



CEFES



**УНИВЕРЗИТЕТ "СВ. КИРИЛ И МЕТОДИЈ"
ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ – СКОПЈЕ
Настава на постдипломски студии на проектот:**

**ЕКОНОМСКИ ИСПЛАТЛИВИ И ЕКОЛОШКИ ЕНЕРГЕТСКИ СИСТЕМИ
(COST EFFECTIVE&ENVIRONMENTALLY FRIENDLY ENERGY SYSTEMS)**

НАСТАВА ПО ПРЕДМЕТОТ:

" КВАЛИТЕТ НА ЕЛЕКТРИЧНАТА ЕНЕРГИЈА" (POWER QUALITY)

Материјал изработен од:
проф. д-р Јовица Милановиќ, УМИСТ-Манчестер

и предавачите на CARDS-универзитетите:

доц. д-р Амир Токиќ, ЕТФ – Тузла,
проф. д-р Владимир Катиќ, ТФ- Нови Сад
проф д-р Ристо Ачковски, ЕТФ – Скопје

Манчестер, Тузла, Нови Сад, Скопје, 2005/2006 г.

II ДЕЛ. СТАНДАРДИ, ХАРМОНИЦИ, НАПОНСКИ ЈАМИ (ПРОПАДИ)

(Припремил проф. д-р В. Катиќ, ЕТФ – Тузла)
(дообработка – проф. д-р Ристо Ачковски)

С о д р ж и н а:

4. СТАНДАРДИ И ПРЕПОРАКИ

4.1. IEC стандард од серијата 61000

4.2. CENELEC – EN 50160

4.3. IEEE стандарди за квалитетот на електричната енергија

5. ВИШИ ХАРМОНИЦИ

5.1. Теориска обработка на вишите хармоници

- Фуриева трансформација
- Дискретна Фуриева трансформација
- Брза Фуриева трансформација
- Прозорска Фуриева трансформација
- Грешки на Фуриевата трансформација

5.2. Основни формули кај хармониската анализа

- Струја и напон
- Фазен аголна хармониците
- Моќност
- Фактор на моќност
- Дефиниции на хармониските индикатори
- Статистичка претстава на вишите хармоници

5.3. Извори на виши хармоници

- Исправувачи како извори на вишите хармоници
- Електрични машини како извори на хармоници
- Електролачни (електродагови) печки како извори на хармоници
- Индустијата како извори на хармоници
- Домаќинствата како извори на хармоници
- Административни згради и компјутерски центри како извори на хармоници

5.4. Негативни ефекти од вишите хармоници во мрежата

- Појава на резонанција во мрежата
- Влијание врз кондензаторските батерии
- Влијание врз електричните машини
- Влијание врз телекомуникациските сигнали

5.5. Стандарди и препораки

- Стандарди и препораки на одделните земји
- Група стандарди IEC 61000-2-xx
- Група стандарди IEC 61000-3-xx
- Гранични вредности на на хармониците по CENELEC-EN 50160
- IEEE 519 и IEEE 1159
- Препораки на CIGRE
- Споредба на граничните нивоа за напонските хармоници

5.6. Мерење на вишите хармоници

- Кус приказ на современите мерни системи
- Стратегија и цели на мерењето
- Начини на прикажување на резултатите

5.7. Методи за намалување или елиминација на вишите хар.

5.7. Литература

6. НАПОНСКИ ЈАМИ (ПРОПАДИ)

6.1. Вовед

6.2. Негативни ефекти од појавата на напонските јами

- Контактори
- Контролна електроника
- Претворувачи на енергетската електроника
- Мотори и работни машини
- Осветление

6.3. Техничка регулатива во врска со напонските јами

6.4. Мерење и снимање на напонските јами и скокови

- Мерен систем
- Начин на приказ
- Примери од мерења на напонските јами

6.5. Решавање на проблемите со напонските јами

4. STANDARDI I PREPORUKE

Većina razvijenih industrijskih zemalja sveta, kao i najznačajnije međunarodne organizacije su donele tehničke propise - standarde sa navođenjem graničnih vrednosti osnovnih parametara kvaliteta električne energije od kojih zavisi stabilnost rada elektroenergetskog sistema (efektivna vrednost napona, frekvencija i sl.). Ostali parametri, dati u tabeli 4.1, su definisani pojedinačno ili u sklopu sveobuhvatnijih dokumenata o kvalitetu električne energije. Ovi propisi su u obliku ili obavezujućih standarda ili neobavezujućih preporuka. Oni se stalno ažuriraju, a donose se i novi, naročito za one parametre za koje nedostaju. Ovaj složen i dugotrajan posao uglavnom rade međunarodne organizacije, od kojih su najaktivnije:

- Međunarodna elektrotehnička komisija (*International Electrotechnical Commission*) - **IEC**,
- Evropski komitet za elektrotehničku standardizaciju (*Comite Europeen de Norme Electriques*) – **CENELEC**,
- Institut inženjera elektrotehnike i elektronike (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) - **IEEE**,
- Međunarodna konferencija za velike električne mreže (*Conseil International des Grands Réseaux Électriques*) - **CIGRE**,
- Međunarodna konferencija za distributivne mreže (*Conference International de Reasaux Electrique Distribution*) – **CIREL**,
- Međunarodna unija proizvođača i distributera električne energije – **UNIPED**.

Tabela 4.1 - Podela po vrsti deformacije napona.

I. Deformacije usled spoljnih atmosferskih uticaja
1. Naponski impulsi ("surges")
2. Oscilacije napona
II. Deformacije u prelaznim stanjima sistema:
3. Propadi napona ("sags", "dips")
4. Poskoci napona ("swells")
5. Kratke beznaponske pause
6. Podnaponi
7. Prenaponi
8. Beznaponske pause
III. Deformacije u ustaljenom stanju:
9. Viši harmonici
10. Flicker
11. Urezi (rupe) napona ("notches") (засеци)
12. Šum

U nastavku će biti predstavljeni samo glavni dokumenti, koji se sveobuhvatnije bave kvalitetom električne energije, dok će o standardima ili preporukama, koji se odnose na pojedinačne parametre, biti napisano u poglavljima, koja tretiraju te parametre.

4.1. IEC STANDARD SERIJE 61000

Međunarodna elektrotehnička komisija (IEC) osnovana je 1906. godine i sačinjavaju je nacionalni komiteti iz 43 zemlje, koje obuhvataju 80% svetskog stanovništva i koriste 95% svetske potrošnje električne energije. Ona probleme vezane za kvalitet napona razmatra preko svog tehničkog komiteta TC 77 - "Elektromagnetska kompatibilnost između električne opreme uključujući mrežu" još od 1972. i preko TC 22 – "Energetska elektronika".

Više radnih grupa i pod-komiteta se bavilo ovim problemom, tako da se rezultati javljaju u više publikacija. Prvi standard se pojavio 1982. godine - IEC Publikacija 555: "Smetnje u mreži izazvane električnim aparatima koji se primenjuju u domaćinstvu i sličnim uređajima" [2]. Razvojem problematike i povećanjem broja dokumenata, pojavila se potreba za prenumeracijom. 1990. godine postojeća dokumenta su prenumerisana i oformljena je nova serija standarda -

IEC 1000, koji su nazvani *Elektromagnetna kompatibilnost (EMC)*. Nešto kasnije ova serija označena je sa IEC 61000, zbog usklađivanja sa evropskim EN standardima, koje izdaje CENELEC.

IEC 61000 je serija standarda, koja se naziva *Elektromagnetna kompatibilnost (EMC)*. Ona obuhvataju kompletnu problematiku EMC – kondukovane smetnje, smetnje zračenjem, električna i magnetna polja, elektrostatička pražnjenja i impulsne nuklearne elektromagnetne smetnje i izdaje se sukcesivno (do sada još nisu izdati svi planirani standardi, mada su neki doživeli i više izdanja) [3].

U sklopu ove serije standarda, kao kondukovane smetnje, su pojave vezane za kvalitet električne energije – harmonici, varijacije napona, propadi napona i sl. IEC 61000 serija je podeljena u 9 delova, od kojih su 6 aktivna (postoje pojedinačni standardi), a 3 jos nemaju konkretne dokumente. Svaki deo je podeljen u sekcije, koje obrađuju pojedinačne probleme:

- **Deo 1 – Opšte:** Data je terminologija, definicije i sl. (oznaka 61000-1-x)
- **Deo 2 – Okolina:** Obraduje karakteristike okoline u kojoj uređaj ili oprema biti korišćeni (oznaka 61000-2-x)
- **Deo 3 – Limiti:** Definisani su limiti za dozvoljene vrednosti izobličenja, koja su izazvana uređajima ili opremom priključenom na mrežu. Ovi standardi su ranije nosili oznaku 555 (na primer: standard IEC 555-1 je sad IEC 61000-3-1).
- **Deo 4 – Tehnike ispitivanja i merenja:** Daje detaljna uputstva za postupak merenja (merna oprema) i ispitivanja da bi se obezbedila saglasnost sa ostalim delovima standarda. (oznaka 61000-4-x)
- **Deo 5 – Montaža i tehnike otklanjanja:** Ova grupa standarda je napisana da definiše uputstva za primenu opreme za rešavanje problema kvaliteta električne energije, kao što su filteri, uređaji za podešavanje kvaliteta (*power conditioner*), sprečavanje impulsnih prenapona (*surge suppressors*) (oznaka 61000-5-x)
- **Deo 6 – Generični standard:** Definišu se nivoi imuniteta opreme u opštim kategorijama ili za specifične tipove opreme (oznaka 61000-6-x).

Do sada je objavljeno 157 IEC 61000 publikacija na engleskom ili španskom jeziku, od kojih se 38 odnose na kvalitet napona ili struje, dok je 29 publikacija u pripremi. Od ovih 30 se direktno odnose na kvalitet električne energije, od kojih su neki navedeni u tabeli 4.2, klasifikovani po vrsti potrošača (mreže) na koje se odnose.

Jedan od najznačajnijih dokumenata, vezan za definisanje graničnih vrednosti parametara kvaliteta električne energije, je standard 61000-2-4 [4], koji daje nivo kompatibilnosti za tri klase elektromagnetske okoline: Klasa 1 – Osetljivi potrošači, Klasa 2 – Sabirnica (PCC - points of common coupling) prema javnoj mreži i Klasa 3 – Industrijske mreže. U tabeli 4.3 prikazani su preporučeni nivoi kompatibilnosti za najvažnije parametre kvaliteta.

Tabela 4.2 – Pregled IEC standarda po vrstama potrošača (mreže)

Tip potrošača (mreže)	Standard	Parametar kvaliteta električne energije
Stambene zone	IEC 61000-3-2 (ranije IEC555-2)	Harmonici struje
	IEC 61000-6-3	Radio frekventne smetnje
	IEC 61000-3-3	Fluktuacija napona i fliker
	IEC 61000-6-1	Propadi napona
	IEC 61000-4-11	Propadi i kratkotrajni prekidi
Mala i srednja preduzeća	IEC 61000-3-2	Harmonici struje
	IEC 61000-3-4	Harmonici za uređaje sa $I > 16$ A/fazi
	IEC 61000-6-4	Radio frekventne smetnje
	IEC 61000-3-3	Fluktuacija napona i fliker
	IEC 61000-6-1	Propadi napona
	IEC 61000-4-11	Propadi i kratkotrajni prekidi
Industrija	IEC 61000-3-2	Harmonici struje od pojedinačnih uređaja
	IEC 61000-3-6	Limiti za harmonike SN i VN mreža
	IEC 61000-3-7	Limiti za fluktuacije napona SN i VN mreža
	IEC 61000-6-4	Radio frekventne smetnje
	IEC 61000-3-5	Fluktuacija napona i fliker

Tabela 4.3 – Preporučeni nivoi kompatibilnosti za izobličenje napona po IEC 61000-2-4

Poremećaj	Klasa 1	Klasa 2	Klasa 3
Varijacija napona u odnosu na nominalni $\Delta U_{eff}/U_{nom}$	$\pm 8\%$	$\pm 10\%$	+10% do – 15%
Propad napona $U_{eff}/U_{nom} 100 [\%]$ Δt (polu-perioda)	10% do 100% 1	10% do 100% 1 - 300	10% do 100% 1 - 300
Kratkotrajni prekidi [s]	Ni jedan	Ne primenjuje se	≤ 60
Nesimetrija napona U_{neg}/U_{pos}	2%	2%	3%
Harmonici - THDU [%]	5%	8%	10%
Odstupanje frekvencije - $\Delta f/f_{nom}$	$\pm 1\%$	$\pm 1\%$	$\pm 2\%$

4.2. CENELEC - EN 50160

Evropski komitet za elektrotehničku standardizaciju (CENELEC), koji sada sačinjavaju 16 zemalja, zapadne Evrope je osnovan 1973 godine umesto slične organizacije CENELCOM. Prvi standard za aparate za domaćinstvo i slične uređaje je izdat već 1975. godine - EN 50006 [5]. Sadržaj ovog evropskog standarda je poslužio kao osnova za kasniji IEC standard - Publikaciju 555-2. Tokom devedesetih godina došlo je do usklađivanja sa IEC-om, tako da standardi vezani za kvalitet imaju oznaku EN 61000.

Evropski standard o kvalitetu električne energije EN 50160 potiče iz 1994 godine kada ga je CENELEC prihvatio i dao u postupak usvajanja kao nacionalnog standarda [6]. On je 1995 usvojen u svim tadašnjim zemljama Evropske unije, a predviđen je da ga usvoje i sve nove članice do kraja 2004. god. Osnovu ovog standarda čine dokumenta iz britanskih standarda BS 50160, koja su tokom vremena ažurirana i prilagođena evropskim uslovima. S obzirom na nameru Srbije i Crne Gore i Makedonije ka pridruživanju Evropskoj uniji, postoji potreba za upoznavanjem sa tehničkom regulativom u EU vezanom za kvalitet električne energije.

Standard EN 50160 daje definicije i opisuje bitne osobine distributivnog napona na mestu predaje potrošaču u javnim niskonaponskim (NN) i srednjenaponskim (SN) mrežama pri normalnim pogonskim uslovima. Cilj standarda je da se utvrde karakteristike distributivnog napona s obzirom na frekvenciju, veličinu, talasni oblik i simetriju trofaznog napona. U tabeli 4.4 su sumirane numeričke vrednosti parametara za NN mreže.

Tabela 4.4 - Parametri NN mreže po EN 50160 [6]

Karakteristika	Granične vrednosti	Interval merenja	Period posmatranja	Procenat prihvatanja
Frekvencija (Hz)	49,5 ÷ 50,5 47 ÷ 52	10 s	7 dana	95% 100%
Napon	230V ± 10%	10 min	7 dana	95%
Propadi napona (≤ 1 min)	10 ÷ 1000 puta god. < 85% Un	10 ms	1 godina	100%
Kratki prekidi (≤ 3 min)	10 ÷ 100 puta god. < 1% Un	10 ms	1 godina	100%
Prekidi (> 3 min)	10 ÷ 50 puta god. < 1% Un	10 ms	1 godina	100%
Povremeni prenaponi	U < 1,5 kV	10 ms	/	100%
Tranzijentni prenaponi	U < 6 kV	/	/	100%
Nesimetrija	2 % povremeno 3%	10 min	7 dana	95%
Viši harmonici	THD < 8%	10 min	7 dana	95%

4.3. IEEE STANDARDI O KVALITETU EL. ENERGIJE

Institut inženjera elektrotehnike i elektronike (IEEE), je američko udruženje koje okuplja inženjere iz celog sveta, a pored ostalih aktivnosti preporučuje standarde iz mnogih oblasti elektrotehnike. Ono utiče na međunarodnu standardizaciju preko američkog nacionalnog komiteta za IEC i preko Američkog nacionalnog instituta za standardizaciju (ANSI) za ISO.

Problemi kvaliteta električne energije se u ovom udruženju razmatraju dugi niz godina i to preko ciljanih projekata i posebnih radnih grupa. Sve oblasti kvaliteta su obuhvaćene, ali je najviše urađeno u oblasti viših harmonika, merenja i praćenja, kao i propada napona (IEEE Standard 519, IEEE Standard 1159) [7,8]. Međutim, značajni rezultati su i iz oblasti uzemljenja, telekomunikacione opreme, pouzdanosti i dr., koje takođe utiču na kvalitet. U tabeli 4.5 dat je spisak IEEE standarda po raznim temama (aspektima) kvaliteta el. energije.

Tabela 4.5 – IEEE standardi vezani za kvalitet električne energije

TEMATIKA	RELEVANTNI IEEE STANDARD				
Definicije param. kvaliteta el.ener.	IEEE 1433				
Uzemljenje	IEEE Std. 446	IEEE Std. 141	IEEE Std. 142	IEEE Std. P1100	
Napajanje	IEEE Std. 141	IEEE Std. 446	IEEE Std. 1100	IEEE Std. 1250	
Zaštita od udarnih prenapona	IEEE C62 Ser.	IEEE Std. 141	IEEE Std. 142		
Propadi napona	IEEE P1564				
Harmonici	IEEE Std. C57.110	IEEE Std. 519	IEEE P519a	IEEE Std. 929	IEEE Std. 1001
Fliker	IEEE P1453				
Smetnje i metode merenja i praćenja	IEEE Std. 1100	IEEE Std. 1159	IEEE Std. 1250		
Oprema za otklanjanje	IEEE Std. 446	IEEE Std. 1035	IEEE Std. 1100	IEEE Std. 1250	
Telekomunikaciona oprema	IEEE Std. 487	IEEE Std. 1100			
Šum	IEEE Std. 518	IEEE Std. 1050			
Veza sa snabdevačem	IEEE Std. 446	IEEE Std. 929	IEEE Std. 1001	IEEE Std. 1035	
Praćenje	IEEE Std. 1100	IEEE Std. 1159			
Imunitet potrošača	IEEE Std. 141	IEEE Std. 446	IEEE Std. 1100	IEEE Std. 1159	IEEE P1346
Pouzdanost sistema	IEEE Std. 493				

4.4. LITERATURA

1. V.Katić: “*Kvalitet električne energije – viši harmonici*”, Monografija, Univerzitet u Novom Sadu - Fakultet tehničkih nauka, Edicija Tehničke nauke - Monografije, Br. 6, Novi Sad, 2002.
2. IEC: "Disturbances in supply system caused by household appliances and similar electrical equipment - Part 1: Definitions, Part 2: Harmonics, Part 3: Voltage fluctuations", Publication 555 (555-1, 555-2, 555-3), Geneva, 1982.
3. <http://www.iec.com>
4. IEC Standard 61000-2-4: “*Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2-4: Environment - Compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances*”, International Standard, IEC, Geneva, 2002.
5. European Standard EN 50006: "The Limitation of disturbances in electric supply network caused by domestic and similar appliances equipped with electronic devices", European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC), Brussels, May 1975.
6. EN 50160, “*Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems*”, 1999.
7. IEEE Standard 519-1992: “*IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*”, IEEE, New York, 1993.
8. IEEE Std. 1159-1995: “*IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*”, IEEE, New York, 1995.

5. VIŠI HARMONICI

Krajem pedesetih i tokom šezdesetih godina došlo je do naglog razvoja snažnih poluprovodničkih komponenata (tiristori i snažni bipolarni tranzistori). Pojavljuju se poluprovodnički energetskelektroonski pretvarači, koji u potpunosti potiskuju one sa vakuumskim elementima. Većinu energetskih elektronskih pretvarača čine oni koji se vezuju na naizmeničnu mrežu (ispravljači, mrežom komutirani invertori, regulatori naizmeničnog napona, ciklokonvertori). Zbog svoje prekidačke prirode rada oni predstavljaju nelinearne potrošače za mrežu i izazivaju pojavu izobličenja talasnog oblika struje i napona [1].

Pokazuje se da se matematičkom analizom izobličenih talasnih oblika, korišćenjem Furijeovih redova, mogu ovi izobličeni oblici predstaviti nizom sinusnih funkcija različitih frekvencija. Ove frekvencije su celobrojni umnožak osnovne (dominantne) frekvencije analiziranog signala i nazivaju se viši harmonici [2].

Danas se poluprovodnički energetskelektroonski pretvarači izrađuju za snage od nekoliko desetina vata pa do reda megavata. Smatra se da je 2000 godine u razvijenim zemljama čak 50% potrošača bilo opremljeno ovim uređajima, sa tendencijom daljeg povećanja. Pored elektro-lučnih i indukcionih peći, sijalica na bazi pražnjenja u gasovima, zasićenih električnih mašina i drugih klasičnih izvora, oni postaju značajan izvor viših harmonika u mreži.

Komponente energetskog sistema, kao i potrošači koji se priključuju na njega, podrazumevaju sinusne oblike napona i struje, pa svaka pojava viših harmonika donosi negativne efekte. Poznati su brojni negativni efekti, od kojih su najvažniji:

1. Pojava rezonancije u mreži,
2. Uticaj na kondenzatorske baterije,
3. Uticaj na elemente za zaštitu,
4. Uticaj na tačnost pokazivanja standardnih mernih instrumenata,
5. Dodatni gubici u električnim mašinama,
6. Interferencija sa telekomunikacionim signalima.

Ukupna i individualna harmonijska distorzija napona ili struje su faktori kojima se vrednuju viši harmonici. Individualna harmonijska distorzija (HD_n) se definiše kao odnos efektivnih vrednosti n-tog harmonika i osnovnog (50 Hz ili 60 Hz), gde je n red harmonika. Ona se izražava u procentima:

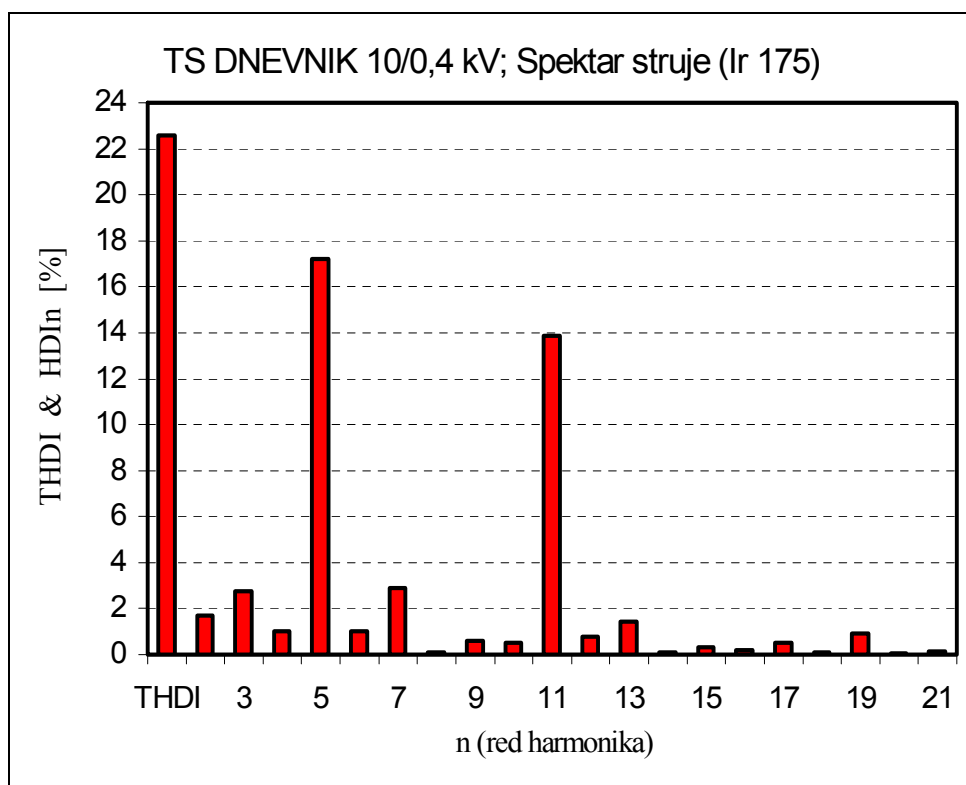
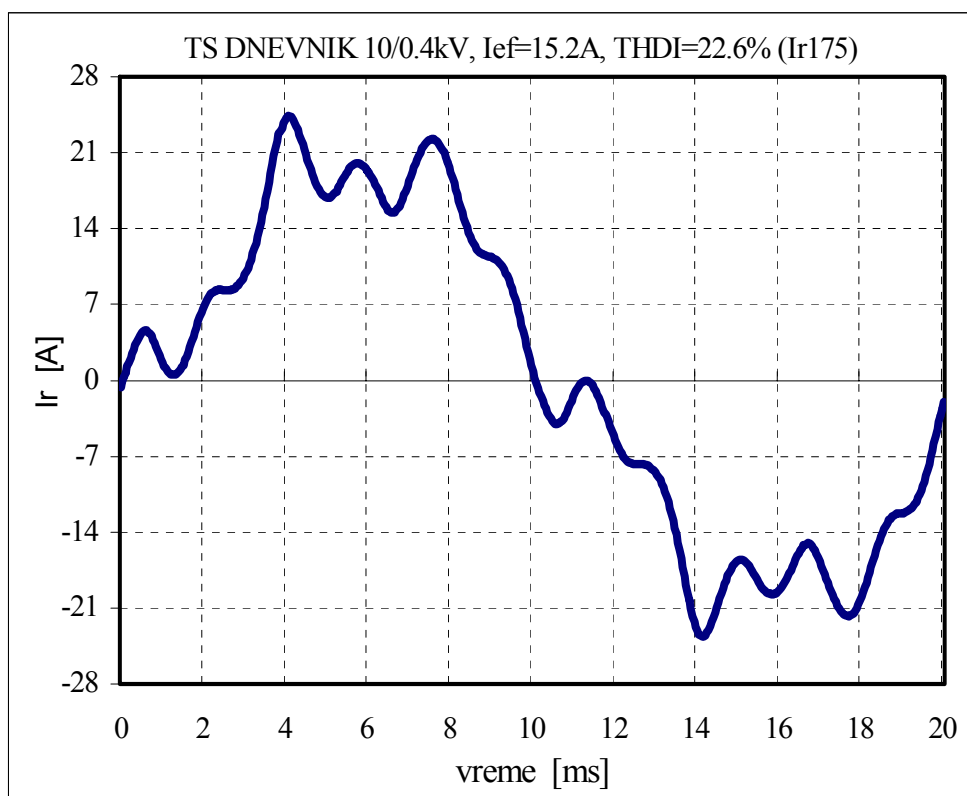
$$HDU_n = (U_n / U_1) \times 100 (\%) ; \quad HDI_n = (I_n / I_1) \times 100 (\%) \quad (5.1)$$

Ukupna harmonijska distorzija (THD) se definiše kao kvadratni koren odnosa sume kvadrata efektivnih vrednosti pojedinačnih harmonijskih komponenti i efektivne vrednosti fundamentalnog harmonika i takođe se izražava u procentima:

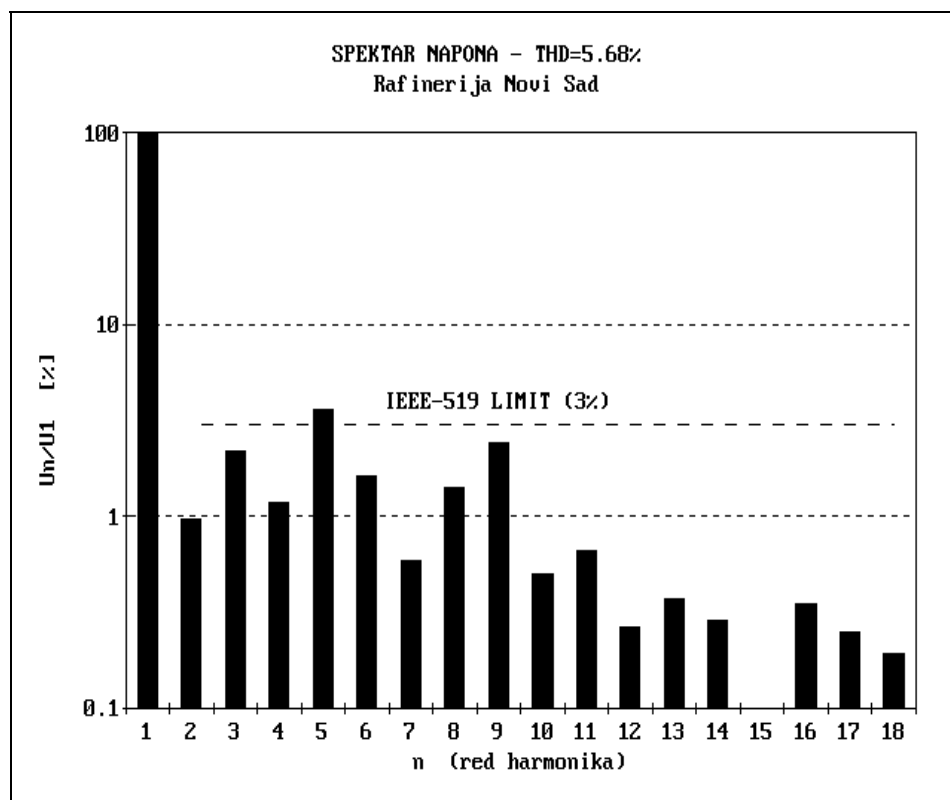
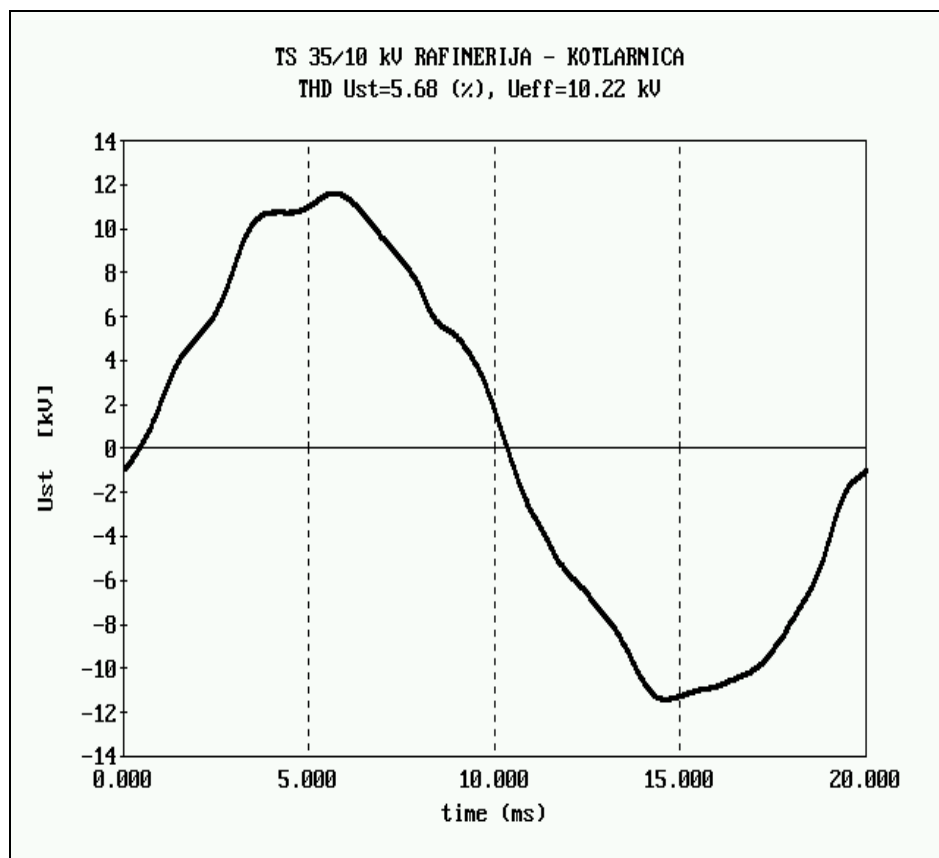
$$THDI = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 / I_1^2} \cdot 100 \text{ (\%)}; THDU = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2 / U_1^2} \cdot 100 \text{ (\%)} \quad (5.2)$$

Uobičajeno je da se za kvalitetan rad uređaja podrazumeva da je **nivo ukupne harmonijske distorzije napona** napajanja **manji od 5 - 8 %**, a **nivo ukupne harmonijske distorzije struje** **manji od 5 - 20 %** u zavisnosti od snage kratkog spoja mreže i snage samog potrošača [3].

