

dr.sc. Boris Šnajder  
7com Limited  
[bsnajder@gmail.com](mailto:bsnajder@gmail.com)

dr.sc. Ian Watson  
7com Limited  
[ian@7com.co.uk](mailto:ian@7com.co.uk)

mag. Ivan Sokac ml.  
Elektron Erma  
[ivan.sokac.ml@elektron.hr](mailto:ivan.sokac.ml@elektron.hr)

## MJERENJE FREKVENCije MREŽNOG NAPONA U SVRHU UTVRĐIVANJA MJERODAVNIH VELIČINA ZA OCJENU KVALITETE ELEKTRIČNE ENERGIJE

### SAŽETAK

U svrhu zaštite i osiguranja optimalnog funkcioniranja opreme i strojeva potrebno je osigurati kvalitetnu opskrbu električnom energijom. U sustavu napajanja izmjeničnim naponom dvije veličine koje se mogu istaknuti kao najbitnije za opis kvalitete električne energije su amplituda i frekvencija sinusnog vala. U stacionarnom stanju frekvenciju sinusnog vala možemo definirati pomoću broja perioda u nekom vremenskom intervalu. Zbog ograničene razlučivosti mjerenja vremena, za postizanje bolje razlučivosti, ali i točnosti, mjerenja frekvencije, potrebno je mjerenje obaviti u dužem vremenskom intervalu, unutar kojeg sustav ne mora biti stacionaran. Nadalje, u određenim situacijama (primjer rotacijskih strojeva) moguće je postaviti pitanje kolika je frekvencija i za intervale koji su kraći od perioda sinusnog vala.

Korištenjem bilo kojeg načina mjerenja frekvencije prisutnost harmonika i tranzijenata predstavlja šum i interferencije, te je signal potrebno filtrirati. Filtriranje signala unosi kašnjenje u mjernom lancu, što može biti kritično za sustave zaštite. Korištenjem više metoda istovremeno cilj je dobiti što više informacija o stanju sustava, a koje je moguće onda i naknadno analizirati u svrhu dijagnostike i identifikacije kvara.

**Ključne riječi:** kvaliteta električne energije, frekvencija, prolazak kroz nulu, sinhrofazor

### MEASURING NETWORK VOLTAGE'S FREQUENCY AS A PART OF POWER QUALITY EVALUATION

#### SUMMARY

In order to protect and ensure optimal functioning of equipment and machinery, it is necessary to provide a quality supply of electric power. In an alternating voltage power supply system, two variables that can be highlighted as the most important for describing the quality of electric power are the amplitude and frequency of the sinusoidal wave. In a steady state, the frequency of the sinusoidal wave can be defined by the number of periods in a given time interval. Due to the limited resolution of time measurements, to achieve better resolution and accuracy in measuring frequency, it is necessary to measure it over a longer time interval. Furthermore, in certain situations (such as with rotating machinery), it is possible to question what the frequency is for intervals shorter than the period of the sinusoidal wave.

Using any method of measuring frequency, the presence of harmonics and transients represents noise and interference, and the signal needs to be filtered. Filtering the signal introduces a delay in the measurement chain, which can be critical for protection systems. By using multiple methods simultaneously, the aim is to obtain as much information about the system's state as possible, which can then be analyzed retrospectively for the purpose of diagnosis and fault identification.

**Key words:** power quality, frequency, zero crossing, synchrophasor

## 1. UVOD

Sustav električne mreže sastoji se od sustava za proizvodnju električne energije, prijenos i distribuciju električne energije, te potrošača električne energije. Javni sustavi za proizvodnju i distribuciju električne energije zasnovani su na izmjeničnoj električnoj struji. Kako bi svi elementi sustava ispravno funkcionirali, svim sudionicima u električnoj mreži moraju biti poznati parametri električne energije, odnosno radni uvjeti [1, 2]. Primjerice, za sinkrone električne motore, frekvencija električne struje će određivati brzinu vrtnje. Za elektroničke uređaje, jedan od bitnih faktora je postizanje visoke učinkovitosti pretvorbe, a koja se postiže za specificirane vrijednosti napona i frekvencije izmjenične električne energije.

S mnogo različitih potrošača, a danas u uvjetima liberalizirane proizvodnje i distribucije električne energije, kako bi se uskladilo mnoštvo čimbenika u električnoj mreži i osiguralo njihovo ispravno i efikasno funkcioniranje, donesen je niz normi koje definiraju parametre električne struje i napona [3, 4]. Kao primjer takve norme može se navesti IEC 61000-4-30 koja definira parametre kvalitete električne energije. Uređaji koji su priključeni na električnu mrežu moraju se ponašati u skladu s propisanim normama.

Za izmjeničnu električnu energiju (napon), ne ulazeći u mnoštvo detalja za objektivnu kvalifikaciju kvalitete električne energije specificirane raznim normama, kao dva najistaknutija (najbitnija) parametra mogu se izdvojiti amplituda naponskog signala i frekvencija. Za optimalno funkcioniranje mreže (smanjenje gubitaka) prilikom proizvodnje i distribucije naponska razina se mijenja, dok je frekvencija naponskog signala zapravo jedini faktor bi trebao biti jedinstven u cijelom sustavu električne mreže, te se često kao pojam koristi i frekvencija mreže.

