



UNIVERZITET CRNE GORE
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Spec.Sci. MIRJANA BOŽOVIĆ GLOGOVAC

**PRIMJENA WAVELET TRANSFORMACIJE PRI
ANALIZI PROPADA NAPONA U
ELEKTROENERGETSKIM SISTEMIMA**

-MAGISTARSKI RAD-

Podgorica, 2016.

PODACI I INFORMACIJE O MAGISTRANDU

Ime i prezime: Mirjana Božović Glogovac
Datum i mjesto rođenja: 24.06.1988. Žabljak, Crna Gora
Naziv završenog osnovnog studijskog programa i godina završetka studija: Elektrotehnički fakultet, Energetika i Automatika, 2010.

INFORMACIJE O MAGISTARSKOM RADU

Naziv postdiplomskog studija: Elektroenergetski sistemi
Naslov rada: PRIMJENA WAVELET TRANSFORMACIJE PRI ANALIZI
PROPADA NAPONA U ELEKTROENERGETSKIM SISTEMIMA
Fakultet na kojem je rad odbranjen: Elektrotehnički fakultet Podgorica

UDK, OCJENA I ODBRANA MAGISTARSKOG RADA

Datum prijave magistarskog rada: 16.03.2016.
Datum sjednice Vijeća na kojoj je prihvaćena tema: 25.05.2016.
Komisija za ocjenu teme i podobnosti magistranda: Prof. dr Saša Mujović
Doc. dr Vladan Radulović
Prof. dr Slobodan Đukanović
Mentor: Prof. dr Saša Mujović
Komisija za ocjenu magistarskog rada: Prof. dr Slobodan Đukanović
Prof. dr Saša Mujović
Doc. dr Vladan Radulović
Komisija za odbranu magistarskog rada: Doc. dr Vladan Radulović
Prof. dr Saša Mujović
Prof. dr Slobodan Đukanović

Datum odbrane: 11.11.2016.
Datum promocije: __.__.2016.

SAŽETAK

U elektroenergetskim sistemima (EES) je potreban konstantan monitoring kvaliteta električne energije. Pomoću signala dobijenih monitoringom dolazi se do informacija o kvalitetu napona i njegovim karakteristikama. Važan segment u nadzoru kvaliteta električne energije predstavlja obrada prikupljenih signala.

Propadi napona su čest oblik naponskog poremećaja i nalaze se u fokusu ovog magistarskog rada. Ranije korišćene metode obrade signala nisu pokazale dovoljnu efikasnost u detektovanju i analizi ovih poremećaja. Jedna od relativno novijih metoda za identifikaciju i analizu problema kvaliteta električne energije je wavelet transformacija (WT). Propadi napona su nestacionarni signali, sadrže komponente niskih i visokih frekvencija, često su praćeni šumom, pa se WT pokazala kao vrlo dobra za njihovu analizu.

Na osnovu teorijskih razmatranja, u programskom paketu MATLAB realizovan je programski kod za simuliranje propada napona. Na njih je primijenjena WT i utvrđene su karakteristične krive devijacije energije signala koje su jedinstvene za ovu vrstu poremećaja. WT je omogućila preciznu i brzu detekciju propada napona, njihovu lokalizaciju, kao i klasifikaciju.

Ključne riječi: Wavelet transformacija, propadi napona, kvalitet električne energije.

ABSTRACT

Power systems need continuous power quality monitoring. Signals collected in this process offer information about voltage quality. Processing of collected signals plays an important role in power quality monitoring.

Voltage sags are common types of voltage disturbances and this paper focuses on them. Earlier signal processing techniques were not effective tool in detecting and analysing this type of disturbances. One of the new technique for identification and analysing power quality problems is wavelet transform (WT). Voltage sags are non-stationary signals, with low-frequency and high-frequency components, sometimes with noise, so WT is an ideal method for voltage sags analysis.

Based on theoretical knowledge, programming code for simulation of voltage sags is written in MATLAB programming language. WT is applied to those signals, and characteristic curves, unique for this type of disturbance are recorded. WT allowed precise and fast detection of voltage sags, their location, and classification.

Key word: Wavelet transform, voltage sags, power quality.

Popis skraćenica

ANN	–	Vještačka neuronska mreža (<i>Artificial Neural Network</i>)
CTFS	–	Fourier-ov red (<i>Continuous Time Fourier Series</i>)
CTFT	–	Kontinualna Fourier-ova transformacija (<i>Continuous Time Fourier Transformation</i>)
CWT	–	Kontinualna wavelet transformacija (<i>Continuous Wavelet Transform</i>)
Db	–	Daubechies
DFT	–	Diskretna Fourier-ova transformacija (<i>Discrete Fourier Transformation</i>)
DSP	–	Digitalna obrada signala (<i>Digital Signal Processing</i>)
DTFS	–	Diskretan po vremenu Fourier-ov red (<i>Discrete Time Fourier Series</i>)
DTFT	–	Vremenski diskretna Fourier-ova transformacija (<i>Discrete Time Fourier Transform</i>)
DWT	–	Diskretna wavelet transformacija (<i>Discrete Wavelet Transform</i>)
EES	–	Elektroenergetski sistem
EMD	–	Empirijska dekompozicija signala (<i>Empirical Mode Decomposition</i>)
FFT	–	Brza Fourier-ova transformacija (<i>Fast Fourier Transformation</i>)
FT	–	Fourier-ova transformacija (<i>Fourier Transformation</i>)
HHT	–	Hilbert-Huang-ova transformacija (<i>Hilbert-Huang transform</i>)
HMM	–	<i>Hidden Markov Model</i>
HVDC	–	Visoki napon jednosmjerne struje (<i>High-Voltage Direct Current</i>)
IMF	–	Jednostavne svojstvene funkcije (<i>Intrinsic Mode Function</i>)
MAD	–	Medijan Apsolutne Devijacije (<i>Median Absolute Deviation</i>)
MRA	–	Multirezoluciona analiza (<i>Multiresolution Analysis</i>)
NN	–	Neuronska mreža (<i>Neural Network</i>)
PMU	–	Uređaj za mjerenje fazora (<i>Phasor Measurement Unit</i>)
PSS	–	<i>Power System Stabilizers</i>
RMS	–	Korijen srednje kvadratne vrijednosti (<i>Root Mean Square</i>)
ST	–	S transformacija (<i>Stockwell Transform</i>)

STFT	–	Kratkotrajna Fourier-ova transformacija <i>(Short Time Fourier Transformation)</i>
SVC	–	Statički VAR kompenzatori <i>(Static VAR Compensator)</i>
SVM	–	Metod vektora nosača <i>(Support Vector Machine)</i>
SWTC	–	Kvadrirani wavelet koeficijenti <i>(Squared Wavelet Transform Coefficients)</i>
TFT	–	Vremensko-frekventna transformacija <i>(Time Frequency Transform)</i>
TT	–	<i>Time-Time</i>
VF	–	Visko frekventni
WAMPCS	–	<i>Wide area monitoring, protection and control system</i>
WT	–	Wavelet transformacija <i>(Wavelet Transform)</i>
WTC	–	Wavelet koeficijenti <i>(Wavelet Transform Coefficients)</i>

Popis slika

Slika 3.1 – Vremenska i frekvencijska rezolucija kod a) STFT, b) WT

Slika 3.2 – Primjena FT i WT na nestacionarni signal

Slika 3.3 – Skalogram signala dobijen primjenom CWT

Slika 3.4 – Diadska mreža

Slika 3.5 – Dekompozicija signala $c_0(n)$ na tri skale

Slika 3.6 – Wavelet funkcije i funkcije skaliranja

Slika 4.1 – Oscilacija napona

Slika 4.2 – Primjena DWT na signal oscilacija napona

Slika 4.3 – Primjena FFT na detalje signala D_3 i spektar dominantnih frekvencija

Slika 4.4 – Signal koji sadrži šum i njegovo uklanjanje primjenom WT

Slika 4.5 – Primjena DWT na signal koji sadrži kvar

Slika 4.6 – Primjena TT transformacije u detekciji ostrvskog režima rada

Slika 4.7 – Sinusni oblik napona

Slika 4.8 – Kriva devijacije energije detalja sinusnog oblika napona

Slika 4.9 – Propad napona

Slika 4.10 – Dekompozicija signala propada napona

Slika 4.11 – Primjena DWT na talasni oblik propada napona

Slika 4.12 – Kriva ΔE za signal sa propadom napona

Slika 4.13 – Primjena DWT na talasni oblik porasta napona

Slika 4.14 – Razlaganje signala porasta napona

Slika 4.15 – Kriva ΔE za signal sa porastom napona

Slika 4.16 – Prekid u napajanju i primjena WT

Slika 4.17 – Kriva ΔE za signal sa prekidom u napajanju

Slika 4.18 – Pojava flikera i primjena WT

Slika 4.19 – Kriva ΔE kod pojave flikera

Slika 4.20 – Oscilatorni tranzijenti, primjena WT

Slika 4.21 – Kriva ΔE kod pojave oscilatornih tranzijenata

Slika 4.22 – Pojava harmonika i razlaganje signala na četiri nivoa

Slika 4.23 – Pojava harmonika i porasta napona, primjena WT

Slika 4.24 – Pojava harmonika i propada napona, primjena WT

Slika 4.25 – Kriva ΔE pri pojavi harmonika

Slika 4.26 – Kriva ΔE pri pojavi harmonika i porasta napona

Slika 4.27 – Kriva ΔE pri pojavi harmonika i propada napona

Slika 4.28 – Pojava periodičnih zareza u naponu i primjena DWT

Slika 4.29 – Kriva ΔE pri pojavi zareza u naponu

Slika 4.30 – Pojava periodičnih impulsa u naponu i primjena DWT

Slika 4.31 – Kriva ΔE pri pojavi impulsa u naponu

Slika 4.32 – Proizvoljno odabran signal S

Slika 4.33 – Analiza signala S pomoću CWT i Mexican Hat wavelet-a

Slika 4.34 – Analiza signala S pomoću CWT i Haar wavelet-a

Slika 4.35 – Analiza signala S pomoću CWT i db2 wavelet-a

Slika 4.36 – Analiza signala S pomoću CWT i db6 wavelet-a

Slika 4.37 – Analiza signala S pomoću CWT i db12 wavelet-a

Slika 4.38 – Analiza signala S pomoću SWTC i Haar wavelet-a sa četiri skale

Slika 5.1 – Simulirani propad napona i primjena RMS, STFT i DWT

Slika 5.2 – Detekcija propada napona

Slika 5.3 – Devijacija energije detalja posmatranog poremećaja

Slika 5.4 – Familija krivih devijacije energije detalja propada napona

Slika 5.5 – Propad napona sa prisustvom šuma i primjena DWT

Slika 5.6 – Propada napona nakon uklanjanja šuma i devijacija energije detalja

Slika 5.7 – Familija krivih devijacije energije detalja propada napona kod kojih je uklonjen šum

Popis tabela

Tabela 4.1 – Publikacije iz oblasti WT

Tabela 4.2 – Procentualna tačnosti u klasifikaciji poremećaja napona pri upotrebi WT

Tabela 4.3 – Frekvencijski opsezi detalja signala

Tabela 5.1 – Simulirani signali

Tabela 5.2 – Devijacije energije detalja tokom propada napona

Sadržaj

1. UVOD	3
2. PREGLED NAJČEŠĆE KORIŠĆENIH METODA OBRADE SIGNALA U ANALIZI NAPONSKIH POREMEĆAJA.....	5
2.1 Fourier-ova transformacija	5
2.1.1 Kratkotrajna Fourier-ova transformacija.....	8
2.2 Hibert-Huang-ova transformacija	8
2.3 Stockwell-ova transformacija	9
2.4 RMS metoda.....	9
3. OSNOVI WAVELET TRANSFORMACIJE	11
3.1 Multirezoluciona analiza	11
3.2 Razvoj wavelet transformacije.....	11
3.2.1 Kontinualna wavelet transformacija	14
3.2.2 Diskretna wavelet transformacija	15
3.2.2.1 Diskretni wavelet-i.....	16
4. IMPLEMENTACIJA WAVELET TRANSFORMACIJE U ELEKTROENERGETSKIM SISTEMIMA I NJENA PRIMJENA U ANALIZI DEFORMACIJA TALASNOG OBLIKA NAPONA	19
4.1 Praktične primjene wavelet transformacije u elektroenergetskim sistemima	19
4.1.1 Pojava niskofrekventnih poremećaja	19
4.1.2 Detekcija kvara na dalekovodima.....	22
4.1.3 Zaštite transformatora	23
4.1.4 Uklanjanje šuma iz signala.....	23
4.1.5 Detektovanje naglih promjena u signalu.....	25
4.1.6 Detektovanje ostrvskog režima rada.....	26

4.1.7 Prognoziranje potrošnje	27
4.1.8 Kompresija podataka	28
4.1.9 ANN, Fuzzy sistemi i wavelet transformacija	28
4.2 Deformacija talasnog oblika napona i primjena wavelet transformacije	28
4.2.1 Propadi napona	31
4.2.2 Porasti napona	33
4.2.3 Prekidi u napajanju	35
4.2.4 Flikeri	36
4.2.5 Oscilatorni tranzijenti	38
4.2.6 Harmonici	39
4.2.7 Zarezi (usjeci)	42
4.2.8 Impulsi (šiljci)	44
4.2.9 Primjena kontinualne wavelet transformacije na signal napona	45
5. ANALIZA PROPADA NAPONA POMOĆU WAVELET TRANSFORMACIJE	51
5.1 Analiza energije detalja signala propada napona	52
5.2 Benefiti predložene metode	58
6. ZAKLJUČAK	61
Literatura	63

1. UVOD

Problematika kvaliteta električne energije je danas veoma aktuelna tema, pogotovo u uslovima razvoja upravljivih mreža (*eng. smart grids*) i deregulisanog tržišta. Problemi vezani za kvalitet električne energije su se javili tokom sedamdesetih godina prošlog vijeka sa velikom ekspanzijom energetske elektronske pretvarača. Oni su postali nezamjenjiv dio savremenih računara i raznih industrijskih pogona. Njihova masovna upotreba i negativan uticaj koji imaju na naponske prilike u sistemu, kao i potreba za optimalnim kvalitetom istih u cilju njihovog nesmetanog funkcionisanja, pitanju kvaliteta električne energije daje poseban značaj.

Poremećaji u kvalitetu dovode do nepravilnog rada opreme, skraćuju joj vijek trajanja, dovode do ispada, nefunkcionalnosti itd. S tim u vezi, postoji stalna potreba za monitoringom parametara kvaliteta električne energije i utvrđivanjem uzročnika degradacije naponskih prilika u sistemu.

Najčešći tipovi izobličenja talasnog oblika napona su: oscilacije, propadi napona, porasti napona, beznaponska stanja, prenaponi, podnaponi, harmonici, zarezi, impulsi, flikeri i šum. Propadi napona predstavljaju vrlo čest oblik naponskog poremećaja, pa je ovaj fenomen u fokusu magistarskog rada. Posledice propada napona su kvarovi sinhronih motora, zaustavljanje elektromotornih pogona, neželjeno djelovanje osjetljivih mikrokontrolera, kvarovi indukcionih motora, isključenje ili blokiranje personalnih računara itd.

Za analizu navedenih poremećaja koriste se metode digitalne obrade signala (DSP). Svakako, najzastupljenija je Fourier-ova transformacija (FT), ali postoje i druge metode, kao što su: Hilbert-Huang-ova transformacija (HHT), Stockwell-ova transformacija (ST) itd., koje se koriste u većem ili manjem obimu, sa većom ili manjom uspešnošću i tačnošću.

Jedna od relativno novijih metoda za identifikaciju i analizu problema kvaliteta električne energije je wavelet transformacija (WT). U radu je WT primijenjena na gore navedenim oblicima naponskog izobličenja, sa posebnim akcentom na primjeni u analizi propada napona. Propadi napona su nestacionarni signali pa se WT pokazala kao dobar izbor za njihovu detekciju i identifikaciju.

Cilj rada je da se ukaže na prednosti koje nudi WT u detekciji, lokalizaciji i analizi propada napona u odnosu na ostale najčešće korišćene metode.

Master rad se sastoji iz šest poglavlja.

Prvo poglavlje je "Uvod" kojim je predstavljena ideja rada i dat opis sadržaja svakog poglavlja pojedinačno.

U drugom poglavlju "Pregled najčešće korišćenih metoda digitalne obrade signala u analizi naponskih poremećaja" su ukratko predstavljene Fourier-ova analiza, HHT, ST i RMS (metod

korijena srednje kvadratne vrijednosti). FT je kao jedna od najzastupljenijih metoda u obradi signala dobila najviše prostora u ovom poglavlju.

Treće poglavlje nosi naziv "Osnovi wavelet transformacije" i daje teorijsku osnovu WT i njen historijski razvoj. Uvedeni su pojmovi multirezolucione analize i banke filtara. Objasnjene su kontinualna wavelet transformacija (CWT) i diskretna wavelet transformacija (DWT).

U četvrtom poglavlju "Implementacija wavelet transformacije u elektroenergetskim sistemima i njena primjena u analizi deformacija talasnog oblika napona" prikazane su najvažnije oblasti u kojima je WT pružila značajan doprinos u funkcionisanju elektroenergetskih sistema (EES). Ovo se odnosi na primjenu WT u detektovanju niskofrekventnih poremećaja, ostrvskog režima rada, kvarova na dalekovodima, uklanjanju šuma iz signala, kompresiji podataka, zaštita transformatora, prognozi potrošnje, kao i na primjenu WT i neuronskih mreža (NN). U ovom poglavlju su opisani i najčešći poremećaji u kvalitetu električne energije. Za svaki tip poremećaja je izvršena simulacija signala u MATLAB paketu i primijenjena WT. Pažnja je posvećena odabiru osnovne wavelet funkcije i optimalnom broju nivoa na koje je potrebno razložiti signal. Svaki poremećaj je uspješno detektovan i utvrđen je njegov oblik devijacije energije detalja. Na jednom proizvoljnom signalu koji sadrži harmonike, prekid u napajanju i flikere prikazana je primjena CWT.

Poglavlje pet "Analiza propada napona pomoću wavelet transformacije" sadrži analizu signala propada napona simuliranih u MATLAB programskom jeziku. Akcenat je stavljen na informacije koje propadi napona sadrže, a do kojih se došlo pomoću koeficijenata wavelet transformacije (WTC) i krivih devijacija energije detalja. Na kraju je ukazano na sve zabilježene prednosti i mane koje ima ova transformacija u analizi propada napona.

U poglavlju šest su predstavljeni zaključci rada. Na kraju magistarskog rada je dat pregled korišćene literature.

2. PREGLED NAJČEŠĆE KORIŠĆENIH METODA OBRADE SIGNALA U ANALIZI NAPONSKIH POREMEĆAJA

Signal predstavlja funkciju jedne ili više nezavisno promjenljivih [1]. To je vremenski ili prostorno promjenljiv fizički fenomen koji nosi neku informaciju.

Signali mogu biti stacionarni i nestacionarni. Kod stacionarnih signala sve frekvencijske komponente su prisutne sve vrijeme. Kod nestacionarnih signala frekvencijske komponente se mijenjaju tokom trajanja signala. Signali se mogu podijeliti na kontinualne (definisani su u svakom trenutku vremena na nekom vremenskom intervalu, zovu se još i analogni signali) i diskretne signale (definisani su samo u pojedinim trenucima na nekom vremenskom intervalu). Signal može biti predstavljen u vremenskom i frekvencijskom domenu. Vremenski domen pokazuje promjene signala u zavisnosti od vremena. U slučaju frekvencijskog domena signal se predstavlja preko svog spektra.

Transformacijom signala, tj. prelaskom signala iz jednog oblika u drugi moguće je dobiti odgovarajuće informacije koje signal sadrži.

Digitalni signali su kontinualni signali diskretne amplitude i javljaju se kao povorke pravougaonih impulsa. Digitalna obrada signala je naučna oblast koja se razvila tokom proteklih decenija i odnosi se na digitalne signale i metode njihove obrade. Obrada signala pomoću računara podrazumijeva diskretizaciju i kvantizaciju signala. Diskretizacija signala se vrši tako što se u odgovarajućim vremenskim razmacima uzimaju vrijednosti signala (odbirci). Kvantizacija je proces gdje se u nekom trenutku vremena signala zaokružuju ili odsjecaju vrijednosti amplitude da bi se došlo do jedne od diskretnih vrijednosti amplitude.

U ovom poglavlju su ukratko predstavljene neke od metoda koje se koriste u digitalnoj obradi signala pri analizi naponskih poremećaja.

2.1 Fourier-ova transformacija

Francuski matematičar Jean Baptiste Joseph Fourier je 1807. godine utvrdio da se svaka periodična i kontinualna funkcija može predstaviti pomoću Fourier-ovog reda [2]:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos(kx) + b_k \sin(kx)) . \quad (2.1)$$

U pomenutoj relaciji koeficijenti a_k i b_k su definisani sljedećim izrazima:

$$a_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos(kx) dx ,$$

$$b_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin(kx) dx ,$$

dok član $\frac{a_0}{2}$ predstavlja srednju vrijednost funkcije:

$$\frac{a_0}{2} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) dx .$$

Vrijednosti Fourier-ovih koeficijenata pokazuju da li se posmatrana funkcija sporo ili brzo mijenja. Ovi koeficijenti primjenom Parseval-ove jednakosti daju izraz za energiju signala:

$$(E_f)^2 = \|f\|^2 = \int_{-\pi}^{\pi} f^2(x) dx = \sum_{k=0}^{\infty} (|a_k|^2 + |b_k|^2) . \quad (2.2)$$

U kompleksnom domenu Fourier-ov red se predstavlja sljedećim izrazom:

$$f(x) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k e^{jkx} , \quad (2.3)$$

gdje je $c_k = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) e^{-jkx} dx$, za $k = 0, \pm 1, \dots$.

Fourier-ova transformacija funkcije $F(x)$ je funkcija frekvencije ω :

$$\hat{F}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} F(x) e^{-j\omega x} dx . \quad (2.4)$$

FT polazi od činjenice da se svaki signal može predstaviti superpozicijom sinusa i kosinusa [2]. Ako se FT primjeni na signal dobija se spektar signala, a ukoliko se primjeni na impulsni odziv sistema dobija se frekvencijski odziv sistema [1]. Predstavljanje funkcije u frekvencijskom domenu je Fourier-ova odnosno harmonijska analiza (spektralna analiza).

Signal $f(x)$ može se rekonstruisati primjenom inverzne Fourier-ove transformacije koju definiše relacija:

$$\hat{F}(\omega)^{-1} = F(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{F}(\omega) e^{j\omega x} d\omega . \quad (2.5)$$

Razlikuju se sljedeći oblici Fourier-ove analize:

1. Kontinualna Fourier-ova transformacija (CTFT)

Primjenjuje se za proračun spektra neperiodičnih signala čija funkcija ima za argument kontinualnu promjenljivu. Definisana je izrazom:

$$CTFT(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)e^{-j\omega x} dx, \quad (2.6)$$

2. Fourier-ov red (CTFS) za periodičnu funkciju $f(x+T) = f(x)$:

$$\hat{f}(k) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(x)e^{-jk\omega_0 x} dx, \text{ za } \omega_0 = \frac{2\pi}{T}, \quad (2.7)$$

3. Vremenski diskretna Fourier-ova transformacija (DTFT)

Koristi se za proračun spektra vremenski diskretnih signala. Spektar je periodična kontinuirana funkcija frekvencije. DTFT je definisana izrazom:

$$\hat{f}(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f(n)e^{-j\omega n}, \quad (2.8)$$

4. Diskretan po vremenu Fourier-ov red (DTFS) za periodičan niz $f(n) = f(n+ln)$, $l \in \mathbb{Z}$:

$$\hat{f}(k) = \sum_{n=0}^{N-1} f(n)(W_N)^{-nk}, \quad (2.9)$$

za $k \in \mathbb{Z}$, $W_N = e^{j2\pi/N}$.

Diskretna Fourier-ova transformacija (DFT) se primjenjuje na konačnom nizu uzoraka signala u prozorskoj sekvenci, pa je njegov frekvencijski spektar periodičan. Od interesa su diskretne frekvencije f_n . DFT za signal $x(n)$ je definisana jednačinom:

$$DFT_f(x(n)) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j2\pi kn/N}, \quad 0 \leq k \leq N-1. \quad (2.10)$$

Najveća frekvencijska komponenta spektra dobijenog primjenom DFT je Nyquist-ova frekvencija koja iznosi $f_{\max} = S/2$, gdje je S frekvencija kojom je otipkan signal. Primjenom DFT dolazi do "curenja spektra" usljed rasipanja energije po komponentama DFT zbog transformacije iz vremenskog u frekvencijski domen. Ovo utiče loše na kvalitet analize spektra. Algoritam za brzo računanje DFT je Brza Fourier-ova transformacija (FFT). Primjenom FFT se izbjegavaju ponovna izračunavanja izraza koji se međusobno negiraju. FFT daje iste rezultate kao DFT, s tim što se sam proračun znatno brže odvija [3].

Jedan od glavnih nedostataka FT je taj što ne daje podatak o tome kada se neki događaj desio u vremenu, tj. nije pogodna za signale kod kojih je bitna lokalna informacija. Ona je pogodna za analizu stacionarnih signala. FT se može koristiti i u slučaju nestacionarnih signala ukoliko je bitan spektar signala, ali ne i trenuci kada se određene frekvencije javljaju u signalu. Drugi važan nedostatak FT je to što ne daje mogućnost ispitivanja signala

istovremeno u oba domena, tj. i u vremenskom i u frekvencijskom. FT ne nudi dobro rješenje u slučaju naglih promjena frekventnog sadržaja u signalu. Ova transformacija nije dovoljno precizna ako se u jednom trenutku u signalu javlja više frekventnih komponenti.

Vremensko-frekventne transformacije (TFT) se uvode da bi se prevazišli nedostaci FT. Ove transformacije imaju osobinu linearnosti. Ovdje će biti opisana Kratkotrajna Fourier-ova transformacija (STFT).

2.1.1 Kratkotrajna Fourier-ova transformacija

STFT je vremensko-frekventna reprezentacija signala koja se zasniva na FT. Koristi se u analizama nestacionarnih funkcija. Ona opisuje signal i u vremenu i u frekvenciji, dok klasični pristup uvijek isključuje jedno od to dvoje. Domen funkcije se dijeli na male vremenske intervale i pretpostavlja se da je posmatrana funkcija u svakom od njih stacionarna. Dijeljenje funkcije na male intervale se vrši pomoću prozorske funkcije ili prozora $\omega(x)$. Što je odabrani interval širi, biće bolja frekvencijska rezolucija, a slabija vremenska rezolucija i obrnuto. Fourier-ova transformacija se primjenjuje na dio signala koji je obuhvaćen prozorom čime se dobija spektar ograničenog dijela signala. STFT se računa kao Fourier-ova transformacija proizvoda prozorske funkcije i date funkcije $f(x)$, što je definisano sljedećim izrazom:

$$STFT_f(\omega, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \overline{\omega(x - \tau)} e^{-j\omega x} dx . \quad (2.11)$$

Iako je STFT uvedena da bi se omogućila primjena Fourier-ove transformacije na nestacionarne signale, javio se problem vezan za rezoluciju. Rezolucija ne može biti i u vremenu i u frekvenciji istovremeno proizvoljno mala, dok se signal posmatra kroz prozorsku funkciju fiksne širine. Bilo bi pogodnije da se dužina prozora može mijenjati, pa bi se širi prozor mogao koristiti na mjestima gdje se signal sporije mijenja, a uži prozor tamo gdje se signal brže mijenja. Zbog toga se javila potreba za promjenom rezolucije u vremenu i frekvenciji, što je omogućila WT.

2.2 Hibert-Huang-ova transformacija

Ova transformacija je razvijena 1996. godine i koristi se za analizu nelinearnih i nestacionarnih signala. Ona signal opisuje lokalno [4]. Sastoji se iz dva dijela: empirijske dekompozicije signala (EMD) i Hilbert-ove spektralne analize [5]. EMD ima funkciju da prilagodi signal za Hilbert-ovu transformaciju i razloži ga na komponente. EMD signal rastavlja na jednostavne svojstvene funkcije (IMF). Svaka od ovih funkcija predstavlja jednostavnu harmonijsku funkciju. One imaju jednak broj ekstremuma i nula. Nad svakom od

IMF-a je moguće primijeniti Hilbert-ovu transformaciju. Kada se odrede sve IMF funkcije, posebno je izračunati trenutnu frekvenciju. Najjednostavniji način da se to izračuna je primjenom Hilbert-ove transformacije. Tada se originalni signal može izraziti kao realni dio izraza:

$$x(t) = \Re \left\{ \sum_{j=1}^n a_j(t) \cdot e^{i \int \omega_j(t) dt} \right\}, \quad (2.12)$$

gdje je: $\omega(t)$ - trenutna frekvencija, $\alpha(t)$ - trenutna amplituda.

