. Signali se dalje vode na D/A konvertor, a zatim se analogni prostoperiodični signali

Sanja Mandić – Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: sanja.mandic@uns.ac.rs).

Marjan Urekar – Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: urekarm@uns.ac.rs).

Đorđe Novaković – Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: djordjenovakovic@uns.ac.rs).

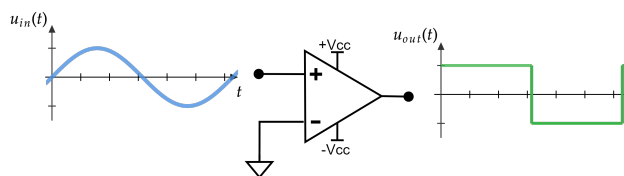
Dragan Pejić – Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: pejicdra@uns.ac.rs).

sa svakog od kanala vode na pojačavački stepen dvokanalnog izvora. Pojačavački stepen naponskog dela predstavlja naponski pojačavač, čija je uloga da ulazni napon amplitude reda nekoliko V pojača i da na izlazu da napon amplitude reda desetina ili stotina V. Pojačavački stepen strujnog kanala predstavlja transkonduktanski pojačavač, čija je uloga da od niskog napona na ulazu generiše struju amplitude reda nekoliko A [2], [3]. Potreba za merenjem faznog stava signala na strujnom i naponskom izlazu dvokanalnog izvora proizilazi iz degradacije faze do koje dolazi u pojačavačkom stepenu dvokanalnog izvora. Degradacija metroloških performansi faznog stava u pojačavačkom stepenu izvora zahteva korekciju faznog stava signala u izlaznom stepenu izvora. Jedan od načina korekcije faznog stava podrazumeva zadavanje poznatog faznog stava u ulaznom stepenu dvokanalnog izvora, merenje faznog stava struje i napona na izlazu izvora i vršenje korekcije na osnovu razlike zadate i izmerene vrednosti.

Fazni stav definiše se kao mera međusobnog smicanja dva periodična signala. Za dva periodična talasna oblika iste periode T , odnosno, frekvencije $f = \frac{1}{T}$, fazni stav $\Delta\Phi$ moguće je definisati na osnovu vremenskog intervala Δt za koji su signali međusobno smaknuti, kao:

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi}{T} \cdot \Delta t \quad (1)$$

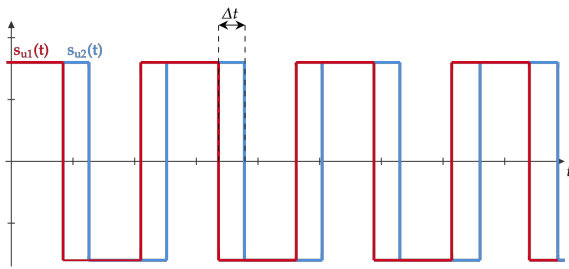
Dakle, kao jedan od mogućih načina merenja faznog stava dva signala istih frekvencija izdvajaju se metode zasnovane na brojanju događaja [1], te je u cilju merenja faznog stava dva periodična signala na izlazu dvokanalnog izvora moguće vršiti merenje upravo vremenskog smicanja datih signala upotrebom tajmerskih modula. Međutim, ovakav pristup zahteva prilagođavanje analognih veličina sa izlaza dvokanalnog izvora, digitalnim tajmerskim modulima, odnosno, neophodno je uvesti dodatni stepen čija je uloga konverzija analognih veličina tj. struje i napona sa izlaza dvokanalnog izvora, u digitalne veličine u vidu periodičnih povorki impulsa. Konverziju prostoperiodičnih signala u periodične povorku impulsa moguće je vršiti upotrebom komparatora (slika 1). Kako bi na osnovu komparatora bila omogućena detekcija prolaska signala kroz nulu i kako bi izlazna povorka četvrtki odgovarala znaku ulaznog prostoperiodičnog signala, invertujući ulaz komparatora povezan je na nulti potencijal (masa), dok je na neinvertujući ulaz doveden prostoperiodični signal.



Slika 1. Konverzija prostoperiodičnog talasnog oblika u periodičnu povorku četvrtki upotrebom komparatora

Povorka četvrtki koja se dobija na izlazu komparatora iste je frekvencije i faze kao odgovarajući ulazni signal, a amplituda da-

tog signala određena je naponom napajanja komparatora. Na slici 2 ilustrovane su povorke četvrtki koje odgovaraju znaku ulaznih prostoperiodičnih signala komparatora, te je merenjem smicanja datih signala moguće dobiti informaciju o faznom stavu struje i napona na izlazu dvokanalnog izvora.

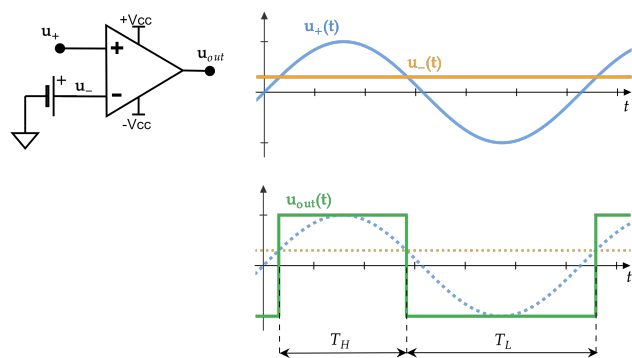


Slika 2. Fazni stav povorke četvrtki na izlazu komparatora, koje odgovaraju znaku ulaznih prostoperiodičnih signala

Metode merenja faznog stava upotrebom tajmerskih modula zasnivaju se na principu merenja vremenskog intervala na osnovu brojanja impulsa određene frekvencije, gde se merenje započinje silaznom/uzlaznom ivicom signala koji prednjači, a zaustavlja silaznom/uzlaznom ivicom signala koji kasni.

