

Implementacija sistema za merenje faznog stava prostoperiodičnih signala upotrebom tajmerskih modula

1. Sanja Mandić

Katedra za električna merenja
Fakultet tehničkih nauka
Novi Sad, Srbija
sanja.mandic@uns.ac.rs

2. Đorđe Novaković

Katedra za električna merenja
Fakultet tehničkih nauka
Novi Sad, Srbija
djordjenovakovic@uns.ac.rs

3. Dragan Pejić

Katedra za električna merenja
Fakultet tehničkih nauka
Novi Sad, Srbija
pejicdra@uns.ac.rs

Apstrakt—U ovom radu prikazana je realizacija sistema čija je uloga merenje faznog stava dva prostoperiodična signala upotrebom tajmerskih modula. U radu je razmatrano merenje faznog stava prostoperiodičnih signala sa dvokanalnog izvora struje i napona. U okviru izlaznog stepena razmatranog izvora javlja se degradacija faznog stava signala na dva kanala izvora, te je potrebno izvršiti korekciju faznog stava. Potreba za vršenjem korekcije faznog stava dva prostoperiodična signala zahteva poznavanje zadatog faznog stava na ulazu dvokanalnog izvora i precizno merenje faznog stava na izlazu dvokanalnog izvora. Metoda merenja faznog stava u radu zasniva se na merenju vremenskog smicanja prostoperiodičnih signala, na osnovu koga se određuje vrednost faznog stava. Merenje vremenskih intervala vršeno je upotrebom tajmerskog modula u okviru mikrokontrolera. Metode merenja faznog stava analognih prostoperiodičnih signala zasnovane na tajmerskim modulima zahtevaju konverziju analognih veličina, u ovom slučaju visokog napona i struje sa izlaza dvokanalnog izvora, u povorku impulsa pogodna za rad sa digitalnim tajmerskim modulima. Rad daje uvid u implementaciju sistema čija je uloga konverzija analognih veličina sa izlaza dvokanalnog izvora u digitalne signale na osnovu kojih se vrše merenja tajmerskim modulom mikrokontrolera. Dodatno, u radu su analizirani problemi uočeni u datom sistemu, te je prikazana je implementacija metode za eliminisanje datih problema.

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

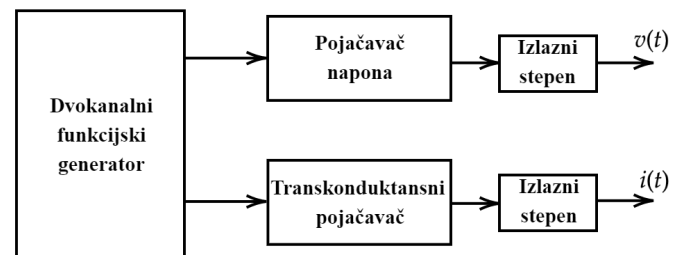
I. UVOD

Na slici 1 prikazan je blok dijagram dvokanalnog izvora i napona, analiziranog u ovom radu. Dvokanalni izvor na svojim izlazima generiše prostoperiodični strujni i naponski signal, na osnovu talasnih oblika čije se karakteristike zadaju u ulaznom stepenu. Ulazni stepen izvora podrazumeva digitalni dvokanalni funkcijski generator baziran na mikroprocesoru, koji na svojim izlazima daje talasne oblike zadatih amplituda, frekvencija i faza, sa visokom tačnošću. Sa izlaza digitalnog dvokanalnog funkcijskog generatora signali se vode na D/A konvertore, a zatim se analogni prostoperiodični signali 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 [1], [2].

Dati pojačavački stepen izvora unosi degradaciju metroloških performansi faznog stava signala, što zahteva vršenje korekciju faznog

stava signala u izlaznom stepenu izvora. Korekciju faznog stava moguće je izvršiti tako što se u ulaznom stepenu zadaje poznat fazni stav, a zatim se na izlazu dvokanalnog izvora vrši merenje faznog stava napona i struje. Poznavanje zadatog faznog stava na ulazu i izmerenog faznog stava na izlazu daje informaciju o odstupanju datih vrednosti i mogućnost vršenja korekcije na osnovu datog odstupanja.

Motivacija ovog istraživanja jeste potreba za vrlo tačnim i preciznim merenjem faznog stava signala na naponskom i strujnom kanalu kod dvokanalnog izvora.