Ukoliko je cilj pronalazak trenutne frekvencije i amplitude, HHT je bolja za primjenu nego FT ili WT. Može se koristiti za uklanjanje šuma. Njeni nedostaci se ogledaju u ograničenom razlikovanju različitih komponenti uskopojasnog signala.

2.3 Stockwell-ova transformacija

S transformacija predstavlja kombinaciju CWT i STFT. Ova činjenica upućuje na to da ST podrazumijeva kompleksne proračune. Potrebno je pomnožiti svaku vrijednost frekvencije u Fourier-ovom spektru sa Gauss-ovim prozorom, a zatim sa inverznom Fourier-ovom transformacijom. Sve to povećava vrijeme proračuna, što je glavni nedostatak ove transformacije. Opisuje je sljedeća relacija:

$$S_x(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) |f| e^{-\pi(t-\tau)^2 f^2} \cdot e^{-j2\pi f \tau} d\tau, \quad (2.13)$$

gdje je: f - frekvencija, τ, t - vrijeme.

Njenom primjenom na signal sa poremećajem dolazi se do tri vrste kontura: vrijeme-frekvencija, vrijeme-amplituda i amplituda-frekvencija. Na osnovu dobijene konture moguće je utvrditi vrstu poremećaja u talasnom obliku napona. Ova transformacija naročito omogućava dobru detekciju tranzijentnih prenapona [6].

2.4 RMS metoda

RMS metoda (*eng. Root Mean Square* – efektivna vrijednost) predstavlja proračun korijena srednjih kvadratnih vrijednosti napona. U praksi se često koristi. Instrumenti koji mjere ovu vrijednost obično mjere srednju vrijednost napona, a prikazuju vrijednost pomnoženu sa faktorom oblika za sinusni signal (odnos efektivne i srednje vrijednosti napona, 1,11). Zbog toga dolazi do greške u mjerenju ukoliko napon nije sinusnog oblika [7].

To je standardizovan način mjerenja i upoređivanja naizmjeničnih napona koji ne zavisi od oblika signala. Efektivna vrijednost napona je definisana sljedećim izrazom:

$$u_{ef} = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \int_{t_1}^{t_2} [u(t)]^2 dt} . \quad (2.14)$$

Izraz za efektivnu vrijednost sinusnog naizmjeničnog napona se definiše kao $u_{ef} = \frac{u_m}{\sqrt{2}}$, gdje je u_m amplituda napona.

Instrumenti koji mjere RMS vrijednosti napona se mogu koristiti u analizi naponskih poremećaja. Oni tada vrše jednostavnu obradu signala koja se sastoji u poređenju promjena u magnitudi napona u odnosu na unaprijed definisan prag.

3. OSNOVI WAVELET TRANSFORMACIJE

Wavelet transformacija predstavlja analizu signala pomoću wavelet-a (talasići). Multirezoluciono predstavljanje signala je osnovno načelo wavelet transformacije, jer omogućava prikazivanje signala istovremeno u vremenskom i frekvencijskom domenu.

3.1 Multirezoluciona analiza

Multirezoluciona analiza (MRA) se pojavila 1986. godine. Svojim pristupom omogućila je da se prevaziđu problemi ograničene rezolucije u analizi signala pomoću STFT. MRA podrazumijeva da se prozori kratkog trajanja koriste u slučaju visokih frekvencija signala, a prozori dužeg trajanja kod niskih frekvencija. Zbog toga je moguće postići veliku rezoluciju u vremenu na visokim frekvencijama i veliku rezoluciju u frekvenciji na niskim frekvencijama. Multirezoluciona analiza se pokazala kao korisna u slučaju signala koji imaju visokofrekventne komponente kratkog trajanja i niskofrekventne komponente dugog vremenskog trajanja.

Posmatrani signal $x^0 := \{x_n\}$ predstavlja odabranu verziju signala $x(t)$, odnosno $x_n := x(kT)$, i taj signal se rastavlja na oblik $x^0 = x^1 + d^1$ [8]. U ovom izrazu x^1 predstavlja aproksimaciju početnog signala x^0 , dok d^1 predstavlja detalje signala x^0 . Opisani postupak se može ponovo primijeniti na signal x^1 onoliko puta koliko je potrebno. U slučaju N ponavljanja ovog postupka važi sljedeća relacija:

$$x^0 = x^N + d^1 + d^2 + \dots + d^N. \quad (3.1)$$

Izraz (3.1) predstavlja multirezolucionu dekompoziciju signala, koja služi za izračunavanje wavelet transformacije.

MRA funkciju predstavlja kao graničnu vrijednost sukcesivnih aproksimacija [9]. Sukcesivne aproksimacije odgovaraju različitim rezolucijama. To je efikasan matematički aparat za hijerarhijsku dekompoziciju signala (ili slike) na komponente različitih skala. Njenom razvoju su veliki doprinos dali Mayer i Mallat, a kasnije Battle i Lemarie.

3.2 Razvoj wavelet transformacije

Wavelet teorija je nastala osamdesetih godina prošlog vijeka ali se analiza signala primjenom wavelet-a istraživala mnogo ranije (1909. godina, Haar) [2]. Wavelet predstavlja funkciju oscilatorne prirode (srednja vrijednost je nula), i konačnog domena na kom je različita od nule (otuda naziv wavelet). Ono što u FT predstavlja sinusoida, to u WT odgovara wavelet-u.

Prvu definiciju vremensko-frekvencijske funkcije je dao Dennis Gabor 1946. godine. Ova funkcija je po njemu dobila naziv Gabor-ovi wavelet-i. On je talas oblika $\cos(\omega x + \varphi)$ podjelio na segmente i zadržao samo jedan od njih [2]. Ovaj wavelet sadrži informacije o početku, kraju i frekvencijskom sadržaju između. Do problema je došlo kada je ovu transformaciju trebalo primijeniti na funkciju diskretnog argumenta.

Jean Morlet je analizirao seizmičke talase i zaključio da imaju različite karakteristike u vremenu i prostoru. On je wavelet zamislio kao familiju funkcija koje su dobijene primjenom skupljanja/širenja i translacije osnovne funkcije, tj. osnovnog wavelet-a [9]. Na taj način su dobijene izvedene funkcije $\psi_{a,b}(t)$ koje opisuje izraz:

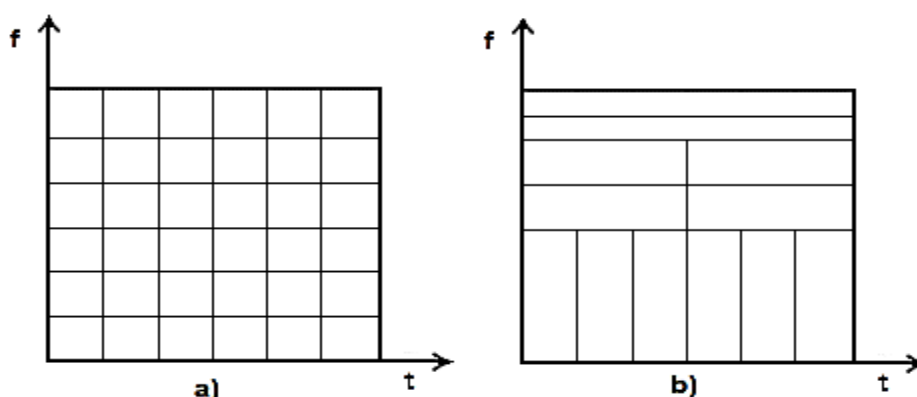
$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \text{ za } a > 0. \quad (3.2)$$

Parametar a predstavlja parametar skaliranja odnosno dilatacije, b predstavlja parametar translacije. Funkcija $\psi(t)$ je osnovni ili majčinski wavelet (*eng. mother wavelet*), a funkcija $\psi_{a,b}(t)$ dječiji wavelet (*eng. baby wavelet*).

Parametar skaliranja omogućava skupljanje i širenje wavelet-a, a parametar translacije njegovo pomjeranje duž vremenske ose. Za $|a| > 1$ wavelet je širi i odgovara nižim frekvencijama. Za $|a| < 1$ wavelet je kompresovana verzija osnovnog wavelet-a i odgovara višim frekvencijama. Za rezoluciju wavelet-a važi Heisenberg-ov princip neodređenosti, tj. da se u istom trenutku ne može postići dobra i vremenska i frekvencijska rezolucija. U slučaju malih skala vremenska rezolucija je dobra, dok frekvencijska opada. Kod velikih skala frekvencijska rezolucija je zadovoljavajuća, za razliku od vremenske koja je slabija. Ne može se tačno reći koje frekvencije postoje u datom vremenskom trenutku.

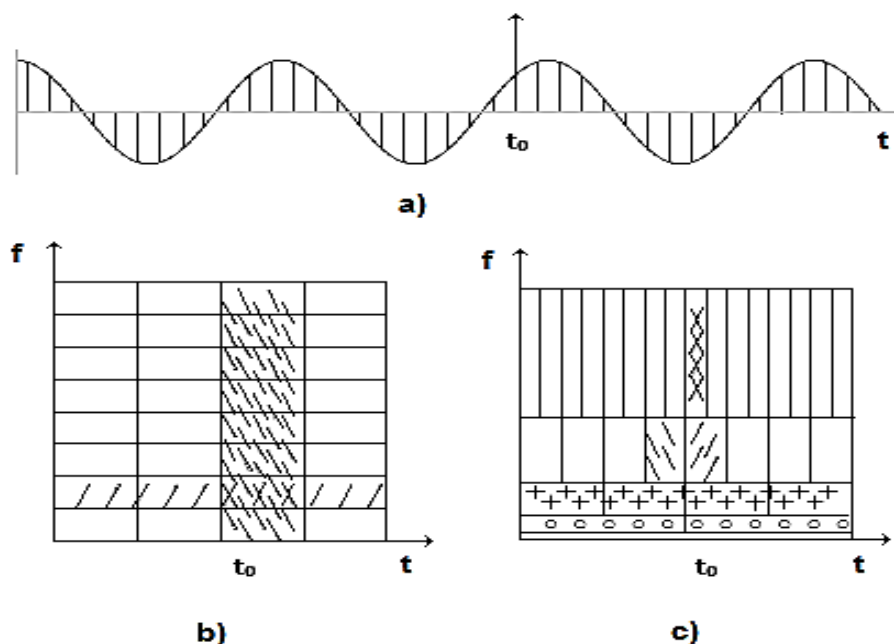
Kod analize realnih signala potrebno je postići dobru frekventnu rezoluciju pri niskim frekvencijama i dobru vremensku rezoluciju pri visokim frekvencijama. Najbolje rješenje za prozorsku funkciju je ponudio Gabor. Ona se zasniva na Gauss-ovoj funkciji $\omega(t) = e^{\frac{-at^2}{2}}$, gdje je $a = \text{const}$ i važi da je $\Delta f \cdot \Delta t = \frac{1}{2}$.

Na slici 3.1 je prikazana vremenska i frekvencijska rezolucija kod STFT i WT. STFT ima konstantnu širinu prozorske funkcije, slika 3.1 a). Ako se odabere uzak prozor dobiće se dobra vremenska, a loša frekvencijska rezolucija. Širok prozor daje lošu vremensku a dobru frekvencijsku rezoluciju. Jednom definisana širina prozora koja se koristi kod STFT se ne može mijenjati, bez obzira na to da li signal ima komponente visoke i niske frekvencije (to je slučaj kod realnih signala).



Slika 3.1 – Vremenska i frekvencijska rezolucija kod a) STFT, b) WT

Kod WT porastom frekvencije Δt se smanjuje i zbog toga se poboljšava vremenska rezolucija, a Δf raste čime se pogoršava frekvencijska rezolucija. Uži i viši pravougaonici predstavljaju visokofrekventne komponente kratkog trajanja. Širi i niži pravougaonici predstavljaju niskofrekventne komponente dugog trajanja. Važi da je površina pravougaonika konstantna, tj. $\Delta f \cdot \Delta t = const$, ali se njihove pojedinačne vrijednosti mijenjaju, slika 3.1 b). Za jedan talasić ova površina je konstantna, dok se dimenzije pravougaonika mijenjaju.



Slika 3.2 – Primjena FT i WT na nestacionarni signal [2]

Slika 3.2 a) prikazuje nestacionarni signal koji predstavlja kombinaciju sinusoide i impulsa koji se javlja u trenutku t_0 . Fourier-ova transformacija ovog signala (slika 3.2 b)) uočava istu frekvenciju sve do trenutka t_0 , kada bilježi promjenu u signalu [2]. U tom intervalu su zastupljene sve frekvencije, a ne samo osnovna. WT sa slike 3.2 c) daje bolju lokalizaciju vremenskog impulsa, ne zanemarujući frekvencijsku lokalizaciju. U okolini t_0 se javljaju

visokofrekventne komponente kratkog trajanja. Za veće frekvencije širina prozora postaje manja (vremenska rezolucija je bolja), a visina pravougaonika se povećava (frekvencijska rezolucija je slabija). Površina svakog pravougaonika kod WT je jednaka.

Uslov prihvatljivosti je osnovni uslov za wavelet i opisuje se sljedećim izrazom:

$$C_{\psi} = \int \frac{|\Psi(f)|^2}{|f|} df, \quad (3.3)$$

gdje $\Psi(f)$ predstavlja Fourier-ovu transformaciju signala $\psi(t)$. Uslov prihvatljivosti implicira sljedeće:

- Važi da je $\int \psi(t)dt = 0$, odnosno površina ispod krive je površina wavelet-a i ona je jednaka nuli.
- Važi da je $\int (1+|t|)|\psi(t)|dt < \infty$, odnosno $\Psi(f)$ mora biti kontinualno diferencijabilna funkcija. Wavelet je dobro lokalizovan u vremenskom domenu.

Na osnovu uslova prihvatljivosti slijedi da $|\Psi(f)|$ ima oblik transfer-funkcije filtra propusnika opsega učestanosti [8]. Pomoću filtra iz signala se izdvajaju komponente sa frekvencijom iz nekog zadatog opsega.

Vrijednosti parametara a i b se mogu mijenjati kontinualno ili diskretno. Zbog toga se razlikuje kontinualna i diskretna wavelet transformacija.

3.2.1 Kontinualna wavelet transformacija

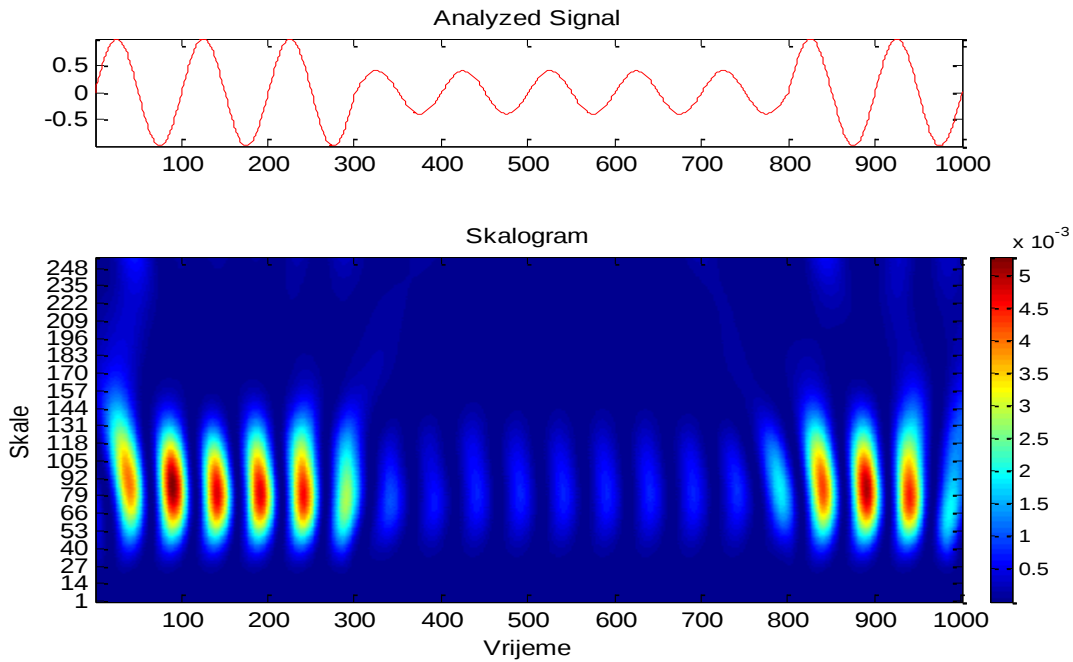
Kontinualna wavelet transformacija je definisana kao:

$$CWT(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt. \quad (3.4)$$

Primjenom CWT se vrši razlaganje signala na frekvencijske komponente koje se analiziraju rezolucijom koja odgovara njenoj skali [2].

Skalogram signala (slika 3.3) daje zajednički prikaz koeficijenata wavelet transformacije (WTC), u vidu procenata energije svakog od njih.

Koeficijenti su rasporedjeni u vidu matrice dimenzija 248 x 1000. Tamnijom bojom su prikazani aposlutni koeficijenti većih vrijednosti, a svjetlijom bojom koeficijenti manjih vrijednosti.



Slika 3.3 – Skalogram signala dobijen primjenom CWT

Pomoću WT mjeri se sličnost frekvencijskog sadržaja funkcije i osnovnog wavelet-a $\psi_{a,b}(t)$ u vremensko-frekvencijskom domenu.

Inverzna CWT je definisana sljedećim izrazom:

$$f(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} CWT_f(a,b) \psi_{a,b}(t) \frac{da db}{a^2} . \quad (3.5)$$

Inverzna CWT postoji ako je ispunjen uslov (3.3). To znači da je $\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0$, što upućuje na oscilatornu prirodu wavelet funkcije $\psi(t)$, kao i na to da ova funkcija mora dovoljno brzo opadati u beskonačnosti. Ovo predstavlja osnovnu razliku između FT i WT [2].

CWT podrazumjeva izračunavanje ogromnog broja koeficijenata, čak i većeg nego što je potrebno. CWT nema veliku praktičnu korist, pošto se računa korelacija signala sa transliranim i skaliranim wavelet-ima. Pomenuti skalirani wavelet-i ne čine ortogonalnu bazu. Zbog toga se prešlo na diskretizaciju parametara translacije i skale.

3.2.2 Diskretna wavelet transformacija

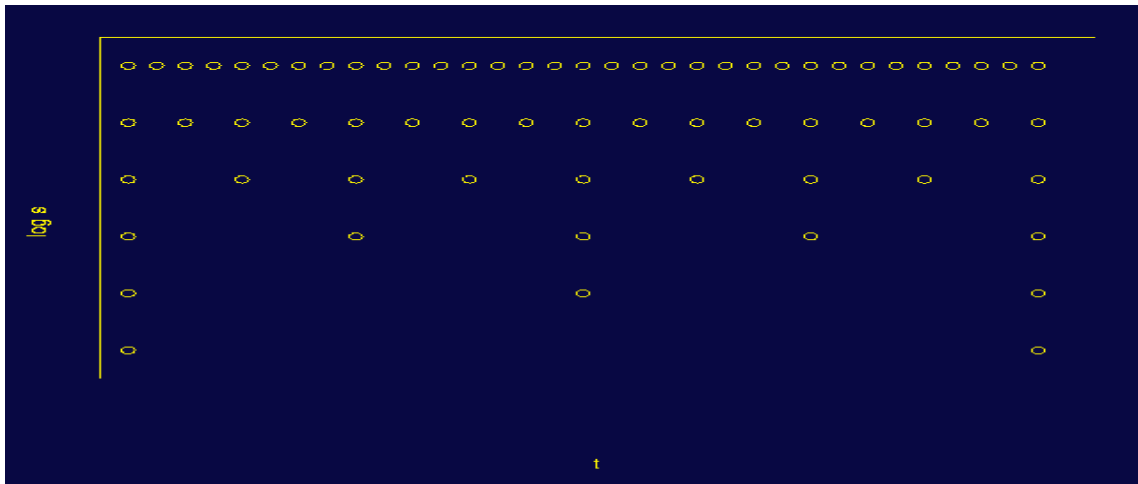
Diskretna wavelet transformacija je nastala zbog potrebe da se izbjegne kontinualna translacija i širenje osnovnog wavelet-a, što je podrazumijevalo velike proračune. Umjesto toga, pristupilo se diskretnom transliranju i širenju osnovnog wavelet-a odabirom

parametara $a = a_0^m$ i $b = nb_0a_0^m$, gdje su a_0 i b_0 konstantnih vrijednosti takve da je $a_0 > 1$ i $b_0 > 0$, $m, n \in \mathbb{Z}$.

3.2.2.1 Diskretni wavelet-i

Diskretni wavelet-i su diskretizovani po koraku širenja i translacije. Definisani su izborom diskretnih vrijednosti parametara a i b , a to je najčešće u vidu tzv. diadske mreže $a = 2^m$, $b = n2^m$, tj. tako da su $a_0 = 2$ i $b_0 = 1$. Diadska mreža se sastoji od tačaka koje predstavljaju wavelet-e nastale dilatacijom i translacijom osnovnog wavelet-a. Diskretizovani osnovni wavelet je predstavljen izrazom:

$$\psi_{m,n}(t) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \psi\left(\frac{t - nb_0a_0^m}{a_0^m}\right). \quad (3.6)$$



Slika 3.4 – Diadska mreža [10]

DWT je opisana sljedećim izrazom:

$$DWT_{\psi} x(m, n) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{m,n}^*(t) dt, \quad (3.7)$$

gdje je $\psi_{m,n}(t)$ dato izrazom (3.6).

Ovakvim izborom parametara a_0 i b_0 moguće je primijeniti algoritam poznat kao MRA, koji je ranije opisan. Iako su ovi parametri diskretizovani i dalje je potrebno mnogo operacija da bi se izračunala WT nekog signala. Ako je signal ograničenog trajanja, broj translacija je takođe ograničen. Zbog toga se uvodi funkcija skaliranja koja će zamijeniti sve wavelet-e od neke skale i ograničiti njihov broj. Funkcija skaliranja $\Phi(t)$ predstavlja osnov wavelet teorije. Funkcija skaliranja je običan signal sa niskofrekventnim spektrom. Iako zbog upotrebe funkcije skaliranja u wavelet analizi dolazi do gubitka nekih informacija o signalu, moguće je izvršiti kvalitetnu rekonstrukciju signala.

Ukoliko se wavelet posmatra kao visokofrekventni filter, a funkcija skaliranja kao niskofrekventni filter, niz kompresovanih wavelet-a zajedno sa funkcijom skaliranja se posmatraju kao banka filtera [2]. Banku filtera čini više filtera.

Sa $h(n)$ će biti označen niskofrekventni filter, a sa $g(n)$ visokofrekventni filter.

Primjenom pomenutih filtera $h(n)$ i $g(n)$ dobija se familija funkcija skaliranja $\Phi(t)$ i wavelet funkcija $\psi(t)$:

$$\Phi(t) = \sqrt{2} \sum_n h(n) \Phi(2t - n), \quad (3.8)$$

$$\psi(t) = \sqrt{2} \sum_n g(n) \Phi(2t - n). \quad (3.9)$$

Primjena DWT na signal se može posmatrati kao propuštanje signala kroz banku filtera. Ona će na izlazu dati koeficijente funkcije skaliranja $c_{j,k}$ i koeficijente wavelet-a $d_{j,k}$. Koeficijenti funkcije skaliranja predstavljaju aproksimacije signala, tj. niskofrekventne komponente signala pri velikim skalama. Wavelet koeficijenti predstavljaju detalje signala, tj. visokofrekventne komponente signala pri malim skalama.

Propuštanjem signala $c_0(n)$ kroz banku filtera nastaju dva signala: $c_1(n)$ koji predstavlja aproksimaciju signala, i $d_1(n)$ koji predstavlja detalje signala. Dobijeni signali su rezultat dekompozicije signala pri skali jedan.

Aproksimacija i detalji signala su definisani kao:

$$c_1(n) = \sum_k h(k - 2n) c_0(k), \quad (3.10)$$

$$d_1(n) = \sum_k g(k - 2n) c_0(k). \quad (3.11)$$

Oba dobijena signala su dugi koliko i početni signal. Kompresijom podataka će se svaki drugi podatak izostaviti, što dovodi do smanjenja na polovinu dužine početnog signala. Znači da će ukupan broj podataka na izlazu biti jednak onom na početku. Početni signal $c_0(n)$ je imao N odbiraka, a signali $c_1(n)$ i $d_1(n)$ imaju $N / 2$ odbiraka [11].

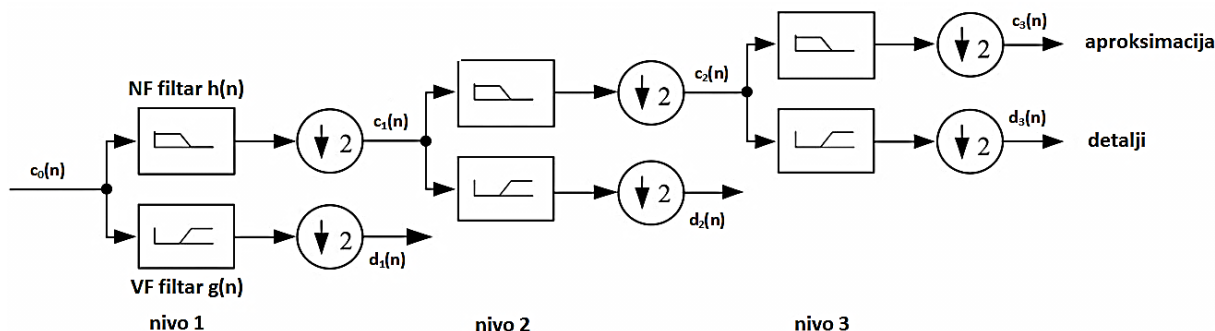
Postupak propuštanja signala kroz niskofrekventni i visokofrekventni filter se može ponoviti opet sa signalom aproksimacije $c_1(n)$. Dekompozicija pri skali dva daje dva signala $c_2(n)$ i $d_2(n)$:

$$c_2(n) = \sum_k h(k - 2n) c_1(k) \quad (3.12)$$

$$d_2(n) = \sum_k g(k-2n)c_1(k) \quad (3.13)$$

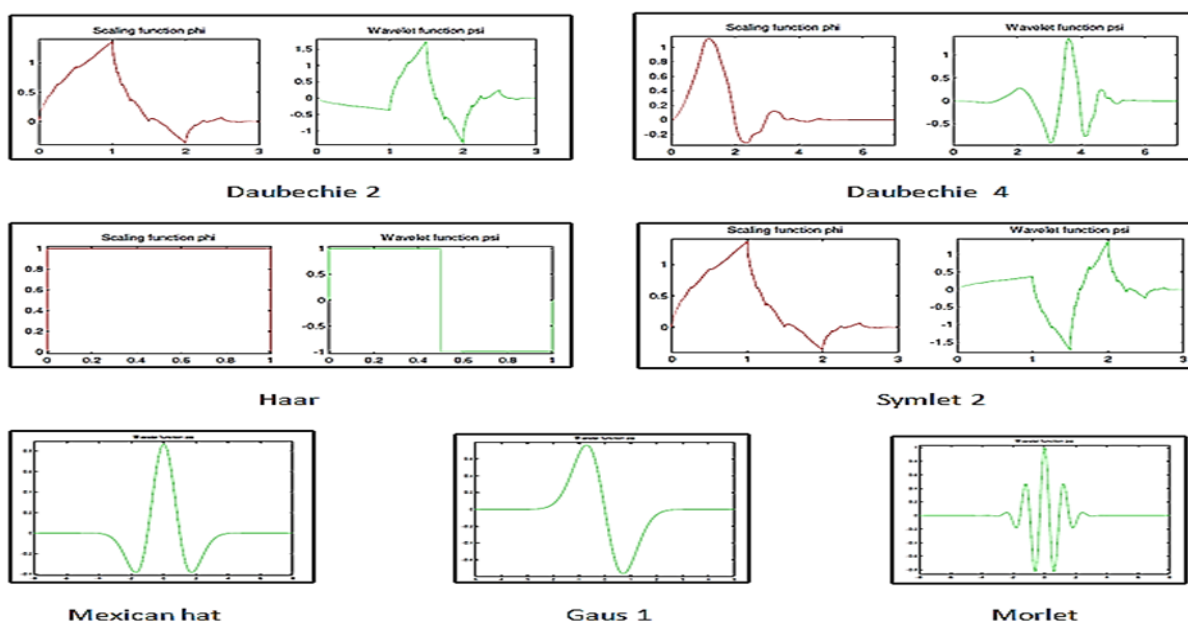
Dalja dekompozicija signala $c_2(n)$ bi kao rezultat dala dva nova signala $c_3(n)$ i $d_3(n)$.

