



Univerzitet u Nišu
Elektronski fakultet



DEJAN S. STEVANOVIĆ

**METOD ZA EFIKASNU IDENTIFIKACIJU
HARMONIJSKIH IZOBLIČENJA U
ELEKTROENERGETSKOJ MREŽI
PRIMENOM MODIFIKOVANIH
ELEKTRONSKIH BROJILA**

doktorska disertacija

Niš, 2015.



University of Niš
Faculty of Electronic Engineering



DEJAN S. STEVANOVIĆ

**A METHOD FOR EFFICIENT
IDENTIFICATION OF HARMONIC
POLLUTION IN POWER GRID
APPLYING MODIFIED
ELECTRONIC POWER METERS**

doctoral dissertation

Niš, 2015.

Podaci o mentoru i članovima komisije

Mentor:

dr Predrag Petković, redovni profesor, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet

Komisija za ocenu i odbranu doktorske disertacije:

1. dr Predrag Petković, redovni profesor, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet
2. dr Milun Jevtić, redovni profesor, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet
3. dr Dragan Mančić, redovni profesor, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet
4. dr Milutin Petronijević, docent, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet
5. dr Miroslav Lazić, naučni saradnik, Iritel, Beograd

Datum odbrane: _____

Mojoj porodici

Teza je realizovana u okviru projekta „TR32004 Napredne tehnologije elektronskog merenja, upravljanja i komunikacije na električnoj distributivnoj mreži“ čiju realizaciju finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

Zahvaljujem se svim kolegama iz Laboratorije za projektovanje elektronskih kola na podršci i pomoći tokom pisanja teze.

Zahvaljujem se Mr Srboljubu Draganoviću iz firme EWG na ustupljenoj opremi pomoću koje je realizovan jedan deo ove teze.

Posebnu zahvalnost dugujem mentoru, profesoru dr Predragu Petkoviću na savetima prilikom realizacije i pisanja teze.

Podaci o doktorskoj disertaciji

Naslov doktorske disertacije:

Metod za efikasnu identifikaciju harmonijskih izobličenja u elektroenergetskoj mreži primenom modifikovanih elektronskih brojila

Rezime:

Razvoj elektronike omogućio je proizvodnju pametnih, energetski efikasnih uređaja i opreme. Njihova primena kako u industriji, tako i u domaćinstvima doprinela je značajnoj uštedi u potrošnji električne energije a samim tim i smanjenju emisije CO₂. Na prvi pogled izgleda da je napravljen značajan napredak bez negativnih posledica. Nažalost, to nije potpuno tačno. Naime, savremeni elektronski uređaji baziraju rad na jednosmernom (DC) naponu a napajaju se naizmeničnim (AC) naponom . Proces konverzije naizmeničnog u jednosmerni napon obavlja se pomoću AC/DC pretvarača. Da bi se povećala efikasnost konverzije neophodno je obezbediti minimalne gubitke u samom pretvaraču. To se postiže radom tranzistora u prekidačkom režimu tako da je struja kroz njih najveća kada je napon na njima minimalan i obrnuto. Tranzistori rade na frekvenciji od nekoliko kHz. Kao posledica ovog režima rada, uređaji se ponašaju kao izuzetno nelinearni potrošači što se manifestuje impulsnom potrošnjom struje. Sa stanovišta celog elektroenergetskog (EE) sistema to znači da struja ne prati prostoperiodični talasni oblik napona, nego je bogata harmonicima. Harmonijske komponente struje protiču kroz EE sistem i na konačnoj impedansi vodova

stvaraju dodatne harmonijske komponente napona. To dovodi do promene u talasnom obliku napona kod svih potrošača koji se nalaze u blizini, a samim tim i u celom EE sistemu.

U cilju očuvanja EE sistema, referentne međunarodne organizacije donele su standarde kojima se ograničava maksimalna dozvoljena vrednost harmonika. Najpoznatiji standardi iz ove oblasti (IEEE 519-1992, IEC serije 61000 i EN 50160) ne definišu metod koji će se koristiti za detekciju dominantnog izvora harmonijskih izobličenja. Kao posledica toga, trenutno u literaturi i praksi postoje mnogobrojni metodi koji mogu da se koriste za ovu namenu.

U ovoj disertaciji najpre su analizirane brojne neželjene pojave uslovljene prisustvom harmonika u EE sistemu. Zatim je dat pregled postojećih metoda za identifikaciju izvora harmonijskog izobličenja. Detaljnom analizom, na realnim primerima, pokazano je da i najčešće primenjivan metod zasnovan na merenju harmonijske komponente aktivne snage nije pouzdan. Zajednički nedostatak svih postojećih rešenja predstavlja komplikovana implemetacija koja diskvalifikuje njihovu primenu na nivou pojedinog potrošača (brojila). Zbog toga se, uglavnom, primenjuju na nivou transformatorskih stanica.

U ovoj disertaciji za identifikaciju izvora harmonijskih izobličenja na elektroenergetskoj mreži predlaže se potpuno novi metod zasnovan na merenju snage izobličenja. Osnovna prednost u odnosu na konkurentna rešenja jeste mogućnost realizacije u okviru standardnog elektronskog brojila. Štaviše, metod se može implementirati modifikacijom standardnih brojila na softverskom nivou ili na nivou hardvera. Nezavisno od načina implementacije ovog metoda, njegovom primenom distributer električne energije dobija informaciju o lokaciji izvora harmonijskih izobličenja neposredno na nivou potrošača koji ih je izazvao. Predloženi metod verifikovan je simulacijama na funkcionalnom nivou i merenjima uz primenu standardnog elektronskog brojila i personalnog računara. Pri tome, uloga personalnog računara može da se prenese na DSP, odnosno mikroprocesorski deo najsavremenije generacije brojila intervencijom na softverskom nivou.

Imajući u vidu činjenicu da na terenu postoji velika količina brojila starije generacije, razvijen je prototip hardverskog dodatka sa ciljem da proširi funkcije postojećim brojilima. Prototip je realizovan na FPGA Cyclone 2 korišćenjem razvojne ploče Altera DE2. On omogućava distributeru električne energije da identifikuje nelinearnog potrošača na mestu njegovog priključivanja na mrežu, bez zamene postojećih elektronskih brojila.

Trenutno se u LEDA Laboratoriji Elektronskog fakulteta Univerziteta u Nišu razvija nova generacija ASIC integrisanog merača potrošnje električne energije. Predloženi metod biće ugrađen u okviru DSP bloka i realizovan u AMS CMOS 018μm tehnologiji.

Ključne reči:

Harmonici, izvori harmonijskih izobličenja, snaga izobličenja, elektronsko brojilo, FPGA.

Naučna oblast:

Elektrotehničko i računarsko inženjerstvo

Uža naučna oblast:

Elektronika

UDK broj: (621.311+621.317.785):(621.31:65.011)

Doctoral dissertation information

Doctoral dissertation title:

A method for efficient identification of harmonic pollution in power grid applying modified electronic power meters

Abstract:

The development of electronics has enabled the production of smart, energy-efficient appliances and equipment. Their application both in industry and in households has contributed to significant savings in electricity consumption and to CO₂ emission reduction respectively. At first glance, it appears that significant progress has been made without any negative consequences. Unfortunately, that is not entirely true. Namely, modern electronic devices are based on direct current voltage (DC) and are supplied with alternating current (AC). The process of converting alternating current to direct current voltage is done by using the AC/DC converter. It is necessary to ensure minimum losses in the converter itself in order to increase the conversion efficiency. This is achieved when transistors operate in the switch mode. The current flowing through transistors is the strongest when transistor voltage is minimal and vice versa. Transistors operate at a frequency of several kHz. As a result of this operating mode, the device acts as an extremely nonlinear load which is manifested by pulse current energy consumption. From the standpoint of the utility system, this means that electricity does not follow the sinusoidal voltage waveform but that it is rich in harmonics. The harmonic components of the current flow through the utility and create

additional harmonic voltage components at the final impedance lines. This leads to changes in the voltage waveform for all nearby consumers and the whole utility as well.

In order to preserve the utility, the relevant international organizations have set standards which limit the maximum permissible value of the harmonics. The most famous standards in this field (IEEE 519-1992, IEC series 61000 and EN 50160) do not define the method which will be used to detect the dominant source of harmonic distortion. As a result, there are numerous methods in the current literature and practice that can be used for this purpose.

Firstly, numerous adverse effects caused by the presence of harmonics in the electricity system were analyzed in this dissertation. Then, an overview of the existing methods for the identification of harmonic distortion sources was given. A thorough analysis on real examples has shown that the most widely used method based on the measurement of the active power harmonic components is not reliable. A common drawback of all the existing decisions is represented by a complicated implementation that disqualifies their application at the level of individual consumers (power meters). Therefore, it is mainly applied at the level of substations.

A completely new method based on the measurement of power distortion is proposed in this dissertation in order to identify sources of harmonic distortion in the power network. The main advantage compared to competing solutions is the possibility to use it within the standard electronic meter. Moreover, the method can be implemented by modifying the standard meter at the software or hardware level. Irrespective of the type of implementation of this method, its application allows the distributor to receive information about the harmonic distortion source location directly at the level of consumers who caused them. The proposed method has been verified by simulations at a functional level and by measurements with the use of standard electronic meter and a personal computer. At the same time, the role of the personal computer can be transferred to the DSP, i.e. to the microprocessor part of the latest generation of meters through the software level intervention.

Bearing in mind the fact that a large amount of meters of the old generation is used, the prototype of hardware device has been developed in order to extend the functions of the existing meters. The prototype was realised on the Cyclone 2 FPGA by the use of Altera DE2 development board. It enables the electricity distributor to identify the nonlinear load at the place of the connection to the network without replacing the existing electronic meters.

A new generation of ASIC integrated Power Meters is currently being developed at the Faculty of Electronic Engineering LEDA Laboratory, University of Niš. The proposed

method will be incorporated within the DSP block and realized in AMS 018μm CMOS technology.

Keywords:

Harmonics, source of harmonic pollutions, power distortion, electronic power meter, FPGA.

Scientific area:

Electrical and Computer Engineering

Major scientific area:

Electronics

UDK broj: (621.311+621.317.785):(621.31:65.011)

Sadržaj

Spisak slika.....	i
Spisak tabela.....	iii
1 Uvod.....	1
2 Izvori harmonijskih izobličenja.....	4
2.1 Transformatori	4
2.2 Generatori	5
2.3 Elektrolučne peći	5
2.4 Statički VAR kompenzatori.....	6
2.5 AC/DC pretvarači	6
2.6 DC/AC pretvarači	8
2.7 Ciklokonvertori	11
3 Problemi izazvani postojanjem harmonika u elektroenergetskoj mreži.....	13
3.1 Generator.....	13
3.2 Transformator	14
3.3 Asihroni motor	15
3.4 Pretvarači za pogone promenljive brzine.....	16
3.5 Osvetljenje	16
3.6 Izvor neprekidnog napajanja.....	17
3.7 Računarske mreže	18
3.8 Elektroenergetski vodovi	18
3.9 Merna oprema	19
3.10 Osigurači i prekidači	20

3.11	Releji	21
3.12	Kondenzatorske baterije.....	21
4	Proračun snaga potrošača električne energije.....	23
4.1	Proračun snaga linearnih monofaznih potrošača	25
4.2	Proračun snaga nelinearnih monofaznih potrošača.....	27
4.3	Proračun snaga linearnih polifaznih sistema.....	31
4.4	Proračun snaga nelinearnih polifaznih sistema.....	33
5	Standardi kojima se definiše kvalitet električne energije.....	34
5.1	IEEE standardi	34
5.1.1	Ograničenja za naponske harmonike	34
5.1.2	Ograničenja za strujne harmonike	35
5.2	IEC standardi	36
5.2.1	Ograničenja za naponske harmonike	36
5.2.2	Ograničenja za strujne harmonike	37
5.3	EN50160 standard – evropski standard za karakteristike napona	40
6	Pregled metoda za identifikaciju izvora harmonijskih izobličenja	42
6.1	Metod zasnovan na praćenju harmonijske aktivne snage	43
6.1.1	Nedostaci metoda zasnovanog na praćenju znaka P_H	44
6.2	Metod zasnovan na praćenju znaka reaktivne harmonijske snage.....	47
6.3	CI (<i>Critical Impedanse</i>) metod	48
6.4	Non-active metod.....	53
6.5	Metod baziran na PQI	55
7	Novi metod za identifikaciju izvora harmonijskih izobličenja u elektroenergetskoj mreži	57
7.1	Opis metoda zasnovanog na merenju snage izobličenja.....	57
7.2	Funkcionalna verifikacija metoda simulacijama	60
7.3	Funkcionalna verifikacija-merenjima	65
7.4	Metod za unapređenje obračuna i naplate potrošene električne energije	71
8	Hardverska realizacija sistema	74
8.1	RS232 komunikacija.....	75
8.2	Kolo za računanje snage izobličenja.....	76
8.3	Kolo za množenje	78
8.4	Kolo za korenovanje	80

8.5	LCD displej	81
8.6	Implementacija sistema za detekciju izvora nelinearnog izobličenja	85
8.7	Kolo za merenje energije izobličenja.....	88
8.8	Implementacija sistema za merenje energije izobličenja.....	90
9	Zaključak.....	93
10	Literatura.....	95

Spisak slika

SLIKA 2.1. TALASNI OBLICI NAPONA, STRUJE I FLUKSA TRANSFORMATORA POBUĐENOG PROSTOPERIODIČNIM NAPONOM U SLUČAJU KADA FEROMAGNETNO JEZGRO KARAKTERIŠE HISTEREZIS PRIKAZAN NA SLICI DESNO [VA14]	5
SLIKA 2.2. TALASNI OBLIK NAPONA NA IZLAZU INVERTORA [DI13].....	8
SLIKA 2.3. BLOK ŠEMA JEDNOFAZNOG PWM INVERTORA SA TALASNIM OBLICIMA SIGNALA NA ULAZU KOMPARATORA [DO00]	9
SLIKA 2.4. UPOREDNI DIJAGRAM ODNOSA SNAGA I BRZINE PREKIDANJA KOD POLUPROVODNIČKIH KOMPONENATA [VA06]	10
SLIKA 2.5. OSNOVNA KONFIGURACIJA TROFAZNOG INVERTORA NAPONA [DO00]	11
SLIKA 3.1. REDNA, PARALELNA REZONANCA	22
SLIKA 4.1. TALASNI OBLICI STRUJE (A) RAČUNARA, (B) MOTORA [IEPQC00].....	23
SLIKA 4.2. UTICAJ NELINEARNOG OPTEREĆENJA (POTROŠAČ) [IEPQC00].....	24
SLIKA 4.3. FAZNI DIJAGRAM NAPONA I STRUJE	26
SLIKA 4.4. TALASNI OBLIK STRUJE ZA A) FLUORESCENTNE LAMPE: FL, PCFL I ECFL B) USMERAČA: 3-DR, SMPS I PWM VSD	30
SLIKA 4.5. GEOMETRIJSKA INTEPRETACIJA VEKTORSKE I ARITMETIČKE PRIVIDNE SNAGE	32
SLIKA 5.1. KLASIFIKACIJA OPREME U SKLADU SA STANDARDOM IEC 61000-3-2[EPSMA10] .	38
SLIKA 5.2. SPECIJALNI OBLIK STRUJE ZA OPREMU KLASSE D	39
SLIKA 6.1. DETEKCIJA UZROČNIKA HARMONIKA U EE MREŽI NA MESTU PRIKLJUČENJA POTROŠAČA [XU03]	43
SLIKA 6.2. TEVENENOVO EKVIVALENTNO KOLO [XU03]	45
SLIKA 6.3. TEVENENOVO EKVIVALENTNO KOLO ZA ILUSTRACIJU CI METODA [LI04]	48

SLIKA 6.4. ODREĐIVANJE NAPONA U TAČKI M DUŽ VODA SA RASPODELJENOM REAKTANSOM jX_H [Li04]	50
SLIKA 7.1. PRIMER UTICAJA SPEKTRALNIH KOMPONENATA NAPONA I STRUJE NA SPEKTRALNE KOMPONENTE PRIVIDNE (U), AKTIVNE (P), REAKTIVNE (Q_B) I SNAGE IZOBLIČENJA (D_B)	58
SLIKA 7.2. GRAFIČKA INTERPRETACIJA ODNOSA IZMEĐU SNAGA P , Q_B , S , D_B I U KOD MONOFAZNOG NELINEARNOG POTROŠAČA	59
SLIKA 7.3. NIVO GREŠKE KOD LINERANOG REAKTIVNOG POTROŠAČA	62
SLIKA 7.4. GRAFIČKI PRIKAZ DOBIJENIH VREDNOSTI ZA SIMULIRANE POTROŠAČE A) HARMONIJSKA AKTIVNA SNAGA B) HARMONIJSKA REAKTIVNA SNAGA.....	64
SLIKA 7.5. A) BLOK ŠEMA B) FOTOGRAFIJA TESTNOG OKRUŽENJA.....	65
SLIKA 7.6. GREŠKA MERENJA STRUJE-ANSI STANDARD [EPRI10].....	68
SLIKA 7.7. DIJAGRAM POTROŠNJE PET RAZLIČITIH SIJALICA	69
SLIKA 7.8. DIJAGRAM POTROŠNJE A) KLIME U REŽIMU ZAGREVANJA B) RAČUNARA U TOKU PODIZANJA SISTEMA	70
SLIKA 8.1. BLOK DIJAGRAM SISTEMA ZA MERENJE SNAGE IZOBLIČENJA	74
SLIKA 8.2. TALASNI OBLIK POSLATOG BAJTA.....	76
SLIKA 8.3. BLOK ŠEMA MODULA ZA RAČUNANJE SNAGE IZOBLIČENJA.....	77
SLIKA 8.4. REZULTATI SIMULACIJA KOLA ZA RAČUNANJE SNAGE IZOBLIČENJA	78
SLIKA 8.5. BLOK ŠEMA KOLA ZA MNOŽENJE REALIZOVANOG PO ITERATIVNOM ALGORITMU ...	79
SLIKA 8.6. REZULTATI SIMULACIJA KOLA ZA MNOŽENJE	79
SLIKA 8.7. BLOK ŠEMA KOLA ZA KORENOVANJE [JOV05]	80
SLIKA 8.8. REZULTATI SIMULACIJE KOLA ZA KORENOVANJE	81
SLIKA 8.9. ALGORITAM INICIJALIZACIJE LCD DISPLEJA- 8 BITNI INTERFEJS[Hi99]	84
SLIKA 8.10. A) REZULTATI IMPLEMENTACIJE, B) GRAFIČKI PRIKAZ IMPLEMENTIRANOG KOLA..	85
SLIKA 8.11. PROCES KOMUNIKACIJE IZMEĐU ALTERE DE2 PLOČE I RAČUNARA	86
SLIKA 8.12. FOTOGRAFIJA SISTEMA ZA VERIFIKACIJU IMPLEMENTIRANOG SISTEMA	86
SLIKA 8.13. A) BLOK ŠEMA TESNOG OKRUŽENJA, B) FOTOGRAFIJA TESNOG OKRUŽENJA	87
SLIKA 8.14. KOLO ZA MERENJE ENERGIJE IZOBLIČENJA	88
SLIKA 8.15. REZULTATI SIMULACIJE KOLA ZA RAČUNANJE ENERGIJE IZOBLIČENJA	89
SLIKA 8.16. REZULTATI IMPLEMENTACIJE KOLA ZA MERENJE ENERGIJE IZOBLIČENJA	90
SLIKA 8.17. FOTOGRAFIJA SISTEMA ZA VERIFIKACIJU IMPLEMENTIRANOG SISTEMA ZA MERENJE SNAGE I ENERGIJE IZOBLIČENJA.....	91

Spisak tabela

TABELA 4.1. SPEKTAR STRUJE POTROŠAČA.....	29
TABELA 4.2. REZULTATI SIMULACIJA RAZLIČITIH DEFINICIJA ZA REAKTIVNU SNAGU PRI RAZLIČITIM POTROŠAČIMA	30
TABELA 5.1. OGRANIČENJA ZA NAPONSKE HARMONIKE PREMA STANDARDU IEEE. 519-1995	35
TABELA 5.2. OGRANIČENJA ZA STRUJNE HARMONIKE PREMA STANDARDU IEEE 519-1995	35
TABELA 5.3. OGRANIČENJA ZA NAPONSKE HARMONIKE PREMA STANDARDU. IEC 61000-2-2 I IEC 61000-2-4(ZA OPREMU KLASSE 2)	36
TABELA 5.4. OGRANIČENJA ZA NAPONSKE HARMONIKE PREMA STANDARDU IEC 61000-2-4 ZA OPREMU KLASSE 2.....	36
TABELA 5.5. OGRANIČENJA ZA STRUJNE HARMONIKE PREMA STANDARDU IEC 61000-3-2.....	39
TABELA 5.6. OGRANIČENJA ZA NAPONSKE HARMONIKE PREMA STANDARDU EN50160	41
TABELA 6.1. PREGLED POSTOJEĆIH <i>SINGLE-POINT</i> METODA ZA DETEKCIJU NELINEARNOG POTROŠAČA	42
TABELA 7.1. REZULTATI SIMULACIJE ZA RAZLIČITE POTROŠAČE	60
TABELA 7.2. SNAGA IZOBLIČENJA IZRAŽENA U PROCENTIMA PRIVIDNE SNAGE	62
TABELA 7.3. POREĐENJE NOVOG METODA SA NON-ACTIVE METODOM	63
TABELA 7.4. REZULTATI MERENJA RAZLIČITIH TIPOVA SIJALICA	66
TABELA 7.5. REZULTATI MERENJA RAZLIČITIH TIPOVA RAČUNARA I RAČUNARSKE OPREME	66
TABELA 7.6. REZULTATI MERENJA RAZLIČITIH TIPOVA KUĆNIH POTROŠAČA.....	67
TABELA 7.7. RASPORED UKLJUČENJA/ISKLUČENJA SIJALICA	69
TABELA 8.1. PROCES KONVERZIJE BCD FORMATA U HEX FORMAT I HEX FORMATA U BCD FORMAT.....	77

TABELA 8.2. IR/DR OPERACIJE.....	82
TABELA 8.3. LCD DISPLEJ INSTRUKCIJE	82
TABELA 8.4. REZULTATI MERENJA RAZLIČITIH TIPOVA SIJALICA.....	87

1 Uvod

U poslednje vreme svedoci smo rapidne promene karaktera potrošača priključenih na elektroenergetski sistem (EE) sistem, kako u industriji, tako i u domaćinstvima. Savremeni elektronski uređaji podigli su kvalitet života, a istovremeno doveli do značajnih ušteda u utrošenoj električnoj energiji. Masovna primena energetske efikasne elektronske opreme doprinela je uštedi u utrošenoj električnoj energiji i smanjenju emisije CO₂, ali stvorila je novi problem. Naime, većina ovih uređaja koristi AC/DC konvertore u čijem sastavu su prekidački regulatori napona. Tajna njihove efikasnosti leži u prekidačkom režimu rada tranzistora koje karakteriše izuzetno nelinearna strujno-naponska karakteristika. Praktično, oni se ponašaju kao nelinearni potrošači.

Nepovoljni uticaj nelinearnih potrošača u EE sistemima ogleda se u generisanju struje koja, osim osnovne komponente, sadrži i harmonike. Ova struja u interakciji sa impedansom mreže izaziva izobličenje napona. Poznato je da takva izobličenja mogu izazvati ozbiljne probleme u radu uređaja koji, po definiciji, očekuju napajanje iz izvora sa prostoperiodičnim naponom. Zbog toga se moraju preduzeti mere za prevenciju i smanjenje negativnih efekata na opremu sistema i ostale potrošače. Standard IEEE 519-1992 i standardi serije IEC 61000 predlažu ograničenja za svaki harmonik struje ili napona nezavisno od toga da li je izobličenje prouzrokovao potrošač ili EE sistem. Na bazi ovih standarda EE sistemi i uređaji projektuju se sa ciljem da rade sa ograničenjima koja ih ispunjavaju.

Standard IEEE 519-1992 i standardi serije IEC 61000 samo preciziraju dozvoljena ograničenja. Da bi se kontrolisalo poštovanje standarda potrebno je razviti nove metode koje će omogućiti identifikaciju izvora harmonijskog izobličenja. Takođe je neophodno obezbediti

i konstantno praćenje stepena harmonijskih izobličenja. Uspešno nadgledanje podrazumeva merenje „zagađenosti“ sistema harmonicima i identifikovanje lokacije njihovog nastanka. U tom cilju potrebno je postojeću mernu opremu osposobiti da registruje vrednosti parametra EE mreže u prisustvu harmonika, a ne samo vrednosti osnovnog harmonika što je trenutni slučaj kod komercijalnih brojila.

Postojeća rešenja za ovu namenu veoma su skupa i komplikovana za implementaciju u elektrodistributivni sistem. Takođe nijedno od tih rešenja ne nudi mogućnost identifikacije lokacije izvora zagađenja mreže na nivou pojedinog potrošača (brojila), već samo daju informaciju da na nekom izvodu transformatorske stanice postoje harmonijska izobličenja. Alternativna rešenja baziraju se na merenju ukupnog harmonijskog izobličenja struje i napona (*THD, Total Harmonic Distortion*). Iako ona daju uvid u stepen izobličenja, na osnovu tih podataka može se tek posredno odrediti uticaj izobličenja na ceo sistem jer treba uvrstiti i informaciju o prividnoj snazi. Zbog toga autor ove teze predlaže korišćenje novog metoda za identifikaciju izvora harmonijskih izobličenja na elektroenergetskoj mreži. Predloženi metod karakteriše se jednostavnošću, a samim tim i mogućnošću da bude implementiran na postojećim savremenim elektronskim brojilima. Zavisno od tipa postojećeg brojila u koji se ugrađuje, modifikacija može da se obavi na softverskom nivou ili na nivou hardvera. Hardverska modifikacija zasniva se na zameni namenskog integrisanog kola novim kolom sa ugrađenom funkcijom registrovanja snage izobličenja. Alternativno, imajući u vidu da nedavno zamenjena brojila nemaju ovu opciju, predlaže se i rešenje u obliku dodatnog uređaja koji se priključuje na postojeće brojilo. Nezavisno od načina implementacije ove ideje u standardna elektronska brojila, njenom primenom distributer električne energije dobija informaciju o lokaciji izvora harmonijskih izobličenja neposredno na nivou potrošača koji ih je izazvao. Modifikacija na softverskom nivou moguća je kod najsavremenijih brojila koja registruju, osim aktivne, i reaktivnu i prividnu snagu.

Predložena disertacija sadrži sledeće celine:

- Pregled uzročnika nelinearnih izobličenja u EE mreži;
- Sistematizacija problema izazvanih postojanjem harmonika u EE mreži. Naime, po definiciji, elektroenergetsku mrežu karakteriše prostoperiodični napon frekvencije 50Hz (60Hz). Tome su prilagođene sve komponente sistema počev od generatora i transformatora do kablova, osigurača i merne opreme. Jednostavno, one nisu projektovane da ispravno funkcionišu sa nesimetričnim talasnim oblicima napona i struje. Zbog toga su komponente sistema osetljive na postojanje harmonika u EE

mreži do mere koja smanjuje njihov životni vek, a u ekstremnim slučajevima i ugrožava pouzdanost sistema;

- Detaljan opis matematičke podrške izračunavanju parametara električne energije u prisustvu harmonika;
- Pregled trenutno važećih standarda i regulativa kojima se definišu ograničenja vezana za EE mrežu u prisustvu harmonika;
- Opis postojećih metoda za identifikaciju izvora harmonijskog zagađenja, njihove prednosti i nedostaci;
- Predlog novog metoda za identifikaciju izvora harmonijskog zagađenja na elektroenergetskoj mreži zasnovan na primeni standardnih elektronskih brojila.

Predloženi metod biće verifikovan

- simulacijama na funkcionalnom nivou,
- merenjima uz primenu standardnog elektronskog brojila i personalnog računara,
- implementacijom predloženog modela na FPGA. Realizovan prototip predstavlja hardversko proširenje standardnih elektronskih brojila. Korišćenjem pomenutog prototipa omogućićemo distributeru električne energije mogućnost identifikacije svakog nelinearnog potrošača na mestu njegovog priključivanja na mrežu.

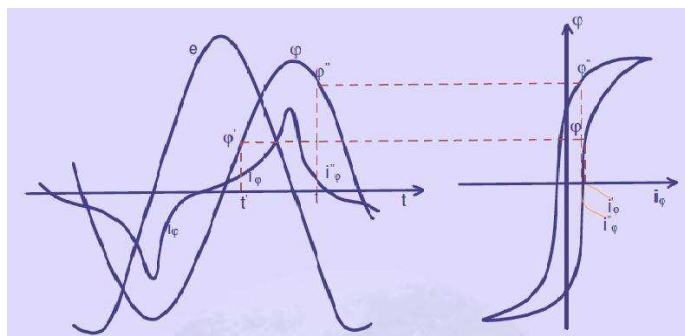
Na kraju, funkcionalnost predloženog rešenja biće testirana merenjima na različitim nelinearnim i linearnim monofaznim potrošačima uz pomoć merne grupe iz proizvodnog programa firme EWG iz Niša.

2 Izvori harmonijskih izobličenja

Postoje mnogobrojni izvori harmonijskih izobličenja, koji bi mogli da se svrstaju u tri grupe [Lu01]. Prvu grupu čine uređaji/oprema koja se koristi u industriji i domaćinstvu. Drugoj grupi pripada oprema koja se koristi u sistemu prenosa električne energije (transformatori, statički kompenzatori reaktivne energije i dr.), dok bi treća grupa bila rezervisana za sinhronne generatore. Klasifikacija izvora harmonijskih izobličenja može da se uradi i na osnovu napona na koji je priključena odgovarajuća oprema i to na: niskonaponsku, srednjenaponsku i visokonaponsku grupu. U narednim odeljcima biće dat pregled najčešćih uzročnika nelinearnih izobličenja u elektroenergetskoj mreži.

2.1 Transformatori

Za realizaciju transformatora koriste se magnetni materijali kod kojih je područje rada veoma blizu ili se čak nalazi u nelinearnoj oblasti. Glavni razlog za ovakav izbor radne tačke magnetnih materijala je smanjenje dimenzije jezgra transformatora, a samim tim i ekonomska isplativost. Usled magnetne nelinearnosti karakteristične za feromagnetne materijale, jezgro transformatora ponaša se kao izraziti nelinearni potrošač. Na Sl. 2.1 prikazan je talasni oblik napona i struje magnetizacije transformatora [Va14]. Spektralnom analizom struje potvrđuje se da osim osnovne komponente koja prati promenu prostoperiodičnog napona postoje i harmonici višeg reda pri čemu dominira treći harmonik. Kod trofaznih transformatora koji su realizovani kao veza trougao ili zvezda bez neutralnog voda, prostiranje harmonika trećeg reda je onemogućeno.



Slika 2.1. Talasni oblici napona, struje i fluksa transformatora pobuđenog prostoperiodičnim naponom u slučaju kada feromagnetno jezgro karakteriše histerezis prikazan na slici desno [Va14]

2.2 Generatori

Obrtne mašine predstavljaju izvor harmonika kada distribucija žlebova u kojima se smestaju namotaji ne prati u potpunosti sinusnu funkciju, zbog čega je i magnetnopolobudna sila *mmf* (*Magnetomotive force*) izobličena. Kod trofaznih rotirajućih mašina namotaji su tako realizovani da su inteziteti 5-og odnosno 7-og harmonika značajno smanjeni. Štaviše trofazni generatori se uobičajeno vezuju preko transformatora kod koga su namotaji povezani u trougao i na taj način se blokira proticanje harmonika struje trećeg reda. Generalno gledano, uticaj harmonika koji nastaju kod obrtnih mašina zanemarljiv je u odnosu na harmonike koje prouzrokuju drugi nelinearni potrošači. Ovde su navedeni samo da bi se kompletirao spisak mogućih uzročnika harmonijskih izobličenja u EE mreži.

2.3 Elektrolučne peći

Elektrolučne peći se koriste u procesu topljenja i obrade metala. Njihova velika efikasnost u procesu dobijanja kvalitetnog čelika dovodi do njihove široke rasprostranjenosti. One predstavljaju velike, izrazito nelinearne potrošače, a samim tim i najznačajniji izvor harmonika u EE sistemu. Tokom procesa topljenja metala struja koju povlače ove peći je izrazito izobličena, sadrži harmonike i inter-harmonike. Dominantne komponente ove struje su harmonici od 2-og do 7-og reda [Pr12]. Vrednost amplitude generisanog harmonika nije predvidljiva veličina, štaviše može da varira usled samog procesa topljenja metala. Naime, ogromna je razlika između vrednosti harmonika generisanih u procesu topljenja gvožđa i procesa obrade i prečišćavanja. Prilikom punjenja rezervoara rastopljenom smesom, luk postaje stabilniji a samim tim i struja postaje manje izobličena. Elektrolučne peći predstavljaju najnepoželjniji potrošač koji može biti priključen na EE mrežu zato što

izazivaju faznu nebalasnost, harmonike, fluktuaciju napona (fliker) i mogućnost pojave rezonance.

2.4 Statički VAR kompenzatori

Statički VAR kompenzatori (*SVC, Static VAR Compensator*) su trofazni balasni uređaji koji koriste tiristore (*SCR, Silicon Controlled Rectifier*) za kontrolu trenutka i vremena priključenja odgovarajuće impedanse (kondenzator, induktivnost) kako bi se postigao željeni napon na priključcima. Osnovna konfiguracija SVC sastoji se od: tiristorske kontrolisane induktivnosti (*TCR, Thyristor Controlled Reactor*), tiristorske kontrolisane kapacitivnosti (*TSC, Thyristor Switched Capacitor*) i filtara. Na osnovu izmerene vrednosti reaktivne struje određuje se ugao vođenja tiristora i smer toka snage, odnosno da li SVC absorbuje ili isporučuje potrebnu količinu reaktivne snage.

2.5 AC/DC pretvarači

AC/DC pretvarači predstavljaju elektronski sklop koji konvertuje naizmenični napon u jednosmerni. Osnovni sastavni delovi AC/DC pretvarača su: transformator, usmerač, filter i upravljački blok koji postoji samo u slučajevima kada je usmerač realizovan uz pomoć tiristora. Transformator služi da prilagodi nivo naizmeničnog napona na potrebnu vrednost. Osnovna uloga usmerača je pretvaranje naizmenične (AC) struje/napona u jednosmernu (DC). U tom smislu on je sastavni deo AC/DC pretvarača zbog čega mnogi pod usmeračem podrazumevaju kompletan AC/DC pretvarač. Najčešće se u usmeračima koriste poluprovodničke diode ili tiristori. Ukoliko se koriste tiristori onda se ti usmerači zovu regulisani, dok su usmerači sa diodama neregulisani. Da bi se smanjila vrednost promenljive komponente, odnosno talasnost izlaznog napona on se dodatno filtrira. Filtri su obično veoma jednostavni i sastoje se od kondenzatora i/ili prigušnice. Kada su struje potrošača male koriste se kapacitivni filtri dok se za velike struje opterećenja koriste induktivni filtri[Do00].

Usmerači se mogu klasifikovati prema:

- načinu korišćenja energije iz naizmeničnog izvora (jednostrani i dvostrani),
- načinu priključenja na naizmeničnu mrežu (monofazni i trofazni) i
- karakteru izlaznog napona i stepenu upravljivosti [Do00].

U ovom odeljku pominjemo realizacije sa stanovišta njihovog uticaja na pojavu harmonijskih izobličenja.

U odnosu na način korišćenja energije AC izvora usmerači mogu biti polutalasni (jednostrani) i punotalasni (dvostrani).

Jednostrani usmerač koristi samo jedan usmerački element (diodu ili tiristor) koji vodi samo tokom jedne poluperiode napona sekundara. Zbog toga se na izlazu dobija povorka polutalasnih impulsa razdvojenih pauzom u trajanju jedne poluperiode. To znači da osnovna pulsirajuća komponenta ima istu frekvenciju kao i mrežni napon. Naravno, usled velikog izobličenja izlaznog napona, prisutni su i viši harmonici. Čak i posle filtriranja na izlazu jednostranog usmerača i dalje je talasnost izlaznog napona dosta velika tako da imaju ograničenu primenu [Do00].

Za razliku od jednostranih, kod dvostranih usmerača usmeravaju se obe poluperiode. Na izlazu se dobija kontinualna povorka polutalasnih impulsa istog polariteta, tako da osnovna pulsirajuća komponenta ima frekvenciju dvostruko veću od frekvencije monofaznog mrežnog napona.

Za velike potrošače koji se koriste u industriji preporučljivo je korišćenje trofaznih usmerača. Oni se najčešće realizuju kao dvostrani. Trofazni mostni usmerač se često u literaturi zove i 6-pulsni zato što izlazni napon čini šest segmenata linijskog napona u toku jedne periode. Praktično se izlazni napon, u toku jedne periode, sastoji od šest vrhova sinusoide tako da je njegova talasnost mala, a srednja vrednost skoro jednaka maksimalnoj vrednosti linijskog napona. Zato je osnovna frekvencija izlaznog napona šest puta veća od frekvencije linijskog napona. Ovo je jedna od osnovnih prednosti trofaznih u odnosu na monofazne usmerače. Pulsirajuća komponenta izlaznog napona javlja se na višim frekvencijama i manjih je amplituda nego kod monofaznih, pa se lakše filtriraju. Kod 6-pulsnih usmerača pojavljuju se sledeći harmonici ulaznih struja: 5, 7, 11, 13, 17, 19,... amplituda harmonika trećeg reda jednaka je nuli. Amplituda prvog harmonika (osnovne komponente) iznosi $I_1 = 0.78 \cdot I_{AVG}$, dok se amplitude ostalih harmonika računaju kao $I_h = I_1 / n$, gde je n red harmonika (5, 7, 11, 13,...) [Do00].