II. PROBLEMI MERENJE FAZNOG STAVA TAJMERSKIM MODULOM I MOGUĆA REŠENJA

Merenje vremenskih intervala upotrebom tajmerskih modula, zasnovanih na digitalnoj elektronici, ogleda se u vrhunskim mernim performansama. Iako tajmerske metode merenja vremenskih intervala daju izuzetne rezultate, dodatni stepen neophodan za konverziju analognih veličina u digitalne veličine karakteriše niz problema, koji utiču na retku primenu datih metoda u merenjima faznog stava. Uzroci ovih problema ogledaju se u prisustvu šuma u ulaznim analognim signalima, ali i u karakteristikama realnih komponenti kao što su ofset komparatora i razlike komponentata u okviru filtera za uklanjanje šuma iz ulaznih signala.

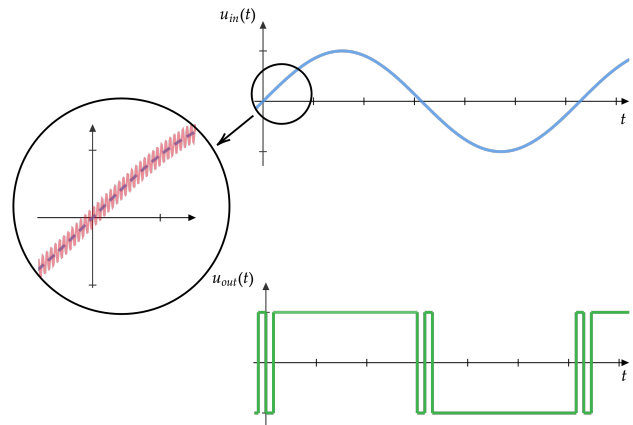


Slika 3. Konverzija prostoperiodičnog talasnog oblika u periodičnu povorku četvrtki u slučaju komparatora sa ofsetom

Ofset, kao odlika realnog komparatora, predstavlja značajan problem u sistemu za merenje faznog stava i utiče na faktor ispunje izlazne povorke četvrtki. Naime, usled ofseta na ulazu dolazi do promene referentnog napona, odnosno, vrednosti u odnosu na koju se izlazni signal menja sa jednog logičkog nivoa na drugi. Promena naponskih nivoa dešava se kada se amplituda ulaznog signala izjednači sa vrednošću referentnog napona, i u slučaju kada je referentni napon 0 V, izlazni signal komparatora, na čiji ulaz je

doveden prostoperiodični signal, ima faktor ispunje 50 %, međutim, ukoliko postoji ofset komparatora faktor ispunje izlaznog signala će odstupati od 50 %, kao što je prikazano na slici 3, gde je ofset modelovan kao jednosmerna komponenta na invertujućem ulazu, a vrednost ofseta je pretpostavljena kao pozitivna.

Zašumljenost ulaznih signala takođe predstavlja jedan od značajnih problema. Ukoliko se na ulaz komparatora dovede signal u kome je prisutan šum, dolazi do detekcije višestrukih prolazaka signala kroz nulu što se ogleda u *bouncing-u* ivica izlaznog signala komparatora. Na slici 4 ilustrovane su višestruke uzlazne/silazne ivice povorke četvrtki na izlazu komparatora, usled prisustva šuma u ulaznom prostoperiodičnom signalu.

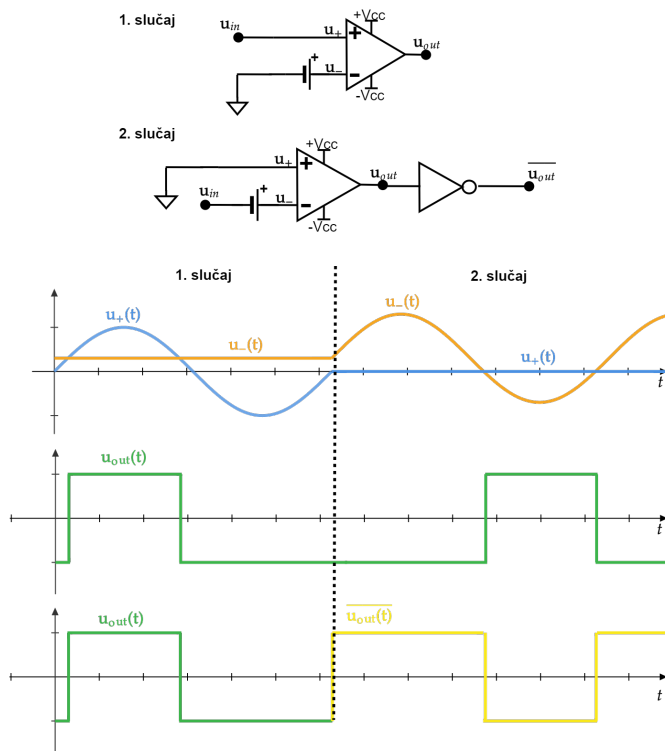


Slika 4. Pojava višestrukih uzlaznih i silaznih ivica u izlaznoj povorci impulsa usled prisustva šuma u ulaznom prostoperiodičnom signalu