Ovaj postupak se može ponoviti koliko je potrebno puta čime se dobija zadovoljavajući broj opsega, slika 3.5. Ovakva vrsta razlaganja signala je MRA.



Slika 3.5 – Dekompozicija signala $c_0(n)$ na tri skale

U idućem primjeru biće prikazani sljedeći wavelet-i: Daubechie 2 (db2), Daubechie 4 (db4), Haar, Symlet 2 (sym2), Mexican hat, Gaus 1 i Morlet. Broj pored imena wavelet-a predstavlja broj momenata nestajanja i definiše glatkoću wavelet-a. Neki od predstavljenih wavelet-a su dobili naziv po osobama koje su ih formulisale (Ingrid Daubechies, Alfréd Haar, Johann Carl Friedrich Gauss, Jean Morlet), neki na osnovu karakteristika (Symlet zbog simetričnosti), dok su neki dobili naziv na osnovu oblika (Mexican hat). Na slici 3.6 zelenom bojom su predstavljeni pomenuti oblici wavelet funkcija a crvenom bojom njihove funkcije skaliranja. Od pomenutih wavelet-a, Morlet, Mexican hat i Gaus 1 predstavljaju kontinualne wavelet-e, dok Haar, Daubechie 2, Daubechie 4 i Symlet 2 predstavljaju diskretne wavelet-e.



Slika 3.6 – Wavelet funkcije i funkcije skaliranja

4. IMPLEMENTACIJA WAVELET TRANSFORMACIJE U ELEKTROENERGETSKIM SISTEMIMA I NJENA PRIMJENA U ANALIZI DEFORMACIJA TALASNOG OBLIKA NAPONA

U ovom poglavlju su ukratko opisane praktične primjene WT u identifikaciji raznih procesa i stanja koji se javljaju u EES-u. Posebna pažnja će biti posvećena primjeni WT u analizi raznih naponskih poremećaja.

4.1 Praktične primjene wavelet transformacije u elektroenergetskim sistemima

WT je tokom poslednjih godina implementirana u više polja koja se tiču rada EES-a:

- Kvalitet električne energije,
- Zaštite,
- Tranzijenti,
- Parcijalna pražnjenja,
- Predviđanje potrošnje,
- Mjerenja.

U tabeli 4.1 su prikazane oblasti primjene WT u EES-u i procentualna zastupljenost kod naučnih istraživanja.

Tabela 4.1 – Publikacije iz oblasti WT [12]

Pojava	Zaštite EES-a	Kvalitet električne energije	Tranzijenti	Parcijalna pražnjenja	Predviđanje potrošnje	Mjerenja	Ostalo
zastupljenost u %	36	32	11	4	3	2	12

Na polju energetike, a posebno u pogledu praćenja rada sistema, očekuje se da WT pruži podršku (direktno ili indirektno) brzom razvoju modernih alata za predviđanja i prognoze. Tokom narednih godina se može očekivati primjena WT u tehnikama za prognoziranje i nadzor stanja sistema, kao što su Hidden Markov Model (HMM), Trend ekstrapolacije itd. [13].

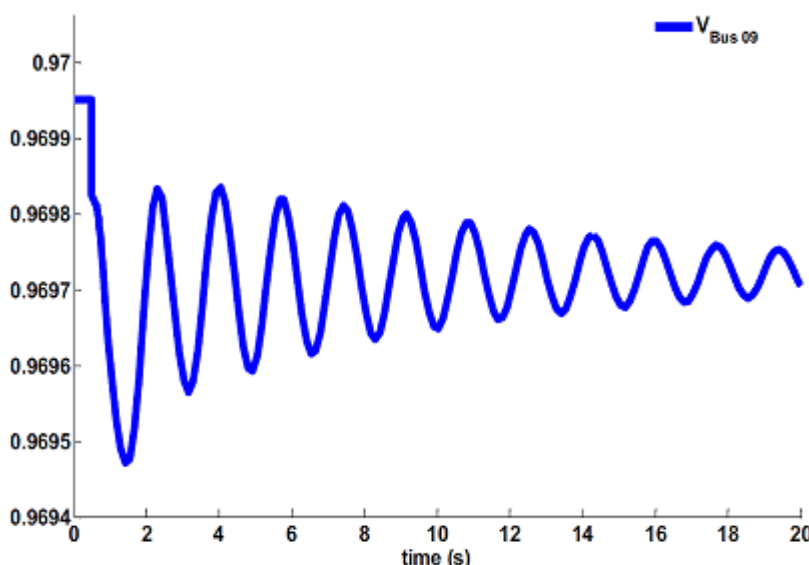
4.1.1 Pojava niskofrekventnih poremećaja

Problemi kvaliteta električne energije se uglavnom odnose na galvanski indukovane poremećaje niske frekvencije. Vrijeme trajanja ovih poremećaja je od nekoliko ili više

desetina mikrosekundi (tranzijentni poremećaji) do perioda od par sekundi ili minuta. Pojava brzih tranzijenata u EES-u dovodi do mogućeg rizika za nestabilnost tiristorski kontrolisanih sistema (invertora) [14]. Poremećaji niske učestanosti narušavaju kvalitet isporučene energije, a dovode i do treperenja izvora svjetlosti (flikera) [15].

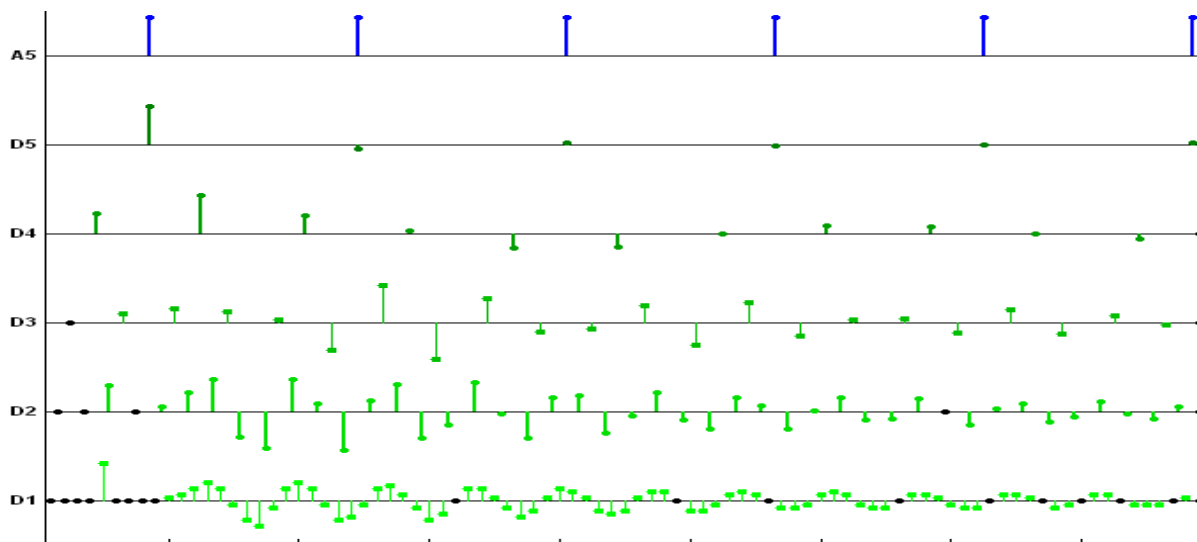
Do pomenutih poremećaja dolazi zbog promjena impedanse opterećenja, što utiče na promjenu napona napajanja. Fluktuacije napona napajanja su uzrokovane vremenski promjenljivim strujama opterećenja i unutrašnjom impedansom izvora. Prema tome promjena napona usljed sporo promjenljivog niskofrekventnog signala dovodi do pada napona preko impedanse transformatora i provodnika. Ova modulacija je nelinearna u odnosu na faktor modulacije (definiše snagu i kvalitet prenešenog signala).

Obzirom na to da su EES-i počeli da rade bliže granicama stabilnosti, slabost obrtnog momenta između generatora je prepoznat kao glavni uzročnik problema nestabilnosti sistema. Korišćenje HVDC konvertora, statičkih VAR kompenzatora (SVC) itd., može dovesti do pojave niskofrekventnih oscilacija sa negativnim prigušenjem. Automatski regulatori napona su pomogli u poboljšavanju statičke stabilnosti sistema, ali tranzijentna stabilnost je postala briga operatora prenosnih sistema. Stvaranjem velikih međusobno povezanih EES-a javio se još jedan problem, a to je prenos velike energije preko dalekovoda izuzetno velike dužine. Upotrebom automatskih regulatora napona u kombinaciji sa PSS (*eng. Power System Stabilizers*), znatno su se umanjili efekti oscilacija niske frekvencije [16].



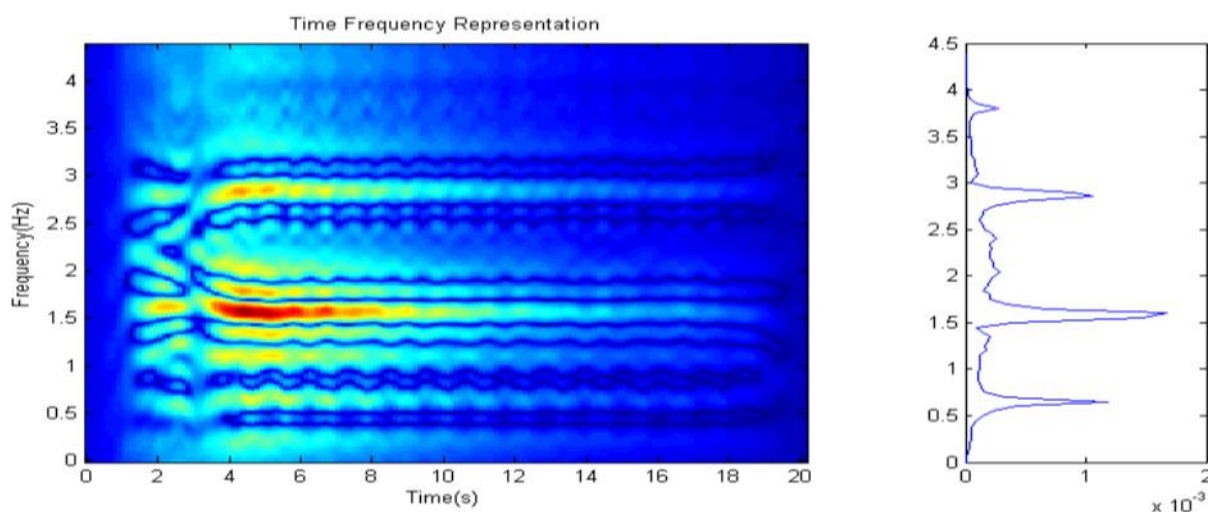
Slika 4.1 – Oscilacija napona [17]

Na sljedećem primjeru će biti predstavljena primjena WT u detekciji niskofrekventnih poremećaja. Na slici 4.1 je predstavljena pojava oscilacija napona na sabirnicama usljed povećanja aktivne snage. Na signal sa slike 4.1 je primijenjena DWT i rezultat je prikazan na slici 4.2.



Slika 4.2 – Primjena DWT na signal oscilacija napona [17]

Primijenjen je Haar wavelet i pet nivoa dekompozicije, što znači da je signal razložen na aproksimaciju (A_5) i pet nivoa detalja (D_1, D_2, D_3, D_4, D_5). Svaki odbirak predstavlja odgovarajući koeficijent funkcije skaliranja $c_{j,k}$ (kod A_5) i koeficijent wavelet-a $d_{j,k}$ (D_{1-5}). Ovdje su od interesa wavelet koeficijenti, pa je signal razložen na pet nivoa detalja. Niži nivoi detalja daju uvid u visokofrekventne komponente signala kratkog trajanja, dok viši nivoi detalja daju uvid u niskofrekventne komponente dugog trajanja. Identifikaciju početka poremećaja omogućava prvi nivo detalja (D_1), koji se inače koristi za detekciju bilo kog poremećaja u signalu. Međutim, drugi nivoi rezolucije se koriste za izdvajanje više detalja koji mogu pomoći u procesu estimacije. WT je upotrebljena za izdvajanje signala sa dominantnim karakteristikama (poremećaj) od signala napona. Za dalju analizu dobijenih detalja signala upotrebljena je FFT [17]. FFT se može primjeniti na svaki nivo detalja, a na slici 4.3 je prikazana vremensko frekvencijska analiza samo za treći nivo detalja D_3 :



Slika 4.3 – Primjena FFT na detalje signala D_3 i spektar dominantnih frekvencija [17]

Nakon primjene vremensko-frekventne analize mogu se definisati dominantne frekvencije kod trećeg nivoa detalja D_3 . Na slici 4.3 plavom bojom su predstavljene komponente sa manjom energijom, a žutom i crvenom bojom komponente sa većom energijom. Dominantne frekvencije za pomenute detalje signala su: 0.6 Hz, 1.6 Hz, 2.8 Hz i 3.8 Hz. Ovo potvrđuje preciznost koju WT ima u otkrivanju niskofrekventnih oscilacija u odnosu na druge metode [17].

Istraživanja su pokazala da WT omogućava tačno utvrđivanje dominantnih frekvencija signala, što je od velikog značaja za praćenje niskofrekventnih oscilacija u sistemu. Primjenom WT u kombinaciji sa FFT moguće je identifikovati početak poremećaja, otkriti oscilacije u EES-u, utvrditi dominantni režim oscilacija, kao i njihov karakter [17].

Nadgledanje sistema u realnom vremenu može da pomogne u identifikovanju slabo prigušenih oscilacija kao i raznih drugih neželjenih pojava u EES-u. U budućnosti se može očekivati primjena WT u modernim sistemima za nadgledanje skupa EES-a koji rade u interkonekciji, što podrazumijeva nadgledanje širokog područja rada [17]. U radu [18] autori su predložili novi koncept identifikacije poremećaja niskih frekvencija pomoću WT i PMU (*eng. Phasor Measurement Unit*), tj. upotrebom WT i fazorskih mjernih jedinica. PMU predstavljaju sastavni dio WAMPCS uređaja (*eng. Wide area monitoring, protection and control system*) koji vrše nadgledanje sistema u interkonekciji u realnom vremenu.

4.1.2 Detekcija kvara na dalekovodima

Kratki spojevi na dalekovodima se mogu javiti iz više razloga. Mogu se dogoditi usljed udara groma, pada drveta na provodnike itd. Ovo može dovesti do trajnog oštećenja izolatora. Pojava bilo kog kvara u prenosnom dalekovodu dovodi do tranzijentnog stanja koje karakteriše prisustvo harmonika struje.

Zbog toga se javila potreba za što kvalitetnijom detekcijom kvarova na dalekovodima. Raniji pristupi u identifikaciji poremećaja podrazumijevali su upotrebu FT za obradu signala, ali je uočena pojava curenja spektra i loša vremenska lokalizacija pri pojavi visokih frekvencija u signalu. Zbog toga se analize okreću upotrebi drugih transformacija, kao što je WT. Zbog velike prednosti koju nude MRA i WT u detekciji kvarova, vršena su mnoga istraživanja sa ciljem njihove optimalne primjene u ovoj oblasti [19].

U radu [20] autori su predstavili novi pristup u detekciji i klasifikaciji kvara na paralelnim dalekovodima, koji predstavlja kombinaciju WT i NN. WT je moćan matematički alat koji u kombinaciji sa NN koji ima sposobnost da klasifikuje nelinearni odnos između izmjerenih signala pronalaženjem različitih obrazaca u signalima, što ih čini dobrim alatom za analizu kvarova. Primjenom WT kvar se detektuje, dok se pomoću NN pronalazi određeni obrazac u signalu i na taj način vrši klasifikacija poremećaja. WT se primjenjuje zbog činjenice da su linijske struje u trenucima kvara tranzijentne i neperiodične prirode. Vršiti se obrada "sirovog"

signala struja pomoću DWT i utvrđuje kvar. Taj podatak se zatim prosleđuje NN koji klasifikuje poremećaj.

Primjenom DWT mogu se detektovati kvarovi kod visokonaponskih dalekovoda. Ovdje se db4 wavelet pokazao kao optimalna osnovna funkcija [19], pogodana za niskofrekventne i za visokofrekventne analize. Autori [19] navode prednost u primjeni DWT kod pomenutih kvarova u pogledu brzine proračuna od 2×10^{-5} sekundi, u odnosu na ranije korišćene metode poput DFT i ANN koji zahtijevaju vrijeme od 5×10^{-4} sekundi.

U slučaju velikih EES-a pojedini autori predlažu upotrebu WT i metoda vektora nosača (SVM), zbog algoritma koji značajno smanjuje broj računskih operacija i mnogo brže radi u slučaju velike baze podataka, u poređenju sa ANN metodama [21]. Predložena je i upotreba posebnog algoritma koji se temelji na DWT i CWT za detekciju kvarova koje karakteriše velika impedansa na nadzemnim dalekovodima distributivnih sistema [22].

4.1.3 Zaštite transformatora

Energetski transformatori su vrlo bitni elementi za pouzdanost i stabilnost EES-a. Kontinualni rad transformatora je od vitalnog značaja za postizanje pouzdanog napajanja. Bilo koja neplanirana popravka transformatora ili zamjena neispravnog je dug i prije svega skup proces. Zbog toga je bitno da im se obezbijedi siguran rad bez neplaniranih prekida. Za bezbjedno funkcionisanje transformatora važna je relejna zaštita.

Jedna od novijih tehnika za razlikovanje udarnih struja pri uključenju transformatora i struja kratkog spoja transformatora podrazumijeva primjenu WT i ANN. Sposobnost wavelet-a da izvrše dekompoziciju signala na frekventne opsege omogućava detekciju kvara. Pošto se ovaj metod koristi za anлізу diskontinuiteta kod signala, čak i ako se kvar pojavi u kratkom intervalu sa velikom impedansom, koeficijenti detalja će omogućiti uvid u kvar. Proračun koji se sprovodi je vrlo jednostavan. Potrebno je izvršiti dekompoziciju signala pri skali 1 primjenom Coif6 wavelet-a. Odabrana funkcija je pokazala optimalne performanse pri testiranju kvarova. Nakon toga ANN vrši klasifikaciju poremećaja vrlo brzo jer je za analizu dovoljna samo jedna četvrtina ciklusa u kom se javio poremećaj. Ova tehnika omogućava vrlo preciznu klasifikaciju tranzijenata ($\approx 99\%$). Ovo je jedan vrlo kvalitetan alternativni algoritam zaštite za velike energetske transformatore [23].

4.1.4 Uklanjanje šuma iz signala

Šum ili interferencija može da se definiše kao neželjeni signal koji iskrivljuje originalni signal. Šum (buka) može biti prolazan ili stalno prisutan. Šumovi se mogu generisati usljed internih ili eksternih faktora [24].

Šumovi koji potiču od visokog napona se dijele na dvije grupe:

1. šumovi u normalnim uslovima rada (šum korone, parcijalno pražnjenje na izolatorima i elektro-energetskoj opremi u trafostanicama)
2. šumovi koji potiču od rada rasklopnih elemenata EES-a (prekidači, rastavljači) i kvarova na dalekovodima.

Šum korone je stalno prisutan u VF kanalu (visoko-frekventne veze za prenos podataka po vodovima visokog napona), a njegova veličina varira unutar jedne periode industrijske frekvencije. Ponašanje šuma korone se ne mijenja bitno u dužem vremenskom periodu.

Šumovi koji potiču od rada rasklopnih elemenata EES-a i od atmosferskih pražnjenja imaju visoke amplitude i uglavnom su relativno kratkog trajanja, od nekoliko mikrosekundi do nekoliko sekundi. Šumovi koji nastaju zbog djelovanja rasklopnih elemenata u dalekovodnoj mreži prouzrokuju gubitak sinhronizacije i pakete grešaka u kanalu realizovanom digitalnom VF vezom po vodu visokog napona.

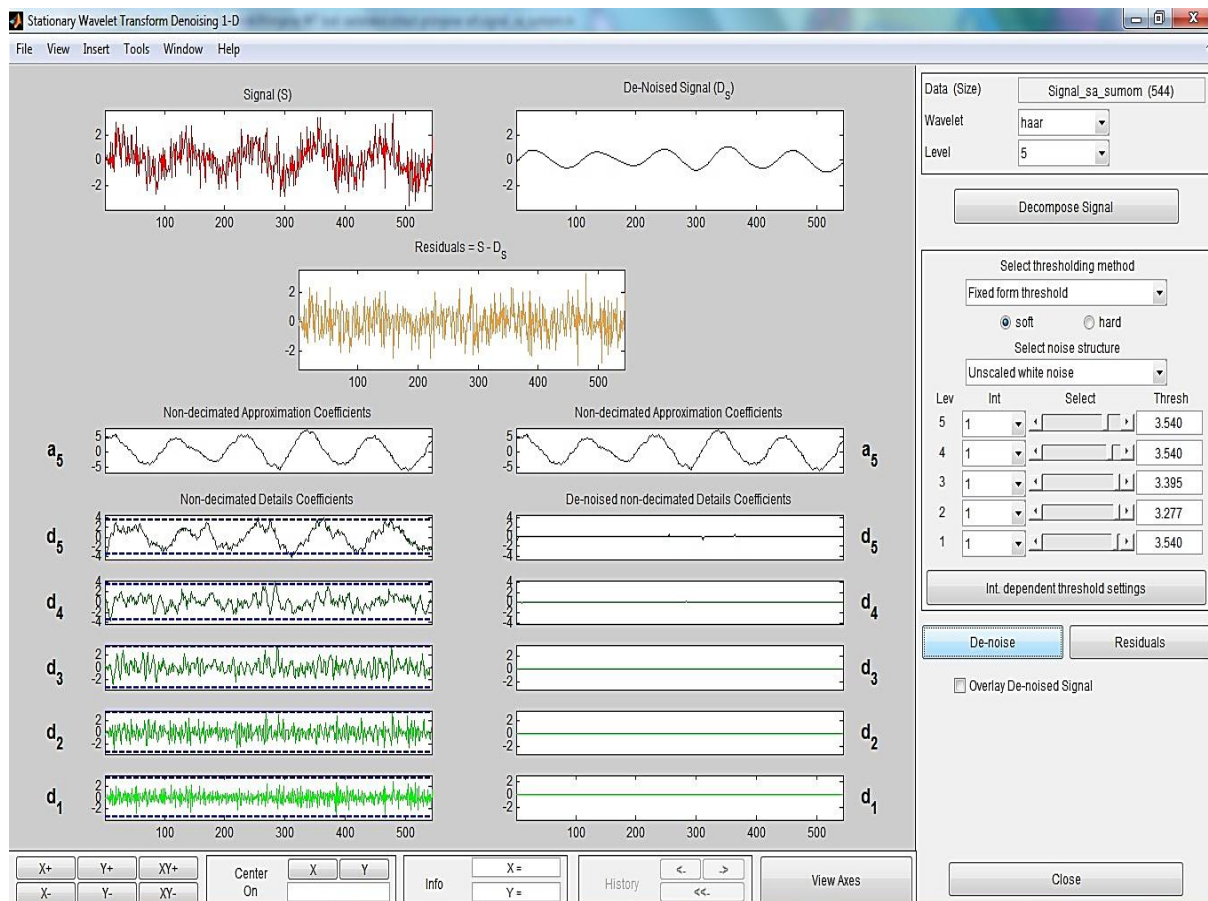
Niskofrekventne pojave (frekvencije 50 Hz i harmonici do reda kHz) potiču uglavnom od kratkih spojeva. Visokofrekventne pojave (frekvencije reda MHz) potiču uglavnom od komutacija rasklopnih elemenata EES-a. Za prenos signala podataka značajne su visokofrekventne impulsne smetnje koje mogu da interferiraju sa telekomunikacionim signalima podataka i ometaju njihov prenos [25].

U EES-u šum nastaje zbog faktora koji dovode do harmonika i brzih promjena (šiljaka) u naponu/struji. Neki od tih faktora su:

- Startovanje motora velike snage,
- Fluorescentne cijevi,
- Udar groma,
- Nagli porast napona usljed električnog kvara,
- Oprema za zavarivanje [24].

U slučaju signala sa šumom zadatak je otkriti stvarni signal na osnovu nepotpunih, indirektnih ili podataka sa šumom. Čišćenje signala se sastoji u odbacivanju detalja čiji su wavelet koeficijenti ispod nekog praga [2]. Ovi koeficijenti se zamjenjuju nulama, nakon čega se primjenjuje inverzna wavelet transformacija i dobija prečišćeni signal.

Na slici 4.4 je prikazano čišćenje signala S pomoću MATLAB-a i opcije za uklanjanje šuma iz jednodimenzionih (1-D) signala (*Stationary Wavelet Transform Denoising 1-D*):



Slika 4.4 – Signal koji sadrži šum i njegovo uklanjanje primjenom WT

Uočava se razlika između signala sa šumom S i signala bez šuma D_s . Uklanjanje šuma iz signala je vrlo bitno jer omogućava dalju analizu signala i detekciju početka i kraja poremećaja. To se postiže zahvaljujući varijacijama amplitude wavelet koeficijenata oko tih tačaka, a moguće je i definisati trajanje poremećaja [26].

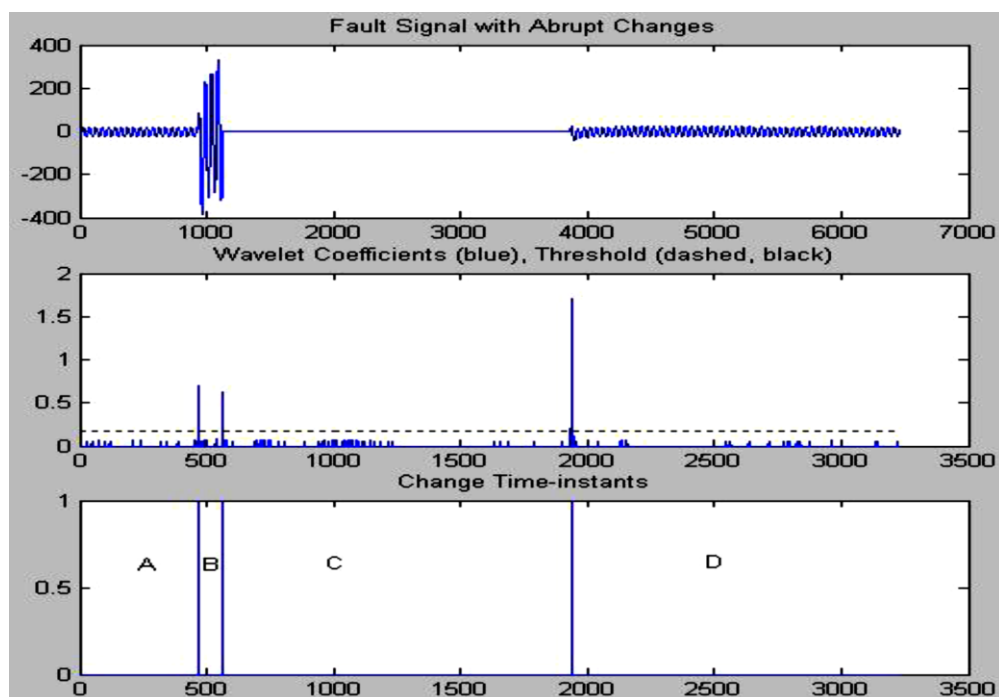
4.1.5 Detektovanje naglih promjena u signalu

WT ima značajan potencijal u detektovanju naglih promjena u signalu koje se javljaju pri kvarovima. Primjenom DWT i analizom detalja signala moguće je odrediti razlike između perioda signala neposredno prije pojave kvara, tokom samog kvara, posle otvaranja prekidača i posle samostalnog ponovnog zatvaranja prekidača. U detaljima signala je potrebno odrediti najveće wavelet koeficijente pomoću relacije (4.1), jer veći koeficijent označava veću promjenu u signalu. Definiše se univerzalni prag T :

$$T = \sigma \sqrt{2 \log_e n}, \quad (4.1)$$

gdje je σ medijan apsolutne devijacije wavelet koeficijenata (MAD), podijeljen sa 0.6725, a n je broj uzoraka koeficijenata. Posmatra se dio signala gdje vrijednost WTC prelazi ovaj

prag. Na slici 4.5, segment A predstavlja dio signala prije pojave kvara i sam početak kvara, segment B prikazuje kvar, C predstavlja otvaranje prekidača i D samostalno ponovno zatvaranje prekidača i vraćanje signala u oblik koji je imao prije poremećaja [27].