Kao primer mogućih pojava viših harmonika u mreži, na slikama 5.1 i 5.2 su prikazani primeri izobličenih talasnih oblika struje i napona snimljenih u mreži “EPS - JP Elektrovojvodina”, Novi Sad, kao i njihov izračunati spektar [4]. Struja je snimljena na 0,4 kV sabirnici TS Dnevnik 10/0,4 kV sa koje se napaja poslovna zgrada štamparsko-izdavačkog preduzeća “Dnevnik”, Novi Sad (slika 5.1), dok je napon snimljen na 10 kV izvodu sa kog se napaja deo postrojenja u “NIS-Rafinerija nafte Novi Sad”, Novi Sad (slika 5.2). Može se uočiti znatno odstupanje od sinustnog talasnog oblika, kao i prisustvo viših harmonika, koji su po amplitudi iznad dopuštenih nivoa definisanih u standardu IEEE-519 [5].



Slika 5.1 - Talasni oblik struje i njen spektar na 0,4 kV izvodu u TS DNEVNIK, Novi Sad.



Slika 5.2 - Talasni oblik napona i njegov spektar na 10 kV izvodu u Rafineriji Novi Sad.

5.1. TEORIJSKA OBRADA VIŠIH HARMONIKA

Analiza viših harmonika bazira na postulatu francuskog matematičara J.B.J. Fourier-a (1768-1830) da se bilo koja kontinualna funkcija sa periodom ponavljanja T može predstaviti sumom osnovne sinusoidalne komponente i niza harmonijskih sinusoidalnih komponenti višeg reda na frekvencijama, koje su celobrojni umnožak osnovne frekvencije [2]. Harmonijska analiza je proces izračunavanja veličine i faze osnovnog i harmonika višeg reda.

5.1.1. Furijeova transformacija

Za funkciju $x(t)$ se kaže da je **periodična** ako je definisana za sve realne vrednosti t i ako postoji neki pozitivni broj T takav da je:

$$x(t + kT) = x(t) \quad (5.3)$$

gde je k bilo koji ceo broj, a T perioda funkcije.

Periodična funkcija $x(t)$ se može razviti u red - Furijeov red tj. predstaviti izrazom:

$$x(t) = \frac{a_o}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos\left(n \frac{2\pi t}{T}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin\left(n \frac{2\pi t}{T}\right) \quad (5.4)$$

gde su a_o , a_n i b_n **koeficijenti niza** - Furijeovi koeficijenti definisani sa:

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cos\left(n \frac{2\pi t}{T}\right) dt \quad (5.5)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \sin\left(n \frac{2\pi t}{T}\right) dt \quad (5.6)$$

Prvi član Furijeovog niza, **nulti harmonik** $X_0 = a_o/2$ se dobija iz (5.5) za $n = 0$ i naziva se **srednja vrednost funkcije**:

$$X_o = \frac{a_o}{2} = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) dt \quad (5.7)$$

Izrazi za Furijeove koeficijente se često daju preko ugaone frekvencije ω :

$$WDFT = \sum_n x[n] w[n-m] e^{-j \frac{2\pi kn}{N}} \quad (5.8)$$

$$a_n = \frac{2}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} x(\omega t) \cos(n\omega t) d(\omega t) \quad (5.9)$$

$$b_n = \frac{2}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} x(\omega t) \cdot \sin(n\omega t) d(\omega t)$$

Furijev red se može napisati i u obliku sume harmonika:

$$x(t) = X_o + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} X_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (5.11)$$

gde su X_n i φ_n , efektivna vrednost i faza n -tog harmonika i definisani su sa:

$$X_n = \sqrt{\frac{a_n^2 + b_n^2}{2}}, \quad \varphi_n = \arctg \frac{a_n}{b_n} \quad (5.12)$$

Furijev red se može predstaviti i u kompleksnom obliku [6]. Sad se amplituda n -te komponente reda dobija kao:

$$X(f_n) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) e^{-j2\pi f_n t} dt, \quad f_n = nf \quad (5.13)$$

a originalna vremenska funkcija je:

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} X(f_n) e^{j2\pi f_n t} dt, \quad f_{-n} = -f_n$$

Kada se Furijev razvoj u red primenjuje na kontinualni, periodični signal u vremenskom domenu, rezultat je niz diskretnih komponenti u frekventnom domenu. Ako se dozvoli da se period integracije proširiti do beskonačnosti, razmak između harmonijskih frekvencija teži nuli i funkcija $X(f)$, data izrazom (5.13), postaje kontinualna i beskonačna funkcija frekvencije:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j2\pi f t} dt \quad (5.15)$$

Izraz za funkciju u vremenskom domenu postaje:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f) e^{j2\pi f t} df \quad (5.16)$$

Izraz (5.15) i (5.16) formiraju Furijev transformacioni par, odnosno definišu **Furijeovu transformaciju** (*Fourier Transform - FT*), s tim da (5.15) definiše **direktnu transformaciju**, a (5.16) **inverznu transformaciju**.

5.1.2. Diskretna Furijeova transformacija

U savremenim elektronskim mernim sistemima, **analogni signali se pretvaraju u digitalne** i zatim se vrši merenje i njihova obrada. Princip analogno-digitalne (A/D) konverzije zasniva se na **teoremi odabiranja (Šenonova teorema)**, koja kaže da se svaka analogna veličina može predstaviti nizom odbiraka, s tim da frekvencija odabiranja (sempliranja) ($f_s = 1/T_s$) mora biti **dva puta veća** od najveće frekvencije u signalu, tkz. granične frekvencije : $f_s = 2f_g$. Tada se kontinualni signal može predstaviti sa nizom odbiraka $x^d(t)$:

$$x^d(t) = x(t) \cdot D(t) = x(t) \cdot \sum_{-\infty}^{+\infty} \delta(t - nT_s) \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (5.17)$$

gde su $\delta(t - nT_s)$, $n=0, 1, 2, \dots, N-1$ Dirakovi impulsi, kojima se vrši odabiranje. Kontinualna funkcija $x(t)$ sad postoji samo u trenucima nT_s i može napisati kao diskretna funkcija:

$$x[n] = x(nT_s); \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1. \quad (5.18)$$

Kako se funkcija u vremenskom domenu sastoji od više diskretnih komponenti (N odbiraka), kao i njen spektar, Furijeov transformacioni par se sastoji od diskretnih komponenti i naziva se **Diskretna Furijeova transformacija (Discrete Fourier Transform - DFT)**. Sad se Diskretna Furijeova transformacija signala $x[n]$ dobija na sledeći način:

$$DFT = X[k] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j \frac{2\pi kn}{N}} \quad (5.19)$$

Inverzna diskretna Furijeova transformacija je:

$$x[n] = \sum_{k=0}^{N-1} X[k] e^{j \frac{2\pi kn}{N}} \quad (5.20)$$

gde je N ukupan broj odbiraka u periodu, a k red harmonika, s tim da se i vremenska funkcija i njen spektar smatraju periodičnim. Pri tome je $x[n]$ - n -ti odbirak, a $X[k]$ - k -ti harmonik. U ovakvom obliku, Furijerova transformacija je najpogodnija za numeričko rešavanje.

5.1.3. Brza Furijeova transformacija

U primeni DFT pokazuje se da **izračunavanje spektra funkcije** po jednačini (5.19) zahteva rešavanje sledeće matrice:

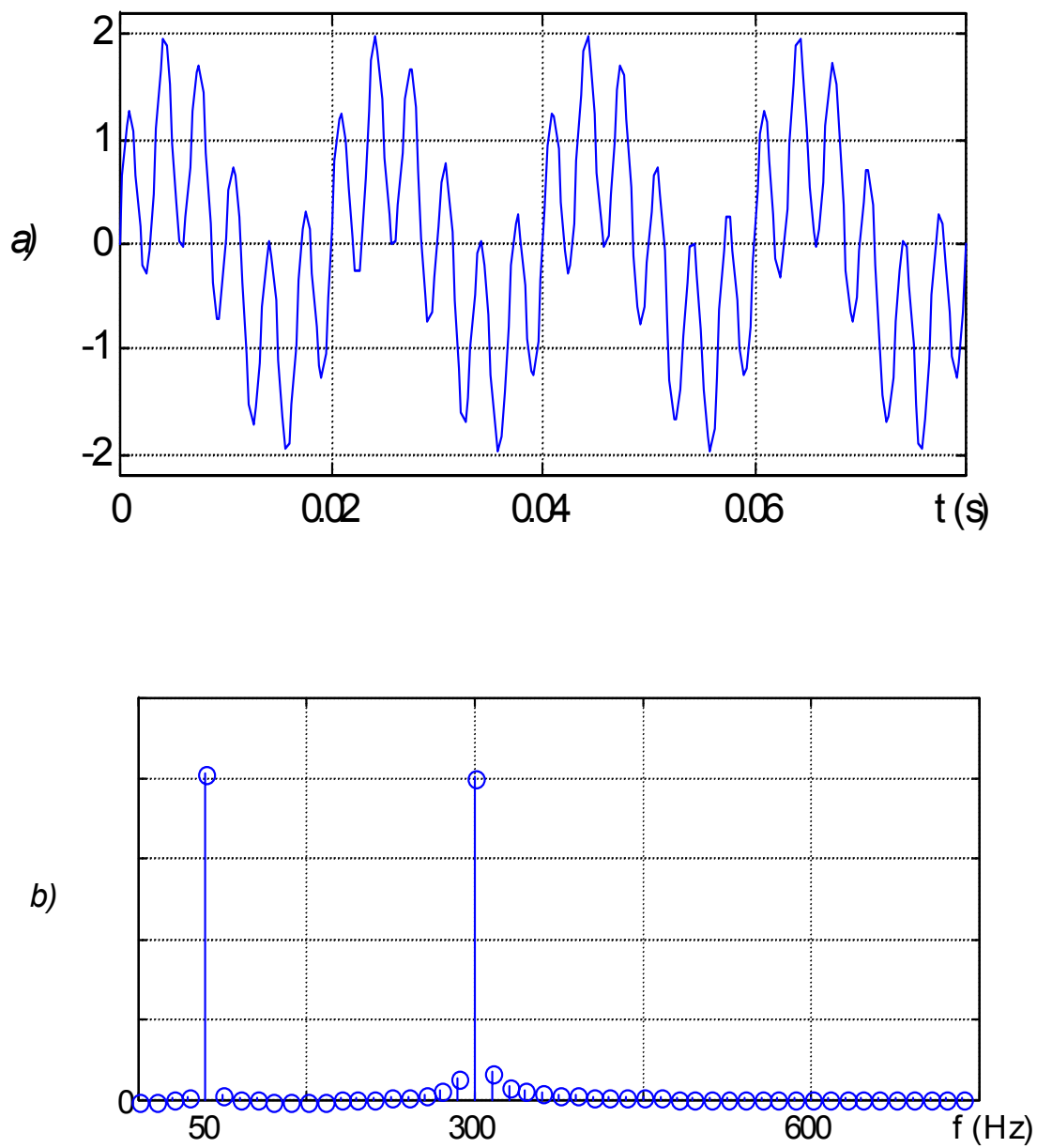
$$[X[k]] = \frac{1}{N} [W^{kn}] \cdot [x[n]] ; \quad (5.21)$$
$$k = 0 \dots N-1, \quad n = 0 \dots N-1, \quad W = e^{-j2\pi/N}$$

gde je $[X[k]]$ vektor, koji predstavlja N harmonika u frekventnom domenu (N harmonika spektra), $[W^{kn}]$ matrica eksponencijalnih komponentata reda $k \times n$, a $[x[n]]$ vektor, koji reprezentuje N odbiraka funkcije u vremenskom domenu.

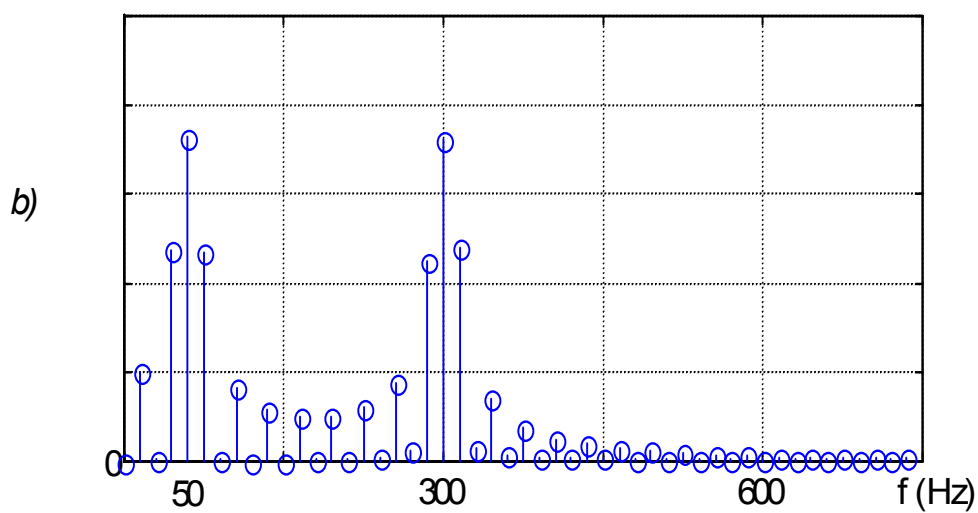
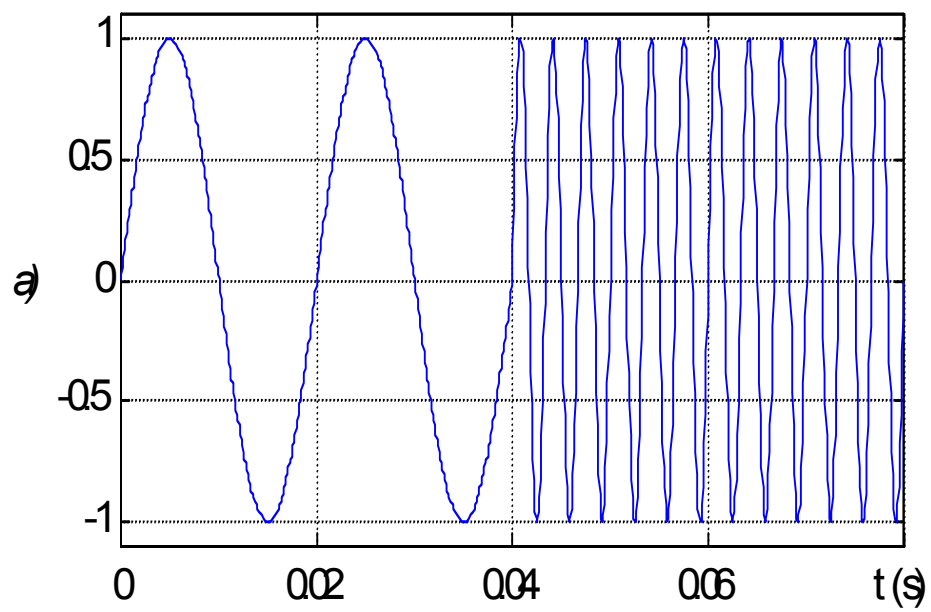
Računanje N harmonika iz N odbiraka zahteva N^2 kompleksnih operacija množenja. U savremenim zahtevima za trenutnu (on-line) frekventnu analizu signala, gde je N često reda nekoliko stotina, vreme procesiranja može da predstavlja ograničavajući faktor.

Posmatranjem matrice $[W^{kn}]$ uočeno je da se ona može transformisati tako da se postigne jednakost pojedinih komponentata: $W^{N/2} = -W^0$, $W^{N+2/2} = -W^1$ itd. Uslov je da broj odbiraka bude neki broj iz niza 2^M gde je M prirodan broj. **U tom slučaju se reducira broj kompleksnih operacija na $N/2 \cdot \log_2 N$.** Ovaj tip Furijeove transformacije, koji koristi gore pomenutu tehniku naziva se **Brza Furijeova transformacija** (*Fast Fourier Transform – FFT*). Prednost FFT-a se može pokazati primerom: Ako je $N=128$, tada je u slučaju DFT potrebno izvršiti $N^2 = 16384$ kompleksnih operacija, dok u slučaju FFT $N/2 \cdot \log_2 N = 448$ kompleksnih operacija, što je 36,6 puta manje, odnosno brže.

Međutim u primeni FT, odnosno DFT javljaju se određeni **problemi**, koji otežavaju razumevanje funkcije. Na slikama 5.3 i 5.4 su predstavljena dva signala koji imaju sličan frekventni spektar, oba imaju iste frekvencije. Prvi signal je zbir dva signala različitih frekvencija, dok drugi signal menja frekvenciju. Iz definicije (5.3) – (5.12), kao i sa slika se vidi da Furijeova transformacija daje tačan frekventni spektar signala, ali ne govori gde su te frekvencije locirane u vremenu. U otklanjanju ovog problema određena poboljšanja daje prozorska Furijeova transformacija.



Slika 5.3 - Stacionaran signal (a) i njegov frekventni spektar (b)



Slika 5.4 - Nestacionaran signal (a) i njegov frekventni spektar (b)

5.1.4. Prozorska Furijeova transformacija

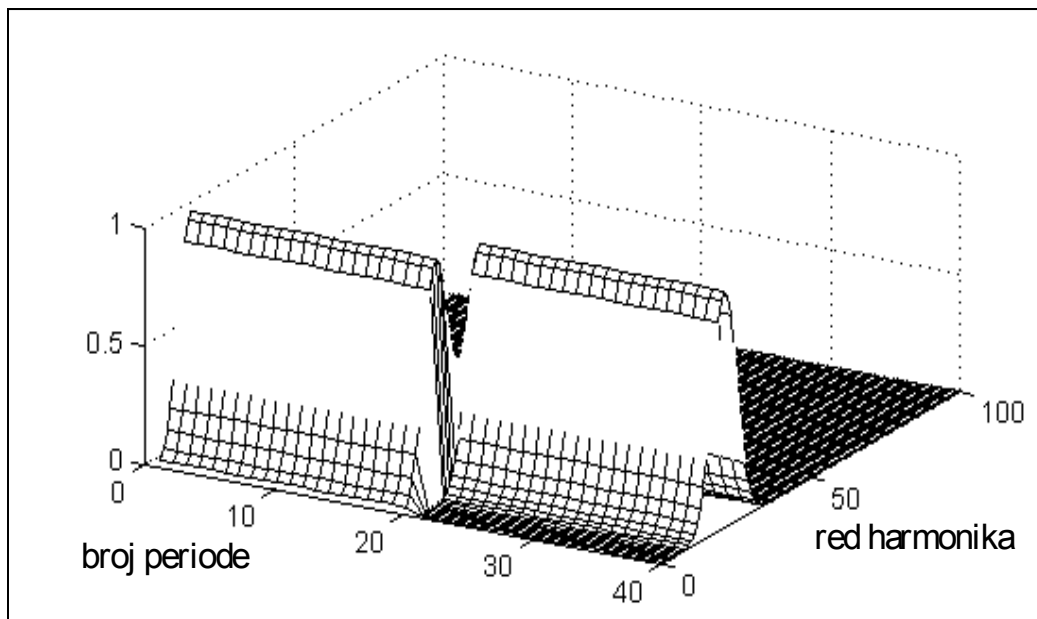
Zbog već pomenutih nedostataka Furijeove transformacije za analizu signala promenljivih sa vremenom, razvijena je Prozorska Furijeova transformacija (*Windowed Fourier Transform - WFT* ili *Short-Time Fourier Transform*). **Prozorska Furijeova transformacija** je slična običnoj Furijeovoj transformaciji sa tom razlikom što se ulazni signal $x(t)$ množi sa prozorskom funkcijom $w(t)$ čija se pozicija translira u vremenu za iznos τ .

$$WFT(f, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)w(t - \tau)e^{-j2\pi ft} dt \quad (5.22)$$

ili u diskretnoj varijanti Diskretna prozorska Furijeova transformacija (*Windowed Discrete Fourier Transform – WDFT*):

$$WDFT = \sum_n x[n]w[n - m]e^{-j\frac{2\pi kn}{N}} \quad (5.23)$$

Za svaki prozor $w_{m_0} = w[n - m_0]$, $WDFT$ daje skup kompleksnih brojeva $WDFT[k, m_0]$, $k=0,1,...,N-1$, čije su amplitude jednake diskretnim frekvencijama, koje se sadrže u ulaznom signalu $x[n]$. Najjednostavniji prozor je pravougaoni, koji daje vrednost 1 za celu širinu prozora. Poznati su i drugi prozori: trougaoni, kvadratni kosinusni ili Hanning-ov, Hamming-ov, Gauosov, Dolph-Chebyshev-ljev i dr. [2,3,6]. Prethodni primer (slika 5.4) obrađen Prozorskom Furijeovom transformacijom dobija izgled kao na slici 5.5. Vidi se da WFT prati vremensku promenu frekvencije. Međutim problem može da nastane ako se određene frekvencije menjaju i u samom prozoru.



Slika 5.5 - Primer sa slike 5.4. i WFT.

5.1.5. Greške Furijeove transformacije

Tokom procedure A/D konverzije i FFT obrade realnog signala može doći do pojave grešaka, koje mogu da utiču na tačnost izračunatih rezultata (može se očekivati greška oko 5%). Izvori tih grešaka su :

1. proces odabiranja i kvantizacije
2. dužina reči A/D konvertora
3. pojava lažnih frekvencija (aliasing)
4. curenje spektra (spectral leakage)

Proces odabiranja i kvantizacije je vezan za konverziju analognog signala u digitalni. Odabiranje može biti sinhronizovano ili nesinhronizovano tj. frekvencija odabiranja jeste ili nije celobrojni umnožak frekvencije osnovnog harmonika, dok kvantizacija može biti uniformna (svi kvantovi su jednake vrednosti) ili neuniformna. Na grešku utiče i broj odbiraka, kao i broj bita sa kojima se vrši kodovanje kvantizovanog odbirka. Izborom A/D konvertora, koji ima mogućnost uzimanja više od 128 odbiraka, kao i rad sa bar 8 bita, ova greška se može zanemariti.

Dužina reči A/D konvertora je značajna kod talasnih oblika bogatih harmonicima. U tom slučaju, za dužine manje od 10 bita, greška postaje veća od 0,5%. Danas, svi moderni A/D konvertori rade sa rečima od 12 bita.

Pojava lažnih frekvencija je vezana za proces FFT obrade i posledica je nepoštovanja teorema odabiranja. Taj problem je naročito istaknut kod signala sa visokim sadržajem harmonika. Manifestuje se pojavom visokofrekventnih komponenti (lažnih) na mestu niskofrekventnih, zbog njihovog preklapanja ako granične učestanosti f_g . Ovo je posebno nezgodno kod merenja viših harmonika u mreži, jer može pogrešno da navede na primenu skupih mera za otklanjanje viših harmonika. Greška se može smanjiti prethodnim propuštanjem signala kroz NF filter (usporava obradu) ili povećanjem broja odbiraka (zahteva veći broj operacija FFT-a).

Curenje spektra je posledica prozoriranja signala pre FFT obrade, odnosno uzimanja uzorka signala sa necelobrojnim brojem perioda za koji FFT program pretpostavlja da se periodično ponavlja. Adekvatnim izborom prozorske funkcije ova se greška može značajno smanjiti.

Poseban problem kod primene Furijeove transformacije predstavlja osnovna pretpostavka transformacije da je signal periodičan u vremenu. Pri analizi tranzijentnih pojava u mreži ili prelaznih procesa

u elektromotornim pogonima talasni oblici signala se brzo menjaju, tako da često **ne postoji ni polutalasna simetrija** (jednakost oblika, apsolutnih vrednosti, pozitivne i negativne periode). Tada je složeno dobiti informaciju o dinamičkoj promeni spektra, a i tačnost merenja je mala. Iz tog razloga postoji potreba da se dalje istražuju i pronalaze i druge, adekvatnije transformacije, odnosno tehnike obrade signala.

5.2. Osnovne formule harmonijske analize

Kod izražavanja harmonijskih veličina veoma bitno je da se **standardizuje način iskazivanja**, kao i osnovne formule za **merenje-vrednovanje**. Pojavom interesa za više harmonike i višegodišnjim bavljenjem ovim problemom, razvijeni su **različiti pristupi**, koji su ušli u odgovarajuće **nacionalne standarde**, **tehničke preporuke** ili druge slične **dokumente**.

S druge strane, primena savremenih digitalnih mernih metoda dovodi da se o harmonicima na jednom mestu (sabirnici, izvodu, priključku ili sl.) **dobija ogroman broj podataka**, koje je **teško pratiti** a i razumeti njihov značaj korišćenjem standardne terminologije. Iz tog razloga **se** sve više **koriste statistički termini** prilagođeni na određen način prirodi pojave.