Rešenju problema prisustva šuma u strujnom i naponskom signalu pristupljeno je na dva načina: upotrebom komparatora sa histeretizom i upotrebom filtera propusnika niskih učestanosti (NF filtera). Dodatno, u odnosu na način realizacije sistema, treba imati u vidu uticaj različitih histeretisa na izlaz komparatora, vremensko kašnjenje koje filteri uvode u signale, kao i problem koji nastaje ukoliko postoje razlike R i C komponenti primenjenih NF filtera, što dovodi do različitih kašnjenja signala i promene faznog stava.

Kao predlog rešenja problema usled prisustva ofseta postavlja se metoda koja se ogleda u sukcesivnoj zameni ulaza komparatora i invertovanju izlaza komparatora (slika 5) [4], [5], [6]. Naime, u toku vremenskog intervala u trajanju jedne periode ulaznog prostoperiodičnog signala, na neinvertujući ulaz komparatora dovodi se ulazni prostoperiodični signal, dok se na invertujući ulaz povezuje masa. Na izlazu komparatora snima se povorka četvrtki. Na gornjem grafiku sa slike 5, prikazani su naponi na ulazima komparatora u dve uzastopne periode, gde je vrednost napona ofseta pozitivna. Kako se logički nivo izlaznog signala, usled prisustva ofseta na invertujućem ulazu, ne menja kada je vrednost ulaznog signala nula, već kada amplituda prostoperiodičnog ulaznog signala dostigne određenu vrednost veću od nule (napon ofseta), vreme trajanja visokog naponskog nivoa na izlazu je kraće u odnosu na vreme trajanja niskog naponskog nivoa. U toku naredne periode ulaznog signala na neinvertujući ulaz komparatora povezuje se masa, dok se na invertujući ulaz dovodi prostoperiodični signal pomešan za vrednost ofseta. Usled amplitude prostoperiodičnog signala uvećane za napon ofseta na invertujućem ulazu, u većem delu periode napon na neinvertujućem ulazu komparatora manji je u odnosu na napon na invertujućem ulazu komparatora, te je za vreme druge periode trajanje niskog naponskog nivoa u izlaznom signalu duže u odnosu na trajanje visokog naponskog nivoa. Kako bi se u celokupnom izlaznom signalu u trajanju od dve periode, postigao ukupan faktor ispunje 50 %, u toku druge periode izlazna

povorka četvrtki se invertuje. Izlazni signal prikazan je na donjem grafiku na slici 5. Dodatno, vršena je zamena signala vođenih sa izlaza dva kanala izvora na dva komparatora, na svake dve periode signala.



Slika 5. Predlog rešenja problema usled ofseta komparatora: zamena ulaza komparatora i invertovanje izlaza komparatora

III. SIMULACIONA ANALIZA SISTEMA ZA MERENJE FAZNOG STAVA TAJMERSKIM METODAMA

Dva predloga rešenja problema koji se javljaju pri merenju faznog stava tajmerskim metodama, dakle, podrazumevaju upotrebu:

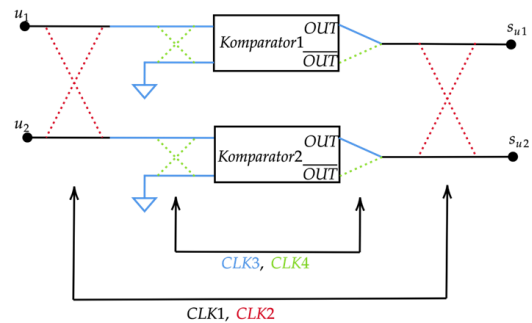
- komparatora sa histerezisom,
- komparatora bez histerezisa i NF filtera.

U cilju određivanja optimalnog pristupa rešenju izvršena je simulaciona analiza sistema u navedena dva slučaja, upotrebom *LTSpice* softvera. U okviru simulacija vršena je analiza sistema u odnosu na prethodno opisane probleme - ofset komparatora, šum u ulaznim signalima, histerezis komparatora, razlike NF filtera na dva kanala, te su na osnovu zadavanja faznih stavova ulaznih prostoperiodičnih signala i merenja faznih stavova izlaznih povorki četvrtki proverena predložena rešenja navedenih problema.

Na slici 6 prikazan je blok dijagram sistema za merenje faznog stava koji podrazumeva upotrebu komparatora sa histerezisom kao prilagođavačkog stepena između izlaznih signala dvokanalnog izvora i ulaznih signala tajmerskog modula. U *LTSpice* softveru realizovana je simulacija datog sistema, gde je predloženo rešenje zamene ulaza i izlaza komparatora simulirano upotrebom modela naponom kontrolisanih prekidača.