## 2. KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE

Prema normi IEC 61000-4-30 elementi koji definiraju kvalitetu električne energije su: frekvencija mreže, amplituda napona napajanja, propadi i nadvišenja napona, treperenje napona, prekidi i tranzijenti, nesimetrija napona, harmonici i interharmonici, ali i niz drugih parametara.

U idealnom slučaju napon napajanja je periodični sinusoidni valni oblik, definirane amplitude i frekvencije:

$$U(t) = A \sin(2\pi t \omega_0), \quad (1)$$

gdje je  $A$  amplituda,  $\omega_0$  je frekvencija mreže,  $t$  je vrijeme, a  $U(t)$  je trenutna vrijednost napona.

Norme koje propisuju mjerenje kvalitete električne energije opisuju načine prema kojima je potrebno mjeriti odstupanje napona napajanja u odnosu na idealni. Također, kako su napajački napon i električna struja povezani preko impedancije trošila ( $i$  izvora), u svrhu razumijevanja izvora koji dovode do odstupanja napona od željenih vrijednosti, uobičajeno se propisuje i mjerenje električne struje.

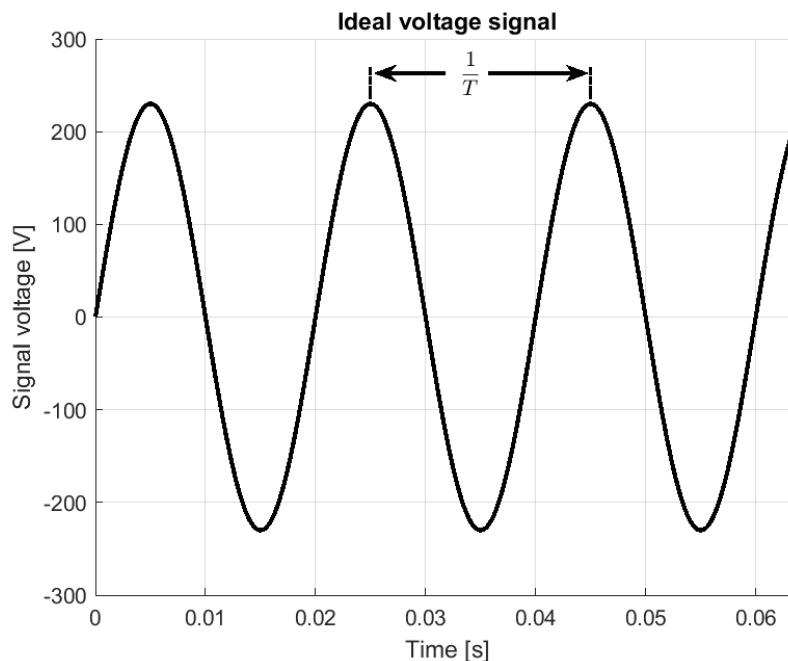
Idealni valni oblik napona dan izrazom (1) podrazumijeva nepromjenjivu amplitudu i frekvenciju. S matematičkog stajališta, takav proces je stacionaran, te mjerenje u bilo kojem vremenskom trenutku ili intervalu produciralo bi jednake rezultate. Međutim, u stvarnosti napon napajanja je suma osnovnog harmonika (s vremenski promjenjivom amplitudom), viših harmonika, te interharmonika:

$$U(t) = A(t)\sin(2\pi t \omega_0(t)) + \sum_{n=2}^N A_n(t)\sin(2\pi t \omega_0(t)n + \phi_n) + \sum_m^M A_m(t)\sin(2\pi t \omega_m(t)) + n(t), \quad (2)$$

gdje je  $A(t)$  amplituda osnovnog harmonika,  $A_n(t)$  i  $A_m(t)$  su amplitude harmonika i interharmonika, te  $n(t)$  je šum.

## 3. MJERENJE FREKVENCije ELEKTRIČNE MREŽE

U slučaju idealnog signala danog izrazom (1), frekvencija sinusnog valnog oblika definira se kao broj ciklusa u jednoj sekundi, što inherentno podrazumijeva nepromjenjivost mjerene veličine u promatranom vremenskom intervalu. I u slučaju definicije frekvencije kao recipročne vrijednosti trajanja jednog ciklusa sinusnog vala, što je ilustrirano na Slika 1., minimalni vremenski interval za mjerenje je vrijeme trajanja jednog perioda, što također naglašava da definiranje frekvencije mreže na ovakav način povlači za sobom stacionarnost signala, barem u promatranom vremenskom intervalu.