5.2.1. Struja i napon

Rezultat Fourier-ove harmonijske analize nekog signala su amplituda (odnosno efektivna vrednost) i faza n -tog harmonika ($n = 2, 3, \dots, \infty$). Tako se neka harmonijski izobličena struja, odnosno napon mogu predstaviti izrazima:

$$i(\omega t) = \sqrt{2}I_1 \sin(\omega t - \phi_1) + \sum_{n=2}^{\infty} \sqrt{2}I_n \sin(n\omega t - \phi_n) \quad (5.24)$$

$$u(\omega t) = \sqrt{2}U_1 \sin(\omega t - \varphi_1) + \sum_{h=2}^{\infty} \sqrt{2}U_h \sin(h\omega t - \varphi_h) \quad (5.25)$$

gde je n - red harmonika struje, h - red harmonika napona, I_n - efektivna vrednost n -tog harmonika struje, U_h - efektivna vrednost h -tog harmonika napona, ϕ_n - fazni stav n -tog harmonika struje i φ_h - fazni stav h -tog harmonika napona.

Efektivna vrednost struje, odnosno napona sa izraženim harmonijskim komponentama je:

$$I_{eff} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} \quad U_{eff} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} U_h^2} \quad (5.26)$$

5.2.2. Fazni stav harmonika

U trofaznim simetričnim sistemima prisustvo viših harmonika se iskazuje i u uticaju na fazni stav. Matematički izraz (5.25) za trofazni napon sad postaje:

$$\begin{aligned} u_{Rh}(\omega t) &= \sqrt{2}U_h \sin(h\omega t - \varphi_h) \\ u_{Sh}(\omega t) &= \sqrt{2}U_h \sin(h\omega t - 2h\pi/3 - \varphi_h) \\ u_{Th}(\omega t) &= \sqrt{2}U_h \sin(h\omega t + 2h\pi/3 - \varphi_h) \end{aligned} \quad (5.27)$$

Iz (5.27) se vidi da harmonici imaju različit fazni stav, odnosno da postoje pozitivni, negativni i harmonici sa nultim faznim stavom. Kratak pregled je dat u tabeli 5.1.

Tabela 5.1 – Fazni stav harmonika u trofaznom simetričnom sistemu.

Red harmonika	1	2	3	4	5	6	7
Fazni Stav	+	–	0	+	–	0	+

Međutim, u nesimetričnim trofaznim sistemima situacija je drugačija i gornja definicija ne važi. Svaki harmonik ima drugačiju fazni stav, pa je analiza mnogo složenija [7].

5.2.3. Snaga

Snaga koju proizvode struje i napon bogati višim harmonicima se dobija iz:

$$\begin{aligned}
p(\omega t) &= u(\omega t) \cdot i(\omega t) = \left[\sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} U_h \sin(h\omega t - \phi_h) \right] \times \\
&\times \left[\sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_n \sin(n\omega t - \phi_n) \right] = \\
&= \sum_{h=n=1}^{\infty} U_h I_h [\cos(\phi_h - \phi_n) - \cos(2h\omega t - \phi_h - \phi_n)] + \\
&+ \sum_{\substack{h \neq n \\ h=1, n=1}}^{\infty} U_h I_n \{ \cos[(h-n)\omega t - \phi_h + \phi_n] - \cos[(h+n)\omega t - \phi_h - \phi_n] \}
\end{aligned} \tag{5.28}$$

Radi jednostavnijeg prikazivanja, neka je $\phi_h = 0$:

$$\begin{aligned}
p(\omega t) &= \sum_{h=n=1}^{\infty} U_h I_h [\cos \phi_h - \cos(2h\omega t - \phi_h)] + \\
&+ \sum_{\substack{h \neq n \\ h=1, n=1}}^{\infty} U_h I_n \{ \cos[(h-n)\omega t + \phi_n] - \cos[(h+n)\omega t - \phi_n] \}
\end{aligned} \tag{5.29}$$

Aktivna snaga, koja se oslobađa na nekom potrošaču je:

$$\begin{aligned}
P &= \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u(\omega t) \cdot i(\omega t) d(\omega t) = \\
&= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left\{ \sum_{h=n=1}^{\infty} U_h I_h [\cos \phi_h - \cos(2h\omega t - \phi_h)] + \right\} d(\omega t) + \\
&+ \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left\{ \sum_{\substack{h \neq n \\ h=1, n=1}}^{\infty} U_h I_n \{ \cos[(h-n)\omega t + \phi_n] - \cos[(h+n)\omega t - \phi_n] \} \right\} d(\omega t)
\end{aligned} \tag{5.30}$$

odnosno:

$$P = \sum_{h=1}^{\infty} P_h = \sum_{h=1}^{\infty} U_h I_h \cos \phi_h$$

Prividna snaga je:

$$\begin{aligned}
S &= U \cdot I = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} U_h^2} \cdot \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} = \sqrt{\sum_{h=n=1}^{\infty} U_h^2 \cdot I_h^2 + \sum_{\substack{h \neq n \\ h=1, n=1}}^{\infty} U_h^2 \cdot I_n^2} = \\
&= \sqrt{\sum_{h=n=1}^{\infty} U_h^2 \cdot I_h^2 \cos^2(\phi_h) + \sum_{h=n=1}^{\infty} U_h^2 \cdot I_h^2 \sin^2(\phi_h) + \sum_{\substack{h \neq n \\ h=1, n=1}}^{\infty} U_h^2 \cdot I_n^2}
\end{aligned} \tag{5.32}$$

Ako se analogno (5.31), a u skladu sa Boudeanu-ovom teorijom [8], definiše ekvivalentna reaktivna snaga u prisustvu harmonika:

$$Q = \sum_{h=1}^{\infty} Q_h = \sum_{h=1}^{\infty} U_h I_h \sin \phi_h$$

dobija se

$$S = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} P_h^2 + \sum_{h=1}^{\infty} Q_h^2 + \sum_{\substack{h \neq n \\ h=1, n=1}}^{\infty} U_h^2 \cdot I_n^2} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} S_h^2 + \sum_{\substack{h \neq n \\ h=1, n=1}}^{\infty} U_h^2 \cdot I_n^2} \quad (5.34)$$

Iz (5.34) može se zaključiti da u slučaju postojanja viših harmonika u mreži, prividna snaga potrošača se može podeliti na deo koji odgovara prividnoj snazi pojedinačnih harmonika i prividnoj snazi međusobnih produkata n-tog i h-tog harmonika. Ta druga komponenta naziva se **snaga distorzije**:

$$D = \sqrt{\sum_{\substack{h \neq n \\ h=1, n=1}}^{\infty} U_h^2 \cdot I_n^2}$$

Sad je prividna snaga data sa:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}$$

Ovakva definicija prividne snage odgovara važećim shvatanjima snage i postavljenim osnovama u [8]. Međutim, prisustvo viših harmonika izaziva poteškoće u fizičkom objašnjenju, naročito o znaku i pravcu prostiranja. Stoga se traže se nova objašnjenja i nude drugačije definicije [9], ali dublje ulaženje u tu problematiku izlazi iz okvira ove monografije.

5.2.4. Faktor snage

U električnim kolima, koja se karakterišu prisustvom viših harmonika u struji i naponu, uobičajena predstava faktora snage kao $\cos \varphi$ nije tačna. Na bazi osnovne definicije faktor snage je iskazan složenijim izrazom:

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{\sum_{h=1}^{\infty} U_h I_h \cos \varphi_h}{\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} U_h^2} \cdot \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}} \quad (5.37)$$

Ako se pretpostavi da su viši harmonici napona malo izraženi, onda se za faktor snage dobija nešto jednostavnija predstava:

$$\lambda = \frac{\sum_{h=1}^{\infty} U_h I_h \cos \varphi_h}{\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} U_h^2} \cdot \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}} \approx \frac{I_1 \cos \varphi_1}{\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}} = \frac{I_1}{I_{eff}} \cos \varphi_1 = \frac{\cos \varphi_1}{\sqrt{THDI_{ac}^2 + 1}} \quad (5.38)$$

5.2.5. Definicije harmonijskih indikatora

Za kvantifikovanje izobličenja talasnih oblika struja i napona koriste se pojmovi individualna i ukupna harmonijska distorzija, koji su već pomenuti na početku ovog poglavlja, zatim ukupna angažovana distorzija (TDD), TIF faktor, K-faktor transformatora i dr.

Individualna harmonijska distorzija ili samo harmonijska distorzija (HD_n) se definiše kao odnos efektivnih vrednosti n-tog harmonika i fundamentalnog (50 Hz ili 60 Hz) i izražava se u procentima:

$$\begin{aligned} HDI_n &= (I_n / I_1) \cdot 100 \quad (\%) \\ HDU_n &= (U_n / U_1) \cdot 100 \quad (\%) \end{aligned} \quad (5.39)$$

Ukupna harmonijska distorzija (THD) se definiše kao kvadratni koren odnosa sume kvadrata efektivnih vrednosti pojedinačnih harmonijskih komponenti i efektivne vrednosti fundamentalnog harmonika i takođe se izražava u procentima:

$$THDI = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 / I_1^2} \cdot 100 = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} HDI_n^2} \quad (\%) \quad (5.40)$$

$$THDU = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2 / U_1^2} \cdot 100 = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} HDU_h^2} \quad (\%) \quad (5.41)$$

Ukupna angažovana distorzija (TDD) je indikator koji se pojavljuje u IEEE-519 standardu [5] i definisan je kao odnos kvadratnog korena sume kvadrata efektivnih vrednosti pojedinačnih harmonijskih komponenti i maksimalne vrednosti fundamentalnog harmonika struje koju potrošač uzima (potražuje) iz mreže u nekom 15-min intervalu (I_L)

$$TDDI = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_L} \cdot 100 \quad (\%) \quad (5.42)$$

TIF faktor je skraćenica od faktor uticaja na telefoniju (Telephone Influence Factor) i definiše se da opiše šum u telefonskim

signalima potekao od uticaja viših harmonika napona i struje u elektro-energetskom sistemu. On je preko težinskih faktora podešen subjektivnom osećaju šuma ljuskog uha na različitim frekvencijama. Definiše se kao:

$$TIF_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} (w_n I_n)^2}}{I_{eff}} \quad (5.43)$$

gde je w_n **težinski faktor** koji definiše efekat induktivnog sprežanja u audio signalu na frekvenciji n -tog harmonika. **TIF** je u stvari **modifikacija THD faktora**, koja uzima u obzir i subjektivni uticaj na govorni signal.

Pored w_n težinskih faktora definišu se i druge težinske funkcije, koje su razradili ili **CCITT** - psfometrijske težinske funkcije ili **Bell Telephone System and Edison Institute** - "C-message" težinske funkcije. Na osnovu ove poslednje, definisan je TIF u IEEE-519 [5] kao:

$$TIF_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} (5c_n f_n I_n)^2}}{I_{eff}} \quad (5.44)$$

gde je c_n vrednost "C-message" težinske funkcije na frekvenciji n -tog harmonika f_n .

K-faktor transformatora je indeks koji se koristi za **izračunavanje slabljenja nominalnih karakteristika** u slučaju prisustva viših harmonika u struji. Definiše se kao:

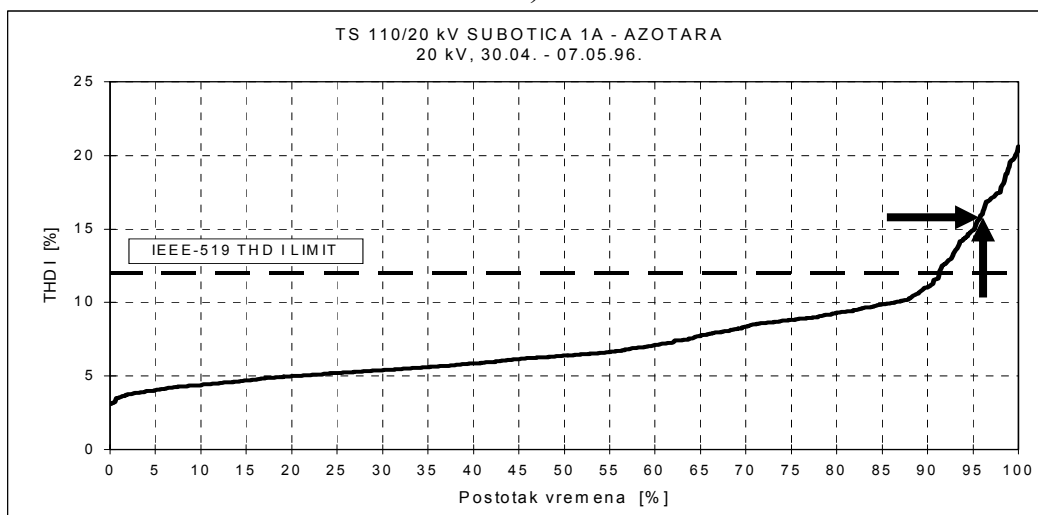
$$K = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} n^2 (I_n / I_1)^2}{\sum_{n=1}^{\infty} (I_n / I_1)^2} \quad (5.45)$$

5.2.6. Statistička predstava viših harmonika

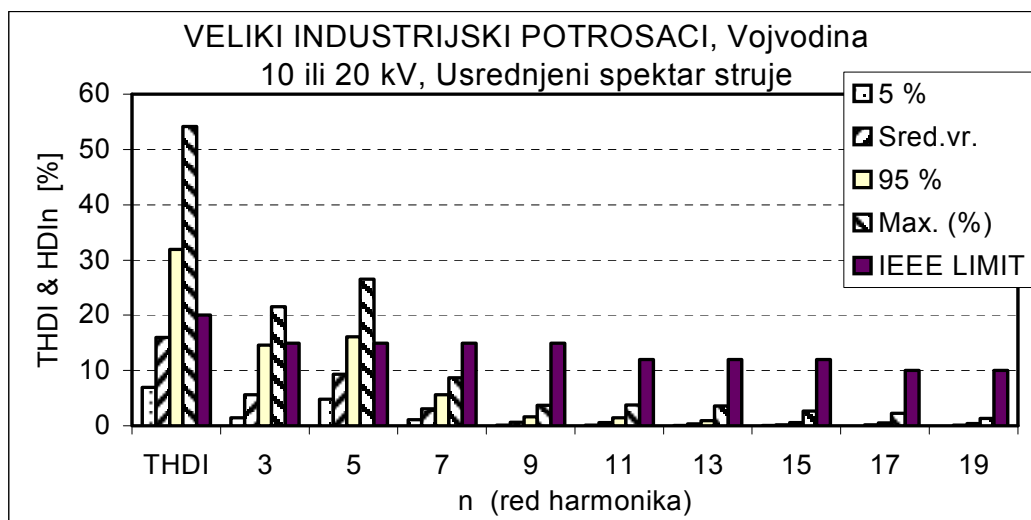
S obzirom na **veliki broj podataka**, koji se prikupi tokom merenja postoji **potreba** za njihovom **statističkom analizom**. Kod istraživanja harmonika primarno je **da li je premašen određen nivo** ili ne, a zatim **u kom procentu vremena**, pa koliki je **prosečan nivo** i sl. Zbog toga se statistička obrada ne bavi krivama raspodele, već **kumulativnim verovatnoćama**. Pored **maksimalnog**, bitan je i **nivo harmonika**, koji nije premašen u **95% vremena**, zatim **srednja** i

minimalna vrednost. Time se uvažava dinamika harmonika, ali se zanemaruju kratkotrajni skokovi. Kritična situacija nastaje ako je taj nivo iznad dozvoljenog (propisanog). Na slici 5.6 je prikazan statistički dijagram (histogram) za THDI u obliku 95% verovatnoće (slika 5.6.a), statističke predstave spektra struje gde su prikazane usrednjene vrednosti maksimuma, 95%, srednje vrednosti i minimuma (5% vrednosti) sa većeg broj merenja u Vojvodini (slika 5.6.b).

a)



b)



*Slika 5.6 - Primeri statističke obrade rezultata : a) 95% verovatnoća
b) Usrednjeni spektar STRUJE kod velikih industrijskih potrošača 10 ili 20 kV.*

5.3. Izvori viših harmonika

U elektroenergetskom sistemu harmonici se javljaju u postupku proizvodnje električne energije, kao posledica rada sinhronih generatora, zatim u prenosu, kao posledica komutacija u mreži, kvarova, atmosferskih nepravilnosti i sl., i na kraju u domenu potrošnje, kao posledica rada nelinearnih potrošača. Najčešći nelinearni potrošači su *energetski elektronski pretvarači*. To su pretvarači energetske elektronike, koji se karakterišu prekidačkim načinom rada snažnih elektronskih komponenti. Razlikuju se pretvarači naizmenične struje u jednosmernu – *ispravljači*, jednosmerne struje u naizmeničnu – *invertori*, jednosmerne struje u jednosmernu – *čoperi* i naizmenične struje u naizmeničnu – *naizmenični pretvarači*. Pored energetskih elektronskih pretvarača u mreži postoje još nekoliko značajnih "zagađivača": energetski transformatori, rotirajuće električne mašine, elektrolučne peći i fluorescentne sijalice.

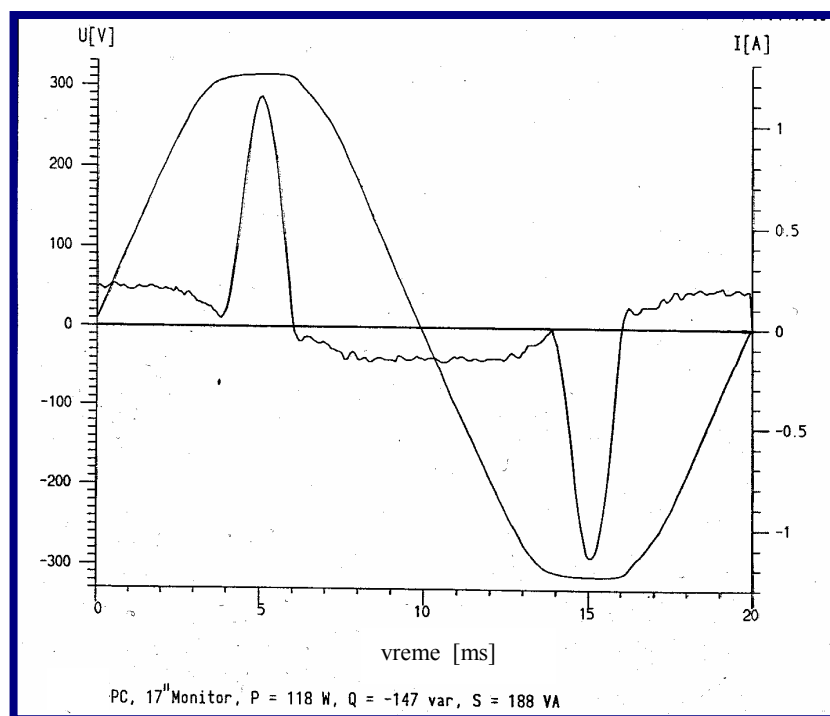
5.3.1. Ispravljači kao izvori viših harmonika

Ispravljači, kao najčešće korišćeni energetski elektronski pretvarači, su jedan od glavnih izvora viših harmonika. Prekidački način rada ima za posledicu stalne promene konfiguracije aktivnog dela ispravljača. To dovodi to toga da je talasni oblik mrežne struje ispravljača sastavljen od segmenata i da je nesinusoidalnog oblika. Proticanje nesinusoidalne struje izaziva pad napona na impedansi mreže, što dovodi do izobličenja osnovnog sinusnog napona. Istovremeno, sa strane potrošača, talasni oblik napona se sastoji od delova sinusoide, odnosno pored jednosmerne komponente, postoje i naizmenične komponente - viši (parni) harmonici.

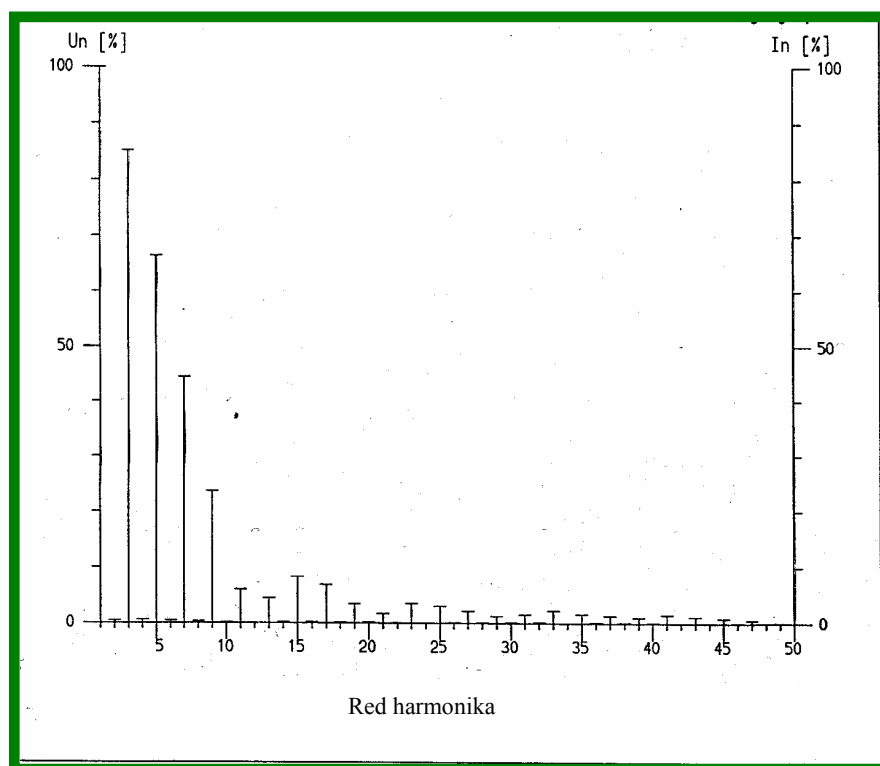
Monofazni ispravljači se upotrebljavaju u napojnom delu elektronskih uređaja i od njih se zahteva da generišu stabilne jednosmerne napone, da budu što jednostavnije konstrukcije i visoke pouzdanosti. Iz tih razloga, najčešće se radi o diodnim ispravljačima sa filterskim kondenzatorom na jednosmernoj strani ili u novije vreme o jednosmernim prekidačkim napajateljima, koji takođe na izlazu imaju kondenzator. U slučaju potrebe za drugim naponskim nivoom ili stabilnijim naponom, iza kondenzatora se povezuje linearni ili prekidački napajatelj. Međutim, u oba slučaja ovaj ispravljač izobličuje struju mreže, a delimično i napon. Izobličenje je posledica dopunjavanja kondenzatora u periodima kad je mrežni napon veći od jednosmernog, odnosno napona na kondenzatoru.

Na slici 5.3 prikazan oscilogram talasnog oblika napona i struje (slika 5.3.a) i spektar struje (slika 5.3.b) jednog monofaznog ispravljača ugrađenog u standardni PC računar. Lako se može uočiti trenutak dopunjavanja kondenzatora strujnim impulsom, koji je praćen i blagim izobličenjem (zaravnjenjem) napona. U spektru je dominantan treći harmonik, a izraženi su i ostali neparni harmonici 5-ti, 7-mi, 9-ti, itd.

Trofazni mosni ispravljač se najčešće primenjuje u **elektromotornim pogonima** i to najčešće u **regulisanim jednosmernim** pogonima, a u novije vreme i u **naizmjeničnim pogonima**, kao prvi deo u frekventnim pretvaračima (ispravljač-invertor ili ispravljač-čoper-invertor). I ovakav ispravljač se karakteriše **filterskim kondenzatorom** na izlazu, pa ima slično ponašanje, kao i monofazni. Dva najčešća slučaja primene ispravljača u sklopu naizmjeničnog pogona su: **diodni ispravljač sa C filtrom** u jednosmernom kolu i **regulisani ispravljač sa LC filterom** u jednosmernom kolu. U oba slučaja **pogon povlači** iz mreže izrazito **deformisane talasne oblike struje** (slika 5.4). Može se primetiti da je kritičniji prvi slučaj (slika 5.4.a), gde pojedinačni harmonik, 5-ti, dostiže vrednost od 70% osnovnog i gde je ukupna harmonijska distorzija (THDI) oko 80%. Dodavanje 3% prigušnice u filterar jednosmernog kola (LC filterar), ublažava deformaciju struje (slika 5.4.b), tako da 5-ti harmonik ima znatno manje izobličenje (oko 30%), a i THDU je 37,7%. Slično se može primetiti i za 7-mi harmonik, koji je u prvom slučaju oko 40%, a u drugom oko 10%. Kod ostalih viših harmonika ta razlika nije toliko izražena, osim nešto malo kod 13-tog.

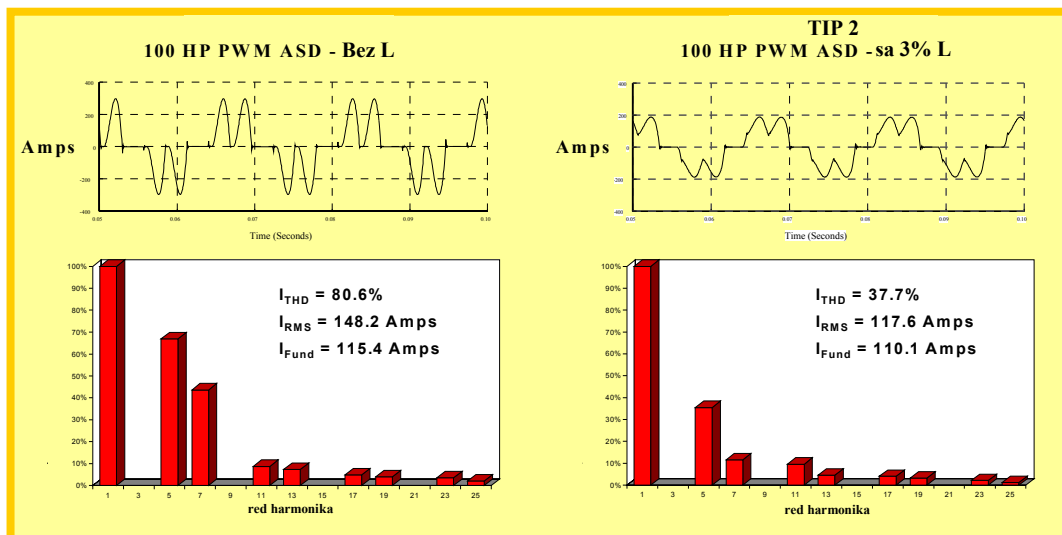


a)



b)

Slika 5.3 - a) Talasni oblik napona i struje mreže monofaznog ispravljača; b) Spektar struje.