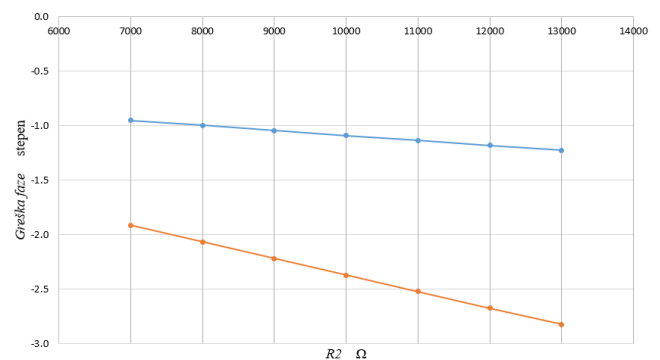
Naime, povorkama četvrtki označenim kao CLK1 i CLK2, koje su međusobno invertovane, upravlja se prekidačima u okviru strukture H mosta koja se nalazi na ulazu i izlazu sistema, tako da postiže efekat dovođenja ulaznog prostoperiodičnog signala $u1$ na komparator 1 i signala $u2$ na komparator 2 u toku dve periode datih signala, a zatim se u toku naredne dve periode signal $u1$ dovodi na komparator 2, a signal $u2$ na komparator 1. Promena ulaznih signala komparatora

1 i 2 praćena je odgovarajućom promenom izlaznih signala sistema s_{u1} i s_{u2} , odnosno, izlaznih signala komparatora 1 i 2, redom, tako da se u okviru prve dve periode kao izlazni signal s_{u1} snima izlaz komparatora 1, a kao izlazni signal s_{u2} snima se izlaz komparatora 2, a zatim, u toku naredne dve periode kao izlazni signal s_{u1} uzima se izlaz komparatora 2, dok se kao s_{u2} uzima izlazni signal komparatora 1. Dodatno, neophodno je izvršiti zamenu napona koji se dovode na invertujući i neinvertujući ulaz komparatora, u toku svake periode ulaznih signala, praćeno invertovanjem izlaza komparatora, što se vrši pomoću prekidača kojima se upravlja povorkama četvrtki označenim kao CLK3 i CLK4, dvostruko veće frekvencije u odnosu na CLK1 i CLK2.



Slika 6. Blok dijagram sistema za merenje faznog stava realizovanog upotrebom komparatora sa histerezisom, u kome se primenjuje zamena ulaza i invertovanje izlaza komparatora u cilju eliminisanja greške

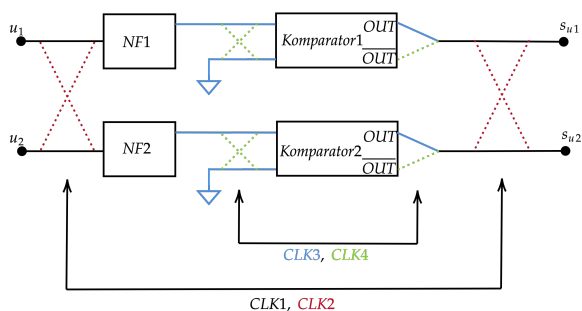
Kroz simulaciju vršena je analiza odstupanja faznog stava povorke četvrtki izmerenog na izlazu sistema, u odnosu na zadati fazni stav ulaznih signala, u prisustvu ofseta i histerezisa komparatora. Na slici 7 prikazani su grafici zavisnosti greške faznog stava, kao mere odstupanja izmerenog od zadatog faznog stava, od vrednosti otpornosti otpornika povezanog na neinvertujući ulaz komparatora, koji utiče na histerezis komparatora. Simulaciona analiza datog sistema pokazuje dvostruko smanjenje greške usled ofseta i histerezisa komparatora kada se u sistemu primeni prethodno opisana metoda zamene ulaza i invertovanja izlaza komparatora.



Slika 7. Odstupanje izmerenog od zadatog faznog stava u zavisnosti od ofseta i histerezisa komparatora pre (narandžasta) i nakon primene metode zamene ulaza i invertovanja izlaza komparatora (plava)

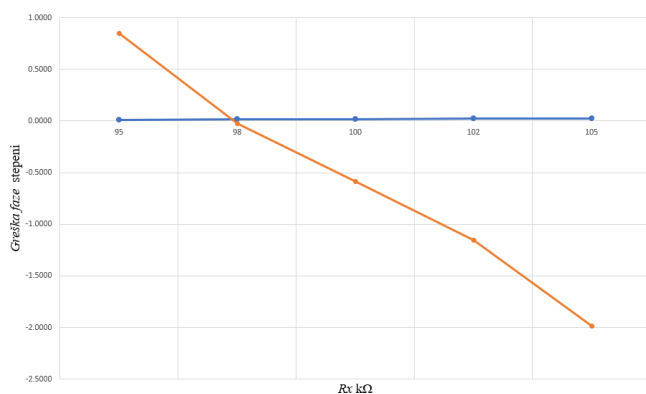
Drugi pristup realizaciji sistema za merenje faznog stava tajmerskim modulom podrazumeva upotrebu NF filtera i komparatora bez histerezisa, a odgovarajući blok dijagram sistema ilustrovan na slici 8. Za dati predlog rešenja, takođe je vršena simulaciona analiza, upotrebom *LTSpice* softvera. Zamena ulaznih i izlaznih signala takođe je realizovano upotrebom modela prekidača upravljanijh pomoću naponskih signala oblika četvrtki. U datoj postavci sistema neophodno