Slika 1. Blok dijagram dvokanalnog izvora

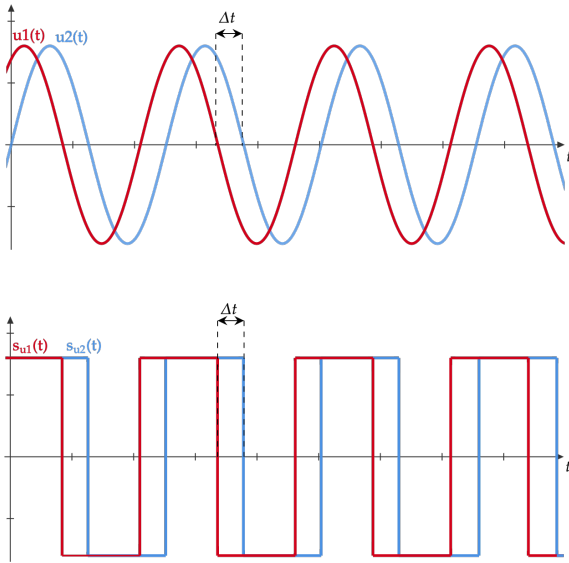
U praktičnim primenama, često postoji potreba za merenjem fazne razlike između dva signala istih frekvencija. Merenja faznog stava se često sprovode da bi se okarakterisao signal ili električno kolo, da bi se indirektno izmerile druge veličine ili da bi se pratilo stanje mreže za prenos električne energije. Prema [3] metode merenja faznog stava signala mogu se podeliti u tri različite grupe:

- metode brojanja događaja,
- metode zasnovane na modulaciji,
- metode zasnovane na odabiranju.

Prva kategorija metoda merenja faze zasniva se na principu da se fazna razlika između dva signala identičnih frekvencija može odrediti na osnovu vremenskog pomaka dve karakteristične tačke datih signala (npr. prolazak kroz nulu). Jedna od metoda merenja faze brojanjem događaja je razrađena u radu [4]. Tehnike merenja faze zasnovane na modulaciji, kao što je istraženo u [5], [6], koriste mikser frekvencije za upoređivanje faze signala koji se ispituje, sa fazom referentnog signala. Ove metode nalaze primenu u različitim oblastima kao što su telekomunikacije i radarski sistemi. Metode zasnovane na odabiranju signala uključuju digitalizaciju signala i naknadnu digitalnu obradu, gde se odabiranje ulaznog signala vrši pomoću referentnog signala takta. Radovi [7], [8] predstavljaju sisteme za merenje faze koji uključuju metode zasnovane na odabiranju.

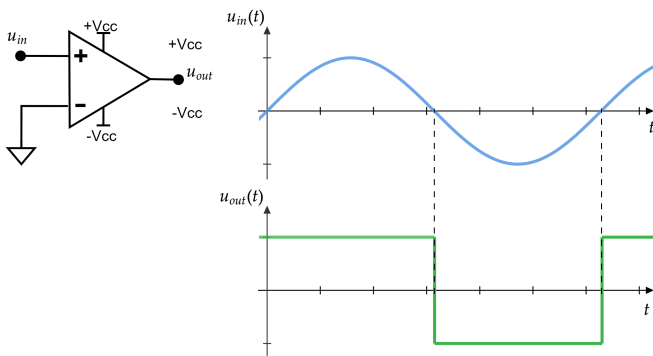
Metoda merenja koja je uvedena u ovom radu pripada prvoj kategoriji metoda merenja faze, jer se oslanja na određivanje fazne

razlike između dva signala iste frekvencije merenjem vremenskog pomeranja između odgovarajućih tačaka u tim signalima. Dakle, kako se fazni stav definiše kao mera međusobnog smicanja dva periodična signala, za dva periodična talasna oblika iste frekvencije, odnosno, periode T , fazni stav $\Delta\Phi$ moguće je definisati na osnovu vremenskog intervala Δt za koji su signali međusobno smaknuti, kao $\Delta\Phi = \frac{2\pi}{T} \cdot \Delta t$. U cilju merenja faznog stava dva periodična signala na izlazu dvokanalnog izvora moguće je vršiti merenje upravo vremenskog smicanja datih signala upotrebom tajmerskih modula. Ovakav pristup zahteva prilagođavanje analognih veličina sa izlaza dvokanalnog izvora, digitalnim tajmerskim modulima. Dakle, neophodno je uvesti dodatni stepen čija je uloga konverzija analognih veličina - struje i napona sa izlaza dvokanalnog izvora, u digitalne veličine - periodične povorke impulsa, istog faznog stava (slika 2).



Slika 2. Analogni prostoperiodični signali sa izlaza dvokanalnog izvora (gore) i odgovarajuće periodične povorke impulsa (dole) jednakog faznog tj. vremenskog smicanja

U implementiranom sistemu konverzija prostoperiodičnih signala u periodične povorke impulsa vrši se upotrebom komparatora (slika 3). Invertujući ulaz komparatora povezan je na nulti potencijal (masa), dok je na neinvertujući ulaz doveden prostoperiodični signal.



Slika 3. Konverzija prostoperiodičnog talasnog oblika u periodičnu povorku četvrtki upotrebom komparatora

Na ovaj način omogućena je detekcija prolaska signala kroz nulu, a izlazna povorka četvrtki odgovara znaku ulaznog prostoperiodičnog

signala, te je povorka četvrtki koja se dobija na izlazu komparatora iste frekvencije i faze kao odgovarajući ulazni signal, a amplituda datog signala određena je naponom napajanja komparatora.