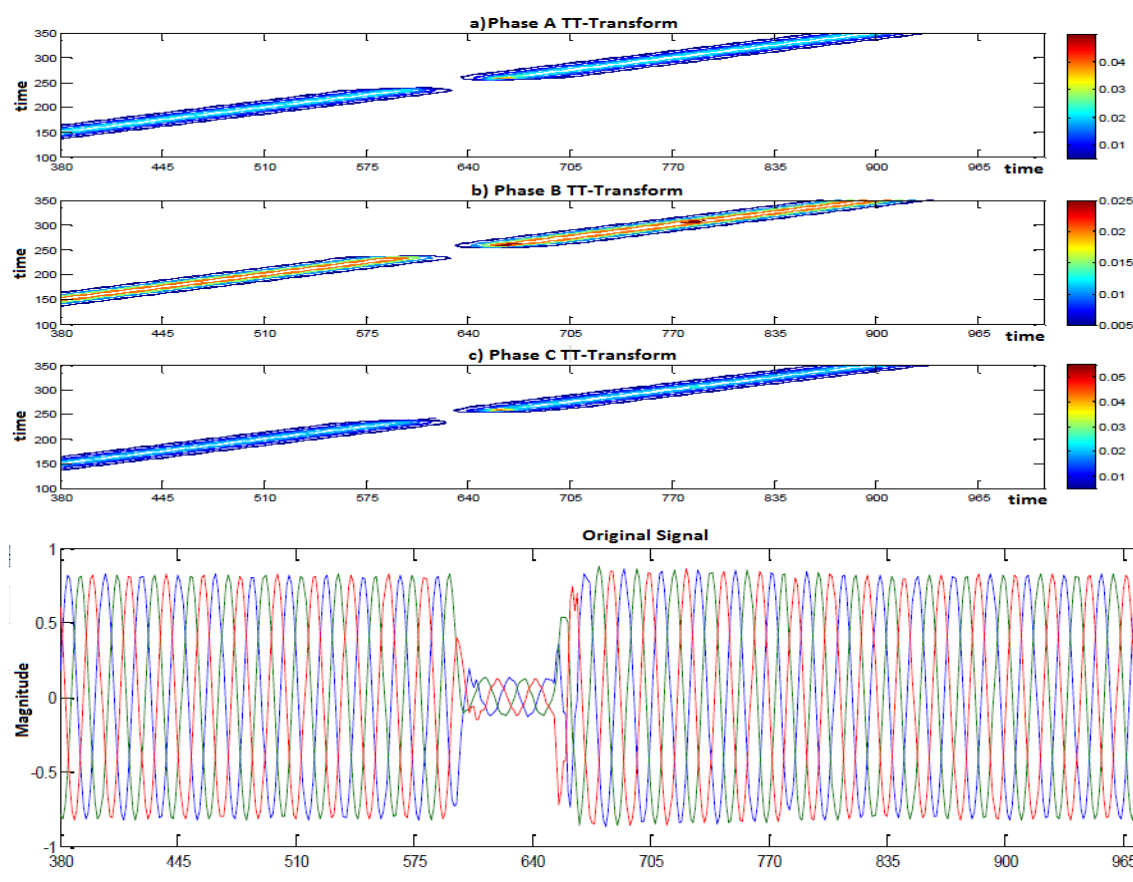


Slika 4.5 – Primjena DWT na signal koji sadrži kvar [27]

4.1.6 Detektovanje ostrvskog režima rada

WT se može koristiti u detekciji ostrvskog rada dijela sistema i trofaznih kvarova, na neposredni način. Ovdje se zapravo koristi Time-Time transformacija (TT), koja je izvedena iz S transformacije. Predloženi algoritam omogućava obradu parametara i utvrđivanje odgovarajućih obrazaca za detekciju pojave ostrvskog rada i trofaznih kvarova [28].

Na slici 4.6 je prikazana pojava ostrvskog rada do kog dolazi usljed simuliranog poremećaja. Nakon pojave poremećaja ubrzo se otvara prekidač, sistem je vrlo kratko u ostrvskom režimu rada nakon čega se vraća u normalno stanje. Varijacija u naponu daje jedinstveni uzorak koji je ekstrahovan pomoću TT transformacije. Niske magnitude su prikazane varijacijom boja prije nego je došlo do poremećaja. Varijacije crvene boje su izraženije pri tačkama sa velikim magnitudama napona. Ovo se javlja zbog toga što se prekidač otvorio da bi eliminisao kvar. Ostrvski režim je trajao od 650 s do 750 s. Sistem se ubrzo vratio u stabilni rad.



Slika 4.6 – Primjena TT transformacije u detekciji ostrvskog režima rada [28]

Princip detekcije trofaznih kvarova i ostrvskog režima rada zasniva se na otkrivanju jedinstvenih obrazaca koje oni imaju pomoću TT transformacije. WT kao dio TT transformacije, može da ukaže na indirektan način na jedinstveni obrazac kontura se javlja pri različitim vrstama poremećaja [28].

4.1.7 Prognoziranje potrošnje

Dobro prognoziranje potrošnje u EES-u omogućava racionalno korišćenje proizvodnih objekata i blagovremenu nabavku električne energije i samim tim energetske i finansijske uštede. Utvrđeno je da važan potencijal u kratkoročnom prognoziranju potrošnje nudi WT u kombinaciji sa NN. Konzum se sa stanovišta signala može posmatrati kao linearna kombinacija različitih frekvencija. Svaka komponenta konzuma se može predstaviti pomoću jedne ili više frekvencija. Pomoću WT, konzum u prošlosti se može posmatrati u dva dijela. Jedan dio predstavlja aproksimaciju koja se odnosi na niske frekvencije, a drugi dio predstavlja detalje koji se odnose na visoke frekvencije. Nakon toga se prognoza potrošnje u budućnosti može realizovati pomoću NN ili podešavanjem opterećenja metodom regresije (koja je jedna od najšire korišćenih statističkih metoda) [13].

4.1.8 Kompresija podataka

Poznato je da WT može izvršiti dekompoziciju bilo kog signala vezanog za kvalitet električne energije (npr. napona) na različite skale. Pri svakoj skali WTC koji se povezuju sa određenim poremećajem su veći od onih koji se ne odnose na poremećaj. Kompresija podataka se vrši tako što se ovi specifični koeficijenti čuvaju dok se ostali koji prikazuju irelevantne događaje izostavljaju. Tako se količina sačuvanih podataka drastično smanjuje. Ovi kompresovani podaci se mogu iskoristiti za rekonstrukciju signala sa vrlo malo izgubljenih informacija. Dokazano je da je odnos kompresije (definiše se kao originalna veličina podataka podijeljena sa veličinom kompresovanih podataka) dobar. Potvrđeno je da su zahtjevi za memorijom i vrijeme prenosa podataka minimalni, dok rekonstruisani signal ima manji broj podatka u odnosu na originalni signal [29].

4.1.9 ANN, Fuzzy sistemi i wavelet transformacija

Različiti algoritmi koji se upotrebljavaju za klasifikaciju poremećaja kvaliteta električne energije ne mogu biti dovoljni za kvalitetnu analizu ukoliko se samostalno koriste. Zato se primjenjuju zajedno sa raznim vrstama neuronskih mreža. Na taj način se efikasnije i brže dolazi do rezultata. Ipak, utvrđeno je da je tačnost nešto slabija pri upotrebi ANN, nego pri upotrebi Fuzzy sistema. Fuzzy sistemi su sistemi bazirani na fuzzy logici koja se koristi za modelovanje složenih sistema u kojima je primjenom drugih metoda veoma teško utvrditi međuzavisnosti koje postoje između pojedinih promjenljivih. U pogledu brzine ANN je nešto sporiji metod zbog ponavljanja i vremena potrebnog za obradu, a njegova složenost se povećava sa brojem ulaznih podataka. Fuzzy sistemi nemaju mogućnost ispravne klasifikacije ekstremnih vrijednosti u svakom poremećaju [29]. U tabeli 4.2 je prikazana procentualna tačnost prilikom primjene različitih metoda u kombinaciji sa WT.

Tabela 4.2 – Procentualna tačnosti u klasifikaciji poremećaja napona pri upotrebi WT [29]

Br.	Metod	Tačnost (%)
1.	Wavelet transformacija i ANN	94.37
2.	Wavelet transformacija i Fuzzy	98.70
3.	Wavelet transformacija, ANN i Fuzzy	98.90

4.2 Deformacija talasnog oblika napona i primjena wavelet transformacije

Amplituda napona, njegov talasni oblik i frekvencija predstavljaju osnovne činioce kvaliteta električne energije [30].

Napon na izlazu generatora u elektranama je približno oblika idealne sinusoide, ali se prilikom prenosa i distribucije deformiše. Svako odstupanje od osnovnog talasnog oblika napona ukazuje na prisustvo poremećaja.

U ovom poglavlju će biti obrađene sljedeće vrste deformacija talasnog oblika napona: propadi napona, porasti napona, beznaponska stanja, flikeri, oscilatorni tranzijenti, harmonici, zarezi i impulsi. Prikazani talasni oblici napona predstavljaju simulaciju signala u MATLAB-u [31]. Simulacija je urađena na osnovu relacija koje opisuju talasni oblik napona pri gore pomenutim poremećajima [32]. Na tim primjerima je objašnjena primjena DWT i CWT. Analiza poremećaja je izvršena proučavanjem WTC i energije signala.

Ako je osnovni signal označen sa $f(t)$, njegova energija se može opisati sljedećom relacijom:

$$E = \int |f(t)|^2 dt. \quad (4.2)$$

Tada se veza između energije signala i energije komponentni nastalih primjenom WT predstavlja kao:

$$E = E_C + E_D, \quad (4.3)$$

gdje je E_C energija aproksimacije signala, a E_D energija detalja signala $f(t)$. Na osnovu relacije (4.2) dolazi se do izraza koja opisuje vezu između energije signala i snage svake komponente i koeficijenata wavelet transformacije:

$$E = \int |f(t)|^2 dt = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} |c(k)|^2 + \sum_{j=0}^{+\infty} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} |d_j(k)|^2, \quad (4.4)$$

gdje je $c(k)$ aproksimacija signala, a $d(k)$ detalji signala.

Signali napona koji sadrže deformacije talasnih oblika imaju komponente visokih frekvencija koje su od velikog značaja za proučavanje samih poremećaja. Zbog toga je potrebno obratiti pažnju na energiju koeficijenata detalja, jer su detalji visokofrekventne komponente signala pri malim skalama.

Svaki poremećaj u EES-u ima specifičnu krivu razlike, tj. devijacije energije detalja ΔE :

$$\Delta E = E_{signal} - E_{pure}, \quad (4.5)$$

gdje E_{signal} predstavlja energiju detalja signala koji sadrži poremećaj, a E_{pure} predstavlja energiju detalja čiste sinusoide napona. Dobijena kriva ΔE je funkcija skala. U zavisnosti od oblika ove krive može se pronaći njen jedinstveni obrazac za svaki poremećaj i na taj način omogućiti njegova klasifikacija [33].

Svaki signal koji predstavlja poremećaj se prilikom utvrđivanja karakterističnog oblika krive ΔE razlaže na i skala. Da bi se taj broj odredio, prvo je potrebno izračunati minimalni broj skala na koji se signal razlaže, pomoću sljedeće relacije:

$$\log_2\left(\frac{f_s}{f_{ref}}\right) - 1 \leq N_{min} \leq \log_2\left(\frac{f_s}{f_{ref}}\right). \quad (4.6)$$

Član f_s predstavlja frekvenciju odabiranja, a $f_{ref} = 50$ Hz. Optimalan broj skala i predstavlja dvostruku vrijednost broja N_{min} .

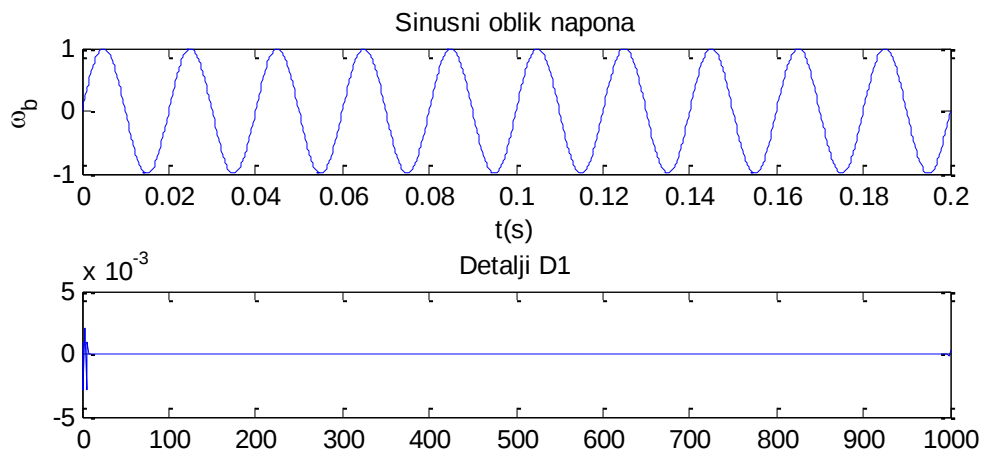
U primjerima koji slijede signali imaju frekvenciju odabiranja od 5 kHz, odnosno 5000 uzoraka u sekundi. Zaključuje se da optimalan broj skala iznosi 12.

Relacija (4.5) će prvo biti primjenjena na sistemski napon. Sistemski napon na izlazu generatora u EES-u se može opisati formulom:

$$u(t) = \sin(\omega_b t), \quad (4.7)$$

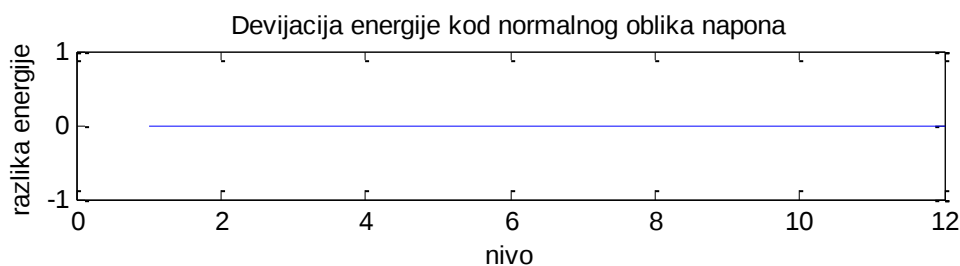
gdje je učestanost $\omega_b = 2\pi f$, f - frekvencija sistema (50 Hz), što je predstavljeno na slici 4.7. Bilo koji poremećaj u radu EES-a će uticati na talasni oblik napona i promijeniti ga.

Ukoliko se DWT i db4 primjeni na sinusni oblik napona pri skali jedan, dobijaju se detalji signala označeni sa D_1 (slika 4.7). Vrijednost dobijenih koeficijenata je nula, jer je sinusoida idealnog oblika i bez poremećaja.



Slika 4.7 – Sinusni oblik napona

Kriva devijacije energije detalja za sinusni oblik napona je data na slici 4.8.



Slika 4.8 – Kriva devijacije energije detalja sinusnog oblika napona

Devijacija energije u posmatranom slučaju je predstavljena pravom linijom koja ima pravac ose Ox .

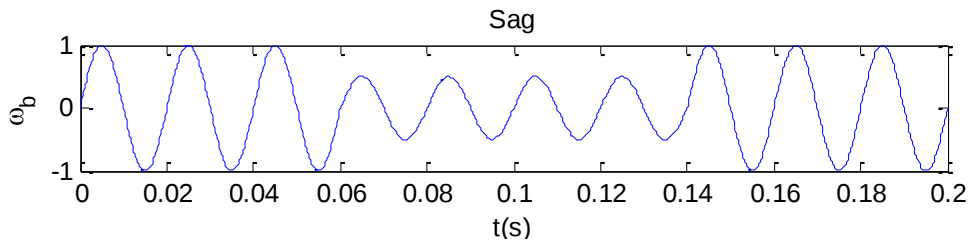
4.2.1 Propadi napona

Propadi napona predstavljaju smanjenje amplitude napona industrijske učestanosti, čije je trajanje u opsegu od 0.01 s do 1 minuta. Tipične vrijednosti su između 10 % i 90 % od nazivne efektivne vrijednosti napona. Nastaju zbog kvarova u nekom dijelu električne mreže, bilo distributivne, bilo prenosne. Kvarovi u prenosnoj mreži pogađaju mnogo više potrošača i na većoj udaljenosti. Propadi napona u prenosnoj mreži traju kraće od propada u distributivnoj mreži. Prvi razlog tome je što oprema (releji, prekidači) mora brzo reagovati zbog velike energije kvara. Drugi razlog je to što su prenosni sistemi zatvoreni i rade u interkonekciji, dok su distributivni sistemi radijalni. Potrošači udaljeni i do 100 km od mjesta kvara mogu osjetiti propad napona [30]. Veliki broj ovih propada potiče od zemljospojeva koji nastaju zbog vremenskih nepogoda kao što su: udar munje, vjetar, led i sl. Kvarovi se mogu pojaviti i unutar fabrike ili u industrijskoj električnoj mreži. Pri normalnim uslovima rada, tokom jedne godine može se zabilježiti od nekoliko desetina do preko hiljadu propada [34]. Posljedice propada napona su ispadi osjetljive električne opreme. Od propada napona stradaju računari, računarske mreže, audio i video uređaji u domaćinstvu, razni drugi uređaji na bazi mikroprocesora ili sličnih mikroelektronskih kola [30]. Trajanje propada napona zavisi od vremena koje je potrebno zaštitnoj opremi da otkrije i isključi kvar. Propadi napona se obzirom na trajanje mogu podijeliti u tri grupe:

- Trenutni propadi napona koji traju od 0.5 do 30 perioda,
- Momentalni propadi napona, traju od 30 perioda do 3 sekunde,
- Privremeni propadi napona, traju od 3 sekunde do 1 minuta.

U evropskoj literaturi za propad napona se koristi termin *voltage dip*, a u američkoj *voltage sag*. Propadi napona mogu biti jednofazni, dvofazni i trofazni, u zavisnosti od toga kako je došlo do njihovog nastanka.

Na slici 4.9 prikazan je trenutni propad napona:



Slika 4.9 – Propad napona

Ova vrsta poremećaja u EES-u se može opisati funkcijom:

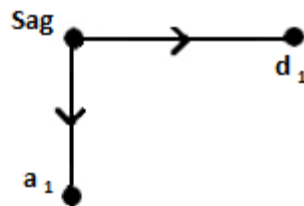
$$h(t) = [1 - \alpha(u(t - t_1) - u(t - t_2))] \sin(\omega_b t), \quad (4.8)$$

pri parametrima $0.1 \leq \alpha \leq 0.9$ i $T \leq t_2 - t_1 \leq 9T$. Podešavanjem parametra α utiče se na amplitudu poremećaja, parametri t_1, t_2 određuju koji dio signala je obuhvaćen poremećajem, dok T predstavlja period signala (1/50 Hz).

Simuliran je signal propada napon pod nazivom *Sag* sa sljedećim parametrima: $\alpha = 0.5$, $t_1 = 7T$ i $t_2 = 8T$, slika 4.11. Na njega je primijenjena DWT i Daubechie 6 wavelet (db6), pri prvoj skali. Ta funkcija je odabrana jer je u pitanju brzi poremećaj. U ovakvim slučajevima je potrebno za mother wavelet odabrati db4 ili db6, jer su kompaktni i posebno efikasni u detektovanju i lokalizovanju poremećaja kao što su propadi napona [35]. Pri velikim skalama wavelet-i su prošireni i daju globalni prikaz, a na malim skalama su uži i daju lokalni prikaz odnosno analiziraju male detalje. Generalno je pravilo da se kraći wavelet-i biraju u slučaju brzih poremećaja, a duži u slučaju sporih poremećaja [36]. Daubechie wavelet ima široku primjenu zbog osjetljivosti na nestacionarne signale, što je slučaj sa posmatranim signalom.

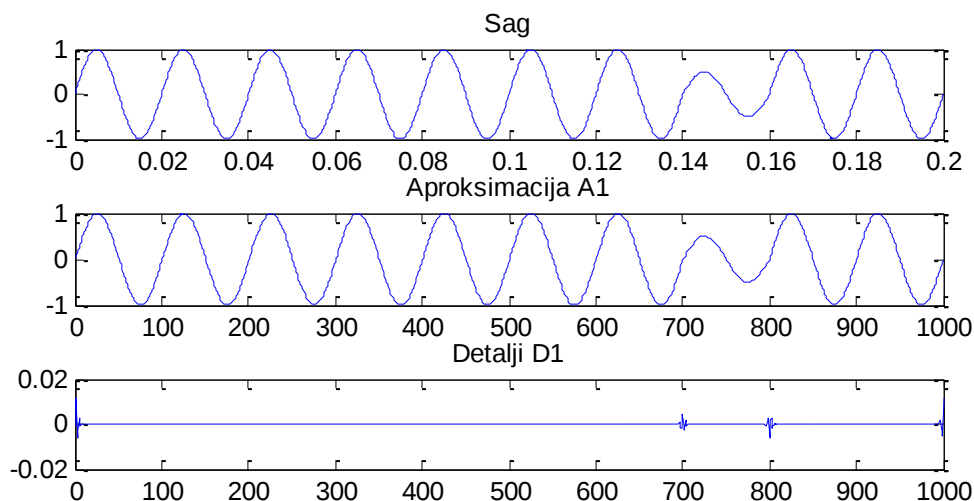
Originalni signal *Sag* je razložen na aproksimaciju signala a_1 i detalje signala d_1 .

Slika 4.10 pokazuje dekompoziciju signala *Sag* pri skali jedan:



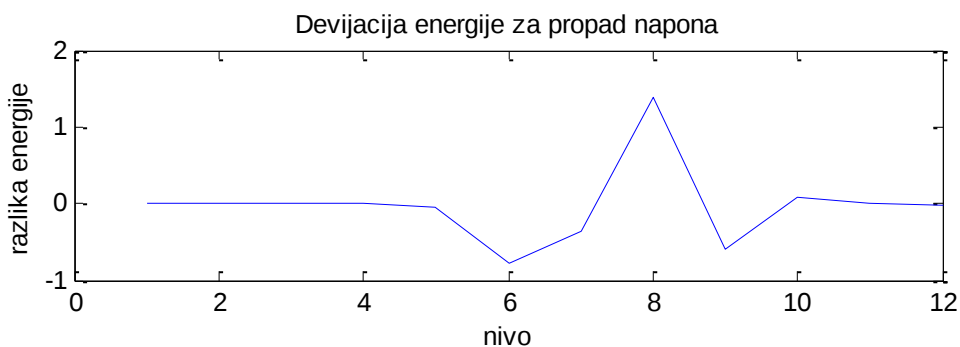
Slika 4.10 – Dekompozicija signala propada napona

Detalji signala su činioци koji ukazuju na to da se dogodio poremećaj. U trenucima poremećaja, vrijednosti WTC su značajno veće od vrijednosti ostalih koeficijenata. Pomoću detalja signala i na osnovu relacije (4.1) moguće je odrediti trajanje poremećaja. U posmatranom slučaju poremećaj je nastao pri 0.14 s i trajao do 0.16 s tj. ukupno 0.02 s.



Slika 4.11 – Primjena DWT na talasni oblik propada napona

Na slici 4.12 prikazana je kriva devijacije energije detalja za signal koji sadrži propad napona:



Slika 4.12 – Kriva ΔE za signal sa propadom napona

Kod krive devijacije energije detalja za propade napona ističu se tri tačke. Uočava se negativna vrijednost ΔE u skali šest, pozitivna vrijednost ΔE u skali osam, kao i negativna vrijednost ΔE u skali devet. Ova kriva se značajno razlikuje od krive devijacije energije detalja sinusnog napona bez poremećaja sa slike 4.8.

4.2.2 Porasti napona

Porasti napona ili premašenja napona predstavljaju povećanje efektivne vrijednosti napona na vrijednost od 1.1 do 1.8 p.u., pri nazivnoj frekvenciji čije je trajanje u opsegu od 0.01 s do 1 minuta. Do porasta napona može doći usljed ispada motora velike snage, zemljospoja itd. Porasti napona se mogu javiti prilikom isključenja velikih potrošača ili prilikom uključenja kondenzatorskih baterija velike snage [30]. Posljedica porasta napona može biti pojava prenapona na električnoj opremi kao i oštećenje odvodnika prenapona. Slično kao što je slučaj sa propadima napona, porasti napona se mogu podijeliti u zavisnosti od dužine trajanja na:

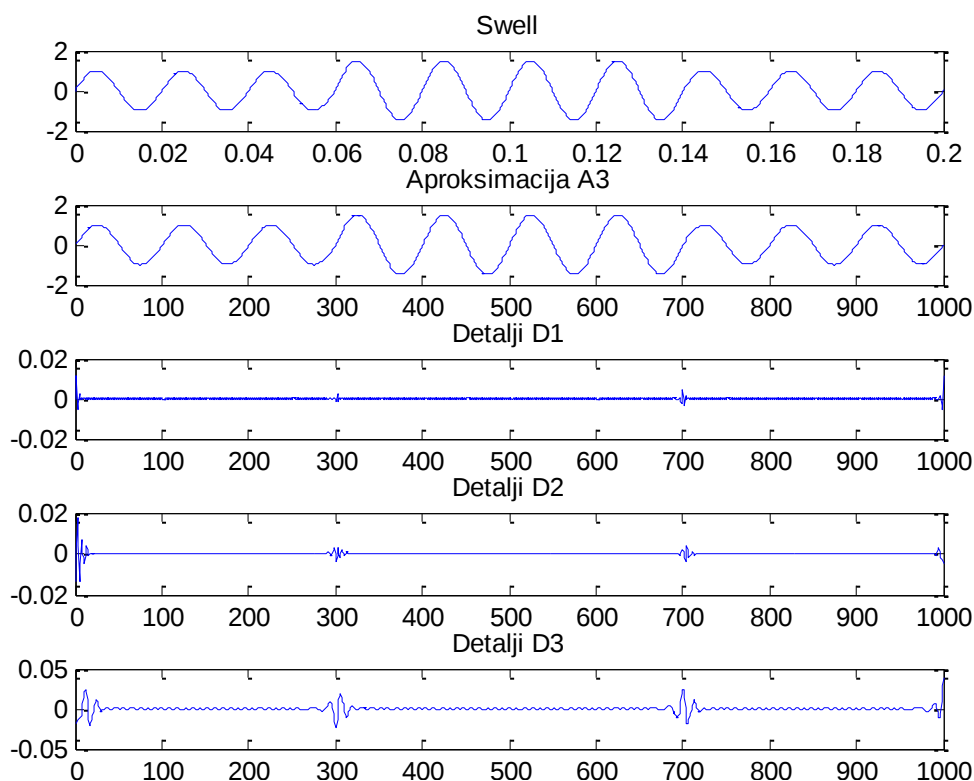
- Trenutne poraste napona (trajanja od 0.5 do 30 perioda),
- Momentalne poraste napona (od 30 perioda do 3 sekunde),

- Privremene poraste napona (od 3 sekunde do 1 minuta).