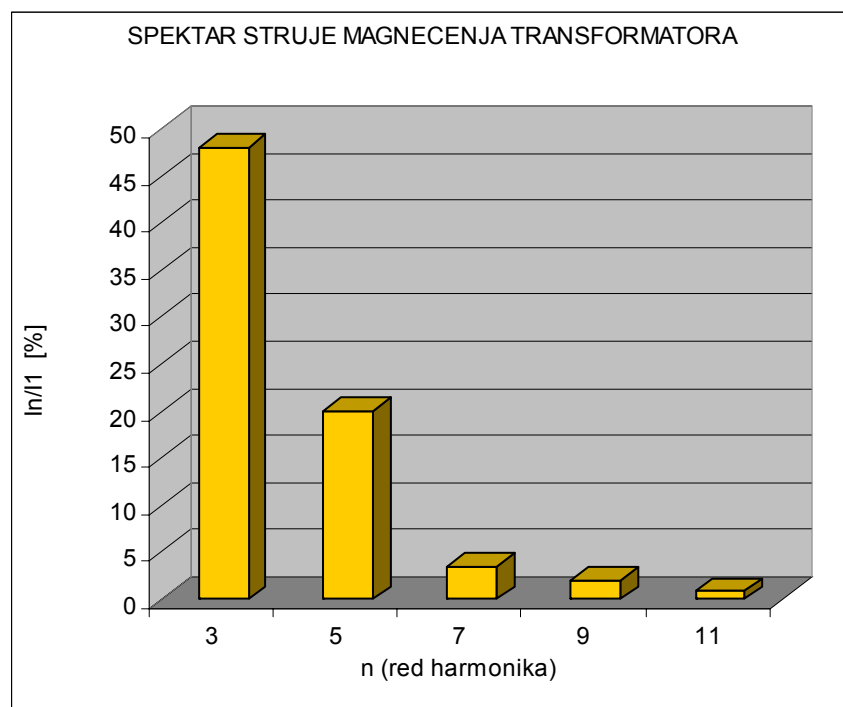
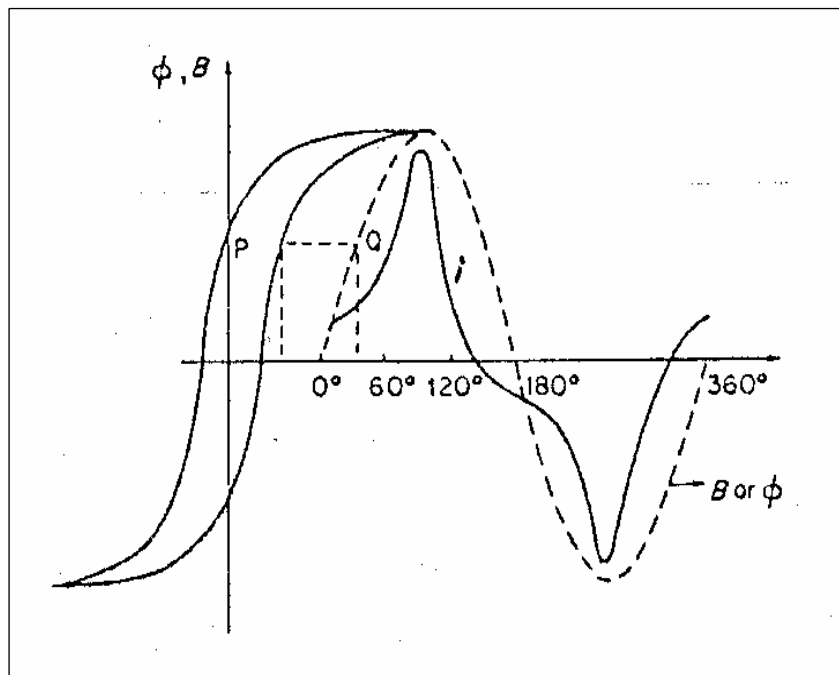
*Slika 5.4 – Trofazni ispravljač u sklopu frekventnog pretvarača:
Talasni oblik i spektar struje za slučaj ispravljača
sa C filterom (levo) i sa LC filterom (desno).*

5.3.2. Električne mašine kao harmonijski izvori

Pored energetske elektronske pretvarača, viši harmonici nastaju i pri radu električnih mašina usled rada ili odlaska **radne tačke u nelinearni deo** B-H karakteristike. Najčešće se kao izvori javljaju **energetski transformatori** i **rotirajuće električne mašine**.

Transformatori su najznačajniji klasični izvori harmonika struje i napona. Zbog nelinearne veze između fluksa i struje magnetovanja, čak i u praznom hodu, struja magnetovanja se izobličuje. Struja s dalje izobličuje zbog širine histerezisne petlje, tako da dobija oblik koji je bogat neparnim harmonicima, a naročito onim koji su multipl od 3 (slika 5.5.a).

Na slici 5.5.b) predstavljen je spektar struje magnetovanja transformatora. Vidi se da je najveći problem treći harmonik, ali se on može uspešno neutralizovati vezivanjem namota u trougao. Time se obezbeđuje putanja kako za treći tako i za sve ostale harmonike koji su njegov multipl. Peti i sedmi harmonik su takođe značajni (5-10%) i mogu prouzrokovati vidljivu distorziju. Korišćenjem kvalitetnijih materijala sa užom histerezisnom petljom mogu se i ovi harmonici smanjiti. Pored ovog uzroka, harmonici se mogu javiti i kao posledica saturacije.



Slika 5.5 - Struja magnećenja transformatora sa uticajem histereza: a) talasni oblik, b) spektar.

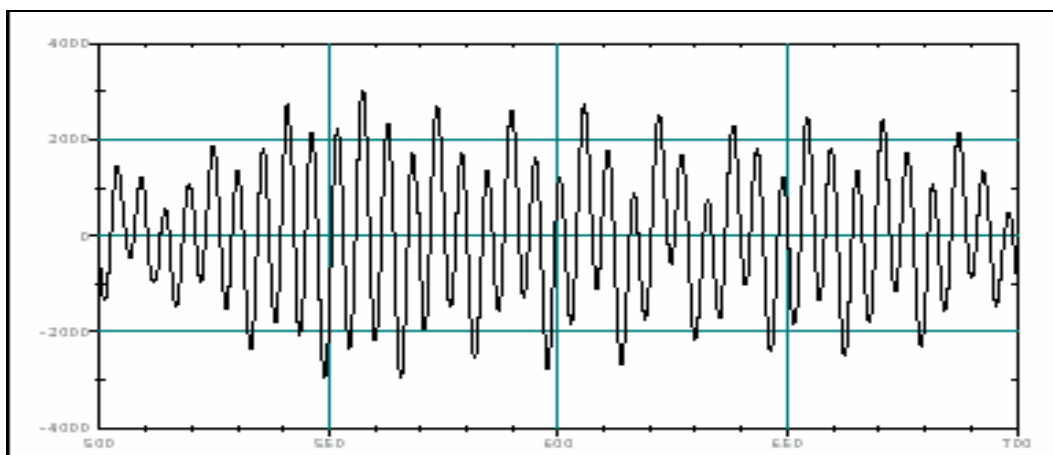
Kao **dodatni uzrok** pojave harmonika kod transformatora može biti i **jednosmerna komponenta struje magnećenja**. Jednosmerna komponenta je posledica nesimetričnog oblika histereza, a uzrok je jednosmerna struja, koja se javlja u opterećenju transformatora

(ispravljači sa srednjom tačkom, trofazni mosni ispravljači u slučaju grešaka u paljenju tiristora itd.). Sad se javljaju i parni i neparni harmonici, koji su nezavisni od naizmjenične pobude. Da bi se ovi harmonici smanjili, u standardima ili preporukama elektrodistributivnih organizacija se zabranjuje ili posebno uslovljava priključivanje ispravljača sa srednjom tačkom.

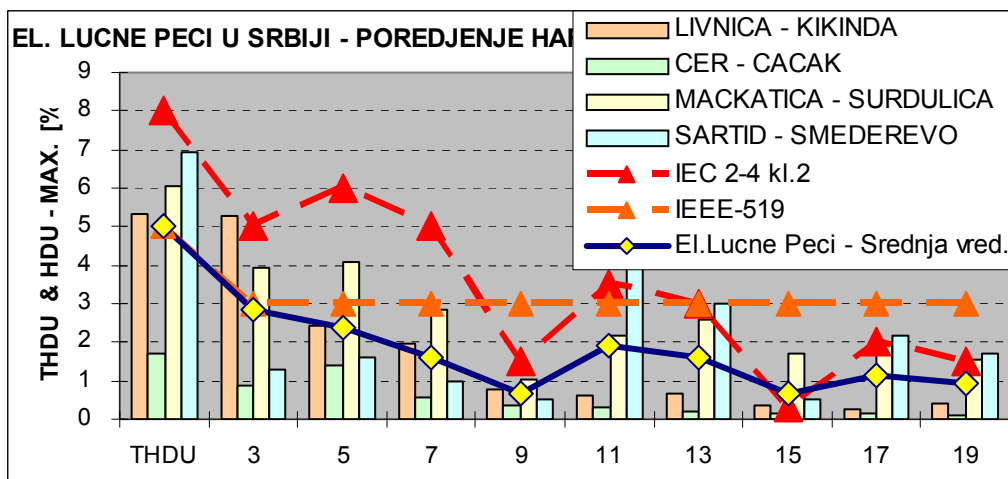
Od **rotirajućih električnih** mašina kao izvori harmonika u mreži mogu da se jave **sinhrone** i **asinhronne** mašine, ali je **intenzitet** harmonika je **obično mali**.

5.3.3. Elektrolučne peći kao harmonijski izvori

Proces rada elektrolučne peći se može podeliti na **tri faze**: **topljenje**, **oksidacija** i **rafinacija**. U prvoj fazi peć je značajan izvor viših harmonika, a takođe i glavni **izvor flikera** u mreži. Mnoga istraživanja i merenja su vršena i ona su potvrdila potrebu posebnih mera zaštite sistema kod priključivanja elektrolučnih peći. Na slici 5.6 dat je primer talasnog oblik struje mreže tokom rada peći. Vide se velike promene i oscilacije amplitude, kao i značajna odstupanja od sinusnog oblika, odnosno izobličenja. Karakteristično je da talasni oblik struje nije osno simetričan, odnosno da se pored neparnih, javljaju i parni harmonici. Na slici 5.7 dat je spektar harmonika napona na sabirnicama distributivnih transformatorskih stanica sa kojih se napajaju neke elektrolučne peći u Srbiji. Visoke vrednosti harmonika tokom rada elektrolučnih peći ukazuju da su one jedan od najozbiljnijih izvora viših harmonika u Srbiji. Rezultati merenja su upoređeni sa odgovarajućim graničnim vrednostima po IEEE – 519 i IEC 61000-2-4 standardima. Može se uočiti da su harmonici ili iznad ili veoma blizu graničnih vrednosti, što upućuje na veliku verovatnoću mogućnosti pojave negativnih efekata.



Slika 5.6 – Promena struje tokom rada elektrolučne peći.

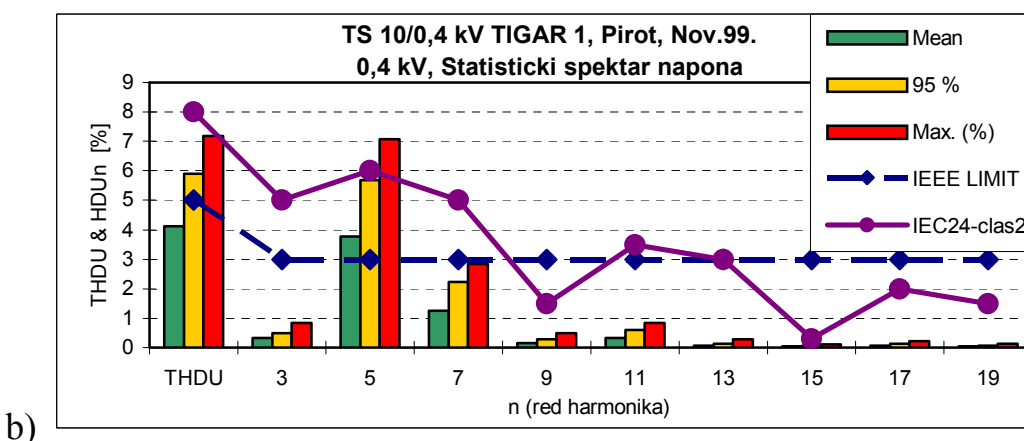
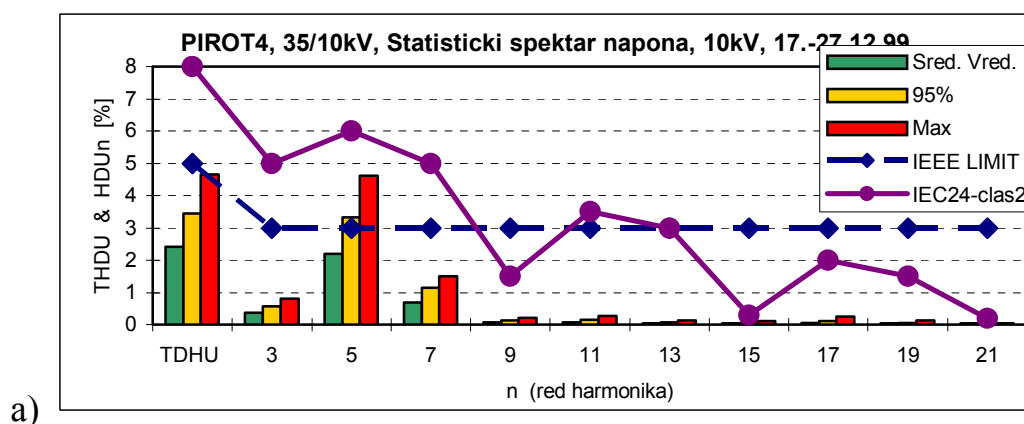


Slika 5.7 – Sumarni pregled harmonika napona elektrolučnih peći u Srbiji.

5.3.4. Industrija kao izvor viših harmonika

Danas, skoro da ne postoji industrijsko preduzeće ili industrijski pogon u kome se ne koristi jedan od ili više pomenutih harmonijskih izvora. Posmatramo sa strane mreže takvo preduzeće ili pogon predstavlja izvor harmonika, koji "zagađuje" mrežu. Poseban problem tj. problem samog industrijskog preduzeća je da je i mreža unutar preduzeća "zagađena" - često mnogo jače nego prema spolja. Primeri takvih industrijskih preduzeća su brojni, a najznačajniji su elektrolize, livnice, valjaonice, fabrike tekstilne industrije, fabrike papira, željezare itd.

Merenja u mreži "EPS ' JP Elektrovojvodina", Novi Sad pokazala su da je upravo industrija najveći izvor zagađenja. Jedan primer izobličenja pojedinačnih talasnih oblika napona i struje je već prikazan na slici 5.2, dok su na slikama 5.8.a) i 5.8.b) dati rezultati višednevnih merenja harmonika i njihove statističke obrade na sabirnicama 10 kV i 6 kV u mreži velikog industrijskog preduzeća "Tigar" iz Pirota. U oba slučaja, rezultati su upoređeni sa graničnim vrednostima iz dva svetska standarda – IEEE 519 i IEC 61000-2-4 – klasa 2 (industrijske mreže) [5,10]. Može se uočiti da je izobličenje napona veliko prema javnoj mreži (5-ti harmonik je iznad IEEE standarda), a naročito u industrijskoj mreži, gde su i THDU i 5-ti harmonik značajno iznad oba limita. Izražen je i 7-mi harmonik napona. Treba reći da je na sabirnicama TS "Tigar 1" u periodu pre merenja došlo do velikog kvara i požara na kondenzatorskim baterijama, koji je verovatno bio uzrokovan rezonancijom sa višim harmonicima.



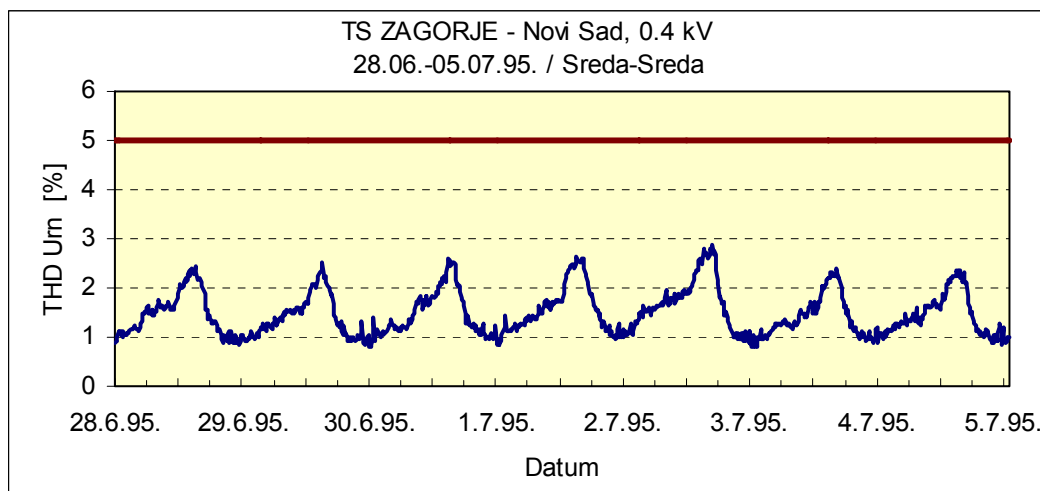
Slika 5.8 – Statistički spektar napona na sabirnicama industrije “Tigar”, Pirot. a) Prikaz na sabirnicama distributivne TS, b) Prikaz na sabirnicama industrijske TS.

5.3.5. Rezidencijalne oblasti (domaćinstva) kao izvori viših harmonika

Savremena domaćinstva postaju sve **opremljenija raznim elektronskim uređajima**, koji do pre desetak godina uopšte nisu ni postojali. Broj takvih uređaja sve više raste, a kako su oni uglavnom opremljeni **monofaznim ispravljačima**, time se polako **povećava nivo viših harmonika** koji se generišu u mrežu. Problem je naročito izražen u zonama gradova gde je visoka **koncentracija stanovništva** – nova naselja sa **višespratnicama**, zbog istovremenog delovanja velikog broja uređaja (TV aparata, **video-rekordera**, **audio-uređaja**, **PC računara**, **video-igrica**, **regulatora osvetljenja** – **dimera**, **mikrotalasnih pećnica** i sl.).

Ukupno delovanje ovih pojedinačnih uređaja, multiplicirano sa brojem stanova ili biroa je potencijalno veliki izvor viših harmonika. Već je poznat karakterističan oblik vremenskog dijagrama THDU tokom jedne nedelje za stambene oblasti u nekom gradu (slika 5.9). On je sličan, bez obzira da li je merenje sprovedeno u U.S.A., zapadnoj

Evropi ili Srbiji. Uočljivo je podizanje nivoa viših harmonika u večernjim časovima, što se tumači uključivanjem velikog broja TV prijemnika.



Slika 5.9 – Primer promene THDUu stambenoj zoni tokom nedelje.

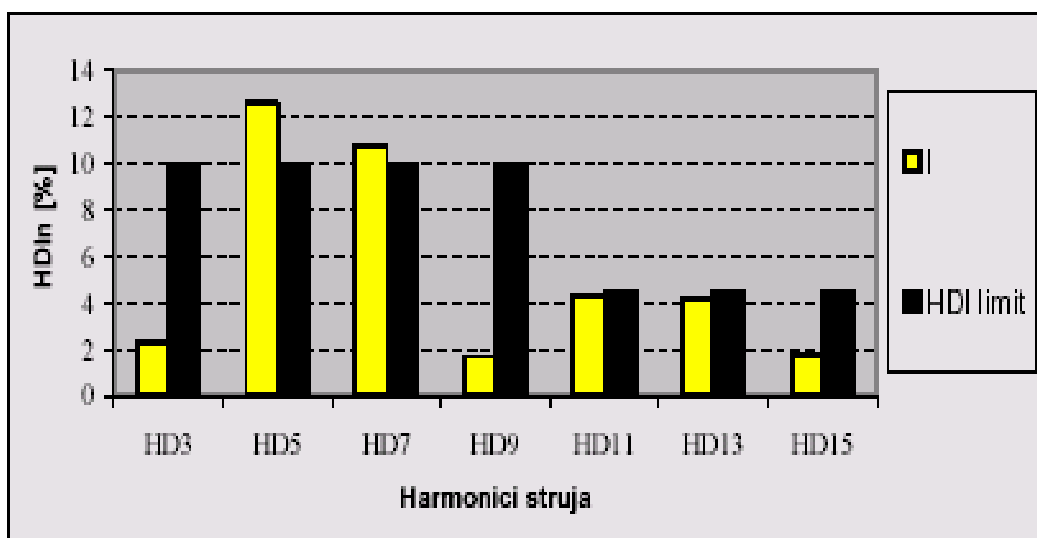
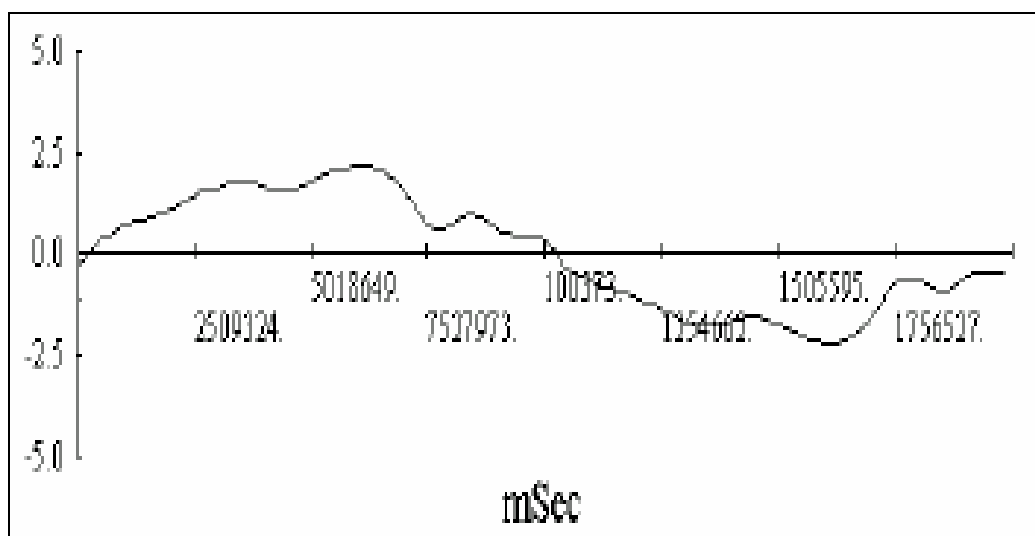
Za ovu grupu potrošača karakteristično je generisanje trećeg harmonika, što je vezano za primenu monofaznih ispravljača. Prostiranje trećeg harmonika dalje u mrežu jednostavno se sprečava sprezanjem distributivnog transformatora u trougao. Međutim, zbog nesimetrije ili dugih uzroka, treći harmonik može prodreti na viši naponski nivo. To potvrđuju i zaključci pomenutih merenja u Švajcerskoj, gde je u periodu 1979-1991. god., došlo do povećanja nivoa 3-ćeg harmonika od skoro 100% [11]. Ovo upućuje na zaključak da ova grupa potrošača predstavlja potencijalno ozbiljan izvor viših harmonika u budućnosti, koji će ubrzo popuniti harmonijske kapacitete mreže.

5.3.6. Poslovne zgrade i računarski centri kao izvori viših harmonika

Poslovne zgrade sa velikim brojem administrativnih i drugih uslužnih radnika, koji svoj rad ne mogu zamisliti bez računara, laser-skih i/ili matričnih štampača, skenera, kopir aparata, malih telefonskih centrala, fluorescentnih, halogenih ili štedljivih sijalica i drugih sličnih malih izvora viših harmonika, predstavljaju prepoznatljivu potrošačku grupu, kojoj se mora posvetiti posebna pažnja. U sklopu ovih zgrada se često nalaze koncentrisane velike grupe malih (personalnih) računara (PC), bilo kao računari pojedinih odeljenja, bilo kao posebni računarski centri. U ovu grupu se mogu uračunati i fakulteti i univerzitetski kampusi, koji imaju svoje računarske centre, kao i veliki broj računara u laboratorijama i kabinetima.

Pored ovih malih, ali brojnih harmonijskih izvora, u poslovnim zgradama instalisani su i **snažni** i brzi **liftovi**, koji svojim **elektromotornim pogonom** predstavljaju značajan **generator harmonika**. Ovi pogoni su **jednosmernog** tipa (starije verzije) ili **naizmeničnog** sa **frekventnim pretvračima** (novije verzije). Detaljnije o ovakvim izvorima je dato u prethodnim poglavljima.

U ranijem periodu urađeno je više istraživanja stanja u poslovnim zgradama. Na slici 5.1 je prikazan primer dobijenih rezultata: talasni oblik i spektar struje u transformatorskoj stanici (TS) “Dnevnik” na 0,4 kV nivou iz koje se napaja poslovna zgrada i **štampanija NIP Dnevnik-a, Novi Sad**. Uočljivo je značajno prisustvo 5-tog i 11-tog harmonika, što se može povezati sa pogonom liftova. Slično merenje i analiza urađena je u poslovnoj zgradi “**Naftne industrije Srbije**” (NIS) u Novom Sadu [12]. Zgrada poseduje 14 liftova grupisanih po 7 u dva krila, čiji EMP su realizovani sa snažnim asinhronim motorima regulisanim frekventnim pretvaračima. Na slici 5.10 prikazan je snimljeni oscilogram struje, na kom se mogu uočiti značajna odstupanja od sinusnog oblika. Prikazani spektar ukazuje na postojanje visokih vrednosti dominantnih harmonika (5-tog, 7-mog, 11-tog, 13-tog), a postojanje malog 3-ćeg harmonika je vezano za druge, monofazne potrošače. Ove vrednosti su čak iznad dozvoljenih limita prema IEC standardima.



Slika 5.10 – Talasni oblik struje jedne faze (gore) i njen spektar (dole) na sabirnici TS (PCC) poslovne zgrade NIS-a.

5.4. Negativni efekti pojave viših harmonika u mreži

Komponente energetskog sistema, kao i potrošači koji se priključuju na njega, **podrazumevaju sinusne oblike napona i struje**, pa svaka pojava viših harmonika donosi **negativne efekte**. Poznati su **brojni negativni efekti**, od kojih su najvažniji:

1. Pojava rezonancije u mreži,
2. **Uticaj** na kondenzatorske **baterije**,
3. Uticaj na elemente za **zaštitu**,
4. Uticaj na **tačnost pokazivanja** standardnih mernih instrumenata,
5. **Dodatni gubici** u električnim mašinama,
6. **Interferencija** sa telekomunikacionim signalima.

U ovom poglavlju su detaljnije opisani pomenuti efekti na pojedine komponente sistema i priključene potrošače.

5.4.1. Pojava rezonancije u mreži

Prisustvo kapacitivnosti u sistemu (kondenzatora za popravku faktora snage, kapacitivnosti kablovskih vodova, kondenzatora iz filtera ili sopstvene kapacitivnosti mreže) može da rezultira pojavom lokalne rezonancije [1]. To izaziva pojavu prevelikih struja i povećanje napona. Takvo stanje dovodi do prekomernog i kvarova, najčešće na samim kondenzatorima, a i na drugim komponentama sistema. Javljaju se dve vrste rezonancije:

1. **paralelna** rezonancija i
2. **serijska** rezonancija.

Paralelna rezonancija se javlja u više slučajeva, a **najčešće** ako je **kondenzator na istoj sabirnici kao i harmonijski izvor**. Ona se može javiti i između mrežnog izvora i kondenzatora, između induktivnosti mreže i kapacitivnosti mreže, odnosno između induktivnosti mreže i kapacitivnosti potrošača. Na slici 5.11.a) predstavljena je ekvivalentna šema u slučaju paralelne rezonancije.

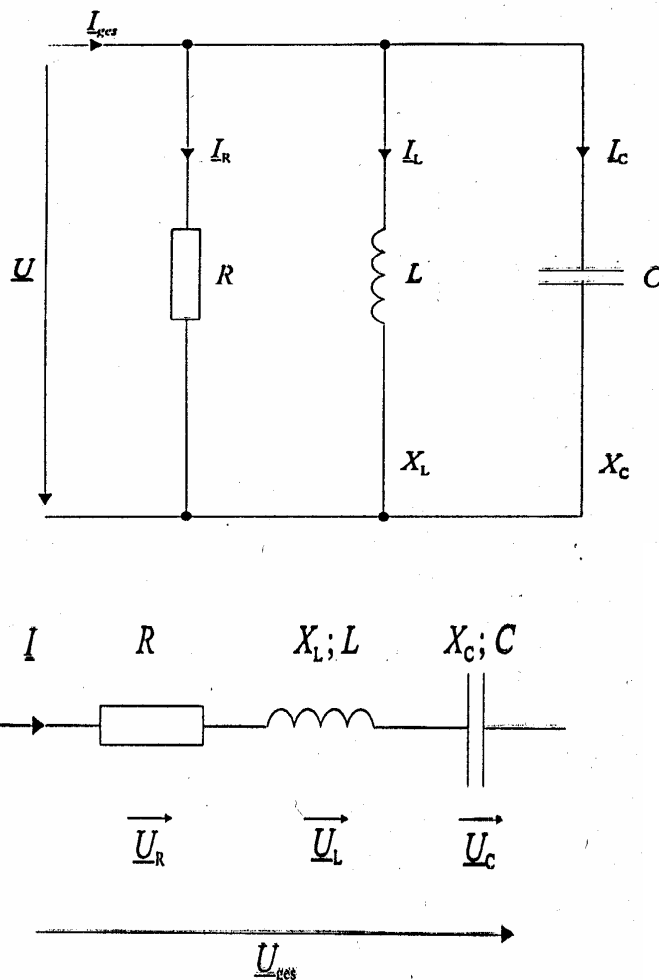
Ako se izvor smatra induktivnim tada je **rezonantna frekvencija** definisana sa

$$f_{rp} = f \sqrt{\frac{S_{SC}}{S_C}} \quad (5.46)$$

gde je f_{rp} - paralelna rezonantna frekvencija, f - frekvencija osnovnog harmonika, S_{SC} - nominalna snaga kratkog spoja izvora (VAr) i S_C - nominalna snaga kondenzatora (VAr).