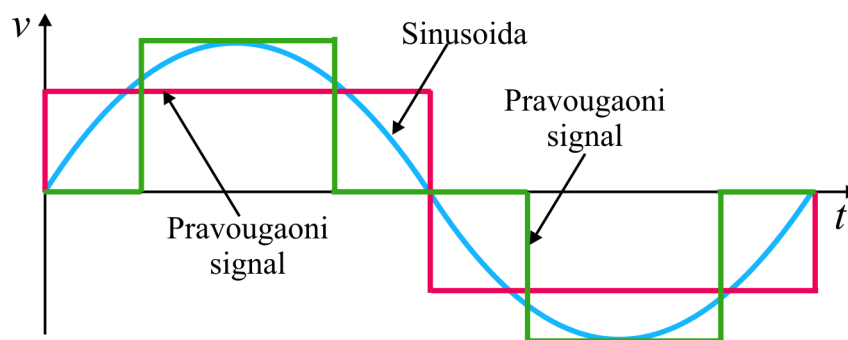
Usmerači višeg reda (12-pulsni, 18-pulsni, 24-pulsni,...) sačinjeni su od dva ili više 6-pulsnih usmerača koji su povezani preko paralelnih transformatora kod kojih je pažljivo određena fazna razlika između sekundara [Wa01]. Generalno p -pulsni usmerač može biti konstruisan od $p/6$ 6-pulsnih usmerača koji su povezani preko sekundara koji ima $(p/6 + 1)$

namotaja transformatora. Fazna razlika između sekundara je $360/p$. Generalno p -pulsni usmerač generiše harmonike $h = pn \pm 1$, pri čemu je $p = 6, 12, 18, \dots$, a $n = 1, 2, 3, 4, \dots$

2.6 DC/AC pretvarači

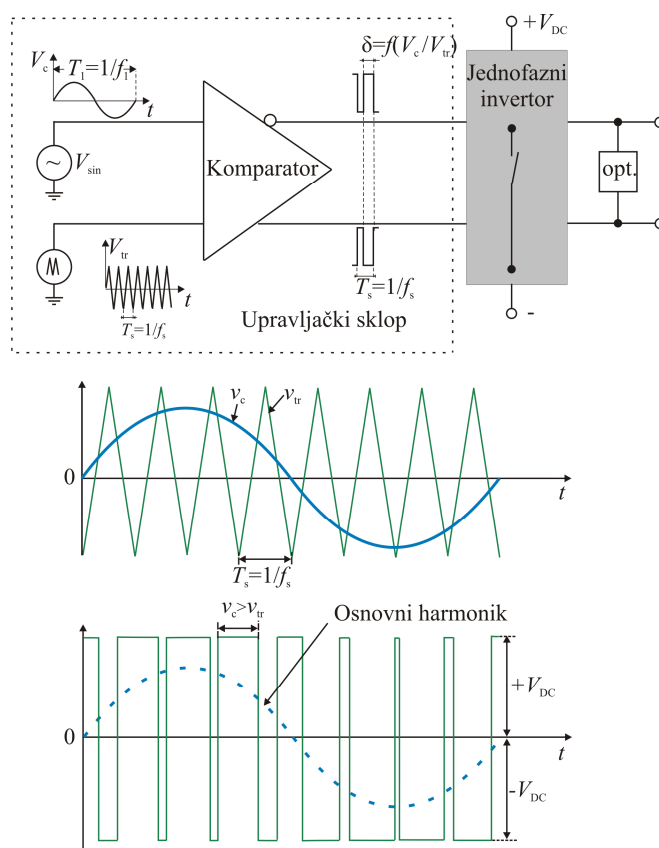
Pomoću DC/AC pretvarača konvertuje se jednosmerni napon (akumulatorske baterije, DC generatori, fotonaponski izvori i sl.) u naizmenični. Zbog svoje osnovne funkcije često se nazivaju invertorima. Postoje dva osnovna problema u DC/AC konverziji. Prvi predstavlja značajno podizanje vrednosti napona sa DC nivoa od nekoliko volti do AC nivoa (230V). Drugi se odnosi na transformaciju jednosmernog napona u sinusni talasni oblik. Prema redosledu rešavanja ovih problema razlikuju se dva pristupa u realizaciji DC/AC pretvarača. Prema jednom, najpre se podigne vrednost DC napona uz pomoć DC/DC podizača napona do napona elektroenergetske mreže 230V (120V). Tako dobijena DC vrednost napona se, zatim, uz pomoć impulsne širinske modulacije (*PWM, Pulse Width Modulation*) konvertuje u AC vrednost. Drugi pristup podrazumeva da se najpre konvertuje DC napon u AC, pa da se zatim, uz pomoć transformatora taj napon podiže na željenu vrednost 230V (120V).

Konverzija u sinusni talasni oblik izlaznog napona može da se obavi sa većom ili manjom preciznošću. Kao što se vidi sa Sl. 2.2 talasni oblik napona može biti stepenast ili pravougaoni, odnosno složeno periodičan, ali sa dominantnom osnovnom frekvencijom. Širina impulsa na izlazu invertora podešava se tako da odgovara efektivnoj vrednosti sinusnog napona. Invertori kod kojih napon na izlazu nije sinusni mnogo su jeftiniji od onih kod kojih je napon na izlazu sinusna funkcija. Njihov osnovni nedostatak jeste veliki sadržaj harmonika značajnih amplituda. Primena izobličenog napona napajanja može da izazove oštećenje ili neispravan rad osetljive opreme kao što je medicinska oprema i dr. Za napajanje ovakve opreme koriste se invertori koji na svom izlazu daju signal što približnije čistoj sinusoidi.



Slika 2.2. Talasni oblik napona na izlazu invertora [Di13]

Za dobijanje sinusnog napona na izlazu invertora određene amplitude i frekvencije koristi se PWM. Za kreiranje PWM signala mogu da se koriste analogne komponente, mikrokontroleri ili specijalna PWM integrisana kola. Signal koji se dobija na izlazu PWM koristi se za kontrolu prekidača koji se nalaze u kolu invertora. Da bi se dobio PWM signal potrebno je: kolo oscilatora koje generiše kontrolni sinusni signal željene frekvencije 50Hz (60Hz), kolo koje generiše trougaoni oblik signala tj. noseći signal i analogni komparator sa komplementarnim izlazima. Blok šema jednofaznog invertora sa PWM i talasni oblici signala na ulazu komparatora prikazani su na Sl. 2.3. Kao što je prikazano na Sl. 2.3 poredeći vrednost osnovnog sinusnog i trougaonog nosećeg signala, komparator na izlazu generiše pravougaone impulse različite širine. Oni služe da kontrolišu rad prekidača u invertoru.



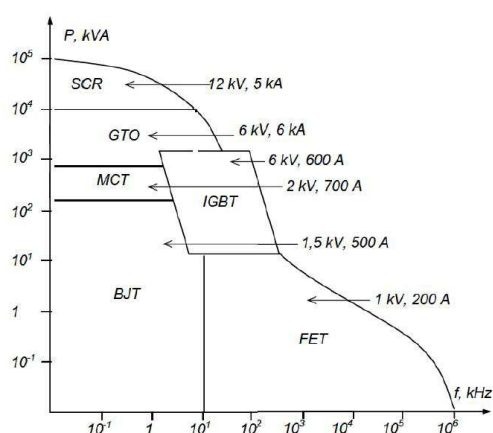
Slika 2.3. Blok šema jednofaznog PWM invertora sa talasnim oblicima signala na ulazu komparatora [Do00]

Kao prekidački elementi u kolu invertora mogu da se koriste MOSFET tranzistori snage, IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) ili tiristori. Tiristori se koriste kod invertora kod kojih je frekvencija uključenja/isključenja prekidača manja od 100Hz. Kod PWM invertora kao prekidači koriste se MOSFET tranzistori ili IGBT. Iako su po specifikacijama obe komponente veoma slične, svaka ponaosob ima svoje prednosti i nedostatke.

IGBT tranzistori koriste se u slučajevima kada se zahtevaju visoki naponi, naponi iznad 600V i velike struje. Izlazna snaga invertora kod kojih se koriste IGBT tranzistori uglavnom je preko 5kW. Dodatna prednost IGBT tranzistora u odnosu na MOSFET jeste i njihova izuzetna temperaturna stabilnost. Oni rade bez problema čak i na temperaturama iznad 100 °C. Glavni nedostatak ovih tranzistora predstavlja nekontrolisani deo struje koja se javlja prilikom isključenja. Naime prilikom isključenja IGBT, struja ne može trenutno da padne na nulu. Usled toga dolazi do povećanja snage gubitaka tokom zakočenja tranzistora. IGBT tranzistori nemaju visoku prekidačku frekvenciju pa se zbog toga koriste na frekvencijama ispod 29kHz [Cr11].

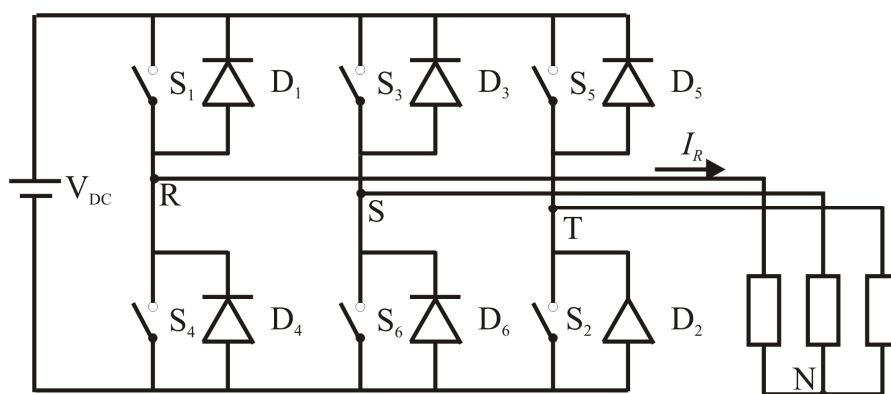
MOSFET tranzistori snage imaju veoma visoku prekidačku frekvenciju i mogu da se uključuju i isključuju sa frekvencijom signala koja je veća od 200kHz. Mana ovih tranzistora je nemogućnost korišćenja u situacijama kada su potrebne velike snage. MOSFET-ovi se uglavnom koriste kod invertora čiji je izlazni napon manji od 250V i izlazna snaga manja od 500W. Zbog malih gubitaka MOSFET-ovi se koriste kad god je to moguće.

Uporedni dijagram odnosa poluprovodničkih prekidačkih komponenti snaga i njihove prekidačke brzine dat je na Sl. 2.4. [Va06].



Slika 2.4. Uporedni dijagram odnosa snaga i brzine prekidanja kod poluprovodničkih komponenti [Va06]

Invertori se, takođe, mogu klasifikovati na jednofazne i trofazne. Osnovna konfiguracija trofaznog invertora napona prikazana je na Sl. 2.5. Njihovom kombinacijom mogu se realizovati invertori višeg reda.



Slika 2.5. Osnovna konfiguracija trofaznog invertora napona [Do00]

Kod trofaznih invertora osnovni harmonik izlaznog napona je na frekvenciji prekidača. Harmonici trećeg reda i parni harmonici potisnuti su, tako da postoje samo neparni harmonici $h = 6n \pm 1$, gde h označava red harmonika, a n može da bude bilo koji prirodni broj (1,2,3...). Invertori višeg reda (12-pulsni, 18-pulsni, 24-pulsni,...) sačinjeni su od dva ili više 6-pulsnih invertora koji su povezani preko paralelnih transformatora kod kojih je pažljivo određena fazna razlika između sekundara. Generalno, p -pulsni inverter generiše harmonike reda $h = pn \pm 1$, pri čemu je p ($p=6, 12, 18...$) red invertora, a $n=1, 2, 3, 4...$. Kod invertora višeg reda manje su amplitude harmonika i nalaze se na višim frekvencijama tako da se lako uklanjaju filtriranjem. Kod trofaznih PWM invertora harmonici se javljaju na frekvencijama koje su jednake celobrojnom umnošku frekvencije nosećeg signala. Što je frekvencija nosećeg signala veća problem filtriranja je manji. Maksimalna frekvencija nosećeg signala ograničena je dinamičkim gubicima na poluprovodničkim komponentama.

2.7 Ciklokonvertori

Pretvarači koji direktno pretvaraju naizmenični napon jedne frekvencije/amplitude u naizmenični napon druge frekvencije/amplitude nazivaju se ciklokonvertorima. Za realizaciju ciklokonvertora potrebna su dva pretvarača koja su povezana antiparalelno i odgovarajuće kolo koje će upravljati radom prekidača (tiristora, tranzistora...).

Zavisno od odnosa frekvencija ulaznog i izlaznog napona postoje ciklokonvertori kod kojih je izlazna frekvencija manja od ulazne i ciklokonvertori kod kojih je izlazna frekvencija veća od ulazne.

Ciklokonvertori kod kojih je frekvencija izlaznog napona manja od frekvencije ulaznog napona nazivaju se *ciklokonvertori sa prirodnom komutacijom* (NCC, *Naturally Commutated Cycloconverter*).

Frekvencija napona na izlazu NCC može da se kreće u granicama od 0 do $2/3$ frekvencije ulaznog napona. Za dobijanje trofaznog izlaznog napon potrebno je šest 6-pulsnih ili šest 3-pulsnih pretvarača. Broj tiristora pri ovakvoj konfiguraciji iznosi 36 odnosno 18. Upravljanje svakim tiristorom ponaosob, čini ove pretvarače dosta komplikovanim. Za razliku od ovih ciklokonvertora sa faznom regulacijom postoji jednostavnija realizacija takozvanih anvelopnih ciklokonvertora. Da bi se dobila frekvencija koja je niža od frekvencije ulaznog napona, na izlazu ovog kola naizmenično se propušta po n pozitivnih i n negativnih poluperioda. Anvelopne ciklokonvertore karakterišu veća harmonijska izobličenja od ciklokonvertora sa faznom regulacijom tako da zahtevaju primenu boljih filtera na izlazu[Do00].

Ciklokonvertori kod kojih je frekvencija izlaznog napona veća od frekvencije ulaznog nazivaju se ciklokonvertori sa forsiranom komutacijom (*FCC, Forced Commutated Cycloconverter*). Za realizaciju ovih ciklokonvertera koriste se snažni prekidački tranzistori.

Generalno, napon na izlazu ciklokonvertora je dosta izobličen, odnosno sadrži veći broj harmonika. Harmonike višeg reda filtriraju induktivnosti namotaja kod motora, zbog toga je struja koja protiče kroz namotaje motora manje izobličena [Oz14]. Preostali harmonici koji nisu filtrirani izazivaju neželjene efekte prilikom rada motora, o čemu će biti više reči u narednom poglavlju.

U kojoj meri će izlazni napon ciklokonvertora biti izobličen prvenstveno zavisi od načina realizacije i od vrste korišćenih pretvarača. Ukoliko je korišćen 6-pulsn pretvarač onda je napon na izlazu manje izobličen nego u slučaju kada je korišćen 3-pulsn pretvarač. Štaviše ukoliko je frekvencija izlaznog napona bliža vrednosti frekvenciji ulaznog napona, izlazni napon je više izobličen. Na izobličenost izlaznog napona takođe utiče faktor snage i frekvencija kontrolišućih signala.

3 Problemi izazvani postojanjem harmonika u elektroenergetskoj mreži

Sa povećanjem broja nelinearnih uređaja koji se koriste kao potrošači električne energije, raste i obim problema koje harmonici unose u EE mreži. Postojanje harmonika u EE mreži negativno utiče na: generatore, transformatore, asihrone motore, pogone promenljive brzine, osvetljenje, izvore neprekidnog napajanja (*UPS, Uninterruptible Power Supply*), lokalnu računarsku mrežu (LAN), kablove, opremu za merenje, osigurače, releje i kondenzatorske baterije. U ovom poglavlju biće dat pregled negativnih efekata harmonijskih izobličenja u EE mreži na pojedine tipove priključenih potrošača.

3.1 Generator

Usled postojanja harmonika napona i struje dolazi do povećanog zagrevanja generatora. Ono je posledica porasta gubitaka u gvožđu i bakru. Intenzitet zagrevanja zavisi od frekvencije i amplitude viših harmonika [ABS06].

Gubici koji se javljaju u gvožđu mogu da se podele na gubitke usled histerezisa i na gubitke usled vrtložnih struja. Gubici usled histerezisa nastaju usled nelinearnosti između gustine magnetnog fluksa/magnetnog polja i ciklične promene polja u magnetnom kolu. Oni se ispoljavaju pri svakoj promeni smera struje kroz namotaje, odnosno 100 puta u sekundi za frekvenciju od 50Hz. Zato su gubici veći na višim frekvencijama. Osim toga, gubici usled histerezisa proporcionalni su i kvadratu magnetnog fluksa.

Proticanje vrtložnih struja izaziva gubitke proporcionalne kvadratu frekvencije. Veza između gubitaka usled vrtložnih struja i frekvencije data je sledećom formulom[Wa01]:

$$P_{EC} = P_{EF} \sum_{h=1}^{h_{\max}} I_h^2 h^2, \quad (3.1)$$

gde su:

P_{EC} = ukupni gubici usled vrtložnih struja

P_{EF} = gubici usled vrtložnih struja pri max opterećenju na osnovnoj frekvenciji

I_h = efektivna, odnosno srednjekvadratna ili RMS (*Root Mean Square*) vrednost struje h -tog harmonika (u relativnim jedinicama)

h = red harmonika

Osim gubitaka koji se pojavljuju u gvožđu, postoje gubici u bakru. Snaga koja se gubi usled proticanja struje kroz namotaje generatora jednaka je:

$$P_{CU} = I_{RMS}^2 R, \quad (3.2)$$

gde P_{CU} , I_{RMS} i R označavaju ukupne gubitke u bakru, RMS vrednost struje koja protiče kroz namotaje generatora i ukupnu otpornost namotaja generatora respektivno. Gubici u bakru, takođe, zavise i od površinskog efekta (*skin effect*), odnosno od osobine naizmenične struje da teče samo po površini provodnika. Što je frekvencija viša, struja koristi manji poprečni presek bakra, tako da otpornost raste. Stoga, ukoliko kroz namotaje protiču harmonici višeg reda, onda su gubici koji nastaju u bakru veći saglasno sa (3.2).

3.2 Transformator

Gubici koji se javljaju kod transformatora značajno su uvećani usled izobličenja struje napajanja. Kao i kod generatora, gubici kod transformatora nastaju u gvožđu (usled histerezisa i vrtložnih struja) i u bakru [Wa01, ABS06]. Za računanje gubitaka u gvožđu usled vrtložnih struja koristi se jednačina (3.1) dok se za računanje gubitaka u bakru koristi (3.2). Gubici u bakru izazivaju dodatno zagrevanje transformatora a samim tim dolazi do degradacije karakteristika izolacije namotaja. Do dodatnih problema može doći i usled moguće rezonance između induktivnosti namotaja transformatora i kondenzatora koji se koristi kod transformatorskih stanica za poboljšanje faktora snage [Wa01].

Kod transformatora realizovanih u konfiguraciju trougao-zvezda, harmonici trećeg reda i njegovi umnošci (3, 9, 15, ...) su blokirani u kolu primara i izazivaju dodatno grejanje namotaja transformatora [Wa01]. Opšte je poznato da struja kroz neutralni provodnik trofaznog sistema treba da bude jednaka nuli. Ovo pravilo važi samo u slučaju kada su potrošači čisto linearnog karaktera. Ukoliko potrošači nisu linearni, kroz neutralni provodnih

protiču harmonici trećeg reda (3, 9, 15, 21,...). Usled toga, struja kroz neutralni provodnik može da dostigne vrednost do 173% vrednosti fazne struje [ABS06]. Ovako visoka vrednost struje kroz neutralni provodnik može da izazove pregrevanje transformatora, a ponekad može doći i do pregrevanja ili čak prekida neutralnog provodnika.

Imajući u vidu značaj transformatora u EE sistemu i rasprostranjenost nelinearnih potrošača kako u domaćinstvu tako i u industriji, preduzimaju se mere zaštite transformatora. Najjednostavniji način prevazilaženja problema je korišćenje transformatora veće izlazne snage nego što su priključeni potrošači. Ukoliko to nije slučaj razmatra se rasterećivanje transformatora. Drugi ekonomičniji metod je korišćenje specijalno dizajniranih transformatora za napajanje nelinearnih potrošača, takozvani “*K-factor*” odnosno “*K-rated*” transformatora kod kojih su gubici usled postojanja harmonika manji u odnosu na obične transformatore [ABS06].

3.3 Asihroni motor

Izobličena struja povećava nivo gubitaka koji se javljaju kod asihronih motora, na sličan način kao kod transformatora, i izaziva dodatno zagrevanje. Do dodatnog zagrevanja dolazi usled povećanja gubitaka u bakru i gvožđu (gubici usled vrtložnih struja i histerezisa) u namotajima statora, rotora i magnetnom kolu rotora. Ovi gubici se dodatno povećavaju usled površinskog efekta, naročito na frekvencijama iznad 300Hz. Za računanje gubitaka usled vrtložnih struja i gubitaka u bakru koriste se formule (3.1) i (3.2).

Pregrevanje motora značajno utiče na smanjenje njegovog životnog veka. Svako povećanje temperature za 10°C iznad nominalne temperature rada utiče na redukciju životnog veka motora, koja može biti i do 50% [ABS06]. Spektar harmonika koji postoje u talasnom obliku struje takođe igra veoma značajnu ulogu kod asihronih motora. Osim harmonika trećeg reda postoje “pozitivni” (7, 13, 19, ...) i “negativni” harmonici (5, 11, 17, ...). Pozitivni harmonici struje statora utiču na kreiranje magnetnog polja u smeru rotacije rotora motora, dok negativne sekvence utiču na stvaranje magnetnog polja koje je u suprotnom smeru od magnetnog polja osnovne frekvencije. Usled interakcije ova dva magnetna polja dolazi do smanjenja brzine obrtanja rotora motora. Da bi se održala konstantna brzina obrtanja rotora, neophodna je veća amplituda struje osnovne komponente koja pak izaziva dodatne gubitke u bakru. Harmonici trećeg reda ne utiču na brzinu obrtanja rotora. Njihov uticaj ogleda se kroz povećanu disipaciju toplote.

3.4 Pretvarači za pogone promenljive brzine

Pretvarači za pogone promenljive brzine (VSD, *Variable Speed Drivers*) koriste se za upravljanje brzinom obrtanja elektromotora. Sadrže poluprovodničke komponente snage za usmeravanje naizmeničnog ulaznog napona u jednosmernu vrednost. DC napon na izlazu usmerača sadrži određeni nivo harmonika. Nivo harmonika zavisi pre svega od načina realizacije usmerača kao što je objašnjeno u poglavlju 2.5. Iako sami usmerači stvaraju harmonike koji dalje kruže EE mrežom, njihov rad može zavisiti od nivoa harmonika koji je prisutan na ulaznoj strani usmerača. Osim negativnih efekata koji harmonici izazivaju, oni mogu dovesti do smanjenja stresa kojim su opterećeni usmerači usled smanjenja amplitude napona. Naime usled prisustva harmonika može doći do “zasecanja” vrha talasnog oblika napona, tj vrednost amplitude napona biće nešto manja nego što bi bila u slučaju kada je napon čista sinusna funkcija. Ovakav oblik izobličenja se naziva *flat-topping*.

Jednofazni 2-pulsni PWM drajveri bez induktivnosti imaju visok nivo izobličenja izlazne struje, THD_I iznosi između 130 i 140% [ABS06]. Značajnu komponentu ovako izobličene struje sačinjavaju harmonici trećeg reda koji se kumulativno sabiraju u neutralnom provodniku. Struja neutralnog provodnika može da dostigne vrednost od 173% vrednosti fazne struje [ABS06]. Ovako visoka vrednost struje neutralnog voda može da se reflektuje na DC strani usled čega dolazi do pregrevanja kondezatora za filtriranje.

Kod 2-pulsnih i 6-pulsnih jednosmernih pretvarača malih snaga koji nemaju komutacione induktivnosti ili izolovane transformatore može doći do pogrešnog uključanja usled višestrukog prolaska kroz nulu ili visokog nivoa izobličenja struje. S druge strane kod drajvera veće izlazne snage, snage preko 10 HP/7.5 kW, koji obično imaju komutacione induktivnosti ili izolovane transformatore, smanjena je verovatnoća pogrešnog uključanja SCR. Pogrešna uključanja SCR mogu izazvati pregorevanje osigurača ili isključenje automatskog prekidača.

3.5 Osvetljenje

Jedan od najuočljivijih efekata harmonika na opremu koja se koristi za osvetljenje je treperenje (*flicker*). Osvetljenje je veoma osetljivo na promenu RMS vrednosti napona, tako da čak i male promene napona od 0.25% ljudsko oko može da registruje [ABS06]. Treperenje osvetljenja zavisi od:

- vrste sijalica koje se koriste za osvetljenje (sijalica sa užarenim vlaknom, fluorescentna ili sijalica sa pražnjenjem visokog intenziteta),
- amplitude napona,
- frekvencije napona,
- osvetljenosti prostorije koja se osvetljava ,
- faktora pojačanja sijalice koji se definiše kao odnos promene količine osvetljenja u zavisnosti od promene napona mreže.

Klasične sijalice sa užarenim vlaknom mnogo su osetljivije na promenu napona napajanja. Kod fluorescentne lampe sa elektromagnetnom prigušnicom, treperenje osvetljenja je izraženije nego u slučaju kada se koristi elektronska prigušnica.

Osim promena u naponu napajanja koje rezultuju treperenjem svetlosti, nagla promena vrednosti amplitude napona napajanja (*notching*) takođe može uticati na intenzitet svetlosti koji se dobija iz odgovarajuće sijalice. Ukoliko je ovaj fenomen značajno zastupljen, potrebno je uraditi posebnu zaštitu sijalica.

Unutar fluorescentnih sijalica postoji kondenzator za korekciju faktora snage koji sa induktivnostima čini paralelno oscilatorno kolo. Pri određenim harmonijskim frekvencijama može doći do pojave paralelne rezonance i do pregorevanja te sijalice. Ovaj efekat može da se izbegne tako što se korekcija faktora snage radi na instalacionoj tabli gde se priključuje osvetljenje.

3.6 Izvor neprekidnog napajanja

Pojedini elektronski sistemi kao što su navigacioni, radio-komunikacioni i dr. zahtevaju neprekidan izvor napajanja kako bi njihov rad bio pouzdan i neprekidan. Jedan od načina da se to obezbedi je upravo korišćenje izvora neprekidnog napajanja. Snaga ovih izvora kreće se u granicama od 100VA do nekoliko MVA.

Arhitektura UPS-a je veoma slična arhitekturi pretvarača za pogone promenljive brzine, zbog toga su efekti harmonika gotovo identični onima koji su se javljali kod VSD uz dodatno zagrevanje aktivnih i pasivnih komponenata koje se koriste za filtriranje napona na izlazu usmerača. Pored toga može doći i do pregrevanja baterija koje su sastavni deo UPS-a.

Ukoliko je napon mreže izobličen ili usled pojave propada napona, može doći do pogrešnog uključenja SCR koji može da dovede do pregorevanja osigurača. Pri visokom izobličenju, na nekoj od harmonijskih komponenata struje može doći do pojave rezonance na

oscilatornom kolu koje čini ulazni filter UPS-a sa EE mrežom. U tom slučaju dolazi do isključenja UPS-a.

3.7 Računarske mreže

Postojanje harmonika u elektroenergetskom sistemu negativno utiče na rad lokalne računarske mreže (LAN). Za LAN mrežu posebno su opasni harmonici trećeg reda, koji se kumulativno sabiraju u neutralnom provodniku. Struja kroz neutralni provodnik može da premaši po vrednosti faznu struju, što pak dovodi do pojave visokog napona između nule i zemlje. Ukoliko je uzemljenje loše odrađeno može doći do problema u radu LAN mreže [Sh07].

Generalno, usled postojanja harmonika može doći do: smanjenja brzine protoka podataka, isključenja mrežnog servera, ispadanja iz normalnog režima rada pojedinih mrežnih uređaja, otkaza komponenata koje se koriste prilikom prenosa podataka i gubitka ogromnog broja podataka prilikom komunikacije.

3.8 Elektroenergetski vodovi

Harmonijske komponente struje koje prolaze kroz provodnik izazivaju povećanje disipacije toplote usled površinskog efekta (*skin effect*) i gubitaka u bakru. Ovi gubici se računaju saglasno definiciji (3.2) i direktno su proporcionalni kvadratu struje (I_{RMS}) i otpornosti kabla (R). Poznato je da otpornost kabla zavisi i od efekta blizine (*proximity effect*). Koliko će ovi efekti uticati na konačnu otpornost provodnika zavisi od provodnosti materijala koji je iskorišćen za provodnik, frekvencije, prečnika i geometrije provodnika. Na osnovnoj frekvenciji njihov efekat je zanemarljiv, posebno u slučajevima kada su u pitanju provodnici malih dimenzija.

Harmonici, takođe, utiču na povećanje naprezanja izolacionih materijala, čime se smanjuje pouzdanost kabla i njegov životni vek. Usled proticanja struje koja sadrži harmonike kroz elektroenergetske kablove dolazi do pojave elektromagnetnih smetnji (*EMI*, *Electromagnetic Interference*) u signalnim i kontrolnim kablovima. Ove elektromagnetne smetnje utiču na rad telefonske, radio i televizijske opreme.

3.9 Merna oprema

Tradicionalno, oprema koja se koristi za merenje parametara EE mreže projektovana je uz pretpostavku da su merne veličine prostoperiodične. S obzirom da to danas nije slučaj, njihova primena u uslovima harmonijskih izobličenja, neminovno dovodi do pogrešnih rezultata. Da bi se greške ovog tipa otklonile, neophodno je da se koriste drugačiji instrumenti ili da se u njih ugrađuju komponente sa širim frekvencijskim opsegom.

Većina analognih instrumenata i veliki broj digitalnih instrumenata koji se koriste za merenje efektivnih vrednosti napona/struje na EE mreži projektovani su tako da mere srednju vrednost usmerenog napona/struje koja iznosi 0.636 vrednosti amplitude signala. Ovako izmerene vrednosti množe se koeficijentom 1.11, kako bi se dobila efektivna vrednost [0.7071 vrednosti amplitude signala]. Predloženi princip daje tačne rezultate jedino u slučaju kada se meri napon/struja prostoperiodičnog talasnog oblika. Kada su prisutni harmonici dolazi do pojave greške. Nivo greške zavisi od zastupljenosti harmonika, odnosno od izobličenja signala. Zato se za precizno merenje efektivne vrednosti koriste instrumenti za merenje stvarne srednje kvadratne vrednosti, takozvani “true RMS” instrumenti.

U mernim instrumentima koji koriste strujne transformatore za konverziju struje u napon, moraju se koristiti veoma kvalitetne komponente sa širokim propusnim opsegom, kako bi bilo moguće precizno očitavanje frekvencije što većeg broja harmonika. Obično se zahteva frekvencijski opseg od prvog do pedesetog harmonika. Kod nekih instrumenata (razni harmonijski analizatori, instrumenti za merenje snage i dr.) često se koristi strujni senzori bazirani na Hall-ovom efektu. Ovi instrumenti su precizniji, ali zahtevaju često baždarenje.

Tradicionalni instrumenti koji se koriste za merenje aktivne i reaktivne snage u prisustvu harmonika prave grešku koja je manja od 3% [We99]. Nasuprot tome, instrumenti koji se koriste za merenje faktora snage i prividne snage, prave veliki nivo greške u prisustvu harmonika. Faktor snage računa se kao količnik ukupne aktivne (P) i prividne snage (U), dok se prividna snaga računa kao proizvod RMS vrednosti napona i struje. Prava RMS vrednost napona/struje varira u zavisnosti od zastupljenosti harmonika, a samim tim i nivo greške koji se pravi prilikom merenja. Ukoliko su harmonici značajno zastupljeni greške su veće i obrnuto.

3.10 Osigurači i prekidači

Poznato je da usled prekoračenja nominalne struje ili usled kratkog spoja u kolu dolazi do topljenja osigurača. Njihov rad baziran je na termičkom efektu izazvanom strujom kroz provodnik. Koliko brzo će osigurač odreagovati zavisi od RMS vrednosti struje i od vremena u toku kojeg ta struja teče kolom, odnosno od I^2t karakteristike osigurača. Kod brzih osigurača čim se premaši dozvoljena RMS vrednost struje dolazi do momentalnog topljenja osigurača. Ukoliko su pak u pitanju spori osigurači do topljenja dolazi ukoliko RMS vrednost struje koja nije dozvoljena traje neko duže vreme (nekoliko sekundi). RMS vrednost struje potrošača je veća kod nelinearnih u odnosu na linearne potrošače iste nominalne snage. Da bi se izbeglo topljenje osigurača usled postojanja harmonika potrebno je izabrati osigurač veće nominalne struje. Usled postojanja harmonika dolazi do pojave površinskog efekta i efekta blizine, koji rezultiraju neravnomernom distribucijom struje kroz osigurač izazivajući na taj način dodatne termalne gubitke. Gubici snage na osnovnoj frekvenciji računaju se kao:

$$P_N = I_N^2 R_N, \quad (3.3)$$

gde I_N , R_N označavaju nominalnu struju, i otpornost osigurača na osnovnoj frekvenciji, respektivno.

Na frekvencijama viših harmonika raste otpornost. Da bi se na osiguraču razvila ista snaga kao i u uslovima bez harmonika, potrebno je smanjiti nominalnu vrednost struje osigurača [ABS06]. Faktor redukcije se računa kao:

$$F_P = \frac{P_N}{P_H} = \sqrt{\frac{R_N}{R_H}}, \quad (3.4)$$

gde P_H predstavlja aktivnu snagu koju razvijaju harmonijske komponente, a R_H ekvivalentnu otpornost na frekvenciji harmonika.

Efektivna vrednost struje takođe određuje uslov pri kome dolazi do prekidanja strujnog kola kod prekidača. Prekidači se projektuju tako da do prekidanja strujnog kola dolazi prilikom prolaska struje kroz nulu, kako bi se sprečio nastanak luka. Ukoliko je struja mnogo izobličena ili ako dođe do propada napona, prekidač može prerano da reaguje, tj. dolazi do isključenja pre nego što dođe do prekoračenja dozvoljene vrednosti struje ili pojave struje kratkog spoja.

Pojedini prekidači reaguju kada dođe do prekoračenja maksimalne vrednosti struje. Ukoliko struja sadrži harmonike može doći do isključenja ovih prekidača čak i u slučaju kada imamo nizak nivo vrednosti struje osnovnog harmonika. Prekidači novijeg tipa koriste oba

metoda zaštite, zaštitu od prekoračenja maksimalne dozvoljene vrednosti struje i zaštitu na bazi merenja RMS vrednosti struje. I kod ovih prekidača može doći do preranog reagovanja čak i pri malim vrednostima harmonika, pa je zato potrebno povećati vrednost maksimalno dozvoljene, RMS vrednosti struje.

3.11 Releji

U elektroenergetskom sistemu releji se uglavnom koriste za zaštitu. Oni se mogu klasifikovati u tri grupe: elektromehanički, poluprovodnički i releji kontrolisani mikrokontrolerom.

Standardni elektromehanički releji isključuju se pod dejstvom obrtnog momenta koji je srazmeran kvadratu fluksa definisanog ulaznom strujom. Ovaj tip releja reaguje na efektivnu vrednost struje i nije preterano osetljiv na dejstvo harmonika zato što se namotaji releja napajaju niskim naponom (npr. 24V) ili preko transformatora koji smanjuje amplitude harmonika. Ukoliko postoje značajna harmonijska izobličenja, može doći do sporijeg reagovanja ili smanjenja životnog veka releja usled dodatnog zagrevanja namotaja.

Poluprovodnički releji reaguju u zavisnosti od amplitude signala. Samim tim visok nivo harmonika, postojanje *notching*-a utiče na povećanje naprezanja kod poluprovodničkih releja, a samim tim se i smanjuje njihova pouzdanost. Ukoliko je ukupno harmonijsko izobličenje napona (THD_V) manje od 10%-20%, ne očekuju se problemi u radu releja [ABS06].

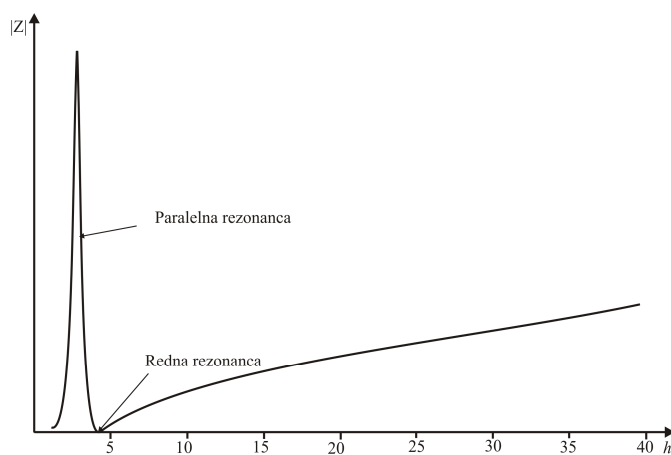
Uticaj harmonijskih izobličenja na rad releja čiji rad se bazira na upotrebi mikrokontrolera značajno se umanjuje upotrebom filtara. Naime, filtriranjem se potiskuju viši harmonici i izdvaja se samo osnovna komponenta signala na koju je rele osetljiv.

3.12 Kondenzatorske baterije

Da bi se povećao faktor snage, tj. smanjili gubici usled postojanja reaktivne komponente snage/energije u sistemu, ugrađuju se kondenzatorske baterije za kompenzaciju reaktivne energije. Kondenzatorske baterije su dimenzionisane tako da rade u opsegu do 110% nominalnog napona, odnosno do 135% nominalne snage [Al10]. Usled prisustva velikog nivoa izobličenja napona/struje dolazi do prekoračenja ovih ograničenja, a samim tim dolazi do otkaza kondenzatorskih baterija. S obzirom da se impedansa kondenzatora smanjuje sa

porastom frekvencije, visokofrekvencijske komponente struje prolaze kroz kondenzator i dolazi do preopterećenja kondenzatorskih baterija.

Drugi uticaj harmonika na kondenzatorske baterije ogleda se kroz pojave harmonijske rezonance. Do pojave rezonantnih uslova dolazi usled izjednačavanja induktivne i kapacitivne reaktanse. Postoje dva tipa harmonijske rezonance: redna i paralelna. Paralelna rezonanca prouzrokuje povećanje napona dok redna utiče na povećanje vrednosti struje u sistemu. U sistemima bogatim harmonicima postoje oba tipa rezonance (Sl. 3.1). Na harmonijskim rezonantnim frekvencijama može doći do uništenja kondenzatora, a ponekad i do štete kod ostale opreme sistema.

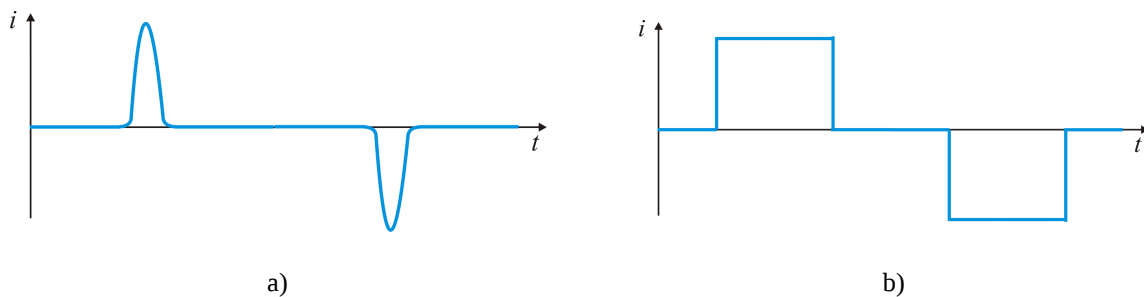


Slika 3.1. Redna, paralelna rezonanca

Prisustvo harmonika, posebno postojanje harmonika kod napona utiče na povećanje nivoa gubitaka kod dielektrika, a samim tim i na povećanje temperature. Usled povećanja temperature smanjuju se pouzdanost i životni vek kondenzatora.

4 Proračun snaga potrošača električne energije

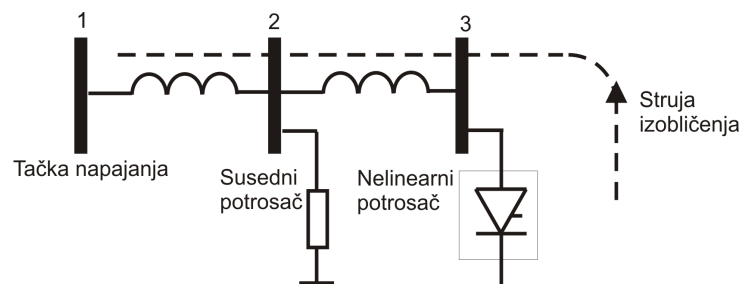
U zavisnosti od talasnog oblika struje koju potrošači povlače iz elektroenergetskog sistema, sve potrošače možemo svrstati u dve grupe: u linearne i nelinearne. Linearni potrošači su oni koji povlače struju prostoperiodičnog talasnog oblika frekvencije 50 Hz, odnosno 60Hz, tj. kod njih talasni oblik struje prati talasni obliku napona. Istorijski gledano, do skora su na EE mreži dominirali linearni potrošači: električni motori, sijalice sa užarenim vlaknom, razna grejna tela i većina drugih uređaja koji su se koristili u domaćinstvu. Nelinearne potrošače električne energije karakteriše talasni oblik struje koji se razlikuje od prostoperiodične funkcije napona. Poslednjih 50-ak godina primećuje se značajno povećanje broja ovih potrošača. Oni se mogu svrstati u dve grupe: u prvoj grupi mogu biti uređaji koji se koriste u kancelarijama kao što su računari, faks mašine, štampači i većina uređaja iz domaćinstva kod kojih je primenjena savremena elektronika za kontrolu rada tog uređaja, kao što su napredne veš mašine i dr.; u drugoj grupi mogu se naći razne vrste motora kod kojih se može podešavati brzina rada. Ovi motori se uglavnom koriste u industriji, u procesu proizvodnje, kao i u liftovima. Na Sl. 4.1 prikazani su talasni oblici struje (a) računara, (b) motora promenljive brzine



Slika 4.1. Talasni oblici struje (a) računara, (b) motora [IEPQC00]

Talasni oblici struje koji su prikazani na Sl.4.1 mogu se dobiti superponiranjem više sinusnih talasnih oblika različitih frekvencija (harmonika). Amplituda i frekvencija viših harmonika zavise od vrste nelinearnog potrošača tako da pomažu u njegovoj identifikaciji [IEPQC00].