Metode merenja faznog stava upotrebom tajmerskih modula zašnivaju 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. ANALIZA PREDLOŽENOG MERNOG SISTEMA

Merenje vremenskih intervala upotrebom tajmerskih modula ogleda se u vrhunskim mernim performansama, međutim, ove metode retko se primenjuju u svrhe merenja faznog stava usled niza problema koji se javljaju u stepenu za konverziju analognih veličina u digitalne veličine. 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 komponenta u okviru filtera za uklanjanje šuma iz ulaznih signala.

A. Problemi merenja faznog stava tajmerskim modulima

Prisustvo šuma u ulaznim signalima predstavlja jedan od značajnih problema predloženog mernog sistema. Šum značajno većih frekvencija u odnosu na razmatrani ulazni signal utiče na detekciju višestrukih prolazaka signala kroz nulu na komparatoru. Ovo dovodi do višestrukih uzlaznih, odnosno, silaznih ivica, tj. *bouncing*-a ivica izlaznog signala komparatora, što uvodi grešku u merenje vremenskih intervala tajmerskim modulima koji se uključuju i isključuju u trenucima određenim tranzicijama izlaznog signala komparatora sa jednog logičkog nivoa na drugi.

Postojanje ofseta komparatora takođe predstavlja značajan problem u predloženom sistemu za merenje faznog stava. 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, te ukoliko postoji ofset komparatora uzlazna, odnosno, silazna ivica izlaznog signala ne javlja se u trenutku koji odgovara prolasku ulaznog signala kroz nulu, što dovodi do pogrešne informacije o vremenskom trenutku kada je potrebno započeti, odnosno, zaustaviti ciklus merenja tajmerskog modula. Dakle, ofset komparatora unosi grešku u merenje faznog stava signala.

B. Predlozi rešenja uočenih problema

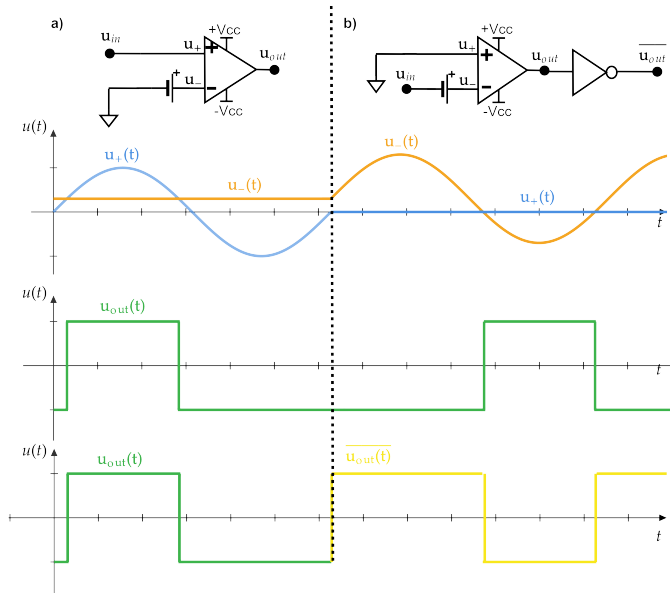
Problem prisustva šuma u strujnom i naponskom signalu moguće je rešiti na nekoliko načina. U ovom istraživanju implementiran je sistem koji za potiskivanje šuma u ulaznim prostoperiodičnim signalima koristi filtere propusnike niskih učestanosti (NF filtre), čija je uloga da propuste frekvenciju koja odgovara frekvenciji ulaznog signala, a potišnu signale viših frekvencija, odnosno, šum. Dati pristup unosi dodatne probleme koje je neophodno imati u vidu, a oni se ogledaju u vremenskom kašnjenju koje filteri uvode u signale, i problemu 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 4). Predložena metoda podrazumeva da se u toku vremenskog intervala u trajanju jedne periode ulaznog signala, na neinvertujući ulaz komparatora dovodi prostoperiodični signal, dok se na invertujući ulaz povezuje masa. U toku trajanja naredne periode ulaznog signala, na neinvertujući ulaz komparatora povezuje se masa, a na invertujući ulaz dovodi se ulazni prostoperiodični signal. Ilustracija opisanog postupka sa odgovarajućim prikazima signala na ulazima i izlazu komparatora prikazana je na slici 4. Gornji grafik daje prikaz signala na invertujućem $u_-(t)$ i neinvertujućem ulazu komparatora $u_+(t)$ u toku dve

periode ulaznog signala. Grafik u sredini na slici 4 predstavlja signal na izlazu komparatora. Kako se u toku druge periode zamenjuju signali na neinvertujućem i invertujućem ulazu toku druge periode izlaznu povorku četvrtki potrebno je invertovati. Izlazni signal sistema prikazan je na donjem grafiku na slici 4.

Na svake dve periode ulaznog signala dodatno se vrši zamena ulaznih signala sistema, kao i izlaznih signala sistema.

Početa faza ispitivanja predloženog sistema podrazumevala je simulacionu analizu sistema. Simulacije su vršene upotrebom *LTSpice* softvera.