Paralelna rezonancija ima za **posledicu** pojavu **visoke impedanse**, odnosno niske admitanse prema harmonijskom izvoru na rezonantnoj frekvenciji. Pošto se najveći broj harmonijskih izvora može smatrati kao **strujni izvori**, javlja se **povećanje harmonijskih napona**, koji svoj **maksimum** imaju na **rezonantnoj frekvenciji**. Tako povećan napon izaziva **visoke struje harmonika** u svakoj grani paralelne rezonancije, koje su **uzrok kvarova**.

Redna (serijska) rezonancija nastupa kada je potrošaču paralelno vezana kondenzatorska baterija, pa sa strane mreže se to vidi kao redna veza otpornosti, induktivnosti vodova i transformatora i kapacitivnosti kondenzatorskih baterija. Na slici 5.11.b) prikazana je ekvivalentna šema ovakve veze. Ako u mreži postoje visokofrekventne komponente, tada za njih impedansa ove veze postaje jako mala, pa velika struja teče kroz kondenzator i za relativno male harmonijske napone..



Slika 5.11 – Ekvivalentno kolo: paralelne rezonancije (gore) i redne rezonancije (dole)

Pojava **rezonancije** u mreži **utiče na kondenzatorske baterije** (**kvarovi** ili **uništenje**), na **telekomandne signale** (ometa ih), na opremu za **telekomandne signale** (**uništenje** VF skretnica i kondenzatora za podešavanje frekvencije), na rad **zaštitnih relea** (nekontrolisano treperenje) itd.

5.4.2. Uticaj na kondenzatorske baterije

Kondenzatori, koji čine kondenzatorske baterije za popravku faktora snage ili su u sastavu filtera ili se pojavljuju u nekom drugom sklopu, su ugroženi pojavama prenapona ili velikim vrednostima struja.

Prisustvo harmonika u naponu izaziva dodatne gubitke:

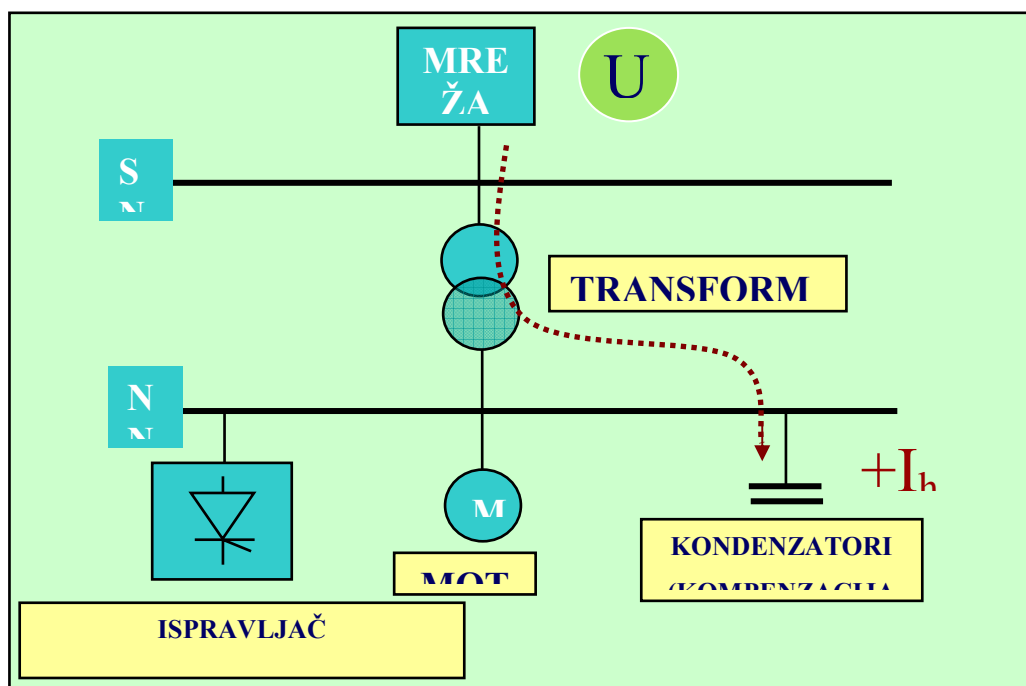
$$P_g = \sum_{n=1}^{\infty} C t g \delta \omega_n U_n^2 \quad (5.47)$$

s tim da je C kapacitivnost kondenzatora, $\operatorname{tg}\delta = R\omega C$, $\omega_n = 2\pi n f$, U_n - efektivna vrednost n -tog harmonika napona. Takođe, ukupna reaktivna snaga, koja je data sa:

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} Q_n \quad (5.48)$$

ne bi smela da prevaziđe nominalnu reaktivnu snagu.

Serijska i paralelna rezonancija između kondenzatora i ostatka mreže izaziva prenapone i visoke vrednosti struja, što dramatično povećava gubitke i pregrevanje kondenzatora i vodi skraćanju veka trajanja ili probiju u dielektriku (uništenju). Na slici 5.12 prikazan je slučaj redne rezonancije, kad harmonici iz mreže (U_h) izazivaju dodatno strujno naprezanje kondenzatora (I_h). Na slici 5.13 prikazan je slučaj paralelne rezonancije, kad harmonici struje generisani od nelinearnog potrošača (u ovom slučaju ispravljača) izazivaju pojavu dodatnog naponskog naprezanja kondenzatora (U_h).

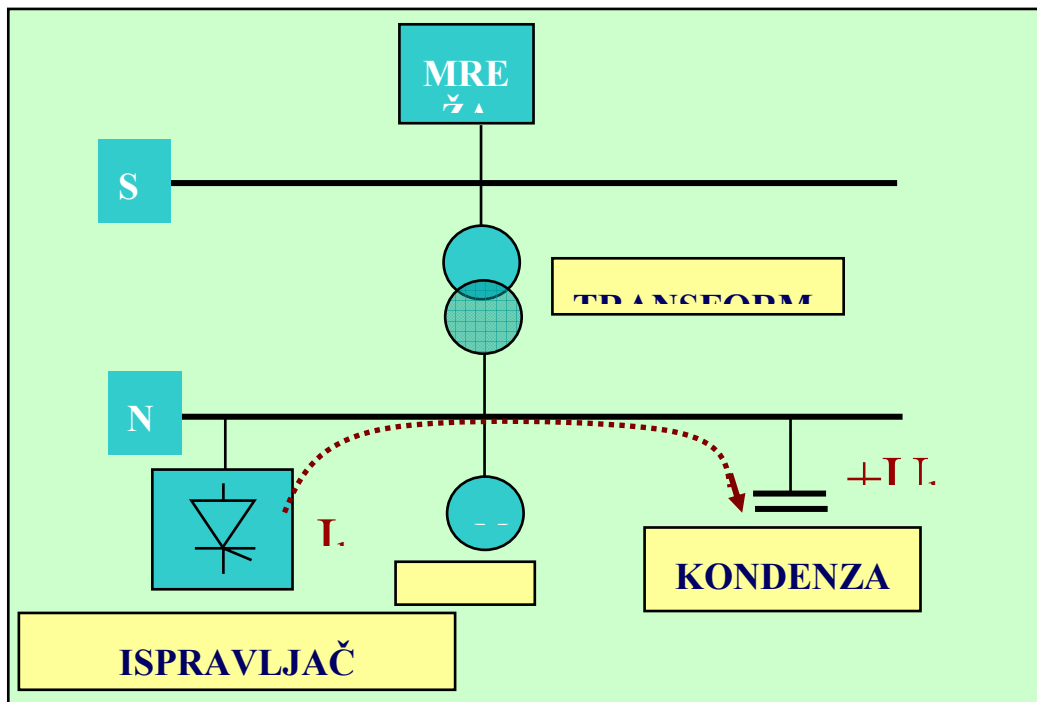


Slika 5.12 - Uticaj redne rezonancije

Kondenzatori se izrađuju prema različitim standardima, koji specificiraju različite nivoe strujnog naprežanja. Tako je taj nivo 15% u Velikoj Britaniji, 30% u Australiji i Evropi, a čak 80% u Sjedinjenim Američkim Državama. U mnogim slučajevima je primećeno da se kvar javljao posle rada sa strujama iznad tih limita.

5.4.3. Uticaj na telekomandne signale

Prisustvo harmonika u mreži je čest uzrok smetnji za **telekomandne signale**. Ovi signali koriste energetske vod kao prenosni medijum i upotrebljavaju se za **daljinsku kontrolu** ulične **rasvete**, za **uključivanje/isključivanje** većih potrošača u domaćinstvu (**termoakumulacione peći**, **bojleri** i sl.) i dr. Obično koriste frekvencije od nekoliko stotina herca. Negativni efekti se manifestuju u **nepravilnom radu prijemnika**, kao i u **kvarovima** opreme.



Slika 5.13 - Uticaj paralelne rezonancije

5.4.4. Uticaj na tačnost pokazivanja standardnih mernih instrumenata

Standardna merna oprema za merenje napona, struje, snage, energije uglavnom pretpostavlja linearne potrošače i ulaznih je frekventnih opsega. Pojava mernih veličina bogatih sa harmonicima izaziva grešku, koja izlazi iz okvira klase instrumenta. Njeno određivanje predstavlja značajan podatak, naročito kod pogonskih istraživačkih merenja, obračuna utrošene električne energije i sl. Zbog različite konstrukcije mernog uređaja, uticaj harmonika na instrumente za merenje napona, struje i snage, odnosno na instrument za merenje utrošene električne energije se razlikuje.

Instrumenti za merenje struje i napona, koji se danas koriste u elektrodistribuciji ili industriji, uglavnom se pojavljuju u dva oblika:

1. analogni instrumenti sa mekim gvožđem i
2. univerzalni instrumenti sa analognim/digitalnim pokazivanjem.

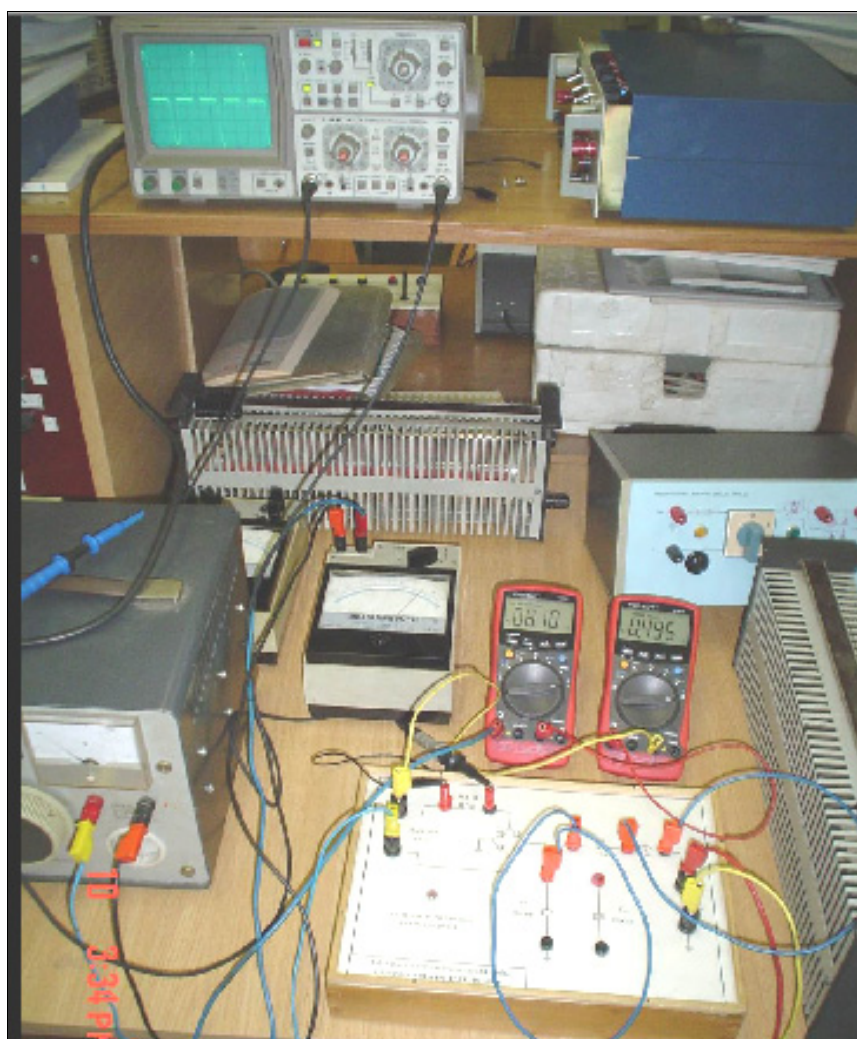
Instrumenti sa mekim gvožđem mere stvarnu efektivnu vrednost struje, koja u sebi pored osnovnog harmonika, obuhvata i više harmonike, ali u granicama frekventnog opsega instrumenta. Obično su efektivni za frekventni opseg do 400 Hz, a van njega izlaze iz klase. Istraživanja su pokazala da je relativna greška pokazivanja uvek negativna, što znači da je izmerena vrednost uvek nešto manja od tačne. Ta greška zavisi od konkretne frekvencije i amplitude merne struje i ide i do 15% [13]. U slučaju merenja talasnog oblika bogatog harmonicima iste efekte će pokazivati i ampermetar i voltmetar [13].

Univerzalni instrumenti su se poslednjih godina počeli široko da koriste, posebno oni sa digitalnim pokazivanjem. Oni su naročito pogodni za brze kontrole na terenu ili prilikom remonta i popravki. Međutim, princip rada ovih instrumenata potpuno je drugačiji. Da bi se postigla jednostavna i jeftina konstrukcija, ovi instrumenti u stvari mere srednju vrednost signala i množenjem sa koeficijentom 1,11 prikazuju je kao efektivnu vrednost. Ovo je ispravno u slučaju sinusnog talasnog oblika struje, ali postaje uzrok velike pogreške, ako je talasni oblik izobličen. Da bi se dobila predstava o veličini moguće greške pokazivanja, urađen je eksperiment gde je univerzalni instrument iskorišćen za merenje ulazne struje diodnog ispravljača. Na slici 5.14 su pokazani rezultati eksperimenta – pokazivanje univerzalnog instrumenta je upoređeno sa analognim instrumentom (sa mekom gvožđem) i sa drugim univerzalnim, ali koji meri stvarnu efektivnu vrednost ("*True RMS*"). Pokazivanje univerzalnog mernog instrumenta, koji ima mogućnost prikazivanja "*True RMS*" je $I = 0,81$ A, dok je ista vrijednost očitana sa analognog mernog instrumenta takođe 0,81 A (na slici 5.14 leva dva instrumenta). Međutim, na drugom (standardnom) univerzalnom mernom instrumentu, pokazivanje je $I = 0,495$ A. Vidi se da je razlika u pokazivanju ova dva instrumenta, pri relativno malom priključenom opterećenju, izuzetno velika - preko 60%.

Instrumenti za merenje snage, vatmetri, nisu bili predmet posebnog ispitivanja, odnosno uticaj harmonika na pokazivanje vatmetra nije u literaturi posebno istraživan. Međutim, smatra se da je njegov uticaj zanemarljiv, mada ga ne treba isključiti.

Instrumenti za merenje utrošene električne energije – indukciona brojila na osnovu teorije, ne bi trebalo da reaguju na

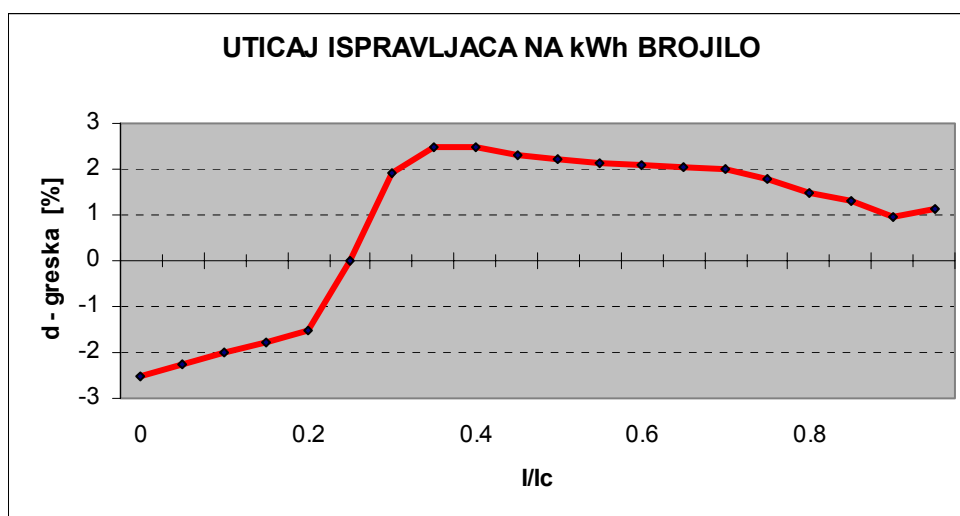
pojavu viših harmonika struje, ako je u mreži prisutan samo osnovni harmonik napona ili njegov niski sadržaj. Praksa, tj. eksperimenti pokazuju suprotno. Indukciono brojilo ima određenu frekventnu karakteristiku. Pored toga, u konstrukciji brojila, pored frekventno osetljivih, postoje nelinearni i inercijalni elementi, koji unose greške sasvim druge prirode. Istraživanja i eksperimenti su pokazali da greška pokazivanja indukcionog brojila može biti i pozitivna i negativna, za razliku od frekventne karakteristike, koja iskazuje negativnu grešku [13]. Na slici 5.15 prikazan je uticaj struje ispravljača na pokazivanje brojila. Vidi se da greška i znak greške zavisi od intenziteta konzumirane struje. To potvrđuje konstataciju da se uticaj energetskih elektronskih pretvarača ne može direktno poistovetiti sa višim harmonicima, već je mnogo kompleksniji. Preporuka je da NE TREBA koristiti indukciono brojilo u slučaju nesinusoidalnih struja i napona, s obzirom da ono ima lošu frekventnu karakteristiku i izraženu nelinearnost.



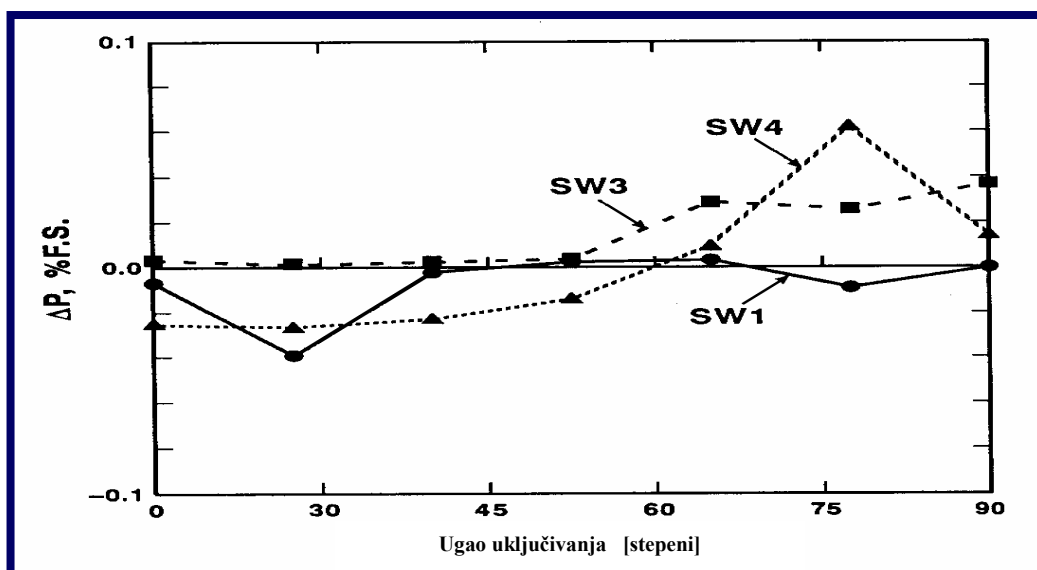


Slika 5.14 – Razlike u pokazivanju univerzalnog mernog instrumenata pri merenju nesinusoidalnih struja.

Poslednjih godina izlaz od sve većeg uticaja nelinearnih potrošača na merenje i obračun električne energije traži se u digitalnim brojilima. Najvažnija komponenta u ovim uređajima su A/D konvertori (jedan za struju i jedan za napon), koji se pomoću sinhronizirajućih kola priključuju simultano na po jednu fazu. Tačnost rada brojila zavisi direktno od procesa A/D konverzije. Današnji A/D konvertori su obično 12-16 bitni, a učestanost odabiranja i do 0,5 MHz. To ukazuje da uticaj viših harmonika ne predstavlja problem za tačnost merenja. Međutim, javljaju se novi problemi, vezano za sinhrono-asinhrono odabiranje, vreme konverzije i sl, čiji uticaj ipak nije tako izražen. Na slici 5.16 je prikazan dijagram greške pokazivanja digitalnog brojila za slučajeve raznih tehnika odabiranja. Vidi se da je greška pokazivanja izrazito niska, odnosno da se sa 12 bitnim A/D konvertorom može postići tačnost od 0,05%.



Slika 5.15 – Greška pokazivanja usled struje ispravljača.



Slika 5.16 – Greška pokazivanja digitalnog kWh brojila [9].

5.4.5. Uticaj na električne mašine

Kod transformatora prisustvo harmonika napona povećava histerezisne i gubitke usled vrtložnih struja, kao i naprezanja izolacije. Protok harmonika struje povećava gubitke u bakru tj. Džulove gubitke. Posebno su izraženi gubici u namotima spregnutim u trougao, zbog cirkulisanja harmonika struje koji su multipli od 3, pa se oni moraju predvideti kod projektovanja (naročito ako se radi o ispravljačkom transformatoru). Uticaj viših harmonika se izražava Field-ovim sačinioem, kojim se povećava (množi) izraz za aktivnu snagu gubitaka. Za viši harmonik reda h izraz za aktivnu snagu gubitaka postaje:

$$P_{dod(h)} = k_{F(h)} \cdot R_{dc} \cdot i_{(h)}^2, \quad k_{F(h)} \geq 1 \quad (5.49)$$

gde je $k_{F(h)}$ Field-ov sačinilac, R_{dc} omski otpor jednosmerne struje, a $i_{(h)}$ vrednost struje h -tog harmonika.

Kod rotacionih električnih mašina javljaju se dva efekta: 1. povećani gubici i 2. parazitni momenti.

Gubici usled prisustva viših harmonika se javljaju i u rotorskom i u statorskom kolu, kao i u feromagnetima. U rotorskim i statorskim provodnicima mogu biti veći od gubitaka usled otpornosti, zbog vrtložnih struja i skin efekta. U feromagnetiku doprinose povećanju gubitaka u gvožđu.

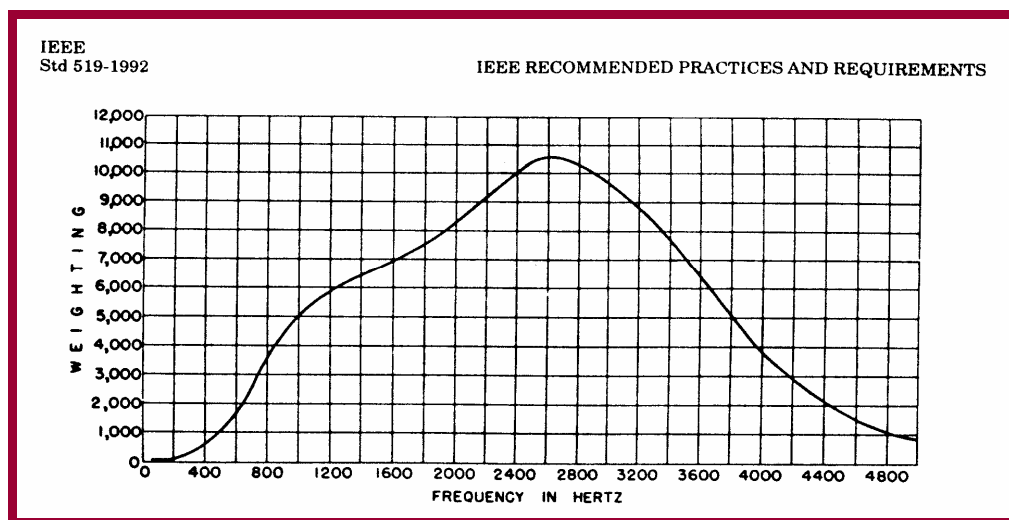
5.4.6. Uticaj na telekomunikacione signale

Harmonici se u telekomunikacionom sistemu generišu, tj. prenose elektromagnetnom interferencijom i to naročito u slučajevima kada su energetska i telekomunikacioni kablovi postavljeni blisko, u istom rovu ili po podu, jedan pored drugog. Glavni izvor harmonika su energetska elektronska pretvarači, a najveći problemi se javljaju u poštama (na telefonskim signalima) i u poslovnim zgradama sa velikim brojem računara ili terminala (na računarskim komunikacijama).

Kao mera uticaja se definišu tkz. težinske funkcije, koje su razradili ili CCITT - psometrijske težinske funkcije, ili Bell Telephone System and Edison Institute - "C-message" težinske funkcije. Na osnovu ove poslednje, je definisan telefonski faktor interferencije u standardu IEEE-519 [11] kao:

$$TIF = 5 \cdot P_f \cdot f \quad (5.50)$$

gde je P vrednost "C-message" težinske funkcije na frekvenciji f. Na slici 5.17 prikazane su vrednosti TIF faktora za razne frekvencije [5]. Ovaj faktor, pomnožen sa strujom (u amperima) daje tkz. I x T proizvod, ili pomnožen naponom (u kilovoltima) kV x T proizvod, gde je T=TIF.



Slika 5.17 - Vrednosti TIF-a za različite frekvencije [5].

Za sada, u praksi ne postoje neka ograničenja za uticaj harmonika na telekomunikacione signale, jer njegova izraženost zavisi od više faktora od kojih su neki subjektivni. Ipak u dokumentu IEEE-519 su date neke smernice za dozvoljenu vrednost proizvoda I x T i to za tri kategorije instalacija (Tabela 5.2): I kategorija su instalacije osetljive na šum, II kategorija su instalacije u poslovnim zgradama i industrijskim pogonima i III kategorija su ostale instalacije [5].

Tabela 5.2. - Smernice za dopuštene vrednosti $I \times T$ proizvoda

Kategorija	O p i s	$I \times T$
I	Nivoi sa malom verovatnoćom da izazovu inteferenciju	do 10000
II	Nivoi koji mogu da izazovu interferenciju	10000 - 50000
III	Nivoi koji će verovatno izazvati interferenciju	veći od 50000

5.5. Standardi i preporuke

Problemom kvaliteta električne energije se bave stručnjaci i naučnici mnogih zemalja od nastanka proizvodnje, prenosa i korišćenja električne energije. Sa razvijanjem i širenjem primene električne energije i tehnologije rada elektro-energetskog sistema pojavljuje se potreba za standardizacijom pojedinih rešenja, odnosno za unapređenjem kvaliteta. Osnovni cilj u tom periodu je bio obezbeđenje pouzdanog napajanja potrošača, koji su po prirodi bili linearni. Stoga je dugo godina definicija kvaliteta bila veoma jednostavna – kvalitet jednako pouzdanost. Međutim, uvođenjem elektronike u banke, poslovne institucije, industrijske pogone i domaćinstva, odnosno pojavom mikroelektronskih kola i informatičkom revolucijom u drugoj polovini dvadesetog veka, pojam kvaliteta dobija širi smisao. Na mrežu se priključuje ogroman broj osetljivih potrošača, koji zahtevaju visok kvalitet napajanja i samog napona. S druge strane, javljaju se kategorija nelinearnih potrošača (energetskih pretvarača), koja intenzivno deformiše talasni oblik konzumirane struje. Potreba za standardizacijom, odnosno limitiranjem nivoa smetnji, postaje esencijalna za nesmetano korišćenje električne energije. Prvo pojedine razvijene zemlje, a zatim i najznačajnije međunarodne organizacije počinju da posvećuju ovom problemu veliku pažnju. Početni standardi ili preporuke vezani za kvalitet napona, donešeni su još krajem šesdesetih godina (1967 – preporuka i standard za limitiranje harmonika u V.Britaniji i SSSR-u, respektivno), a tokom sedamdesetih i početkom osamdesetih godina pridružilo im se još dvadesetak zemalja [1].