Postojanje viših harmonika manifestuje se kroz izobličenje talasnih oblika struje. Usled proticanja struje izobličenja kroz elektroenergetske vodove dolazi do dodatne visoko frekvencijske (VF) komponente pada napona [IEPQC00]. Njihov uticaj raste ukoliko je otpornost vodova veća. Treba se podsetiti da su nominalno vodovi projektovani za prostoperiodične signale od 50Hz (60Hz). Međutim njihova otpornost raste za VF signale usled postojanja površinskog efekta. Zato se izobličenje struje preslikava u promene talasnog oblika napona kod svih potrošača koji se nalaze u blizini. Na Sl.4.2 je prikazano kako nelinearno opterećenje utiče na potrošače u blizini. U tački 1 izobličenje je najmanje, dok je u tački 3 najveće, zato što impedansa sistema raste sa povećanjem daljine između potrošača i transformatorske stanice, a samim tim povećava se i pad napona.



Slika 4.2. Uticaj nelinearnog opterećenja (potrošač) [IEPQC00]

Nelinearno opterećenje, osim što prouzrokuje dovodi i do izobličenja talasnog oblika napona napajanja. Kao što se vidi sa Sl. 4.2 harmonijsko izobličenje je fenomen kod koga potrošači međusobno utiču jedan na drugog zato što su povezani na istu električnu mrežu. Sa porastom broja nelinearnih potrošača raste i veličina harmonijskog izobličenja celog sistema. Kao što je u prethodnom poglavlju pokazano harmonijska izobličenja negativno utiču na rad pojedinih komponenata distributivne mreže i drugih potrošača. Ukoliko već harmonijska izobličenja na mreži ne mogu da se spreče, važno ih je održavati u prihvatljivim granicama. Da bi to bilo moguće, neophodno je meriti ova izobličenja, a zatim primeniti odgovarajuće postupke za njihovo smanjenje.

4.1 Proračun snaga linearnih monofaznih potrošača

Linearna opterećenja karakterišu se konačnom impendansom koja može biti čisto otpornog, induktivnog, kapacitivnog karaktera ili njihova kombinacija. Kapacitivna i induktivna opterećenja imaju reaktivni karakter, jer razmenjuju energiju akumuliranu u električnom ili magnetnom polju sa izvorom. Kod ovih opterećenja struja u odnosu na napon može da kasni ili prednjači u zavisnosti od tipa reaktanse (induktivne, kapacitivne). Trenutne vrednosti napona mreže i struje kod linearnih potrošača mogu se predstaviti pomoću sledećih izraza:

$$v(t) = \sqrt{2}V_{RMS} \sin(\omega t), \quad (4.1)$$

$$i(t) = \sqrt{2}I_{RMS} \sin(\omega t - \theta), \quad (4.2)$$

gde V_{RMS} , I_{RMS} , ω , θ , t predstavljaju efektivnu vrednost napona i struje, kružnu frekvenciju, faznu razliku između napona i struje i vreme, respektivno.

Trenutna snaga se računa kao proizvod trenutnih vrednosti napona i struje opterećenja [IEEE00, IEEE10].

$$p(t) = v(t)i(t) = 2V_{RMS}I_{RMS} \sin(\omega t) \sin(\omega t - \theta) = p_a + p_q. \quad (4.3)$$

Nakon odgovarajućih transformacija dobija se:

$$p_a = V_{RMS} I_{RMS} \cos \theta \cdot (1 - \cos(2\omega t)) = P \cdot (1 - \cos(2\omega t)), \quad (4.4)$$

$$p_q = -V_{RMS} I_{RMS} \sin \theta \cdot \sin(2\omega t) = -Q \cdot \sin(2\omega t), \quad (4.5)$$

gde p_a predstavlja trenutnu aktivnu snagu, p_q označava trenutnu reaktivnu snagu, P predstavlja aktivnu, a Q reaktivnu snagu.

Aktivna snaga P , koja se često naziva i realna snaga, predstavlja srednju vrednost trenutne aktivne snage u toku nekog vremenskog intervala između τ i $\tau + kT$ i računa se kao:

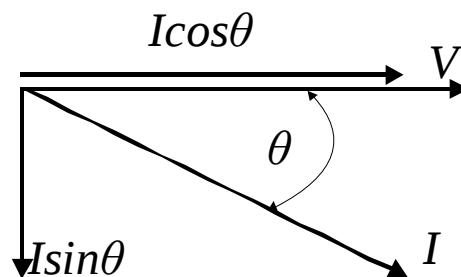
$$P = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} p(t)dt = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} (p_a(t) + p_q(t))dt = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} p_a(t)dt, \quad (4.6)$$

gde k predstavlja pozitivni celi broj, τ označava vremenski trenutak u kome je počelo merenje, a T označava periodu napona (struje). Dakle, aktivna snaga se računa kao srednja vrednost trenutne aktivne snage p_a , pošto je srednja vrednost trenutne reaktivne snage p_q jednaka nuli. Nakon transformacije izraza (4.6) konačni izraz za aktivnu snagu je

$$P = V_{RMS} I_{RMS} \cos(\theta). \quad (4.7)$$

Konačno, može se reći da je na linearnim potrošačima aktivna snaga jednaka proizvodu efektivnih vrednosti napona, struje i kosinusa ugla između napona i struje opterećenja. Snaga je maksimalna kada su struja i napon u fazi ($\theta = 0$) što je slučaj kod čistog omskog opterećenja. Primer za to su grejne ploče na kojima se aktivna snaga pretvara u toplotu. Ako je $\left(\theta = \pm \frac{\pi}{2}\right)$, kao kod idealnog kalema i kondenzatora, $\cos \theta = 0$, pa je aktivna snaga na ovim elementima jednaka nuli. To znači da se na čisto reaktivnim opterećenjima, (L i C) oslobađa samo reaktivna snaga, jer je kod njih $\sin(\theta)=1$. Na opterećenjima koja sadrže aktivnu i reaktivnu komponentu (impedanse sa konačnom otpornošću i reaktansom) postoje obe komponente snage.

Fazorski dijagram napona i struje s faznim pomerajem θ prikazan je na Sl.4.3.



Slika 4.3. Fazni dijagram napona i struje

Kao što se vidi na Sl. 4.3 struja potrošača razložena je na dve komponente $I \cos \theta$, koja je kolinearna sa naponom i $I \sin \theta$, ortogonalna sa naponom. Komponenta struje $I \cos \theta$, pomnožena sa naponom, daje aktivnu snagu. Ortogonalna komponenta struje predstavlja pasivnu komponentu zato što ne vrši rad, tj. ne transformiše se električni rad izvora, pa se odgovarajuća snaga naziva reaktivnom snagom koja iznosi

$$Q = V_{RMS} I_{RMS} \sin(\theta). \quad (4.8)$$

Reaktivna snaga Q predstavlja amplitudu oscilovanja trenutne reaktivne snage p_q (4.5). Vrednost reaktivne snage može biti pozitivna, u slučaju induktivnog opterećenja ili pak negativna, kod kapacitivnog opterećenja.

Između fazorske¹(vektorske), aktivne i reaktivne snage važi kvadratura formula:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} . \quad (4.9)$$

¹ U literaturi se prividna snaga najčešće obeležava sa S . U ovoj disertaciji prividna snaga biće označena sa U , dok je oznaka S rezervisana za fazorsku snagu, kao što je dato u originalnim Budeanu-ovim radovima.

4.2 Proračun snaga nelinearnih monofaznih potrošača

Računanje isporučene snage nelinearnim potrošačima mnogo je komplikovanije zato što nelinearni potrošači unose harmonike u elektroenergetski sistem. Trenutne vrednosti izobličenog napona napajanja i izobličene struje mogu se predstaviti pomoću sledeće dve formule:

$$v(t) = V_0 + \sum_{h=1}^M \sqrt{2} V_{RMS h} \sin(h\omega t - \alpha_h), \quad (4.10)$$

$$i(t) = I_0 + \sum_{h=1}^M \sqrt{2} I_{RMS h} \sin(h\omega t - \beta_h), \quad (4.11)$$

gde $V_{RMS h}$, $I_{RMS h}$, predstavljaju efektivne vrednosti, a α_h , β_h faze napona i struje za h -ti harmonik. V_0 i I_0 su jednosmerne vrednosti napona, odnosno struje.

Efektivne vrednosti napona i struje čije su trenutne vrednosti date formulama (4.10), (4.11) računaju se kao:

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+KT} v^2 dt}, \quad (4.12)$$

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+KT} i^2 dt}, \quad (4.13)$$

Efektivna vrednost napona i struje u frekvencijskom domenu računa se uz pomoć sledeća dva izraza

$$V_{RMS} = \sqrt{V_0^2 + V_{RMS1}^2 + \sum_{h=2}^M V_{RMS h}^2} = \sqrt{V_0^2 + V_{RMS1}^2 + V_{RMSH}^2}, \quad (4.14)$$

$$I_{RMS} = \sqrt{I_0^2 + I_{RMS1}^2 + \sum_{h=2}^M I_{RMS h}^2} = \sqrt{I_0^2 + I_{RMS1}^2 + I_{RMSH}^2}, \quad (4.15)$$

gde je M red najvišeg harmonika uzetog u razmatranje. Indeks „0” predstavlja DC komponentu, indeks „1” predstavlja prvi (osnovni ili fundamentalni) harmonik, indeks h označava h -ti harmonik, dok „H” označava zajednički doprinos svih viših harmonika ($h \geq 2$). Jednosmerne komponente V_0 i I_0 nisu značajno zastupljene u EE sistemu, ali njihov doprinos uzet je u obzir radi kompletnosti prvog dela jednačina (4.14) i (4.15). Trenutna vrednost

snage računa se kao proizvod trenutnih vrednosti napona i struje i sastoji se od aktivne i reaktivne komponente trenutne snage označene sa p_a , p_q , čija vrednost se izračunava kao:

$$p_a = V_0 I_0 + \sum_{h=1}^M V_{\text{RMS}_h} I_{\text{RMS}_h} \cos \theta_h [1 - \cos(2h\omega t - 2\alpha_h)], \quad (4.16)$$

$$\begin{aligned} p_q = & - \sum_{h=1}^M V_{\text{RMS}_h} I_{\text{RMS}_h} \sin \theta_h \sin(2h\omega t - 2\alpha_h) \\ & + 2 \sum_n^M \sum_{\substack{m \\ m \neq n}}^M 2V_{\text{RMS}_m} I_{\text{RMS}_n} \sin(m\omega t - \alpha_m) \sin(n\omega t - \beta_n) \\ & + \sqrt{2}V_0 \sum_h^M I_h \sin(h\omega t - \beta_h) + \sqrt{2}I_0 \sum_h^M V_h \sin(h\omega t - \alpha_h), \end{aligned} \quad (4.17)$$

gde $\theta_h = \alpha_h - \beta_h$, predstavlja fazni ugao između napona V_{RMS_h} i struje I_{RMS_h} h -tog harmonika.

Na osnovu jednačina (4.6), (4.10) i (4.11) aktivna snaga se može eksplicitno izraziti u funkciji spektralnih komponenti napona i struje:

$$P = V_0 I_0 + \sum_{h=1}^M V_{\text{RMS}_h} I_{\text{RMS}_h} \cos(\theta_h). \quad (4.18)$$

Ona može biti predstavljena kao suma jednosmerne komponente snage P_0 , snage osnovnog harmonika P_1 i snaga svih viših harmonika $P_H (h=2, \dots, M)$:

$$P = P_0 + P_1 + P_H. \quad (4.19)$$

Jedan od pionira u definisanju različitih oblika snage u elektroenergetskim sistemima u prisustvu harmonijskih izobličenja, rumunski naučnik Budeanu predložio je [Bu27, Em04] da se reaktivna snaga računa kao:

$$Q_B = \sum_{h=1}^M V_{\text{RMS}_h} I_{\text{RMS}_h} \sin(\theta_h) = Q_1 + Q_H. \quad (4.20)$$

Slično kao i u (4.19), Q_1 i Q_H označavaju reaktivnu snagu osnovne komponente i reaktivnu snagu svih viših harmonika, respektivno. Ova definicija je široko prihvaćena u naučnoj javnosti. Međutim, pojedini autori (Czarnecki, Lyon [Cz87], [IEEE10]) je osporavaju, tako da je indeks B u Q_B uveden da bi se napravila razlika u odnosu na drugačije definicije. Osnovna zamerka tiče se situacija u kojima je $Q_H < 0$, što može dovesti do toga da je $Q_B < Q_1$. Sa druge strane, činjenica je da reaktivna snaga, uprkos svojoj negativnoj vrednosti, doprinosi gubicima na mreži na isti način kao i pozitivna reaktivna snaga. Alternativno rešenje nudi revizija standarda IEEE Std 1459-2010 [IEEE10] predlažući da se reaktivna snaga računa kao:

$$Q_{IEEE} = \sqrt{\sum_{h=1}^M [V_{RMS_h} I_{RMS_h} \sin(\theta_h)]^2} = \sqrt{Q_1^2 + \sum_{h=2}^M Q_h^2}. \quad (4.21)$$

Očigledno da jednačina (4.21) eliminiše situaciju kada je ukupna reaktivna snaga manja od reaktivne snage osnovne komponente Q_1 . Pored ove postoje i druge definicije reaktivne snage kojima se obezbeđuje njena pozitivna vrednost. To su Fryze-ova i Sharon-ova definicija koje su date sa (4.22), (4.23), respektivno :

$$Q_F = \sqrt{U^2 - P^2}, \quad (4.22)$$

$$Q_{Sh} = V_{RMS} \cdot \sqrt{\sum_{h=1}^M I_{RMS_h}^2 \sin^2(\theta_h)}. \quad (4.23)$$

Da bismo procenili opravdanost i praktičnu primenu svake od navedenih definicija, u okviru ove disertacije napisan je originalni MATLAB kod koji obuhvata sve navedene definicije. Zatim je razmatrano šest različitih realnih potrošača povezanih na EE sistem, to su:

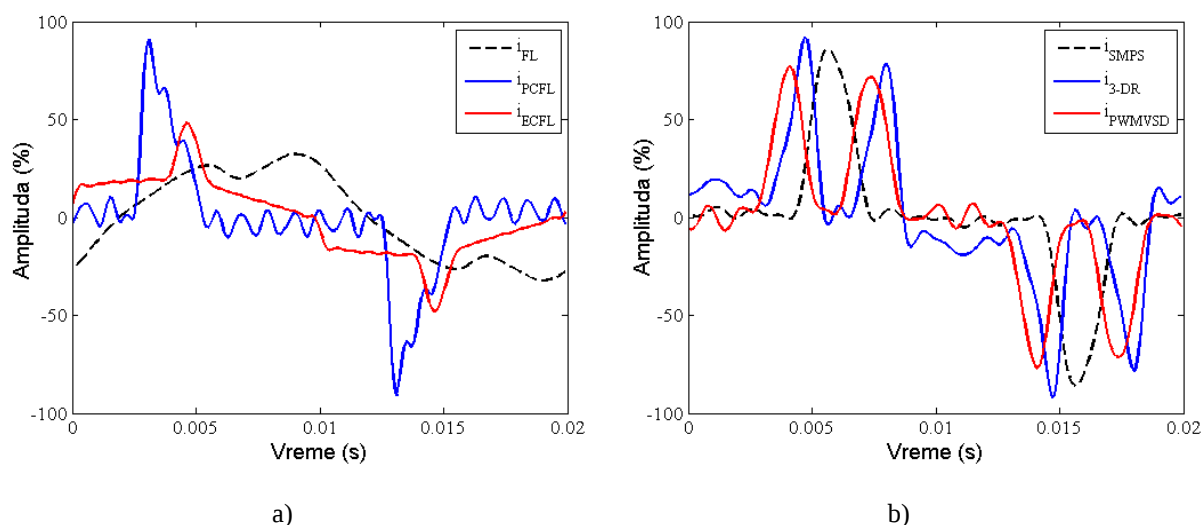
- Fluorescentna lampa (FL)
- EcoBulb štedljive sijalice (ECFL)
- Phillips štedljive sijalice (PCFL)
- 6-pulsni trofazni diodni usmerač (3-DR)
- 6-pulsni izvor napajanja za računar (SMPS)
- 6-pulsni PWM kontrolisani pretvarač za pogone promenljive brzine (PWM VSD)

U tabeli 4.1 date su informacije o spektru struje dobijene merenjem i preuzete iz literature [Wa01, We09]. Svaki harmonik struje definisan je amplitudom i faznim pomerajem. Amplituda je data u procentima u odnosu na osnovnu komponentu struje, dok je fazni ugao dat u odnosu na osnovnu komponentu napona.

TABELA 4.1. SPEKTAR STRUJE POTROŠAČA

Red harmonika	FL	EcoBulb CFL	Philips CFL	3-DR	SMPS	PWM VSD
1	100/-41.2°	100/18°	100/32°	100/-11.8°	100/-12°	100/0°
3	20/273.4°	11.8/-151°	86.4/-107°	0/0°	81/135°	9/60°
5	10.7/339°	25.9/21°	60.2/124°	72.3/-241.2°	61/-70°	70/70°
7	2.1/137.7°	12.9/-128°	34.3/7°	51.5/-88.3°	37/ 83°	60/-150°
9	1.4/263.2°	15.3/40°	21.7/-82°	0/0°	16/-115°	6/30°
11	0.9/39.8°	9.41/ -101°	22.4/ -176°	16/ 15.7°	2.4/170°	30/-80°
13	0.6/182.4°	8.24/58°	21.7/74°	9/-235.1°	6.3/-50°	20/-40°
15	0.5/287°	5.88/-68°	17.8/-34°	0/0°	7.9/110°	3/-170°
17		2.35/71°	15/-134°	7.5/-171.5°		15/70°
19		3.53/-28°	14.3/15°	5.4/-41.9°		9/60°

Na Sl.4.4.a prikazani su talasni oblici struje za FL, ECFL i PCFL, dok su na Sl.4.4.b prikazani talasni oblici struje za 3-DR, 6-SMPS i PWM VSD



Slika 4.4. Talasni oblik struje za a) fluorescentne lampe: FL, PCFL i ECFL b) usmerača: 3-DR, SMPS i PWM VSD

Da bi se simulirao što realniji slučaj pretpostavili smo da su svi potrošači priključeni na napon koji osim osnovne komponente sadrži i treći harmonik čija je vrednost 3% vrednosti osnovne komponente, što predstavlja gornju granicu izobličenja dopuštenu standardom IEEE Std. 519-1995. Rezultati simulacija prikazani su u tabeli 4.2.

TABELA 4.2. REZULTATI SIMULACIJA RAZLIČITIH DEFINICIJA ZA REAKTIVNU SNAGU PRI RAZLIČITIM POTROŠAČIMA

	FL	EcoBulb CFL	Philips CFL	3-DR	SMPS	PWM VSD
$Q_I[\text{VAR}]$	15.15	-6.04	-10.06	470.34	478.20	0.00
$Q_H[\text{VAR}]$	0.14	0.03	0.47	0.00	-39.52	-5.38
$Q_B[\text{VAR}]$	15.29	-6.01	-9.58	470.34	438.68	-5.38
$Q_{IEEE}[\text{VAR}]$	15.15	6.04	10.07	470.34	479.83	5.38
$Q_F[\text{VAR}]$	16.04	9.66	25.05	2149.80	2602.20	2327.70
$Q_{SH}[\text{VAR}]$	15.87	7.44	21.98	1948.40	2138.40	1863.50

Analiza dobijenih vrednosti za reaktivnu snagu pokazuje da Fryze-ova i Sharon-ova definicija daju vrednost za reaktivnu snagu koja je nerealno veća od vrednosti reaktivne snage za osnovni harmonik. Ovo je posebno izraženo kod potrošača 3-DR, SMPS i PWM VSD. Zbog toga će u narednoj analizi definicije (4.22) i (4.23) biti ignorisane. Za trofazne potrošače (3-DR, SMPS i PWM VSD) u tabeli 4.2 date su vrednosti reaktivnih snaga za jednu fazu. Dobijeni rezultati simulacija prikazani u tabeli 4.2 konzistentni su sa merenim vrednostima koja su data u [Di12-1, Di12-2].

Prividna snaga računa se kao proizvod efektivnih vrednosti napona i struja. To znači da u prisustvu harmonika prividna snaga može da se izračuna kao:

$$U = I_{\text{RMS}} \cdot V_{\text{RMS}} \cdot \quad (4.24)$$

4.3 Proračun snaga linearnih polifaznih sistema

Polifazni sistemi se u osnovi sastoje od dva ili više monofazna sistema koja su povezana u jedinstvenu celinu. Svaka faza polifaznog sistema pomerena je u odnosu na sledeću za odgovarajući fazni ugao. Vrednost faznog pomeraja između faza polifaznog sistema zavisi od broja faza tog sistema. Najrasprostranjeniji polifazni sistem koji se koristi u sistemima prenosa i distribucije električne energije je trofazni sistem kod koga je fazni pomeraj 120° . Trofazni sistemi su uglavnom balansirani odnosno uravnoteženi, tako da rade sa fazno pomećenim ali po amplitudi identičnim strujama i naponima. Kod linearnih trofaznih sistema efektivna vrednost napona i struje, aktivna, reaktivna i prividna snaga definisane su uz pomoć osnovnih principa koji su korišćeni kod monofaznih kola.

Aktivna snaga polifaznih sistema jednaka je algebarskom zbiru aktivnih snaga svake faze

$$P = \sum_{n=1}^N P_n = \sum_{n=1}^N \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} v_n(t) i_n(t) dt, \quad (4.25)$$

gde v_n i i_n predstavljaju trenutnu vrednost napona i struje po fazi.

U frekvencijskom domenu aktivna snaga se može predstaviti kao:

$$P = \sum_{n=1}^N V_{\text{RMS}n} I_{\text{RMS}n} \cos \theta_n, \quad (4.26)$$

gde n predstavlja broj faze a N maksimalni broj faza polifaznog sistema.

Reaktivna snaga definiše se slično kao aktivna snaga i može se predstaviti sledećim izrazom:

$$Q = \sum_{n=1}^N V_{\text{RMS}n} I_{\text{RMS}n} \sin \theta_n. \quad (4.27)$$

Standardom IEEE 1459-2010 [IEEE10] definišu se i:

vektorska prividna snaga:

$$U_V = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad (4.28)$$

aritmetička prividna snaga:

$$U_A = \sum_{n=1}^N U_n = \sum_{n=1}^N V_{RMSn} \cdot I_{RMSn}, \quad (4.29)$$

i efektivna prividna snaga:

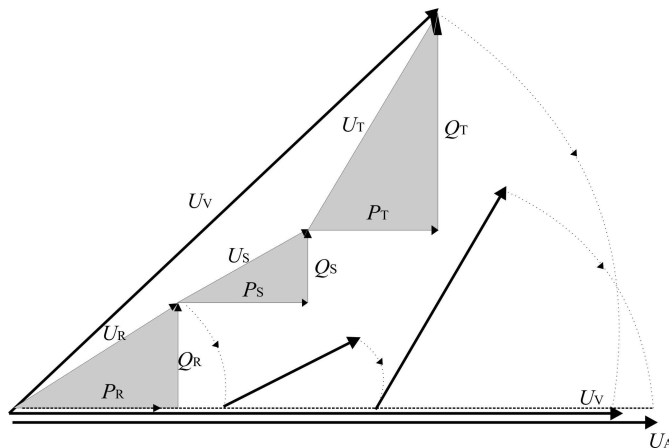
$$U_e = 3V_e I_e, \quad (4.30)$$

gde V_e i I_e predstavljaju efektivnu vrednost napona i struje trofaznog sistema i računaju se kao:

$$V_e = \sqrt{\frac{V_{RS}^2 + V_{RT}^2 + V_{TS}^2}{9}}, \quad (4.31)$$

$$I_e = \sqrt{\frac{I_R^2 + I_S^2 + I_T^2}{3}}. \quad (4.32)$$

Izraze za računanje efektivnih vrednosti napona i struja trofaznog sistema predložio je F. Buchholz 1922. godine [Bu22, Em98], a detaljnije ih je objasnio 1933 W. M. Goodhue [Go33, Em98]. U literaturi *efektivna prividna snaga* često se može naći i kao *Buchholz-ova* definicija prividne snage. Analiza prikazana u [IEEE10, Cz00] pokazuje da u nekim slučajevima jedino *Buchholz-ova* definicija daje korektne rezultate. Ova definicija može se proširiti i za slučaj kada napon i struja nisu prostoperiodične veličine. U slučaju balansirano trofaznog sistema važi $U_A = U_V = U_e$, dok u slučaju neuravnoteženog trofaznog sistema važi $U_V \leq U_A \leq U_e$. Geometrijska interpretacija vektorske i aritmetičke prividne snage data je na Sl. 4.5.



Slika 4.5. Geometrijska interpretacija vektorske i aritmetičke prividne snage

4.4 Proračun snaga nelinearnih polifaznih sistema

Kao i kod monofaznih nelinearnih sistema, računanje isporučene snage u prisustvu harmonika u polifaznom sistemu je dosta komplikovanije. Efektivna vrednost napona i struje za svaku fazu ponaosob računaju se uz pomoć izraza (4.14) i (4.15). U prisustvu harmonika aktivna i reaktivna snaga kod monofaznog sistema računaju se na osnovu (4.18) i (4.20) respektivno. Kombinovanjem izraza (4.18) i (4.20) sa (4.26) i (4.27) dobijaju se izrazi za računanje ukupne aktivne i reaktivne snage trofaznog sistema u prisustvu nelinearnih opterećenja:

$$P = \sum_{n=1}^N \sum_{h=1}^M V_{RMSn} I_{RMSn} \cos \theta_h, \quad (4.33)$$

$$Q = \sum_{n=1}^N \sum_{h=1}^M V_{RMSn} I_{RMSn} \sin \theta_h. \quad (4.34)$$

Za računanje aritmetičke prividne snage trofaznog sistema kod koga napon i struja nisu prostoperiodične funkcije koristi se izraz (4.29), dok se za računanje efektivne prividne snage koristi izraz (4.30). Iako se primenjuju isti izrazi kao u slučaju linearnih trofaznih sistema, u izrazu (4.29) primenjuju se efektivne vrednosti napona i struje definisane sa (4.14) i (4.15) koje uzimaju u obzir i efekat harmonika. Slično se i za izračunavanje efektivne prividne snage efekat harmonika preslikava kroz (4.30), (4.31) i (4.32) zamenom izraza za efektivne vrednosti napona i struje trofaznog sistema koje važe za nelinearne monofazne sisteme. Više informacija o efektivnoj prividnoj snazi može se naći u [IEEE10, Em10, Em98].

5 Standardi kojima se definiše kvalitet električne energije

Sve veće prisustvo harmonika u EE mreži nametnulo je potrebu da se ograniče njihove maksimalne vrednosti posebnim standardima. Mnogobrojne institucije bave se razvojem ovih standarda koji će se primenjivati kao referentni pri oceni kvaliteta električne energije. Među najpoznatijim organizacijama u SAD su IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), ANSI (American National Standards Institute) i EPRI (Electric Power Research Institute). U EU za standardizaciju u ovoj oblasti zadužene su IEC (International Electrotechnical Commission) i European Committee for Electrotechnical Standardization koja donosi EN (European Norms).

5.1 IEEE standardi

5.1.1 Ograničenja za naponske harmonike

IEEE standardi propisuju obaveze proizvođača i distributera električne energije sa ciljem da se proizvede i isporuči što je moguće manje izobličen, odnosno “čistiji” napon. Poželjno je da napon napajanja bude prostoperiodična funkcija. Pored toga, IEEE standardi regulišu obaveze potrošača kroz limitiranje vrednosti harmonika struje svakog uređaja koji je priključen na mrežu. IEEE standard koji se odnosi na preporučenu praksu prilikom praćenja kvaliteta električne energije nosi oznaku IEEE 519-1995. Tabela 5.1. prikazuje dopuštenu distorziju mrežnog napona prema definicijama datim u standardu IEEE 519-1995. Ovaj standard obavezuje proizvođače i distributere električne energije da prilikom isporuke napona

krajnjem korisniku na niskonaponskoj mreži, napon bude izobličen do najviše $THD_V \leq 5\%$ [Wa01].

TABELA 5.1. OGRANIČENJA ZA NAPONSKE HARMONIKE PREMA STANDARDU IEEE. 519-1995

Napon u PCC	Maksimalna dozvoljena vrednost harmonika [%]	Ukupno izobličenje napona (THD_V) [%]
≤ 69 kV	3.0	5.0
69.001 kV do 161 kV	1.5	2.5
≥ 161.001 kV	1.0	1.5

5.1.2 Ograničenja za strujne harmonike

Standard IEEE 519-1995 tretira krajnje korisnike (nelinearne potrošače) kao glavne uzročnike izobličenja. Zato se ograničava vrednost svakog harmonika struje u tački priključenja (*PCC, Point of Common Coupling*). Tabela 5.2 prikazuje granične vrednosti pojedinih harmonika struje u procentima, kao i ukupnog izobličenja (*TDD, Total Demand Distortion*) [Wa01].

TABELA 5.2. OGRANIČENJA ZA STRUJNE HARMONIKE PREMA STANDARDU IEEE 519-1995

Maksimalna dozvoljena struja izobličenja u procentima I_L						
Individualno red harmonika (neparni harmonici)						
I_{sc}/I_L	$h < 11$	$11 < h < 17$	$17 < h < 23$	$23 < h < 35$	$35 < h$	TDD
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5
$20 < 50$	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8
$50 < 100$	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12
$100 < 1000$	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20
Parni harmonici su limitirani na 25% od neparnih harmonika						
Struja izobličenja koja ima za posledicu DC ofset, koja se javlja npr. kod polutalasnih usmerača, nije dozvoljena						
I_{sc} : maksimalna struja kratkog spoja u PCC I_L : Nazivna struja (osnovna komponenta) u PCC <i>TDD</i> : Ukupno dozvoljeno izobličenje						

TDD predstavlja veličinu koja pokazuje stepen izobličenja ukupne struje koja se povlači iz mreže u tački PCC za razliku od THD_I -a koja se odnosi na svaki potrošač posebno. *TDD* se računa kao:

$$TDD = \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^M (I_h)^2}{I_L^2}}, \quad (5.1)$$

gde I_L predstavlja RMS vrednost maksimalno zahtevane vrednosti struje potrošača a I_h je RMS vrednost struje h -tog harmonika.

5.2 IEC standardi

5.2.1 Ograničenja za naponske harmonike

Nasuprot IEEE, IEC standardi bave se kompatibilnošću opreme koja se sme priključiti na EE sistem. Standardom IEC 61000-2-2 definisane su dozvoljene vrednosti harmonika napona u niskonaponskoj mreži. Dozvoljene vrednosti prikazane su u tabeli 5.3 [Wa01].

TABELA 5.3. OGRANIČENJA ZA NAPONSKE HARMONIKE PREMA STANDARDU IEC 61000-2-2
I IEC 61000-2-4(ZA OPREMU KLASA 2)

Neparni harmonici		Parni harmonici		Harmonici trećeg reda	
h	$\%V_1$	h	$\%V_1$	h	$\%V_1$
5	6	2	2	3	5
7	5	4	1	9	1.5
11	3.5	6	0.5	15	0.3
13	3	8	0.5	≥ 21	0.2
17	2	10	0.5		
19	1.5	≥ 12	0.2		
23	1.5				
25	1.5				
≥ 29	$0.2+12.5/h$				

Standardom IEC 61000-2-4 definiše se nivo kompatibilnosti industrijskih postrojenja pri smetnjama do 9kHz. Ovim standardom su definisane numeričke vrednosti kompatibilnosti za industrijske i privatne (*non-public*) EE sisteme pri nominalnom naponu do 35kV i nominalnoj frekvenciji od 50Hz. Ograničenja koja su postavljena ovim standardom odnose se na tačku u kojoj se povezuje industrijski, odnosno zatvoreni EE sistem na EE mrežu (*IPC, In Plant Point of Coupling*) i predstavljena su tabelom 5.3 [Wa01].

TABELA 5.4. OGRANIČENJA ZA NAPONSKE HARMONIKE PREMA STANDARDU IEC 61000-2-4 ZA OPREMU KLASA 3

Neparni harmonici		Parni harmonici		Harmonici trećeg reda	
h	$\%V_1$	h	$\%V_1$	h	$\%V_1$
5	8	2	3	3	6
7	7	4	1.5	9	2.5
11	5	≥ 6	1	15	2
13	4.5			21	1.75
17	4			≥ 27	1
19	4				
23	3.5				
25	3.5				
≥ 29	$5\sqrt{11/h}$				

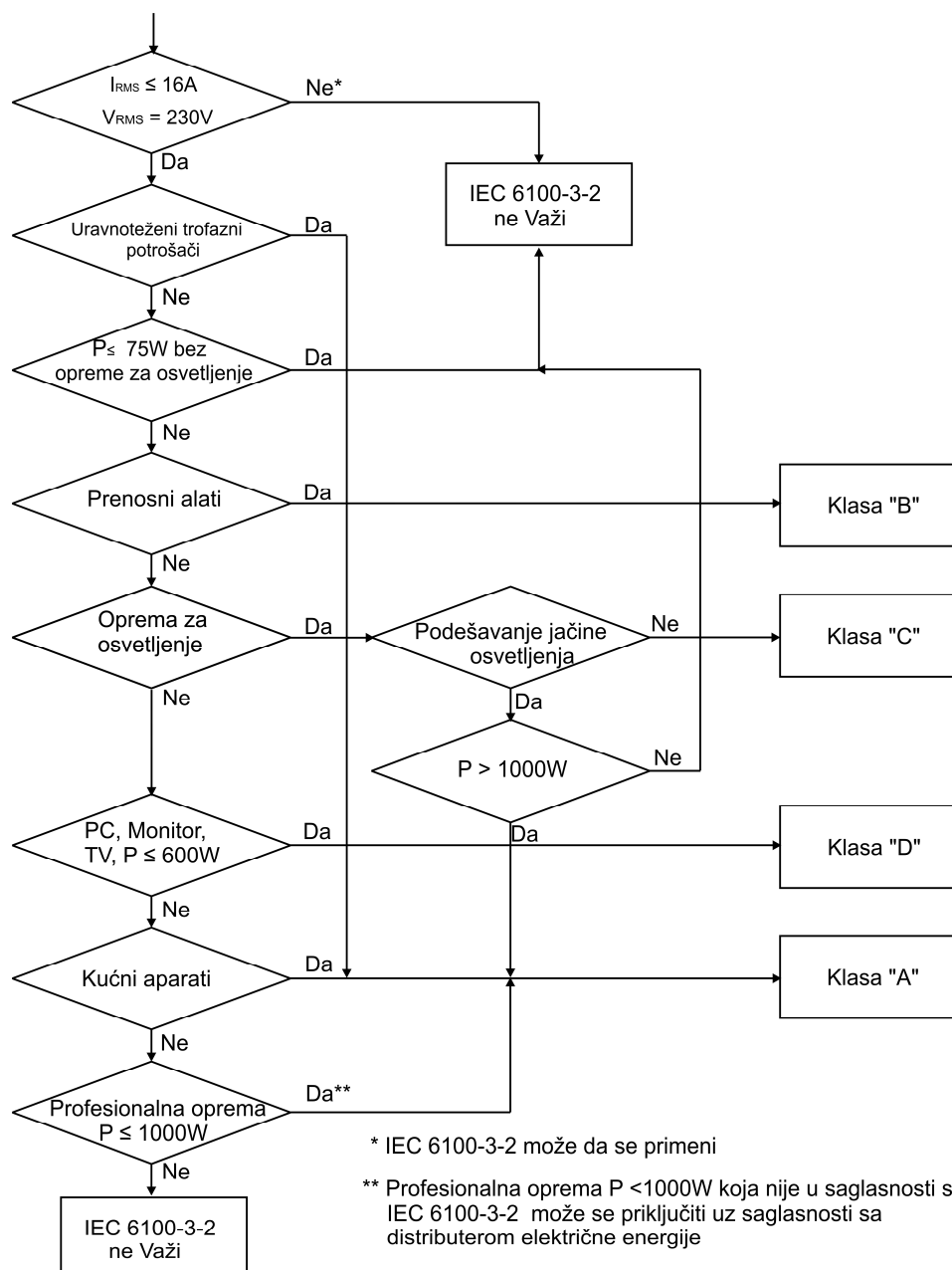
U Tabeli 5.4 date su dozvoljene vrednosti harmonika napona za opremu klase 2 i primenjuje se na PCC i IPC kod industrije. Treba napomenuti da za razliku od IEEE koji kao PCC tretira mesto gde se potrošač (brojilo) priključi na EE mrežu, IEC standard kao PCC tretira mesto na instalaciji gde se uređaj priključuje na napajanje. Može se uočiti da se ova ograničenja u potpunosti poklapaju sa ograničenjima koja su data u Tabeli 5.3. Ukoliko su ispoštovana ograničenja definisana sa THD_I u IEC 61000-2-4, biće zadovoljena ograničenja definisana sa TDD standardom IEEE 519-1995.

Standard IEC 61000-2-4 definiše ograničenja koja se primenjuju za opremu klase 3 na način prikazan u Tabeli 5.4 [Wa01].

Maksimalna dozvoljena vrednost izobličenja napona za opremu klase 2 je $THD_V \leq 8\%$, dok za opremu klase 3 iznosi $THD_V \leq 10\%$. Prilikom računanja THD_V korišćeni su harmonici do 40 reda.

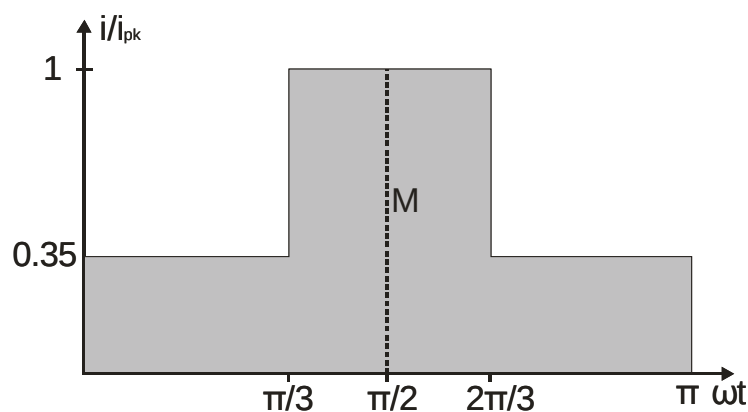
5.2.2 Ograničenja za strujne harmonike

U Evropskoj Uniji od 2001. godine primenjuje se standard IEC 61000-3-2 koji propisuje granične vrednosti nelinearnih izobličenja struje potrošača do 40-tog harmonika. Standard se odnosi na izobličenja struje koja unose elektronski i električni uređaji u domaćinstvima u mrežu. Standard obuhvata potrošače sa nazivnom strujom do 16A po fazi i sa nazivnim naponom do 415 V. Ovoj grupi pripadaju proizvodi kao što su kućni aparati, prenosni alati, elektronska oprema, potrošačka dobra i industrijska oprema. IEC 61000-3-2 standard ne pokriva opremu koja ima nominalni radni napon manji od 230V efektivno, a nisu naznačena ograničenja za opremu snage veće od 1kW. Definisana su ograničenja koja važe za uređaje klasifikovane u četiri kategorije označene slovima A, B, C, i D. Klasifikacija se obavlja prema algoritmu prikazanom na Sl. 5.1 [EPSMA10].