je vršiti zamenu ulaznih prostoperiodičnih talasnih oblika u_1 i u_2 na dva NF filtra, označena kao NF1 i NF2, kao i zamenu odgovarajućih izlaza komparatora 1 i komparatora 2, s_{u1} i s_{u2} , na svake dve periode, pomoću četiri prekidača u okviru mosne strukture na ulazu i na izlazu sistema, koji su kontrolisani signalima CLK1 i CLK2. Takođe, vrši se zamena signala na invertujućim i neinvertujućim ulazima komparatora 1 i 2, kao i odgovarajuće invertovanje izlaznih signala komparatora 1 i 2, svake periode, a ovaj proces je upravljan prekidačima koji su kontrolisani signalima CLK3 i CLK4, čija je perioda dvostruko manja u odnosu na CLK1 i CLK2.



Slika 8. Blok dijagram sistema za merenje faznog stava realizovanog upotrebom komparatora bez histerezisa i NF filtera, u kome se primenjuje zamena ulaza i invertovanje izlaza komparatora u cilju eliminisanja greške

Simulacionom analizom opisanog sistema pokazano je značajno smanjenje odstupanja izmerenog od zadatog faznog stava nakon primene metode zamene ulaznih signala na NF filterima, kao i zamene ulaza komparatora i invertovanja izlaza komparatora. Greška faznog stava analizirana je u prisustvu ofseta na oba komparatora, za različite vrednosti otpornika u jednom od NF filtera. Na slici 9 prikazani su grafici zavisnosti greške faznog stava u odnosu na variranu vrednost otpornosti NF filtra, odakle je moguće uočiti da se predloženom metodom problem ofseta i razlike NF filtera uspešno eliminiše, a greška faznog stava se umanjuje do oko sto puta.



Slika 9. Odstupanje izmerenog od zadatog faznog stava u zavisnosti od ofseta komparatora i otpornosti NF filtra pre (narandžasta) i nakon primene metode zamene ulaza i invertovanja izlaza komparatora (plava)

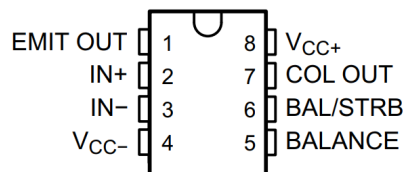
IV. REALIZACIJA SISTEMA ZA MERENJE FAZNOG STAVA TAJMERSKIM METODAMA

A. Hardverska implementacija sistema

Na osnovu rezultata simulacija sistema za merenje faznog stava, pristupljeno je hardverskoj realizaciji sistema upotrebom komparatora

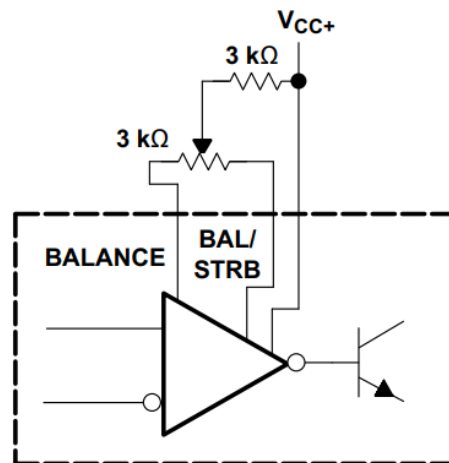
bez histerezisa i NF filtera. Na slici 10 prikazana je šema realizovanog sistema, dok je na slici 13 prikazana realizovana proto pločica.

Kao komparator upotrebljeno je LM311 integrisano kolo [7] čiji su pinovi prikazani na slici 11. Na pinove 2 i 3 LM311 čipa dovode se ulazni signali, gde je neophodno periodično menjati signale na data dva pina. Zamena ulaza komparatora realizovano je upotrebom kratkospojnika i 2x3 pin zaglavlja, gde su srednje tačke dva reda pin zaglavlja povezane na pinove 2 i 3 LM311, a levi i desni pin povezani su na izlaz NF filtra i masu, redom. Postavljanjem kratkospojnika u levi, odnosno, desni položaj, ostvaruje se povezivanje izlaza filtra i odgovarajućeg ulaza komparatora, odnosno, mase i ulaza komparatora. Zamena ulaznih signala u_1 i u_2 vrši se manuelno na terminalima sa zavrtanjem, na koje se dovode prostoperiodični signali određene amplitude, frekvencije i faze.