Porast napona se može opisati sljedećom relacijom:

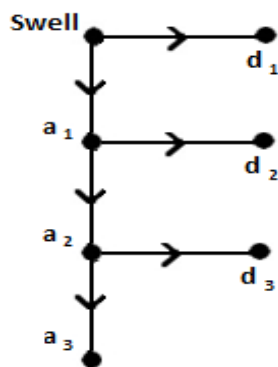
$$h(t) = [1 + \alpha(u(t - t_1) - u(t - t_2))] \sin(\omega_b t), \quad (4.9)$$

gdje su parametri $0.1 \leq \alpha \leq 0.8$ i $T \leq t_2 - t_1 \leq 9T$. Slično kao u relaciji za propade napona (4.8), podešavanjem parametra α utiče se na amplitudu poremećaja, dok parametri t_1, t_2 određuju koji dio signala je obuhvaćen poremećajem. Primjenom relacije (4.9) simuliran je signal porasta napona *Swell* sa sljedećim parametrima: $\alpha = 0.5$, $t_1 = 3T$, $t_2 = 7T$:



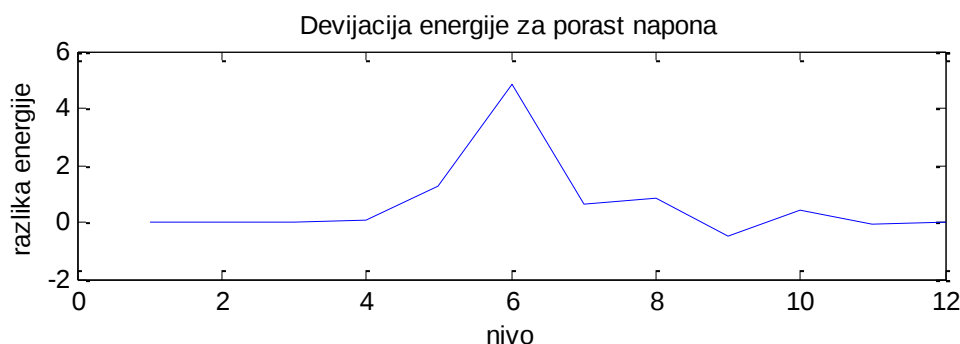
Slika 4.13 – Primjena DWT na talasni oblik porasta napona

Primijenjen je db4, pri tri skale, a dobijeni rezultati su prikazani na slici 4.13. Početni signal *Swell* je razložen na tri nivoa detalja i jednu aproksimaciju pri skali tri. Detalji signala pri najvećoj skali (D_3) daju najbolji uvid u poremećaj. Poremećaj je počeo oko 0.059 s, a završio se oko 0.141 s. Ukupno je trajao oko 0.083 s i obuhvatio je 4.15 perioda signala. Struktura razlaganja ovog signala je predstavljena na slici 4.14:



Slika 4.14 – Razlaganje signala porasta napona

Na slici 4.15 je prikazana kriva devijacije energije detalja za posmatrani signal koji sadrži porast napona:



Slika 4.15 – Kriva ΔE za signal sa porastom napona

U slučaju pojave porasta napona, pri skali šest ΔE ima najveću vrijednost.

4.2.3 Prekidi u napajanju

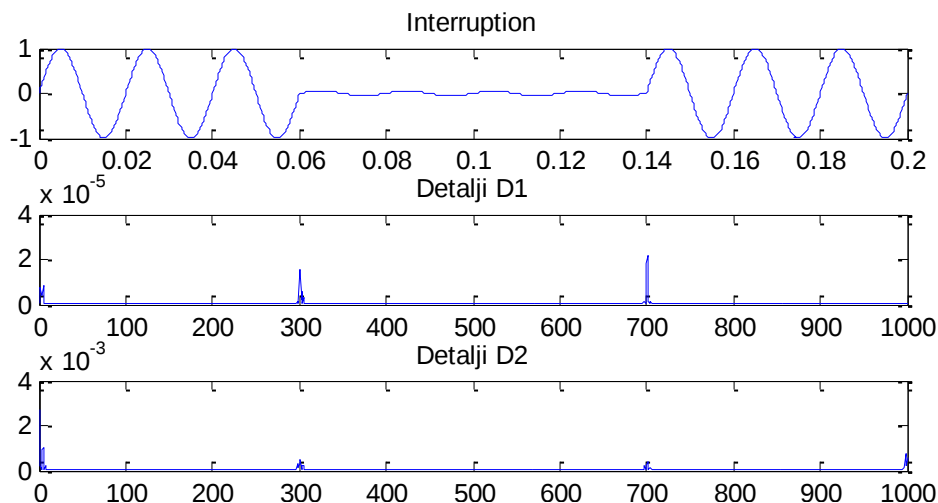
Prekidi u napajanju predstavljaju poremećaje u kvalitetu električne energije kada je vrijednost napona na mjestima isporuke potrošačima manja od 1% u odnosu na propisane nominalne vrijednosti. Oni se u pogledu regulacije kvaliteta obično ne posmatraju kao problem kvaliteta napona, nego kao problem pouzdanosti sistema [37]. Prekidi u napajanju potrošača se dijele na planirane (usljed planiranih radova, hitnih intervencija) i neplanirane (nastali usljed prolaznih ili trajnih poremećaja u EES-u). Prekidi u napajanju dovode do grešaka u radu raznih uređaja, naročito računara, gubitaka podataka, prekida proizvodnih procesa, prekida u telekomunikacionim vezama itd. Kratkotrajni prekidi u napajanju traju isključivo do 3 minuta, a dugotrajni preko 3 minuta.

Signal koji sadrži prekid u napajanju opisuje sljedeća relacija:

$$h(t) = [1 - \alpha(u(t - t_1) - u(t - t_2))] \sin(\omega_b t), \quad (4.10)$$

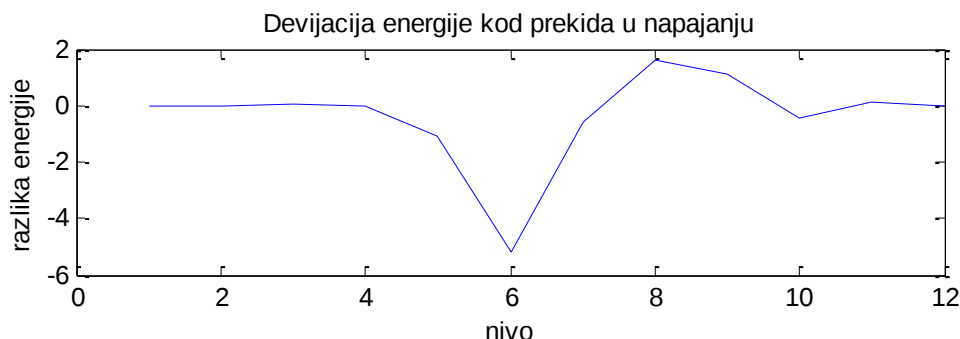
za $0.9 < \alpha \leq 1$ i $T \leq t_2 - t_1 \leq 9T$.

Signal napona koji sadrži prekid u napajanju je predstavljen na slici 4.16 i opisan sljedećim parametrima: $\alpha = 0.95$, $t_1 = 3T$ i $t_2 = 7T$. Primijenjena je DWT, db4 wavelet i dva nivoa razlaganja. Radi lakšeg uočavanja poremećaja koriste su kvadrirani wavelet koeficijenti (SWTC).



Slika 4.16 – Prekid u napajanju i primjena WT

Početak prekida napajanja i njegov kraj su jasno uočljivi zahvaljujući SWTC koji ih izdvajaju od ostalih koeficijenata signala pri prvoj skali. Slika 4.17 prikazuje krivu devijacije energije detalja za signal sa prekidom u napajanju.



Slika 4.17 – Kriva ΔE za signal sa prekidom u napajanju

Karakteristična kriva devijacije energije detalja ukazuje na to da pri skali šest ΔE ima najmanju vrijednost, nakon čega bilježi rast do skale osam gdje dostiže najveću pozitivnu vrijednost.

4.2.4 Flikeri

Flikeri predstavljaju periodične fluktuacije napona sa promjenama amplitude od 0.9 do 1.1 r.j. Ove oscilacije imaju frekvenciju manju od 25 Hz. Nastaju usljed elektromagnetske pojave fluktuacije napona na izvore svjetlosti, a ljudsko oko može da ih zapazi ukoliko su varijacije osvjetljenja manje od 1%. Pojavljuju se kao posledica periodičnog mijenjanja velikih

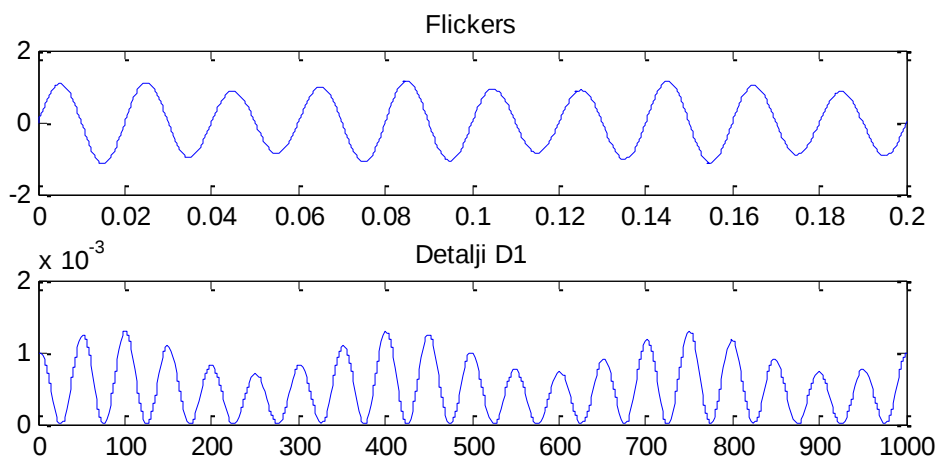
opterećenja, sa frekvencijom ponavljanja koja je blizu maksimalne osjetljivosti ljudskog oka (oko 10 ciklusa u sekundi). Najčešći uzročnici flikera su sljedeći potrošači: mlinovi za čelik, elektrolučne peći, pilane sa elektromotornim testerama, elektrolučni aparati za zavarivanje itd. Flikeri mogu imati negativan uticaj na neke kategorije potrošača (regulacioni uređaji, računari, televizori) i industrijske procese kao što je elektroliza.

Flikeri se mogu opisati sljedećom relacijom:

$$h(t) = [1 + \alpha \sin(2\pi\beta t)] \sin(\omega_b t), \quad (4.11)$$

za vrijednosti $0.1 < \alpha \leq 0.2$ i $5\text{Hz} \leq \beta \leq 20\text{Hz}$.

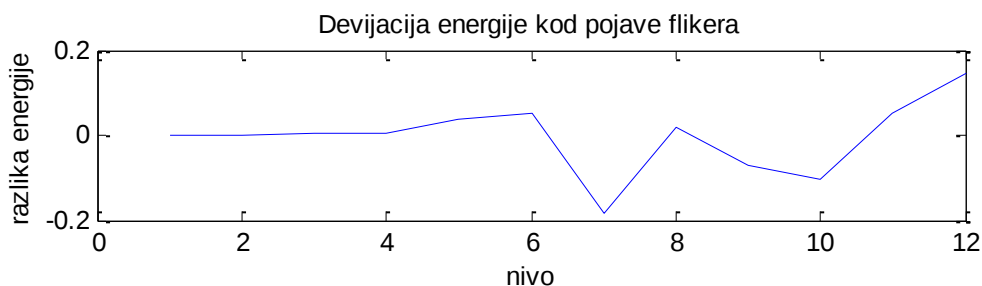
Simulirana je pojava flikera sa parametrima $\alpha = 0.1$ i $\beta = 15$, slika 4.18. Podešavanjem ovih parametara mijenja se intenzitet flikera.



Slika 4.18 – Pojava flikera i primjena WT

Primijenjena je DWT i Haar wavelet [38] sa jednim nivoom razlaganja signala. Detalji signala pri prvom nivou su osjetljivi na visokofrekventne komponente signala i dovoljni su za detekciju ove vrste poremećaja. Flikeri su zastupljeni tokom cijelog trajanja signala od 0.2 s.

Na slici 4.19 je prikazana kriva devijacije energije detalja za signal sa flikerima. Karakteristična kriva devijacije energije detalja pokazuje najmanju vrijednost pri skali sedam.



Slika 4.19 – Kriva ΔE kod pojave flikera

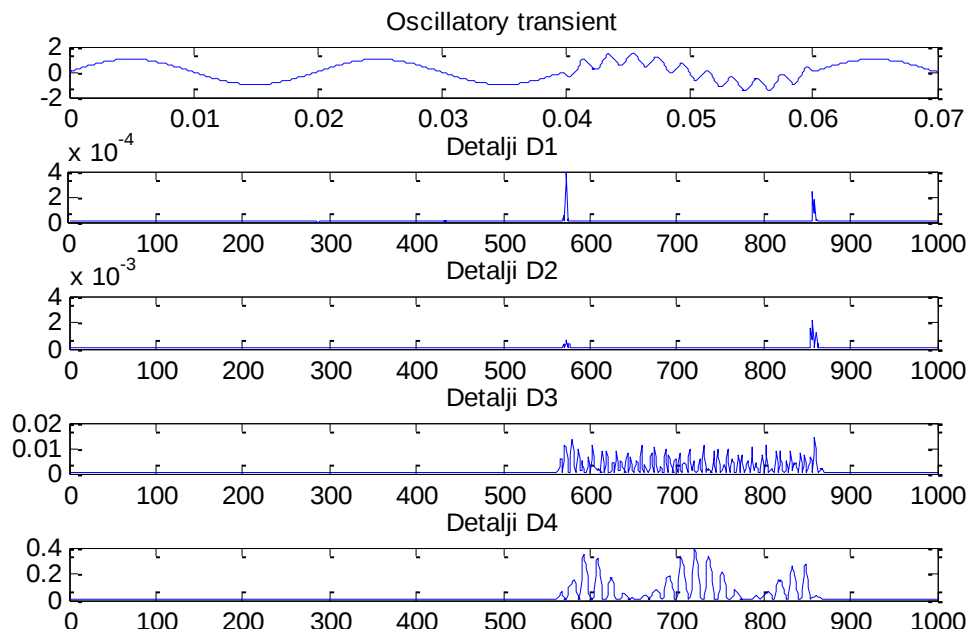
4.2.5 Oscilatorni tranzijenti

Oscilatorni tranzijenti su vrsta prenaponskih tranzijenata koje karakteriše brza promjena stacionarnog stanja talasnih oblika napona (struja). Dvosmjernog su polariteta. Mogu biti niskofrekventni (<500 Hz), srednjefrekventni (500 Hz – 2 kHz) i visokofrekventni (>2 kHz). Nastaju zbog uključivanja i isključivanja kondenzatorskih baterija, prekidača, atmosferskih pražnjenja itd. Posljedice oscilatornih tranzijenata su kvarovi osjetljive električne opreme, pojava šuma, porast napona na mjestu ugradnje kondenzatorskih baterija itd.

Mogu se opisati izrazom:

$$h(t) = \sin(\omega_0 t) + \alpha^{(-(t-t_1)/\tau)(u(t-t_1)-u(t-t_2))} \sin(2\pi f_n t), \quad (4.12)$$

sa parametrima: $0.1 < \alpha \leq 0.8$, $0.5T \leq t_2 - t_1 \leq 3T$, $300\text{Hz} \leq f_n \leq 900\text{Hz}$, $8\text{ms} \leq \tau \leq 40\text{ms}$.



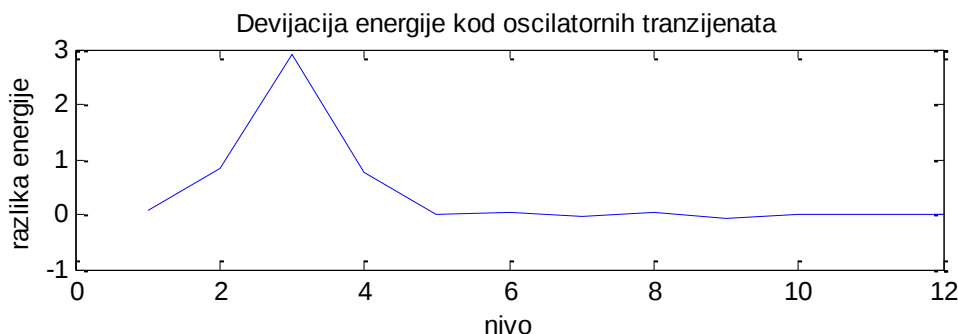
Slika 4.20 – Oscilatorni tranzijenti, primjena WT

Na slici 4.20 je prikazan niskofrekventni oscilatorni tranzijent sa sljedećim parametrima: $\alpha = 0.5$, $f_n = 400$, $\tau = 30$, $t_1 = 2T$, $t_2 = 3T$. Primijenjena je DWT, db4 i četiri nivoa razlaganja. Za analizu oscilatornih tranzijenata potrebno je koristiti wavelet sa dobrom frekventnom rezolucijom, kao što je odabrani mother wavelet db4. Za dobru detekciju ovog poremećaja mogao se koristiti još jedan wavelet iz Daubechie familije, a to je Daubechie 10 (db10).

Tranzijenti su počeli u 0.041 s i trajali su do 0.059 s. Pri nižim skalama je detektovan početak i kraj poremećaja. Veće skale definišu sporije promjene. Što je skala veća, bolja je i detekcija niskofrekventnih komponenti signala. Sva četiri detalja signala su mogla da detektuju

poremećaj, ali nisu dali podatak o kakvom poremećaju je riječ. U tome pomaže kriva energije posmatranog signala upoređena sa krivom energije čistog sinusnog signala napona.

Devijacija energije detalja kod oscilatornih tranzijenata je prikazana na slici 4.21:



Slika 4.21 – Kriva ΔE kod pojave oscilatornih tranzijenata

Kriva devijacije energije detalja kod oscilatornih tranzijenata ima pozitivne vrijednosti u skalama jedan, dva, tri, četiri i pet.

4.2.6 Harmonici

Harmonici su periodična oscilacija koja je prisutna u signalu, a njihova frekvencija je cjelobrojni umnožak osnovne frekvencije signala. Za sistem sa osnovnom frekvencijom od 50 Hz, harmonici su komponente sa sljedećim frekvencijama: 100 Hz (drugi harmonik), 150 Hz (treći harmonik), 200 Hz (četvrti harmonik) itd. Subharmonici su učestanosti ispod 50 Hz. Niskofrekventni harmonici (viši harmonici) imaju učestanost $f_n = n50$ Hz, gdje je $n = 1, 2, 3, \dots$, najčešće $n < 100$, ali je f_n maksimalno 10 kHz. Posledica subharmonika je treperenje svjetlosti [30]. Interharmonici ili asinhroni harmonici imaju učestanosti koje nisu umnožak osnovne, za $f_n < 10$ kHz. Visokofrekventni harmonici imaju učestanost iznad 10 kHz. Izvori harmonika su obično ispravljači, elektrolučne peći, rotacione električne mašine, zasićeni transformatori itd. Harmonici mogu dovesti do kvarova na kondenzatorskim baterijama, povećanja gubitaka električnih mašina, prenapona, grešaka u očitavanju indukcionih brojlara, interferencije sa telekomunikacionim sistemima itd.

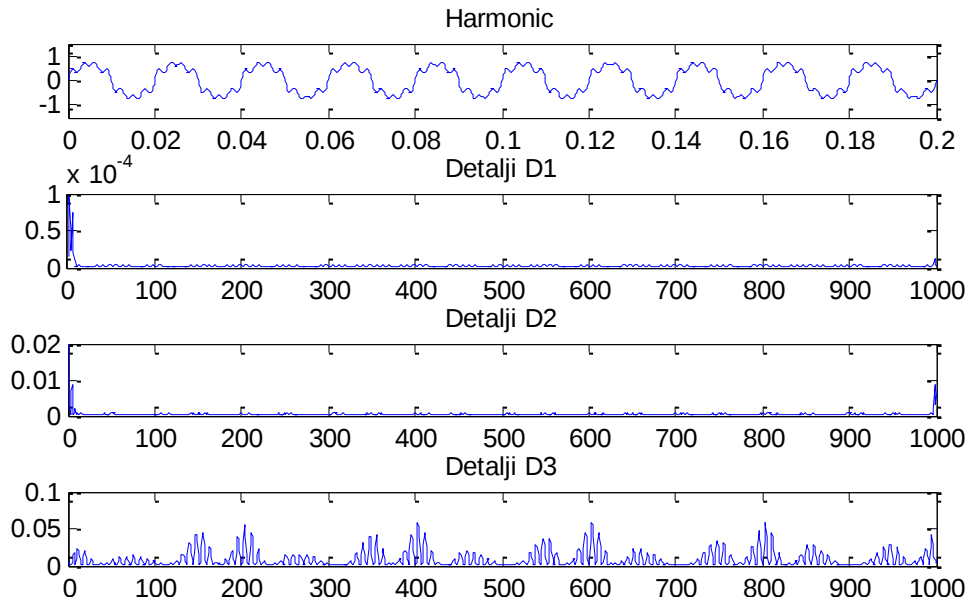
Harmonici su predstavljeni sljedećim izrazom:

$$h(t) = \alpha_1 \sin(\omega_b t) + \alpha_3 \sin(3\omega_b t) + \alpha_5 \sin(5\omega_b t) + \alpha_7 \sin(7\omega_b t) . \quad (4.13)$$

Parametri u relaciji (4.13) su definisani kao: $0.05 \leq \alpha_3, \alpha_5, \alpha_7 \leq 0.15$, $\sum (a_i)^2 = 1$.

Za grafičko predstavljanje signala napona koji sadrži harmonike, slika 4.22, odabrani su sljedeći parametri: $\alpha_1 = 0.7$, $\alpha_3 = 0.05$, $\alpha_5 = 0.1$, $\alpha_7 = 0.15$. Primijenjena je DWT i db6 sa tri skale.

Pri skalama jedan i dva harmonici su slabo registrovani, jer su vrijednosti SWTC male. Kod skale tri dolazi do naglog skoka vrijednosti SWTC, kada dostižu maksimalnu vrijednost od 0.05. Harmonici su spora i kontinuirana pojava pa se zbog toga detektuju na višim skalama.

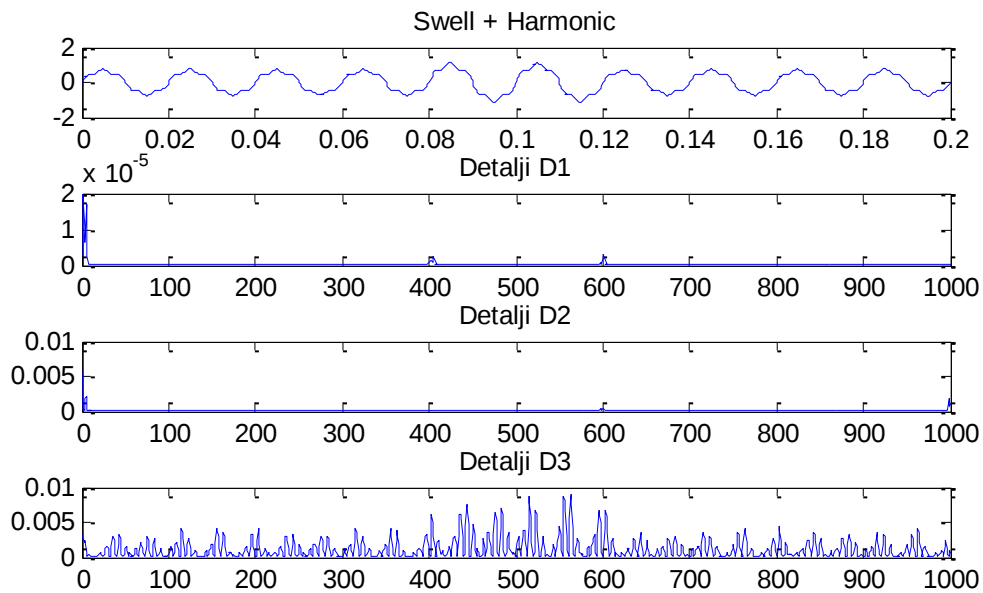


Slika 4.22 – Pojava harmonika i razlaganje signala na četiri nivoa

Poseban slučaj je pojava porasta napona i harmonika (slika 4.23), a opisana je pomoću relacije:

$$h(t) = [1 + \alpha \times (u(t - t_1) - u(t - t_2))] \times [\alpha_1 \sin(\omega_b t) + \alpha_3 \sin(3\omega_b t) + \alpha_5 \sin(5\omega_b t)], \quad (4.14)$$

pri parametrima: $0.1 \leq \alpha \leq 0.8$, $T \leq t_2 - t_1 \leq 9T$, $0.05 \leq \alpha_3, \alpha_5 \leq 0.15$, $\sum (a_i)^2 = 1$.



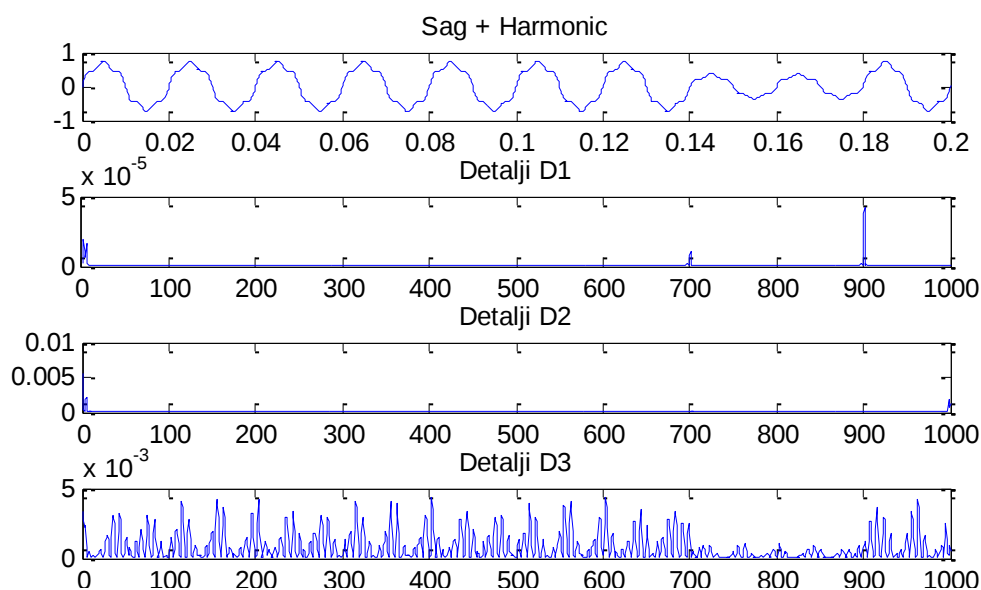
Slika 4.23 – Pojava harmonika i porasta napona, primjena WT

Drugi posebni slučaj harmonika je pojava propada napona i harmonika (slika 4.24), a opisan je pomoću sljedeće relacije:

$$h(t) = [1 - \alpha \times (u(t - t_1) - u(t - t_2))] \times [\alpha_1 \sin(\omega_b t) + \alpha_3 \sin(3\omega_b t) + \alpha_5 \sin(5\omega_b t)], \quad (4.15)$$

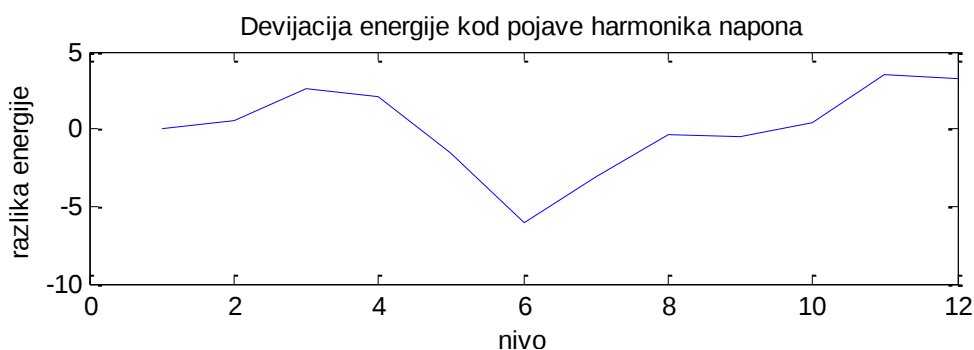
sa parametrima: $0.1 \leq \alpha \leq 0.8$, $T \leq t_2 - t_1 \leq 9T$, $0.05 \leq \alpha_3, \alpha_5 \leq 0.15$, $\sum (a_i)^2 = 1$.

U oba slučaja pojave harmonika sa propadom ili porastom napona, DWT je omogućila detekciju propada/porasta napona pri prvoj skali. To se dogodilo jer su u pitanju brzi poremećaji sa komponentama visoke frekvencije.



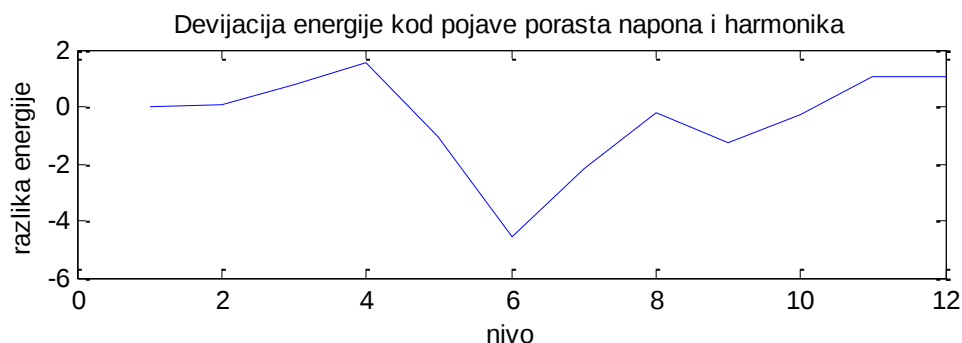
Slika 4.24 – Pojava harmonika i propada napona, primjena WT

Harmonici su kao i u slučaju sa slike 4.22 detektovani na većim skalama. Drugi nivo razlaganja gotovo da i nije detektovao prisustvo harmonika. Treći nivo bilježi velike varijacije u amplitudi SWTC. Ovo upućuje na to da amplituda signala sa harmonicima varira samo u opsegu niskih frekvencija. Kriva devijacije energije detalja signala pri pojavi harmonika je prikazana na slici 4.25. Najveće pozitivne vrijednosti ΔE su prisutne pri skalama tri, četiri, jedanaest i dvanaest. Pri skali šest se bilježi najmanja vrijednost ΔE .