Slika 5.1. Klasifikacija opreme u skladu sa standardom IEC 61000-3-2[EPSMA10]

Klasi A pripadaju uravnoteženi trofazni potrošači i sva ostala oprema sem one koja je obuhvaćena u ostalim klasama. Klasi B pripadaju prenosni alati i uređaji koji se koriste za zavarivanje ali nemaju profesionalne karakteristike. U klasu C spada oprema koja se koristi za osvetljenje. Klasi D pripadaju računari, monitori, čija je nominalna snaga u granicama od 75W do 600W. Osim ovih potrošača, klasi D pridružuje se ostala oprema kod koje se talasni oblik struje uklapa u granice prikazane na Sl. 5.2. Naime potrebno je da 95% vremena struja bude u granicama prikazanim na Sl. 5.2. u toku svake poluperiode [Ma04]. Centralna linija M na $\pi/2$ odgovara maksimalnoj vrednosti ulazne struje.



Slika 5.2. Specijalni oblik struje za opremu klase D

Na klase B i C ne primenjuje se kriterijum talasnog oblika. Za svaku klasu uspostavljen je skup ograničenja u odnosu na izobličenja. Ograničenja izobličenja za klase A i B definišu se kao apsolutni nivoi i uključuju sve harmonike do četrdesetog. Kod klase C ograničenja izobličenja definišu se kao procenat od osnovnog harmonika i primenjuju se samo na neparne harmonike do 39-tog. Ukoliko je nominalna snaga potrošača koji pripadaju klasi C manja od 25W onda se primenjuju ograničenja koja važe za opremu klase D ili se vrednosti 3. i 5-tog harmonika ograničavaju na 86% odnosno 61% osnovne komponente struje. Za opremu koja pripada klasi D definiše se maksimalno dozvoljena struja harmonika po vatu (mA/W), pri čemu amplituda harmonika ne sme da premaši vrednost koja je definisana za taj harmonik za opremu klase A. Ograničenja za svaku klasu data su u tabeli 5.5 [Mu06, EPSMA10] .

TABELA 5.5. OGRANIČENJA ZA STRUJNE HARMONIKE PREMA STANDARDU IEC 61000-3-2.

Oprema klase A		Oprema klase B	
Red	Maksimalno dozvoljena struja harmonika (A)	Red	Maksimalno dozvoljena struja harmonika (A)
Neparni harmonici		Neparni harmonici	
3	2.30	3	3.45
5	1.14	5	1.71
7	0.77	7	1.155
9	0.4	9	0.6
11	0.33	11	0.495
13	0.21	13	0.315
15<h<39	0.15 x15/h	15<h<39	0.225 x 15/h
Parni harmonici		Parni harmonici	
2	1.08	2	1.62
4	0.43	4	0.645
6	0.3	6	0.45
8<h<40	0.23 x8/h	8<h<40	0.345 x8/h

Oprema klase C		Oprema klase D		
Red harmonika (h)	Maksimalno dozvoljena struja harmonika izražena u procentima struje osnovne komponente	Red harmonika (h)	Maksimalno dozvoljena struja harmonika po vatu (mA/W)	Maksimalno dozvoljena struja harmonika (A)
2	2	3	3.4	2.30
3	30 x PF	5	1.9	1.14
5	10	7	1.0	0.77
7	7	9	0.5	0.4
9	5	11	0.35	0.33
11<h<39	3	13<h<39	3.85/h	0.15 x15/h
PF: faktor snage				

Za potrošače kod kojih je nominalna struja veća od 16 A po fazi, primenjuje se standard IEC 61000-3-4 koji predstavlja nadogradnju standarda IEC 61000-3-2.

Kao što se vidi na osnovu prethodne tabele, standard IEC 61000-3-2 limitira emisiju harmonika ka mreži, za opremu nezavisno od sistema na koji je oprema priključena. Svi proizvedeni uređaji, pre odlaska u slobodnu prodaju moraju da prođu kontrolu ispunjenosti ovog standarda. Ovo je od izuzetnog značaja, pogotovo što se stalno povećava broj nelinearnih potrošača na mreži. Naravno, kada se proizvod testira mora da se obezbedi da napon mreže nema harmonike. Saglasno tome ovim standardom propisuju se gornje granice izobličenja struje napajanja koje omogućavaju kvalitetno merenje. Imajući u vidu da obična sprega sa mrežom ne može da zadovolji ovaj standard, prilikom merenja se koriste specijalni izvori prostoperiodičnog napona.

Standard detaljno specificira kako se mere harmonici sa posebnom pažnjom posvećenom fluktuaciji harmonika i uslovima testiranja.

5.3 EN50160 standard – evropski standard za karakteristike napona

Standardom EN 50160 definisana su dozvoljena odstupanja od nominalne vrednosti na potrošačkim priključcima (*PCC*) u javnoj niskonaponskoj mreži (*LV, Low Voltage*) i srednjenaponskoj mreži (*MV, Medium Voltage*), pri nominalnim radnim uslovima. Kod LV mreže efektivna vrednost napona između faza ne prelazi 1000V, dok se kod MV mreže kreće u opsegu između 1kV i 35kV.

U tabeli 5.6 date su vrednosti za harmonike napona do 25-og reda koje ne smeju biti prekoračene tokom 95% vremena 10-to minutnih posmatranja izvršenih u toku jedne nedelje. Tabela 5.6 ne obuhvata vrednosti harmonika višeg reda zato što su one obično male, a i nisu

predvidljive usled rezonantnih efekata. Uprkos tome što nisu navedena ograničenja za ove harmonike, oni se uzimaju u razmatranje prilikom izračunavanja THD_V . Totalno harmonijsko izobličenje napona THD_V ne sme preći 8% u 95% izvršenih merenja u toku nedelju dana. Informacije o drugim ograničenjima koja su definisana standardom EN50160, mogu se naći u [Ma04].

TABELA 5.6. OGRANIČENJA ZA NAPONSKE HARMONIKE PREMA STANDARDU EN50160

Neparni harmonici		Parni harmonici		Harmonici trećeg reda	
h	$\%V_1$	h	$\%V_1$	h	$\%V_1$
5	6	2	2	3	5
7	5	4	1	9	1.5
11	3.5	6-24	0.5	15	0.5
13	3			21	0.5
17	2				
19	1.5				
23	1.5				
25	1.5				

6 Pregled metoda za identifikaciju izvora harmonijskih izobličenja

Nijedan od pomenutih standarda ne definiše metod odnosno veličinu koja se koristi za određivanje izvora harmonijskih izobličenja (nelinearnih potrošača). Svesni nedostatka ovih standarda stručnjaci se utrkuju da razviju što precizniji i efikasniji metod koji bi bio jednostavan za upotrebu. Otuda postoji veliki broj različitih metoda. Svi se mogu podeliti u dve grupe:

- *multi-point* metodi i
- *single-point* metodi.

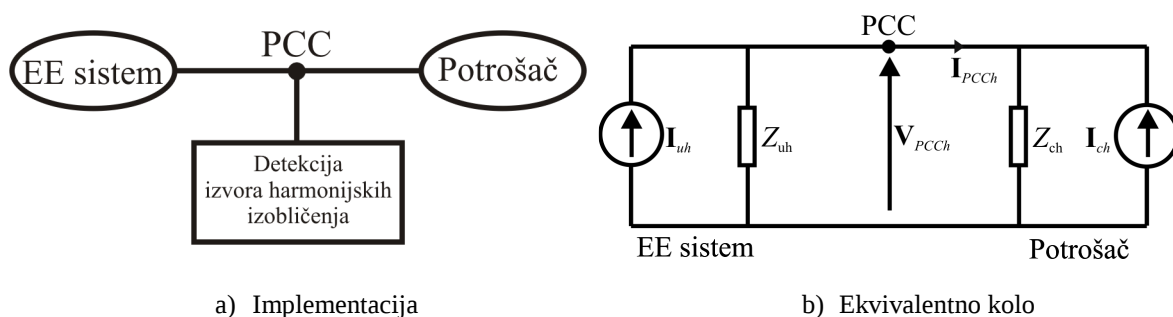
Multi point metodi su zasnovani na merenjima u više distribuiranih tačaka u EE mreži. Ovi metodi daju precizan uvid o zastupljenosti harmonika u EE mreži. Njihova implementacija zahteva distribuiran i sinhronizovan merni sistem sa kompleksnom i skupom mernom opremom. S druge strane, *single-point* metodi su zasnovani na merenjima u jednoj tački na mreži. Oni ne zahtevaju skupu mernu opremu, ali je njihova preciznost daleko manja od *multi-point* metoda. Pregled postojećih *single-point* metoda da je u Tabeli 6.1.

TABELA 6.1. PREGLED POSTOJEĆIH *SINGLE-POINT* METODA ZA DETEKCIJU NELINEARNOG POTROŠAČA

Metod	Potrebni podaci	Cilj
Praćenje znaka harmonijske aktivne snage (APD)	Napon i struja, dobijeni merenjem u PCC tački	Detekcija izvora izobličenja
Praćenje znaka harmonijske reaktivne snage (RPD)		
Metod zasnovan na merenju neaktivne snage (NP)		
Rangiranje na osnovu harmonijskih izobličenja (HPR)	Struja dobijena merenjem u PCC tački	Podela odgovornosti između potrošača i EE sistema
Metod zasnovan na određivanju vrednosti impedanse (CI)	Tevenenovo ekvivalentno kolo potrošača i EE sistema	

6.1 Metod zasnovan na praćenju harmonijske aktivne snage

Problem koji se javlja prilikom identifikacije izvora harmonijskih izobličenja može se objasniti uz pomoć Sl. 6.1. Na Sl. 6.1.a prikazano je mesto na kome se postavlja uređaj za detekciju izvora harmonijskog izobličenja dok je na Sl.6.1.b prikazano ekvivalentno kolo koje će se dalje koristiti u analizi. Izvori izobličenja predstavljeni su preko strujnih generatora I_{uh} i I_{ch} , dok Z_c i Z_u predstavljaju njihove ekvivalentne impedanse. Indeks u odnosi se na parametre sa strane distributera (*utility*), dok se indeks c odnosi na parametre sa strane potrošača (*customer*). Topologija modela sa Sl. 6.1.b može se primeniti na različiti red harmonika, naravno. Pri čemu se parametri modela I_{uh} , I_{ch} , Z_{ch} i Z_{uh} odnose na h -ti harmonik. Glavni zadatak identifikacije izvora harmonijskih izobličenja jeste da se odredi da li je za prisustvo harmonika na PCC odgovoran EE sistem ili ih je generisao potrošač.



Slika 6.1. Detekcija uzročnika harmonika u EE mreži na mestu priključenja potrošača [Xu03]

Da bi se odredilo ko više izobličuje mrežu uz pomoć metoda zasnovanog na praćenju znaka harmonijske aktivne snage, potrebno je prvo izmeriti napon i struju u PCC tački. Na osnovu izmerenih vrednosti primenom izraza (6.1) računa se vrednost aktivne snage svakog harmonika ponaosob:

$$P_h = V_{PCC} I_{PCC} \cos(\theta_h), \quad (6.1)$$

gde V_{PCC} , I_{PCC} predstavljaju RMS vrednosti napona i struje merenih u PCC tački za h -ti harmonik, a θ_h ugao između napona i struje. Korišćenjem prethodnog izraza može se odrediti dominantni izvor zagađenja za svaki harmonik posebno. Naime ako je $P_h > 0$ onda je izvor izobličenja sa strane EE sistema; u suprotnom izvor harmonijskog izobličenja na mreži je potrošač. Da bi se merila RMS vrednost harmonika napona i struje potrebno je koristiti analizator mreže čiji rad se zasniva na FFT algoritmu. Cena profesionalnih analizatora je

izrazito visoka, zato što se za veliku preciznost zahteva sofisticiran specifični hardver obogaćen namenskim softverom za implementaciju FFT algoritma. Ovo predstavlja glavnu prepreku za širu primenu metoda na nivou svakog pojedinačnog potrošača (elektronskog brojila).

Sumiranjem vrednosti aktivne snage za svaki harmonik dobija se ukupna vrednost aktivne harmonijske snage P_H . Ukoliko je $P_H > 0$ onda je izvor izobličenja EE sistem napajanja, u suprotnom izvor harmonijskog izobličenja na mreži je potrošač.

Da bi se postupak pojednostavio, realizuju se instrumenti koji računaju ukupnu vrednost harmonijske aktivne snage P_H kao:

$$P_H = P - P_1 = \sum_{h=2}^M V_{PCC_h} I_{PCC_h} \cos(\theta_h), \quad (6.2)$$

gde P i P_1 označavaju ukupnu aktivnu snagu i doprinos osnovnog harmonika ($h=1$) respektivno.

Uprkos ceni, ovaj način identifikacije nelinearnog potrošača je široko rasprostranjen mnogo godina unazad naročito u industriji, [Si07, Xu03]. Sami proizvođači merne opreme predstavljaju ovu mogućnost kao ključnu karakteristiku njihove opreme [Xu03]. Prema istraživanjima koja su rađena u cilju ispitivanja verodostojnosti ovog metoda ustanovljeno je da on nije potpuno tačan [Si07, Xu03].

6.1.1 Nedostaci metoda zasnovanog na praćenju znaka P_H

Pretpostavimo da prethodno opisani metod primenjujemo za tri specijalna slučaja:

- Kolo jednosmerne struje
- Kolo naizmenične struje sa čisto reaktivnim potrošačem, $Z=X$
- Kolo naizmenične struje sa čisto otpornim potrošačem, $Z=R$

Za analizu validnosti metoda zasnovanog na praćenju znaka aktivne snage u prva dva slučaja koristićemo model sa Sl. 6.1.b. Iako problem detekcije izvora harmonijskog izobličenja zahteva analizu AC kola, analizom DC kola možemo otkriti glavne karakteristike metoda zasnovanog na praćenju znaka aktivne snage. Takođe za DC kolo možemo reći da je specijalan slučaj AC kola kod koga ne postoji fazna razlika između dva izvora harmonijskog izobličenja i kod koga je $Z=R$. Na osnovu Sl. 6.1.b sledi da su u PCC tački struja i napon definisani sa:

$$I_{PCC_h} = I_{ufh} + I_{cfh} = \frac{R_u}{R_u + R_c} I_{uh} - \frac{R_c}{R_u + R_c} I_{ch}, \quad (6.3)$$

$$V_{PCC} = \frac{R_c R_u}{R_u + R_c} (I_{uh} + I_{ch}), \quad (6.4)$$

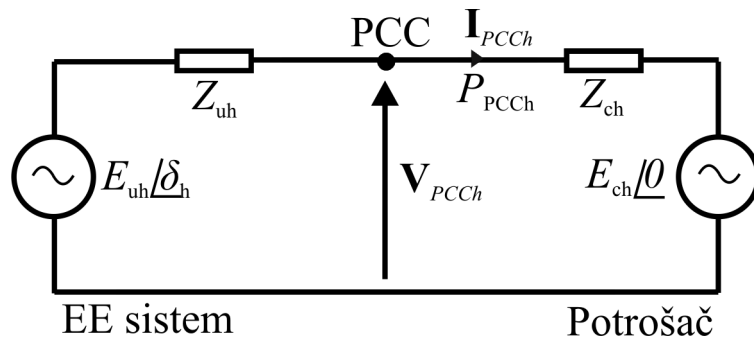
gde je I_{uh} i I_{ch} predstavljaju doprinos struja I_{uh} i I_{ch} u PCC tački, respektivno.

S obzirom da je napon uvek pozitivan, da bi smer snage bio usmeren ka potrošaču potrebno je da struja bude pozitivna, odnosno da sledeći uslov bude ispunjen:

$$R_u I_{uh} > R_c I_{ch}. \quad (6.5)$$

Do istog uslova dolazi se korišćenjem alternativnog metoda baziranog na superpoziciji i indeksu struje koji je predložen u [Xu03]. Ukoliko je smer struje kod potrošača suprotan smeru prikazanom na Sl. 6.1.b, potrebno je korigovati prethodne jednačine. Naime, u ovom slučaju struja postaje stalno pozitivna veličina, a vrednost napona može biti ili pozitivna ili negativna. Ukoliko želimo da smer snage bude usmeren prema potrošaču potrebno je da $I_{uh} > I_{ch}$. Ovaj uslov nije u konzistentnosti sa uslovom (6.5) koji se dobija primenom metoda superpozicije, a koji zavisi i od vrednosti R_u i R_c . Na osnovu prethodne analize dokazali smo da postoje neusklađenosti između metoda zasnovanog na praćenju znaka aktivne snage i metoda zasnovanog na indeksu struje. Takođe, još jedan važan zaključak dolazi do izražaja na osnovu prethodne analize, a to je da vrednost aktivne snage više zavisi od faznog ugla između dva izvora izobličenja nego od razlike njihovih amplituda.

Za analizu slučaja prikazanog na Sl. 6.2 koji predstavlja dva AC izvora sa $Z_{uh}=X_{uh}$ i $Z_{ch}=X_{ch}$, možemo napisati klasičnu ugaonu (*power-angle*) jednačinu (6.6). Jednačina (6.6) odnosi se na slučaj kada je tok snage usmeren od EE sistema prema potrošaču:



Slika 6.2. Tevenenovo ekvivalentno kolo [Xu03]

$$P_h = \frac{E_{uh} E_{ch}}{X_{uh} + X_{ch}} \sin \delta_h = \frac{X_{uh} X_{ch}}{X_{uh} + X_{ch}} I_{uh} I_{ch} \sin \delta_h, \quad (6.6)$$

gde su E_{uh} i E_{ch} , amplitude harmonika napona sa strane mreže i korisnika, respektivno; X_{uh} , X_{ch} , ekvivaletne reaktanse h -tog harmonika na strani EE sistema i potrošača, respektivno, a δ_h fazni ugao između E_{uh} i E_{ch} . Na osnovu (6.6) može se zaključiti da smer snage definiše fazni ugao δ_h između dva izvora harmonijskog izobličenja, a ne amplituda E_{uh} i E_{ch} . S obzirom da

smer snage zavisi od δ_h , zaključujemo da metod zasnovan na praćenju znaka aktivne snage nije pouzdan.

Za analizu slučaja kada imamo dva AC izvora sa $Z_u=R_u$ i $Z_c=R_c$ koristi se Sl.6.2. Usled gubitka snage koja se javlja na otpornicima R_u i R_c smer aktivne snage zavisi i od položaja PCC tačke u kojoj se meri napon i struje. Da bismo pojednostavili problem pretpostavićemo da generator $\mathbf{E}_{uh}$ može da ima pozitivnu ili negativnu vrednost, u zavisnosti od toga da li EE mreža generiše ili apsorbuje h -ti harmonik. Za slučaj kada je snaga generisana od strane $\mathbf{E}_{uh}$ aktivna snaga računa se pomoću sledećeg izraza:

$$P_h = \Re \left(\frac{\mathbf{E}_{uh}^* - \mathbf{E}_{ch}^*}{R_u + R_c} \mathbf{E}_{uh} \right) = \frac{E_{uh}}{R_u R_c} (E_{uh} - E_{ch} \cos \delta_h), \quad (6.7)$$

gde operator $\Re$ označava realni deo, a $\mathbf{E}_{uh}^*$ i $\mathbf{E}_{ch}^*$ predstavljaju konjugovano kompleksne veličine, a δ_h fazni ugao između $\mathbf{E}_{uh}$ i $\mathbf{E}_{ch}$. S obzirom da je $R_u + R_c > 0$ a $\cos \delta_h < 0$, ukoliko je ispunjen uslov $E_{uh} > E_{ch}$ snage je generisana od strane EE sistema. Prethodna analiza nam pokazuje da se metod zasnovan na praćenju znaka aktivne znake može koristiti kao potreban ali ne i kao dovoljan indikator za određivanje dominantnog izvora harmonijskog izobličenja.

Drugi deo analize odnosi se na uticaj merne tačke (PCC) na tok snage u slučaju kada je $Z_u=R_u$ i $Z_c=R_c$, Sl. 6.2. Na osnovu Sl. 6.2 za napon i struju u PCC tački možemo napisati sledeća dva obrasca:

$$\mathbf{V}_{PCC} = \frac{R_u}{R_u + R_c} \mathbf{E}_{uh} + \frac{R_c}{R_u + R_c} \mathbf{E}_{ch}, \quad (6.8)$$

$$\mathbf{I}_{PCC} = \frac{\mathbf{E}_{uh}^* - \mathbf{E}_{ch}^*}{R_u + R_c}. \quad (6.9)$$

Aktivna snaga računa se kao:

$$\begin{aligned} P_{PCC} &= \Re \left(\mathbf{V}_{PCC} \cdot \mathbf{I}_{PCC}^* \right) \\ &= \left(\frac{R_u}{R_u + R_c} \mathbf{E}_{uh} + \frac{R_c}{R_u + R_c} \mathbf{E}_{ch} \right) \left(\frac{\mathbf{E}_{uh}^* - \mathbf{E}_{ch}^*}{R_u + R_c} \right) \\ &= \frac{R_c E_{ch}^2 - R_u E_{uh}^2 + (R_u - R_c) E_{uh} E_{ch} \cos \delta_h}{(R_u + R_c)^2}. \end{aligned} \quad (6.10)$$

Prethodna jednačina pokazuje da vrednosti otpornosti R_u i R_c igraju važnu ulogu u definisanju toka aktivne snage. Njihov uticaj možemo kvantifikovati ukoliko razmotrimo specijalni slučaj kada je $E_{uh}=E_{ch}$. Tada jednačina (6.10) može da se napiše kao:

$$P_{PCC} = \frac{E_{uh} E_{ch} (1 - \cos \delta_h)}{(R_u + R_c)^2} (R_u - R_c). \quad (6.11)$$

Jednačina 6.11 jasno pokazuje da tok aktivne snage zavisi od vrednosti otpornosti R_u i R_c , odnosno od položaja PCC tačke. Naime ukoliko je PCC bliža potrošaču, $R_u > R_c$, vrednost aktivne snage je pozitivna, a samim tim i njen smer je u pravcu potrošača. Prethodna analiza takođe pokazuje da tačnost metoda zasnovanog na praćenju znaka aktivne snage zavisi i od položaja PCC tačke u kojoj se vrši merenje napona i struje.

6.2 Metod zasnovan na praćenju znaka reaktivne harmonijske snage

Opšte je poznato da tok aktivne snage zavisi od faznog ugla između dva AC izvora, dok tok reaktivne snage zavisi od amplitude njihovih napona. Zbog toga se sa pravom postavlja pitanje da li će smer reaktivne snage biti pouzdaniji pokazatelj dominantnog izvora harmonijskog izobličenja. Analiza metoda zasnovanog na praćenju znaka reaktivne snage biće urađena uz pomoć kola sa Sl. 6.2, kada je $Z_{uh}=X_{uh}$ a $Z_{ch}=X_{ch}$. Pretpostavimo da je tok reaktivne snage usmeren od E_{uh} . Vrednost ove snage računa se kao:

$$\begin{aligned} Q_h &= \Im \left(\frac{\mathbf{E}_{uh}^* - \mathbf{E}_{ch}^*}{-j(X_{uh} + X_{ch})} \mathbf{E}_{uh} \right) \\ &= \frac{E_{uh}}{X_{uh} + X_{ch}} (E_{uh} - E_{ch} \cos \delta_h), \end{aligned} \quad (6.12)$$

gde operator $\Im$ označava imaginarni deo kompleksnog broja, E_{uh} i X_{uh} predstavljaju amplitudu napona praznog hoda i ekvivalentnu reaktansu h -tog harmonika na strani EE sistema, E_{ch} i X_{ch} odgovarajuće veličine na strani potrošača, respektivno, a δ_h fazni ugao između E_{uh} i E_{ch} . S obzirom da je $\cos \delta_h$ uvek manji od 1 a $X_{uh}+X_{ch}>0$, uslov $E_{uh}>E_{ch}$ ukazuje da je tok reaktivne snage od EE sistema prema potrošaču. Može se zaključiti da se metod baziran na praćenju znaka Q_h može koristiti za detekciju dominantnog izvora izobličenja. Međutim, on predstavlja neophodan ali ne i dovoljan uslov da bi se nedvosmisleno utvrdio uzročnik postojanja h -tog harmonika u PCC tački. Naime može da se desi da $E_{ch} \cos \delta_h < E_{uh}$ u izrazu (6.12) što znači da tok reaktivne snage zavisi i od faznog ugla δ_h . Uprkos ovom ograničenju metod zasnovan na praćenju znaka reaktivne snage (Q_h) je pouzdaniji od metoda zasnovanog na praćenju znaka aktivne snage (P_h). Još jedno veoma važno ograničenje metoda baziranog na praćenju znaka Q_h odnosi se na uslov da $X_{uh}+X_{ch}>0$. Generalno ovaj

uslov je ispunjen za osnovnu frekvenciju ali ne mora da znači da važi za frekvenciju nekog harmonika, što predstavlja najveći nedostatak ovog metoda.

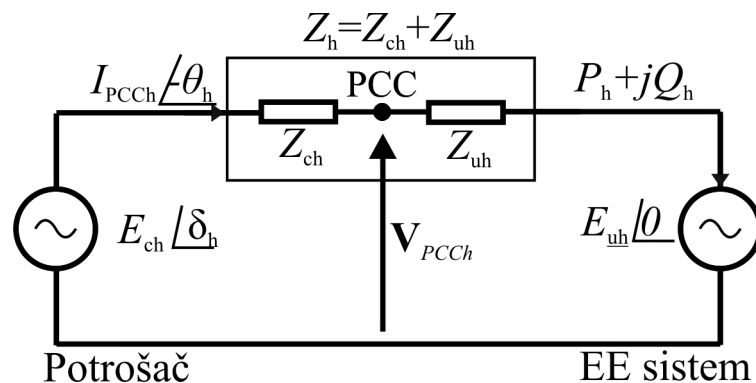
Validnost metoda baziranog na praćenju znaka reaktivne snage biće proverena i za slučaj kada je $Z_u=R_u$ i $Z_c=R_c$, Sl.6.2. Ukoliko pretpostavimo da je tok snage u pravcu potrošača onda se reaktivna snaga računa kao:

$$Q_h = \frac{E_{uh}E_{ch}}{R_u R_c} \sin \delta_h, \quad (6.13)$$

gde je δ_h fazni ugao između E_{uh} i E_{ch} za h -ti harmonik. Jednačine (6.6), (6.13) i (6.7), (6.12) su istovetne. Poređenjem (6.6) sa (6.13) i (6.7) sa (6.12) može se zaključiti da su metodi zasnovani na praćenju znaka aktivne/reaktivne snage komplementarni. Koji metod će se primeniti zavisi od odnosa otpornosti i reaktanse (R/X) potrošača. Ukoliko je impedansa kola pretežno reaktivnog karaktera onda je metod zasnovan na praćenju znaka reaktivne snage precizniji i obrnuto [Xu03].

6.3 CI (Critical Impedanse) metod

Prilikom analize metoda zasnovanog na praćenju znaka reaktivne snage, krenuli smo od pretpostavke da je tok reaktivne snage od EE sistema prema potrošaču. Pomenuta analiza je pokazala izvesne nedostatke koje ublažava primena *CI metoda* [Li04]. Da bi analiza CI metoda bila jasnija poći ćemo od pretpostavke da je tok snage usmeren od potrošača ka EE sistemu kao što je ilustrovano na Sl.6.2. To bi značilo da je izvor h -te harmonijske komponente potrošač, a da ga EE mreža apsorbuje. Na ovaj način ponovićemo deo metoda zasnovanog na praćenju znaka Q_h ali sa ciljem da opis CI metoda bude jasniji.



Slika 6.3. Tevenenovo ekvivalentno kolo za ilustraciju CI metoda [Li04]

Za kolo sa Sl 6.2. aktivna i reaktivna snaga računaju se kao:

$$P_h = E_{uh} I_{PCCh} \cos \theta_h = \frac{E_{uh} E_{ch}}{X_h} \sin \delta_h, \quad (6.14)$$

$$Q_h = E_{uh} I_{PCCh} \sin \theta_h = \frac{E_{uh}}{X_h} (E_{ch} \cos \delta_h - E_{uh}), \quad (6.15)$$

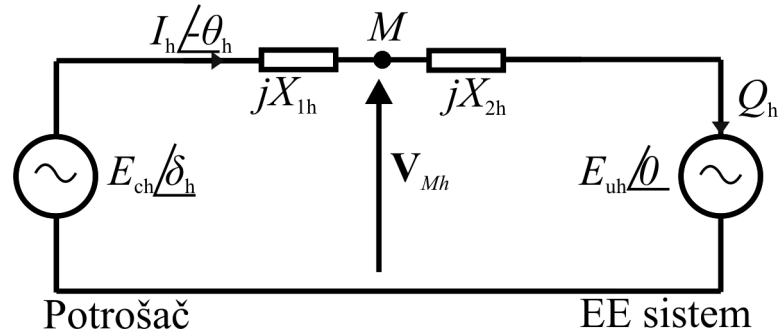
gde je δ_h fazni ugao između E_{uh} i E_{ch} , a θ_h fazni ugao između E_{uh} i I_{PCCh} . Jednačine (6.14) i (6.6) su konzistentne, dok se jednačina (6.15) razlikuje od jednačine (6.12) u znaku, što je posledica suprotnog smera toka snage u odnosu na slučaj prikazan na Sl. 6.2. Prethodna jednačina pokazuje da smer reaktivne snage zavisi od amplitude napona E_{uh} i E_{ch} . EE sistem će apsorbovati reaktivnu snagu ($Q_h > 0$), samo u slučaju kada je $E_{uh} < E_{ch}$. Ukoliko je prethodni uslov ispunjen može se zaključiti da se izvor koji ima dominantni uticaj na struju I_{PCCh} , nalazi na strani potrošača. Da bi se snaga h -tog harmonika generisanog na potrošaču apsorbivala, potrebno je da E_{ch} ima dovoljnu amplitudu koja će mu dozvoliti da utisne reaktivnu snagu ka EE mreži u vidu E_{uh} .

Međutim, ako je $Q_h < 0$ ne mora da znači da je dominantni izvor zagađenja E_{uh} odnosno EE sistem. Naime, može da se desi da reaktivna snaga koju generiše EE sistem usled postojanja h -tog harmonika (E_{uh}) ne dospe do potrošača (E_{ch}) iz razloga što impedansa voda apsorbuje reaktivnu snagu. Da bismo analizirali slučaj kada $Q_h < 0$ moramo pretpostaviti da su impedanse za h -ti harmonik na strani EE sistema (Z_{uh}) i na strani potrošača (Z_{ch}) poznate. U EE sistemu dominira impedansa transformatora koja je poznata. Takođe mnogobrojne studije koje su posvećene uticaju harmonika od 5 do 15 reda na impedansu EE sistema pomažu da se odredi aproksimativna vrednost impedanse EE sistema (Z_{uh}). Sa druge strane određivanje aproksimativne vrednosti impedanse na strani potrošača Z_{ch} nije jednostavno. Naime, nije poznat vremenski raspored uključenja/isključenja potrošača kao i tip uređaja koji je priključen na mreži. Jedan od načina da se odredi okvirna vrednost Z_c je korišćenje frekvencijske analize ili odgovarajući simulacioni model za potrošače.

Znajući da je ukupna impedansa pri h -tom harmoniku $Z_h = jX_h = j(X_{ch} + X_{uh})$, uz uslov da je poznato $Z_{uh} = jX_{uh}$, može se reći da će h -ti harmonik generisan na strani potrošača izazvati na strani EE sistema (E_{uh}) komponentu čija je vrednost:

$$E_{uh} = V_{PCCh} - I_{PCCh} Z_{uh} = V_{PCCh} - I_{PCCh} \cdot jX_{uh}. \quad (6.16)$$

Uticaj tačnosti određivanja X_{uh} na grešku metoda zasnovanog na praćenju znaka reaktive snage analiziran je u [Li04].


 Slika 6.4. Određivanje napona u tački M duž voda sa raspodeljenom reaktansom jX_h [Li04]

Ipak, osnovni cilj CI metoda [Li04] je da se odredi koliko daleko reaktivna snaga generisana od strane E_{uh} može da se prostire duž voda sa podužnom reaktansom jX_h , ukoliko je ona uniformno raspodeljena između E_{uh} i E_{ch} . Zato razmotrimo slučaj prikazan na Sl. 6.4. Uместo napona u PCC tački posmatramo napon u proizvoljnoj tački m , koja se nalazi duž impedanse voda. Metodom superpozicije može se odrediti uticaj E_{uh} i E_{ch} kao:

$$V_{Mh} = \frac{X_{1h}}{X_{1h} + X_{2h}} E_{uh} \angle 0 + \frac{X_{2h}}{X_{1h} + X_{2h}} E_{uh} \angle \delta_h, \quad (6.17)$$

gde je $X_{1h} + X_{2h} = X_h$.

Tačka M u kojoj je napon najniži može se odrediti iz uslova $\partial |V_{mh}|^2 / \partial X_{2h} = 0$.

$$X_M = \frac{E_{uh}^2 - E_{ch} E_{uh} \cos \delta_h}{E_{uh}^2 + E_{ch}^2 - 2 E_{ch} E_{uh} \cos \delta_h} X_h, \quad (6.18)$$

gde X_M predstavlja vrednost reaktanse od E_{uh} do tačke gde je vrednost napona najniža. Struja I_h koja teče kroz kolo prikazano na Sl. 6.4 računa se kao:

$$I_h^2 = \frac{E_{uh}^2 + E_{ch}^2 - 2 E_{uh} E_{ch} \cos \delta_h}{X_h^2}. \quad (6.19)$$

Kombinovanjem prethodnog izraza za struju sa (6.15), izraz (6.18) može da se napiše u obliku:

$$X_M = \frac{-Q_h}{I_h^2} = -\frac{E_{uh}}{I_h} \sin \theta_h. \quad (6.20)$$

gde je θ_h fazni ugao između struje I_h i napona E_{uh} . S obzirom da je $X_M I^2$ jednako $|Q_h|$ može se zaključiti da je celokupno generisana reaktivna snaga od strane E_{uh} apsorbovana od strane reaktanse X_M . Takođe tačka M ujedno označava najdalju tačku do koje može da se prostre reaktivna snaga, to jest tačku u kojoj je komponenta h -tog harmonika napona generisana na strani EE sistema najniža.

Na osnovu vrednosti reaktanse X_M može se odrediti dominantni izvor zagađenja. Naime ukoliko je $X_M > X_h/2$, očekuje se da je vrednost amplitude E_{uh} dovoljno velika da emituje reaktivnu snagu koja može da pređe veću dužinu od polovine rastojanja između dva izvora izobličenja. U suprotnom ukoliko je $X_M < X_h/2$, odnosno ukoliko je tačka M bliža E_{uh} , očekuje se da E_{ch} ima veću amplitudu. Na osnovu prethodne analize možemo zaključiti da jednostavno poređenje X_M i $X_h/2$ može dovesti do korektnog određivanja dominantnog izvora izobličenja[Li04].

Da bismo dokazali da se na osnovu kriterijuma da li je $X_M > X_h/2$ može odrediti dominantni izvor izobličenja pretpostavićemo da je $E_{uh} = \alpha E_{ch}$, gde je $\alpha > 1$. Zamenom E_{uh} u izraz (6.18) dobićemo:

$$X_M = \frac{\alpha^2 - \alpha \cos \delta_h}{(1 + \alpha^2) - 2\alpha \cos \delta_h} X_h. \quad (6.21)$$

Minimalna vrednost za X_M dobiće se u slučaju kada je $\delta_h = \pi$

$$X_{M \min} = \left. \frac{\alpha^2 - \alpha \cos \delta_h}{(1 + \alpha^2) - 2\alpha \cos \delta_h} X_h \right|_{\delta=\pi} = \frac{\alpha}{\alpha + 1} X_h > 0.5 X_h. \quad (6.22)$$

Prethodna nejednakost biće ispunjena za sve vrednosti X_M ukoliko je $E_{uh} > E_{ch}$. Takođe ukoliko je $2X_M > X_h$ važiće i $E_{uh} > E_{ch}$. Dosadašnja analiza nam je pokazala da su znak reaktivne snage Q_h i vrednost $2X_M$ dva neophodna parametra za detekciju dominantnog izvora izobličenja. Da bismo pojednostavili određivanje dominantnog izvora harmonijskog izobličenja prethodna dva parametra se kombinuju u jedan koji se označava sa CI (*critical impedance*) i definiše se kao:

$$CI_h = 2 \frac{Q_h}{I_h^2}, \quad (6.23)$$

gde je Q_h vrednost reaktivne snage koju apsorbuje EE sistem (E_{uh}). Važno je napomenuti da CI_h indeks ima isti znak kao reaktivna snaga Q_h .

Ukoliko je $CI_h > 0$ reaktivnu snagu apsorbuje EE sistem, odnosno dominantni izvor harmonijskog izobličenja je na strani potrošača. Za slučaju kada je $CI_h < 0$ reaktivnu snagu generiše EE sistem, tako da je potrebno vrednost reaktanse X_h porediti sa apsolutnom vrednošću CI_h indeksa. Dominantni izvor harmonijskog izobličenja korišćenjem CI metoda može se odrediti uz pomoć sledećeg algoritma:

- izračunati napon E_{uh} koristeći izraz (6.16),
- izračunati Q_h pomoću izraza (6.15),

- izračunati CI_h indeks (6.23),
- ako je $CI_h > 0$, EE sistem apsorbira reaktivnu snagu, dominantni izvor harmonijskog izobličenja je na strani potrošača,
- u slučaju kada je $CI_h < 0$, EE sistem generiše reaktivnu snagu, da bi se odredio dominantni izvor harmonijskog izobličenja treba uraditi dodatno poređenje CI_h sa vrednošću reaktanse X_h ,
 - o ukoliko je $|CI_h| > X_{hmax}$, gde je X_{hmax} maksimalna moguća vrednost reaktanse X_h , EE sistem je dominantni izvor harmonijskog izobličenja. Ovo je posledica dovoljno visokog napona na strani EE sistema koji može da isporuči generisanu reaktivnu snagu do potrošača.
 - o ukoliko je $|CI_h| < X_{hmin}$, gde je X_{hmin} minimalna moguća vrednost reaktanse X_h , dominantni izvor harmonijskog izobličenja se nalazi na strani potrošača. Ovo je posledica dovoljno visokog napona na strani potrošača koji može da isporuči generisanu reaktivnu snagu do EE sistema.
 - o ukoliko je $X_{hmin} < |CI_h| < X_{hmax}$, ne može da se donese konačna odluka. Rezultati studija prikazani u [Li04], pokazuju da u ovom slučaju EE sistem i potrošač približno podjednako utiču na struju u PCC tački.

Dosadašnja analiza CI metoda odnosila se na slučaj kada je $Z_h = jX_h$ ali šta se dešava u realnijem slučaju kada je $Z_h = R + jX_h$. Ukoliko EE sistem prima snagu, vrednosti aktivne i reaktivne snage računaju se kao:

$$P_h = \frac{E_{ch}E_{uh}}{|Z_h|} \sin(\delta_h + \beta_h) - \frac{E_{uh}^2}{|Z_h|} \sin(\beta_h), \quad (6.24)$$

$$Q = \frac{E_{ch}E_{uh}}{|Z_h|} \cos(\delta_h + \beta_h) - \frac{E_{uh}^2}{|Z_h|} \cos(\beta_h), \quad (6.25)$$

gde je $\beta_h = \text{tg}^{-1}(R/X_h)$. Poređenjem jednačine (6.24), (6.25) sa jednačinama (6.14), (6.15) vidi se da je jedina razlika u rotacionom uglu β , zbog čega se uvodi pojam obrtne transformacije:

$$T = \begin{bmatrix} \cos \beta_h & -\sin \beta_h \\ \sin \beta_h & \cos \beta_h \end{bmatrix}. \quad (6.26)$$

Oblik transformisane snage je potpuno identičan slučaju kada je impedansa induktivnog karaktera.

$$\begin{bmatrix} P_{th} \\ Q_{th} \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} P_h \\ Q_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_{uh} E_{ch}}{|Z_h|} \sin \delta_h \\ \frac{E_{uh} E_{ch}}{|Z_h|} \cos \delta_h - \frac{E_{uh}^2}{|Z_h|} \end{bmatrix}. \quad (6.27)$$

Postupak implementacije *CI* metoda za određivanje dominantnog izvora harmonijskog izobličenja kada je $Z=R+jX_h$ istovetan je postupku za slučaj kada je $Z=jX_h$.