Slika 1. Ilustracija idealnog naponskog signala i definicije frekvencije

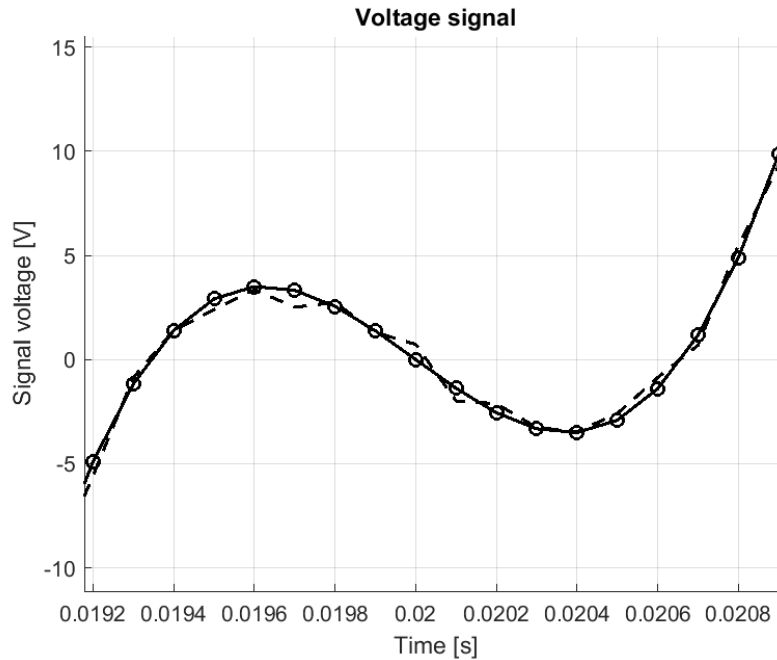
U praksi se navedeni princip uobičajeno implementira kroz mjerenje vremenskog perioda potrebnog da signal završi zadani cjelobrojni broj ciklusa. Takav pristup mjerenje frekvencije je sugeriran u normi IEC 61000-4-30, gdje zadani vremenski interval promatranja signala iznosi deset sekundi, umanjeno za trajanje jednog ciklusa. U takvom pristupu mjerenju frekvencije potrebno je točno odrediti početak svakog ciklusa sinusnog vala. Prolazak sinusnog vala kroz nulu možda je najuobičajeniji način određivanja početka novog ciklusa sinusnog vala, jer ga je relativno lagano realizirati. Dodatno, s obzirom na to da je u tom trenutku derivacija sinusnog vala najveća, umanjuje se utjecaj šuma na mjerenje. Prolazak kroz nulu je metoda koja je predložena u normi IEC 61000-4-30.

U digitalnim mjernim uređajima, naponski signal mreže uzorkuje se analogno-digitalnim pretvaračima (ADC) s nekom frekvencijom uzorkovanja  $F_s$ . Frekvencija uzorkovanja određuje maksimalnu frekvenciju signala koja se može prikazati, te se uobičajeno u mjernim uređajima za nadzor kvalitete električne mreže koristi frekvencija uzorkovanja značajno viša od frekvencije mreže, a kako bi mjerni uređaj mogao izmjeriti harmonike, interharmonike, tranzijente i druge pojave koje sadrže frekvencije značajno više od frekvencije mreže. Analogno sklopovlje ispred ADC-a osigurava uklanjanje komponenti signala koje ADC pretvarač ne može jednoznačno digitalizirati, a kako bi se spriječila nepovratna deformacija degradacija digitalnog signala.

Kako je trenutna razina signala rezultat sume svih komponenti naponskog signala i šuma, prolazak naponskog signala kroz nulu u općem slučaju neće koincidirati s prolaskom kroz nulu osnovnog harmonika. Dapače, viši harmonici mogu često rezultirati višestrukim prolascima naponskog signala kroz nulu tijekom jednog ciklusa osnovnog harmonika, dok će (bijeli) šum uvesti dodatnu nesigurnost u mjerenju. Stoga je uobičajena procedura filtriranje naponskog signala, s ciljem uklanjanja svih komponenti osim osnovnog harmonika, kao i smanjenje razine šuma.

### 3.1. Mjerenje frekvencije metodom prolaska kroz nulu

U digitalnoj domeni, detekciju prolaska kroz nulu vrlo je lagano implementirati kroz detekciju promjene predznaka dva uzastopna uzorka (što se svodi na detekciju promjene najznačajnijeg bita broja). Pri tome, zbog diskretnih vremenskih trenutaka uzorkovanja signala, stvarni trenutak prolaska kroz nulu može se dogoditi u bilo kojem trenutku između dva trenutka uzorkovanja. Također, utjecaj šuma može uzrokovati pomak trenutka kada signal prolazi kroz nulu, ili u slučaju visoke razine šuma, nekoliko uzastopnih prolazaka kroz nulu, što je ilustrirano na Slika 2.



Slika 2. Ilustracija višestrukog prolaska kroz nulu i utjecaja šuma na mjerenje

Šum i izobličenja signala uzrokovat će određenu mjernu nesigurnost u određivanju trenutka prolaska kroz nulu. Također se može pretpostaviti (uz nepromjenjive razine šuma) da se apsolutni očekivani iznos pogreške neće mijenjati kroz vrijeme. Uz takvu pretpostavku, produženje intervala u kojem promatramo signal, odnosno broja ciklusa osnovnog harmonika naponskog signala, rezultirat će smanjenom relativnom pogreškom mjerenja frekvencije signala. Ovdje se opet možemo referencirati na normu IEC 61000-4-30, i interval promatranja od 10 sekundi, što rezultira promatranjem 500 ciklusa, u slučaju nominalne frekvencije mreže. IEC 61000-4-30 propisuje mjernu nesigurnost od 10 mHz. Za postizanje tražene točnosti mjerenja, maksimalno odstupanje detekcije prolaska kroz nulu mora biti manje od (približno) jedne milisekunde.