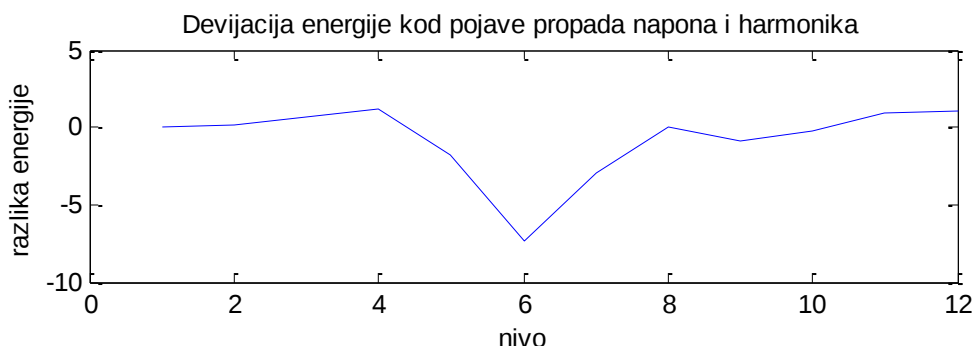
Slika 4.25 – Kriva ΔE pri pojavi harmonika

Karakteristične krive devijacije energije detalja za slučaj pojave harmonika i porasta/propada napona su prikazane redom na slikama 4.26 i 4.27. Ove dvije krive imaju sličan oblik.



Slika 4.26 – Kriva ΔE pri pojavi harmonika i porasta napona

U slučaju pojave propada napona i harmonika, negativne vrijednosti ΔE pri skali šest su više izražene nego u slučaju porasta napona i harmonika.



Slika 4.27 – Kriva ΔE pri pojavi harmonika i propada napona

4.2.7 Zarezi (usjeci)

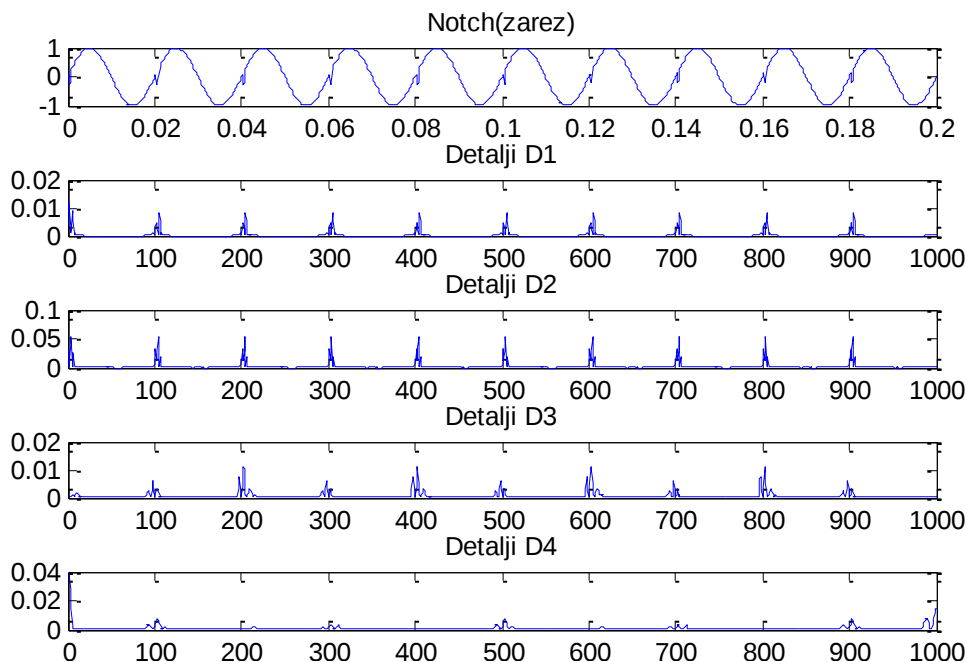
Zarezi (*eng. notches, dropouts*) predstavljaju poremećaje kvaliteta električne energije koji nastaju usljed normalnog rada komponenti energetske elektronike (npr. ispravljača) prilikom komutacije struje iz jedne u drugu fazu. Pojava zarez u naponu se smatra netipičnim slučajem poremećaja kvaliteta električne energije koji se nalazi između harmonika i tranzijenata, zbog toga što se javljaju u stanju normalnog rada uređaja energetske elektronike. Zarezi u naponu utiču loše na izolaciju transformatora, generatora, osjetljivu opremu za mjerenje, dovode do kvarova opreme itd.

Pojavu zarez u talasnom obliku napona opisuje relacija:

$$h(t) = \sin(\omega_b t) - \text{sign}(\sin(\omega_b t)) \times \left\{ \sum_{n=0}^9 k \times [u(t - (t_1 + 0.02n)) - u(t - (t_2 + 0.02n))] \right\}, \quad (4.16)$$

sa sljedećim parametarima: $0.1 \leq k \leq 0.4$, $0 \leq t_1, t_2 \leq 0.5T$ i $0.01T \leq t_2 - t_1 \leq 0.05T$.

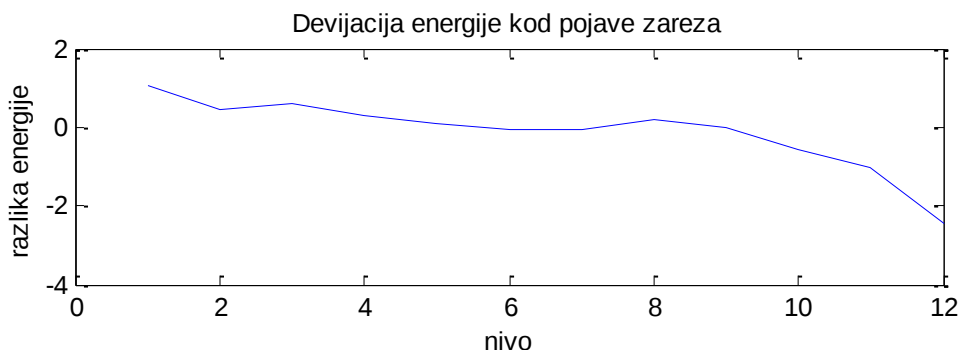
Na slici 4.28 je prikazana pojava periodičnih zarezâ u talasnom obliku napona, sa parametrom $k = 0.4$. Primijenjena je DWT, pri čemu je kao osnovni wavelet odabran db4.



Slika 4.28 – Pojava periodičnih zarezâ u naponu i primjena DWT

Pri prvom nivou dekompozicije signala odmah je registrovana pojava zarezâ u signalu napona. Oni su predstavljeni u vidu oštarih šiljaka kratkog trajanja. U pitanju su brze promjene u signalu sa komponentama visoke frekvencije (1250-2500 Hz). Pri drugom nivou, promjene u signal su i dalje prikazane u vidu oštarih kratkotrajnih šiljaka većeg intenziteta. Kod treće skale polako opadaju, a kod četvrte su slabo uočljivi. Pri četvrtoj skali opseg frekvencije je najniži i kreće se od 156.25 do 312.5 Hz. To govori da je u pitanju promjena u talasnom obliku napona koja sadrži malo komponenti niske frekvencije.

Na slici 4.29 je prikazana kriva devijacije energije pri pojavi zarezâ u talasnom obliku napona. Vrijednost ΔE bilježi rast u skalama tri i osam, nakon čega bilježi pad do skale dvanaest.



Slika 4.29 – Kriva ΔE pri pojavi zarezâ u naponu

4.2.8 Impulsi (šiljci)

Tranzijentni prenaponi ili impulsni prenaponi su brze visokofrekventne naponske promjene. Traju od par mikrosekundi do par milisekundi. Njihova energija varira i zavisi od konkretnog uzroka. Jedan od čestih uzročnika tranzijenata je uključivanje kondenzatora za popravku faktora snage u napojnom vodu. Atmosferska pražnjenja, kratki spojevi, kao i isključenja velikih potrošača sa mreže mogu dovesti do pojave impulsa u talasnom obliku napona. Na pojavu impulsa je osjetljiva izolacija transformatora i motora, pojedine elektronske komponente kod kojih može doći do gubitka podataka itd.

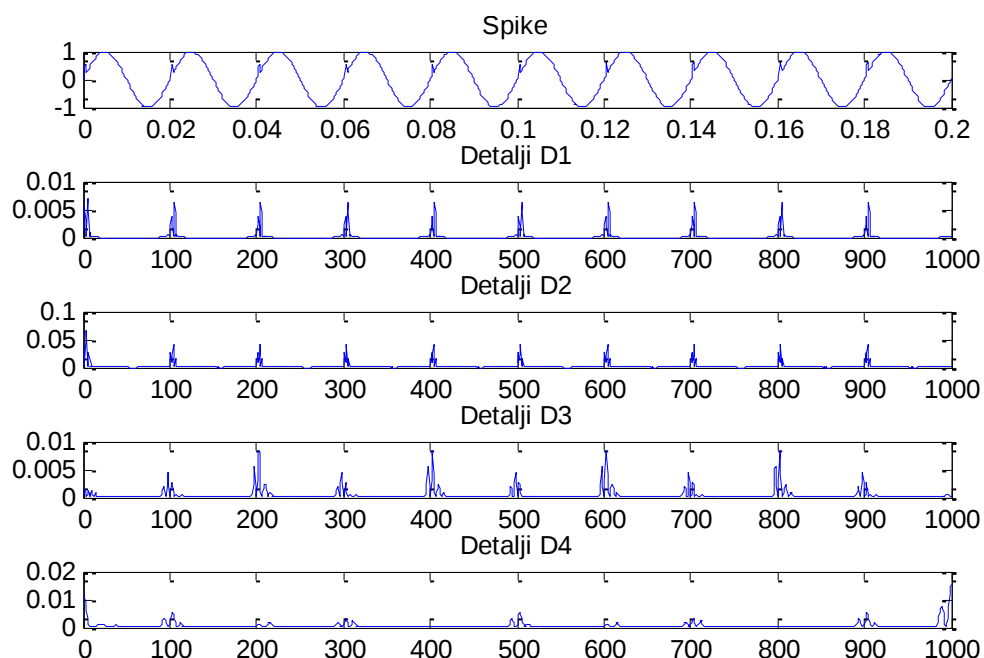
Periodični impulsi su kratkotrajni poremećaji u svakoj poluperiodi talasa napona koji traju kraće od 0.01 s. Usljed kratkog trajanja, njihove harmonijske komponente su obično vrlo visoke učestanosti, reda veličine MHz. Njihovi izvori su obično komutacioni uređaji energetske elektronike.

Pojavu periodičnih impulsa u talasnom obliku napona opisuje relacija:

$$h(t) = \sin(\omega_b t) + \text{sign}(\sin(\omega_b t)) \times \left\{ \sum_{n=0}^9 k \times [u(t - (t_1 + 0.02n)) - u(t - (t_2 + 0.02n))] \right\}, \quad (4.17)$$

sa parametrima k, t_1, t_2 definisanim na sljedeći način: $0.1 \leq k \leq 0.4$, $0 \leq t_1, t_2 \leq 0.5T$ i $0.01T \leq t_2 - t_1 \leq 0.05T$.

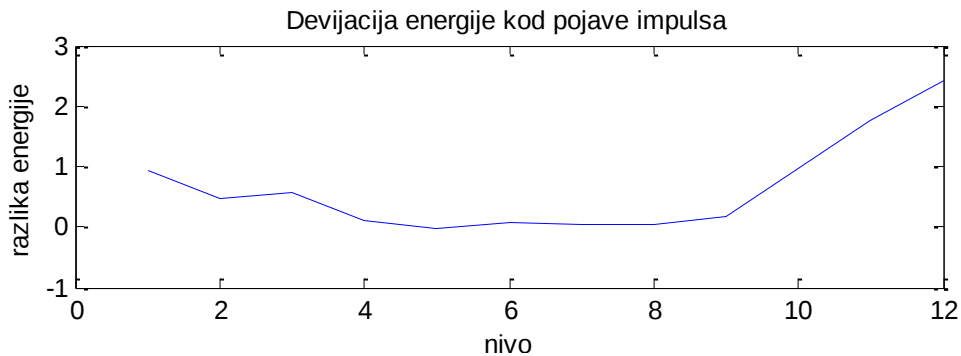
Na slici 4.30 je predstavljena pojava periodičnih impulsa u naponu (za $k = 0.35$).



Slika 4.30 – Pojava periodičnih impulsa u naponu i primjena DWT

Kao osnovni wavelet primijenjen je db4 i izvršena su četiri nivoa razlaganja signala. Poremećaj je detektovan pri skali jedan, a visoki šiljci koji su dominantni pri skalama jedan,

dva i tri upućuju na to da signal sadrži komponente visoke frekvencije. Broj šiljaka koji se nalaze u detaljima signala je jednak broju impulsa. Impulsi se javljaju u svakoj periodi talasnog oblika napona.



Slika 4.31 – Kriva ΔE pri pojavi impulsa u naponu

Na slici 4.31 je prikazana kriva energije ΔE kod pojave impulsa u signalu napona. Vrijednost ΔE bilježi rast u skali tri, kao i od skale devet do skale dvanaest.

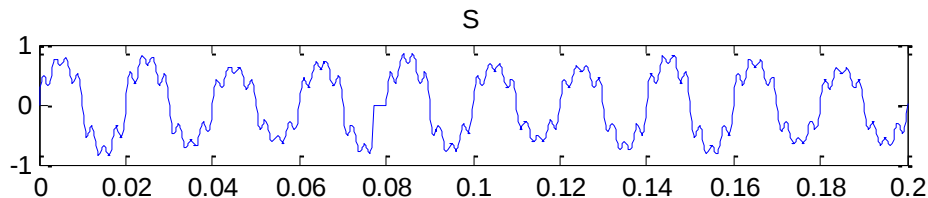
4.2.9 Primjena kontinualne wavelet transformacije na signal napona

Posmatra se proizvoljno odabran signal napona koji sadrži harmonike i flikere [39] kao i jedan prekid u napajanju. Matematički izraz za ovaj signal može se predstaviti u sljedećem obliku:

$$S = [1 - \alpha(u(t - t_1) - u(t - t_2))] \times (1 + \alpha_f \sin(2\pi\beta t)) \times [\alpha_1 \sin(\omega_b t) + \alpha_3 \sin(3\omega_b t) + \alpha_5 \sin(5\omega_b t) + \alpha_7 \sin(7\omega_b t)] \quad (4.18)$$

gdje je: $\omega_b = 2\pi f$, $f = 50\text{Hz}$, $0.1 \leq \alpha_f \leq 0.2$, $0.9 < \alpha \leq 1$, $5\text{Hz} \leq \beta \leq 20\text{Hz}$, $T \leq t_2 - t_1 \leq 9T$

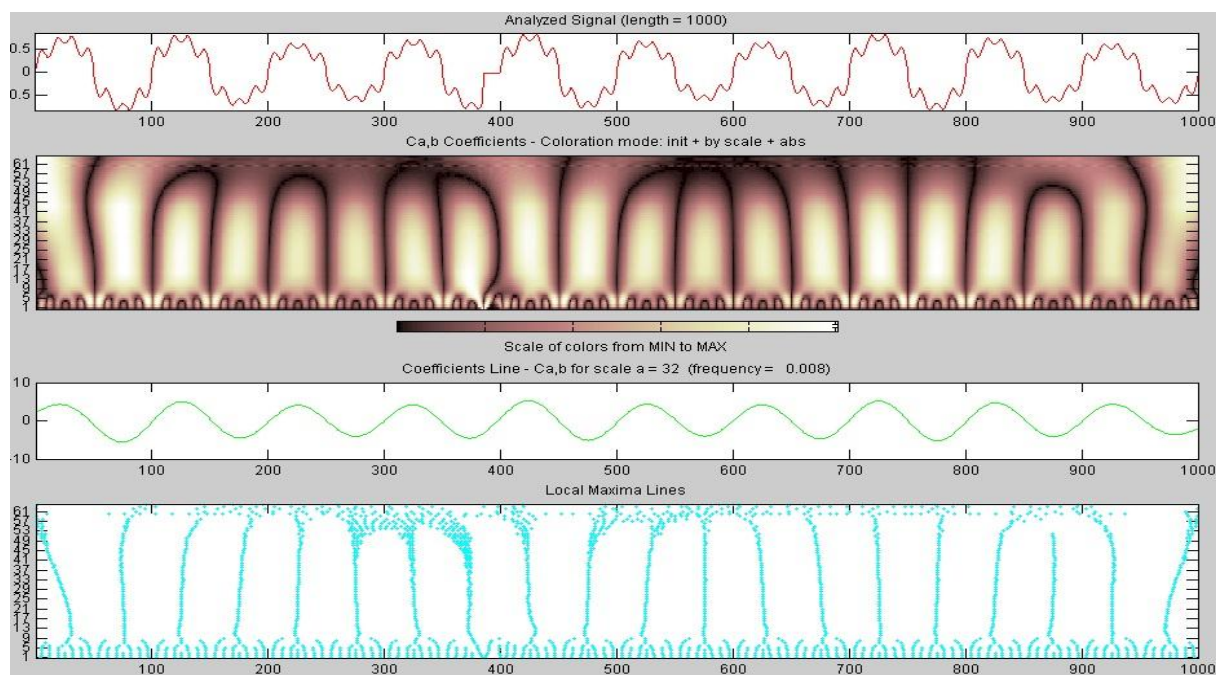
$$0.05 \leq \alpha_3, \alpha_5, \alpha_7 \leq 0.15, \sum (a_i)^2 = 1.$$



Slika 4.32 – Proizvoljno odabran signal S

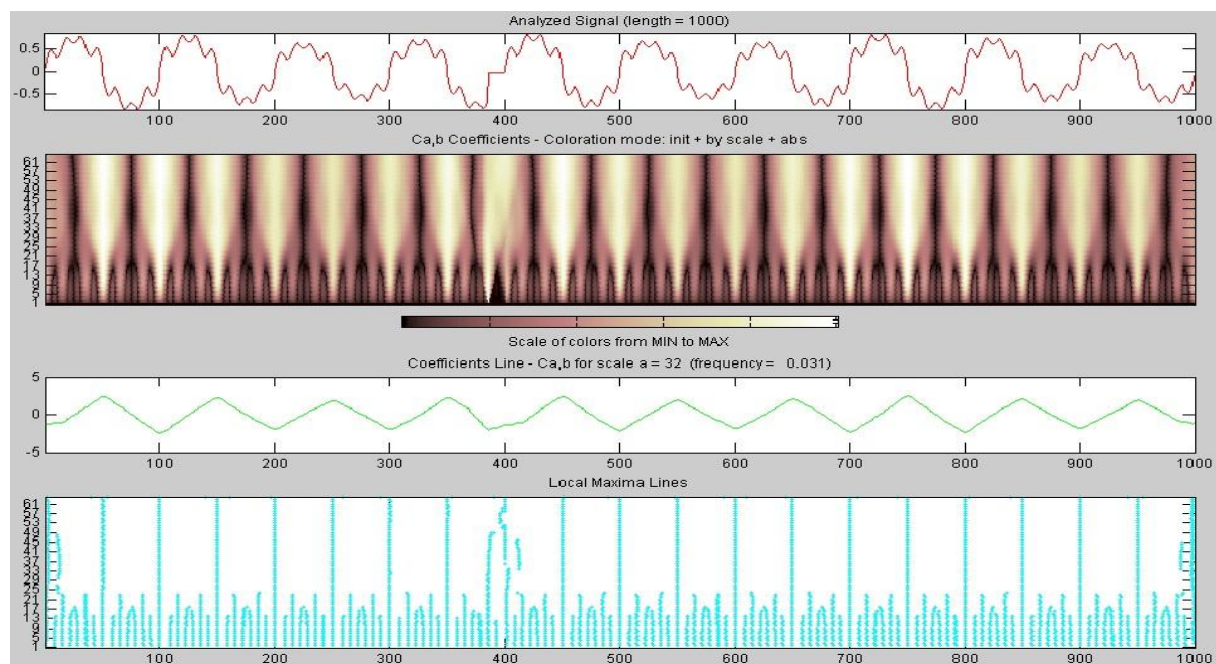
Na ovom primjeru će biti objašnjena primjena CWT i njene sposobnosti analize signala sa poremećajima. Koristiće se različite vrste osnovnog wavelet-a, da bi se na osnovu dobijenih rezultata odabrala najbolja osnovna funkcija. U primjeru na slici 4.33 prikazana je primjena CWT i Mexican Hat wavelet-a. Na slici 4.34 je primijenjen Daubechies 1 (db1 ili Haar wavelet)

wavelet, na slici 4.35 db2, na slici 4.36 db6, dok je na slici 4.37 primijenjen Daubechie 12 (db12) wavelet.



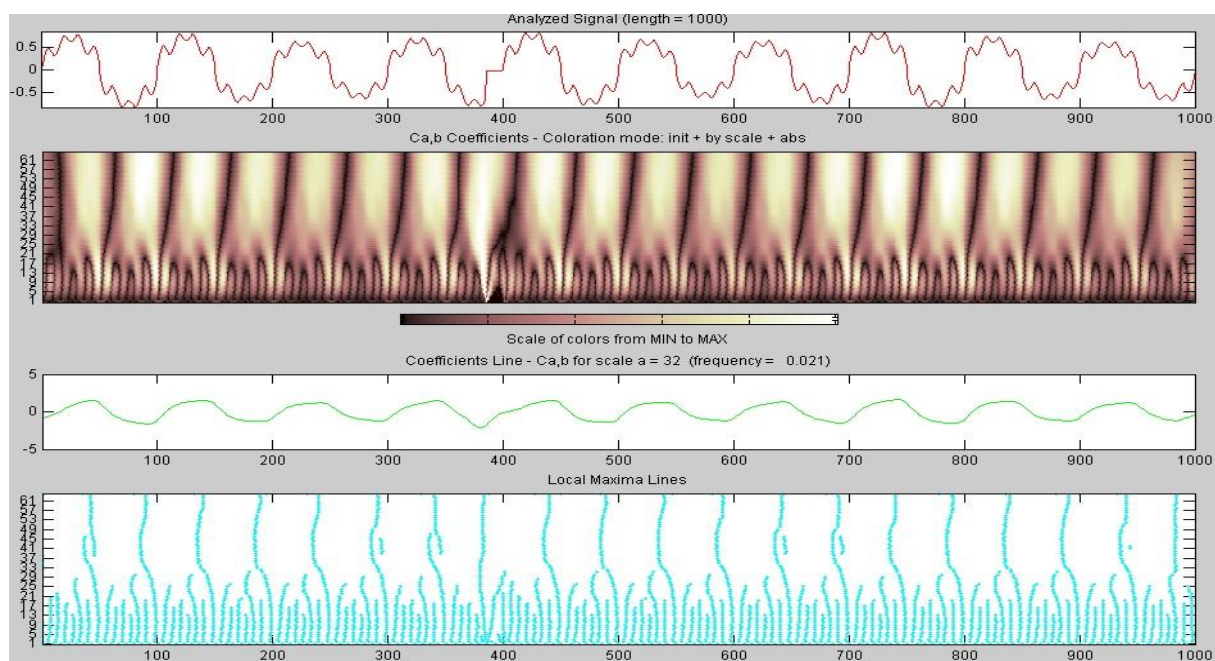
Slika 4.33 – Analiza signala S pomoću CWT i Mexican Hat wavelet-a

Dobija se prikaz signala S , koeficijenta, linija koeficijenta pri skali $a=32$ i slika linija lokalnog maksimuma (prikazuju povezivanje koeficijenta lokalnog maksimuma preko skala (od 64 do 1)).

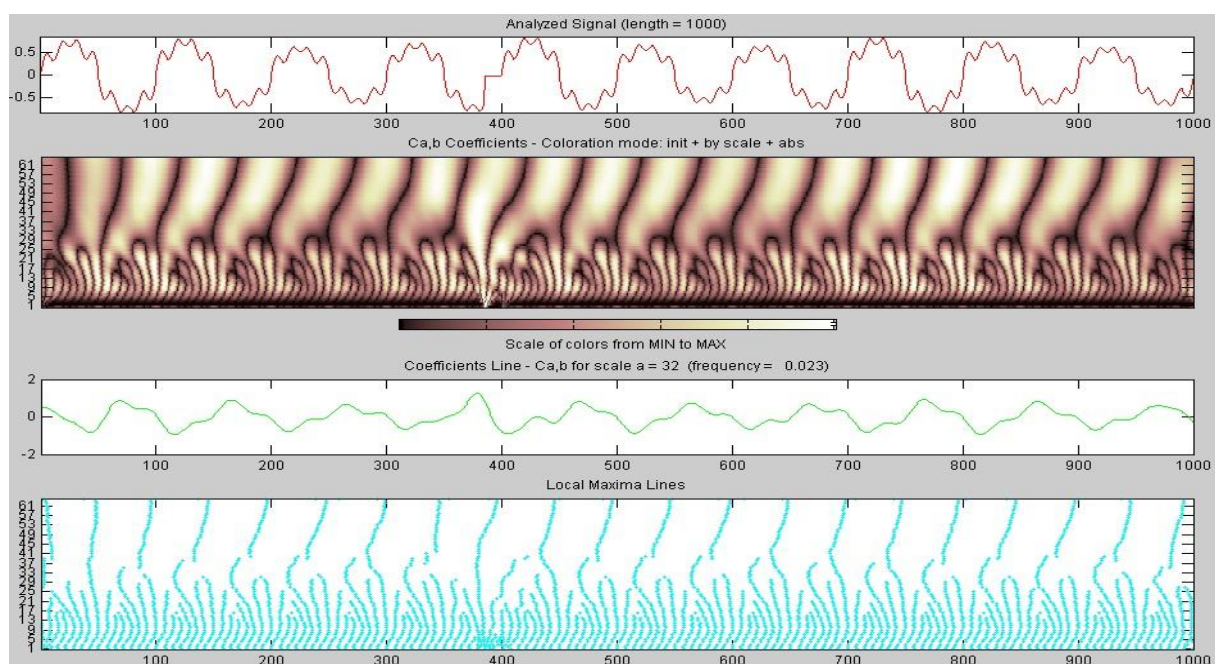


Slika 4.34 – Analiza signala S pomoću CWT i Haar wavelet-a

Odabir Haar wavelet-a se pokazao kao dobar, zbog približno simetričnog oblika u odnosu na vertikalnu osu, zbog čega se i preporučuje u slučaju signala koji sadrži flikere [38].



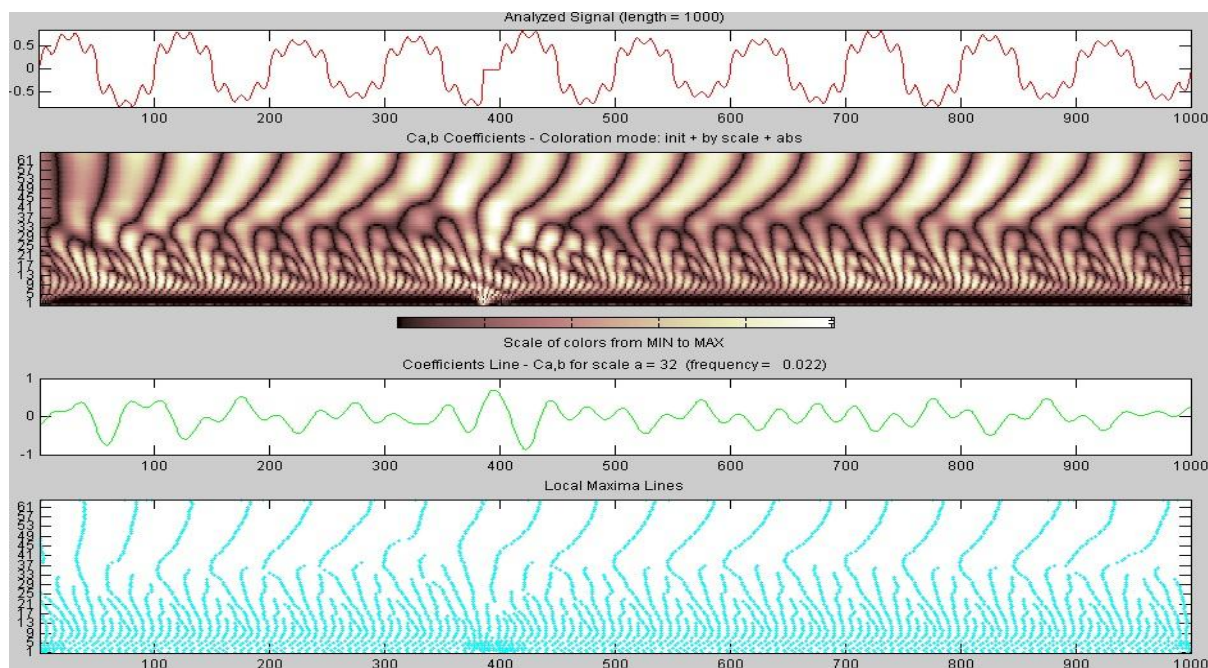
Slika 4.35 – Analiza signala S pomoću CWT i db2 wavelet-a



Slika 4.36 – Analiza signala S pomoću CWT i db6 wavelet-a

Primjena Mexican Hat wavelet-a kao osnovnog nije dobar izbor u ovom slučaju, jer ne omogućava detekciju poremećaja. Wavelet-i tipa db2, db6 i db12 omogućavaju identifikaciju poremećaja ali ne dovoljno precizno.