Interesantno je razmotriti još dva specijalna slučaja. U prvom slučaju $Z=-jX_h$, ovaj slučaj se javlja kada postoji prekompenzacija reaktivne snage ili pak kada je struja potrošača mala. Za pomenutu situaciju reaktivna snaga koju apsorbuje EE sistem računa se kao:

$$Q_h = E_{uh} I_h \sin \theta_h = \frac{E_{uh}}{X_h} (E_{ch} \cos \delta_h - E_{uh}). \quad (6.28)$$

Prethodna jednačina pokazuje da ukoliko je reaktivna snaga generisana od strane EE sistema ($Q_h < 0$) važiće uslov $E_{ch} > E_{uh}$. U slučaju kapacitivne impedanse važe suprotni zaključci u odnosu na induktivno opterećenje.

Jedna od retkih situacija koja može da se javi na mreži je slučaj kada je impedansa otpornog karaktera ($Z=R$). Za pomenuti slučaj transformisana reaktivna snaga biće jednaka aktivnoj.

$$Q_{th} = P_h = \frac{E_{uh}}{R} (E_{ch} \cos \delta_h - E_{uh}). \quad (6.29)$$

Drugačije rečeno u ovom slučaju se aktivna snaga pokazala kao pouzdan metod za identifikaciju izvora harmonijskog izobličenja. Važno je napomenuti da se u stvarnosti veoma retko javlja slučaj kada je impedansa otpornog karaktera i na strani EE sistema i na strani potrošača.

Rezultati simulacija i merenja koji verifikuju *CI* metod kao i analiza grešaka koje mogu da se jave usled korišćenja *CI* metoda mogu se naći u [Li04].

6.4 Non-active metod

Drugačiji pristup za identifikaciju izvora harmonijskog izobličenja zasnovan je na poređenju vrednosti tri neaktivne snage [Ba07, Ca08]. Autori ovog metoda za identifikaciju izvora harmonijskog izobličenja predlažu da se uporede vrednosti reaktivne snage:

- osnovnog harmonika, Q_1 ,
- definisane po Sharon-u, Q_{SH} , (4.23) i

- definisane po Fryze-u, Q_F , (4.22).

Ukoliko je vrednost Q_{SH} bliža vrednosti Q_1 , onda je izvor harmonijskog izobličenja EE sistem. U suprotnom, ukoliko je vrednost Q_{SH} bliža vrednosti Q_F , onda je izvor harmonijskog izobličenja potrošač. Ovaj metod nije pogodan za primenu, zato što se za računanje Q_{SH} zahteva primena analizatora spektra. Da bi se smanjila cena implementacije samog metoda a i osvarila kompatibilnost sa standardom IEEE 1459-2010, autori prethodnog metoda izvršili su neophodnu modifikaciju [Ca09]. Naime standardom IEEE 1459-2000 definisana je veličina Q_1 , veličina Q_F je prepoznata kao neaktivna snaga ($N^2 = U^2 - P^2$), dok veličina Q_{SH} nije definisana ovim standardom. Cilj modifikovanog metoda je da se nađe veličina koja će zameniti Q_{SH} , a koja može biti definisana u skladu sa IEEE 1459-2010. Nova veličina nazvana je fiktivna (*fictious*) rekativna snaga, označena je sa Q_X a definiše se kao:

$$Q_X^2 = V^2 (I_1^2 \sin^2 \theta_1 + I_H^2 \sin^2 \theta_H). \quad (6.30)$$

Sabirci u (6.30) predstavljaju doprinos osnovne komponente struje i doprinos harmonijske komponente struje (ovde su svi harmonici uzeti u obzir). Saglasno sa IEEE 1459-2010, $\sin \theta_H$ računa se kao:

$$\sin^2 \theta_H = 1 - \cos^2 \theta_H = 1 - \frac{P_H^2}{V_H^2 I_H^2}. \quad (6.31)$$

Zamenom (6.31) u (6.30), dobija se:

$$\begin{aligned} Q_X^2 &= V^2 \left(I_1^2 \sin^2 \theta_1 + \frac{D_H^2}{V_H^2} \right) \\ &= (V_1^2 + V_H^2) \cdot \left(I_1^2 \sin^2 \theta_1 + \frac{D_H^2}{V_H^2} \right) \\ &= Q_1^2 + V_H^2 I_1^2 \sin^2 \theta_1 + V_1^2 \frac{D_H^2}{V_H^2} + D_H^2, \end{aligned} \quad (6.32)$$

gde D_H predstavlja snagu izobličenja harmonika [IEEE10].

Izraz za računanje ukupne neaktivne snage (N) može se napisati u sledećem obliku:

$$\begin{aligned} N^2 &= U^2 - P^2 = (U_1^2 + U_N^2) - (P_1^2 + P_H^2) \\ &= (U_1^2 - P_1^2) + (U_N^2 - P_H^2) = Q_1^2 + D_V^2 + D_I^2 + D_H^2 \\ &= Q_1^2 + V_H^2 I_1^2 + V_1^2 I_H^2 + D_H^2 \\ &= Q_1^2 + V_H^2 I_1^2 (\sin^2 \theta_1 + \cos^2 \theta_1) + \frac{V_1^2}{V_H^2} (P_H^2 + D_H^2) + D_H^2 \\ &= Q_X^2 + V_H^2 I_1^2 \cos^2 \theta_1 + \frac{V_1^2}{V_H^2} P_H^2. \end{aligned} \quad (6.33)$$

Na osnovu jednačina (6.30) i (6.33) možemo postaviti sledeću nejednakost $Q_1 < Q_X < N$. Naime Q_1 je sastavni deo (6.30) dok je Q_X sastavni deo jednačine (6.33). Razlika između vrednosti Q_1 , Q_X i N zavisi od stepena izobličenja napona EE mreže i vrste priključenih potrošača. U prisustvu harmonika u mreži na koju je priključen linearni potrošač struja/napon su malo izoblićeni a samim tim i vrednost Q_X je bliža po vrednosti Q_1 nego N . Za slučaj kada je na mrežu priključen nelinearni potrošač vrednost Q_X je bliža vrednosti N , što ukazuje da je izvor zagađenja na strani potrošača. Ukoliko je izobličenje napona i/ili struje veće, razlika između vrednosti Q_1 , Q_X i N postaje značajnija.

Predloženi metod može se koristiti i kod trofaznog uravnoteženog sistema, posmatranjem svake veličine Q_1 , Q_X , N kao sume pojedinačnih vrednosti za svaku fazu (aritmetički pristup):

$$\begin{aligned} Q_1 &= Q_{1(RST)} = Q_{1R} + Q_{1S} + Q_{1T} \\ Q_X &= Q_{X(RST)} = Q_{XR} + Q_{XS} + Q_{XT} \\ N &= N_{(RST)} = N_R + N_S + N_T \end{aligned} \quad (6.34)$$

Rezultati simulacija publikovani u [Ca09, Ca10] pokazali su da pomenuti metod omogućava uspešnu detekciju izvora harmonijskog izobličenja, kako za monofazni, tako i za trofazni uravnoteženi ili neuravnoteženi sistem. Može se reći da je ovaj metod sveobuhvatan i veoma interesantan za distributera EE energije. Njegov osnovni nedostatak jeste otežana praktična primena na PCC tački (brojila). Naime nijedna od pomenutih definicija nije ugrađena u savremena elektronska brojila. Upravo iz ovog razloga, njegova primena na PCC zahteva zamenu svakog brojila što je, praktično, veoma teško realizovati. Takođe predloženi metod ne daje kvantitativnu informaciju koliko je zagađena mreža, već nudi samo identifikaciju da li je uzročnik potrošač ili EE sistem.

6.5 Metod baziran na PQI

U poslednje vreme pojavilo se mišljenje da se samo na osnovu THD ne može pouzdano odrediti dominantni izvor harmonijskog izobličenja [Le10]. Zato je uveden novi indeks za definisanje kvaliteta električne energije $DPQI$ (*Distortion Power Quality Index*), koji se definiše kao:

$$DPQI = LCR \cdot THD \quad (6.35)$$

Vrednost LCR (*Load Composition Rate*) računa se za struju svakog potrošača priključenog u PCC tački pomoću RMP (*Reduced Multivariate Polynomial*) polinoma. Prilikom određivanja LCR nije potrebno razmatrati napon V_{PCC} . Nasuprot LCR , prilikom računanja THD_1 mora se

uzeti u razmatranje i napon V_{pcc} . Naime vrednost THD_I može da se javi i u slučaju kada je u PCC tački priključen linearni otporni potrošač a napon je izobličen. Ovo ograničenje je prevaziđeno uz pomoć algoritma opisanog u [Le10]. Predloženi algoritam prvo računa težinski faktor admitanse za RMP model. On se zasniva na izračunavanju talasnog oblika struje koji bi se dobio pod uslovom da je potrošač pobuđen neizobličenim naponom. U sledećem koraku računa se THD_I kao:

$$THD_I = \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^N I_h^2}{I_1^2}}, \quad (6.36)$$

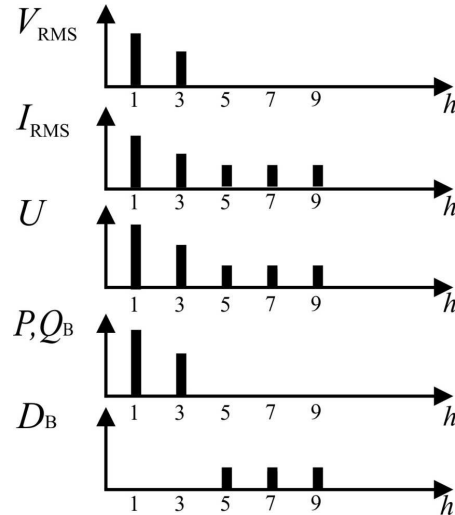
gde I_1 , I_h , predstavljaju efektivnu vrednost struje osnovne komponente i struje svakog harmonika ponaosob. Vrednost amplitude svakog harmonika računa se primenom diskretne Furijeve transformacije. Rezultati koji su prikazani u radu nedvosmisleno pokazuju da se $DPQI$ može koristiti za rangiranje nelinearnih potrošaša. Više o samom metodu i rezultatima može se naći u [Le10].

7 Novi metod za identifikaciju izvora harmonijskih izobličenja u elektroenergetskoj mreži

Prethodno analizirane metode za detekciju izvora harmonijskog izobličenja karakteriše nemogućnost precizne identifikacije izvora harmonijskog izobličenja. Naime implementacija postojećih metoda je veoma komplikovana, zbog čega se oni koriste samo na nivou transformatorskih stanica. Takođe, postojeći metodi ne obezbeđuju kvantitativnu informaciju koliko neki potrošač zagađuje EE sistem. Ovi nedostaci biće otklonjeni primenom novog metoda koji se zasniva na merenju snage izobličenja. Pomenuti metod se karakteriše jednostavnošću, što mu omogućava primenu na nivou elektronskog brojila, odnosno na PCC.

7.1 Opis metoda zasnovanog na merenju snage izobličenja

Analizom jednačina za izračunavanje aktivne (4.18) i reaktivne snage (4.20), može se zaključiti da samo harmonici struje i napona istog reda utiču na ukupnu vrednost aktivne i reaktivne snage što je prikazano na Sl. 7.1. Doprinos harmonijske komponente aktivne i reaktivne snage na njihovu ukupnu vrednost je mali, obično manji od 3% [Em04, We99]. Glavni efekat harmonici imaju na RMS vrednost struje i napona a samim tim i na prividnu snagu koja se računa kao proizvod RMS vrednosti struje i napona (4.24).



Slika 7.1. Primer uticaja spektralnih komponenta napona i struje na spektralne komponente prividne (U), aktivne (P), reaktivne (Q_B) i snage izobličenja (D_B)

Važno je napomenuti da se jednačina trougla (4.9) koja važi za prostoperiodične sisteme ne može primeniti za računanje prividne snage. Ukoliko bi se koristila pomenuta jednačina došlo bi do pojave greške. Naime u prisustvu harmonika važi sledeća nejednakost:

$$U^2 > S^2 = P^2 + Q_B^2. \quad (7.1)$$

Jasno je da razlika potiče od prisustva viših harmonika, odnosno da je ona posledica izobličenja napona i struje u sistemu. Prateći ukupnu logiku u definisanju aktivne i reaktivne snage Budeanu je 1927. godine uveo pojam snage izobličenja (*distortion power*), koja je posledica prisustva harmonika u mreži. Zato je uveo korekciju u izrazu za prividnu snagu:

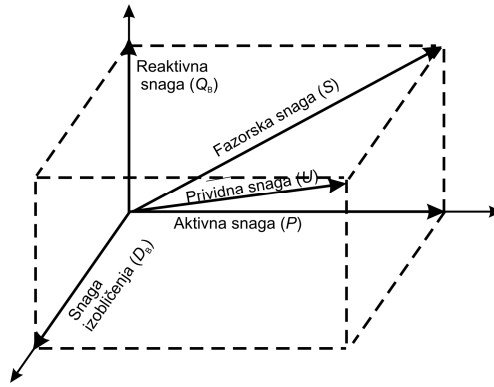
$$U^2 = S^2 + D_B^2, \quad (7.2)$$

gde S , predstavlja faznu snagu, a D_B snagu izobličenja. Suština ove korekcije sadržana je u činjenici da je u odsustvu harmonika, $D_B=0$, tako da važi $U^2=S^2=P^2+Q_B^2$, čime ova poznata definicija postaje specijalni slučaj primene (7.2).

Na osnovu ovoga sledi da snaga izobličenja može da se izračuna kao:

$$D_B = \sqrt{U^2 - P^2 - Q_B^2}. \quad (7.3)$$

Kao što je rečeno doprinos harmonika ispoljava se kroz snagu izobličenja. Dakle osim aktivne, reaktivne i prividne snage postoji i snaga izobličenja. Primenom izraza (7.3) može se nacrtati novi dijagram koji slikovito prikazuje geometrijski odnos između aktivne P , reaktivne Q_B , fazne S , snage izobličenja D_B , i prividne snage U kod monofaznog potrošača, kao što ilustruje Sl. 7.2.



Slika 7.2. Grafička interpretacija odnosa između snaga P , Q_B , S , D_B i U kod monofaznog nelinearnog potrošača

Zamenom izraza koji se koriste za računanje aktivne, reaktivne i prividne snage ((4.18), (4.20), (4.24) respektivno) u jednačini (7.3) dobija se:

$$D_B^2 = \sum_n^{M-1} \sum_{k=n+1}^M (V_n \cdot I_k \cdot \cos \theta_n - V_k \cdot I_n \cdot \cos \theta_k)^2 + \sum_n^{M-1} \sum_{k=n+1}^M (V_n \cdot I_k \cdot \sin \theta_n - V_k \cdot I_n \cdot \sin \theta_k)^2 \quad (7.4)$$

U slučaju kada je na mrežu priključen linearni otporni potrošač (npr. grejač, sijalica) struja i napon imaju iste harmonike, tj. odnos između napona i struje je isti za sve harmonike

$$\frac{V_1}{I_1} = \frac{V_3}{I_3} = \dots = \frac{V_h}{I_h}, \quad (7.5)$$

gde h označava red harmonika. Odavde proističe da je $V_n \cdot I_k = V_k \cdot I_n$. Otporni karakter potrošača prouzrokuje nulti fazni ugao $\cos \theta_n = \cos \theta_k = 1$, $\sin \theta_n = \sin \theta_k = 0$, tako da će svi sabirci u (7.4) biti jednaki nuli, tako da je i snaga izobličenja jednaka nuli.

Kada je na mrežu priključen linearni reaktivni (induktivni ili kapacitivni) potrošač, impedanse potrošača za svaki harmonik nisu međusobno jednake ($Z_1 \neq Z_3 \neq \dots \neq Z_h$) pa samim tim ne važi uslov (7.5). Zato će se iz (7.4) dobiti da je $D_B > 0$, detaljnija analiza ovog slučaja biće data u sledećem poglavlju.

U slučaju nelinearnog potrošača, struja sadrži i harmonike koji ne postoje kod napona napajanja što je ilustrovano na Sl. 7.1. Vrednost ovih harmonika ne utiče direktno na ukupnu aktivnu (4.19) i reaktivnu (4.20) snagu. Međutim oni direktno doprinose efektivnoj vrednosti struje, posledično dolazi do povećanja prividne snage (4.24) što pak utiče na pojavu snage izobličenja $D_B > 0$ (7.3).

Na osnovu Sl. 7.1 i jednačine (7.4) zaključujemo da se metod zasnovan na merenju snage izobličenja uspešno može koristiti u svim situacijama za detekciju izvora harmonijskih izobličenja na mestu priključenja potrošača.

7.2 Funkcionalna verifikacija metoda simulacijama

Funkcionalna verifikacija predloženog metoda za detekciju izvora harmonijskog izobličenja urađena je uz pomoć originalnog MATLAB koda koji je napisan za tu namenu. Pri simulaciji korišćeni su podaci o vrednostima amplituda i faza harmonika struje iz Tabele 4.1. Rezultati simulacija sistematizovani su u Tabeli 7.1. Osim nelinearnih potrošača, u prve dve kolone Tabele 7.1 prikazani su rezultati za dva linearna potrošača i to za sijalicu sa užarenim vlaknom i grejač.

TABELA 7.1. REZULTATI SIMULACIJE ZA RAZLIČITE POTROŠAČE

	Sijalica	Grejač	FL	EcoBulb CFL	Philips CFL	3-DR	SMPS	PWM VSD
$I_{RMS}[A]$	0.44	10.00	0.10	0.09	0.13	13.53	14.84	14.23
$V_{RMS}[V]$	230.1	230.10	230.10	230.10	230.10	230.10	230.10	230.10
$U[VA]$	100.14	2302.10	23.60	20.90	29.69	3112.90	3414.10	3274.50
$U_1[VA]$	100.00	2300.00	23.02	19.54	18.97	2299.82	2300.06	2299.95
$P[W]$	100.14	2302.10	17.31	18.53	15.95	2251.40	2210.20	2303.10
$P_1[W]$	100.05	2300.00	17.31	18.59	16.09	2251.40	2249.70	2300.00
$P_H[W]$	0.09	2.07	0.01	-0.06	-0.14	0.00	-39.52	3.11
$Q_B[VAR]$	0	0.00	15.29	-6.01	-9.58	470.34	438.68	-5.38
$Q_{IEEE}[VAR]$	0	0.00	15.15	6.04	10.07	470.34	479.83	5.38
$Q_1[VAR]$	0	0.00	15.15	-6.04	-10.06	470.34	478.20	0.00
$Q_H[VAR]$	0	0.00	0.14	0.03	0.47	0.00	-39.52	-5.38
$THD_V[\%]$	3	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
$THD_I[\%]$	3	3.00	22.85	37.66	120.28	91.12	109.61	101.25
$D_B[VAR]$	0	0.00	4.86	7.57	23.14	2097.70	2564.90	2327.70
$D_{IEEE}[VAR]$	0	0.00	5.28	7.54	22.94	2097.70	2557.50	2327.70
$D_1[VAR]$	0	0.00	5.28	7.54	22.94	2097.70	2557.90	2327.70
$D_I[VAR]$	3	69.00	5.26	7.36	22.82	2095.60	2521.10	2328.70

Za sve potrošače date su efektivne vrednosti struje I_{RMS} i napona V_{RMS} , prividna snaga U , komponenta osnovnog harmonika prividne snage U_1 , aktivna snaga P , aktivna snaga osnovnog harmonika P_1 , uticaj ostalih harmonika na aktivnu snagu P_H . U Tabeli 7.1 kvantitativno su upoređene vrednosti dobijene primenom različitih definicija za reaktivnu snagu, Q_B , Q_1 i Q_{IEEE} na osnovu (4.20), (4.20) i (4.21), respektivno. Osim toga, u Tabeli 7.1 nalaze se podaci za ukupno harmonijsko izobličenje napona i struje označeni sa THD_V i THD_I , respektivno. U donjem delu tabele nalaze se rezultati dobijeni različitim definicijama za snagu izobličenja. Osim D_B dobijenim na osnovu (7.3), sa D_1 označeni su rezultati dobijeni zamenom Q_B sa Q_1 u jednačini (7.3), dok su rezultati dobijeni zamenom Q_B sa Q_{IEEE} označeni sa D_{IEEE} . Snaga izobličenja na osnovu struje označena sa D_I , računa se kao proizvod THD_I i prividne snage osnovne komponente U_1 , saglasno sa [IEEE10].

Svi potrošači pobuđeni su izobličenim naponom, kod koga, osim osnovne komponente postoji i treći harmonik čija vrednost je 3% amplitude osnovne komponente. Ova vrednost izabrana je kao najnepovoljniji slučaj vezan za maksimalno dopušteno izobličenje po harmoniku napona prema standardu IEEE Std. 519-1995.

Kao što se očekivalo, za linearne potrošače aktivna snaga jednaka je prividnoj snazi, $P=U$. Snaga izobličenja u slučaju linearnih potrošača jednaka je nuli, nezavisno od definicije koja je primenjena za računanje reaktivne snage, jer je $Q=0$. S druge strane, snaga izobličenja na osnovu struje, D_I , nije jednaka nuli. Naime ova snaga ima vrednost koja je posledica izobličenja napona napajanja. Ovim je potvrđeno da primena D_I ne daje pouzdani rezultat koji bi se koristio za utvrđivanje izvora harmonijskih izobličenja.

Za nelinearne potrošače sva četiri metoda za definisanje snage izobličenja daju kompatibilne rezultate. Kod svih šest slučajeva nelinearnih potrošača datih u Tabeli 7.1 registrovana je aktivna i reaktivna snaga. Talasni oblici struje prikazani na Sl.4.4 i THD_I nedvosmisleno pokazuju o kom stepenu izobličenosti se radi za svaki potrošač ponaosob. Dobijeni rezultati potvrđuju da je snaga izobličenja proporcionalna nivou izobličenja.

Dobijene negativne vrednosti za Q_1 u Tabeli 7.1 pokazuju da su obe štedljive sijalice kapacitivnog karaktera.

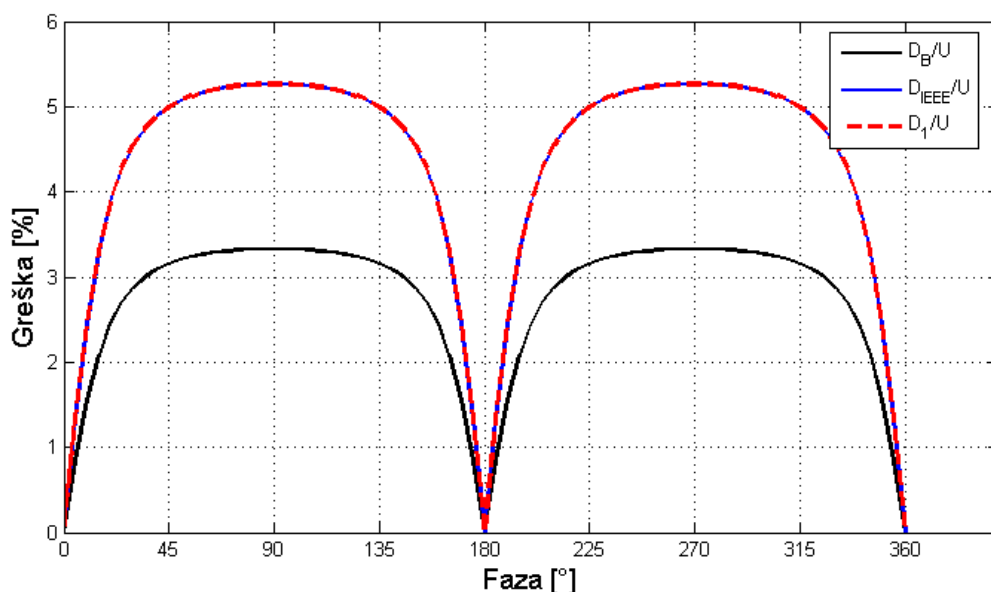
Dva karakteristična primera trofazni diodni usmerač (3-DR) sa $P_H=0$ i $Q_H=0$, i PWM kontrolisan drajver promenljive brzine (PWM VSD) kod koga je $Q_1=0$, zaslužuju dodatnu analizu.

U slučaju 3-DR sve definicije za snagu izobličenja daju isti rezultat. Ovo je očekivano s obzirom da ne postoji treći harmonik struje, tako da je $P_3 = V_{RMS3} \cdot I_{RMS3} \cdot \cos \theta_3 = 0$, te je $P=P_1$. Iz istog razloga je i $Q=Q_1$, tako da snaga izobličenja ne zavisi od definicije koja je korišćena za Q .

Primer PWM VSD karakteriše odsustvo osnovne komponente reaktivne snage, pa je zbog toga, $D_B=D_{IEEE} \neq D_1$. Veća vrednost Q_H doprinosi većoj razlici između $D_B=D_{IEEE}$ i D_1 .

Na osnovu dobijenih vrednosti snage izobličenja (D_B , D_{IEEE} i D_1) u Tabeli 7.1 zaključujemo da se, nezavisno od korišćene definicije za izračunavanje reaktivne snage u jednačini (7.3), praćenjem njihovih vrednosti uspešno može detektovati izvor harmonijskog izobličenja. Takođe, dobijene vrednosti za snagu izobličenja se veoma malo razlikuju. U prethodnom poglavlju smo pokazali da i u slučaju linearnog reaktivnog potrošača postoji snaga izobličenja. Na prvi pogled ovo bi moglo da predstavlja veoma veliki nedostatak predloženog metoda. Da bi se otklonile nedoumice i odredio nivo snage izobličenja, urađena

su dodatna ispitivanja. Najpre je linearni potrošač predstavljen konačnom impedansom $|Z|$ čija je vrednost konstatna a fazni ugao θ se menja. Dobijeni rezultati prikazani su na Sl. 7.3. U slučaju kada je $\theta = k\pi$ (otporno opterećenje), vrednost snage izobličenja jednaka je nuli ($D_B = D_{IEEE} = D_1 = 0$). Za slučaj reaktivnog opterećenja $\theta = (2k+1)\pi/2$, dobija se $D_B/U = 2\%$ a $D_{IEEE}/U = D_1/U = 3.16\%$ [Pe14]. Dobijeni rezultati ukazuju da se najmanja greška dobija u slučaju kada se reaktivna snaga računa pomoću Budenovog obrasca (4.20).



Slika 7.3. Nivo greške kod lineranog reaktivnog potrošača

Podaci sistematizovani u tabelama 7.1 i 7.2 pokazuju da su razlike između različitih vrednosti snage izobličenja koje proističu usled primene različitih definicija za Q praktično neznatne. Tačno je da one uvode sistematsku grešku ali, sa stanovišta naplate za utrošenu energiju, ona se može kompenzovati. Naime, ukoliko korisnik preplati za utrošenu reaktivnu energiju, Q , manje će platiti za snagu izobličenja D .

TABELA 7.2. SNAGA IZOBLIČENJA IZRAŽENA U PROCENTIMA PRIVIDNE SNAGE

	Sijalica	Grejač	FL	EcoBulb CFL	Philips CFL	3- DR	SMPS	PWM VSD
D_B/U [%]	0.00	0.00	20.59	36.22	77.94	67.39	75.13	71.09
D_{IEEE}/U [%]	0.00	0.00	22.37	36.08	77.27	67.39	74.91	71.09
D_1/U [%]	0.00	0.00	22.37	36.08	77.27	67.39	74.92	71.09
D_1/U [%]	3.00	3.00	22.29	35.22	76.86	67.32	73.84	71.12

Prethodna analiza i rezultati prikazani u tabelama 7.1 i 7.2 pokazali su da se vrednost snage izobličenja može uspešno koristiti za detekciju izvora harmonijskog izobličenja na mestu priključenja potrošača (PCC tački, odnosno na nivou brojila)[St12, St14, Pe14 St15-1].

U cilju poređenja metoda koji predlažemo u ovoj disertaciji sa *non-active* metodom objavljenim u [Ba07, Ca08, Ca09, Ca10] urađen je novi set simulacija za prethodno analizirane potrošače. Rezultati simulacija, sistematizovani su u Tabeli 7.3. Cilj je da se detektuje da li određeni potrošač predstavlja izvor harmonijskog izobličenja. U poslednje tri reda predstavljeni su zaključci do kojih se dolazi primenom *non-active* metoda objavljenim u [Ba07, Ca08] (označen sa M1), varijantom istog metoda objavljenim u [Ca09, Ca10] (označen sa M2) i metoda opisanog u ovoj disertaciji (označen sa M)[St15-1].

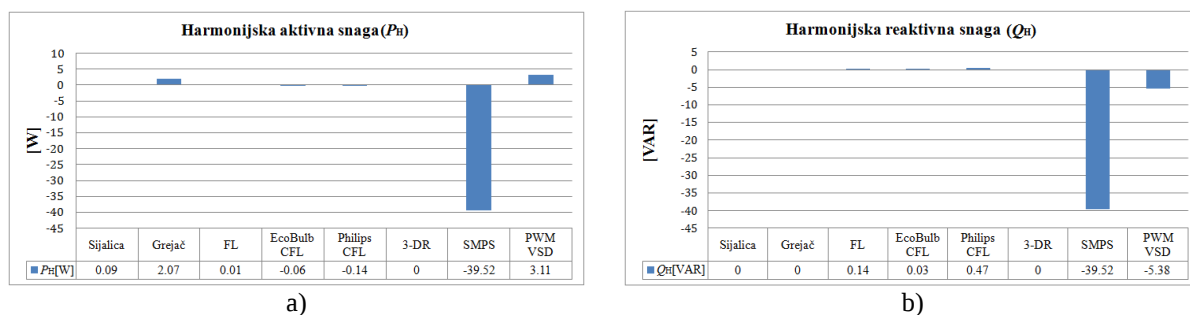
TABELA 7.3. POREĐENJE NOVOG METODA SA NON-ACTIVE METODOM

		Sijalica	Grejač	FL	EcoBulb CFL	Philips CFL	3- DR	SMPS	PWM VSD
	Q_1 [VAR]	0.00	0.00	15.15	-6.04	-10.06	470.34	478.20	0.00
	Q_{SH} [VAR]	0.00	0.00	15.87	7.44	21.98	1948.40	2138.40	1863.50
	Q_X [VAR]	0.00	0.00	16.04	9.31	24.49	2148.70	2203.10	2327.40
	$Q_F \equiv N$ [VAR]	0.00	0.00	16.04	9.66	25.05	2149.80	2602.20	2327.70
Izvor harmonijskog izobličenja	Metod M1	niko	niko	potrošač	potrošač	potrošač	potrošač	potrošač	potrošač
	Metod M2	niko	niko	potrošač	potrošač	potrošač	potrošač	potrošač	potrošač
	Metod M	niko	niko	potrošač	potrošač	potrošač	potrošač	potrošač	potrošač

Kod sijalice i grejača koji spadaju u grupu linearnih otpornih potrošača nijedan od analiziranih metoda ne može da pruži informaciju o lokaciji izvora harmonijskog izobličenja. Ovo se objašnjava činjenicom da je struja napajanja ovih potrošača izobličena usled izobličenja napona napajanja. Stoga se uticaj harmonika ogleda samo u povećanju vrednosti aktivne snage dok će vrednost reaktivne snage i snage izobličenja biti jednaka nuli. U praksi ovo ne predstavlja veliki problem, imajući u vidu da su, saglasno standardu IEEE 519-1992 i standardu IEC/EN61000-2-2, distributeri električne energije dužni da održavaju nizak nivo izobličenja napona napajanja. Osim standarda, distributere na to obavezuje potreba da zaštite opremu koja se koristi u sistemu prenosa i distribucije električne energije. Naime, kao što je rečeno u poglavlju 3, rad u prisustvu harmonika značajno smanjuje životni vek i povećava rizik od otkaza. U poglavlju 6.4 pokazano je da metod M1 detektuje izvor harmonijskog izobličenja na strani potrošača u slučaju kada je vrednost Q_{Sh} (4.23) bliža vrednosti reaktivne snage Q_F (4.22) nego vrednosti osnovne komponente reaktivne snage Q_1 . U suprotnom izvor izobličenja je na strani distributera električne energije. Isti zaključak važi i za metod M2 samo što je Q_{Sh} zamenjen sa Q_X a Q_F sa neaktivnom snagom N koja se računa na isti način kao Fryze-ova reaktivna snaga. Iako metodi M1 i M2 uspešno detektuju izvor izobličenja, zajednički su im sledeći nedostaci:

- Za potrošače male nominalne snage može da se desi da je razlika između vrednosti reaktivnih snaga mala, kao kod FL. Posledično za preciznu identifikaciju potrebni su instrumenti velike tačnosti, što značajno povećava cenu realizacije.
- Vrednost fiktivne i Sharonove reaktivne snage može biti samo pozitivna, što kod potrošača sa kapacitivnom prirodom, što je slučaj kod CFL i LED sijalice, može da izazove konfuziju.
- Zahteva se merenje tri neaktivne snage definisane na tri različita načina.

Metod za detekciju izvora harmonijskog izobličenja predložen u ovoj disertaciji poredili smo sa metodom baziranim na praćenju znaka aktivne harmonijske snage P_H . Saglasno ovom metodu ukoliko je $P_H > 0$ izvor izobličenja je na strani distributera električne energije u suprotnom, izvor izobličenja je sam potrošač. Na slici 7.4 grafički je prikazana vrednost aktivne harmonijske i reaktivne harmonijske snage. Kao što je do sada rečeno, sem sijalice i grejača svi ostali simulirani potrošači spadaju u grupu nelinearnih potrošača, samim tim i očekuje se $P_H < 0$. Slika 7.4.a grafički prikazuje da metod zasnovan na praćenju znaka P_H precizno detektuje izvor izobličenja u svim slučajevima sem u slučaju PWM VSD. U slučaju PWM VSD metod pokazuje da je izvor izobličenja EE sistem a na osnovu talasnog oblika struje prikazanog na slici 4.4.b jasno je da je izvor izobličenja potrošač[St15-1]. Takođe, na slici 7.4.b grafički je prikazana vrednost Q_H koja je nepouzdan pokazatelj izvora harmonijskog izobličenja. Naime uprkos jasnoj činjenici da nelinearni potrošači predstavljaju izvore izobličenja, menja se znak Q_H tako da je u slučaju (FL, EcoBulb CFL i Philips CFL) pozitivan a u slučaju (SMPS i PWM VSD) negativan.

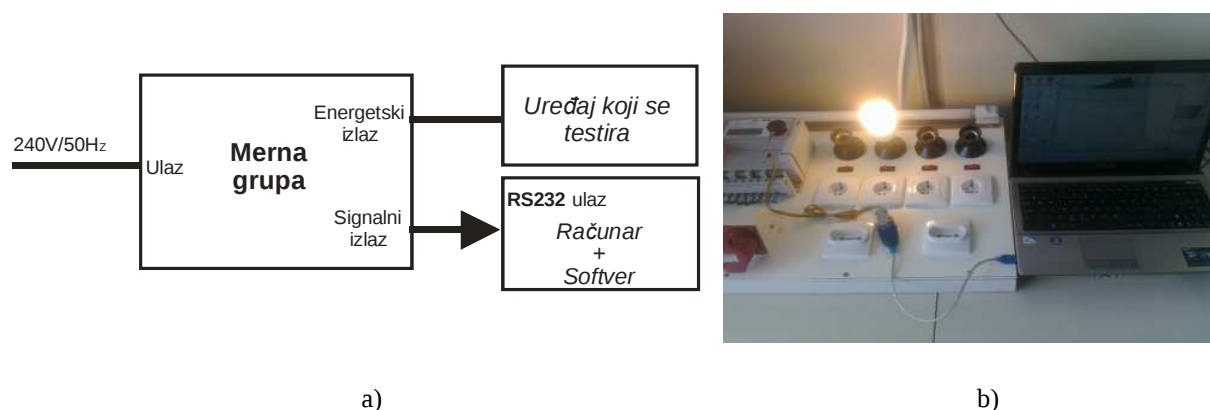


Slika 7.4. Grafički prikaz dobijenih vrednosti za simulirane potrošače a) harmonijska aktivna snaga b) harmonijska reaktivna snaga

7.3 Funkcionalna verifikacija-merenjima

Rezultati prikazani u prethodnom poglavlju pokazali su nam da se uz pomoć snage izobličenja uspešno može detektovati izvor harmonijskih izobličenja. Najvažija prednost predloženog metoda ogleda se u njegovoj jednostavnosti što mu omogućava da bude implementiran na nivou elektronskog brojila. Da bi to bilo moguće, neophodno je da su brojila projektovana za merenje u uslovima kada su harmonici prisutni u EE sistemu.

Da bi se dokazalo da se brojilo može koristiti kao instrument za detekciju izvora harmonijskih izobličenja načinjen je laboratorijski prototip mernog mesta koji povezuje standardnu mernu grupu sa personalnim računarom. Ideja je bila da se omogući merenje snaga (U , P i Q) različitih tipova savremenih uređaja standardnom mernom grupom i da se u personalnom računar izračuna snaga izobličenja. Blok šema i fizički izgled ovog mernog mesta prikazani su na Sl. 7.5.



Slika 7.5.a) Blok šema b) fotografija testnog okruženja

Korišćena merna grupa ispunjava standarde IEC 62053-22 [IEC22], IEC 62053-11 [IEC11] i IEC 62052-23 [IEC23] (proizvod EWG iz Niša www.ewg.co.rs). Brojilo meri osnovne parametre električne energije u skladu sa definicijama koje su date jednačinama (4.14), (4.15), (4.19) i (4.20). Korišćena merna grupa nema mogućnost računanja snage izobličenja, ali registruje veličine I_{RMS} , V_{RMS} , P i Q . Ove veličine očitavaju se tokom svake sekunde i šalju u računar preko optičkog i RS232 porta. Direktnom primenom izraza (4.24) i (7.3) u računar se izračunavaju vrednosti prividne i snage izobličenja. Rezultati merenja potrošnje na različitim tipovima potrošača dati su u tabelama 7.4, 7.5, 7.6.