U Jugoslaviji, odnosno Srbiji i Crnoj Gori, se ovaj problem aktuelizuje tokom osamdesetih, pa se na savetovanjima elektroenergetičara (JUKO-CIGRE), kao i na drugim stručnim i

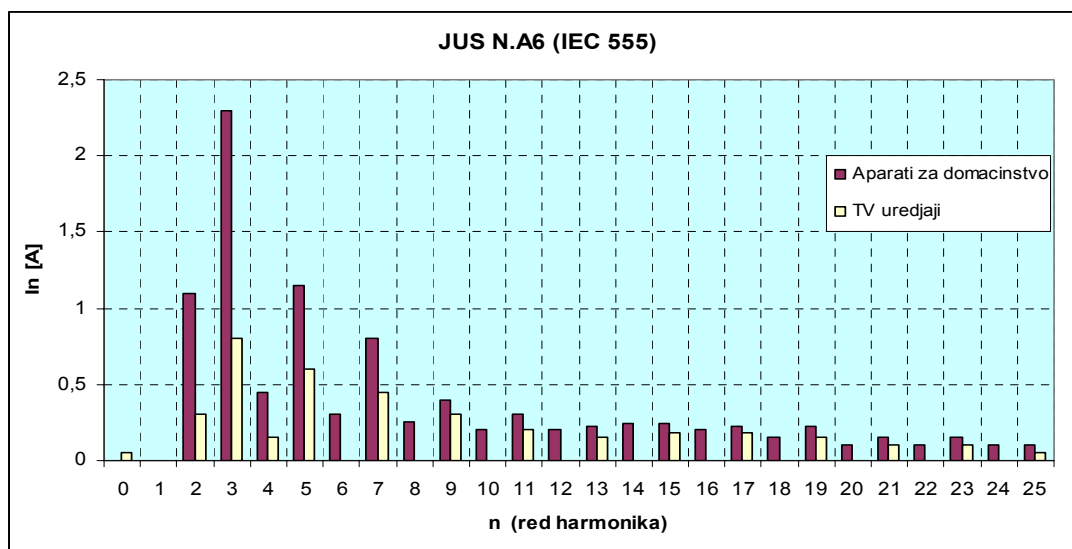
naučnim skupovima, sve češće pojavljuju radovi i diskusije u kojima se zahteva donošenje odgovarajućih preporuka, propisa ili standarda.

Problemom standardizacije kvaliteta električne energije, odnosno limitiranjem uticaja energetske pretvarača na okolinu, a posebno pojavom "zagađenja" mreže višim harmonicima, bavi se više međunarodnih organizacija. Najznačajnija je svakako Međunarodna elektrotehnička komisija - IEC, kao i Evropski komitet za elektrotehničku standardizaciju – CENELEC. Pored ovih međunarodnih organizacija, koje su zadužene za izdavanje standarda, veći broj međunarodnih organizacija razmatra ovaj problem kao svoj stručni interes, od kojih su najuticajnije Institut inženjera elektrotehnike i elektronike – IEEE i Međunarodna konferencija za velike električne mreže - CIGRE.

5.5.1. Standardi i preporuke pojedinih zemalja

Prema podacima sa kojima raspolaže autor, neku regulativu o višim harmonicima su do sada donele (po abecednom redu): Australija, Brazil, Čehoslovačka, Finska, Francuska, Holandija, Irska, Japan, Južnoafrička Republika, Kanada, Mađarska, Novi Zeland, SR Nemačka, Poljska, Sjedinjene Američke Države, Rusija (ex Sovjetski Savez), Švajcarska, Švedska i Velika Britanija. Pristup je bio različit u zavisnosti od ozbiljnosti problema, koje su pojedine zemlje iskusile ili sagledale, i u zavisnosti od karakteristika i konfiguracije mreže i potrošača. Detaljniji podaci o standardima ili preporukama pojedinih zemalja se mogu naći u [1,14].

U bivšoj Jugoslaviji se problem pojave viših harmonika razmatrao u grupi KSN 77 tadašnjeg Saveznog zavoda za standardizaciju - Elektromagnetska kompatibilnost, koja prati aktivnosti tehničkog komiteta TC 77 IEC-a. U tom periodu je izdat standard za kućne aparate i slične uređaje JUS N.A6.101, N.A6.102, N.A6.103, koji odgovara IEC Publikaciji 555 - 1., 2. i 3. deo (slika 5.18). Nakon raspada Jugoslavije rad na ovoj problematici se ugasio, tako da standard za industrijske potrošače niti je izdat niti je u planu njegova izrada.



Slika 5.18 - Limiti za harmonike mrežne struje prema JUS N.A6 standardu : a) za kućne i slične aparate b) za TV aparate.

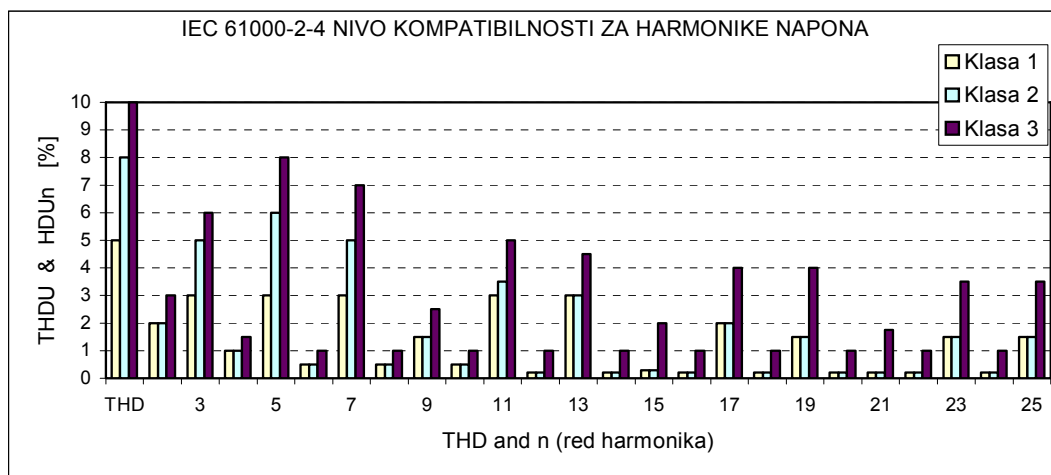
5.5.2. Grupa standarda IEC 61000-2-xx

Ova grupa standarda daje karakteristike okoline u kojoj će biti korišćeni uređaj ili oprema. Pored detaljne klasifikacije okoline, za kvalitet električne energije su interesantni dokumenti vezani za karakteristike industrijske okoline. Jedan od najznačajnijih dokumenata je standard 61000-2-4 [10], koji daje nivoe kompatibilnosti u industrijskim pogonima, odnosno propisuje dozvoljene nivoe deformacije talasnog oblika napona (promene efektivne vrednosti napona, propade napona, kratkotrajnih prekida, nesimetrije, varijacije frekvencije, više harmonike, interharmonike) i to za tri klase elektromagnetske okoline: Klasa 1 – Osetljivi potrošači, Klasa 2 – Sabirnica (PCC) prema javnoj mreži i Klasa 3 – Industrijske mreže. Limiti dati za klasu 2 su detaljno opisani u IEC 61000-2-2, kao nivoi kompatibilnosti za nisko-naponsku i srednje-naponsku javnu mrežu. Na slici 5.19 prikazani su limiti za više harmonike za sve tri klase.

5.5.3. Grupa standarda IEC 61000-3-xx

U ovoj grupi standarda definisane su granične vrednosti za izobličenja, koja su izazvana uređajima ili opremom priključenom na mrežu. Dakle, ovi standardi ograničavaju uticaj nelinearnih potrošača na harmonijski kvalitet napona i time štite mrežu. Ovi standardi su ranije nosili oznaku 555 (na primer: standard IEC 555-1 je sad IEC 61000-3-1) i to je jedina grupa standarda gde postoji ekvivalent u JUS standardima.

Razlikuju se uređaji koji konzumiraju struju manju-jednaku 16A (61000-3-1,2,3) i oni koji vuku struju veću od 16A, kako za nisko-naponske mreže (61000-3-4,5), tako i za uređaje priključene na srednji i visoki napon (61000-3-6,7). Pored toga uređaji su podeljeni u klase u zavisnosti od prirode funkcionisanja (kod uređaja manje snage $I_n \leq 16A$) ili sopstvene snage (kod uređaja veće snage $I_n > 16A$). U prvom slučaju razlikuju se klasa A,B koja obuhvata razne prenosne uređaje, klasa C, koja obuhvata ručne alate i klasa D, koja obuhvata TV prijemnike, PC i druge uređaje koji imaju ispravljač sa C filterom. U drugom slučaju definisana su 3 nivoa u zavisnosti od snage kratkog spoja (S_{sc}) i snage priključenog uređaja (S_{ur}): Nivo 1 za slučaj $S_{sc}/S_{ur} < 33$; Nivo 2 za $S_{sc}/S_{ur} > 33$ i Nivo 3 ako nisu primenljiva prethodna dva nivoa (tada važi za celokupnu instalaciju). Primer graničnih vrednosti za struju je dat u tabeli 5.3.



Slika 5.19 – Limiti za harmonike napona prema IEC 61000-2-4 [10].

Tabela 5.3 – Preporučeni nivoi kompatibilnosti za harmonike struje po IEC 61000-3-4

	Standard IEC 61000-3-4					I>16A
	HD In - SAMO NEPARNI (%)					THDI (%)
S_{SC}/S_{ur}	n=5	n=7	n=11	n=13	n>14	
<66	14	11	10	8	/	16
120	16	12	11	8	/	18
250	30	18	13	8	/	35
450	50	35	20	15	/	58
>600	60	40	25	18	/	70
- Parni harmonici su limitirani sa: $I_n/I_1 = 16/n$						
- Harmonici umnožak od 3 nisu prisutni						
- Parni harmonici su limitirani sa: $I_n/I_1 = 16/n$						

5.5.4. Granične vrednosti harmonika po CENELEC – EN 50160

Za harmonike u NN i SN mreži je izdat standard EN 50160, koji je skoro jednak IEC standardu 61000-2-2 [15]. Razlika je jedino kod nekih nekarakterističnih harmonika (12-ti, 14-ti, 15-ti, 16-ti, 18-ti...), gde je IEC limit nešto niži. U tabeli 5.4 dat je pregled graničnih vrednosti viših harmonika napona za NN i SN distributivnu mrežu

Tabela 5.4 - Granične vrednosti harmonika za NN i SN mreže

Neparni harmonici, koji nisu umnožak 3		Neparni harmonici, koji su umnožak 3		Parni harmonici	
N	U_n/U_1 (%)	n	U_n/U_1 (%)	n	U_n/U_1 (%)
5	6,0	3	5,0	2	2,0
7	5,0	9	1,5	4	1,0
11	3,5	15	0,5	6 – 24	0,5
13	3,0	21	0,5		
17	2,0				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

5.5.5. IEEE 519 i IEEE 1159

Kao rezultat istraživanja viših harmonika, još 1979. godine publikovan je izveštaj sa projekta IEEE P519, na osnovu kog je 1981. god. izdat IEEE standard 519-1981 - "Vodič za harmonijsku kontrolu i kompenzaciju reaktivne energije statičkih energetske pretvarača". Ovaj standard dopunjen je i prerađen 1992. godine i izdat kao novi IEEE standard 519-1992 pod nazivom: "Praktične preporuke i zahtevi za kontrolu harmonika u elektroenergetskim sistemima" [5]. U toku je priprema dopunskog dokumenta, koji treba da omogući lakšu praktičnu primenu standarda – IEEE P519a /D5 iz 1996. god. pod nazivom: "Uputstvo za primenu harmonijskih limita u mreži".

Standard uvodi dva kriterijuma za limitiranje harmonika:

1. limitiraju se harmonici struje, koje korisnik može da unese u elektroenergetski sistem i
2. garantuje se kvalitet napona, koji se isporučuje potrošaču, tj. limitira se ukupna distorzija napona u mreži.

U tabeli 5.5 dati su limiti za harmonijsku distorziju struje, s tim da se vidi da su oni povezani sa nivoom korišćenih "harmonijskih kapaciteta" mreže (tj. odnosom struje kratkog spoja i maksimalne struje pretvarača) i naponskim nivoom na koji je priključen. Time je usavršen metod, primenjen delimično u standardima Velike Britanije i Australije, čiji je cilj davanje istih prava svim potrošačima (i velikim i malim) da "zagađuju" mrežu. Istovremeno je taj nivo "zagađenja" ograničen na vrednost koju mogu da tolerišu ostali potrošači i sama mreža.

Limiti za maksimalnu distorziju napona, koja može biti prisutna u mreži su dati u tabeli 5.6. Vidi se da ove vrednosti zavise od naponskog nivoa mreže i da nisu date izdiferencirano za pojedinačne harmonike. Međutim, slično kao kod IEC standarda, razlikuju se tri grupe (klase) limita: Specijalne aplikacije (u stvari veoma osetljivi potrošači), Opšti sistem (javna mreža) i Namenski sistemi (specijalni industrijski potrošači). Ove grupe se razlikuju po visini limita. Na slici 5.20 je dato poređenje nivoa limita ovih grupa.

Oblast merenja i praćenja (monitoringa) kvaliteta električne energije obuhvaćena je dokumentom IEEE standard 1159-1995: "Praktične preporuke za praćenje kvaliteta električne energije", koji je izdat 1995. god. [16]. Standard se sastoji iz 8 poglavlja u kojima su date definicije, opis pojava, ciljevi merenja i praćenja, merna instrumentacija, tehnike korišćenja i način tumačenja dobijenih rezultata.

Tabela 5.5 - Limiti za harmonike struje po izmenjenom IEEE-519 (USA)

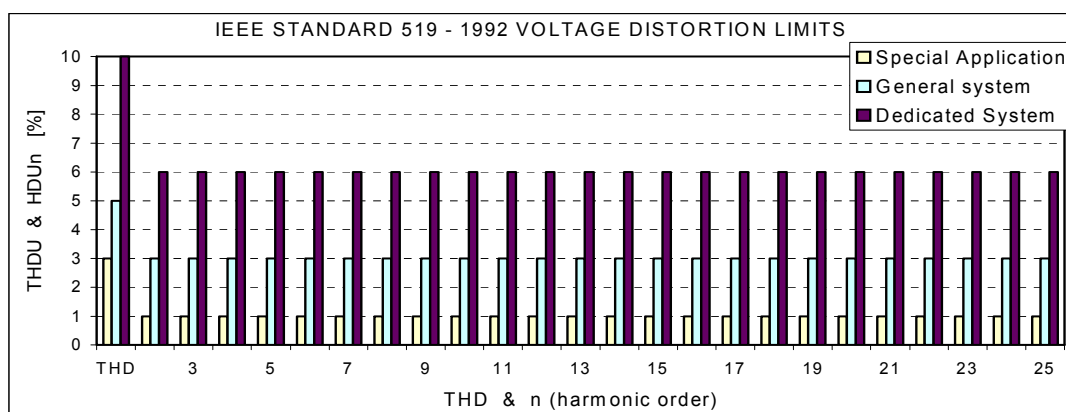
	MAKSIMALNO DOZVOLJENI HARMONICI STRUJE U ODNOSU NA FUNDAMENTALNI U (%) ZA NAPONSKI NIVO OD 2.4 kV DO 69 kV					
	POJEDINAČNA HARMONIJSKA DISTORZIJA RED HARMONIKA (n) - SAMO NEPARNI					UKUPNA HARMON. DISTORZIJA THDI _{ac} (%)
I _{ac} /I _L	n<11	11<n<17	17<n<23	23<n<35	n>35	
<20*	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20-50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50-100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100-1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0
- Parni harmonici su limitirani na 25% vrednosti limita za neparne.						
- * Svi generatori su limitirani na ove vrednosti, bez obzira na stvarnu vrednost I _{sc} /I _L .						

- Legenda: I_{SC} = Maksimalna struja kratkog spoja na sabirnicama (PCC)
 I_L = Maksimalna struja potrošača (osnovni harmonik) na sabirnicama
- Za sabirnice sa naponima od 69 kV do 138 kV limiti su 50% od gornjih limita.
- Za sabirnice sa naponima iznad 138 kV potrebna je procena od slučaja do slučaja.

Tabela 5.6 - Limiti za THD mrežnog napona prema IEEE-519-1992 (USA)

HARMONIJSKA DISTORZIJA NAPONA NA SABIRNICAMA U (%)			
Napon mreže	2.3-69 kV	69-138 kV	> 138 kV
Maksimum za pojedinačne harmonike	3.0	1.5	1.0
Ukupna harmonijska distorzija (THDU)	5.0	2.5	1.5

Posebno su vredne preporuke vezano za načine merenja i praćenja pojedinih pojava. Pored moguće instrumentacije, opisani su i praktični problemi odabiranja mernog mesta, povezivanja (ožičenja), uzemljenja, načini galvanske izolacije i postavljanja pragova osetljivosti za reagovanje pojedinih instrumenata (date su vrednosti za 120V sistem). Na kraju su data uputstva za tumačenje dobijenih rezultata i prepoznavanje o kojim poremećajima se radi.



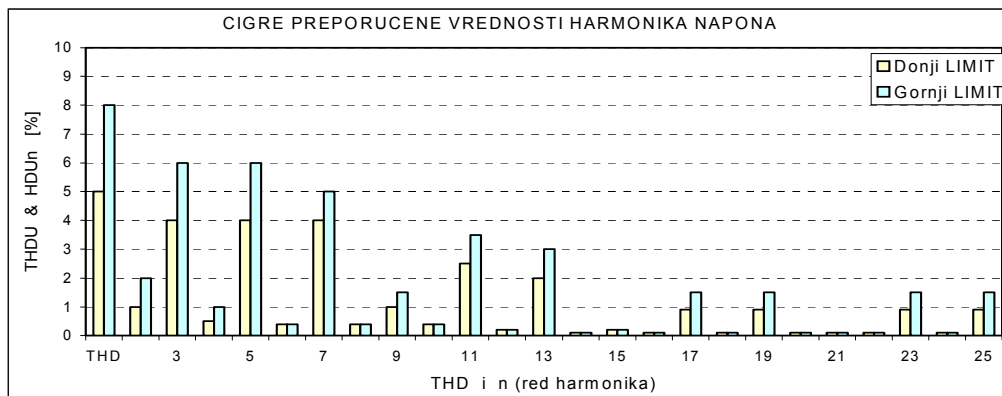
Slika 5.20 – IEEE 519 standard: limiti za harmonike napona.

5.5.6. Preporuke CIGRE-a

Međunarodnu konferenciju za velike električne mreže (CIGRE) sa sedištem u Parizu čini 15 studijskih komiteta u koje su učlanjeni stručnjaci iz 53 zemlje sveta. U svakoj zemlji postoje nacionalni komiteti, koji su organizovani slično međunarodnom CIGRE-u.

Problemom kvaliteta električne energije bavi se Studijski komitet C4 – Tehničke performanse sistema (SC C4). Radne grupe ovog komiteta su već pripremili nekoliko izveštaja vezanih za mrežne harmonike i druge parametre kvaliteta [17,18]. U njima su razmatrani karakterističnu parametri izobličenja, kriterijumi za izražavanje negativnog uticaja harmonika, metod merenja harmonika, način za prethodni proračun mrežnih harmonika napona i struje, kao i za procenu egzistirajućih harmonika u mreži, filteri i rezultati međunarodnog upitnika u vezi izobličenja napona. Na slici 5.21 su date preporučene granične vrednosti po dokumentima CIGRE-a iz 1981. godine [17].

Ovi dokumenti predstavljali su osnovu kod priprema i usvajanja međunarodnih IEC standarda. Na primer, preporučene vrednosti ukupne i pojedinačne harmonijske distorzije napona iz [17] (gornji limiti - oni koji se retko dostižu u mreži, ali imaju sa veliku verovatnoću izazivanja negativnih efekata) su kasnije usvojeni od IEC-a i primenjeni u IEC standardu 61000-2-4 za klasu 2 (slika 5.19).



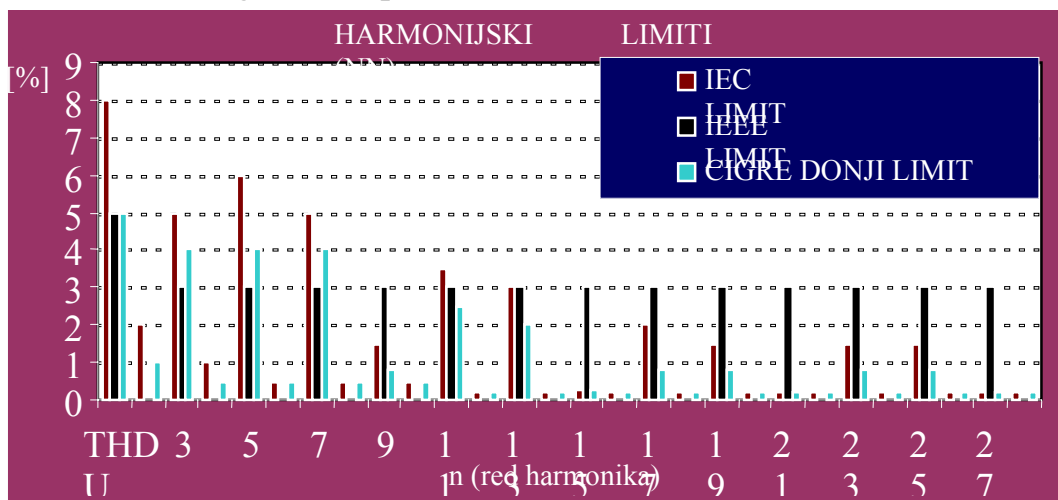
Slika 5.21 – Granični nivoi po preporukama CIGRE-a [17].

5.5.7. Poređenje graničnih nivoa za harmonike napona

Kao referenca tj. mera kvaliteta su korišćeni limiti dati u standardu IEEE-519 [5]. Za tretirano zagađenje i registrovani spektar oni su se pokazali čak suviše restriktivni, jer premašenje limita harmonika struje nije izazvalo očekivano povećanje harmonika napona. Pored ovih limita, važno je pomenuti i one koje su izdale

međunarodne organizacije IEC i CIGRE-a. CIGRE daje dva seta limita - gornje i donje. Gornji limiti, koji su prihvaćeni od IEC-a i izdati kao IEC 1000-2-2 standard [19], su nešto viši od IEEE-519 limita ($THDU_{\text{limit}}=8\%$). To su oni koji se retko dostižu u mreži, ali imaju veliku verovatnoću izazivanja negativnih efekata. S druge strane donji limiti CIGRE-a, za koje je verovatno da se premašuju u blizini velikih izvora harmonika, s tim da imaju manju verovatnoću izazivanja negativnih efekata, su nešto viši (blaži) od onih u IEEE-519 standardu za harmonike reda $n \leq 7$, ali strožiji za harmonike većeg reda.

Na slici 5.22 dato je poređenje dozvoljenih nivoa viših harmonika u distributivnoj mreži prema standardima IEEE-519, IEC-61000 i CIGRE preporuci (donji limiti) za priključenje na javnu mrežu (CIGRE – gornji limiti su jednaki sa IEC-ovim, pa nisu posebno naznačeni). Vidi se da su IEC i CIGRE više pažnje posvetili karakterističnim harmonicima (3-ći, 5-ti, 7-mi, 11-ti, 13-ti..), dok ostali nisu dopušteni. IEEE tretira jednako sve više harmonike, što u praksi može biti nezgodno za primenu.



Slika 5.22 - Poređenje IEC, IEEE-519 i CIGRE (donjeg) limita za NN mrežu.

5.6. MERENJE VIŠIH HARMONIKA

Prvobitni uređaji za merenje harmonika u distributivnoj mreži su imali jednostavne zahteve: da mere individualne harmonike i/ili računaju individualnu i ukupnu harmonijsku distorziju. Nagli razvoj mikroelektronike, odnosno uvođenje brzih mikroprocesora ili kompletnih računara u merne sisteme pružio je čitav niz novih mogućnosti kod detekcije, merenja, memorisanja, analize, statističke obrade i dr. Danas merenje viših harmonika u distributivnoj mreži obavljaju specifični uređaji, visokih zahteva i performansi. Načini merenja harmonika, merne veličine, obrada mernih rezultata, njihova prezentacija, kao i ostali zahtevi su se tokom godina uvećavali, ali i delimično kristalisali. Oni sad definišu i glavne karakteristike savremenih mernih sistema. Taj proces je još uvek u toku, podstaknut konstantnim razvojem mikroelektronike i otvaranjem novih mogućnosti merenja i obrade rezultata.

Na bazi poznatih realizovanih mernih sistema i iz autorovog sopstvenog iskustva mogu se sumirati sledeći zahtevi, koje moraju da zadovolje merni uređaji (sistemi) pri merenju i praćenju viših harmonika:

1. mogućnost merenja na bilo kojoj tački u distributivnoj mreži ili na više tačaka simultano sa centralizovanim procesiranjem.
2. višekanalni ulaz, minimalno 7 ulaza - tri mrežna napona, tri struje i struja neutralnog voda.
3. širok opseg mernih opcija: vremenski oblik napona ili struje, frekvencija, amplituda harmonika, individualna i ukupna harmonijska distorzija, spektar, vremenska funkcija pojedinačnih harmonika i THD, poređenje sa zadatim standardima i dr.
4. alternativne opcije: merenje faze harmonika, određivanje smera protoka harmonika, merenje snage - aktivne, reaktivne i harmonijske, određivanje frekventne karakteristike impedanse voda i dr.
5. sva očitavanja moraju se uzimati simultano ili najviše u broju perioda osnovnog harmonika jednakom broju korišćenih ulaza.
6. merni uzorak treba da obuhvata do 30 perioda sa usrednjavanjem na jednu periodu.
7. sistem mora imati mogućnost nenadgledanog rada u dužem vremenskom periodu: do 7 dana ili čak 1 mesec.
8. obrada podataka mora biti on-line (u toku rada) sa reprezentovanjem rezultata na grafičkom displeju.

9. sakupljeni podaci moraju biti memorisani u trajnoj memoriji uređaja, odnosno internog računara i to u obliku i formatu koji će omogućiti njihovu off-line (kasniju, naknadnu) obradu korišćenjem specijalnog ili komercijalnog softvera.
10. sistem mora biti baziran na većem korišćenju softvera nego hardvera, da bi se postigla veća fleksibilnost.
11. opseg harmonijskog merenja mora biti do 50-tog harmonika, a najviše do 100-tog harmonika.
12. maksimalna greška merenja amplitude mora biti 1% pune skale.
13. maksimalna greška merenja faze mora biti ± 2 stepena za prvih petnaest harmonika.
14. A/D konverzija sa 12 bita i minimalnom frekvencijom odabiranja od 6.4 kHz (128 odbiraka u periodu) je potrebna.
15. merenje sa ovim sistemom treba da bude jednostavno na bazi lako razumljivih naredbi ili softverskog menija.
16. sistem mora biti lako prenosiv, što manjih dimenzija i sa mogućnostima dograđivanja.

5.6.1. Kratak prikaz savremenih sistema za merenje

Početkom devedesetih godina prošlog veka, mali broj komercijalnih firmi se opredeljivao da ponudi uređaje za merenje viših harmonika, koji bi odgovarali gornjim zahtevima. Oni su se uglavnom razvijali u okviru istraživačkih projekata na univerzitetima ili istraživačkim institutima [2,3]. Osnovna karakteristika sistema, koji su realizovani u tom periodu, je da su kompjuterski bazirani, da se sastoje od dve ili više hardverskih jedinica i da su orijentisani na široko korišćenje softvera.

U kasnijem periodu, pojavljuje se raznovrsna ponuda mernih uređaja i sistema. Ručni, monofazni, koji daju skraćeni spektar, a opremljeni su strujnim klještima, tako da je priključenje i samo merenje veoma jednostavno. Prenosni, trofazni, koji vrše kompletno merenje, daju izveštaje na papirnoj traci ili u elektronskom obliku (na disketi). Složeni prenosni merni sistemi, koji u sebi sadrže kompletan računar i kompleksan softver za merenje i praćenje viših harmonika, ali i drugih parametara kvaliteta električne energije (flikera, varijacija napona i dr.) [1].

Na savremenom tržištu kvaliteta električne energije jedna od najznačajnijih komponenti su uređaji za merenje i praćenje. Tokom poslednjih godina pojavio se veliki broj raznovrsnih mernih uređaja za merenje ili praćenje parametara kvaliteta električne energije. Oni se uglavnom baziraju na definicijama, metodama, zahtevima i mernim

karakteristikama datim u standardima EN 50160 i IEEE 1159. Na taj način obezbeđena je delimična standardizacija samih uređaja i mernih metoda, mada su sami standardi još uvek prilično široki.