Prilikom upotrebe Daubechie wavelet-a sa većim brojem koeficijenata (db6, db12) poremećaji u signalu se mogu manje uspješno detektovati.



Slika 4.37 – Analiza signala S pomoću CWT i db12 wavelet-a

U blizini nagle promjene signala CWT koeficijenti dobijaju veliku apsolutnu vrijednost i raspoređeni su oko mjesta sa diskontinuitetima. Trenuci prekida jasno utiču na CWT koeficijente pri svim skalama. U donjem dijelu grafika vrijeme-skala odabrani wavelet-i su suženi i ne pokazuju mnogo sličnosti sa posmatranim signalom na šta ukazuje tamnija boja na grafiku. Što je veća skala wavelet-i su translirani i skalirani pa je prisutna veća sličnost sa posmatranim signalom. Dijelovi grafika označeni svetlijom bojom ukazuju na promjene u signalu odnosno poremećaje. Obzirom na to da CWT može da se primjeni pri bilo kojoj skali (u primjerima je bilo odabrano 64), počevši od minimalne do maksimalno dozvoljene, gore navedeni primjeri podrazumijevaju veliki broj operacija i proračuna. Sve to dovodi do velikog broja podataka, pa je preporučljivo izvršiti diskretizaciju parametara transliranja i skaliranja. To dovodi do upotrebe DWT.

U sljedećem primjeru biće primijenjena DWT na signal (4.18) sa db1 i četiri nivoa dekompozicije. Upotrebljeni su SWTC. Oni su vrlo korisni za analizu jer predstavljaju kvadrirane WTC, pa su svi koeficijenti u pozitivnom dijelu ose Oy . Ovi koeficijenti su jedinstveni za svaki tip poremećaja i po nekim autorima [11] mogu nesumnjivo da vode do šeme za automatsku klasifikaciju raznih vrsta poremećaja. Trajanje signala je 0.2 sekunde, tokom kojih je uzeto 1000 uzoraka, pa učestanost odabiranja f_s iznosi 5000 Hz. U tabeli 4.3 su predstavljeni frekvencijski opsezi za detalje signala nakon primjene DWT i kreću se od $f_s/2^{n+1}$ do $f_s/2^n$, gdje je n nivo dekompozicije.

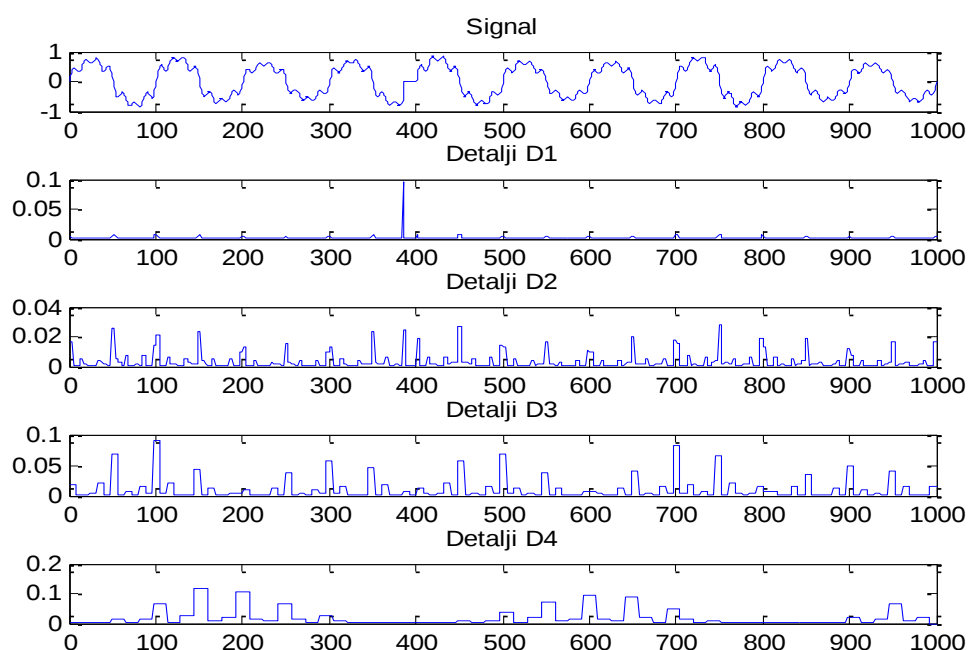
Tabela 4.3 – Frekvencijski opsezi detalja signala

Koeficijenti detalja	Frekvencijski opseg (Hz)
D1	1250 – 2500
D2	625 – 1250
D3	312.5 – 625
D4	156.25 - 312.5

Prvi nivo dekompozicije obuhvata najveći frekvencijski opseg (1250 – 2500 Hz) i on će trenutno da detektuje brze poremećaje. Sljedeći nivoi imaju manji frekvencijski opseg i detektuju poremećaje sa niskofrekventnim komponentama.

Na prvom nivou razlaganja jedan poremećaj je detektovan i predstavljen kao koeficijent značajno veće vrijednosti od ostalih (0.09588). On predstavlja prekid u napajanju. Ostali koeficijenti sa njegove lijeve i desne strane su mnogo manjih vrijednosti (reda 0.006). To znači da je prvi nivo razlaganja dao najveći značaj prekidu napajanja i registrovao je pojavu flikera kao i harmonika, ali u znatno manjoj mjeri. Detalji signala pri skali jedan D_1 su dovoljni za precizno određivanje vremena kada se prekid u napajanju dogodio. Prekid je počeo u 0.0766 sekundi i trajao do 0.0798 s. Trajao je približno 0.0032 s.

Pri skali jedan, wavelet za analiziranje je lokalizovan, pa će se registrovati poremećaji koji se najbrže mijenjaju ili su najveći [11]. Veći nivoi dekompozicije omogućavaju uvid u dodatne podatke neophodne za klasifikaciju poremećaja [40].



Slika 4.38 – Analiza signala S pomoću SWTC i Haar wavelet-a sa četiri skale

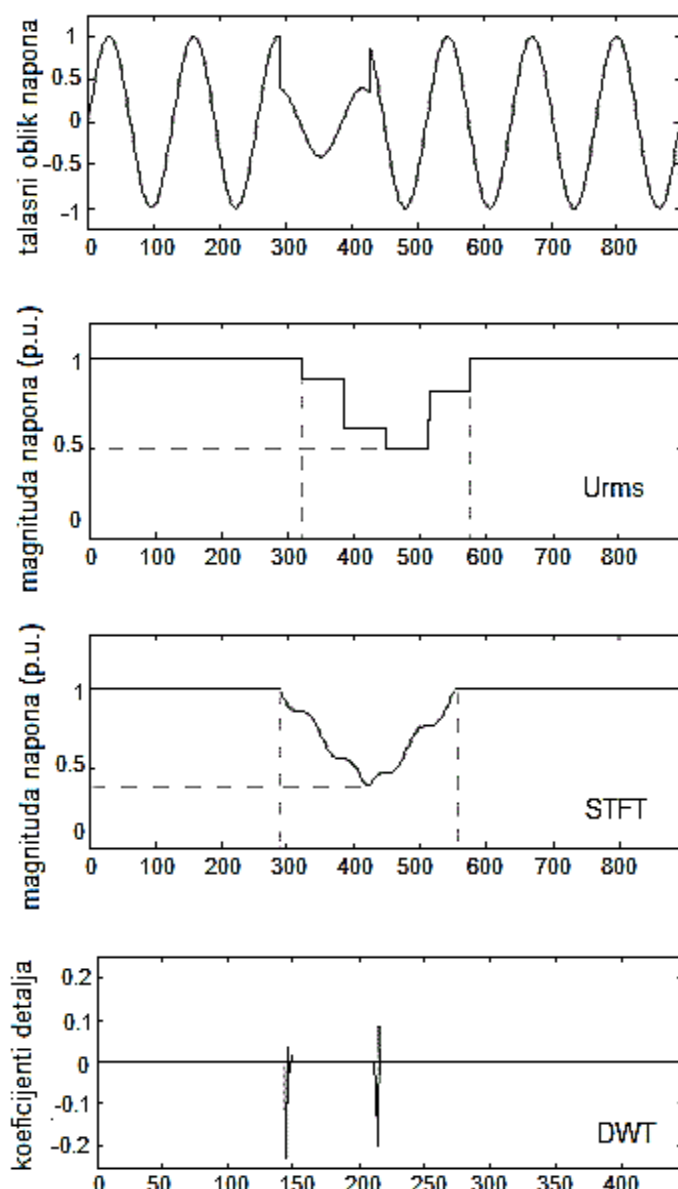
U drugom i trećem nivou razlaganja signala, vrijednosti koeficijenta koji ukazuju na prekid u napajanju i flikere se smanjuju, dok vrijednosti koeficijenta koji ukazuju na harmonike rastu.

Ovo je zbog toga što amplituda signala napona koji sadrži flikere i prekide ima fluktuacije samo u opsegu visokih frekvencija. Pri skali dva koeficijenti koji ukazuju na flikere su najveći, a sa porastom skale rastu oni koji ukazuju na harmonike. Pri skali četiri prekid gotovo da i nije zabilježen. Veće skale su zabilježile spore poremećaje (niske frekvencije). Važno je napomenuti da svaki pik SWTC odgovara nekom poremećaju.

5. ANALIZA PROPADA NAPONA POMOĆU WAVELET TRANSFORMACIJE

U ovom poglavlju je predstavljena analiza signala propada napona simuliranih u MATLAB programskom jeziku primjenom WT.

Na početku je potrebno objasniti zašto je za analizu propada napona odabrana upravo WT. Da bi se opravdala njena upotreba, na jednom primjeru će biti analizirani propadi napona primjenom WT i dvije najčešće korišćene metode u analizi propada napona: Furijeove transformacije i RMS metode.



Slika 5.1 – Simulirani propad napona i primjena RMS, STFT i DWT [41]

Simulira se jedan propad napona na kom će biti primijenjene sve tri opisane metode u cilju detekcije i analize poremećaja. Posmatraće se kako svaka od pomenutih metoda detektuje promjene u signalu, određuje magnitudu poremećaja i njegovu dužinu trajanja.

Propad napona iznosi $60\%u_n$, traje 21.25 ms, a frekvencija talasnog oblika signala napona iznosi 50Hz. Rezultati su prikazani na slici 5.1.

Uočava se da se najslabiji rezultati u pogledu estimacije magnitude i dužine trajanja poremećaja dobijaju primjenom RMS metode ($\approx 50\%u_n$, 40 ms). Ona je detektovala propad, ali ne i njegovo tačno trajanje i magnitudu. Bolje rezultati se postižu primjenom STFT metode (magnituda $60\%u_n$, trajanje poremećaja ≈ 37 ms). Ona je detektovala tačno magnitudu poremećaja ali ne i njegovo trajanje.

Najtačniji u detekciji, procjeni magnitude i dužine trajanja poremećaja je bio DWT metod (magnituda $60\%u_n$, trajanje poremećaja ≈ 21 ms), što ga čini optimalnim za ovu vrstu poremećaja.

WT se pokazala kao najpreciznija i najbrža metoda u detekciji propada napona.

5.1 Analiza energije detalja signala propada napona

Da bi se poremećaj u talasnom obliku napona ispravno klasifikovao kao propad napona, potrebno je posmatrati energiju detalja signala.

Kao što je ranije opisano u poglavlju 4, energija signala $f(t)$ se može predstaviti relacijom (4.2). Jednačina (4.3) prikazuje vezu između energije signala $f(t)$, energije aproksimacija i energije detalja signala.

Relacija koja opisuje vezu između energije signala i snage svake komponente i koeficijenata wavelet transformacije je oblika (4.4).

Propadi napona simulirani u MATLAB programskom paketu će biti podijeljeni u dvije grupe. Prva grupa neće sadržati šum, a druga grupa će sadržati aditivni bijeli Gausov šum, definisan tako da je odnos signala i šuma $SNR=30dB$. Biće uzeti u obzir propadi napona različitog intenziteta i trajanja.

U tabeli 5.1 je dat pregled simuliranih signala propada napona i njihove karakteristike.

Tabela 5.1 – *Simulirani signali*

	Učestanost odabiranja	Broj signala
Propadi napona bez prisustva šuma	$f = 5kHz$	10
Propadi napona sa prisustvom šuma		8

Učestanost odabiranja signala će iznositi 5 kHz, pa je optimalan broj skala 12. Osnovni wavelet za primjenu DWT i računanje energije detalja u ovim primjerima je db4.

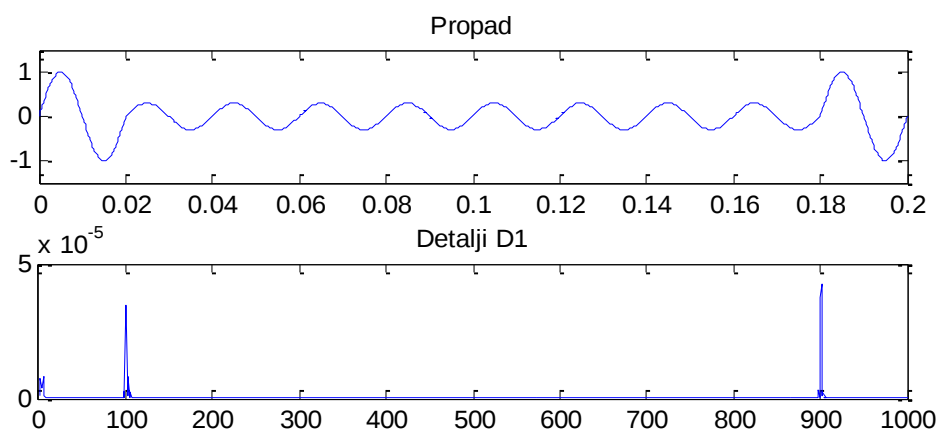
Da bi se smanjio veliki broj podataka dobijenih tokom simulacija, potrebno je izdvojiti dijelove signala kada se javljaju propadi napona. To se može postići primjenom DWT i kvadriranih wavelet koeficijenata. Početak poremećaja i njegov kraj su uočljivi zahvaljujući SWTC koji su osjetljivi na poremećaje. Početak i kraj poremećaja se može utvrditi već pri skali jedan.

Na slici 5.2 je prikazan jedan od simuliranih propada napona iz prve grupe. Tokom poremećaja napon je iznosio $30\%u_n$. Na simulirani signal je primijenjena DWT. Signal je razložen pri skali jedan i prikazani su detalji signala D_1 .

Glavnu informaciju o pojavi poremećaja daju detalji signala pri skali 1. Potrebno je detektovati prvi koeficijent (pik) čija vrijednost prelazi prag $T = 2.1378 \cdot 10^{-6}$. Prag T je određen na osnovu relacije (4.1). Trenutak u kom se on javlja predstavlja početak poremećaja t_1 . Tokom poremećaja vrijednost koeficijenata je manja od praga. Kraj poremećaja predstavlja trenutak u kom se javlja koeficijent veći od praga i obilježava se sa t_2 . Oduzimanjem dvije zabilježene vrijednosti dobija se vrijeme trajanja poremećaja:

$$\Delta t = t_2 - t_1 \quad (5.1)$$

Posmatrani poremećaj je trajao 0.16 s. Ovo znači da on može predstavljati trenutni propad napona s obzirom na vrijeme trajanja.

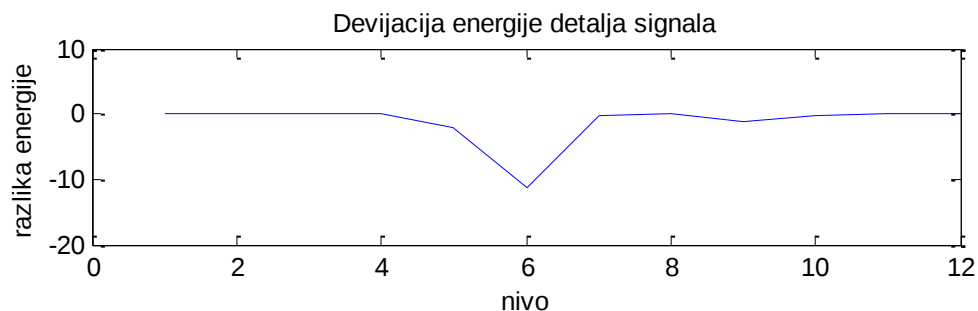


Slika 5.2 – Detekcija propada napona

SWTC ne mogu dati više informacija o tome koji je poremećaj zabilježen. Oni su omogućili da se poremećaj detektuje i lokalizuje u vremenu. Vrsta poremećaja će se dalje utvrditi pomoću devijacije energije detalja, primjenom relacije (4.4). Nakon završenog prvog koraka u kom je propad detektovan, računa se energija detalja signala za svaku skalu pojedinačno. Dobijene vrijednosti se koriste za dobijanje devijacije energije detalja ΔE (slika 5.3), kao što je to opisano u poglavlju 4.

Kod posmatranog poremećaja vrijednosti ΔE pri skalama jedan, dva, tri i četiri su bliske nuli. Devijacija energije detalja ima negativnu vrijednost u skalama pet i šest, gdje dostiže

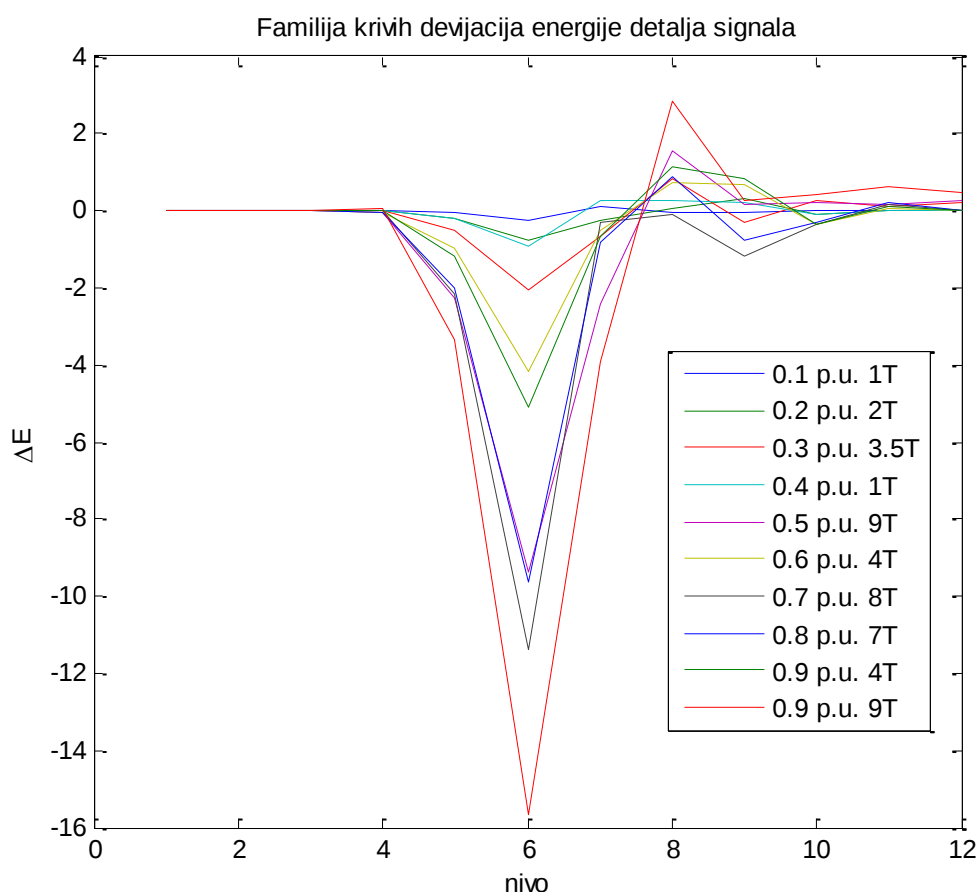
najmanju vrijednost od -11.384. Nakon toga vrijednost ΔE u preostalim skalama raste i bliska je nuli.



Slika 5.3 – Devijacija energije detalja posmatranog poremećaja

Devijacija energije detalja omogućava prepoznavanje propada napona, bez obzira na to kada se on javlja i kakvog je intenziteta.

Na slici 5.4 su prikazane krive devijacije energije detalja talasnih oblika koji predstavljaju propade napona bez šuma. Legenda na slici opisuje simulirane propade napona, njihov intenzitet i broj perioda obuhvaćenih poremećajem.



Slika 5.4 – Familija krivih devijacije energije detalja propada napona

Svi zabilježeni propadi napona imaju sličan trend krive ΔE . Na osnovu simuliranih signala uočava se da propadi napona većeg intenziteta $(10 - 40\%)u_n$ imaju najmanju vrijednost $|\Delta E|$ u skali šest. Kod propada napona od $90\%u_n$ koji traje 9 perioda signala, zabilježena je najveća vrijednost $|\Delta E|$ u skalama šest i osam.

Magnituda i vrijeme trajanja propada napona mogu dati informacije o kvaru koji ih je uzrokovao. Ako magnituda propada napona iznosi do $20\%u_n$, znači da se kvar koji ga je uzrokovao dogodio blizu mjesta mjerenja. Ako je vrijeme trajanja propada napona manje od četiri ciklusa, najvjerovatnije se radi o kvaru u prenosnoj mreži [42].

U tabeli 5.2 su prikazane vrijednosti devijacije energije kod 10 zabilješanih propada napona. Sa ΔE_1 je označena devijacija energije detalja pri skali jedan, sa ΔE_2 je označena devijacija energije detalja pri skali dva, i tako redom do skale dvanaest. Predstavljene su minimalne i maksimalne zabilježene vrijednosti za ΔE pri svakoj skali, kao i prosječne vrijednosti.

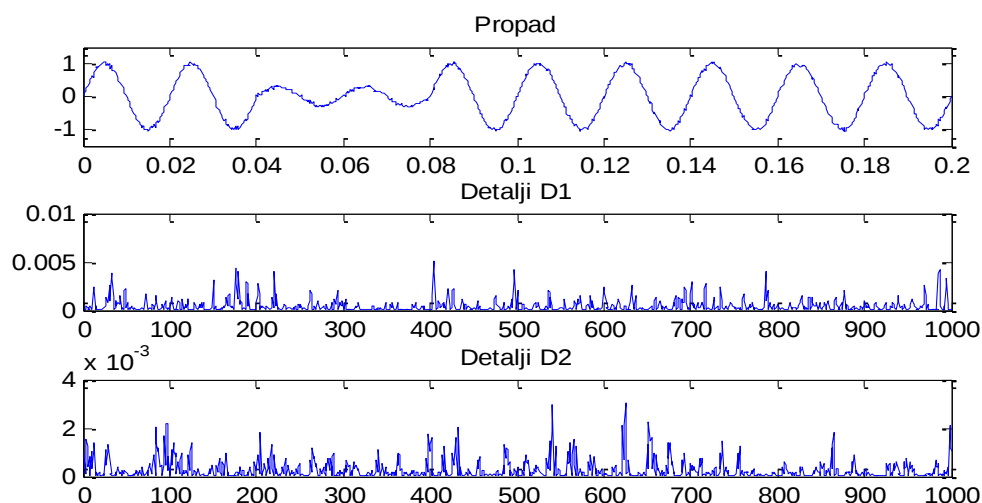
Tabela 5.2 – Devijacije energije detalja tokom propada napona

Devijacija energije detalja tokom propada napona	Minimalna vrijednost	Maksimalna vrijednost	Prosječna vrijednost
ΔE_1	0.000	0.013	0.004
ΔE_2	0.000	0.011	0.004
ΔE_3	0.000	0.026	0.009
ΔE_4	-0.042	0.045	-0.008
ΔE_5	-3.358	-0.045	-1.297
ΔE_6	-15.640	-0.274	-5.926
ΔE_7	-3.904	0.268	-0.913
ΔE_8	-0.098	2.844	0.811
ΔE_9	-1.197	0.852	0.008
ΔE_{10}	-0.373	0.419	-0.075
ΔE_{11}	-0.001	0.606	0.143
ΔE_{12}	-0.017	0.469	0.092

Vrijednosti ΔE u svakoj skali definišu trend krive devijacije energije detalja. Uočava se da su vrijednosti ΔE pri skalama jedan, dva, tri i četiri vrlo bliske nuli. Kod skale pet ΔE ima trend opadanja, sve do skale šest kada ima najmanju vrijednost. Od skale sedam do skale osam, kriva devijacije energije detalja raste i dostiže maksimalnu pozitivnu vrijednost u skali osam. Kod skale devet vrijednost ΔE polako opada, da bi nakon toga opet bilježila rast u skalama deset i jedanaest, pa pad u skali dvanaest. Ova tabela pokazuje da svaki zabilježeni propad napona ima jedinstven oblik krive devijacije energije detalja, u zavisnosti od toga koliko je trajao i kakvog je bio intenziteta. Primjećuje se da su razlike minimalnih i maksimalnih vrijednosti ΔE pri svakoj skali male, osim kod skale pet, šest, sedam i osam. Kod manjih propada napona ΔE_5 , ΔE_6 , ΔE_7 i ΔE_8 imaju veću apsolutnu vrijednost. Zaključuje se da što

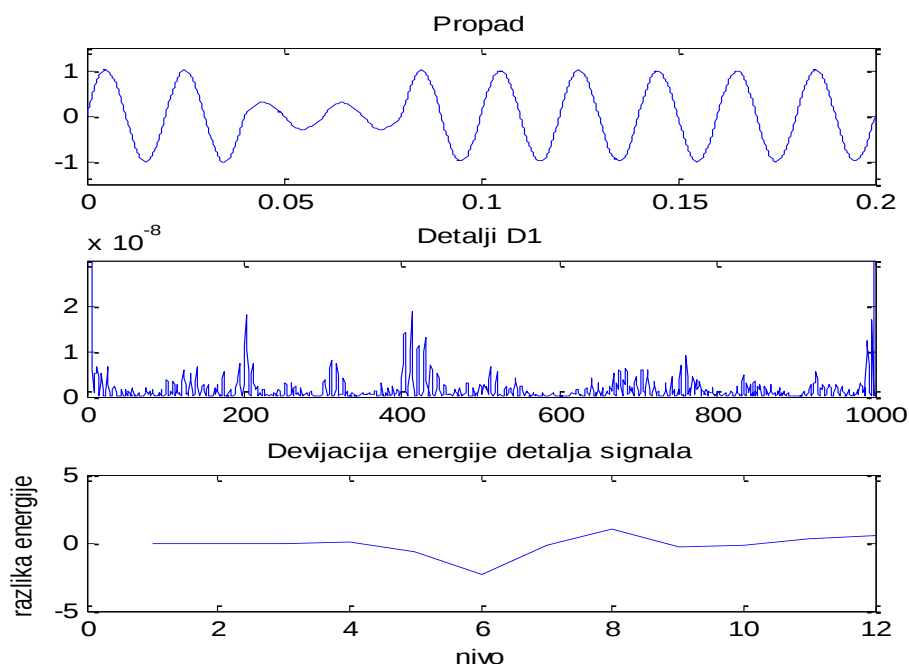
je propad napona bio intenzivniji i dužeg trajanja, vrijednost $|\Delta E|$ u četiri gore pomenute skale je manja.