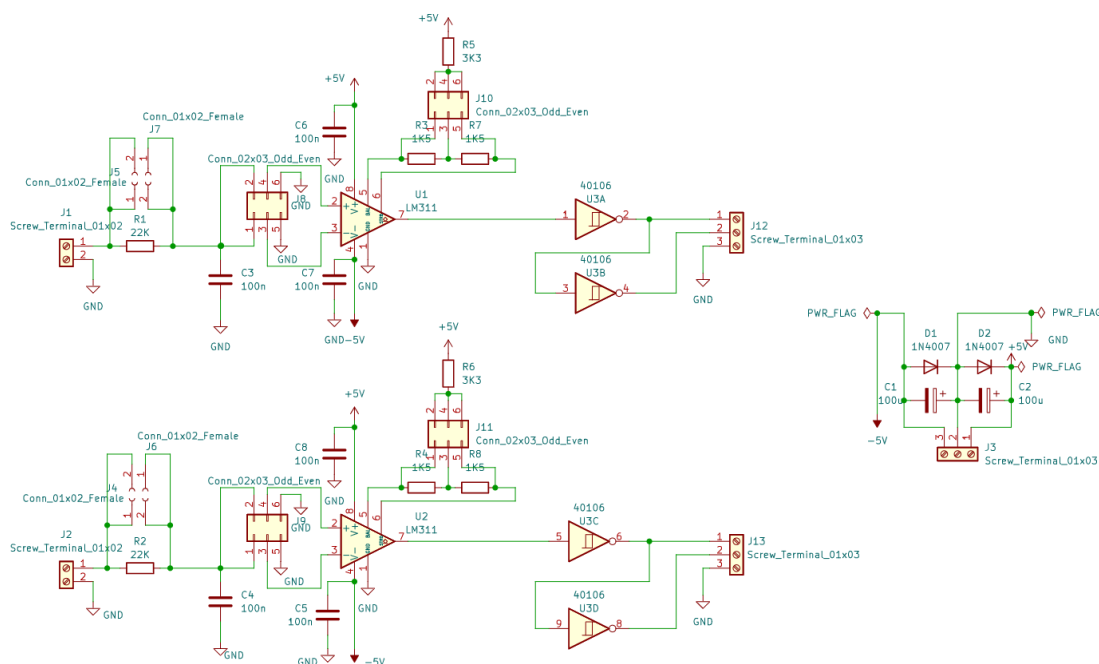
Slika 11. Pinovi LM311 čipa

Ulazni signali sistema vode se sa *Siglent SDG1025* signal generatora [8]. *Siglent SDG1025* predstavlja dvokanalni signal generator, frekvencijskog opsega do 25 MHz, frekvencije odabiranje do 125 MHz i 14-bitne rezolucije. NF filteri realizovani su kao pasivni RC filteri prvog reda, a dodatno, omogućeno je povezivanje otpornika paralelno sa otpornikom u okviru filtra, kako bi bilo omogućeno dodatno razdešavanje RC konstanti dva filtra, u cilju analize uticaja razlike filtera na performanse sistema. Napajanje se na pločicu dovodi pomoću terminala sa zavrtanjem, gde su dodatno povezane antiparalelne zaštitne diode 1N4007, za slučaj pogrešnog povezivanja napajanja, kao i polarisani *decoupling* kondenzatori kapacitivnosti 100 μ F. Dodatno, na pinove za napajanje svih integrisanih kola povezani su, ka masi, *decoupling* kondenzatori kapacitivnosti 100 nF.



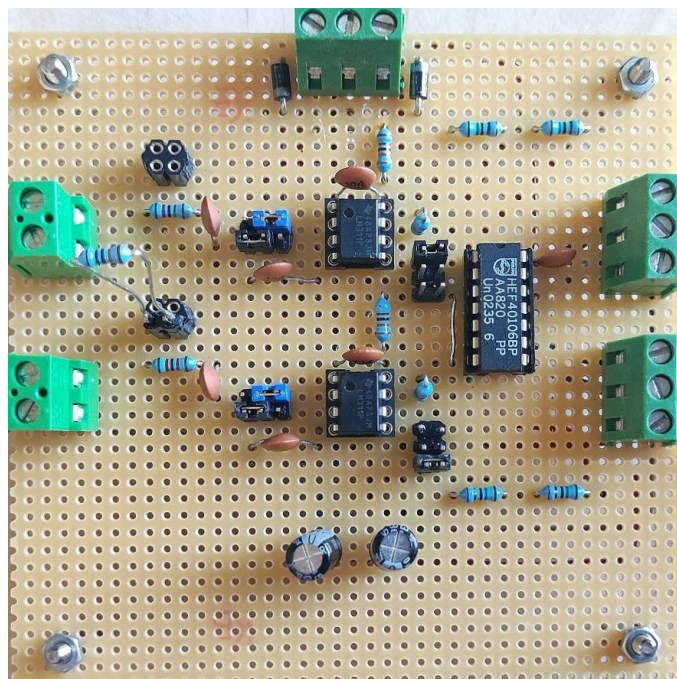
Slika 12. Princip povezivanje pinova BALANCE i BALANCE/STROBE LM311 čipa za podešavanje ofseta komparatora

Ofset komparatora LM311 moguće je podešavati pomoću pinova 5 i 6, odnosno, BALANCE i BALANCE/STROBE, redom [7]. Upotrebom 2x3 zaglavlja, kratkospojnika i naponskih razdelnika, kao što je prikazano u okviru šeme na slici 10, omogućava se dovodenje različitih vrednosti napona na navedene pinove, čime se utiče na ofset samog komparatora, a ovakav sistem omogućava analizu rezultata merenja u odnosu na varirane vrednosti ofseta na dva komparatora.