Međutim, veliki broj podataka, koji se dobiju ovakvim merenjima, prouzrokovao je da se veliki broj proizvođača merne opreme posveti i razvoju softvera za prihvatanje, prezentaciju i analizu. Takvi softveri se konstantno ažuriraju i često daju i kao besplatni (free download).

Novi momenat predstavlja veoma brz razvoj Internet mreže i pojava veoma jeftinog mrežnog hadvera. Time je omogućeno da se pojave, takođe po ceni veoma pristupačni uređaji za praćenje (monitoring), koji se stalno pozicioniraju na pojedine tačke u mreži i koji konstantno šalju merne rezultate glavnom serveru, koristeći Internet mrežu (žičnu ili bežičnu). Oni se mogu i on-line očitati, odnosno u realnom vremenu posmatrati pojedini parametri kvaliteta. Time je omogućeno da stanje kvaliteta električne energije postane javno dostupno svim zainteresovanim stranama, što znatno poboljšava i pojednostavljuje mogućnosti tržišnog tretiranja električne energije.

Očigledno je da jedan sveobuhvatni pregled tržišta uređaja za kvalitet električne energije predstavlja ozbiljan i veoma obiman zadatak. Da bi se izbor suzio, ovde neće biti govora o softverima za obradu i prikazivanje parametara, jer oni obično idu zajedno sa samim uređajima. Oni su vezani za određenog proizvođača, odnosno tip uređaja i besplatno skidanje sa mreže ima smisla samo ako se poseduju uređaji dotične firme. U ovom domenu nije još došlo do standardizacije, tako da se često kompetitivne prednosti određenog proizvođača najizrazitije očitavaju upravo u softverskoj podršci.

Uređaji za merenje kvaliteta električne energije se pojavljuju u tri klase ili grupe proizvoda:

1. ručni i prenosni (portabl) uređaji,
2. stacionarni uređaji za merenje i kratkotrajni monitoring i
3. mernih sistemi za permanentno merenje i praćenje.

Ovi uređaji su uglavnom opremljeni sa svim potrebnim dodacima u cilju što jednostavnijeg priključenja na merno mesto, kao i odgovarajućim softverima za prihvatanje, obradu, analizu i prikazivanje raznih parametara kvaliteta električne energije. U poslednje vreme, neki modeli su opremljeni i mrežnim karticama za umrežavanje i komunikaciju preko Interneta.

5.6.2. Strategija i ciljevi merenja

Merenje viših harmonika je postupak, koji zahteva planski pristup i odgovarajuću strategiju. Pošto je pojava i intenzitet viših harmonika uslovljena velikim brojem parametara, na osnovu jednog merenja nije moguće izvući validne zaključke o prisustvu viših harmonika. Zbog toga merenje u stvari podrazumeva čitav niz pojedinačnih merenja, tj. višednevno praćenje nivoa viših harmonika, sa ciljem da se dobiju informacije o nivoima tokom celog dana i tokom cele jedne kalendarske nedelje. Kako i mesto merenja, odnosno tip potrošača, koji su priključeni na neku sabirnicu utiče na nivo harmonika, merenje mora da obuhvati razne lokacije u karakterističnim tačkama elektroenergetskog sistema. Rezultati merenja treba da posluže za ocenu kvaliteta isporučenog napona neke distributivne organizacije. Iz tog razloga merenje se uvek sprovodi na mestu, odnosno sabirnici u mreži, koja je direktno okrenuta krajnjem potrošaču ili mreži druge vrste (industrijskoj mreži, prenosnoj mreži i sl.). Takođe, važna je informacija i o prostiranju viših harmonika kroz distributivnu mrežu, pa se merenja sprovode i na različitim naponskim nivoima u dubini mreže. I najzad, merenja moraju da potvrde teorijske postavke i analize, pa se određen broj mernih ciklusa mora odvijati i na sabirnicama bliskim potrošačima, naročito unutar velikih industrijskih preduzeća.

Kao primer primenjene strategije može da posluži merenje viših harmonika koje je obavljeno na teritoriji elektrodistributivne mreže firme »EPS - JP Elektrovojvodina«. Ono je planirano i izvedeno u širokom opsegu, u dužem vremenskom periodu, u raznim meteorološkim uslovima, godišnjim dobima i na više lokacija, koje se karakterišu različitim tipovima potrošača. Pojedinačne seanse merenja su trajale po 7 dana, najčešće sa intervalom od po 10 minuta. U oblasti većih gradova (Novi Sad i Subotica) izdvojeno je 5 karakterističnih tipova potrošača: 1. Stambene oblasti, 2. Poslovne oblasti i zgrade, 3. Industrijska oblast, 4. Univerzitetski centar i 5. Mešovite oblasti (poslovno-trgovačko-stambene). Pored toga izvršeno je merenje u vangradskoj oblasti podeljenoj u tri celine: 1. Prigradska naselja, 2. Manja naseljena mesta i 3. Seoska oblast. Kao posebna grupa tretirani su veliki industrijski potrošači. U svakoj zoni, je realizovano nekoliko merenja, na najpogodnijim lokacijama, koje se izdvajaju određenim užim karakteristikama potrošača. Na taj način su dobijeni rezultati, koje je moguće generalizovati sa dobrim stepenom sigurnosti.

Cilj merenja je dobijanje svobuhvatne slike o prisustvu viših harmonika u mreži na teritoriji određene distribucije, dobijanje osnovnih informacija o nivou, odnosno stanju zagađenosti mreže

poređenjem sa svetskim standardima, lociranje glavnih izvora viših harmonika, kao i formiranje podloga za izradu preporuka za proceduru priključivanja nelinearnih potrošača i propisa o dozvoljenom nivou viših harmonika u mreži.

5.6.3. Načini prikazivanja rezultata merenja

Tokom merenja viših harmonika u mreži dobija se veliki broj podataka. Nakon merenja se vrši analiza, odnosno izračunavanje spektra snimljenih talasnih oblika, te određivanje harmonijskih faktora napona i struje, i to individualne (HD) i ukupne (THD) harmonijske distorzije. Dakle, kao rezultat merenja dobija se ogroman broj podataka, koji se moraju dodatno obraditi, da bi kod prikazivanja bili razumljivi i upotrebljivi.

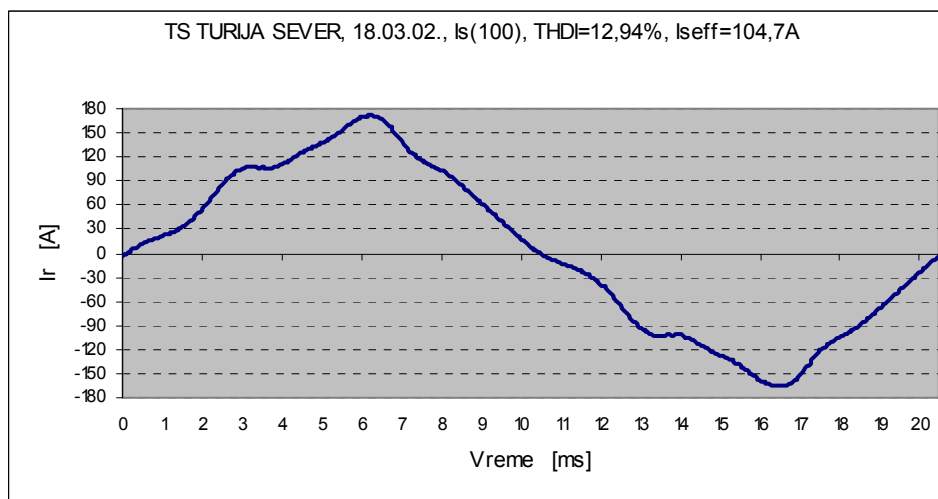
Kvalitetan prikaz rezultata merenja viših harmonika je od velikog značaja za razumevanje pojave i pravilno tumačenje dobijenih rezultata. Cilj je da se na jednostavan način obuhvati veliki broj podataka i da se kroz prikaz uputi nedvosmislena poruka o postojanju ili nepostojanju problema. U praksi se pojavljuje nekoliko načina prikazivanja rezultata:

1. Kontinualni vremenski prikaz,
2. Diskretni vremenski prikaz
3. Prikaz u frekventnom domenu,
4. Statistički prikaz.

Kontinualni vremenski prikaz daje više harmonike u dva oblika:

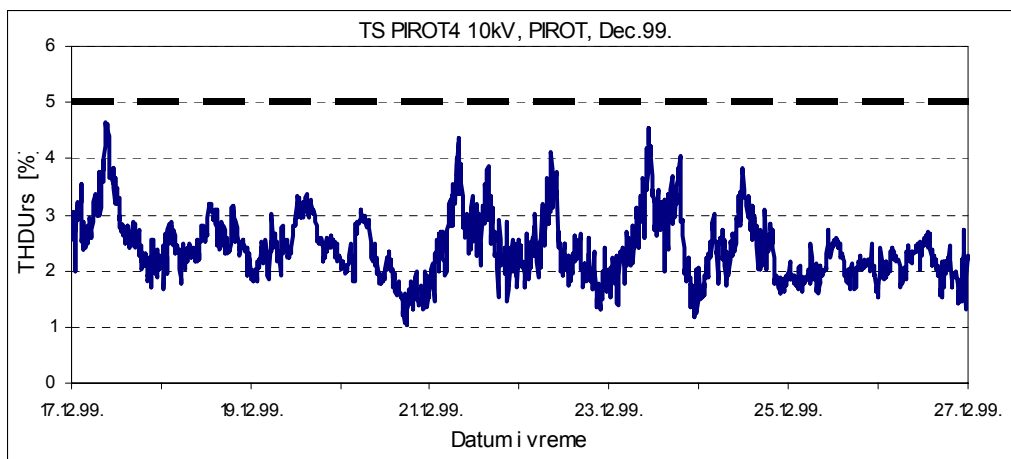
1. u obliku izgleda vremenske funkcije napona ili struje (posredno), i
2. u obliku vremenske promene ukupne ili pojedinačne harmonijske distorzije (THD ili HD) – relativne vrednosti.

Na slici 5.23 dat je primer izgleda talasnog oblika struje i napona snimljenog tokom merenja u distributivnoj mreži na niskonaponskim sabirnicama sa izraženim harmonijskim izobličenjem. Lako se može uočiti odstupanje od sinusnog oblika, odnosno prisustvo viših harmonika.



Slika 5.23 - Primer talasnog oblika struje snimljenog na 0,4 kV izvodu.

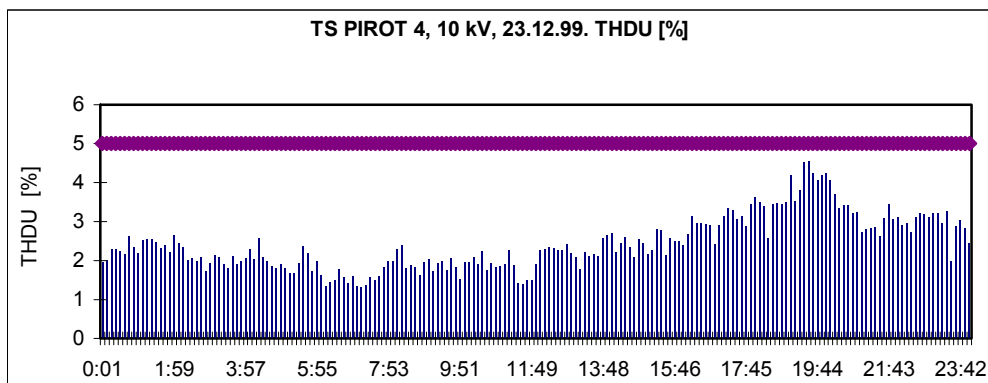
Prikaz relativnih vrednosti viših harmonika u obliku vremenske promene ukupne ili pojedinačne harmonijske distorzije je veoma popularan. Time se lako uočava dinamika promene nivoa harmonika i može se jednostavno povezati sa poznatim pojavama iz rada industrijskog pogona ili domaćinstva. Na slici 5.24 prikazan je primer prikaza vremenske promene THDU tokom jednog mernog ciklusa (10 dana) snimljen na srednje-naponskim sabirnicama.



Slika 5.24 - Vremenska promena harmonika napona (THDU) na sabirnicama 10 kV.

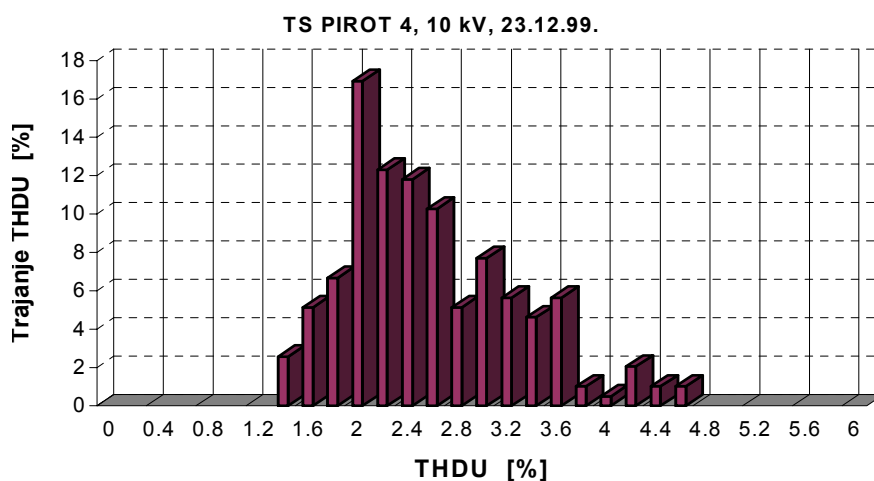
Diskretni vremenski prikaz je posledica merenja, odnosno uzimanja uzoraka talasnih oblika struje i napona ili izračunavanja THD parametara u jednakim intervalima od po 10-15 minuta. Na dijagramu merenja THDU (slika 5.24), zbog velikog broja podataka (1008 merenja), takva diskretnost se vizuelno gubi. Međutim, ako se dijagram uveća, na primer, posmatranjem dnevnog dijagrama, ona

postaje očigledna. Na slici 5.25 predstavljen je jedan takav dnevni dijagram, izvađen iz rezultata merenja datih na slici 5.24. Ovakav prikaz ukazuje na skokovite promene sadržaja viših harmonika, što se može povezati sa dinamikom rada nelinearnih potrošača – harmoniskih izvora.



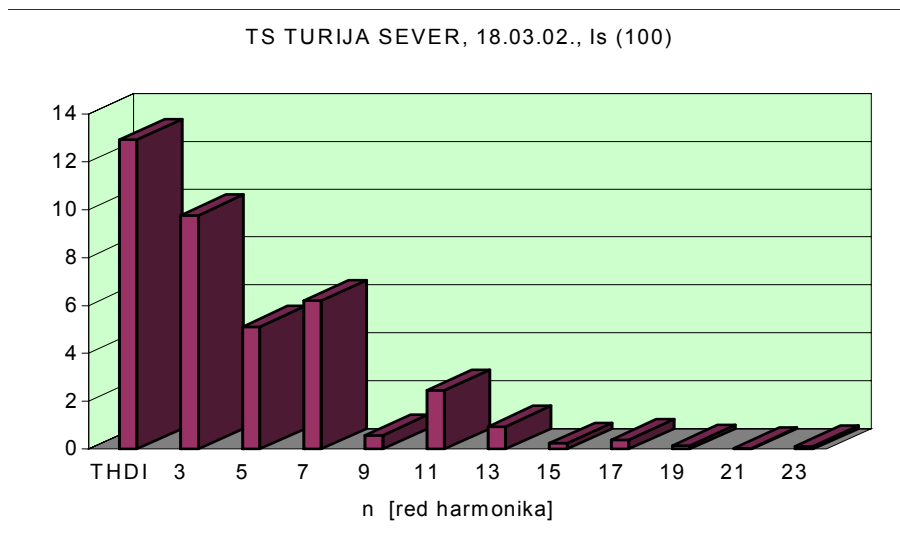
Slika 5.25 – Diskretni vremenski prikaz promene THDU tokom jednog dana.

Za analizu kompletnih rezultata merenja, pogodno je da diskretni vremenski prikaz daje vremensko trajanje pojedinih nivoa THD ili harmonika. Na slici 5.26 dat je primer takvog prikaza za THDU u slučaju merenja prikazanog na slici 5.25. Vidi se, na primer, da se najčešće javlja izobličenje od $\text{THDU} = 2\%$, oko 17% vremena, zatim $\text{THDU} = 2,2\%$, oko 12% vremena, itd., odnosno da se izobličenje između $\text{THDU} = 2\%$ i $\text{THDU} = 3\%$ javlja u 63,2% vremena. Ovakvo predstavljanje je pogodno za procenu o mogućnosti pojave nekog negativnog efekta.



Slika 5.26 – Diskretni vremenski prikaz - trajanje THDU (u %) tokom jednog dana.

Prikaz u frekventnom domenu je rezultat primene Furijeove transformacije na talasni oblik signala. On ukazuje koji su harmonici prisutni ili dominantni i na taj način indirektno na uzroke i opasnosti njihovog prisustva. Na primer, spektar talasnih oblika sa slike 5.23 dat je na slici 5.27. Ovakav prikaz je pogodan i za analizu prostiranja harmonika u mreži.

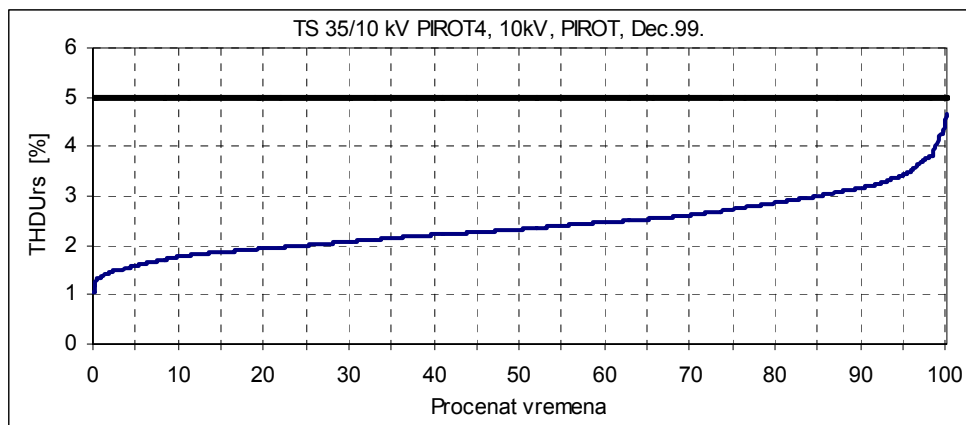


Slika 5.27 - Spektar struje sa slike 5.23.

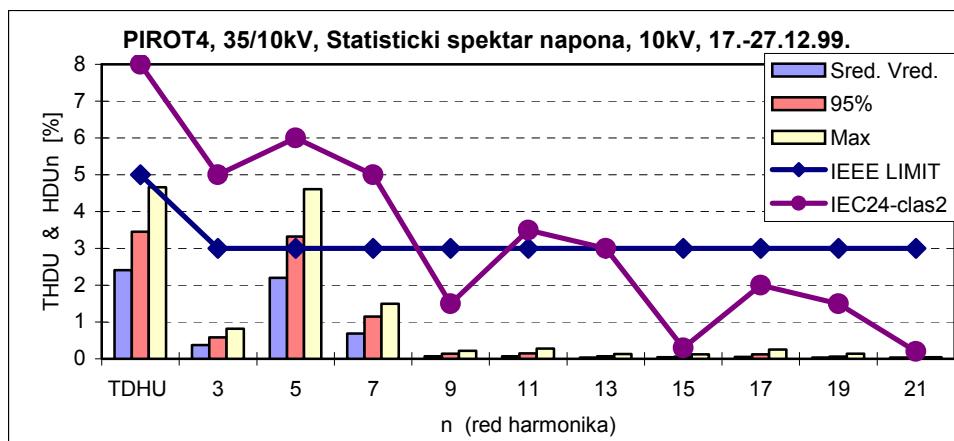
Statistički prikaz S obzirom na veliki broj podataka, koji se prikupi tokom merenja postoji potreba za njihovom statističkom analizom. Kod istraživanja harmonika primarno je da li je premašen određen nivo ili ne, a zatim u kom procentu vremena, pa koliki je prosečan nivo i sl. Zbog toga se statistička obrada ne bavi krivama raspodele, već kumulativnim verovatnoćama. Pored maksimalnog, bitan je i nivo harmonika, koji nije premašen u 95% vremena. Time se uvažava dinamika harmonika, ali se zanemaruju kratkotrajni skokovi. Kritična situacija nastaje ako je taj nivo iznad dozvoljenog (propisanog). Na slici 5.28 prikazan je statistički dijagram za THDU za rezultate merenja sa slike 5.24. Vidi se da je 95% nivo oko 3,5%, dakle u dozvoljnim okvirima, ispod limita od 5%.

Kombinovani, statističko-frekventni prikaz takođe daje dobru osnovu za donošenje zaključaka. Na slici 5.29 predstavljen je primer prikaza rezultata merenja nakon harmonijske i statističke analize – statistički spektar napona za usrednjene vrednosti viših harmonika napona za sabirnice industrijskog potrošača. Ucertane su srednja vrednost, 95% verovatnoća, maksimalna vrednost, kao i maksimalno dozvoljeni nivoi po IEEE-519 [5] i standardu IEC 61000-2-4 za klasu 2 [10]. Može se uočiti da maksimalne vrednosti idu i iznad IEEE

limita, ali su unutar IEC granica. To ukazuje na mogućnost pojave negativnih efekata.



Slika 5.28 – Kumulativna verovatnoća – THDU sa slike 5.24.



Slika 5.29 – Statistički spektar napona na sabirnicama industrije “Tigar”, Pirot.

5.7. METODE SMANJENJA ILI ELIMINISANJA VIŠIH HARMONIKA

Viši harmonici su stalno prisutni u mreži u većem ili manjem procentu. Međutim, u određenom trenutku oni mogu da postanu problem. To se dešava ako je izvor harmonika suviše velik, ako je putanja harmonika struje suviše dugačka, odnosno ako je reaktansa kola velika, ili ako je odziv sistema takav da dovodi do pojačanja harmonika (rezonansa). Da bi se harmonijski problem smanjio ili eliminisao postoji nekoliko osnovnim rešenja:

1. smanjenje intenziteta harmonijskih struja,
2. postavljanje filtera,
3. promena rezonantne frekvencije sistema.

Metode smanjenja intenziteta harmonijskih struja obično podrazumevaju menjanje načina rada pogona, koji generišu harmonike. Takav pristup je teško praktično izvesti, jer to može da utiče na kompletan proizvodni proces, odnosno mogće je jedino u fazi projektovanja. Međutim, odgovarajućim sprežanjem transformatora može se nešto uraditi. Sprega namota u trougao dovodi do blokiranja daljeg toka svih harmonika, koji su umnožak od 3. Unošenjem faznog pomeraja od 30 stepeni, sprežanjem sekundara transformatora u zvezdu i u trougao, dobija se efekat 12-pulsnog ispravljača, odnosno eliminišu se 5-ti i 7-mi harmonik. Povezivanje nelinearnog potrošača na izvode sa većom snagom kratkog spoja, takođe smanjuje efekte harmonika.

Cilj postavljanja filtera je da se obezbedi niska impedansa za harmonike struje i na taj način spreči njihovo širenje u mrežu. Zbog toga se filteri najčešće postavljaju paralelno potrošaču i sastoje od kondenzatora sa pridodatim prigušnicom. Rezonantna frekvencija filtera se proračunava uvek da bude nešto ispod frekvencije najnižeg dominantnog harmonika. Time se obezbežuje da filter pravilno radi i u slučaju oscilacija parametara kondenzatora zbog temperature i sl., a i da se izbegne da se antirezonantna učestanost približi učestanosti harmonika. Primena serijskih filtera se ređe primenjuje, a cilj im je da predstavljaju visoku impedansu za harmonike struje i na taj način blokiraju njihovo širenje u mrežu. Detaljnije o vrstama i metodama projektovanju filtera može se naći u [3]. Ovakve vrste filtera nazivaju se pasivnim, za razliku od novijih vrsta – aktivnih. Aktivni filteri su u stvari energetski elektronski pretvarači, koji su tako programirani da vrše kompenzaciju viših harmonika. Sa takvim filterom obezbeđuje se “čista” sinusoidalna struja mreže, a često i faktor snage 1. Složenije

konfiguracije omogućuju potpuno otkljanjanje svih poremećaja, koji utiču na kvalitet električne energije [20].

Promena rezonantne frekvencije sistema je potrebna kad u sistemu ili kod potrošača postoje kondenzatorske baterije za kompenzaciju reaktivne energije. Njihova rezonantna učestanost je često blizu učestanosti karakterističnih harmonika, pa dolazi do neželjenih negativnih pojava. Menjanje veličine kondenzatora, dodavanje serijske impedanse, pomeranje kondezatora na drugu sabirnicu (lokaciju) ili jednostavno potpuno izbacivanje kondenzatora (uz plaćanje cene rada bez kompenzacije) su mere kojima se problem može otkloniti. Na primer, u literaturi [21] je opisano jedno takvo iskustvo. Rešenje problema pojave rezonancije u mreži, koja je dovodila do pregorevanja osigurača kondezatorskih baterija, netačnog pokazivanja instrumenata, čestih kvarova motora i komunikacionih problema, je nađeno u pomeranju rezonantne učestanostivan opsega karakterističnih harmonika (5-ti i 7-mi) smanjenjem broja kondenzatora u bateriji.

Rešavanje problema uticaja harmonika na telekomandne signale se može videti iz sledećeg primera. Telekomandni signali na frekvenciji 200 Hz se koriste za kontrolu osvetljenja [22]. Primećeno je da dolazi do grešaka u radu pojedinih prijemnika. Da bi se otkrio uzrok sprovedena je harmonijska analiza tj. merenje prisustva 2-gog i 4-tog harmonika. Rezultati u su ukazali na povećanu harmonijsku distorziju ovih harmonika i to u periodu vremena koji se poklapa sa terminima najgledanijih emisija na televiziji ($HU_2 \approx 1,5\%$, $HU_4 \approx 1\%$). Preporučene su dve mogućnosti kao rešenje: 1. da se frekvencija telekomandnih signala podigne na učestanost gde je manja verovatnoća ometanja ili 2. da se poveća otpornost telekomandnog sistema na parazitne signale povećavanjem odnosa signal/šum.

Kao specifičan način suočavanja sa harmonicima je administrativni, odnosno ekonomski pristup, gde se posebnim ugovorima i tarifiranjem destimuliše prekomerno generisanje harmonika. Na primer, u Francuskoj je razvijen specijalan ugovor nazvan "Emeraude", koji predstavlja skup tehničkih propisa i obaveza elektrodistribucije, ali i potrošača, a sve u cilju obezbeđenja odgovarajućeg kvaliteta. Posle godinu dana primene, rezultati koje je objavio EDF pokazuju da je na srednjem naponu kod 99% potrošača ispoštovan ugovor, ali da je za kompenzacije dato 150.000 \$ i to najčešće zbog kratkih prekida. U 1995-toj godini je izašao novi tekst ugovora, kojim je dozvoljen znatno manji broj prekida, a 1998. je izvršena njegova revizija, kojom su u ugovor uneseni i problemi vezani za propade napona.

Novija istraživanja idu u pravcu ne samo da utvrde stanje, nego da omoguće i predikciju, ali i da odgovore na pitanje koja je cena degradiranja kvaliteta (harmonijski gubici), odnosno šta i kako dodatno naplatiti od potrošača za rad nelinearnih pogona [23]. Tu je posebno interesantno pitanje tarifiranja viših harmonika i načina na koji se to može uraditi. Rezultati ankete pokazuju da 46% distribucija ima nameru da dodatno naplaćuje generisanje harmonika i flikera, 40% da naplaćuje harmonike preko prividne snage (kVA), a ostale vreme korišćenja, odnosno vreme “zagađivanja”. Pored ovog nije još raščišćeno pitanje merenja viših harmonika i načina iskazivanja njihovog uticaja.