Mjerna nesigurnost određivanja prolaska kroz nulu zbog diskretnih trenutaka uzorkovanja signala može se smanjiti višom frekvencijom uzorkovanja, te (linearnom) interpolacijom signala između dvije točke. Nedostaci korištenja više frekvencije uzorkovanja je veća snaga šuma u signalu, kao i povećanje kompleksnosti filtera za uklanjanje neželjenih komponenti signala. Dok je detekcija promjene predznaka broja vrlo jednostavna matematička operacija u digitalnim računalima, u slučaju interpolacije signala potrebno je koristiti značajno složenije matematičke operacije za dolazak do rezultata (množenje i dijeljenje brojeva), što, ovisno o platformi koja se koristi za obradu signala, može predstavljati povećanje korištenja resursa, energije ili rezultirati ograničavanjem maksimalne frekvencije uzorkovanja.

U digitalnom sustavu koji mjeri vrijeme, mora biti korišten izvor takta zadovoljavajuće točnosti i stabilnosti.

### 3.2. Mjerenje frekvencije usporedbom s referentnim signalom

Iz opisa mjerenja frekvencije metodom detekcije prolaska kroz nulu, a kako je već i u tekstu bilo naglašeno, pretpostavlja se stacionarnost sustava, odnosno da se mjerene veličine ne mijenjaju. Ako se frekvencija naponskog signala mijenja, metoda detekcije prolaska kroz nulu će kao rezultat dati prosječnu frekvenciju u promatranom vremenskom intervalu. Nadalje, minimalni vremenski interval mjerenja je vrijeme trajanja jednog ciklusa signala, jer to je definicija frekvencije.

Ako je potrebno frekvenciju mjeriti u kraćim vremenskim intervalima, potrebna je drugačija definicija frekvencije. Pojam trenutne frekvencije [4, 5] moguće je definirati kao derivaciju faze:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta(t)}{dt}, \quad (3)$$

gdje je  $f(t)$  trenutna frekvencija, a  $\theta(t)$  trenutna faza. Iako prema literaturi [5] pojam definicije trenutne frekvencije može ovisiti o konkretnoj aplikaciji, u kontekstu kvalitete električne mreže, lagano se

može interpretirati pomoću kuta rotacijskih strojeva, a koji je direktno povezan s naponskim signalom. U kontekstu nadzora kvalitete električne energije, trenutna faza i frekvencija se koriste u sinkrofazorskim mjernim uređajima. Naponski signal se tada može opisati izrazom:

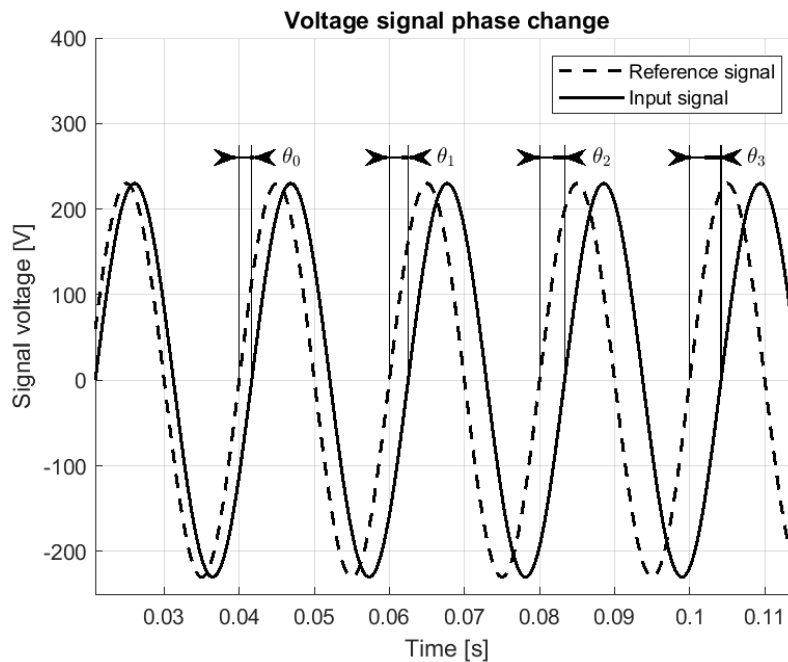
$$U(t) = A \cos\left(\int_0^t 2\pi f(t) dt + \theta_0\right), \quad (4)$$

Prikaz naponskog signala korištenjem fazorske notacije dan je izrazom (5), pri čemu je fazor kompleksni broj koji opisuje signal pomoću amplitude i faze:

$$U(t) = \text{Re}\{Ae^{i\theta_0} e^{i \int 2\pi f(t) dt}\} \quad (5)$$

Korištenjem kompleksnih brojeva za opis signala omogućuje vrlo jednostavno računanje faznog pomaka između dva signala. Sinkrofazorski mjerni uređaji pak mjere fazni pomak između referentnog fazorskog signala i ulaznog signala. Za generiranje referentnog fazorskog signala potrebno je osigurati stabilnu vremensku referencu, koja se danas uobičajeno dobiva korištenjem GPS signala. Korištenje GPS signala omogućuje distribuciju globalne vremenske reference velikom broju mjernih uređaja, čime se omogućuje usporedba trenutne frekvencije u velikom broju mjernih točaka.