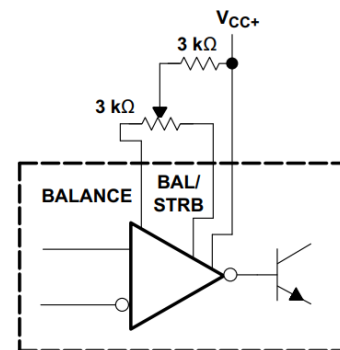
Slika 4. Predlog rešenja problema usled ofseta komparatora: zamena ulaza komparatora i invertovanje izlaza komparatora

U radu [9] prikazana je simulaciona analiza opisanog sistema. U okviru simulacija vršena je analiza sistema u odnosu na prethodno opisane probleme - ofset komparatora, šum u ulaznim signalima, 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. Razmatrani su uticaji pojedinačnih problema na performanse sistema, kao i uticaj kombinacije problema. Rezultati simulacionih analiza mernog sistema pokazali su da se smenjivanjem ulaza komparatora značajno smanjuje greška usled ofseta komparatora. Za razmatrane vrednosti napona ofseta komparatora od 1 mV do 500 mV ostvareno je smanjivanje odstupanja zadate od izmerene vrednosti faze smenjivanjem ulaza do 120 puta. U okviru simulacija analizirana su odstupanja izmerenog faznog stava od zadanog u odnosu na različite vrednosti otpornosti R u NF filteru. Analizom problema u okviru ovog pristupa utvrđeno je da se smenjivanjem ulaza komparatora, kao i smenjivanjem signala koji se dovode na NF filtre uspešno eliminiše uticaj razlike NF filtera na dva kanala, gde se primenom predložene metode greška faze usled razlike NF filtera smanjuje oko 20 puta. Kroz prethodno istraživanje prikazano u radu [10] izvršeno je testiranje predložene metode. U ovom radu izvršena je praktična implementaciji sistema, namenjenog za rad sa mikrokontrolerom, gde se uklanjanje sistematske greške vrši predloženom metodom upotrebom prekidačkih elemenata kontrolisanih od strane mikrokontrolera, a takođe, samo merenje faznog stava vrši se pomoću tajmera mikrokontrolera.

III. IMPLEMETACIJA MERNOG SISTEMA

Na slici 6 prikazan je blok dijagram realizovanog sistema.

Merni sistem se sastoji od dva merna kanala, od kojih svaki prihvata analogni sinusni signal na svom ulazu i generiše odgovarajuću periodičnu povorku četvrtki na svom izlazu. Osnovni element svakog kanala je komparator, ključan za pretvaranje ulaznih sinusnih signala u povorke četvrtki. Kao komparator upotrebljeno je LM311 integrisano kolo. Na pinove 2 i 3 LM311 čipa dovode se ulazni signali, gde je neophodno periodično menjati signale na data dva pina. Ofset komparatora LM311 moguće je podešavati pomoću pinova 5 i 6, odnosno, BALANCE i BALANCE/STROBE, redom. Na slici 5 prikazan je princip povezivanja navedenih pinova kako bi se varirale vrednosti napona ofseta komparatora LM311. Upotrebom 2×3 zaglavlja, kratkospojnika i naponskih razdelnika omogućava se dovođenje 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.



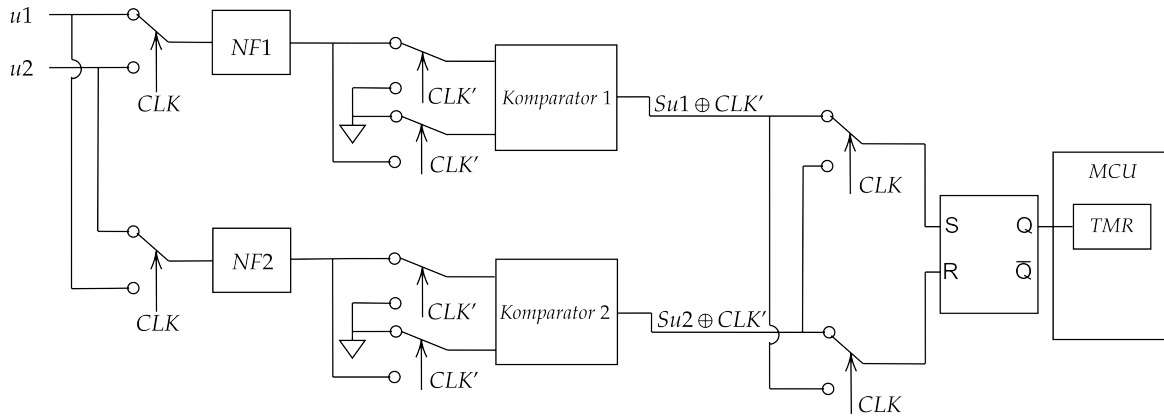
Slika 5. Princip povezivanja pinova BALANCE i BALANCE/STROBE LM311 čipa za podešavanje ofseta komparatora

Filtracija ulaznog signala se ostvaruje upotrebom pasivnih niskopropusnih filtera prvog reda, odnosno, RC komponente, na dva kanala mernog sistema. NF filtri realizovani su kao pasivni RC filtri 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 μF . Dodatno, na pinove za napajanje svih integrisanih kola povezani su, ka masi, *decoupling* kondenzatori kapacitivnosti 100 nF.