TABELA 7.4. REZULTATI MERENJA RAZLIČITIH TIPOVA SIJALICA

Potrošač	$V_{RMS}[V]$	$I_{RMS}[A]$	$U[VA]$	$P[W]$	$Q[VAR]$	$D_B[VAR]$	$P/U[\%]$	$D_B/U[\%]$
Sijalica 100W	223.41	0.42	92.94	92.90	0.80	2.55	99.96	2.75
Sijalica 75W	222.82	0.33	73.53	73.48	0.69	2.64	99.93	3.59
FL18W	218.62	0.08	17.49	11.33	-5.80	11.99	64.78	68.58
CFL20Wbulb	218.55	0.13	29.07	18.30	-8.81	20.79	62.96	71.54
CFL 20Whelix	219.01	0.14	30.66	18.61	-9.38	22.49	60.70	73.35
CFL 20Wtube	219.46	0.14	31.60	18.73	-9.58	23.58	59.27	74.62
CFL 15Wbulb	219.74	0.09	19.56	12.10	-5.51	14.34	61.87	73.34
CFL 11Whelix	221.73	0.08	17.74	10.42	-5.38	13.31	58.74	75.03
CFL 11Wtube	221.27	0.08	17.92	10.76	5.74	13.13	60.04	73.28
CFL 11WE14	215.51	0.08	17.24	10.79	-5.26	12.38	62.58	71.78
CFL 9Wbulb	216.06	0.06	12.75	7.58	-3.64	9.58	59.46	75.16
CFL 7Wspot	217.75	0.04	9.58	5.83	-2.87	7.04	60.85	73.48
CFL 7W	219.83	0.04	9.67	6.03	-2.57	7.11	62.34	73.54
CFL 15Whelix	218.55	0.15	32.13	18.95	-10.26	23.83	58.98	74.17
CFL 20Wtube	216.91	0.11	24.08	13.86	-7.15	18.34	57.57	76.19
LED Parlamp 15W(9x1.5W)	217.27	0.157	34.11	16.9	-3.87	29.38	49.54	86.12
LED Parlamp 10W(6x1.5W)	217.51	0.114	24.80	12.89	-2.74	21.00	51.98	84.71
LED Bulb 8 W(7x1W) Warm White	218.02	0.083	18.10	9.7	-2.84	15.01	53.60	82.95
LED Bulb 6W(6x1W) Warm White	217.93	0.042	9.15	7.76	-0.14	4.85	84.78	53.00
LED Bulb 6W(6x1W) White	217.85	0.045	9.80	8.34	-0.16	5.15	85.07	52.53
LED Bulb 3x1W	217.9	0.034	7.4086	3.96	-0.89	6.20	53.45	83.66
LED MiniBulb 3x1W	215.86	0.034	7.33924	3.91	-1	6.13	53.28	83.52

TABELA 7.5. REZULTATI MERENJA RAZLIČITIH TIPOVA RAČUNARA I RAČUNARSKE OPREME

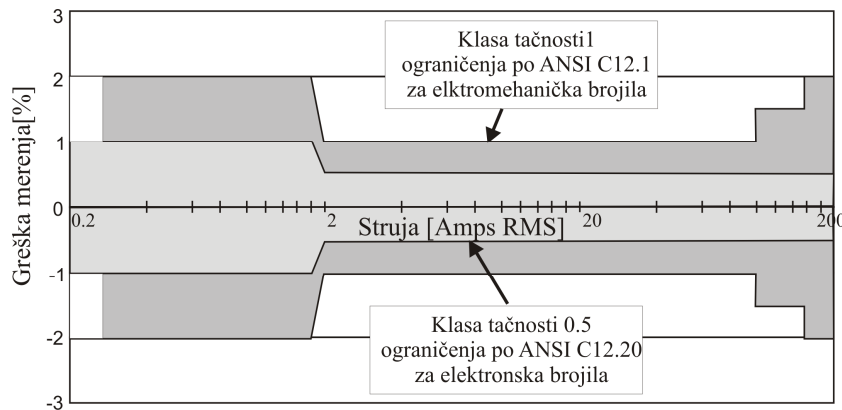
Potrošač	$V_{RMS}[V]$	$I_{RMS}[A]$	$U[VA]$	$P[W]$	$Q[VAR]$	$D_B[VAR]$	$P/U[\%]$	$D_B/U[\%]$
Računar DELL-Optiplex980-idle	221.25	0.30	66.15	55.83	-33.05	12.92	84.39	19.54
Računar DELL-Optiplex360-idle	220.57	0.39	85.80	61.09	10.24	59.37	71.20	69.20
Monitor CRT-21 HM903DT-idle	220.92	0.37	82.40	77.84	-17.11	20.94	94.46	25.41
Monitor Dell 1909W-idle	221.79	0.20	43.91	24.69	-7.15	35.61	56.22	81.08
Monitor Dell E2310H-idle	222.36	0.18	40.91	23.33	-7.06	32.86	57.02	80.32
Monitor BENQ G2220HDA-idle	223.37	0.176	39.31	20.13	-5.46	33.32	51.20	84.77
Monitor BENQ G2320HDBL-idle	222.9	0.179	39.90	23.65	-4.67	31.79	59.27	79.68
Monitor LG W2241S-idle	223.88	0.289	64.70	40.28	-9.40	49.75	62.26	76.90
Monitor ACER X163W-idle	225.76	0.117	26.41	14.8	-3.37	21.62	56.03	81.84
Monitor ACER V193HQ-idle	225.51	0.144	32.47	18.2	-1.09	26.87	56.05	82.75
Monitor PHILIPS 192E-idle	226.45	0.145	32.84	17.12	-5.02	27.57	52.14	83.95
Monitor SAMSUNG 943N-idle	226.11	0.247	55.85	32.75	-1.24	45.22	58.64	80.97
Štampač HP1505 StandBy	211.26	0.04	8.24	3.60	-3.35	6.61	43.69	80.23
Štampač HP1505 printing	208.19	2.68	557.32	548.39	-8.05	99.07	98.40	17.78
Štampač M2727 StandBy	208.20	0.12	24.78	13.06	-5.01	20.45	52.71	82.54
Štampač M2727printing	206.78	3.23	667.90	630.82	-6.53	219.35	94.45	32.84

TABELA 7.6. REZULTATI MERENJA RAZLIČITIH TIPOVA KUĆNIH POTROŠAČA

Potrošač	$V_{RMS}[V]$	$I_{RMS}[A]$	$U[VA]$	$P[W]$	$Q[VAR]$	$D_B[VAR]$	$P/U[\%]$	$D_B/U[\%]$
Kuvalo	216.24	7.906	1709.59	1709.54	0.39	13.51	100.00	0.79
Frižider	225.68	0.641	144.66	98.64	104.78	14.77	68.19	10.21
Ventilator	225.41	0.008	1.83	1.19	1.32	0.42	65.01	23.21
Grejalica	220.29	0.793	174.67	174.60	1.39	4.67	99.96	2.67
CRT televizor	233.51	0.217	50.67	31.44	-3.73	39.56	62.05	78.08
Muzicka linija	232.92	0.109	25.39	17.3	14.85	11.17	68.14	43.99
LG 32LE5300 isključen	234.79	0.024	5.63	0.29	-3.52	4.39	5.15	77.92
LG 32LE5300 uključen	233.62	0.436	101.86	95.61	-24.86	24.82	93.87	24.36
LG 32LE5300 srednji mod	233.98	0.275	64.34	57.7	-18.49	21.66	89.67	33.66
LED32D3HD isključen	233.83	0.034	7.95	0.23	-7.54	2.51	2.89	31.57
LED32D3HD uključen	233.8	0.224	52.37	27.36	-8.87	43.77	52.24	83.57
Klima LGK18AH	greje	218.19	9.304	2030.04	1976.74	163.75	432.14	97.37
	hladi	219.86	7.153	1572.66	1525.69	137.42	355.87	97.01
	ventilator	224.2	0.176	39.46	25.75	17.1	24.53	65.26
Klima MXI18HC002i	greje	215.66	5.758	1241.77	1214.96	-58.34	249.92	97.84
	hladi	216.57	4.851	1050.58	1016.62	-142.26	223.53	96.77
	ventilator	220.86	0.269	59.41	52.18	1.44	28.37	87.83

Za sijalicu sa užarenim vlaknom i aparat za grejanje vode koji predstavljaju linearne otporne potrošače, snaga izobličenja trebala bi biti jednaka nuli. Kao što se vidi iz tabele 7.6 to nije slučaj. Kod sijalice vrednost snage izobličenja je manja od 4% vrednosti prividne snage, dok je kod aparata za grejanje vode ta vrednost manja od 1%. Mala vrednost snage izobličenja kod linearnih otpornih potrošača je posledica dozvoljene greške merenja merne grupe [IEC22, IEC23]. U našem slučaju koristili smo mernu grupu klase 0.5 za aktivnu snagu i klase 2 za reaktivnu snagu. Teoretski najnepovoljniji slučaj dešava se kada se prividna snaga registruje sa greškom od +0.5% dok se aktivna snaga registruje sa greškom od -0.5%. Za slučaj linearnog otpornog potrošača dobila bi se greška od 14.1% za snagu izobličenja D_B . Naime u ovom slučaju $U=P$, dok je $U_{max}=1.005U$, i $P_{min}=0.995P$ što rezultira sa $D_{Bmax}=0.1414U$. Srećom u realnom slučaju do ovako velike greške ne može doći. Naime, prilikom računanja prividne i aktivne snage koriste se isti semplovi napona, struje. Posledično ukoliko dođe do greške u konverziji kod ADC ta greška se prenosi na istovetan način na aktivnu i prividnu snagu. Naravno može doći do pojave greške prilikom računanja vrednosti unutar DSP ali ta greška može biti u najnepovoljnijem slučaju vrednosti reda veličine LSB bita. Sa pravom se može postaviti pitanje zašto je vrednost snage izobličenja veća kod sijalica u odnosu na vrednost koja se javlja kod aparata za grejanje vode i grejalice. Odgovor na ovo pitanje nalazi se u standardu za elektronska brojila. Naime ovim standardom je definisan veći nivo dozvoljene greške prilikom merenja struje malih potrošača. Za vrednost struje do 2A

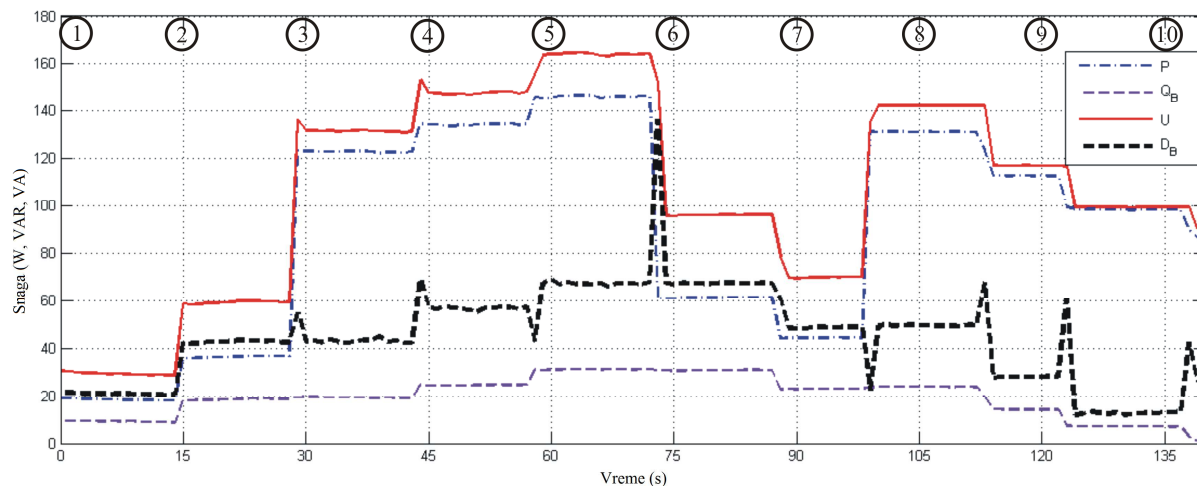
dozvoljena greška prilikom očitavanja struje je 1% a za struje veće od 2A dozvoljena vrednost greške je 0,5% što je i ilustrovano na Sl. 7.6 [EPRI10].



Slika 7.6. Greška merenja struje-ANSI standard [EPRI10]

Kod linearnih reaktivnih potrošača vrednost snage izobličenja je izraženija, i u našem slučaju kreće se do 11% vrednosti prividne snage. Razlog postojanja ovako visoke vrednosti snage izobličenja je mrežni napon koji nije idealan. Naime sva merenja obavljena su u realnim uslovima. To znači da je mrežni napon mogao biti izobličen u granicama do 5% što je i potvrđeno merenjima objavljenim u [Di12-2]. Struja kroz linearni reaktivni potrošač koji se napaja izobličenim naponom imaće harmonijske komponente kod kojih uslov (7.5) nije ispunjen a samim tim se primenom jednačine (7.3) ili (7.4) dobija određena komponenta snage izobličenja $D_B > 0$. Prethodnu analizu treba uzeti u obzir tokom razmatranja problema tarifiranja, o čemu će biti reči kasnije.

Kod ostalih potrošača iz tabela 7.4, 7.5 i 7.6 radi se o izrazito nelinearnim potrošačima. Vrednost snage izobličenja, proporcionalna je zastupljenosti harmonika u struji. Veća je ukoliko je struja više izobličena. Informacija o vrednosti THD_I za pojedine nelinearne potrošače iz Tabele 7.4 mogu se naći u [Di12-2]. Dobijeni rezultati u tabelama 7.4, 7.5 i 7.6 potvrdili su da se izvor harmonijskog izobličenja može odrediti uz pomoć snage izobličenja, što će dodatno biti ilustrovano i pomoću Sl. 7.7.



Slika 7.7. Dijagram potrošnje pet različitih sijalica

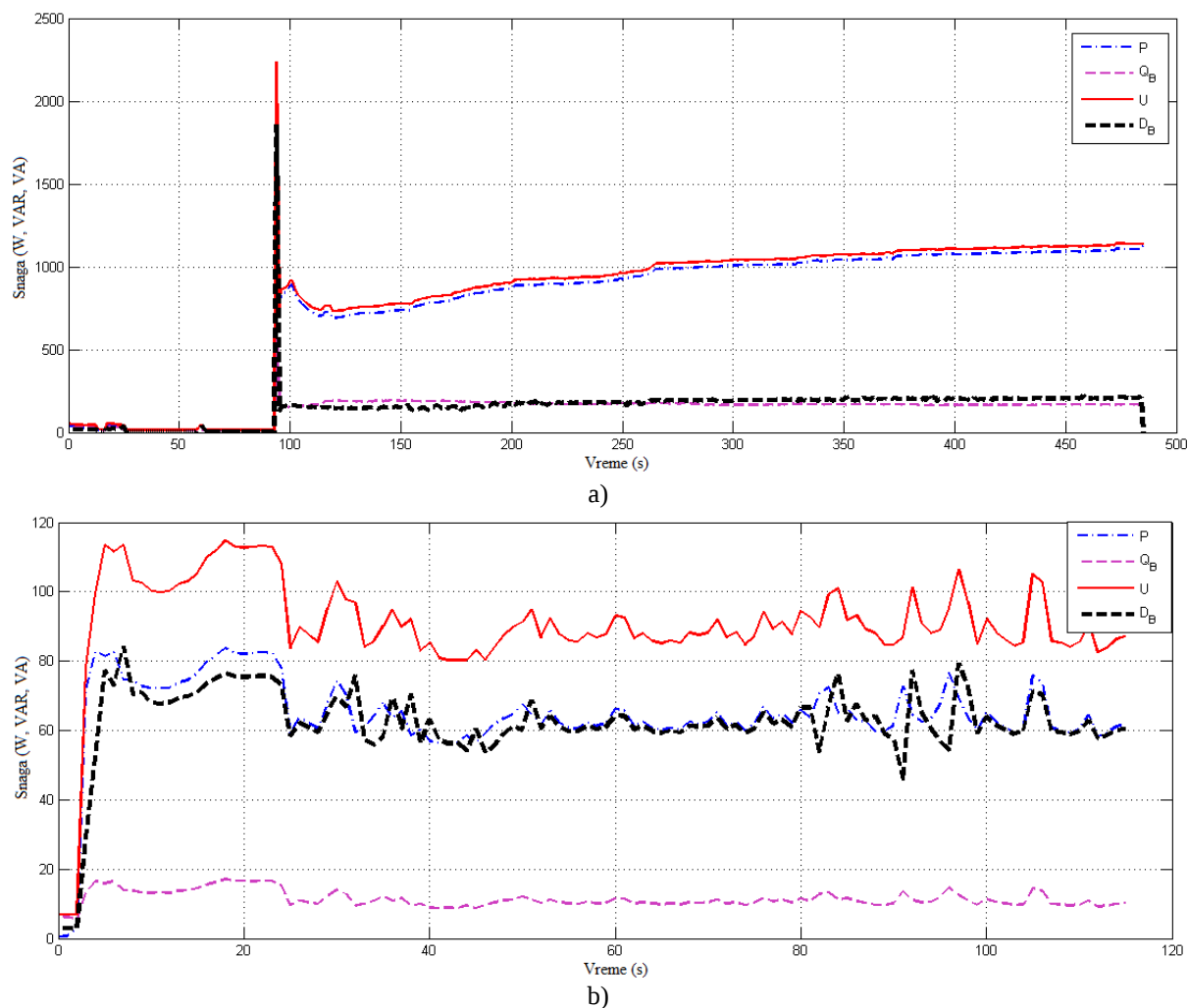
Na Sl. 7.7 prikazana je potrošnja 5 sijalica u vremenskom intervalu koje se uključuju/isključuju po rasporedu koji je dat u tabeli 7.7. Očigledno je da realizovano testno okruženje uz pomoć odgovarajućeg Matlab koda omogućava monitoring potrošnje u realnom vremenu i uspešno detektuje sve promene, odnosno uključenje/isključenje pojedinih sijalica. U vremenskim trenucima označenim sa 3 i 8 na Sl. 7.7, kada dolazi do uključanja sijalice sa užarenim vlaknom, jasno se vidi da se jedino vrednost aktivne i prividne snage menja, dok vrednosti snage izobličenja i reaktivna snage ostaju iste. Slična situacija dešava se i u slučaju kada se isključi sijalica sa užarenim vlaknom (trenutak 6). Slika 7.7 jasno pokazuje da će se snaga izobličenja registrovati samo u slučaju kada je na mreži priključen nelinearan potrošač.

TABELA 7.7. RASPORED UKLJUČENJA/ISKLUČENJA SIJALICA

	CFL20WBulb	CFL 20Whelix	ILB Philips 100W	CFL 15WBulb	CFL 11Whelix
1	ON	OFF	OFF	OFF	OFF
2	ON	ON	OFF	OFF	OFF
3	ON	ON	ON	OFF	OFF
4	ON	ON	ON	ON	OFF
5	ON	ON	ON	ON	ON
6	ON	ON	OFF	ON	ON
7	ON	ON	OFF	OFF	ON
8	ON	ON	ON	OFF	ON

Osim brojnih vrednosti koje su prikazane u tabelama 7.4, 7.5 i 7.6 interesantno je posmatrati i potrošnju pojedinih uređaja u nekom vremenskom trenutku. Na Sl. 7.8.a prikazana je potrošnja klime koja greje (MIDEA – MSG12HR) dok je na Sl. 7.8.b prikazana potrošnja računara tokom podizanja sistema (DELL-Optiplex360). Kao što se vidi sa Sl. 7.8.a, dominantna komponenta prividne snage je aktivna snaga, što je i razumljivo s obzirom da klima greje. Interesantno je primetiti i da vrednosti reaktivne snage i snage izobličenja

nisu zanemarljive i kreću se oko 200 VAR. Nasuprot Sl. 7.8.a kod koje je vrednost aktivne snage uvek veća od vrednosti snage izobličenja, kod Sl. 7.8.b to nije slučaj.



Slika 7.8. Dijagram potrošnje a) klime u režimu zagrevanja b) računara u toku podizanja sistema

Podaci iz tabela 7.4, 7.5 i 7.6 pokazuju da snaga izobličenja nije zanemarljiva! Njena vrednost premašuje vrednost aktivne snage koja se, inače, registruje i naplaćuje. To znači da elektrodistribucija beleži značajne gubitke po ovom osnovu. Naravno ona ih pokriva kroz povećanu cenu koju plaćaju i potrošači koji nemaju nelinearna opterećenja. Za potrošače iz tabela 7.4, 7.5 i 7.6, gubici koji se javljaju usled neregistrovanja snage izobličenja kreću se u granicama od 19.54% kod računara (DELL-Optiplex980) do 86% prividne snage što je slučaj kod LED Parlamp od 15W.

Srećom proizvođači uređaja i opreme koja se koristi u svakodnevnom životu postaju svesni problema koji se javljaju usled korišćenja njihovih proizvoda. Zbog toga oni pokušavaju da poboljšaju svoje proizvode primenom raznih tehnika filtriranja. Na ovaj način oni smanjuju vrednost harmonika koji se generišu u mreži ali ga na žalost ne eliminišu u potpunosti. Da li će se i koja vrsta tehnika filtriranja primeniti zavisi od samih proizvođača.

Tako na primer kod većine Philips LED sijalica postoji ugrađeno Valley-fill kolo [Su97, Lu07]; Osram se opredelio za korišćenje aktivnih filtara [Ud12, Ud13], dok Toshiba kod svojih LED sijalica koristi pasivne filtre. Uprkos primenjenim tehnikama filtriranja talasni oblik struja nije prostoperiodična funkcija kao što je prikazano u [Ud12, Ud13], posledično i vrednost harmonika koji se generišu u mreži nije zanemarljiva. Slobodno se može postaviti i pitanje da li se implementacija ovih filtara isplati proizvođačima. Po našem mišljenju primenom raznih tehnika filtriranja kod potrošača malih nominalnih snaga nema efekta već samo utiče na povećanje proizvodne cene. Naefikasniji način za rešenje problema harmonika na mestu priključenja potrošača (PCC tački) prezentovan je u [ABB12]. Implementacija ovog sistema otvara i novo pitanja ko treba platiti za njegovu implementaciju na mestu priključenja potrošača, sam potrošač ili EE sistem.

Na osnovu svega rečenog do sada može se zaključiti da postoji potreba da se modifikuje tarifni sistem naplate potrošnje EE kako bi se uskladio sa zahtevima savremenog tržišta. Jedno rešenje u ovom pravcu nudi se u narednom poglavlju.

7.4 Metod za unapređenje obračuna i naplate potrošene električne energije

Rezultati iz tabela 7.4 i 7.6 kao i rezultati iz tabele 7.1 nedvosmisleno ukazuju da je opravdano obogatiti elektronska brojila i merne grupe opcijom registrovanja snage izobličenja. Štaviše, jednostavnost izraza (7.3) ukazuje da je to moguće uraditi uz minimalne troškove.

Istovremeno, treba imati na umu da su standardna elektronska brojila zasnovana na primeni integrisanih merača potrošnje kao što su Teridian™ 78M6613 [Te08] i IMPEG [Leda08] koja već imaju ugrađene funkcije za računanje V_{RMS} , I_{RMS} , U , P i Q_B . To znači da je implementacija (7.3) moguća u okviru standardnih elektronskih brojila i mernih grupa i to uz minimalnu modifikaciju.

U specijalnim slučajevima, kada postojeći hardver u elektronskim brojilima raspolaže sa rezervom u registarskoj bazi, modifikacija je moguća čak i na softverskom nivou. Naime, rutina kojom se izračunava (7.3) lako se programira i jedini problemi svode se na upisivanje dobijenog rezultata u odgovarajući registar i pristup tim podacima.

Ukoliko to nije slučaj, moguća je dogradnja hardvera u postojećim brojilima kako bi im se proširile mogućnosti opcijom registrovanja potrošnje snage izobličenja. Autor ove disertacije zajedno sa ostalim članovima LEDA laboratorije koja je projektovala prvi domaći

integrisani merač potrošnje IMPEG [Leda08] ugradili su ovo proširenje u najnoviju generaciju IMPEG čipa[Jo12]. Imajući u vidu da je opcija izračunavanja prividne snage već bila ugrađena, implementacija izraza (7.3) zahtevala je minimalnu izmenu u okviru DSP bloka.

Veoma je verovatno da će i izračunavanje snage izobličenja (D_B) postati standardna opcija kod ostalih integrisanih merača potrošnje električne energije. Potrebno je samo da svest o potrebi za registrovanjem ove veličine na nivou svakog potrošača sazri i da se uključi u odgovarajuće standarde. Da bi se to postiglo valja ukazati na sve efekte koji odavde proističu.

Imajući u vidu sve veći broj priključenih nelinearnih potrošača na EE mreži, gubici koji se javljaju kao rezultat neregistrovanja snage izobličenja zauzimaju sve značajnije mesto. Može se reći da postoji trend povećanja nelinearnih potrošača. Potrošači su stimulisani da koriste energetske efikasne uređaje koji malo troše, ali unose značajna nelinearna izobličenja. Najbolji primer za to su štedljive i LED sijalice. Kod njih je neregistrovana snaga veća od registrovane aktivne snage. Iz ovoga se može zaključiti da distributerima električne energije ide u prilog da se opcije standardnih brojila prošire mogućnošću merenja snage izobličenja, jer bi time značajno smanjili ekonomske gubitke. Pored toga, modifikovana brojila omogućavaju da se tačno utvrdi koji potrošač i koliko ugrožava elektroenergetsku mrežu priključivanjem nelinearnih potrošača.

Korisnici takođe imaju interesa da njihovu potrošnju kontrolišu brojila koja registruju i snagu izobličenja. Naime, sadašnja je praksa da distributer gubitke pokriva povećanjem cene energije. Na taj način i gubitke nastale usled povećanja snage izobličenja/energije plaćaju svi korisnici nezavisno od prirode potrošača koje koriste. Korisnici koji ne mogu da plate skupe, a energetske efikasne uređaje imaju uvećane račune jer pokrivaju gubitke nastale kod energetski efikasnih uređaja! Takođe, oni svesniji korisnici koji su spremni da kupe efikasne uređaje sa skupim filtrima za uklanjanje nelinearnih izobličenja, plaćaću i troškove nesavesnih potrošača. Dakle, postoji obostrani interes (distributera i potrošača) da se primenjuju elektronska brojila koja registruju i potrošnju i energije izobličenja.

Da bi se kompletirao sistem za registrovanje potrošnje električne energije opterećen nelinearnim potrošačima, potrebno je unaprediti i tarifni sistem[St13, St15-2]. Pravedno je destimulisati potrošače da nekontrolisano unose u elektroenergetsku mrežu harmonike. Generalno moguća su dva pristupa:

- isključiti potrošače koji unose harmonijska izobličenja u mrežu ili

- destimulisati ih kroz povećane račune.

Prvi pristup je oštar i može biti koristan samo u drastičnim slučajevima. Racionalno je iskoristiti praksu koja se primenjuje kod potrošača kada je u pitanju reaktivna snaga [Xu00] i uvesti energiju izobličenja u tarifni sistem.

Prilikom tarifiranja neophodno je voditi računa o dozvoljenom pragu snage izobličenja kod uređaja koji ispunjavaju standarde date u poglavlju 5. Takođe, treba poštediti korisnike od plaćanja snage izobličenja koja se javlja na linearnim potrošačima pobuđenim nelinearnim naponom. Naime, aktuelni standard obavezuje distributere da obezbede napon sa ukupnim izobličenjem manjim od 5%. Takođe, treba imati u vidu da izračunavanje D_B primenom (7.3) zavisi od tačnosti Q . Različiti definicioni izrazi za reaktivnu snagu Q i manja zahtevana klasa tačnosti ne bi smeli značajno da ugroze ni jednu stranu u tarifnom sistemu.

Sve ovo ukazuje na potrebu da se uvede neka dozvoljena granična vrednost snage izobličenja koja se ne bi obračunavala prilikom kreiranja konačnog računa o utrošenoj električnoj energiji. Istovremeno to znači da bi za taj iznos trebalo umanjiti izmerenu vrednost snage izobličenja. Predlažemo korekciju koja se može iskazati uz pomoć obrasca:

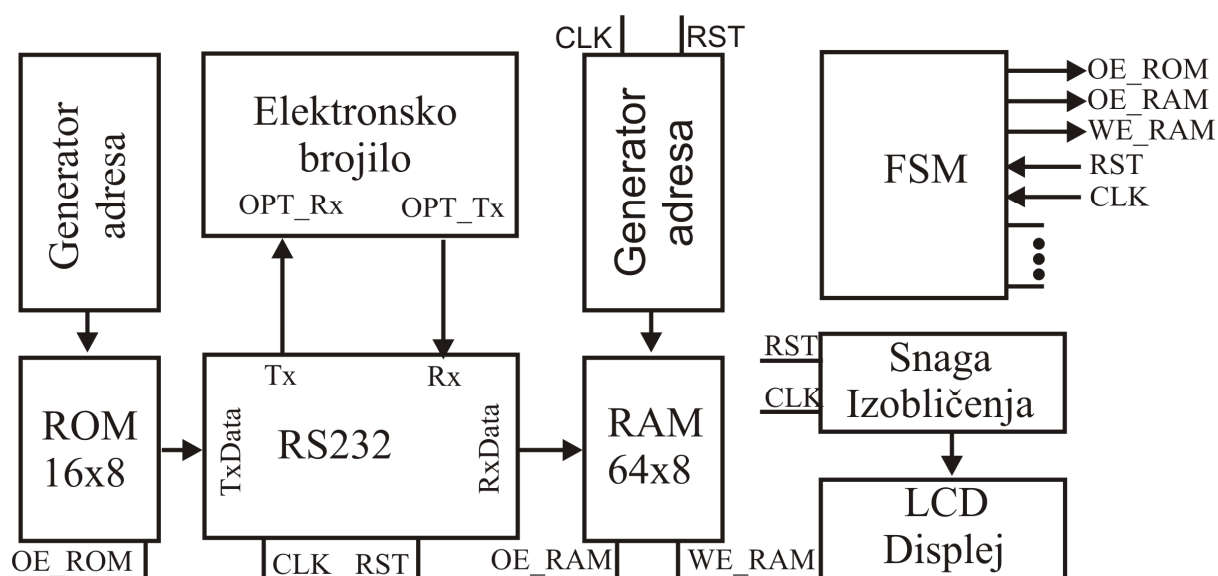
$$D_p = D_B - \gamma \cdot U \quad (7.6)$$

gde D_B i U predstavljaju vrednost izmerene snage izobličenja i prividne snage respektivno, a γ označava konstantu koju treba definisati. Odluku o veličini konstante γ kojom će se korigovati izmerene vrednosti doneli bi eksperti u dogovoru sa distributerima električne energije. Autor ove disertacije predlaže da vrednost ovog koeficijenta bude 0,1[St15-2]. Do pomenute vrednosti došlo se nakon razmatranja dozvoljene vrednosti harmonika napona/struje na mestu priključka koju propisuje standard IEEE 519-1995. Ovaj standard je posmatran kao referentni, umesto IEC61000-3-2 koji se pretežno primenjuje na teritoriji Evrope, iz veoma pragmatičnog razloga. Naime, kao što se vidi iz tabele 5.5, IEC61000-3-2 reguliše karakteristike elektronskih uređaja, dok standard IEEE 519-1995 definiše dozvoljene vrednosti harmonika napona/struje na mestu gde se potrošač priključuje na EE mrežu, odnosno na mestu priključenja elektronskog brojila. Važno je napomenuti da su ovi standardi kompatibilni, tako da ispunjenje standarda IEC61000-3-2 garantuje i ispunjenje uslova propisanih standardom IEEE 519-1995.

8 Hardverska realizacija sistema

U našoj zemlji počela je zamena starih elektromehaničkih brojila novim elektronskim brojilima. Nažalost, zbog nedovoljne svesti o značaju i veličini snage izobličenja koju unose savremeni elektronski uređaji, u nova brojila nije ugrađena opcija registrovanja snage, odnosno energije izobličenja. Da ceo proces zamene brojila ne bi bio uzaludan, u ovoj tezi nudimo rešenje koje može da se koristi kao nadogradnja već postojećim elektronskim brojilima. Njegovom primenom postojeća brojila bi se lako modifikovala i na taj način došlo bi do smanjenja finansijskih gubitaka koji nastaju kao posledica neregistrovanja snage/energije izobličenja.

Prototip predloženog sistema realizovan je na Alterinoj DE2 razvojnoj ploči koja sadrži FPGA (Cyclone® II 2C35). Blok dijagram realizovanog sistema prikazan je na Sl. 8.1.



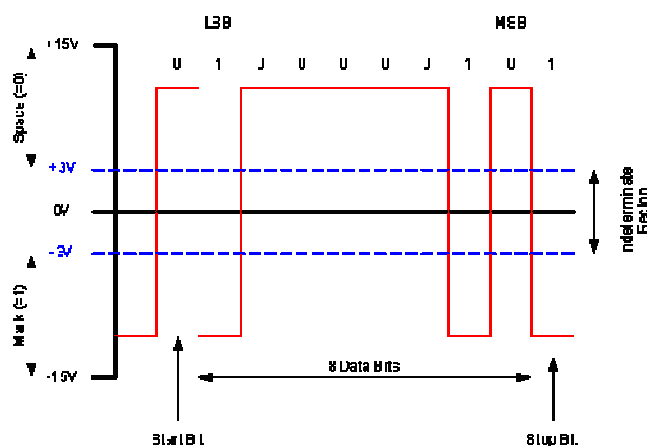
Slika 8.1. Blok dijagram sistema za merenje snage izobličenja

Kao što se vidi sa Sl. 8.1 realizovani sistem čine: RAM i ROM memorija, dva bloka za generisanje adrese za oba tipa memorije, RS232 interfejs, kontrolna logika u obliku konačnog automata, kolo za računanje snage izobličenja i drajver za LCD displej. Komunikacijom između blokova upravlja se pomoću konačnog automata (*FSM- finite state mashine*). ROM memorija se koristi za smeštaj komandi koje se šalju brojilu, dok se RAM koristi za memorisanje dobijenih podataka. Komunikacija između sistema realizovanog na razvojnoj ploči i samog elektronskog brojila realizovana je pomoću RS232 i optičkog porta. Ceo proces komunikacije obavlja se u dva koraka. Na početku sistem šalje komandu brojilu i zahteva informaciju o efektivnoj vrednosti napona i struje. Nakon što se prime ovi podaci, sistem automatski šalje zahtev za informaciju o vrednostima aktivne i reaktivne snage. Podaci se primaju preko RS232 porta u BCD formatu.

8.1 RS232 komunikacija

RS232 predstavlja veoma popularan vid serijske komunikacije kojim se razmenjuju podaci između dva uređaja. Prvobitna verzija ovog interfejsa razvijena je za potrebe povezivanja računara i perifernih uređaja. Štaviše ovaj interfejs predstavlja sastavni deo svih mikrokontrolera i u kombinaciji sa UART integrisanim kolima (npr. MAX232) omogućava komunikaciju između mikrokontrolera. Prilikom slanja podatka prvo se šalje *start bit* koji predstavlja pozitivan napon (0) praćen podacima (obično 8 bita a u nekim slučajevima može biti 5, 6 ili 7), na kraju se šalje *stop bit* koji je predstavljen negativnim naponom (1). U nekim slučajevima, pre nego što se pošalje stop bit, šalje se *parity bit* pomoću kojeg se proverava da li je došlo do greške tokom prenosa podatka. Vrednost *parity bita* može biti "1" ili "0" u zavisnosti da li se koristi parna i neparna provera parnosti.

RS232 standardom definiše se vrednost logičke jedinice kao negativan napon iz opsega od -15V do -5V, a vrednost logičke nule kao pozitivan napon u opsegu od +5V do +15V. Takođe, ovaj standard zahteva da se uspešno detektuje signal čija je vrednost najmanje 3V. Na ovaj način obezbeđuje se tolerancija na slabljenje signala duž prenosnih linija. Interfejs RS232 kola sadrži sledeće pinove: *TxDATA(7:0)*, *Tx*, *RxDATA(7:0)*, *Rx*, *IntTx* i *IntRx*. Talasni oblik poslatog podatka preko *Tx* pina prikazan je na Sl. 8.2.



Slika 8.2. Talasni oblik poslatog bajta

Brzina kojom se šalju podaci (*baud rate*) zavisi od uređaja do uređaja. Uglavnom se kreće u opsegu od 300 do 230400 bit/s. Struktura realizovanog RS232 kola je veoma jednostavna i sastoji se od dva pomeračka (*shift*) registra. Prvi registar prihvata ulazni 8-bitni podatak preko *TxData(7:0)* porta, konvertuje ga u serijsku jednobitnu informaciju i šalje preko *Tx* pina. Tokom slanja podatka preko *Tx* pina, pin *IntTx* je resetovan i pokazuje da proces komunikacije još uvek traje. Pojava rastuće ivice na ovom pinu označava da može početi prenos narednog podatka. Drugi pomerački registar se koristi za prihvatanje serijskog podatka preko *Rx* pina i njegovo prevođenje u paralelnu reč. Takođe, tokom prijema, *IntRx* pin je resetovan čime se ukazuje da je proces prijema u toku dok rastuća ivica na ovom pinu označava da se može krenuti sa prijemom narednog podatka.

8.2 Kolo za računanje snage izobličenja

Podaci koji su primljeni preko RS232 porta o efektivnoj vrednosti napona/struje, aktivne i reaktivne snage smešteni su u RAM memoriju. Svaki primljeni podatak je predstavljen sa po 3 bajta u BCD formatu. Zato je potrebno izvršiti povezivanje sva tri bajta u jednu reč od 24 bita. Ovako dobijene 24 bitne reči čuvaju se u odgovarajućem registru. Pre računanja snage izobličenja je potrebno je konvertovati ulazne podatke iz BCD formata u HEX format. Konverzija se radi primenom *Shift and Sub-3* algoritma. Proces konverzije je veoma jednostavan i prikazan je u Tabeli 8.1.

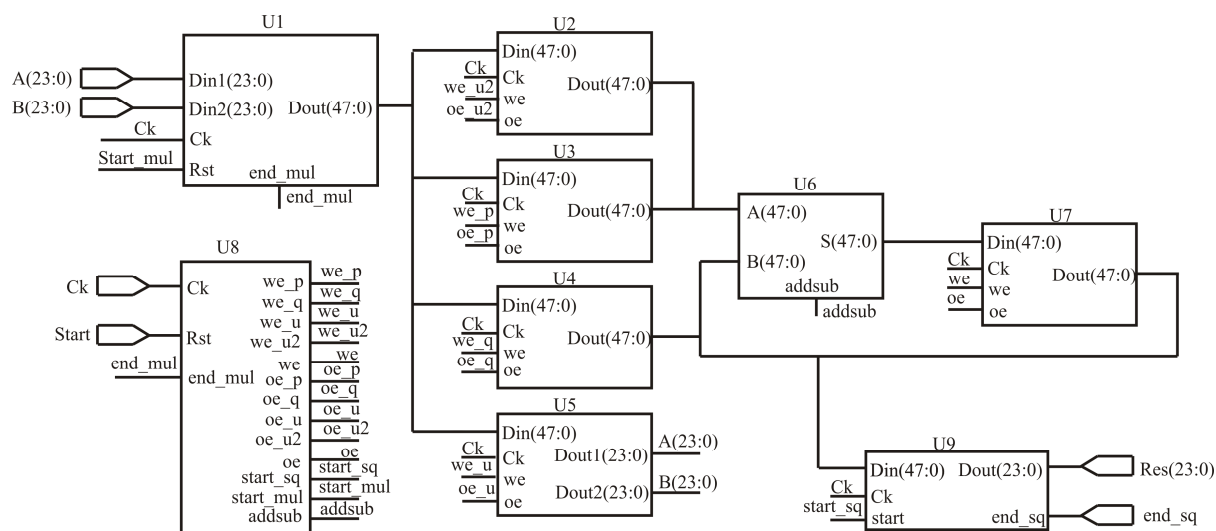
Ulazna reč se подели u grupe od po 4 bita, koji predstavljaju jedan BCD broj. Zatim se, svaka grupa ponaosob, ispituje da li predstavlja broj jednak ili veći od 8, ukoliko jeste oduzme se 3 i pomeri se za jednu poziciju udesno. Proces pomeranja ponovi se 24 puta.

TABELA 8.1. PROCES KONVERZIJE BCD FORMATA U HEX FORMAT I HEX FORMATA U BCD FORMAT

Operacija	H	T	U	Binarno	
BCD	2	5	5	0	0
start	10	101	101	0	0
sub 3	1	10	1010	1000	0
shift 2	1	10	111	1000	0
sub 3		1001	11	1100	0
shift 3		110	11	1100	0
shift 4		11	1	1110	0
sub 3		1	1000	1111	0
shift 4		1	101	1111	0
sub 3			1010	1111	0
shift 5			111	1111	1000
shift 6			11	1111	1100
shift 7			1	1111	1110
shift 8				1111	1111
HEX				F	F

Operacija	H	T	U	Binarno	
HEX				F	F
Start				1111	1111
shift 1			1	1111	1110
shift 2			11	1111	1100
shift 3			111	1111	1000
add 3			1010	1111	0
shift 4		1	101	1111	0
add 3		1	1000	1111	0
shift 5		11	1	1110	0
shift 6		110	11	1100	0
add 3		1001	11	1100	0
shift 7	1	10	111	1000	0
add 3	1	10	1010	1000	0
shift 8	10	101	101	0	0
BCD	2	5	5	0	0

Kada se završi proces konverzije, postavlja se signal *Start* i počinje postupak računanja snage izobličenja. Blok šema kola za računanje snage izobličenja prikazana je na Sl.8.3. Sastoji se od kola za množenje (U1), registara (U2, U3, U4, U5 i U7), kola za sabiranje i oduzimanje (U6), kola za korenovanje (U9) i kontrolne logike u vidu konačnog automata (U8).