Referentni fazorski signal uobičajeno je naponski signal frekvencije koja odgovara nominalnoj frekvenciji mreže (uz poznati početni fazni pomak), te se korištenjem fazorskog računa u kompleksnoj domeni može doći do faznog pomaka između ulaznog i referentnog signala. Daljnjom manipulacijom tako dobivene razlike faze između dva signala korištenjem izraza (3), može se odrediti frekvencija ulaznog signala. Kontinuirana promjena faznog pomaka između referentnog i mjenog signala ilustrirana je na Slika 3.



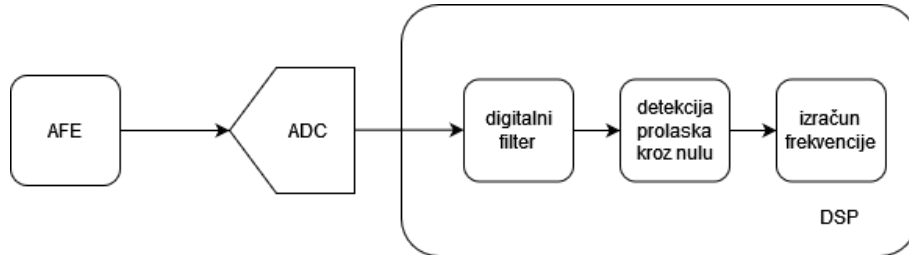
**Slika 3. Ilustracija promjene faznog pomaka između referentnog i mjenog signala**

### 3.3. Implementacija mjerenja frekvencije

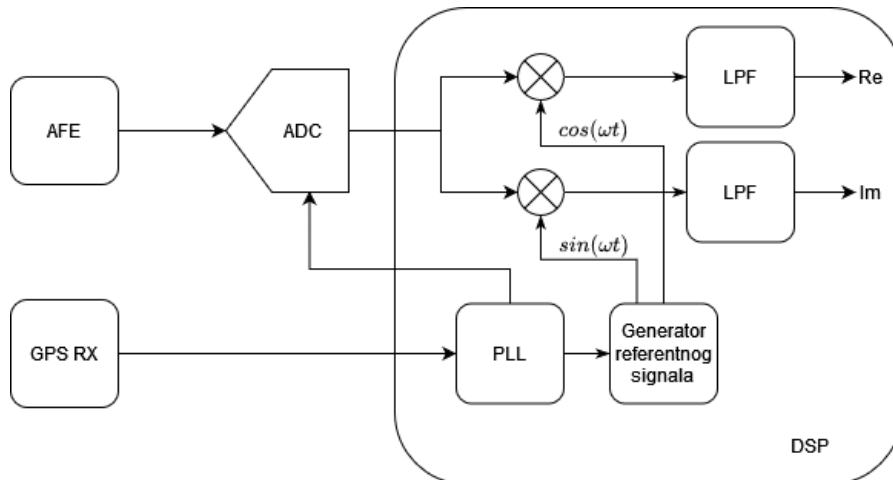
Blok dijagram uređaja za mjerenje frekvencije pomoću detekcije prolaska kroz nulu prikazan je na Slika 4. Prvo se signal prilagođava za analognu-digitalnu pretvorbu u AFE bloku (eng. analog front-end), koji uključuje anti-alias filtre. Nakon što ga ADC blok pretvori u digitalni oblik, dalje se signal obrađuje u digitalnoj domeni. Obrada signala, kao što je primjerice filtriranje, može zahtijevati izvršavanje velikog broja matematičkih operacija. Stoga će ovisno o brzini uzrokovanja signala i broju matematičkih operacija izbor platforme za digitalnu obradu signala biti različit (CPU, DSP ili FPGA).

Ako se frekvencija mjeri metodom usporedbe s referentnim signalom, potrebno je uzrokovanje signala uskladiti s izvorom referentnog signala. To se uobičajeno čini pomoći PLL sklopa, kao što je

prikazano na Slika 5. Ako je ulazni vremenski signal za PLL sinkroniziran s nekom vanjskom vremenskom bazom, poput GPS-a, onda je moguće pomoću ovakvih uređaja uspoređivati ne samo frekvencije, već i faze naponskih signala na različitim mjestima u mreži.