Sa stanovišta minimizacije greške merenja, ključne komponente svakog kanala su prekidački elementi, odgovorni za smenjivanje signala između invertujućih i neinvertujućih komparatorских ulaza u određenim vremenskim intervalima, logika invertovanja izlaza komparatora, zadužena za invertovanje izlaznog signala komparatora u određenim vremenskim intervalima, kao i prekidački elementi koji se koriste za smenjivanje ulaza i izlaza dva merna kanala. Smenjivanje signala na invertujućem i neinvertujućem ulazu komparatora vrši se upotrebom analognih prekidača u okviru integrisanog kola CD4053BE. Važno je uzeti u obzir serijski otpor analognih prekidača, što dodatno utiče na vrednosti RC komponente na dva kanala. Analogni prekidači zaduženi za smenjivanje signala na invertujućem i neinvertujućem ulazu kontrolisani su upravljačkim signalom frekvencije koja je upola manja od frekvencije ulaznog analognog signala, koji su na slici 6 označeni kao CLK'.

Uzimanje invertovanog, odnosno, neinvertovanog signala sa izlaza komparatora kao izlaza sistema vrši se upotrebom digitalnih multipleksera PC74HC257. Da bi se postigla inverzija izlaza komparatora svake druge periode ulaznog signala, izlazni signal komparatora se



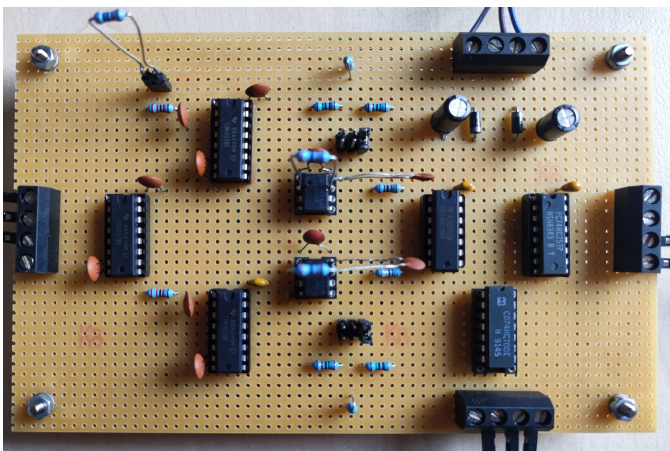
Slika 6. Blok dijagram sistema

usmerava na ulaz logičkog eks-ili kola SN74HC86, dok se na drugi ulaz eks-ili kola dovodi CLK' upravljački signal u vidu pravougaone povorke. Dodatno, ulazni signali na dva kanala, zajedno sa izlaznim signalima komparatora, se prebacuju između mernih kanala svaka dva perioda ulaznog signala. Shodno tome, kontrolni signal za prekidačke elemente na ulazu i izlazu mernog sistema je označen kao CLK, sa frekvencijom koja je upola manja od CLK' signala.

Upravljački signali CLK i CLK' generišu se kao povorke četvrti upotrebom jednog od tajmerskih modula mikrokontrolera, gde se po isteku zadatog vremenskog intervala stanja određenih digitalnih izlaznih pinova menjaju. Ovi signali dovode se na jedan od terminala sa zavrtanjem realizovane pločice, i vode se dalje na određene ulaze integrisanih kola u okviru pločice.

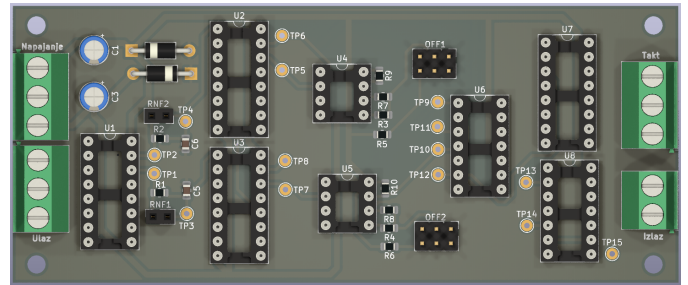
Konačno, izlazni stepen mernog sistema integriše SR leč kolo CD74HCT00, gde je izlazni signal Q zavisao od izlaza komparatora u određenim vremenskim intervalima. Usmeravanje izlaznog signala s_{u1} sa kanala 1 na S (set) ulaz SR leča, i izlaznog signala s_{u2} sa kanala 2 do R (reset) ulaza SR leča, generiše pravougaoni impulsni signal na Q izlaza SR leča. U ovoj konfiguraciji, trajanje visokog naponskog nivoa u Q signalu odgovara vremenskom kašnjenju između dva ulazna signala, pod pretpostavkom da signal sa kanala 2 zaostaje za signalom sa kanala 1. Rezultujući izlazni signal SR leča služi kao izvorni signal gejta tajmera i usmeren je na tajmerski modul mikrokontrolera.