Slika 8.3. Blok šema modula za računanje snage izobličenja

Kolo za množenje prihvata podatke o efektivnoj vrednosti napona i struje koji dolaze preko ulaznih portova *A(23:0)*, *B(23:0)* i računa prividnu snagu *U*. Dobijena vrednost se

zatim čuva u registru U5. Nakon toga, računaju se kvadrati vrednosti prividne, aktivne i reaktivne snage i smeštaju u registre U2, U3, U4 kao što je prikazano na Sl.8.3. Zatim se u kolu sabirača/oduzimača (U6) sabiraju kvadrati vrednosti aktivne P^2 i reaktivne snage Q^2 a, zatim, dobijeni rezultat se oduzme od U^2 čija vrednost je smeštena u registru U2. Rezultat oduzimanja šalje se na ulaz kola za korenovanje (U9). Nakon 48 taktnih ciklusa na izlazu kola za korenovanje dobija se vrednost snage izobličenja D . Struktura kola za množenje, korenovanje biće objašnjena u nastavku. Rezultati simulacije kola za računanje snage izobličenja prikazani su na Sl.8.4. Prikazan je slučaj kada je efektivna vrednost napona 217.14V, efektivna vrednost struje 4.73A, aktivna snaga 1006.03W i reaktivna snaga 107.44 VAR. Kao rezultat za snagu izobličenja dobijena je vrednost od 176.72 VAR.

▶ Clk					
▶ Rst					
+ ▶ A	?	21714	100603	10744	102707
+ ▶ B	?	4730	100603	10744	102707
+ ▶ Res	?		0		17672

Slika 8.4. Rezultati simulacija kola za računanje snage izobličenja

8.3 Kolo za množenje

Strukturu množača najjednostavnije ćemo objasniti na primeru dva neoznačena broja X , Y koji su predstavljeni sledećim izrazom:

$$X = \sum_{i=0}^{m-1} x_i 2^i, \quad Y = \sum_{j=0}^{n-1} y_j 2^j, \quad (8.1)$$

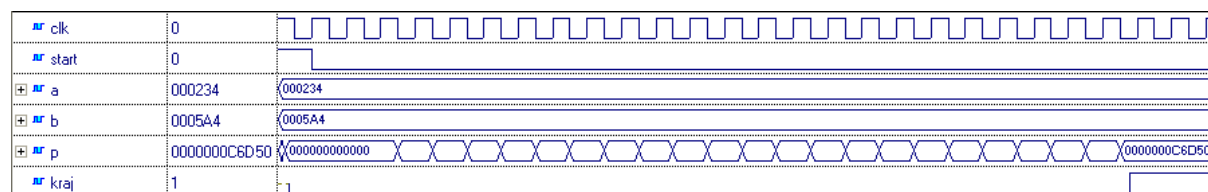
gde m i n označavaju ukupan broj bitova brojeva X , Y respektivno, $x_i, y_i \in \{0,1\}$. Operacija množenja definiše se kao:

$$Z = X \cdot Y = \sum_{k=0}^{m+n-1} z_k 2^k = \left(\sum_{i=0}^{m-1} x_i 2^i \right) \left(\sum_{j=0}^{n-1} y_j 2^j \right) = \sum_{i=0}^{m-1} \left(\sum_{j=0}^{n-1} x_i y_j 2^{i+j} \right). \quad (8.2)$$

Na osnovu prethodnog izraza vidi se da se operacija množenja neoznačenih binarnih brojeva obavlja na isti način kao i množenje decimalnih brojeva. Ovaj algoritam poznat je pod nazivom *iterativni* (ručni). Proces množenja počinje tako što se množenik množi sa svakim bitom množioca, počev sa LSB (*least significant bit*) bitom. Na ovaj način dolazi do formiranja parcijalnog proizvoda. Sukcesivni parcijalni proizvodi pomeraju se za jedno mesto ulevo. Suma svih parcijalnih proizvoda predstavlja konačan rezultat množenja. Zaključujemo da se ceo proces množenja može obaviti pomoću kombinacionih kola AND i potpunih sabirača (FA).

Kolo za množenje realizovano po iterativnom algoritmu Sl. 8.5 sastoji se od četiri 24 bitna registra (U1, U2, U6, U8), niza AND kola (U4), potpunog sabirača (U5), kola za konkatenciju (U7) i bloka kontrolne logike (U3). Osnovna funkcija bloka kontrolne logike je da obezbedi da proces množenja traje onoliko taktnih impulsa koliko operandi imaju bitova. U našem slučaju postupak množenja traje 24 taktna intervala. Nakon setovanja signala *Start*, množenik i množilac se upišu u registre U1 i U2 respektivno. Svakog taktnog ciklusa, sadržaj registra U2 pomera se za jednu poziciju ulevo i bit najmanje težine se množi sa sadržajem registra U1. Dobijeni proizvod se vodi na ulaz kola za sabiranje U5, da bi se sabrao sa rezultatom prethodnog množenja. Iz dobijenog zbira, 24 bita najveće težine (MSB) smešta se u registar U6. Sadržaj registra U8 pomera se za jedno mesto udesno i na poziciju najmanje težine smešta se bit najmanje težine sa izlaza sabirača U5.

Na Sl. 8.6 prikazani su rezultati simulacije kola za množenje kada su kao ulazni podaci uzeti (000234h) i (0005A4h) dok se za proizvod dobija (00C6D50h).



79

8.4 Kolo za korenovanje

Kolo za korenovanje realizovano je korišćenjem iterativnog (ručnog) algoritma, koji je objašnjen u [Jo04]. Algoritam prati korake koji se primenjuju prilikom „ručnog“ računanja kvadratnog korena nekog prirodnog broja. Na samom početku broj se podeli u grupe od po 2 cifre počevši od cifre jedinice. Prva cifra rezultata B_m , je broj čiji je kvadrat manji od prvog para cifara. Ostatak koji je nastao oduzimanjem kvadrata broja B_m od prve grupe cifara dodaje se sledećem paru i tako nastaje broj C_m . Sledeća cifra rezultata B_{m-1} je maksimalna cifra koja ispunjava uslov (8.3).

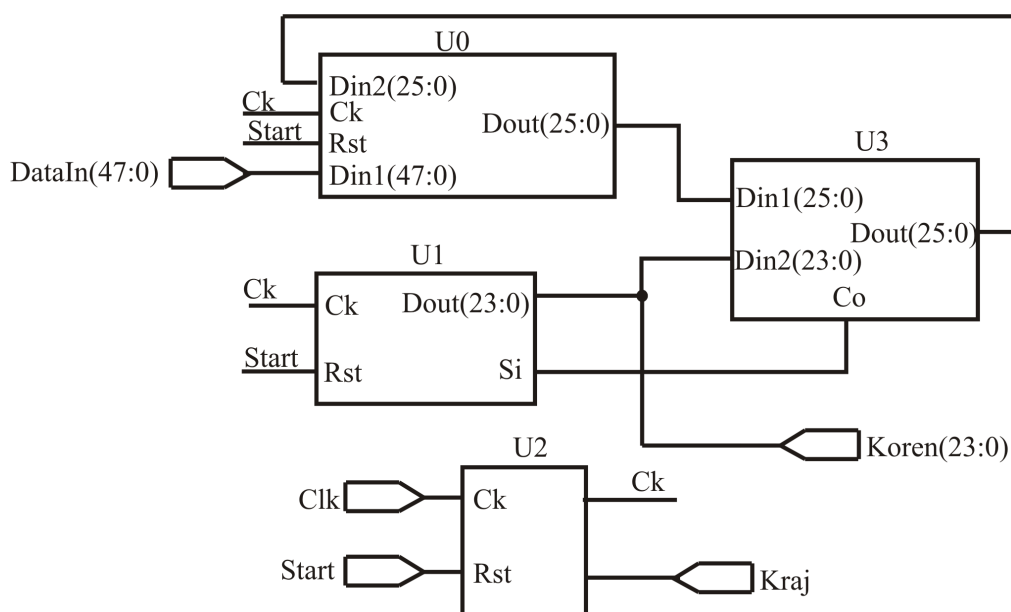
$$(20 \cdot \text{trenutni_rezultat} + B_{m-1}) \cdot B_{m-1} \leq C_m. \quad (8.3)$$

Nova vrednost C_{m-1} se dobija kad se rezultatu oduzimanja na osnovu (1.4) pridruži (doda sa LSB strane) sledeći par cifara.

$$C_m - (20 \cdot \text{trenutni_rezultat} + B_{m-1}) \cdot B_{m-1}. \quad (8.4)$$

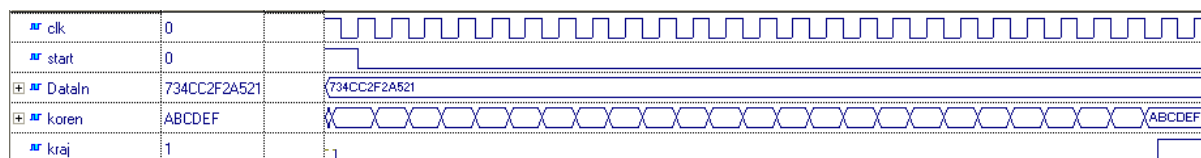
Cifra B_{m-1} dodaje se trenutnom rezultatu a postupak se ponavlja dok se ne obrade svi parovi cifara.

Algoritam računanja korena binarnog broja identičan je postupku računanja korena broja osove 10. Činjenica da se kao mogući rezultat mogu pojaviti samo cifre 1 ili 0, dodatno olakšavaju postupak. Binarni broj se podeli u grupe od po 2 cifre. Tokom svake iteracije, trenutnom rezultatu dodaju se 2 cifre s desne strane i to cifra 0 zbog množenja bojem 2 a cifra 1 kao sledeća moguća cifra rezultata. Ukoliko je umanjnik veći od umanjioaca trenutnom rezultatu se dodaje cifra 1; u suprotnom se dodaje cifra 0.



Slika 8.7. Blok šema kola za korenovanje [Jov05]

Kao što je prikazano na Sl. 8.7 kolo za korenovanje sastoji se od: registara (U0 i U1), kontrolne logike (U2) i kola za oduzimanje (U3). Blok kontrolne logike generiše 24 taktna impulsa čime se operacija korenovanja ograničava na toliko ciklusa. Ulaz u kolo za korenovanje je 48 bitni broj *DataIn*(47:0) a izlaz je 24 bitni broj *Koren* (23:0). Umanjenik na ulazu kola za oduzimanje formira se na osnovu 26 MSB registra U0, a umanjilac od bitova trenutnog rezultata i dve binarne cifre 0 i 1 koje se dodaju trenutnom rezultatu sa desne strane. Registar U1 koristi se za smeštanje trenutne vrednosti rezultata, čija je inicijalna vrednost nula. Nakon svakog takta obavi se po jedna operacija oduzimanja. U slučaju kada je umanjilac manji od umanjenika, onda se cifra 1 dodaje trenutnom rezultatu sa desne strane. Razlika se smešta na mesto umanjenika (26 MSB registra U0) a sadržaj registra U0 pomera se ulevo za dve pozicije. U suprotnom, ako je umanjilac veći od umanjenika, rezultat oduzimanja se ne pamti a sadržaj registra U0 pomera se za 2, a registra U1 pomera se za jednu poziciju ulevo. Rezultati simulacije kola za korenovanja prikazani su na Sl. 8.8. Broj koji se korenuje je *DataIn*=(734CC2F2A521)*h* a rezultat koji se dobija nakon 24 taktna ciklusa je *Koren*=(ABCDEF)*h*.



Slika 8.8. Rezultati simulacije kola za korenovanje

8.5 LCD displej

Za prikazivanje podataka očitanih iz brojila i vrednosti snage izobličenja iskoristili smo 2x16 LCD displej koji je sastavni deo Alterine DE2 razvojne ploče. Obično se za povezivanje LCD displeja koristi 14 ili 16 pinova i to: 8-pinova za prenos podatka za prikazivanje (DB[7:0]), dva pina za napajanje (Vdd, GND), dva pina za kontrolu pozadinskog osvetljenja (A, K) i tri pina za kontrolu rada displeja (enable pin (E), register select pin (RS), read/write select pin (R/W)). Korišćenjem LCD displeja štedi se na ukupnom broju pinova potrebnom za povezivanje sa displejem ali je postupak prikazivanja rezultata mnogo komplikovaniji. Naime, svaki displej je opremljen sopstvenim kontrolerom čiji sastavni deo predstavlja drajver za pokretanje LCD, Ram memorija za prikazivanje podatka (Display data RAM - DDRAM) kao i RAM i ROM memorije koje omogućavaju generisanje karaktera koji već nisu predefinisani (CGROM i CGRAM). U DDRAM čuvaju se podaci o adresi karaktera smeštenog u CGROM odnosno CGRAM memoriji. CGROM sadrži već definisane karaktere

veličine 5x8 dok se CGRAM memorija koristi za definisanje novih karaktera. Radom displeja upravlja kontroler koga kontroliše FSM ili procesor. Kontroler sadrži dva 8 bitna registra(*instruction register*-IR i *data register* -DR). IR se koristi za čuvanje instrukcija i adresa dok se DR koristi za čuvanje podataka koji se upisuju ili isčitavaju. Čitanje ili upis podatka određuje se na osnovu stanja R/W pina, a izbor registra na osnovu stanja RS pina. U tabeli 8.2 prikazana je lista dozvoljnih IR i DR operacija.

TABELA 8.2. IR/DR OPERACIJE

RS	R/W	Operacija
0	0	Instrukcija se upisuje u IR registar
0	1	Busy fleg(DB7) i vrednost(DB6-DB0) brojača adresa (AC) se čitaju
1	0	Upisivanje podataka iz DR u DDRAM ili CGRAM
1	1	Čitanje podataka iz DDRAM ili CGRAM u DR registar

U IR registar podaci mogu samo da se upisuju. Ukoliko je IR registar selektovan, a signal na R/W pinu na logičkom nivou “1” onda se očitava *busy* fleg i adresni brojač. Ukoliko je setovan *busy* fleg u toku je interna operacija, tako da se nova instrukcija ne može prihvatiti. Da bi došlo do obrade nove instrukcije *busy* fleg mora biti resetovan. Umesto korišćenja *busy* flega mnogi preferiraju korišćenje vremenskog kašnjenja(*delay*) umesto stalne provere *busy* flega (*polling*). Adresni brojač (AC) čuva adresu DDRAM ili CGRAM. Izbor memorije čija se adresa čuva u AC određuje se pomoću instrukcije. Prilikom upisa ili čitanja DDRAM i CGRAM, sadržaj AC se automatski inkrementira, odnosno dekrementira. Radom displeja upravlja se pomoću 8-bitnih instrukcija, prikazanih u tabeli 8.3

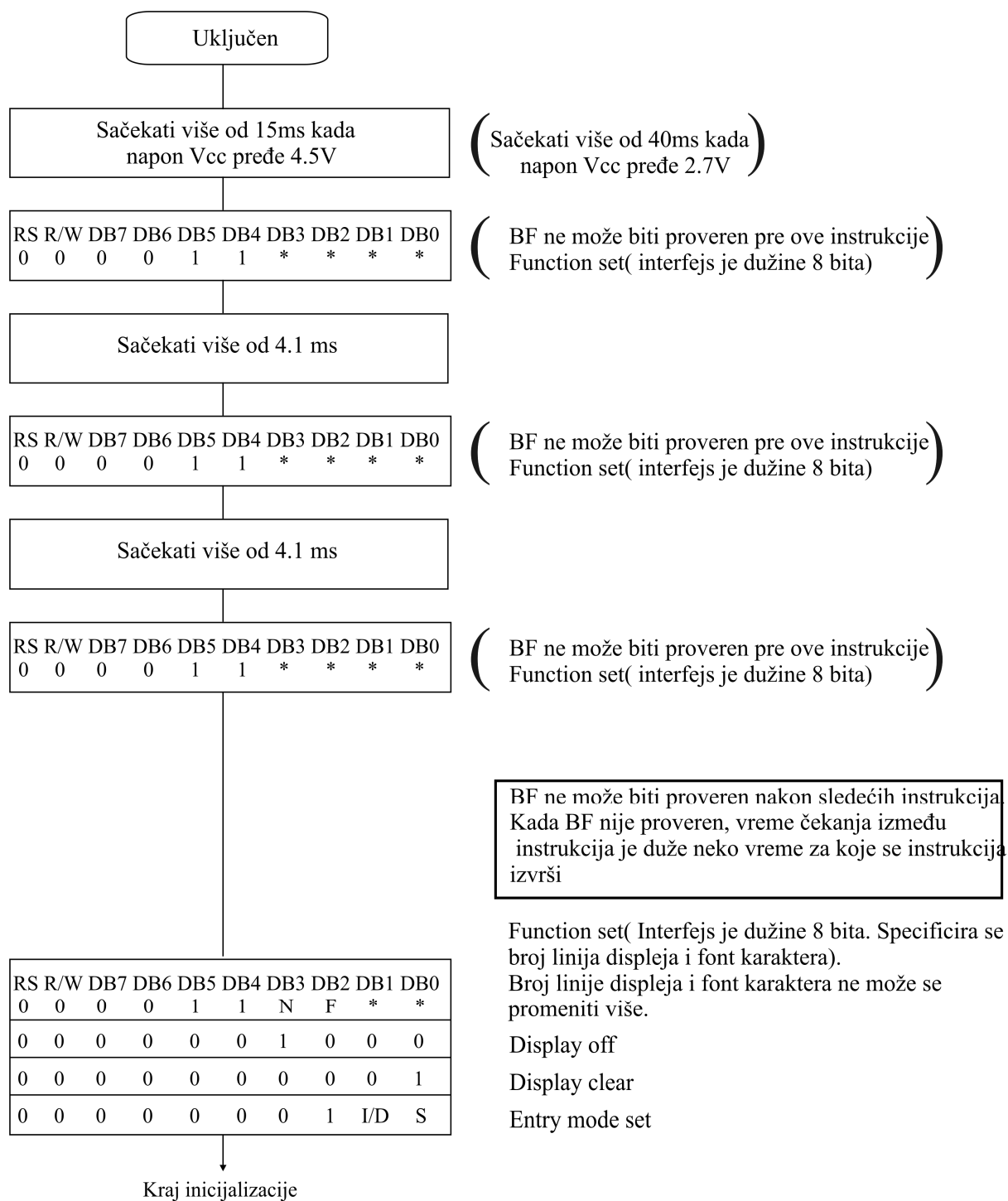
TABELA 8.3. LCD DISPLEJ INSTRUKCIJE

Instrukcija	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
Clear display	0	0	0	0	0	0	0	1
Cursor at home	0	0	0	0	0	0	1	x*
Entry mode set	0	0	0	0	0	1	I/D	S
Display control	0	0	0	0	1	D	C	B
Cursor or display shift	0	0	0	1	S/C	R/L	x	x
Function set	0	0	1	DL	N	F	x	x
CGRAM address set	0	1	Adresa					
DDRAM address set	1	Adresa						

*) “x” označava vrednost koja nije od značaja

Prilikom korišćenja *clear display* instrukcije dolazi do upisa vrednosti 20h (*space* karakter) na poziciji svake DDRAM adrese. Istovremeno resetuje se sadržaj AC na 00h i selektuje se inkrement mod, dok se kursor vraća na početnu poziciju. Instrukcija *cursor at home*, setuje kursor na početnu poziciju ali sadržaj DDRAM memorije i mod ostaju nepromenjeni. Korišćenjem *entry mode* instrukcije određuje se da li se radi čitanje ili

upisivanje karaktera. I/D parameter određuje da li se sadržaj AC inkrementira (I/D=1) ili dekrementira (I/D=0) nakon upisa odnosno čitanja sadržaja DDRAM ili CGRAM. Setovanjem S bita, nakon upisa podatka u DDRAM, dolazi do pomeranja vidljivog dela memorije levo ili desno, dok, vizuelno, kursor ostaje na istoj poziciji. Ukoliko je S bit resetovan vidljiv deo memorije ostaje nepromenjen, posledično dolazi do pomeranja kursora na sledeću poziciju. *Display control* instrukcija se koristi za upravljanje prikazom na LCD displeju, gde D bit uključuje/isključuje displej, C bit omogućava da kursor bude vidljiv/nevidljiv a B bit definiše da li će karakter na poziciji kursora treperiti. Pozicija kursora definisana je od strane adrese sačuvane u AC. Instrukcija *cursor or display shift* pomera kursor za jednu poziciju levo/desno ili ceo displej u zavisnosti od statusa S/C bita. Kada je S/C=0 dolazi do pomeranja kursora dok S/C=1 pomera karaktere na displeju. Bit R/L određuje smer pomeranja (ulevo kada je R/L=0 odnosno udesno kada je R/L=1). Pomoću *function set* instrukcije i DL bita bira se 8/4-bitni interfejs u zavisnosti da li je DL setovan ili resetovan, respektivno. Na Sl.8.9 prikazan je algoritam za inicijalizaciju LCD displeja (8 bitni interfejs).

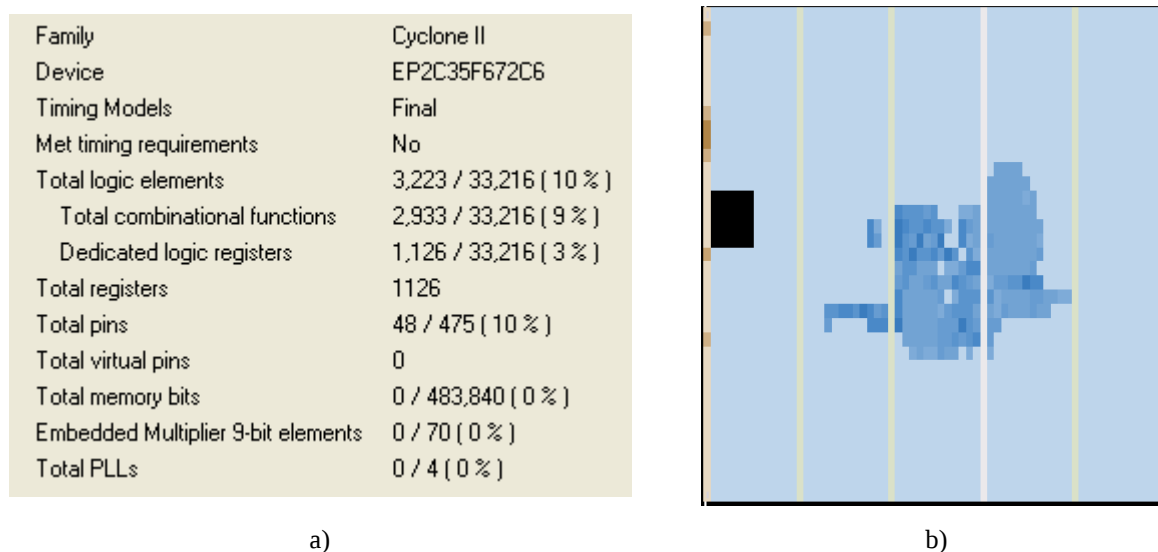


Slika 8.9. Algoritam inicijalizacije LCD displeja- 8 bitni interfejs[Hi99]

Algoritam prikazan na Sl. 8.9 opisuje FSM kojim se kontroliše prikazivanje podataka na displeju.

8.6 Implementacija sistema za detekciju izvora nelinearnog izobličenja

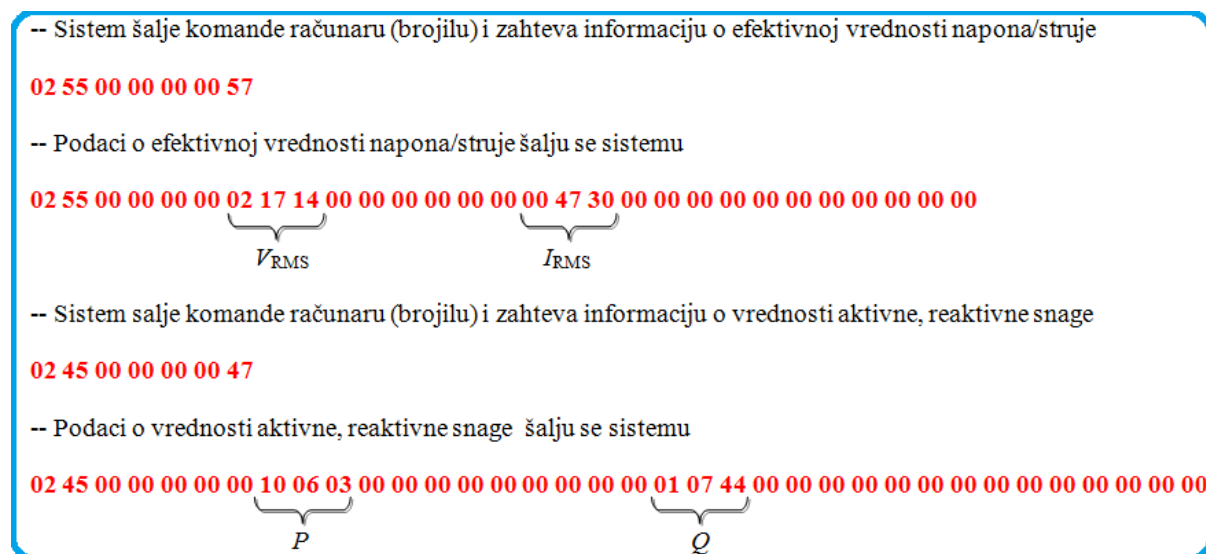
Nakon logičke verifikacije svakog bloka ponaosob sa Sl. 8.1 kao i celokupnog sistema pristupilo se implementaciji samog sistema na Alterinoj DE2 razvojnoj ploči. Proces implementacije sistema urađen je uz pomoć *Quartus*, alata za opis i implementaciju digitalnih kola na FPGA. Na Sl. 8.10.a prikazani su osnovni podaci o iskorišćenosti resursa FPGA. Slika 8.10.b prikazuje zauzeće FPGA resursa (tamno plava boja)



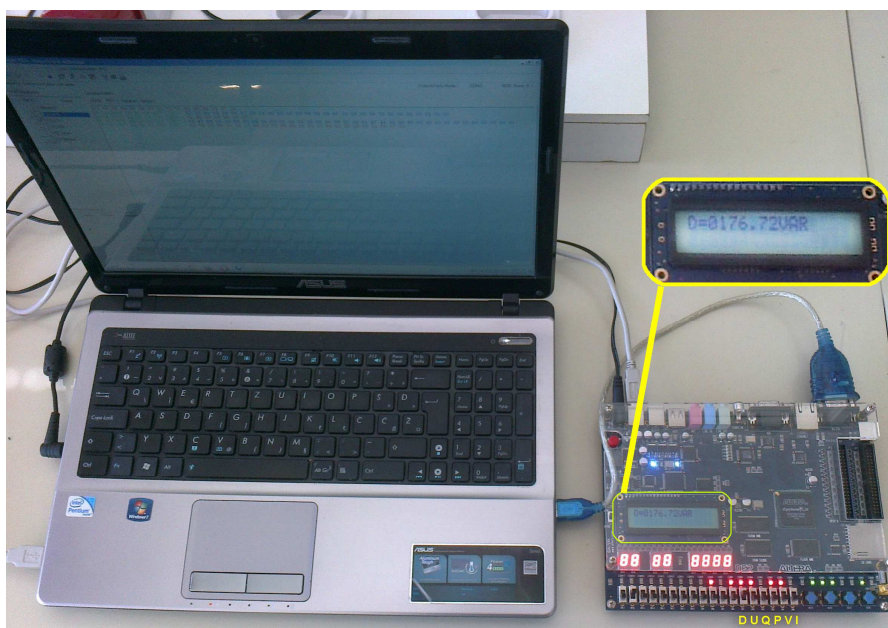
Slika 8.10. a) Rezultati implementacije, b) grafički prikaz implementiranog kola

Funkcionalnost implementiranog sistema testirana je uz pomoć laptopa na kome je pokrenut *docklight* program za komunikaciju računara i razvojne ploče. U ovom slučaju laptop uz pomoć *docklight* programa simulira elektronsko brojilo. Postupak verifikacije odvija se u četiri etape. Na samom početku sistem preko RS232 šalje komande i zahteva podatke o efektivnoj vrednosti napona i struje. Po prijemu zahteva, uz pomoć *docklight* programa se šalju podaci sistemu. Nakon prijema informacija o efektivnoj vrednosti struje i napona, sistem automatski šalje zahtev za informaciju o vrednostima aktivne i reaktivne snage. Kada se proces komunikacije završi, sistem počinje sa računanjem vrednosti snage izobličenja i rezultat prikazuje na LCD displeju. Realizovani sistem ima mogućnost da u zavisnosti od stanja prekidača na razvojnoj ploči (označeni žutom bojom slovima I , V , P , Q , U , D) prikazuje različite podatke na LCD displeju. Na ovaj način realizovani sistem, sem što ima mogućnost detekcije izvora harmonijskog izobličenja omogućava da, u istom trenutku, pročitamo i ostale parametre od interesa (I_{RMS} , V_{RMS} , P , Q , U , D). Proces komunikacije između realizovanog sistema i računara kao i podaci koji se razmenjuju prikazani su na Sl.

8.11 dok je na Sl. 8.12 prikazana fotografija sistema za verifikaciju implementiranog sistema.

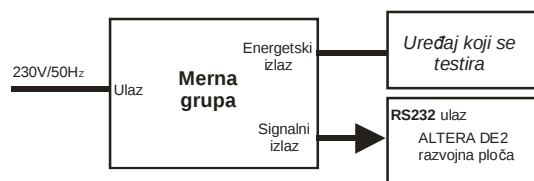


Slika 8.11. Proces komunikacije između Altere DE2 ploče i računara

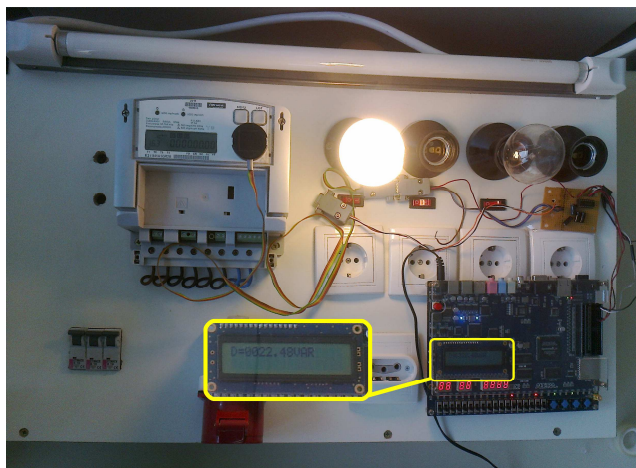


Slika 8.12. Fotografija sistema za verifikaciju implementiranog sistema

Nakon funkcionalne verifikacije realizovanog sistema pomoću računara urađena su merenja realnih potrošača u našem slučaju različitih tipova sijalica. Blok šema korišćenog testnog okruženja prikazana je na Sl. 8.13a, dok je na Sl. 8.13b prikazana fotografija tesnog okruženja.



a)



b)

Slika 8.13. a) Blok šema tesnog okruženja, b) fotografija tesnog okruženja

Kao merni instrument korišćena je merna grupa iz proizvodnog programa firme EWG iz Niša. Korišćena merna grupa ispunjava standarde IEC 62053-22 [IEC22], IEC 62053-11 [IEC11] i IEC 62052-23 [IEC23]. Merna grupa meri osnovne parametre električne energije u skladu sa definicijama koje su date jednačinama (4.14), (4.15), (4.19) i (4.20). Korišćena merna grupa prikuplja podatke o I_{RMS} , V_{RMS} , P i Q . Ove veličine očitavaju se tokom svake sekunde i šalju sistemu koji je realizovan na Alterinoj DE2 razvojnoj ploči preko optičkog i RS232 porta. Implementirani sistem izračunava vrednosti prividne i snage izobličenja primenom izraza (4.24) i (7.3) respektivno. Rezultati merenja potrošnje na različitim tipovima sijalica dati su u tabeli 8.4.

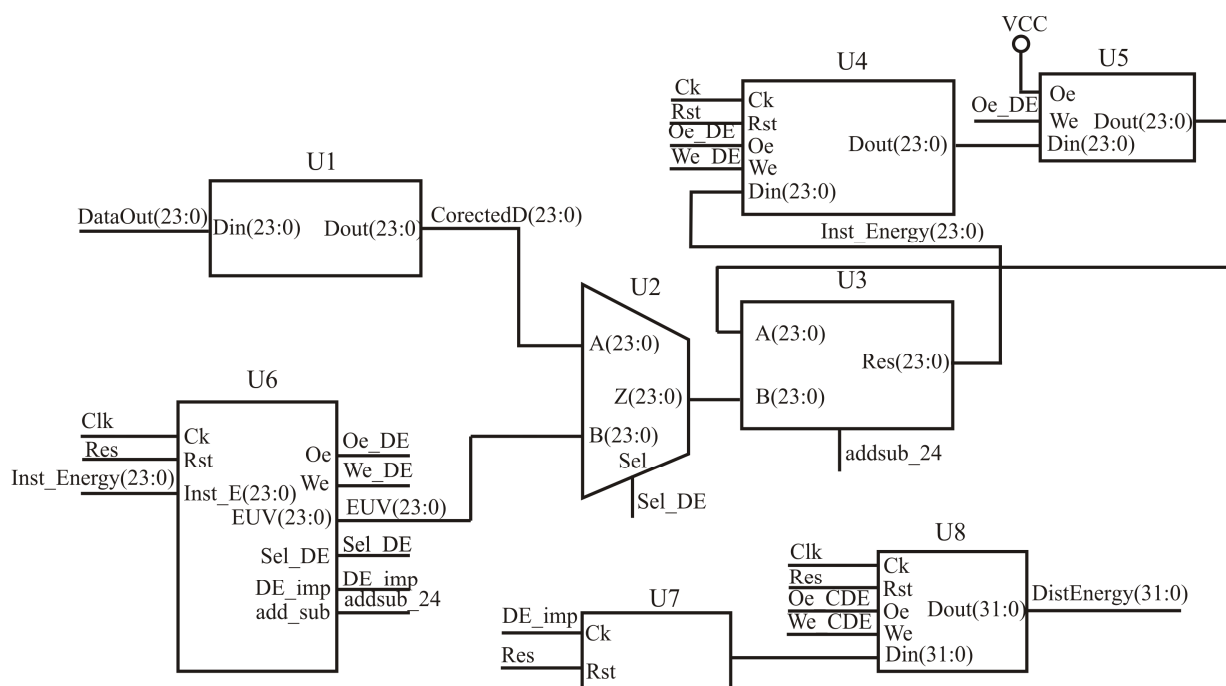
TABELA 8.4. REZULTATI MERENJA RAZLIČITIH TIPOVA SIJALICA

Potrošač	$V_{RMS}[V]$	$I_{RMS}[A]$	$U[VA]$	$P[W]$	$Q[VAR]$	$D_B[VAR]$	D/P
Sijalica 75W	221.44	0.321	71.08	71.07	-0.71	1.11	0.02
FL 18W	221.75	0.084	18.63	12.17	-6.36	12.59	1.03
CFL 20W bulb	222.69	0.125	27.84	17.82	-7.99	19.84	1.11
CFL 15W helix	223.41	0.109	24.35	14.79	-7.16	17.97	1.22
CFL 7W bulb	225.96	0.047	10.62	6.63	-2.83	7.80	1.18
LED 10W	222.64	0.052	11.58	9.8	-2.7	5.54	0.57
LED 9W	221.65	0.072	15.96	9.43	-3.1	12.50	1.33
LED 4W	223.09	0.034	7.59	3.52	-5.15	4.32	1.23

Rezultati prikazani u Tabeli 8.4 pokazuju da se opisani sistem može uspešno koristiti kao hardverska nadogradnja postojećim elektronskim brojilima kako bi im se dogradila mogućnost detekcije nelinearnih potrošača.

8.7 Kolo za merenje energije izobličenja

Poslednja kolona u Tabeli 8.4 iz prethodnog poglavlja ukazuje da se nelinearnim potrošačima, pored aktivne snage (koja je uključena u tarifni sistem), isporučuje i snaga izobličenja. Štaviše, ova komponenta nije zanemarljiva. Kod izrazito nelinearnih opterećenja ona je i do 74% veća od aktivne snage. Imajući u vidu trend povećanja broja nelinearnih opterećenja, očigledno je da gubici koji se javljaju kao rezultat neregistrovanja energije izobličenja postaju veoma značajni. Zbog toga osim merenja snage izobličenja koja se meri svake sekunde neophodno je realizovati kolo za merenje energije izobličenja. Blok šema kola za merenje energije izobličenja prikazana je na Sl. 8.14.



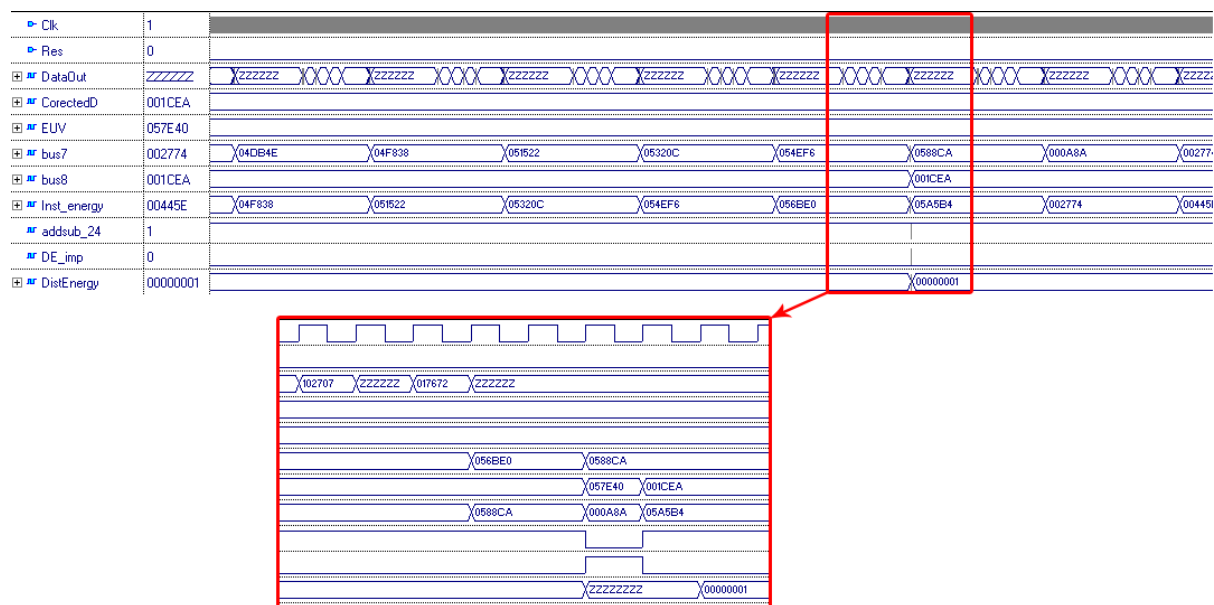
Slika 8.14. Kolo za merenje energije izobličenja

Kolo za merenje energije izobličenja sastoji se od kola za korekciju vrednosti snage izobličenja (U1), multipleksera (U2), kola za akumuliranje i oduzimanje (U3), registara (U4, U5, U8), BCD brojača (U7) i FSM (U6). Kolo za korekciju snage izobličenja zasnovano na primeni (7.6), obezbeđuje da se vrednost snage izobličenja koja se javlja kod nelinearnih potrošača a koja je rezultat dozvoljenih vrednosti harmonika struje potrošača na osnovu standarda IEEE 519-1995 ne registruje. Na ovaj način su zaštićeni potrošači koji koriste uređaje u skladu sa standardima prikazanim u poglavlju 5.