Slika 4. Blok shema uređaja za mjerenje frekvencije metodom detekcije prolaska kroz nulu



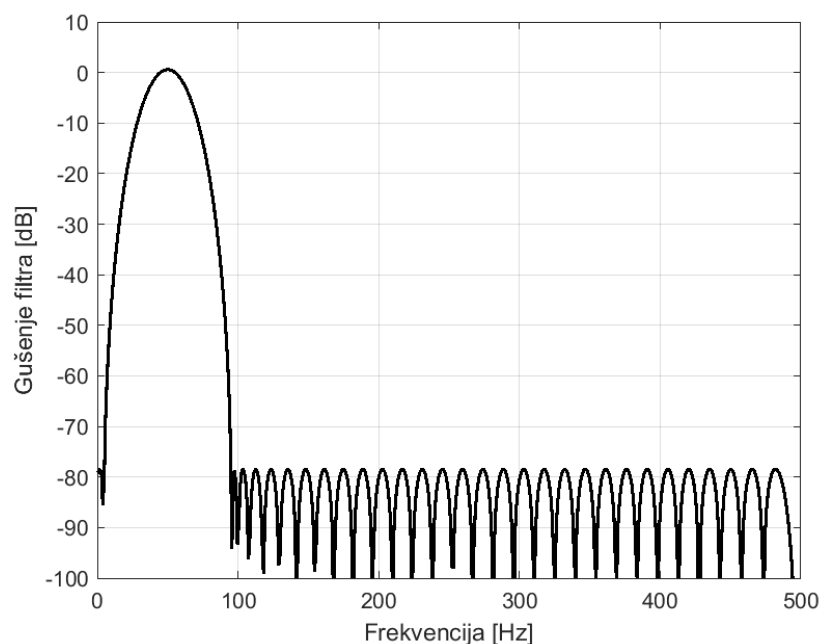
Slika 5. Blok shema uređaja za mjerenje frekvencije metodom usporedbe s referentnim signalom (sinhrofazorom)

### 3.3.1 Filtriranje (naponskog) signala

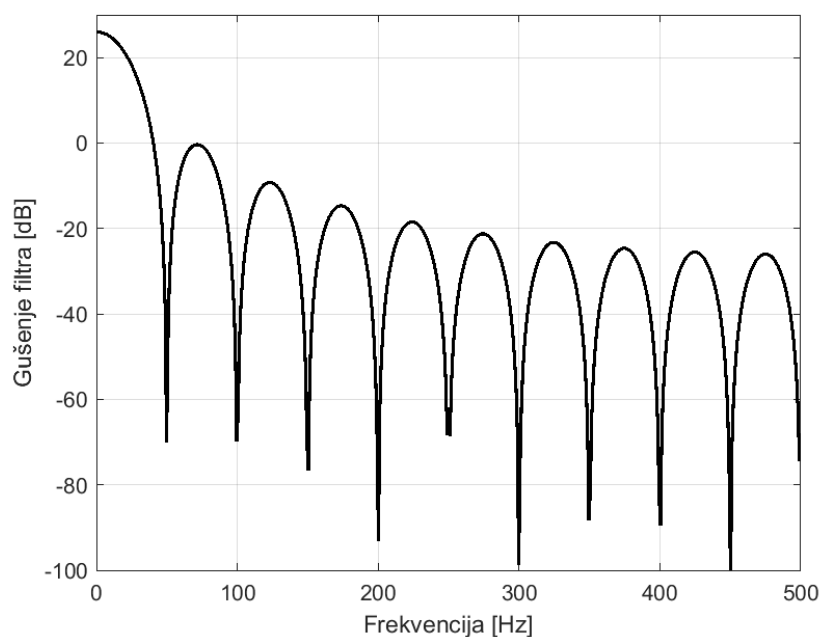
Kako je već spomenuto, a što je vidljivo i u blok shemama uređaja za mjerenje frekvencije, jedan od ključnih dijelova obrade signala je filtriranje signala. U slučaju mjerenja frekvencije metodom detekcije prolaska kroz nulu, digitalni filter je pojasno-propusni filter, pri čemu pojas propuštanja treba odgovarati mjernom području, dok pojas gušenja treba ukloniti sve moguće harmonike i interharmonike iz signala. Kao i uvijek, potrebno je napraviti kompromis između performansi i kompleksnosti. Tako primjerice za pojasno-propusni filter s pojasom propuštanja od 42,5 Hz do 57,5 Hz, te pojasima gušenja do 5 Hz i od 95 Hz (gušenje 80 dB) uz frekvenciju uzorkovanja 1 kHz stupanj FIR filtra je 67 (koji određuje broj računskih operacija) (Slika 6). Povećanje frekvencije uzorkovanja, gotovo linearno će povećati stupanj filtra, te za frekvenciju uzorkovanja od 100 kHz, filter bi bio približno 6750 stupnja. S druge strane, ukoliko bi se za isti pojas propuštanja pojas gušenja promijenio na do 25 Hz i od 75 Hz (kako bi se odstranilo više mogućih interharmonika), stupanj filtra bi se povećao sa 67 na 145.

S druge strane, u implementaciji mjerenja frekvencije pomoću referentnog signala potrebno je koristiti nisko-propusne filtre. Kako će biti pokazano u sljedećem poglavlju, prilikom opisa simulacije opisanih metoda mjerenja, u ovoj metodi je još izraženija potreba za kompromisima prilikom dizajna filtra. Ova metoda mjerenja frekvencije ima značajno nižu latenciju očitavanja frekvencije, koja je jednaka vremenu grupnog kašnjenja filtra, te omogućava gotovo trenutno praćenje promjene frekvencije. Međutim, kako se u ovoj metodi frekvencija računa pomoću derivacije faznog pomaka, šum u izlaznom signalu će biti značajan faktor. Kako niža latencija filtra uobičajeno znači i niže gušenje filtra, potrebno je naći kompromis između željene latencije mjerenja i dozvoljene snage šuma u signalu.