Slika 10. Šema sistema za merenje faznog stava tajmerskim metodama realizovanog upotrebom komparatora bez histerezisa i NF filtera

Izlazni signali komparatora vode se na ulaze HEF40106BP integrisanog kola [9] koje sadrži šest invertujućih Šmit triger. U okviru HEF40106BP kola koriste se četiri invertora, koji obezbeđuju ubrzanje ivice izlaznih povorki četvrtki kao i invertovane povorke četvrtki, koje je neophodno uzeti u obzir pri promeni ulaza komparatora, kao što je opisano u prethodnim poglavljima. Zamena izlaznih signala koji se posmatraju pri merenjima vrši se manuelno, na izlaznim terminalima sa zavrtanjem.



Slika 13. Proto pločica sistema za merenje faznog stava tajmerskim metodama realizovanog upotrebom komparatora bez histerezisa i NF filtera

B. Eksperimentalna postavka i rezultati merenja

Na ulaz sistema sa slike 13 sa Siglent SDG1025 signal generatora dovedeni su prostoperiodični signali amplitude 4 Vpp i frekvencije 50 Hz. Fazni stav jednog od signala je variran od -10 do 10 stepeni, a na izlazu sistema mereno je vreme između dve silazne ivice povorke četvrtki. Vremensko smicanje izlaznih signala određeno je upotrebom Rigol DC1054 osciloskopa [10]. Kursori osciloskopa pozicionirani su na odgovarajuće silazne ivice izlaznih povorki četvrtki, a zatim je očitana udaljenost kursora po vremenskoj osi. U odnosu na konfiguraciju ulaznih i izlaznih signala postupak merenja izvršen je za četiri različita slučaja, prikazana u okviru tabele I. Pomoću odgovarajućih konektora, paralelno sa otpornikom u okviru jednog od NF filtera povezan je otpornik od 100 kΩ, čime se postiže dodatno razdešavanje filtera. Takođe, kratkospojnicima su podešeni ofseti na dva komparatora, tako da se postigne njihova maksimalna razlika omogućena konfiguracijom na BALANCE i BAL/STRB pinovima.

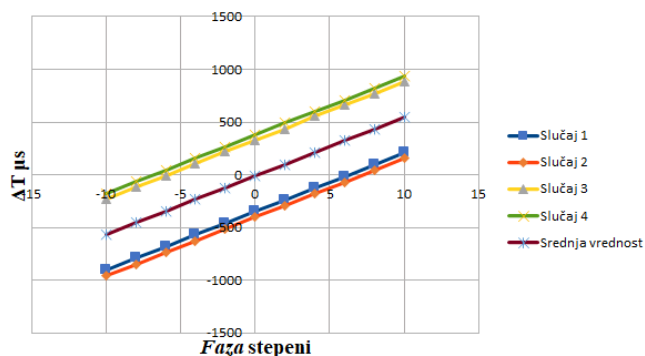
Tabela I
RAZLIČITE KONFIGURACIJE ULAZA I IZLAZA KOMPARATORA K1 I K2

Slučaj	K1 ulaz		K2 ulaz		K1 izlaz	K2 izlaz
	+	-	+	-		
1	$u1$	GND	$u2$	GND	s_{u1}	s_{u2}
2	GND	$u1$	GND	$u2$	$\overline{s_{u1}}$	$\overline{s_{u2}}$
3	$u2$	GND	$u1$	GND	s_{u2}	s_{u1}
4	GND	$u2$	GND	$u1$	$\overline{s_{u2}}$	$\overline{s_{u1}}$

Vremenska smicanja izlaznih signala za različite vrednosti faznog stava ulaznih signala beležena su za data četiri slučaja. Na slici 14 prikazani su grafici zavisnosti vremenskog smicanja ΔT od faznog stava, za četiri opisana slučaja, kao i srednje vrednosti vremenskog smicanja u data četiri slučaja.

Pod uticajem sistematske greške usled razlike NF filtera i ofseta komparatora, u slučajevima 1, 2, 3 i 4 uočava se ofset zavisnosti vremenskog smicanja ΔT od faznog stava. Ukoliko se posmatraju slučaj 1 i 3, uočavaju se iste konfiguracije + i - ulaza komparatora, međutim prostoperiodični signali koji se dovode na komparatore

su zamenjeni, što važi i za slučajeve 2 i 4. Uočeno je da je vrednost sistematske greške približno jednaka za slučaj 1 i 3, dok je znak sistematske greške suprotan. Takođe, vrednost sistematske greške je približno jednaka, ali suprotnog znaka, za slučaj 2 i 4. Moguće je zaključiti da usled primene metode zamene ulaznih signala sistematska greška menja znak, te usrednjavanjem vrednosti ΔT eliminišemo uticaj sistematske greške, što je takođe moguće videti na grafiku sa slike 14. Dakle, sistem u praktičnoj realizaciji pokazuje performanse predviđene simulacionom analizom i daje poželjne rezultate, odnosno, predloženo rešenje uspešno eliminiše greške koje nastaju usled ofseta komparatora i razlike NF filtera.



Slika 14. Izmereni vremenski intervali između silaznih ivica izlazne povorke četvrtki u zavisnosti od vrednosti faze ulaznih prostoperiodičnih signala

V. ZAKLJUČAK

Merenje faznog stava upotrebom metoda zasnovanih na tajmerskim modulima izdvaja se kao jedno od rešenja u slučaju merenja faznog stava struje i napona na izlazima dvokanalnog izvora. U cilju rešenja problema koji karakterišu date sisteme, u okviru rada data su dva predloga realizacije sistema: realizacija sistema upotrebom komparatora sa histerezisom i realizacija sistema upotrebom NF filtera i komparatora bez histerezisa. Predlozi realizacije sistema su provereni kroz simulacije i vršena je analiza uticaja svakog od problema na performanse sistem.