Na slici 5.5 je prikazana propad napona iz druge grupe, sa aditivnim bijelim Gausovim šumom. Primijenjena je DWT i određeni SWTC pri skali 1 (D_1) i skali 2 (D_2). Sa slike se vidi da šum utiče na dobijene koeficijente i otežava detekciju propada. Ne može se jasno utvrditi početak i kraj propada jer se kod skale jedan i dva javlja veliki broj wavelet koeficijenata. Uočljivo je da šum utiče na sve skale, naročito one niže pa je teže lokalizovati poremećaj. Zbog toga je potrebno prvo ukloniti šum iz signala.



Slika 5.5 – Propad napona sa prisustvom šuma i primjena DWT

Šum će biti uklonjen primjenom važnog svojstva WT, a to je da se energija signala komprimira u relativno mali broj koeficijenata visokih vrijednosti.

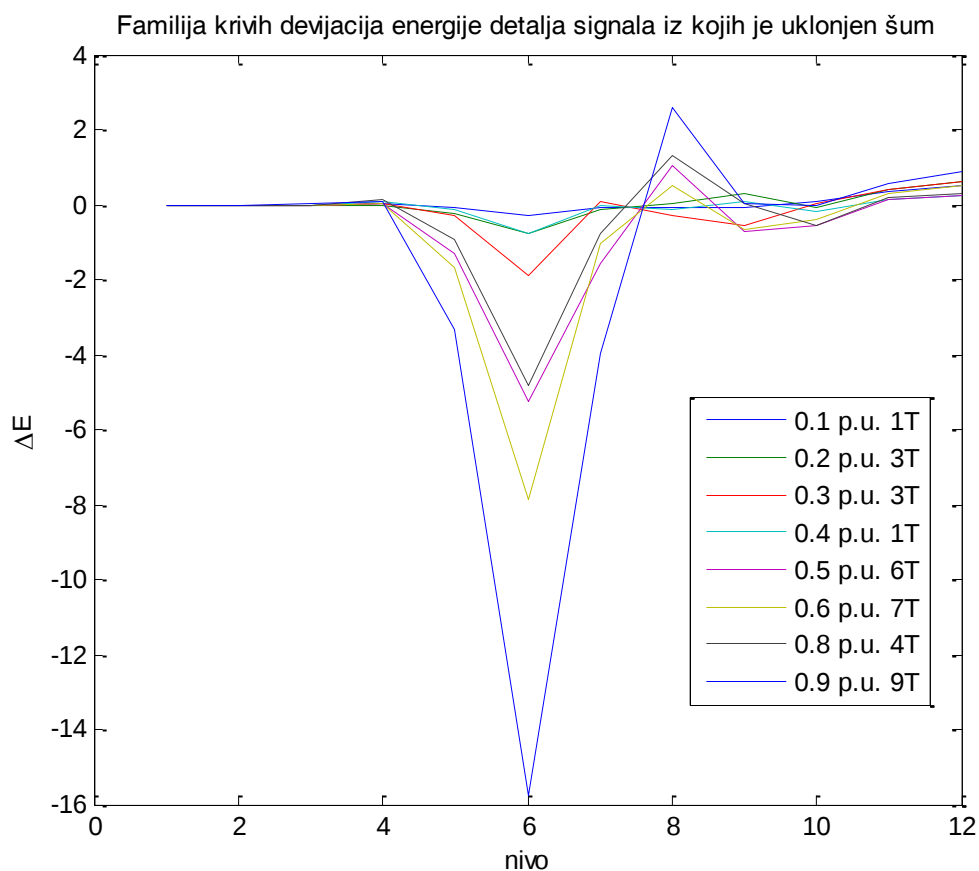


Slika 5.6 – Propad napona nakon uklanjanja šuma i devijacija energije detalja

Koeficijenti malih vrijednosti se zanemaruju, nakon čega se vrši rekonstrukcija signala. Na slici 5.6 je prikazan signal nakon uklanjanja šuma, primijenjena je DWT i određena devijacije energije detalja. Nakon uklanjanja šuma moguće je detektovati i analizirati posmatrani propad. SWTC prikazani na slici 5.6 pri skali jedan (D_1), omogućavaju detekciju ovog brzog poremećaja. Ističu se dva pika veće vrijednosti od okolnih. Oni predstavljaju početak i kraj propada napona. Skala jedan ima mogućnost dobre detekcije poremećaja i obuhvata frekvencijski opseg od 1250 Hz do 2500 Hz. Ona daje precizan uvid u to kada se dogodio propad jer je osjetljiva na brze promjene visokofrekventnih komponenti signala. Kriva devijacije energije detalja (slika 5.5) i u ovom slučaju ima oblik sličan obliku kod prethodno opisanog poremećaja. Pri skali šest je najmanja vrijednost ΔE i ona iznosi -3.152. Kod skale osam je najveća pozitivna vrijednost ΔE i iznosi 1.574. Propad napona je trajao 0.04 s i obzirom na trajanje predstavlja trenutni propad napona.

Na slici 5.7 su prikazane devijacije energije detalja propada napona koji su sadržali šum. Šum je uklonjen pomoću MATLAB Wavelet Design & Analysis Toolbox (opcija za uklanjanje šuma kod jednodimenzionog signala).

Familija krivih pri propadima napona bez šuma (slika 5.4), kao i familija krivih iz kojih je uklonjen šum (slika 5.7) su sličnog oblika.



Slika 5.7 – Familija krivih devijacije energije detalja propada napona kod kojih je uklonjen šum

Pošto su devijacije energije detalja kod prethodno posmatranih propada napona praćene varijacijom vrijednosti ΔE pri skalama pet, šest, sedam i osam, zaključuje se da su u pitanju su poremećaji gdje dolazi do distorzije amplitude signala.

Distribucija energije detalja signala napona se pokazala vrlo korisnom u detekciji jednih od vrlo čestih oblika naponskog poremećaja a to su propadi napona. Utvrđeno je da kod propada napona energija detalja signala varira pri svakoj skali i daje karakterističnu krivu devijacije energije. Ova kriva definiše koja promjena se desila u signalu napona. Na osnovu ovih informacija i odgovarajuće softverske podrške, bilo bi moguće konstruisati sistem za automatsku klasifikaciju propada napona. Ovakav ANN sistem bi se temeljio na *back propagation* algoritmu (BP ili algoritam sa prostiranjem greške unazad). Kod ovog algoritma se izračunava greška u vrijednosti output-a i šalje unazad kroz sistem neurona. Zbog toga se povećavaju ili smanjuju vrijednosti težinskih koeficijenata (sinapse kod bioloških neurona). Ovaj algoritam se najčešće koristi za obučavanje NN i pogodan je za prepoznavanje oblika (*eng. pattern recognition*). Ovakav sistem bi zahtijevao odgovarajuće vrijeme za učenje, na osnovu ulaznih podataka koje bi obezbijedila WT. Tokom perioda učenja i treniranja sistema, on bi zabilježio sve relacije između ulaznih i izlaznih podataka. Sistem bi prilikom klasifikacije propada napona relevantne podatke zadržavao, dok suvišne i nebitne informacije ne bi uzimao u obzir. Na taj način bi omogućio bržu obradu podataka u neuronskim mrežama. Ovim principom bi se omogućilo direktno prikupljanje podataka sa mjernih uređaja, gdje bi umjesto korisnika sistem automatski obrađivao i klasifikovao veliku količinu podataka. Sistem može izvršiti prilagođavanje prikupljenih podataka (uklanjanje šuma) primjenom WT, čime bi se postigla još kvalitetnija analiza događaja. Ovakav ANN sistem zasnovan na devijaciji energije detalja imao bi procenat tačnosti prepoznavanja propada napona od 94%. Sa druge strane, ANN sistem zasnovan samo na energiji detalja signala imao bi tačnost prepoznavanja propada napona od 90% [33].

5.2 Benefiti predložene metode

Da bi oprema za monitoring propada napona ispravno funkcionisala, mora sadržati funkcije koje će omogućiti detekciju, lokalizaciju i klasifikaciju poremećaja. Kada poremećaj traje kratko kao što je slučaj sa propadima napona, jednostavno posmatranje talasnog oblika napona možda neće uvijek biti dovoljno za utvrđivanje da se poremećaj uopšte dogodio, ili što je još teže, neće biti dovoljno da se identifikuje vrsta poremećaja.

DWT nudi mogućnost kvalitetnog praćenja nestacionarnih i neperiodičnih signala. Može se koristiti za izvlačenje bitnih karakteristika signala koje služe za identifikaciju i analizu propada napona.

Kod većine signala komponente niske frekvencije su najvažnije komponente koje daju originalni identitet signalu. Komponente visokih frekvencija daju posebne karakteristike

signalu. MRA daje dobru vremensku rezoluciju kod komponenti visokih frekvencija, a dobru frekvencijsku rezoluciju kod komponenti niskih frekvencija. Ovakav pristup je naročito značajan kada signal sadrži komponente visoke frekvencije koje kratko traju i komponente niske frekvencije koje dugo traju. To je pokazano u predstavljenim primjerima. Propadi napona su pojave koje kratko traju, a WT ih identifikuje kao brze promjene u signalu koje sadrže komponente visoke frekvencije.

Pojedini autori su u cilju analize propada napona i ostalih poremećaja predlagali izdvajanje SWTC koeficijenata za svaku skalu pojedinačno. Oni bi predstavljali ulazne podatke za NN model. Obzirom na to da bi upotreba ovih koeficijenata podrazumijevala veliki memorijski prostor i mnogo vremena za učenje neuronskih mreža, taj pristup se nije pokazao kao dobro rješenje. Zato se pažnja posvetila raspodjeli energije detalja signala pri različitim skalama.

Rezultati su pokazali da metod predložen u ovom radu može efikasno analizirati signal koji sadrži propade napona sa ili bez šuma. Db4 wavelet se koristi kao osnovni jer su propadi napona brzi događaji, a mnogobrojna literatura ga je označila kao najboljeg za ovakve poremećaje. Razlaganjem signala pri skali jedan, početak i kraj poremećaja se detektuje pomoću SWTC koeficijenata. Time se lako može doći do dužine trajanja poremećaja. Na osnovu upoređivanja energije detalja signala sa propadom napona i energije detalja čistog sinusnog signala, dolazi se do devijacije energije detalja. Ova kriva je jedinstvenog oblika kod propada napona i može se uzeti kao obrazac za prepoznavanje tog poremećaja. Sama distribucija energije po skalama nije osjetljiva na vrijeme kada se propadi napona javljaju, što je analiza i potvrdila. Distribucija energije pri nižem skalama je pokazala varijacije kada signal sadrži komponente visoke frekvencije. Distribucija energije pri višim skalama je pokazala varijacije kada signal sadrži komponente niske frekvencije. Amplitude i oblici krivih devijacije energije mogu da se neznatno mijenjaju u zavisnosti od intenziteta poremećaja, ali ove krive imaju karakterističan oblik koji se može usvojiti i upotrebiti za prepoznavanje propada napona. Ovo može pomoći da se pronađe i ukloni izvor poremećaja.

Glavna prednost ove metode je značajna redukcija količine podataka, koji se sada obrađuju na i nivoa dekompozicije. Broj skala na koji se razlaže signal se mora redukovati da bi se proračun brže odvijao, ali i dalje mora biti dovoljno efikasan da uhvati i prepozna poremećaj. Predloženi metod može redukovati veliku količinu podataka koju sadrži distorzovani signal bez gubljenja važnih detalja. Time se postižu manji zahtjevi za memorijskim prostorom a sam proračun se brzo odvija.

Osnovne karakteristike predloženog pristupa u detekciji i analizi propada napona su:

- Mogućnost obrade nestacionarnih i neprirodnih signala koji se javljaju u EES-u.
- Značajna redukcija količine podataka koji se obrađuju, čime se postiže brža obrada podataka i smanjeni zahtjevi za memorijskim prostorom.
- Postizanje dobre vremenske i frekvencijske rezolucije, što je od izuzetnog značaja kod propada napona.

- Osnovni wavelet db4 se pokazao kao vrlo efikasan u detekciji ovakvih vrsta poremećaja.
- Pri prvom nivou razlaganja primjenom DWT omogućeno je detektovanje početka i kraja poremećaja se pomoću SWTC koeficijenata, čime se određuje dužine trajanja poremećaja.
- Pomoću devijacije energije detalja signala pri raznim skalama utvrđuje se kriva devijacije energije.
- Distribucija energije po skalama nije osjetljiva na vrijeme kada se poremećaj javlja.
- Postiže se detekcija, lokalizacija i klasifikacija poremećaja.
- Predloženi metod se može iskoristiti za povećanje potencijala opreme za praćenje kvaliteta napona, sa mogućnošću obrade podataka u realnom vremenu.
- Mogućnost primjene kod svih naponskih nivoa.

Pored benefita predložene metode za detekciju i analizu propada napona, potrebno je obratiti pažnju na njene nedostatke i ograničenja:

- U praksi se mogu javiti signali koji sadrže propade napona praćene npr. flikerima ili harmonicima. Znači da u tom sličaju nije dovoljno posmatrati samo krive devijacije energije detalja sa slike 5.4.
- Pojava šuma u realnim signalima u značajnoj mjeri narušava kvalitet mjerenja i dovodi do pogrešnih rezultata prilikom obrade signala. Zbog toga ga je neophodno eliminisati prije obrade signala kako bi se došlo do ispravnih rezultata.
- Kod navedenih primjera korišćen je db4 wavelet kao osnovni. Primjena nekog drugog wavelet-a bi značila i drugačiju raspodjelu energije detalja.
- Oblik i amplitude krive devijacije energije može da se neznatno promjeni u zavisnosti od mjesta gdje je mjerenje izvršeno. Zato je bitno pažljivo odabrati lokacije za monitoring, što bliže uređajima koji su osjetljivi na propade napona, kao i odgovarajućoj transformatorskoj stanici.
- Predstavljeni metod se može upotrebiti ukoliko se posjeduje talasni oblik napona velike učestanosti odabiranja uzoraka, jer je to neophodan uslov za primjenu DWT.
- Krive devijacije energije prikazane u ovom radu se odnose na talasni oblik napona odabiran frekvencijom od 5 kHz i na referentnu frekvenciju od 50 Hz.

Uopšteno govoreći, oprema za monitoring kvaliteta električne energije bi trebala da se zasniva na primjeni raznih metoda u zavisnosti od ciljeva analize. WT ima vrlo dobru osjetljivost na poremećaje i veliku brzinu obrade podataka. S transformacija ima još veću osjetljivost na poremećaje ali podrazumijeva velike proračune i sporost u analizi. Fourier-ova transformacija ima manju osjetljivost na poremećaje u talasnom obliku napona u odnosu na WT, ali se pokazala kao najbolja ukoliko je glavni cilj analiza harmonijskih komponenti.

WT se može koristiti za dobijanje jeftinog sistema za nadgledanje EES-a u realnom vremenu. Na taj način bi se povećao potencijal opreme za monitoring kvaliteta električne energije, a podaci bi se mogli obrađivati u realnom vremenu.

6. ZAKLJUČAK

Monitoring kvaliteta električne energije podrazumijeva prikupljanje, prikazivanje i analiziranje snimljenih signala napona i struja u korisnom i pogodnom obliku. Posljednjih decenija evidentan je porast broja novih uređaja za mjerenje i ispitivanje kvaliteta električne energije. Njihov razvoj prati i razvoj odgovarajućeg alata za obradu signala. Ovi uređaji uglavnom nemaju mogućnost da naprave razliku između zabilježenih događaja. Zato korisnici moraju sami da odvajaju potrebne podatke, što podrazumijeva veliki broj informacija koji se treba obraditi i klasifikovati. Zbog toga je vrlo poželjno da ova analiza bude automatska.

Da bi oprema za monitoring ispravno funkcionisala, potrebno je da posjeduje funkcije koje će omogućiti detekciju, lokalizaciju i klasifikaciju poremećaja. U stvarnosti, kada se poremećaj klasifikuje ispravno, inženjeri koji se bave kvalitetom električne energije mogu definisati glavne efekte poremećaja na konzum i mogu analizirati izvor poremećaja. Kada poremećaj traje kratko kao što je slučaj sa propadima napona, jednostavno posmatranje talasnog oblika napona neće uvijek biti dovoljno za registrovanje poremećaja, ili što je još teže, neće biti dovoljno za identifikovanje vrste poremećaja.

U radu su ukratko navedene neke od najčešće korišćenih metoda za analizu propada napona, sa osvrtom na njihove prednosti i mane. Propadi napona su nestacionarni signali pa se WT pokazala kao dobar izbor za njihovu detekciju i lokalizaciju. WT prati promjene u signalu u vremenskom domenu i automatski vrši dekompoziciju signala na razne frekvencijske pojaseve.

Primjenom WT na signale propada napona dolazi se do kvadriranih wavelet koeficijenta. Oni brzo detektuju poremećaj, ali ne mogu dati više informacija o tome koji se poremećaj dogodio. Zbog toga se pažnja usmjerava na distribuciju energije detalja signala sa poremećajem u odnosu na distribuciju energije detalja čistog sinusnog signala. Dobijena devijacija energije se pokazala vrlo korisnom u analizi propada napona. Na primjerima je pokazano da kod ovih poremećaja energija detalja varira pri svakoj skali i daje karakterističnu krivu devijacije energije. Ova kriva definiše vrstu promjene koja se desila u naponu. Na osnovu ovih informacija i odgovarajuće softverske podrške, moguće je konstruisati ANN sistem za automatsku klasifikaciju propada napona sa tačnošću prepoznavanja od 94%. Pokazano je da distribucija energije detalja po skalama nije osjetljiva na vrijeme kada se poremećaj javlja.

Poznato je da se u praksi mogu javiti signali koji sadrže propade napona praćene npr. flikerima, harmonicima itd. U tom slučaju nije dovoljno posmatrati samo krive devijacije energije signala koji sadrže isključivo propade napona. Predložena metoda daje rezultate kod čistih propada napona. Realni signali sadrže u značajnoj mjeri i šum koji narušava kvalitet mjerenja i dovodi do pogrešnih rezultata prilikom obrade signala. Da bi se došlo do tačnih rezultata neophodno je eliminirati šum prije dalje obrade signala. U radu je to postignuto

primjenom WT. U zavisnosti od učestanosti uzimanja mjernih podataka kod uređaja za kvalitet električne energije dolazi se do optimalnog broja skala potrebnih za analizu poremećaja. Ovo je podatak koji varira od uređaja do uređaja. Oblik i amplituda krive devijacije energije može se neznatno promjeniti u zavisnosti od mjesta gdje je mjerenje izvršeno. Zato je bitno pažljivo odabrati lokacije za monitoring tako da budu što bliže uređajima koji su osjetljivi na propade napona kao i odgovarajućoj transformatorskoj stanici. Metod prikazan u ovom radu se može upotrebiti ukoliko se posjeduje talasni oblik napona odgovarajućeg kvaliteta sa visokom rezolucijom mjerenja. Krive devijacije energije prikazane u ovom radu se odnose na talasni oblik napona odabiran frekvencijom od 5 kHz i referentnu frekvenciju od 50 Hz.

Buduće istraživanje predloženog pristupa za analizu propada napona bi moglo da se razvija u dva pravca:

- Formiranje NN modela za automatsku detekciju propada napona
- Utvrđivanje tačnosti detekcije propada napona realnih signala u EES-u

Uređaji za monitoring kvaliteta električne energije bi trebalo da se baziraju na primjeni raznih metoda obrade signala, zavisno od ciljeva analize. WT je pokazala dobru osjetljivost na poremećaje u talasnom obliku signala napona i veliku brzinu obrade podataka. S transformacija ima bolju osjetljivost na poremećaje, ali podrazumijeva velike proračune zbog čega je analiza spora. Fourier-ova transformacija je pokazala manju osjetljivost na poremećaje u talasnom obliku napona u poređenju sa WT, ali je najbolja za primjenu ukoliko je glavni cilj analiza harmonijskih komponenti.

Posljednjih 15 godina je napravljen značajan iskorak u razvoju wavelet teorije i njene primjene u energetici. Najveću primjenu kod EES-a WT je našla u oblastima kvaliteta električne energije, parcijalnih pražnjenja, mjerenja, prognoziranja potrošnje, zaštita i tranzijenata. WT se vremenom razvila u jednu kvalitetnu tehniku sa ogromnim potencijalom koja ima sve veću primjenu u energetici.

Uprkos brzom razvoju i napredovanju WT, i dalje postoje neke nedoumice vezane za ovu transformaciju i njenu upotrebu. To se odnosi na problem odabira odgovarajuće osnovne wavelet funkcije, broj nivoa dekompozicije signala kod DWT, kao i na optimalan broj skala kod CWT. Ovim pitanjima se u budućnosti mora posvetiti pažnja.

Literatura

- [1] Lj. Milić, Z. Dobrosavljević - *Uvod u digitalnu obradu signala*, Elektrotehnički fakultet, Akademska misao, Beograd 1999.
- [2] D. P. Radunović - *Talasići (wavelets)*, Akademska misao Beograd 2005.
- [3] O. J. Singh, P. Winston - *A Survey on Classification of Power Quality Disturbances in a Power System*, Journal of Engineering Research and Applications, Vol. 4, Issue 8 (Version 2), August 2014, pp.80-84
- [4] B. Lee Barnhart - *The Hilbert-Huang Transform: theory, applications, development*, PhD thesis, University of Iowa, 2011
- [5] N. Brajković, N. Cvrlje, M. G. Pecotić - *STFT i Huang Hilbertova transformacija u obradi spektra radio signala*, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zavod za elektroničke sustave i obradu informacija
- [6] M. E. Salem Abozaed - *Detection and Classification of Power Quality Disturbances Using S-Transform and Wavelet Algorithm*, World Academy of Science, Engineering and Technology Vol:7 2013-06-28
- [7] H. Hegeduš - *Precizno mjerenje izmjeničnog napona primjenom analogno-digitalnih pretvornika visoke rezolucije*, Zavod za osnove elektrotehnike i električna mjerenja, Zagreb
- [8] M. Lainović - *Vremensko-frekvencijske metode u obradi elektrofizioloških signala*, diplomski rad, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Beograd 2013.
- [9] Đ. Starčević - *Dekompozicija signala pomoću wavelet transformacije*, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2010.
- [10] R. Polikar - The Wavelet Tutorial,
<http://users.rowan.edu/~polikar/WAVELETS/WTpart1.html> ,1996
- [11] S. Santoso, Edward J. Powers, W. Mack Grady, P. Hofmann - *Power quality assessment via wavelet transform analysis*, IEEE Vol.11, No.2, April 1996.
- [12] V. Kumar, S. K. Gawre, T. Kumar - *Power Quality Analysis Using Wavelet Transform: A Review*, International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, Volume 3, Special Issue 3, March 2014.
- [13] D. Baleanu, H. Aydin - *Advances in Wavelet Theory and Their Applications in Engineering, Physics and Technology*, April 04, 2012.

- [14] M. Szmaida, J. Mroczka - *Models of disturbances in power networks for testing frequency*, Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), ISSN 0033-2097, R. 88 NR 4a/2012
- [15] A. Bien - *The Hilbert Transform Adaptation for Measuring Amplitude and Phase Low-Frequency Disturbances in Power System Voltage*, Electrical Power Quality and Utilization, Journal Vol. XIV, No. 2, 2008.
- [16] A. Francis Snyder - *Inter-Area Oscillation Damping with Power System Stabilizers and Synchronized Phasor Measurements*, Thesis for the degree of Master of Science in Electrical Engineering, Paris, France, February 10, 1997.
- [17] S. Avdakovic, A. Nuhanovic, M. Kusljagic, E. Becirovic, M. Music - *Identification Of Low Frequency Oscillations In Power System*, International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), Bursa, Turkey 2009.
- [18] S. Avdakovic, A. Nuhanovic - *Identifications and Monitoring of Power System Dynamics Based on the PMUs and Wavelet Technique*, World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol:4 2010-03-23
- [19] K.Gayathri, N. Kumarappan - *Comparative Study of Fault Identification and Classification on EHV Lines Using Discrete Wavelet Transform and Fourier Transform Based ANN*, World Academy of Science, Engineering and Technology Vol:2 2008-05-23
- [20] V.S.Kale, S.R.Bhide, P.P.Bedekar, G.V.K.Mohan - *Detection and Classification of Faults on Parallel Transmission Lines using Wavelet Transform and Neural Network*, World Academy of Science, Engineering and Technology Vol:2 2008-10-20
- [21] V. Malathi, N.S.Marimuthu - *Wavelet Transform and Support Vector Machine Approach for Fault Location in Power Transmission Line*, World Academy of Science, Engineering and Technology Vol:4 2010-03-26
- [22] Ming-Ta Yang, Jin-Lung Guan, and Jhy-Cherng Gu - *High Impedance Faults Detection Technique Based on Wavelet Transform*, World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electrical, Computer, Electronics and Communication Engineering Vol:1, No:4, 2007.
- [23] O. Özgönenel - *Wavelet based ANN Approach for Transformer Protection*, World Academy of Science, Engineering and Technology Vol:2 2008-06-26
- [24] G. Vijayaraghavan, M.Brown, M.Barnes - *Practical Grounding, Bonding, Shielding and Surge Protection*, Butterworth-Heinemann, 21 Sep 2004.

- [25] J. J. Gajica, Lj. D. Milić - *Jedan model simulatora impulsnih smetnji nastalih delovanjem rasklopnih elemenata u elektroenergetskom sistemu*, 17. Telekomunikacioni forum TELFOR 2009, Srbija, Beograd, novembar 24.-26., 2009.
- [26] V. Kumar, S. K. Gawre, T. Kumar - *Power Quality Analysis Using Wavelet Transform: A Review*, International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology (IJIRSET), Volume 3, Special Issue 3, March 2014.
- [27] A. Ukil, R. Živanović - *Detection of abrupt changes in power system fault analysis: a comparative study*, Southern African Univ. Power Engineering Conference, SAUPEC'05, Johannesburg, South Africa, 2005.
- [28] A. Khamis, H. Shareef, M.Z.C Wanik - *Pattern recognition of islanding detection using TT-transform*, Journal of Asian Scientific Research Vol. 2, No. 11, pp. 607-613, 2012.
- [29] S. K. Gawre, N.P.Patidar, R. K. Nema - *Application of wavelet Transform in power Quality: A Review*, International Journal of Computer Applications (0975 – 8887) Volume 39– No.18, February 2012.
- [30] V. Katić, A. Tokić, Tatjana K. - *Kvalitet električne energije*, Novi Sad, jun 2007.
- [31] MATLAB - *The language of technical computing*, The MathWorks Inc., 1998
- [32] Chun-Yao Lee, Yi-Xing Shen - *Optimal Feature Selection for Power-Quality Disturbances Classification*, IEEE Transactions on power delivery, Vol. 26, No. 4, October 2011.
- [33] Jayasree T. - *Application of signal processing techniques and artificial neural networks for power quality disturbance analysis*, PhD Thesis, Faculty of information and communication engineering ANNA University Chennai, Tamil Nadu India, August 2011.
- [34] M. Simić - *Metrološko obezbeđenje merila kvaliteta električne energije*, magistarska teza, Niš, Srbija, 2008.
- [35] S. Santoso, E. J. Powers, W. Mack Grady - *Electric power quality disturbance detection using wavelet transform analysis*, IEEE, 1994
- [36] S. Kanoon, H. H. Sherwali, A. Badee ali Awin, F. ali Awin - *Monitoring Power Quality Voltage Variations, Sag, Swell and Flickers Based on Wavelet Technique*, ICALEEE, Volume: 1
- [37] J. Trhulj, N.Stefanović, Lj.Hadžibabić - *Regulacija kvaliteta isporuke električne energije*, 13. Simpozijum Upravljanje i telekomunikacije u EES, JUKO CIGRE, Srbija 2006.

- [38] D. Hussam El.Din, A. F. Abd El-Gawad, R. El-Sharkawy - *Application of Continuous & Discrete Wavelet Transform for studying of voltage flicker-generated signal*, 21st International Conference on Electricity Distribution, Frankfurt, June 2011.
- [39] N. Huang, S. Zhang, G. Cai, D. Xu - *Power Quality Disturbances Recognition Based on a Multiresolution Generalized S-Transform and a PSO-Improved Decision Tree*, Energies (ISSN 1996-1073) Vol.8, 15 January 2015.
- [40] Bhavna J., Shailendra J., R.K. Nema - *Investigations on Power Quality Disturbances Using Discrete Wavelet Transform*, International Journal of Electrical, Electronics and Computer Engineering, 2013.
- [41] E. Perez - *Voltage event detection and characterization methods: a comparative study*, 2006 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition Latin America, Venezuela, 2006.
- [42] R. P. Bingham - *Sags and Swells*, Dranetz BMI, Edison, USA, February 1998.