Kako su u mjerenju frekvencije signala mreže najveći izvor smetnji harmonične komponente, kroz realizaciju filtra koji ima nule (i visok stupanj gušenja) samo na frekvencijama koji su višekratnici osnovnog harmonika (Slika 7), moguće je postići zadovoljavajući stupanj gušenja smetnji, uz zadržavanje niske latencije. Tako je primjerice, stupanj filtra, čija je frekvencijska karakteristika prikazana na Slika 7, iznosi 38. Ali pri tome treba voditi računa da, ako filter nije fleksibilan, doći će do značajne degradacije rezultata mjerenja prilikom većeg odmaka frekvencije mreže od nominalne.



Slika 6. Frekvencijska karakteristika pojasno-propusnog filtra



Slika 7. Frekvencijska karakteristika nisko-propusnog filtra

### 3.3.2 Rezultati simulacija mjerenja frekvencije

Kroz simulacije mjerenja frekvencije u nekoliko različitih scenarija uspoređeni su izlazi opisanih metoda mjerenja frekvencija. U prvom scenariju u kojem su uspoređene opisane metode za mjerenje frekvencije naponski signal sastojao se samo od osnovnog harmonika, kojem je frekvencija bila varirana u rasponu od 45 do 55 Hz, uz različitu snagu šuma. Rezultati simulacija dani su u Tablica I. Iz prikazanih rezultata vidljivo je da obje metode daju točnu procjenu frekvencije, ali da metoda detekcije prolaska kroz nulu ima puno manju nesigurnost. Dodatno, u slučaju mjerenja korištenjem usporedbe s referentnim signalom (sinhrofazorom), vidljivo je osjetno povećanje mjerne nesigurnosti kako se povećava razlika frekvencija između ulaznog i referentnog signala.

U sljedećem simuliranom scenariju, ulazni naponski signal uključuje i treći harmonik amplitude 20% osnovnog harmonika, te se usporedbe izlaza opisanih metoda mjerenja dane u Tablica II. Kako je vidljivo iz prikazanih rezultata, u slučaju korištenja metode detekcije prolaska kroz nulu, utjecaj harmonika na rezultate nije zamjetljiv, što je očekivano jer se nalaze u pojasu gušenja filtera. U slučaju korištenja metode usporedbe s referentnim signalom, harmonici značajno utječu na nesigurnost mjerenja, posebice kako se povećava razlika između ulazne i nominalne frekvencije signala.

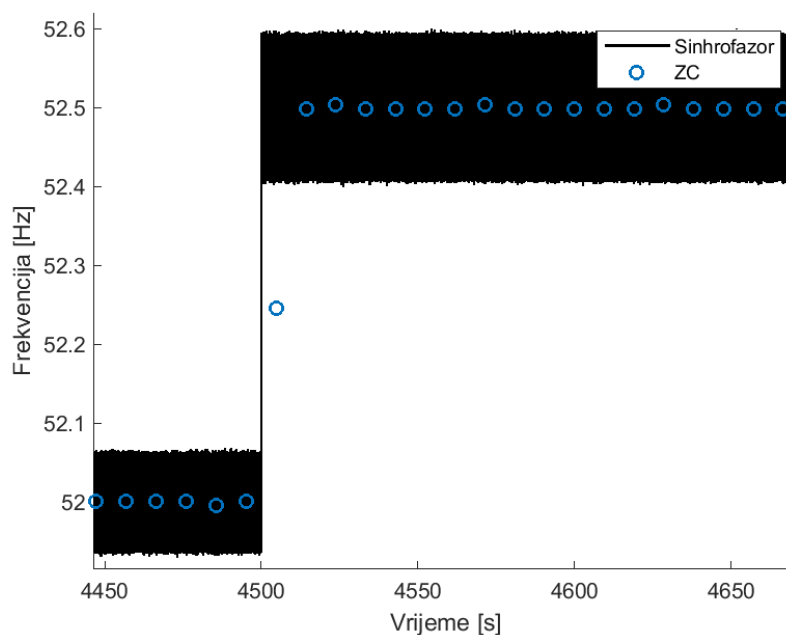
Tablica I. Usporedba rezultata mjerenja različitih metoda u osnovnom scenariju.