Implementirana proto pločica sa opisanim komponentama sistema prikazana je na slici 7.



Slika 7. Proto pločica sistema za merenje faznog stava tajmerskim metodama

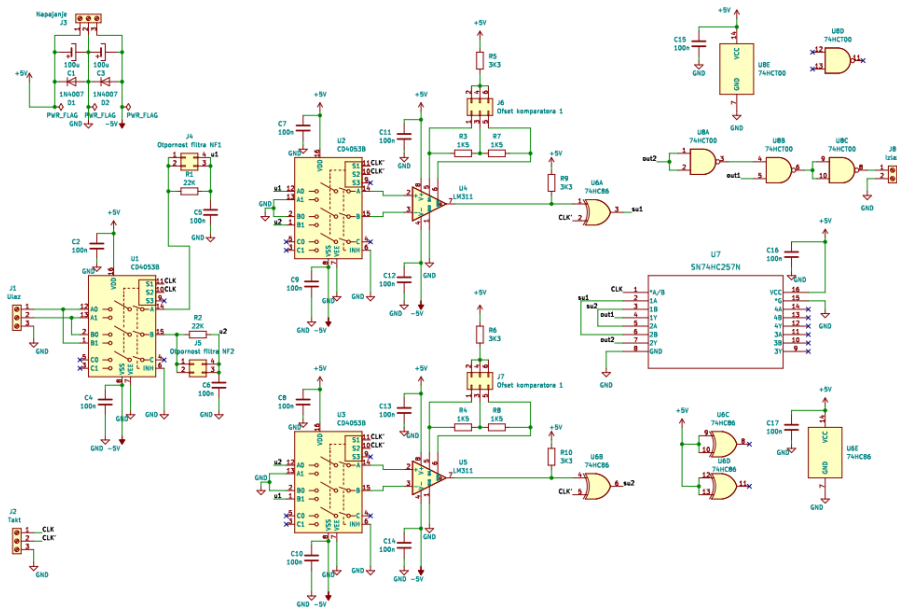
U odnosu na implementiranu proto pločicu realizovana je odgovarajuća šema, kao i PCB (Printed Circuit Board) dizajn. Šema opisanog sistema, prikazana na slici 9, kreirana je u okviru KiCAD softvera, zajedno sa odgovarajućim PCB dizajnom, koji je prikazan na slici 8.



Slika 8. 3D prikaz PCB dizajna

IV. EKSPERIMENTALNA POSTAVKA I REZULTATI MERENJA

Merenje vremenskih intervala između signala se vrši upotrebom PIC18F87K22 mikrokontrolera, koristeći njegova dva tajmerska modula, TMR0 i TMR1. Izvorna frekvencija tajmerskih modula iznosi 16 MHz, što znači da se vrednost registra tajmera povećava svakih $0,0625 \mu\text{s}$. TMR0 je namenjen za generisanje upravljačkih signala prekidačkih elemenata - CLK i CLK' (slika 6) na digitalnim izlaznim pinovima mikrokontrolera. U eksperimentalnoj postavci, frekvencija analognih ulaznih signala podešena je na 50 Hz, pa je modul TMR0 konfigurisan da generiše prekidne na svakih 20 ms. Stanje CLK' pina se menja sa svakim prekidom tajmera TMR0, dok se stanje CLK pina menja sa svakim drugim prekidom tajmera TMR0, generišući kontrolne signale u obliku pravougaonih povorki sa periodima od 40 ms i 80 ms, respektivno. Signali CLK i CLK' se propagiraju sa izlaznih pinova mikrokontrolera na ulaze kontrolnih signala integrisanih prekidačkih kola unutar implementiranog hardvera mernog sistema. Na ulaz sistema sa slike 7 sa Siglent SDG1025 signal generatora dovedeni su prostoperiodični signali amplitude 4 Vpp i frekvencije 50 Hz. Siglent SDG1025 predstavlja dvokanalni signal generator, frekvijskog opsega do 25 MHz, frekvencije odabiranje do 125 MHz i 14-bitne rezolucije [11]. Fazni stav jednog od signala je variran od 80 do 100 stepeni, a na izlazu sistema mereno je vreme između dve ivice impulsa sa izlaza SR leča. Pomoću odgovarajućih konektora, paralelno sa otpornikom u okviru jednog od NF filtera povezan je otpornik od 100 k Ω , čime se postiže dodatno razdešavanje filtera. Takođe, kratkospojnicima su podešeni ofseti na