Kolo U1 prihvata podatke o prividnoj i snazi izobličenja u vidu 24-bitne reči u BCD formatu preko ulaza $Din(23:0)$. Saglasno jednačini (7.6) vrednost snage izobličenja (D) koriguje sa vrednošću koja iznosu 10% prividne snage (U). Vrednost korekcionog

koeficijenta dobije se pomeranjem vrednosti prividne snage za 4 pozicije ulevo, pri čemu se na poziciji MSB bita upisuju nule. Ukoliko je vrednost korekcionog koeficijenta veća od vrednosti snage izobličenja na izlazu *Dout(23:0)* kola U1 prosleđuje se nula. U suprotnom, na izlazu *Dout (23:0)* kola U1 dobija se korigovana vrednost snage izobličenja. Izlaz kola U1 prosleđuje se kolu U3, preko multipleksera U2. Registar U4 na čijem ulazu se prosleđuje izlaz kola U3 čuva informaciju o trenutnoj vrednosti snage izobličenja. Vrednost trenutne snage izobličenja se takođe vodi na ulaz kola U6. Kolo U6 poredi trenutnu vrednost energije izobličenja sa vrednošću koja predstavlja jedan impuls (EUV -Energy Unit Value), odnosno 0,001kVARh (3600VARs). Ukoliko je vrednost trenutne energije izobličenja veća od 0,001kVARh, kolo U6 generiše impuls na izlazu *DE_imp* čija rastuća ivica inkrementira stanje BCD brojača U7. Istovremeno se na ulazu *B(23:0)* kola U3 preko multileksera U2 prosleđuje vrednost EUV (*Energy Unit Value*) a signal *add_sub* koji je bio na logičkoj jedinici menja stanje u logičku nulu. Na ovaj način se obezbeđuje da kolo U3 radi kao oduzimač, na čije ulaze se dovodi trenutna vrednost energije izobličenja i EUV vrednost. Dobijena razlika prosleđuje se ulazu kola U4, gde se čuva nova vrednost energije izobličenja. Ona predstavlja početnu vrednost pri narednom računanju trenutne vrednosti energije izobličenja. Informacija o energiji izobličenja (stanje BCD brojača U7) čuva se u registru U8.

Logička verifikacija kola za merenje energije izobličenja urađena je simulacijom uz pomoć Active-HDL alata. Rezultati simulacije realizovanog kola prikazani su na Sl. 8.15.



Slika 8.15. Rezultati simulacije kola za računanje energije izobličenja

Pri simulaciji, kao pobuda kola za računanje energije izobličenja korišćeni su mereni podaci o efektivnoj vrednosti struje i napona, aktivnoj i reaktivnoj snazi, na osnovu kojih se

računa snaga izobličenja kada je kao opterećenje priključen klima uređaj Midea model MSG-12HR. Izmerene su vrednosti prividne snage od 1027.07VA i snage izobličenja od 176.72VAR. Imajući u vidu da je projektovan hardver za rad sa celobrojnim operandima, vrednost prividne snage od 1027.07VA, vrednost snage izobličenja od 176.72VAR i vrednost EUV se množe sa 100 kako bismo dobili celobrojne operande odnosno 102707VA, 17672VAR i 360000Ws, respektivno, kao što je i prikazano na Sl. 8.15. Ovi podaci prosleđuju se preko signala *DataOut(23:0)* do ulaza kola U1 za korigovanje vrednosti snage izobličenja. Na njegovom izlazu *Dout(23:0)* dobija se korigovana vrednost *CorectedD(23:0)* =7402(001CEAh)VAR. Ona se preko multipleksera U2 prosleđuje akumulatoru U3 gde se sabira sa prethodnom vrednošću i posredstvom signala *InstEnergy(23:0)* prosleđuje do registra U4. U slučaju kada vrednost akumulacione sume postane veća od EUV signal *addsub_24* menja logički nivo sa “1” na “0” a na ulaz *B(23:0)* kola U3 prosleđuje se vrednost EUV(057E40h) i radi se oduzimanje. Dobijeni rezultat (000A8Ah) smešta se u registar U4 i postupak akumulacije se nastavlja. Sa Sl. 8.15 vidi se da u trenutku kada je vrednost signala akumulacione sume veća od EUV, dolazi i do generisanja impulsa signala *De_imp* kojim se inkrementira vrednosti BCD brojača. Vrednost energije izobličenja prikazana je signalom *DistEnergy(31:0)*.

8.8 Impementacija sistema za merenje energije izobličenja

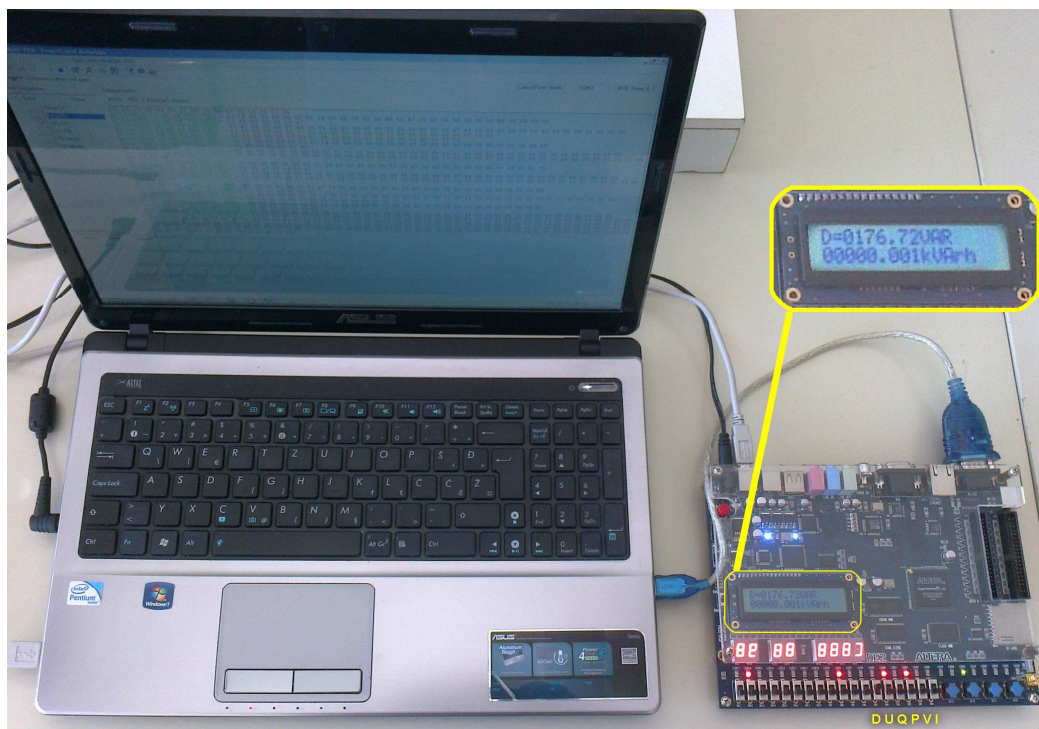
Nakon logičke verifikacije kola za merenje energije izobličenja i njegovog funkcionalnog povezivanja sa sistemom čija je blok šema prikazana na Sl. 8.1 pristupilo se implementaciji sistema na Alterinoj DE2 razvojnoj ploči. Na Sl. 8.16 prikazani su rezultati implementacije kola za merenje energije izobličenja.

Family	Cyclone II
Device	EP2C35F672C6
Timing Models	Final
Met timing requirements	No
Total logic elements	3,520 / 33,216 (11 %)
Total combinational functions	3,205 / 33,216 (10 %)
Dedicated logic registers	1,326 / 33,216 (4 %)
Total registers	1326
Total pins	72 / 475 (15 %)
Total virtual pins	0
Total memory bits	0 / 483,840 (0 %)
Embedded Multiplier 9-bit elements	0 / 70 (0 %)
Total PLLs	0 / 4 (0 %)

Slika 8.16. Rezultati implementacije kola za merenje energije izobličenja

Poređenjem podataka koji su dati nakon sinteze i implementacije kola za detekciju izvora harmonijskog izobličenja sa Sl. 8.10 i podataka sa Sl. 8.16, vidi se da implementacija kola za merenje energije izobličenja neznatno uvećava ukupan broj iskorišćenih logičkih elemenata za samo 1%.

Na Sl. 8.17 prikazana je fotografija sistema kola za merenje energije izobličenja. Kao što se može videti, u prvom redu LCD displeja prikazuje se informacija o trenutnoj vrednosti snage izobličenja dok se u drugom redu prikazuje trenutna vrednost energije izobličenja. Kao i kod sistema sa Sl. 8.17 u prvom redu na displeju mogu se prikazati ostali podaci o kao što su efektivne vrednosti struje i napona, aktivna, reaktivna, prividna i snaga izobličenja. Tip prikazanog podatka selektuje se u zavisnosti od stanja prekidača na razvojnoj ploči (označeni žutom bojom slovima *I*, *V*, *P*, *Q*, *U*, *D* na Sl.8.17).



Slika 8.17. Fotografija sistema za verifikaciju implementiranog sistema za merenje snage i energije izobličenja

Iako je počela zamena starih elektromehaničkih brojila novim elektronskim brojilima svest o veličini snage izobličenja koju troše savremeni elektronski uređaji još nije razvijena. Samim tim, ni u nedavno instaliranim elektronskim brojilima nije implementirana opcija za registrovanje snage, odnosno energije izobličenja. Da ceo proces zamene brojila ne bi bio uzaludan, realizovani sistem može da se koristi kao hardverska nadgradnja postojećim elektronskim brojilima. Primenom realizovanog sistema i promenom politike naplate došlo bi

do značajnog smanjenja finansijskih gubitaka koje distributeri trpe neregistrovanjem utroška energije izobličenja.

9 Zaključak

Kao rezultat korišćenja energetske efikasne uređaja javlja se smanjenje emisije CO₂. Osim ove očigledne prednosti, energetske-efikasni uređaji se karakterišu i jednim veoma ozbiljnim nedostatkom. Usled korišćenja ovih uređaja dolazi do generisanja harmonika, koji protiču kroz EE sistem i izazivaju brojne neželjene efekte.

Sve veće prisustvo harmonika u EE sistemu nametnulo je potrebu da se ograniče njihove maksimalne vrednosti posebnim standardima. Nažalost, njima se ne definiše metod ili veličina koja se koristi za određivanje izvora harmonijskog izobličenja (nelinearnog potrošača). Usled toga došlo je do nadmetanja među stručnjacima i naučnicima da se razvije što precizniji, efikasniji i jednostavniji metod za implementaciju. Sastavni deo ove disertacije čini i pregled postojećih metoda za identifikaciju izvora harmonijskih izobličenja kao i njihovi nedostaci. Zajednički nedostatak analiziranih metoda je njihova komplikovana implementacija a samim tim nemogućnost njihove primene na nivou pojedinog potrošača (elektronskog brojila), zbog čega se uglavnom primenjuju na nivou transformatorskih stanica.

U cilju otklanjanja nedostatka u ovoj disertaciji je predložen jednostavan i efikasan metod za detekciju izvora harmonijskih izobličenja na nivou pojedinačnih potrošača (brojila). Predloženi metod zasniva se na merenju snage izobličenja. Pojam snage izobličenja uveo je rumunski naučnik Budeanu 1927. god. kao vezu između aktivne, reaktivne i prividne snage. Funkcionalna verifikacija metoda potvrđena je simulacijom u Matlab-u i merenjima uz primenu standardnog elektronskog brojila i personalnog računara. Rezultati poređenja predloženog metoda sa već postojećim metodima prikazani u Tabeli 7.3. pokazali su da je prezentovan metod u svim simuliranim situacijama bez greške odredio izvor harmonijskog izobličenja.

Imajući u vidu da je proces zamene starih elektromehaničkih brojila uveliko u toku, kako se on ne bi obesmislio, realizovan je monofazni sistem za detekciju izvora harmonijskih izobličenja baziran na novopredloženom metodu. Sistem je realizovan na Alerinoj DE2 razvojnoj ploči. Prednost ovog sistema leži u činjenici da se može koristiti kao dodatak postojećim, već ugrađenim standardnim elektronskim brojilima koja registuju aktivnu, reaktivnu snagu i efektivne vrednosti napona i struje. Rezultati prikazani u tabelama 7.4, 7.5, 7.6 i 8.4 pokazuju da distributeri električne energije imaju značajne gubitke usled neregistrovanja snage/energije izobličenja. Realizovani sistem ima mogućnost da detektuje i kvantitativno pokaže stepen nelinearnih izobličenja koje u EE sistem unosi svaki pojedinačni korisnik. Ova osobina čini predloženo rešenje jedinstvenim na tržištu. Primenom opisanog sistema distributer električne energije dobija mogućnost da promenom tarifne politike destimuliše korisnike da priključuju velike nelinearne potrošače. Istovremeno, time se štite korisnici linearnih potrošača od naplate troškova izazvanih gubicima generisanim u nelinearnim potrošačima. Posredno, uvođenje ovog sistema povećaće svest o značaju i uticaju nelinearnih potrošača, tako da će se veća pažnja posvećivati filtriranju viših harmonika. Generalno, poboljšaće se kvalitet napona u EE sistemu i umanjiti gubici izazvani havarijom skupe opreme koja je osetljiva na prisustvo harmonika.

Imajući u vidu sve do sada izloženo može se reći da konkretan doprinos ove disertacije predstavlja:

1. Analiza:

- a. izvora harmonijskih izobličenja na EE mreži;
- b. problema koji se javljaju kod potrošača i opreme EE sistema u prisustvu harmonika na mreži;
- c. postojećih metoda za identifikaciju izvora harmonijskog izobličenja.

2. Razvoj originalnog metoda za efikasnu identifikaciju izvora harmonijskog izobličenja u EE mreži zasnovan na primeni standardnih elektronskih brojila.

3. Hardverska realizacija predloženog metoda u vidu prototipa na FPGA razvojnoj ploči.

4. Hardverska realizacija predloženog metoda u vidu proširenja DSP bloka u novoj generaciji integrisanog merača potrošnje koji se trenutno projektuje u AMS CMOS 018mm tehnologiji kao ASIC.

10 Literatura

- [ABB12] ABB, “ABB's ACTIVE HARMONIC COMPENSATION systems,” <https://goo.gl/XdtWYZ>, Mart 2012., [April 15, 2015]
- [ABS06] American Bureau of Shipping, “Control of Harmonics in Electrical Power System,” <http://goo.gl/WmWy6z>, Maj 2006., [Jun 8, 2014].
- [Al10] Y. Alhazmi, “Allocating power quality monitors in electrical distribution systems to measure and detect harmonics pollution,” Doktorska disertacija, University of Waterloo, Canada, 2010.
- [Ba07] P. V. Barbaro, A. Cataliotti, V. Cosentino, and S. Nuccio, “A novel approach based on nonactive powers for the identification of disturbing loads in power systems,” *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 22, no. 3, pp.1782–1789, Jul. 2007.
- [Bu22] F. Buchholz, “Die drehstrom-scheinleistung bei ungleichmassiger belastung Der Drei Zweige,” *Licht und Kraft*, no. 2, pp. 9–11, Jan. 1922.
- [Bu27] C. I. Budeanu, *Puissances Reactives et Fictives*, Bucharest, Romania: Instytut Romania de l’Energie, 1927, Pub. no. 2.
- [Ca08] A. Cataliotti, V. Cosentino, S. Nuccio, “Comparison of nonactive powers for the detection of dominant harmonic sources in power systems,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 57, no. 8, pp. 1554–1561, Aug. 2008.
- [Ca09] A. Cataliotti, V. Cosentino, “A single-point approach based on IEEE 1459-2000 for the identification of detection of prevailing harmonic sources in distorted

- three phase power systems,” *Proc. of the Metrology and Measurement Systems*, vol. 16, no. 2, pp. 209–218, Jun 2009.
- [Ca10] A. Cataliotti, V. Cosentino, “A new measurement method for the detection of harmonic sources in power system based on approach of the IEEE Std.1459-200,” *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 25, no. 1, pp. 332–340, Jan. 2010.
- [Cr11] I. F. Crowley, H. F. Leung, “PWM Techniques: A Pure Sine Wave Inverter,” Worcester Polytechnic Institute, Maj 2011., <http://goo.gl/0MxZrQ>, [Maj 20. 2014].
- [Cz00] L. S. Czarnecki, “Energy flow and power phenomena in electrical circuits:illusions and reality,” *Electrical Engineering*, vol. 82, pp. 119–126, 2000.
- [Cz87] L. S. Czarnecki, “What is Wrong with Budeanu’s Concept of Reactive and Distortion Power and Why it Should be Abandoned,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. IM-36, no.3, Sept. 1987.
- [Di12-1] M. Dimitrijević, V. Litovski, “Quantitative Analysis of Reactive Power Calculations for Small Non-linear Loads,” *Proceedings of Small System Simulation Symposium 2012*, 2012, pp. 150-154.
- [Di12-2] M. Dimitrijević, “Elektronski sistem za analizu polifaznih opterećenja baziran na FPGA”, Doktorska disertacija, Univerzitet u Nišu, 2012.
- [Di13] S. Dixit, A. Tripathi, V. Chola 800VA , “Pure Sine Wave Inverter’s Reference Design,” <http://goo.gl/A3ZXVw>, Jun 2013, [Maj 20. 2014].
- [Do00] B. L. Dokić, *Energetska elektronika pretvarači i regulatori*, Elektrotehnički fakultet, Banja Luka, 2000.
- [Do07] J. Doucet, D. Eggleston, J. Shaw, “DC/AC Pure Sine Wave Inverter,” Worcester Polytechnic Institute, <http://goo.gl/B5P5of>, [Maj 20. 2014].
- [Em04] A. E. Emanuel, “Summary of IEEE standard 1459: definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions,” *Proc. of the IEEE Tran. On Industrial Applications*, vol. 40 n.3, pp. 869 - 876, Maj 2004.

-
- [Em10] A. E. Emanuel, *Power Definition and the Physical Mechanism of Power Flow* Springer, John Wiley and Sons, 2010.
 - [Em98] A. E. Emanuel, "The Buchholz-Goodhue apparent power definition: the practical approach for nonsinusoidal and unbalanced systems," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 13, no. 2, pp. 344–350, Apr. 1998.
 - [EPRI10] Electric power research institute (EPRI), "Accuracy of Digital Electricity Meters," <http://goo.gl/RhPM6K>, May 2010, [April 20. 2015].
 - [EPSMA10] European power supply manufacturers association "Harmonic Current Emissions - Guidelines to the standard EN 61000-3-2," <http://goo.gl/16JblG>, Nov. 2010.[Nov. 10. 2014]
 - [Go33] W. M. Goodhue, "Discussion of Reactive powers in need of clarification," *AIEE Trans.*, vol. 52, Sept. 1933.
 - [Ha10] M. Hartman, "Orthogonality of functions describing power states in electrical circuits in Budeanu's concept," *Proc. of the International School on Nonsinusoidal Current and*, 2010, pp. 127 - 131
 - [Hi99] HITACHI, "HD44780U - Dot Matrix Liquid Crystal Display Controller/Driver," [Jan. 10. 2015].
 - [IEC11] IEC 62052-11, "Electricity metering equipment (AC) - General requirements, tests and test conditions - Part 11: Metering equipment," 2003.
 - [IEC22] IEC 62053-22, "Electricity metering equipment (AC) - Particular requirements - Static meters for active energy (classes 0.2S and 0.5S)," 2003.
 - [IEC23] IEC62053-23, "Electricity metering equipment (a.c.) – Particular requirements – Part 23: Static meters for reactive energy (classes 2 and 3)," 2003.
 - [IEEE00] IEEE Power Engineering Society, "IEEE Trial-Use Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, Or Unbalanced Conditions," IEEE Std 1459-2000, 2000.
 - [IEEE10] IEEE Power Engineering Society, "IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, Or Unbalanced Conditions," IEEE Std 1459-2010, 2010.

- [IEPQC00] Integral Energy Power Quality Centre: "Technical note No. 3 - Harmonic Distortion in the Electric Supply System," University of Wollongong, <http://goo.gl/8QpwdO>, Mart 2000. [Jun 8. 2014].
- [Jo04] B. Jovanović, M. Damnjanović, V. Litovski, "Square Root on Chip," *ETF Journal of Electrical Engineering*, vol. 12, pp. 65-75, Maj 2004.
- [Jo05] B. Jovanović, "Projektovanje DSP bloka u kolu specifične namene," Magistarska teza, Univerzitet u Nišu, 2005.
- [Jo12] B. Jovanović, M. Damnjanović, D. Stevanović, "The Decomposition of DSP Control Logic Block," *Proceedings of Small System Simulation Symposium 2012*, 2012, pp. 119-124.
- [Le10] S. Lee, J. W. Park, "New power quality index in a distribution power system by using RMP model," *IEEE Tran. On Industrial Applications*, vol. 46, n. 3, pp. 1204 - 1211, Maj/Jun 2010.
- [Leda08] LEDA08, "Preliminary Data Sheet IMPEG01," <http://goo.gl/W2ZACI>, 2008. [Mart, 10. 2014].
- [Li04] C. Li., W. Xu, T. Tayjasanant, "A critical impedance based method for identifying harmonic sources," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 19, no. 2, pp. 671–678, Apr. 2004.
- [Lu01] J. Lundquist, "On Harmonic Distortion in Power Systems", Chalmers University of Technology, Doktorska disertacija, Sweden 2001.
- [Lu07] Dylan Dah-Chuan Lu, "Analysis of an AC-DC Valley Power Factor Corrector (VFPC)," *Ecti Transactions On Electrical Eng., Electronics, And Communications*, vol.5, no.2, pp. 23-28 Avgust 2007.
- [Ma04] H. Markiewicz, A Klajn, "Standard EN 50160 -Voltage Characteristics in Public Distribution Systems," 2004.
- [Mu06] M. Nazarudin Zainal Abidin, "IEC 61000-3-2 Harmonics Standards Overview," Schaffner EMC Inc., Edsion, NJ, USA, 2006.
- [Oz14] B. Ozpineci, L. M. Tolbert, "CYCLOCONVERTERS," Department of Electrical and Computer Engineering, University of Tennessee-Knoxville, <http://goo.gl/DKH3d6>, [Jun 3. 2014].

- [Pe14] P. Petković, D. Stevanović, "Detection of power grid harmonic pollution sources based on upgraded power meters," *Journal of Electrical Engineering*, vol. 65, no. 3, pp. 163-168, Maj/Jun 2014.
- [Pr12] A. Priyadharshini, N. Devarajan, A. R. Umasaranya, R. Anitt, "Survey of Harmonics in Non Linear Loads," *International Journal of Recent Technology and Engineering*, vol. 1, no.1, pp. 92 - 97, April. 2012.
- [Sh07] T. Shaughnessy, "Clearing Up Neutral-to-Ground Voltage Confusion," *Electrical Construction & Maintenance*, <http://goo.gl/9yK6Vc>, Feb. 2007., [Jun 10, 2014].
- [Si07] G. K. Singh, "Power system harmonics research: a survey," *European Transactions on Electrical Power*, vol.19, pp. 151–172, August 2007.
- [St12] D. Stevanović, P. Petković, "The Efficient Technique for Harmonic Sources Detection at Power Grid," *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 2012., no.11a, pp. 196-199, Nov. 2012.
- [St13] D. Stevanović, P. Petković, "The Losses at Power Grid Caused by Small Nonlinear Loads", *Serbian Journal of Electrical Engineering*, vol. 10, no. 1, pp. 209-217, Feb. 2013.
- [St14] D. Stevanović, P. Petković, "A single-point method based on distortion power for the detection of harmonic sources in power system," *Metrology and Measurement Systems*, vol. XXI(2014), no.1, pp. 3-14, Mart 2014.
- [St15-1] D. Stevanović, P. Petković, "A Single-Point Method for Identification Sources of Harmonic Pollution Applicable to Standard Power Meters," *Electrical Engineering*, vol. 97, no. 2, pp. 165-174, Jun 2015.
- [St15-2] D. Stevanović, P. Petković, "Utility needs smarter power meters in order to reduce economic losses," *FACTA UNIVERSITATIS Series:Electronics and Energetics*, vol. 28, no. 3, pp. 407-421, Sept. 2013.
- [Su97] K. K. Sum, "Improved Valley-Fill Passive Current Shaper," *Proceedings of International Power Conversion Intelligent Motion Conference*, 1997, pp.43-50.
- [Ta07] D. M Tagare, *Reactive power management*, McGraw-Hill Education, 2007.

- [Te08] "78M6613 Single-Phase AC Power-Measurement IC," <http://goo.gl/lWDsYI>, 2012. [Dec. 10. 2014].
- [Ud12] S. Uddin, H. Shareef, A. Mohamed, M. A Hanan, "Harmonics and thermal characteristics of low wattage LED lamps," *Przegląd Elektrotechniczny* (Electrical Review), no 11a, pp. 266-271, 2012.
- [Ud13] S. Uddin, H. Shareef, A. Mohamed, "Power quality performance of energy-efficient low-wattage LED lamps," *Measurement*, vol. 46, pp. 3783-3795, 2013.
- [Va06] V. Vodovozov, R. Jansikene, "Power Electronic Converters, 2006.
- [Va14] K. Vasudevan, G. S. Rao, P. S. Rao, *Electrical Machines I*, Indian Institute of Technology Madras, pp. 83-88, <http://goo.gl/qRNZ99>, [Maj 20. 2014].
- [Wa01] J. G Wakileh, *Power Systems Harmonics*, Springer, 2001.
- [We09] Z. Wei, "Compact Fluorescent Lamps phase dependency modelling and harmonic assessment of their widespread use in distribution systems," Doktorska disertacija, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 2009.
- [We99] J. G. Webster, *The measurement, instrumentation, and sensors handbook*, IEEE Press, 1999.
- [Wi11] J. L. Willems, "Budeanu's Reactive Power And Related Concepts Revisited," *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, vol. 60, no. 4, pp. 1182-1186, April 2011.
- [Xu00] W. Xu, Y. Liu, "A method for determining customer and utility harmonic contributions at the point of common coupling," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 15, no.2, pp. 804 - 810, Jan. 2000.
- [Xu03] W. Xu, X. Liu, Y. Liu, "An investigation on the validity of power-direction method for harmonic source determination," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 18, no.1, pp. 214 - 219, Jan. 2003.

Kratka biografija kandidata

Kandidat dipl. inž. Dejan Stevanović rođen je 09.06.1982. godine u Vranju. Osnovnu i srednju Tehničku školu završio je u Vladičinom Hanu. Tokom svog osnovnog obrazovanja učestvovao je na brojnim takmičenjima iz matematike i fizike.

Školske 2001/2002. godine počinje studije na Elektronskom fakultetu Univerziteta u Nišu, smer Elektronika, i završava ih septembra 2007. godine, sa prosečnom ocenom 8,15 i ocenom 10 na diplomskom ispitu. Školske 2007/2008. godine upisuje doktorske studije na Elektronskom fakultetu u Nišu, studijski program Elektronika. Sve ispite predviđene planom i programom položio je sa prosečnom ocenom 9,67.

Profesionalno iskustvo započinje 2008. godine kao saradnik firme „Tagor Electronics“ d.o.o sa sedištem u Nišu. Tokom 2009. godine bio je zaposlen u EWG d.o.o takođe sa sedištem u Nišu i radio na poslovima razvoja trofaznog/monofaznog brojila. U periodu od 01.03.2011 do 15.01.2013 bio je zaposlen u Inovacionom centru Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu kao istraživač pripravnik. Od marta 16.01.2013 prelazi u Inovacioni centar naprednih tehnologija sa sedištem u Nišu kao istraživač saradnik. Tokom doktorskih studija boravio je dva puta u Nemačkoj u trajanju od po 2 meseca na Tehničkom Univerzitetu u Ilmenau i Univerzitetu primenjenih nauka u Erfurtu u okviru međunarodne razmene istraživača međunarodnih projekata ISSNS, ISSNBSZ realizovanih u okviru “An international research project realized within the Pact of Stability of Southeast Europe and funded by The German Government (DAAD)”. Kao autor ili koautor objavio je 26 naučnih radova u međunarodnim ili domaćim naučnim časopisima i na međunarodnim ili domaćim

naučnim konferencijama i simpozijumima. Takođe je autor četiri tehnička rešenja prihvaćena od strane nadležnog Ministarstva za nauku. Aktivno se služi engleskim jezikom.

Naučni radovi kandidata

Radovi objavljeni u časopisima međunarodnog značaja sa SCI liste (M23)

- a.1. **Stevanović Dejan**, Petković Predrag, “A Single-Point Method for Identification Sources of Harmonic Pollution Applicable to Standard Power Meters”, *Electrical Engineering*, vol. 97, no. 2, pp. 165-174, Jun 2015.
- a.2. Petković Predrag, **Stevanović Dejan**, “Detection of power grid harmonic pollution sources based on upgraded power meters”, *Journal of Electrical Engineering*, vol. 65, no. 3, pp. 163-168, Maj/Jun 2014.
- a.3. **Stevanović Dejan**, Petković Predrag, “A single-point method based on distortion power for the detection of harmonic sources in power system”, *Metrology and Measurement Systems*, 2013. vol. XXI(2014), no.1, pp. 3-14, Mart 2014.
- a.4. **Stevanović Dejan**, Petković Predrag, “The Efficient Technique for Harmonic Sources Detection at Power Grid”, *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 2012., no.11a, pp. 196-199, Nov. 2012.

Radovi objavljeni u časopisima međunarodnog značaja van SCI liste (M24)

- b.1. **Stevanović Dejan**, Petković Predrag: “ Utility needs smarter power meters in order to reduce economic losses”, *FACTA UNIVERSITATIS Series:Electronics and Energetics*, vol. 28, no. 3, pp. 407-421, Sept. 2013.

b.2. Stevanović Dejan, Petković Predrag: “The Losses at Power Grid Caused by Small Nonlinear Loads”, *Serbian Journal of Electrical Engineering*, vol. 10, no. 1, pp. 209-217 Feb. 2013.

b.3. Stevanović Dejan, Petković Predrag, Jovanović Borisav, “Modelling and Simulation of Power Consumption at Nonlinear Loads”, *International Journal of Research and Reviews in Computer Science (IJRRCS)*, pp. 27-32, April 2011.

Radovi objavljeni u domaćim časopisima (M51)

c.1. Stevanović Dejan, Jovanović Borisav, Petković Predrag, Litovski Vančo, “Korišćenje snage distorzije za identifikaciju izvora harmonijskog zagađenja na mreži”, *Tehnika - Elektrotehnika*, pp. 975-980, 2011.

Radovi prezentovani na međunarodnim konferencijama (M33)

d.1. Stevanović Dejan, Petković Predrag, Volker Zerbe, “Single Phase System for Detection of Harmonic Pollution Sources at Power Grid”, *Proceedings of the 5th Small System Simulation Symposium*, Niš, 12.02.-14.02., 2014, pp. 74-78.

d.2. Stevanović Dejan, Petković Predrag, “Harmonici u elektroenergetskom sistemu- praktični problemi i rešenja”, *XII međunarodni naučno-stručni Simpozijum INFOTEH-JAHORINA 2013.*, Jahorina, Bosna i Hercegovina, 20.3. - 22. 3., 2013.

d.3. Stevanović Dejan, Petković Predrag, “Measurement of Utility Losses Caused by Nonlinear Loads at Power Grid”, *IX Symposium on Industrial Electronics INDEL 2012*, Banja Luka, Bosnia and Herzegovina, 01.11-03.11, 2012, pp. 247-250.

d.4. Jovanović Borisav, Damnjanović Milunka, **Stevanović Dejan**, “The Decomposition of DSP’s Control Logic Block”, *Proceedings of Small System Simulation Symposium 2012*, Niš, Serbia, 12.02.-14.02., 2012., pp. 119-124.

d.5. Mirković Dejan, **Stevanović Dejan**, Litovski Vančo, “Efficient Fault Effect Extraction for an Integrated Power Meters $\Sigma\Delta$ ADC”, *Proceedings of Small System Simulation Symposium 2012*, Niš, Serbia, 12.02.-14.02., 2012., pp. 125-128.

d.6. Stevanović Dejan, Jovanović Borisav, Petković Predrag, “Simulation of Utility Losses Caused by Nonlinear Loads at Power Grid”, *Proceedings of Small System Simulation Symposium 2012.*, Niš, Serbia, 12.02.-14.02., 2012., pp. 155-160.

- d.7. Stevanović Dejan**, Petković Predrag, “A New Method for Detecting Source of Harmonic Pollution at Grid”, *Proceedings of 16th International Symposium POWER ELECTRONICS Ee2011*, Novi Sad, Serbia, 26.10.-28.10., 2011., T6-2.9 pp. 1-4

Predavanje po pozivu na skupu nacionalnog značaja štampano u celini(M61)

- e.1.** Petković Predrag, Jovanović Borisav, **Stevanović Dejan**, “Energetska efikasnost i elektronika”, *Zbornik radova konferencije Energetska efikasnost ENEF 2013*, Banja Luka, 22.11.-23.11., 2013, pp. B3 1-8.

Radovi prezentovani na domaćim konferencijama (M63)

- f.1. Stevanović Dejan**, Petković Predrag, “Monofazni sistem za detekciju potrošača koji predstavljaju izvor harmonijskih izobličenja u elektroenergetskom sistemu”, *Zbornik LVIII konferencije ETRAN*, Vrnjačka Banja, 02.06.-05.06., 2014, EL1.4.
- f.2. Stevanović Dejan**, Petković Predrag, “Unapređenje sistema za registrovanje potrošnje električne energije”, *Zbornik LVII konferencije ETRAN*, Zlatibor, 03.06.-06.06., 2013, EL4.3.
- f.3. Nieto-Taladriz Octavio**, Dimitrijević Marko, **Stevanović Dejan**, Mirković Dejan, “Energy Profile of a Personal Computer”, *Zbornik LVI konferencije ETRAN*, Zlatibor, 11.06.-14.06., 2012., EL3.3.
- f.4. Stevanović Dejan**, Petković Predrag, “Gubici u elektro energetskom sistemu izazvani malim nelinearnim potrošačima”, *Zbornik LVI konferencije ETRAN*, Zlatibor, 11.06.-14.06., 2012., EL3.4.
- f.5. Stevanović Dejan**, Milovanović Dragiša, Petković Predrag, “Indikator temperaturskog opsega u integrisanom meraču potrošnje električne energije”, *Zbornik LV konferencije ETRAN*, Banja Vrućica, Bosna i Hercegovina, 06.06.-09.06., 2011., EL 3.3.
- f.6. Stevanović Dejan**, Jovanović Borisav, “Izračunavanje snage distorzije u integrisanom meraču potrošnje električne energije”, *Zbornik LIV Konferencije ETRAN*, Donji Milanovac, 07.06. - 11.06., 2010., EL3.5-1-4.
- f.7. Stevanović Dejan**, Jovanović Borisav, Petković Predrag, “Identifikacija izvora harmonijskog zagađenja korišćenjem snage distorzije”, *VIII Simposium on Industrial Electronics INDEL 2010*, Banja Luka, Bosnia and Herzegovina, 4-6 November, 2010., pp. 174-178.

- f.8. Stevanović Dejan,** Jovanović Borisav, Petković Predrag, “Logička verifikacija mikrokontrolera u integrisanom meraču potrošnje električne energije”, *LIII Konferencija ETRAN*, Vrnjačka Banja, 15.06-18.06., 2009., EL 2.2-1-4.
- f.9. Sokolović Miljana, Stevanović Dejan,** Petković Predrag, “Projektovanje za IDDQ testiranje u SoC”, *Zbornik radova LII konferencije ETRAN*, Palić, 08.06-12.06., 2008., EL2.3-1-4.
- f.10. Stevanović Dejan,** Jovanović Borisav., Sokolović Miljana, Petković Predrag, “Projektovanje RTC u integrisanom meraču potrošnje električne energije”, *Zbornik radova LII konferencije ETRAN*, Palić, 08.06-12.06., 2008., EL3.4-1-4.

Tehnička rešenja

- g.1. Stevanović Dejan,** Petković Predrag, “Monofazni sistem za detekciju izvora harmonijskih izobličenja na mestu priključenja potrošača”, *TR32004 Tehničko rešenje - laboratorijski prototip*, 2014, Elektronski fakultet u Nišu.
- g.2. Stevanović Dejan,** Petković Predrag, “Metod za registrovanje gubitaka izazvanih nelinearnim potrošačima u elektrodistributivnom/elektroenergetskom sistemu zasnovan na merenju snage distorzije”, *TR32004 Tehničko rešenje - laboratorijski prototip*, 2012, Elektronski fakultet u Nišu.
- g.3. Stevanović Dejan,** Jovanović Borisav, Petković Predrag, “Blok za merenje snage distorzije”, *TR11007 Tehničko rešenje - laboratorijski prototip*, 2011, Elektronski fakultet u Nišu.
- g.4. Stevanović Dejan,** Mirković Dejan, Petković Predrag, “Integrisani senzor temperature na čipu”, *TR11007 Tehničko rešenje - laboratorijski prototip*, 2011, Elektronski fakultet u Nišu

Izjave autora



Prilog 1.

IZJAVA O AUTORSTVU

Izjavljujem da je doktorska disertacija, pod naslovom

Metod za efikasnu identifikaciju harmonijskih izobličenja u elektroenergetskoj mreži primenom modifikovanih elektronskih brojila

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada,
- da predložena disertacija, ni u celini, ni u delovima, nije bila predložena za dobijanje bilo koje diplome, prema studijskim programima drugih visokoškolskih ustanova,
- da su rezultati korektno navedeni i
- da nisam kršio autorska prava, niti zloupotrebio intelektualnu svojinu drugih lica.

U Nišu, 10.06.2015.

Autor disertacije:

dipl. inž. Dejan Stevanović

Potpis doktoranda



Prilog 2.

IZJAVA O ISTOVETNOSTI ŠTAMPANE I ELEKTRONSKE VERZIJE DOKTORSKE DISERTACIJE

Ime i prezime autora: **Dejan S. Stevanović**

Studijski program: **Elektronika**

Naslov rada: **Metod za efikasnu identifikaciju harmonijskih izobličenja u elektroenergetskoj mreži primenom modifikovanih elektronskih brojala**

Mentor: **prof. dr Predrag Petković**

Izjavljujem da je štampana verzija moje doktorske disertacije istovetna elektronskoj verziji, koju sam predao za unošenje u **Digitalni repozitorijum Univerziteta u Nišu**.

Dozvoljavam da se objave moji lični podaci, koji su u vezi sa dobijanjem akademskog zvanja doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mesto rođenja i datum odbrane rada, i to u katalogu Biblioteke, Digitalnom repozitorijumu Univerziteta u Nišu, kao i u publikacijama Univerziteta u Nišu.

U Nišu, 10.06.2015.

Autor disertacije:

dipl. inž. Dejan Stevanović

Potpis doktoranda



Prilog 3.

IZJAVA O KORIŠĆENJU

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku „Nikola Tesla“ da, u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Nišu, unese moju doktorsku disertaciju, pod naslovom:

Metod za efikasnu identifikaciju harmonijskih izobličenja u elektroenergetskoj mreži primenom modifikovanih elektronskih brojila

koja je moje autorsko delo.

Disertaciju sa svim prilogima predao sam u elektronskom formatu, pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju, unetu u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Nišu, mogu koristiti svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons), za koju sam se odlučio.

1. Autorstvo

2. Autorstvo – nekomercijalno

3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerade

4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima

5. Autorstvo – bez prerade

6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima

U Nišu, 10.06.2015.

Autor disertacije:

dipl. inž. Dejan Stevanović

Potpis doktoranda