Simulacionom analizom pokazano je da se zamenom ulaza komparatora značajno smanjuje greška usled ofseta komparatora, međutim u prvom pristupu uočeno je da postoji greška usled ofseta i histerezisa komparatora koja nije uspešno eliminisana zamenom signala koji se dovode na komparatore i zamenom ulaza komparatora, već je umanjena svega dva puta. U okviru prvog pristupa javlja se dodatni problem u slučaju kada su amplitude signala manje od histerezisa, što znači da na izlazu komparatora nema impulsa. Analizom problema u okviru drugog pristupa utvrđeno je da se zamenom ulaza komparatora, kao i zamenom signala koji se dovode na NF filtre uspešno eliminiše uticaj ofseta i uticaj razlike NF filtera na dva kanala, te da je greška predloženom metodom smanjena i do sto puta i svedena na veoma male vrednosti, reda 0,01 stepeni. Na osnovu rezultata simulacije, hardverskoj implementaciji sistema pristupljeno je upotrebom komparatora bez histerezisa i upotrebom NF filtera, a realizovani sistem pokazao je ponašanje predviđeno simulacijama, te se pokazuje kao uspešno rešenje problema koji pri merenju faznog stava nastaju usled ofseta komparatora i različitih filtera. Dalji rad podrazumeva spregu realizovanog sistema za određenim mikrokontrolerskim sistemom, i upotrebu tajmersko/brojačkih modula mikrokontrolera u cilju merenja vremenskog smicanja signala.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je podržan od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija kroz projekat broj 451-03-47/2023-01/200156

”Inovativna naučna i umetnička istraživanja iz domena delatnosti FTN-a”.

LITERATURA

- [1] Balestrieri, Eulalia, De Vito, Luca, Picariello, Francesco, Rapuano, Sergio, Tudosa, Ioan. "A review of accurate phase measurement methods and instruments for sinewave signals." *Acta IMEKO* 9.2 (2020): 52-58. doi: 10.21014/acta_imeko.v9i2.802.
- [2] Mitrović, Zoran. "A phase angle standard." *Measurement Science and Technology* 15.3 (2004): 559.
- [3] Zupunski, I. Z., Holicek, L. M., i Vujicic, V. V. "Power-factor calibrator." *IEEE transactions on instrumentation and measurement* 46.2 (1997): 408-411.
- [4] Pejic, Dragan V., Marjan Urekar, Vladimir Vujicic i Svetlana Avramov-Zamurovic. "Comparator offset error suppression in stochastic converters used in a watt-hour meter." *CPEM 2010* (2010): 235-236.
- [5] Nasrollahpour, M., Sreekumar, R., Hamed-Hagh, S. "Low power comparator with offset cancellation technique for Flash ADC." *14th International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design (SMACD)* (2017). doi:10.1109/smacd.2017.7981602
- [6] Y. Cheng, Y. Tong. "Techniques for offset calibration in comparators." *2021 International Conference on Electronic Information Engineering and Computer Science (EIECS)* (2021): 838-847. doi: 10.1109/EIECS53707.2021.9588097.
- [7] Texas Instruments (2017). LM111, LM211, LM311 Differential Comparators. Preuzeto marta 2023. sa <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm311.pdf>
- [8] Siglent. Siglent SDG1025 25MHz Function / Arbitrary Waveform Generator Data Sheet. Preuzeto marta 2023. sa <https://www.siglent.eu/product/1140255/siglent-sdg1025-25mhz-function-arbitrary-waveform-generator>
- [9] Philips Semiconductors (1995). HEF40106B Hex inverting Schmitt trigger Data Sheet. Preuzeto marta 2023. sa <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/17672/PHILIPS/HEF40106BP.html>
- [10] Rigol. DS1000Z Series Digital Oscilloscope Data Sheet. Preuzeto marta 2023. sa <https://www.rigol-uk.co.uk/product/rigol-ds1054z-50mhz-digital-oscilloscope/>

ABSTRACT

This paper presents an analysis and implementation of a system whose role is to measure the phase shift between two periodic signals using timer-based methods, from the output of a dual-channel source. As the phase shift in the output stage of the dual-channel source degrades, it is necessary to perform correction, which requires knowledge of the phase shift of the signals in the input stage of the source and the measurement of the phase shift of the signals in the output stage of the source. One way to measure the phase shift between two signals is to measure the time interval by which they are shifted. This approach to measuring the phase shift of analog periodic signals requires conversion of high voltage and current into a sequence of pulses suitable for working with timer modules, using comparators. Although timer-based methods provide excellent results in measuring time intervals, they are rarely used for measuring phase shift due to several significant problems that arise during the conversion of analog signals into digital ones.

Two proposed solutions to these problems were presented throughout the paper, a simulation analysis of the approaches was performed, and a hardware system that showed better performance through simulation analysis was implemented.

Phase measurement system based on timer methods

Sanja Mandić, Marjan Urekar, Đorđe Novaković, Dragan Pejić