Slika 9. Šema sistema za merenje faznog stava tajmerskim metodama realizovanog upotrebom komparatora bez histereza i NF filtara

dva komparatora, tako da se postigne njihova maksimalna razlika omogućena BALANCE i BAL/STRB pinovima. Nakon podešavanja ulaznih i izlaznih signala dva merna kanala, kao i konfiguracije ulaza i izlaza komparatora, postupak merenja se izvršava za četiri moguća slučaja konfiguracije ulaza i izlaza sistema, navedena u tabeli I. Ova četiri slučaja su određena prekidačkim elementima sistema koji se kontrolišu signalima CLK i CLK'. Na slici 10 je dat dijagram izvršavanja koda napisanog za PIC18F87K22 mikrokontroler u C programskom jeziku, u cilju merenja faznog stava signala. TMR1 modul PIC18F87K22 mikrokontrolera je namenjen za merenje vremenskog intervala između rastuće i opadajuće ivice impulsa izlaznog signala SR leča. TMR1 konfigurisan je kao gejtvani tajmer, gde gejt signal predstavlja izlazni signal SR leča, koji se dovodi na pina izvora signala gejta tajmera mikrokontrolera. Meranjem impulsa gejtvanih izlaznim signalom SR leča, TMR1 daje uvid u vremensko kašnjenje između dva ulazna signala sistema, pružajući na taj način informacije o faznom stavu datih signala.

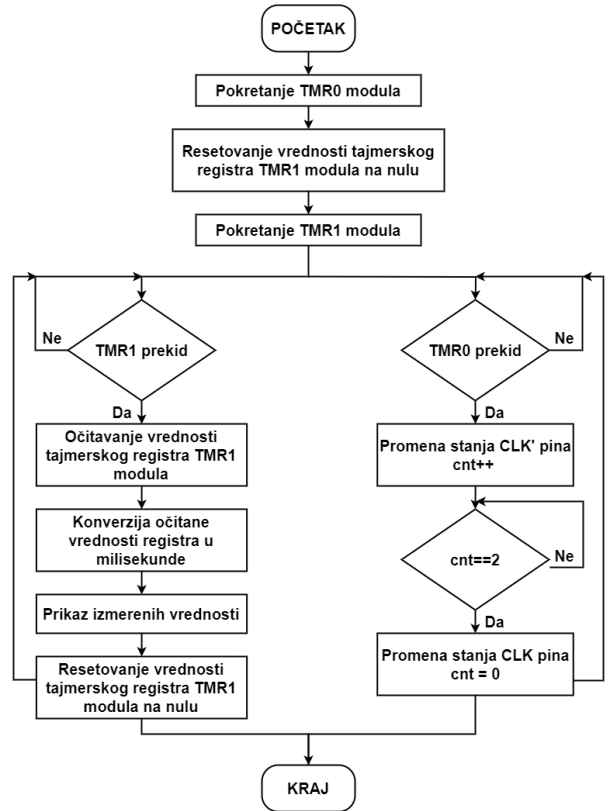
izazvanih razlikama između niskopropusnih filtera na dva kanala i napona ofset komparatora. U slučaju srednje vrednosti greška se svodi na vrednost blisku nuli, što znači da proces smenjivanja signala na dva kanala, smenjivanja ulaza komparatora i invertovanja izlaza komparatora uspešno eliminiše grešku koja se ispoljava u mernom sistemu.

Tabela I
RAZLIČITE KONFIGURACIJE ULAZA I IZLAZA KOMPARATORA K1 I K2

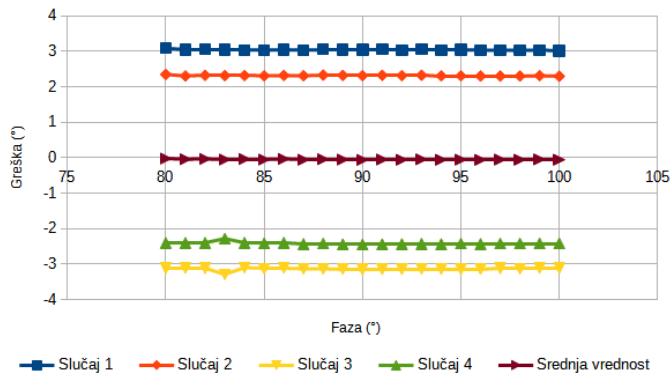
Slučaj	K1 ulaz	K2 ulaz	K1 izlaz	K2 izlaz
1	u_1	GND	u_2	GND
2	GND	u_1	GND	u_2
3	u_2	GND	u_1	GND
4	GND	u_2	GND	u_1

Za svaki zadati fazni pomak, očitani su registri tajmera TMR1 mikrokontrolera za četiri različita slučaja. Na osnovu poznate frekvencije takta tajmerskog modula, vrednosti iz tajmerskog registra pretvorene su u milisekunde.