Frekvencija	Metoda prolaska kroz nulu (SNR 40 dB)	Metoda prolaska kroz nulu (SNR 60 dB)	Sinhrofazor (SNR 40 dB)	Sinhrofazor (SNR 60 dB)
45	$45.0 \pm 0.0018$	$45.0 \pm 0.0018$	$45.0 \pm 0.1813$	$45.0 \pm 0.1792$
47.5	$47.5 \pm 0.0023$	$47.5 \pm 0.0023$	$47.5 \pm 0.0518$	$47.5 \pm 0.045$
50	$50.0 \pm 0.0009$	$50.0 \pm 0.0009$	$50.0 \pm 0.0252$	$50.0 \pm 0.0025$
52.5	$52.5 \pm 0.0024$	$52.5 \pm 0.0024$	$52.5 \pm 0.0518$	$52.5 \pm 0.045$
55	$55.0 \pm 0.0028$	$55.0 \pm 0.0028$	$55.0 \pm 0.1814$	$55.0 \pm 0.1793$

Tablica II. Usporedba rezultata mjerenja različitih metoda za scenarij s prisutnim harmonikom

Frekvencija	Metoda prolaska kroz nulu (SNR 40 dB)	Metoda prolaska kroz nulu (SNR 60 dB)	Sinhrofazor (SNR 40 dB)	Sinhrofazor (SNR 60 dB)
45	$45.0 \pm 0.0018$	$45.0 \pm 0.0018$	$45.0 \pm 0.2118$	$45.0 \pm 0.2099$
47.5	$47.5 \pm 0.0023$	$47.5 \pm 0.0023$	$47.5 \pm 0.0671$	$47.5 \pm 0.062$
50	$50.0 \pm 0.0009$	$50.0 \pm 0.0009$	$50.0 \pm 0.0252$	$50.0 \pm 0.0025$
52.5	$52.5 \pm 0.0024$	$52.5 \pm 0.0024$	$52.5 \pm 0.0576$	$52.5 \pm 0.0515$
55	$55.0 \pm 0.0028$	$55.0 \pm 0.0028$	$55.0 \pm 0.1531$	$55.0 \pm 0.1506$

Treći scenarij koji je bio promatran uključivao je skokovitu promjenu frekvencije ulaznog signala, te je promatrana razlika u odzivu između promatranih metoda, kako je prikazano na Slika 8. Iz prikazanih rezultata vidljivo je kako metoda usporedbe s referentnim signalom (čije je vrijednost prikazana crnom linijom) ima značajno veće rasipanje rezultata, i kako to rasipanje ovisi o razlici između frekvencije ulaznog signala i frekvencije referentnog signala.



Slika 8. Usporedba razlike brzine odziva i mjerne nesigurnosti između opisanih metoda na skok u frekvenciji ulaznog signala



Također je vidljivo kako metoda detekcije prolaska kroz nulu, koja je prikazana plavim kružićima, ima značajno duže intervale očitavanja frekvencije. Također, zbog veće latencije u očitavanju frekvencije kod ove metode, vidljivo je značajno kašnjenje u detekciji skoka frekvencije ulaznog signala. Pri tome je prvo očitavanje frekvencije nakon skoka sa 52 na 52,5 Hz iznosi približno 52,24 Hz. To nam sugerira da metoda mjerenja frekvencije detekcijom prolaska kroz nulu nije u mogućnosti pratiti brze dinamične promjene frekvencije naponskog signala.

#### 4. ZAKLJUČAK

Svaka od metoda mjerenja frekvencije ima svoje prednosti i mane. Očekivano, duži vremenski prozori promatranja signala, uz mogućnost jačeg filtriranja signala, omogućuju postizanje niže mjerne nesigurnosti. Međutim, korištenjem dugačkih vremenskih intervala za promatranje signala gubi se mogućnost opažanja brzih promjena u frekvenciji signala, uz istovremeno povećanje latencije mjerenja.

Metoda mjerenja frekvencije korištenjem usporedbe s referentnim signalom ima vrlo nisku latenciju mjerenja, ali i vrlo visoku vremensku razlučivost mjerenja frekvencije, što joj omogućava da se promjena frekvencije prati i na vremenskoj skali kraćoj od trajanja jednog ciklusa (odnosno omogućava praćenje trenutne frekvencije). Ova metoda pokazuje veliku osjetljivost na razinu šuma u signalu, što za posljedicu ima značajno veću nesigurnost mjernih rezultata. Dodatno, ovisno o dizajnu filtra, mjerno područje s niskom razinom mjerne nesigurnosti, može biti vrlo usko. Dizajn filtera je od presudne važnosti za postizanje željene razine performansi, po pitanju latencije i mjerne nesigurnosti kod ove metode.

Kombiniranjem više metoda za mjerenje frekvencije, moguće je povećati kvalitetu nadzora kvalitete električne energije, ali to rezultira i s većom kompleksnošću mjernog uređaja.

#### 5. LITERATURA

- [1] M.H.J. Bollen, "What is power quality?", Electric Power Systems Research 66, Elsevier, srpanj 2003.
- [2] P.M Ramos, A.C. Serra, "Comparison of frequency estimation algorithms for power quality assessment", Measurement, Elsevier, 2009, 1312-1317
- [3] IEC 61000-4-30 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods, ožujak 2021
- [4] IEC 60255-118-1 Measuring relays and protection equipment – Part 118-1: Synchrophasor for power systems – Measurements, prosinac 2018
- [5] B. Boashash, „Estimating and interpreting the instantaneous frequency of a signal – Part 1: Fundamentals“, Proceedings of the IEEE 80(4), 1992, 520-538