Ekperimentalni rezultati su dali izmerene vremenske intervale na osnovu kojih su određene vrednosti faznog stava, za poznatu periodu signala od 20 ms. Na grafiku sa slike 11 prikazane su greške merenja u vidu odstupanja zadatog od izmerenog faznog stava za četiri moguća slučaja konfiguracije sistema, kao i srednja vrednost greške za data četiri slučaja. Na slici 11 za slučajeve 1, 2, 3 i 4, uočavaju se izražene greške. Date greške ispoljavaju se usled sistematskih grešaka



Slika 10. Dijagram toka izvršavanja eksperimenta



Slika 11. Odstupanje zadate od izmerene vrednosti faze u odnosu na zadate fazne stavove

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 dat je predlog realizacije sistema. Predlog realizacije sistema je proveren kroz simulacije i vršena je analiza uticaja svakog od uočenih problema na performanse sistema. Simulacionom analizom pokazano je da se zamenom ulaza komparatora značajno smanjuje greška usled ofseta komparatora, kao i da se zamenom ulaza komparatora, i zamenom signala koji se dovode na NF filtre uspešno eliminiše uticaj razlike NF filtara na dva kanala. Na osnovu rezultata simulacije, pristupljeno je hardverskoj implementaciji sistema. Analizom rezultata merenja sprovedenog eksperimenta uočeno je da sistematska greška nastaje usled opisanih hardverskih problema. Pod uticajem sistematske greške usled razlike NF filtara i ofseta komparatora, u slučajevima 1, 2, 3 i 4 uočava se značajno odstupanje izmerenog od zadatog 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 eliminišemo uticaj sistematske greške.

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 filtara.

ZAHVALNICA

Ovo istraživanje je podržano od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija (br. ugovora: 451-03-65/2024-03/200156) i Fakulteta tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu kroz projekat "Naučnoistraživački i umetničkoistraživački rad istraživača u nastavnim i saradničkim zvanjima Fakulteta tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu" (br: 01-3394/1).

LITERATURA

- [1] Mitrović, Zoran. "A phase angle standard." *Measurement Science and Technology* 15.3 (2004): 559.
- [2] Zupunski, I. Z., Holicek, L. M., i Vujicic, V. V. "Power-factor calibrator." *IEEE transactions on instrumentation and measurement* 46.2 (1997): 408-411.

- [3] 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.
- [4] G. Crotti, A. D. Femine, D. Gallo, D. Giordano, C. Landi, M. Luiso, Measurement of the absolute phase error of digitizers, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 68 (6) (2019) 1724–1731. doi:10.1109/TIM.2018.2888919
- [5] K. Falaggis, D. Towers, C. Towers, Phase measurement through sinusoidal excitation with application to multi-wavelength interferometry, *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics* 11 (2009) 054008. doi:10.1088/1464-4258/11/5/054008
- [6] A. De Marcellis, G. Ferri, E. Palange, A fully analog high performances automatic system for phase measurement of electrical and optical signals, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 64 (10 2014). doi:10.1109/TIM.2014.2360788
- [7] F. Overney, A. Mortara, Synchronization of sampling-based measuring system, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 63 (1) (2014) 89–95. doi:10.1109/TIM.2013.2275204
- [8] F. Picariello, I. Tudosa, L. D. Vito, S. Rapuano, N. G. Paulter, An initial hardware implementation of a new method for phase measurement of sinewave signals, in: 2019 11th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), 2019, pp. 1–6. doi:10.1109/ATEE.2019.872497
- [9] Mandić, Sanja i Pejić, Dragan. "Merenje faznog stava tajmerskim modulom, problemi i moguća rešenja", Konferencija Merno-informacione tehnologije 2022 (MIT 2022), Fakultet tehničkih nauka Novi Sad, Republika Srbija, 26. - 30. 12. 2022.
- [10] Sanja Mandić, Marjan Urekar, Đorđe Novaković i Dragan Pejić, "Sistem za merenje faznog stava zasnovan na tajmerskim metodama", LXVII konferencija ETRAN, Istočno Sarajevo, Bosna i Hercegovina, 5 - 8. jun 2023.
- [11] 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>

ABSTRACT

In this paper, a system for measuring the phase of two periodic signals using timer modules is presented. The system is designed to measure the phase of periodic signals from a two-channel current and voltage source. The two channels of the source suffer from degradation of the phase, which necessitates a correction of the phase. The need to perform the correction of the phase of two periodic signals requires knowledge of the given phase at the input two-channel source and precise measurement of the phase at the output two-channel source. The method presented in this paper measures the time shift of periodic signals to determine the phase value. The measurement of time intervals is performed using a timer module within the microcontroller. To measure the phase position of analog periodic signals using a timer module, the analog quantities, high voltage and current from the output of the two-channel source, must be converted into pulse sequences suitable for operation with digital timer modules. This paper provides insight into the implementation of a system that converts analog quantities from the output of the two-channel source into digital signals. These digital signals are used to measure the phase of the two periodic signals using the timer module of the microcontroller. Additionally, the paper addresses the problems identified in the given measurement system and demonstrates the implementation of a method to eliminate these problems.

Implementation of the phase measurement system of simple periodic signals based on timer modules

Sanja Mandić, Đorđe Novaković, Dragan Pejić