5.8. LITERATURA

1. V.Katić: “*Kvalitet električne energije – viši harmonici*”, Monografija, Univerzitet u Novom Sadu - Fakultet tehničkih nauka, Edicija Tehničke nauke - Monografije, Br. 6, Novi Sad, 2002.
2. R.Ramirez: “*The FFT-Fundamentals and Concepts*”, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1985.
3. J.Arrillaga, D.Bradley, P.Bodger: “*Power System Harmonics*”, John Wiley & Sons, Chichester, 1985.
4. V.Katić: “*Istraživanje viših harmonika u mreži Elektrovojvodine*”, I Savetovanje JUKO CIRED, Zlatibor, Okt.1998, R-2.03.
5. IEEE Standard 519-1992: “*IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*”, Published by IEEE, New York, 1993.
6. R.Stanković, M.Stojić, S.Bogdanović: “*Fourierovo predstavljanje signala*”, Naučna knjiga, Beograd, 1988.
7. K.Srinivasan: “*Harmonics and Symetrical Components*”, *Power Quality Assurance*, Jan/Feb. 1997.
8. C.I.Budeanu: “*Puissances reactives et fictives*”, *Instytut Romain de l'Energie*, Bucharest, 1927.
9. IEEE Tutorial Course: “*Nonsinusoidal Situations: Effects on the Performance of Meters and Definitions of Power*”, Organized by A.Emanuel, IEEE, 1990.
10. IEC Standard 61000-2-4: “*Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2-4: Environment - Compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances*”, International Standard, IEC, Geneve, 2002.
11. R.Redl, P.Tenti, J.D.vanWyk, “*Power Electronics’ polluting effects*”, *IEEE Spectrum*, Vol.34, No.5, May 1997, pp.32-39.

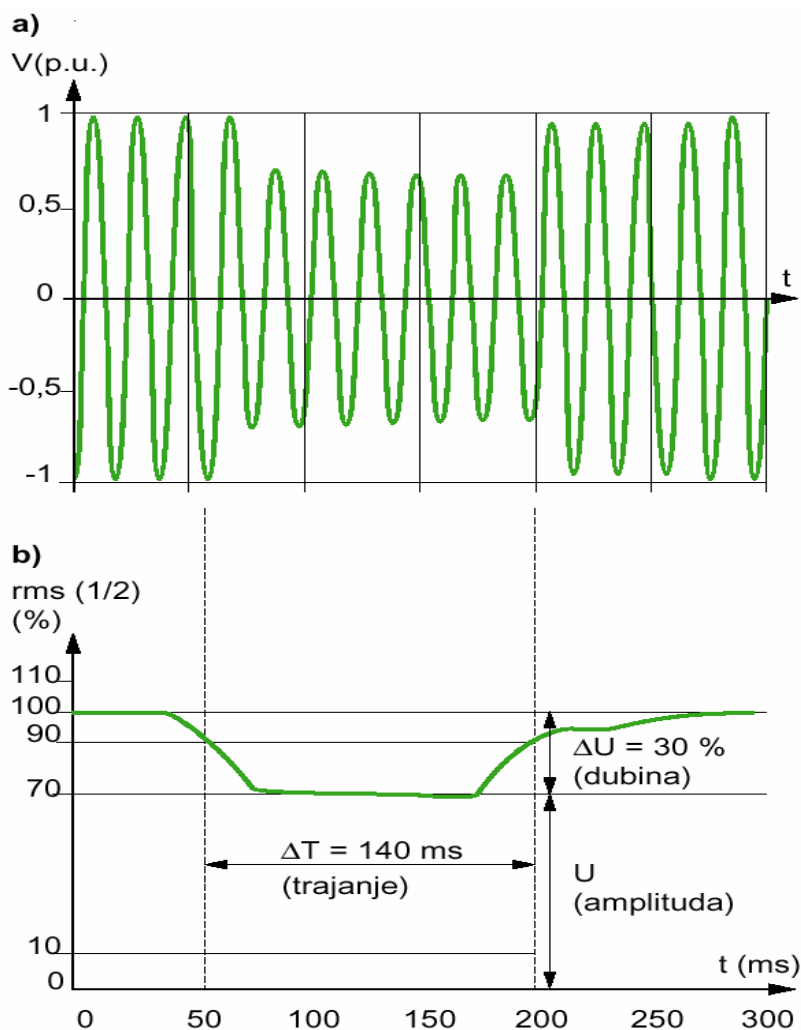
12. D.Reljić, V.Katić, V.Vasić: "Power Quality in Adjustable Elevator AC Drives - A Case Study", International PCIM Conference 2004 - Power Electronics, Intelligent Motion, Power Quality, May 2004, Nürnberg (Germany), pp.836-841.
13. V.Katić, R.Radetić: "Influence on harmonic distortion caused by converters on standard measurement instruments", 2nd European Conference on Power Electronic and Application – EPE'87, Grenoble (France), Sep.1987, pp.713-718.
14. V.Katić: "Network Harmonic Pollution - A Review and Discussion of International Standards and Recommendations", IEEE International Power Electronic Congress - CIEP'94, Puebla (Mexico), Aug.1994, 145-151.
15. EN 50160, "*Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems*", 1999.
16. IEEE Std. 1159-1995: "IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality", *IEEE*, New York, 1995.
17. CIGRE Study Committee 36-WG5: "Harmonics, characteristic parameters, method of study, estimates of existing values in the network", *Electra*, No. 77, July 1981, pp. 35-54.
18. CIGRE Study Committee 36-WG5: "Report on the results of the international questionnaire concerning voltage disturbances", *Electra*, No. 99, July 1985, pp.47-56.
19. IEC 61000-2-2: "*Electromagnetic Compatibility (EMC), Part:2-2: Environment - Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems*", International Standard, IEC, Geneve, 2002.
20. D.Graovac, V.Katić, A.Rufer: "Power Quality Compensation Using Universal Power Quality Conditioning System", *IEEE Power Engineering Review*, USA, Vol.20, No.12, Dec.2000, pp.58-60.
21. J.Toth III, D.Velazquez: "Benefits of an automated on-line harmonic measurement system", *IEEE Transaction on Industry Application*, Vol. IA-22, No.5, Sep./Oct. 1986, pp. 952-963.
22. A.Baggot: "Practical Measurements and Investigations Into the Causes and Effects of Voltage Disturbances on Customers Equipment", Int. Conf. on Sources and Effects of Power System Disturbances, IEE Conf. Public. No. 110, London, 1984, p. 46-51.
23. G.Carpinelli at all, "Probabilistic Evaluation of the Economical Damage due to Harmonic Losses in Industrial Energy System", *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol.11, No.2, Apr.1996, pp.1021-1030.

6. PROPADI NAPONA

6.1. UVOD

Jedan od najnezgodnijih poremećaja kvaliteta predstavlja **propad napona**. Propad se definiše kao **kratkotrajno smanjenje efektivne vrednosti napona između 0,1 i 0,9 nominalne** i to u trajanju od **0,5 periode do 1 minuta** [1]. Propadi napona se mere tako što se posmatra vremenski dijagram promene efektivne vrednosti napona tokom poremećaja.

Na slici 6.1 su prikazani **karakteristični parametri** jednog propada. Međutim, oblik ovih dijagrama nije, kako bi se očekivalo, pravougaoni, niti je jednoznačan. Takođe, **trajanje** i **frekvencija pojavljivanja nisu determinisani**, već zavise od raznih faktora. Sve to podrazumeva da metode merenja i prezentacija rezultata moraju biti specifične.



Slika 6.1 – a) Vremenski oblik napona tokom propada, b) Karakteristični parametri propada napona.

Propad napona posebno pogađa računare, računarske sisteme, mikroprocesorski upravljane uređaje i pogone, te korisnike u procesnoj industriji. Kratkotrajno smanjenje efektivne vrednosti napona izaziva gubitak informacije, prekid tekućeg programa, pad ili resetovanje računara. Oprema koja se koristi u modernim fabrikama (kontroleri procesa, programabilni logički kontroleri (PLC), regulatori brzine, robotika) je tim osjetljivija na propade napona, što se složenost opreme povećava i što je oprema uključena u osjetljivije procese. Čak su i releji i kontaktori za startovanje motora osjetljivi na propade napona, te svojim ispadom mogu izazvati prekid procesa.

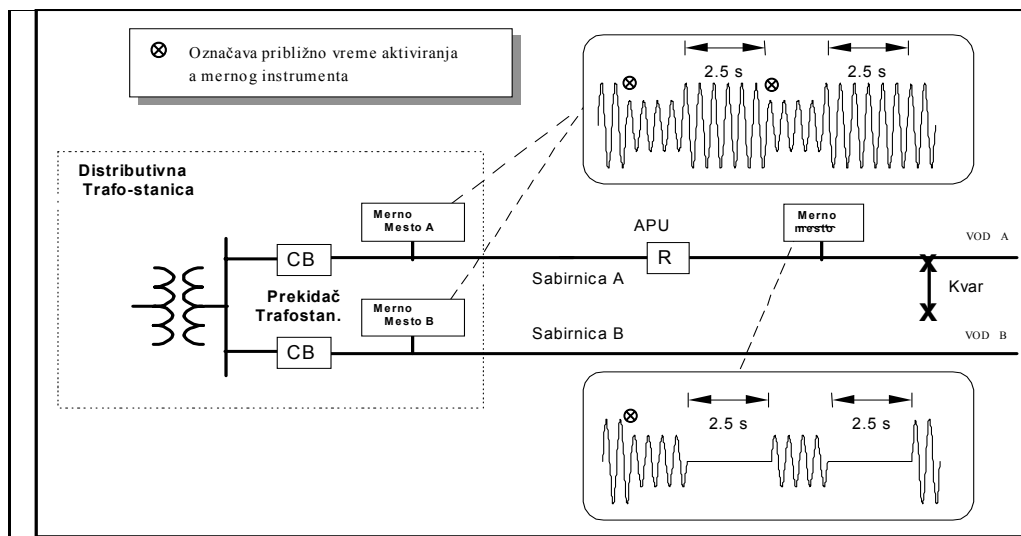
Propad napona nastaje uglavnom zbog kvarova u električnoj mreži, bilo distributivnoj, bilo prenosnoj. Kvarovi se mogu pojaviti i unutar fabrike ili u industrijskoj električnoj mreži.

Kvarovi u prenosnoj mreži pogađaju mnogo više potrošača i na većoj udaljenosti. Potrošači udaljeni i do 100 km od mesta kvara mogu osetiti propad napona. Veliki broj ovih propada potiče od zemljospojeva, koji nastaju zbog vremenskih nepogoda, kao što su: udar munje, vetar, led i sl. Zaprljanost i vlaga na izolatorima, aktivnosti divljih životinja i ptica, kao i nesreće koje su izazvane konstruktivnim ili transportnim radovima, takođe prouzrokuju kvarove. Najčešće se javljaju jednofazni kvarovi - zemljospojevi. Trofazni kvarovi su mnogo ozbiljniji, sa većim intenzitetima struje kvara, ali i ređi. Takođe, kvar na paralelnom fideru može uzrokovati pad napona u napojnom čvoru, koji utiče na sve druge fidere dok se kvar ne otkloni. Tipični opsezi vremena otklanjanja kvara su od tri do tridrideset perioda u zavisnosti od amplitude struje kvara i tipa prekostrujne zaštite.

Za kvarove u mreži postoje osigurači i/ili prekidači u transformatorskim stanicama. Pri delovanju prekidača za automatsko ponovno uključanje (APU), koji ima cilj da eliminiše ("očisti") kvar u prenosnoj mreži, propad se može pojaviti više puta (slika 6.2). Trajanje i broj ovakvih propada su vezani za princip rada način podešenja ovakvog prekidača. Propad napona se održava dok se kvar ne otkloni delovanjem zaštitnog uređaja i/ili prekidača, a u fabrici obično osigurača.

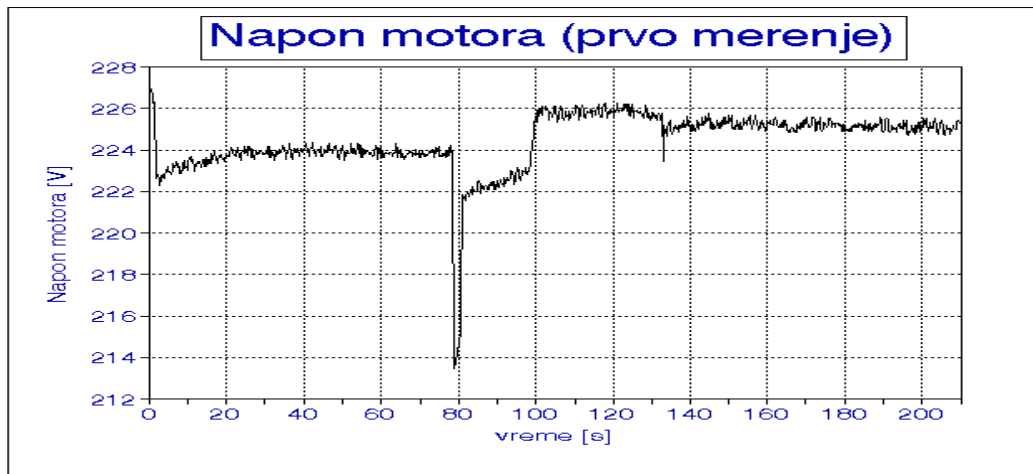
Iako distributeri preduzimaju određene mere da bi sprečili kvarove u električnoj mreži oni se ne mogu u potpunosti eliminisati. Često su ti kvarovi privremeni, što znači da prestaju nakon što se izvrši isključenje i ponovno uključanje odgovarajućih prekidača (APU = automatski ponovni uklop). Na primer, dugogodišnje praćenje beznaponskih stanja u mreži Elektrodistribucije Pančevo pokazuje da

je u periodu od 1979-1990. godine bilo **90,6%** beznaponskih stanja kao posledica prolaznih kvarova uspešno otklonjenih radom APU-a (uspešan APU), a 1990. godine čak **93,4%** [2]. Na teritoriji cele Elektrovojvodine 1990. godine je bilo **92,3%** uspešnih APU-a. Svaka prorada ovih prekidača dovodi do pojave propada napona, pored isključenja one grane u kojoj APU deluje. Kako su kvarovi, a samim tim i propadi napona neizbežni, važno je za potrošače da budu sigurni da je oprema, osetljiva na propade napona, adekvatno zaštićena.



Slika 6.2 – Prikaz pojave propada na sabirnicama u zoni i van zone kvara [3].

Pored ovog, **startovanje velikih motora** ili **velikih potrošača** predstavlja značajan uzrok i može da **izazove pojavu propada napona**. Ovakvi propadi javljaju se u **industrijskim mrežama** ili na **sabirnicama** trafo-stanica **velikih industrijskih potrošača**. Oni su obično **dužeg trajanja** (duže od **60 perioda**) i **karakterističnog oblika**. Najčešće **sniženje amplitude**, koje se pri tome dešava **nije toliko veliko**, ali u pojedinim situacijama može da bude itekako ozbiljno. Na slici 6.3 prikazan je tok promene napona na nisko-naponskoj sabirnici pri kaskadnom startovanju asinhronih motora snage 200 kW i 315 kW.



Slika 6.3 - Propad napona usled uzastopnog starta asinhronih motora od 200 i 315 kW.

6.2. NEGATIVNI EFEKTI POJAVE PROPADA NAPONA

Današnja moderna elektronika je visoko digitalizovana, te je tačnost naponskog nivoa logičke 1 i logičke 0 esencijalna za pravilan rad uređaja ili sistema. Propad napona, kroz napojni deo tih uređaja, unosi poremećaj ovih nivoa, što dovodi do pogrešnog odvijanja programa ili pogrešnog prenosa podataka ili poremećaja u radu. Ovo dalje izaziva ili resetovanje ili prekid programa, odnosno otkazivanje rada uređaja.

Dakle, od propada napona stradaju računari, računarske mreže, audio i video uređaji u domaćinstvu, razni drugi uređaji na bazi mikroprocesora ili sličnih mikroelektronskih kola.

Posledice pojave propada napona naročito su nepovoljne za složene industrijske tehnološke procese, koji su obično pokretani regulisanim elektromotornim pogonima.

Otkaz može da se javi na dva mesta: u upravljačko-regulacionim kolima, koja su izvedena na bazi elektronike ili mikroprocesora (mikrokontrolera ili PLC-ova), ili u kolima relejne zaštite. U tim slučajevima dolazi do reagovanja elektronske zaštite u regulacionim kolima pogona, koja rezultuje isključenjem pogona, odnosno do prekidom procesa. Takođe, može da dođe do otpuštanja elektromagneta u relejima, kontaktorima i drugim sličnim uređajima relejne zaštite i njihovog ispada. Pri tome nastaju velike štete, koje se ogledaju ne samo u zastoju u proizvodnji, nego i u potrebi da se proizvodna linija oslobodi od nastalog škarta i očisti od mogućih zagađenja.

Velika složenost savremenih elektromotrnih pogona uslovljava i njihovu izuzetnu osetljivost na propade napona. Sposobnost industrijskog procesa da neometano radi pri pojavi propada zavisi od svake komponente pogona. Pri analizi osetljivosti pogona uglavnom se vodi računa o prestanku rada usled pojave smetnji u mreži, ali je potrebno proučiti i mogućnost smanjenja ili eliminisanja varijacija u brzini, jer je to veoma bitno u određenim industrijskim granama.

Savremeni elektromotorni pogoni se sastoje iz:

- motora i radne mašine,
- pretvarača energetske elektronike,
- upravljačke elektronike,
- zaštitnih releja,
- kontaktora.

Zaštita čitavog pogona od efekata propada napona podrazumeva zaštitu svake komponente pogona ponasob ili zaštitu čitavog pogona.

6.2.1. Kontaktori

Kontaktori se odlikuju velikom osetljivošću na propade napona. U tabeli 6.1 su sumirani rezultati ispitivanja nekoliko kontaktora. Očigledno je da, bez dodatne opreme kao što je regulator predložen u [4], minimalna vrednost napona koja može da se javi na priključcima namotaja kontaktora i da ne izazove isključenje istog iznosi oko 60% nominalnog napona. Za kontaktor pod rednim brojem 4 ta vrednost je niža i iznosi oko 40%, ali se radi o kontaktoru specijalne namene.

Zanimljivo je da se u katalozima proizvođača kontaktora ili ne navode podaci o opsegu napona napajanja ili se navodi da je taj opseg od 0.85 do $1.1 \cdot U_n$ [5]. To znači da su proizvođači išli na stranu sigurnosti rada, a da u stvarnom pogonu te granice mogu biti i šire. U ovom radu su ispitivani samo releji napajani naizmeničnom strujom. Za releje kojima se upravlja pomoću jednosmerne struje potrebno je uzeti u obzir i uticaj napajanja (ispravljača) na propade napona.

Ispitivani releji nisu mogli da budu testirani na brzinu isključenja. Tokom ispitivanja primećeno je da je brzina izuzetno velika tako da se mogu prihvatiti kao tačni podaci o brzini reagovanja u intervalu od 20 ms [4] do 100 ms [6]. Na osnovu ovoga se može zaključiti da je kriterijum za intervenciju na kolu napajanja kontaktora isključivo amplituda očekivanih propada napona. Za neregulisane elektromotorne pogone neosetljive na varijacije brzine ovo je obično dovoljna mera kompenzacije propada.

Tabela 6.1. Rezultati ispitivanja kontaktora u podnaponskim uslovima

Br.	Model	Nazivne vrednosti			Napon vibriranja (zujanja) [r.j.]	Napon isključenja [r.j.]
		Napon [V]	Frekvencija [Hz]	Termička struja [A]		
1	RK CN 80	220	50	130	0.72	0.54
2	RK CNM 170	220	50	200	0.69	0.67
3	RK CN 250	220	50	300	0.66	0.60
4	EI R-80	220	50	125	--	0.31

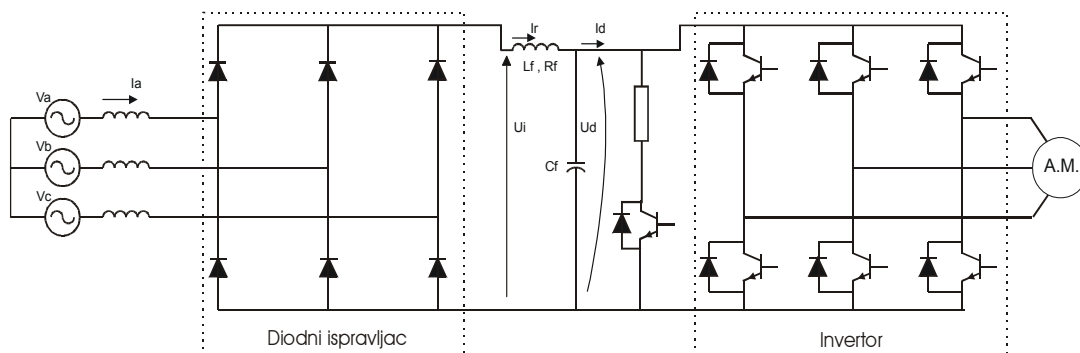
6.2.2. Kontrolna elektronika

Kontrolna elektronika se uglavnom sastoji od mikrokontrolera i PLC-a, koji su i najosetljiviji na propade napona. Za ove uređaje postoje standardi ITIC (Information Technology Industry Council) i CBEMA (Computer Business Equipment Manufacturers Association). Ovih standarda se uglavnom pridržavaju svi veliki proizvođači kontrolera, a prikazani su na slici 6.9.

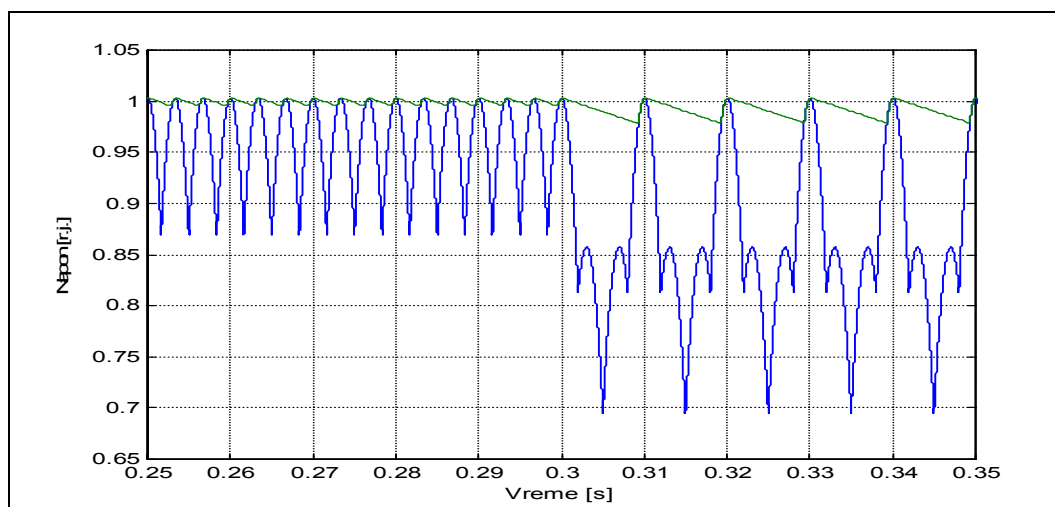
Očigledno je da pomenuti standardi ne obuhvataju sve slučajeve propada napona koji se u praksi javljaju. U [6] se pokazuje da dolazi do ispada kontrolera i za slučajeve propada za koje standard predviđa neometan rad. Na osnovu ovoga je jasno da i zaštiti kontrolne elektronike treba posvetiti dužnu pažnju. Budući da su u pitanju relativno male snage, nije teško ugraditi UPS (Uninterruptable Power Supply) uređaj za potrebe zaštite.

6.2.3. Pretvarači energetske elektronike

Napajanje savremenih pogona sa asinhronom mašinom gotovo isključivo se obavlja posredstvom pretvarača energetske elektronike. Tipično kolo je prikazano na slici 6.4 i sastoji se od šestopulsnog ispravljača, DC međukola sa LC filtrom koji služi za smanjenje harmonijske distorzije struje koju pretvarač vuče iz mreže i invertora. Uticaj propada napona na napon DC međukola može se videti sa grafika prikazanog na slici 6.5. Zahvaljujući nelinearnoj prenosnoj karakteristici ispravljača pad napona DC međukola pri pojavi nesimetričnih propada je znatno manji nego pad napona u mreži. Pogotovu je mali pad napona DC međukola za propad jedne faze.



Slika 6.4 - Standardna realizacija invertorski napajanog pogona sa asinhronim motorom



Slika 6.5 - Napon neopterećenog ispravljača i DC međukola (kondenzatora) pre i u toku propada napona jedne faze

Ovakvi rezultati su prikazani i u [7]. U [8] je analiziran uticaj induktivnosti mreže i LC filtra u DC međukolu na napon i struju, dok je u [9] pokazan uticaj kapacitivnosti LC filtra na napon DC međukola. Rezultati prikazani u tim radovima pokazuju razloge reagovanja zaštitnih releja prilikom propada napona.

Najkritičnija su preopterećenja elektronskih komponenti i to je **prvi uzrok** reagovanja zaštitnih releja. **Drugi uzrok** je premašenje strujnog limita (reaguje prekostrujna zaštita), a **treći** je pad napona ispod dozvoljene vrednosti (reaguje podnaponska zaštita). Razlozi za reagovanje zaštite mogu biti i nesimetrija napona napajanja ako je ugrađena takva zaštita [6]. Poslednji razlog reagovanja zaštite je nedozvoljeno smanjenje brzine kada tehnologija proizvodnje nalaže postojanje takve zaštite, odnosno kada je za proizvodni proces neophodno da brzina motora bude u uskim granicama.

Pošto bi odsustvo ili prepodešavanje zaštite moglo dovesti do ozbiljnih oštećenja motora jedini način za prevazilaženje ovih problema je kompenzacija efekata propada.

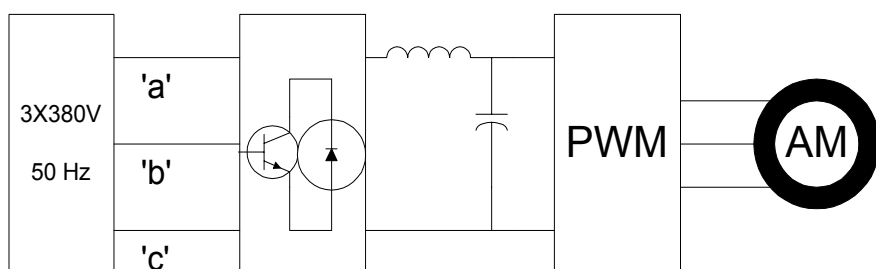
6.2.4. Motori i radna mašina

Pojava **propada napona** u elektroenergetskom sistemu je **neminovnost**, koja se **ne može izbeći**. Zato je potrebno u najvećoj mogućoj meri **istražiti njihov uticaj** na razne vrste električnih uređaja. Takođe je potrebno istražiti mogućnost predviđanja pojave naponskih propada na osnovu podataka dobijenih dugogodišnjim praćenjem njihovog pojavljivanja u određenim delovima elektroenergetskog sistema. Ovi naponski propadi znatno **utiču na pravilan rad elektromotornih pogona** i mogu da nanesu velike **štete** industrijskoj proizvodnji time što izazivaju **prestanak rada** određenog pogona, a ponovno pokretanje proizvodnje je povezano sa **velikim materijalnim izdacima**.

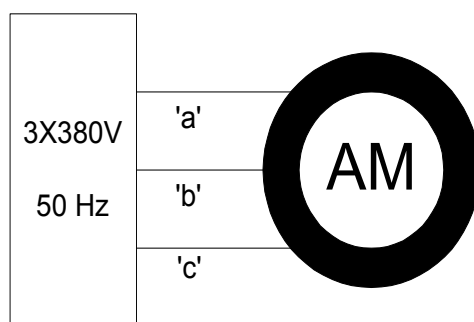
Tačnost regulacije brzine motora zavisi od tehnološkog procesa u kojem pogon učestvuje. Samim tim je određena i **osetljivost** na propade napona. Ako nije ugrađena zaštita koja isključuje pogon kada brzina padne ispod određene vrednosti onda je, usled oscilacije brzine u slučaju propada napona, moguće da dođe do **proizvodnje škarta** i samim tim do **velikih gubitaka**. Krive osetljivosti pogona na propade, kada se kao kriterijum uzima maksimalno klizanje (ekvivalent brzine) može se pronaći u [7].

Priroda opterećenja mašine utiče na njeno ponašanje u uslovima propada napona. Za opterećenje sa **ventilatorskom karakteristikom** uspostavlja se stacionarno stanje na **nižoj brzini** dok pri **konstantnom momentu** radne mašine pad brzine samo izaziva **povećanje struje** i **reagovanje strujne zaštite**. Jedan od metoda zaštite od propada napona upravo se zasniva na mogućnosti smanjenja brzine kod pogona pumpi i ventilatora [10].

Pri pojavi **propada napona** (u sve tri faze istovremeno) od 15% i trajanja 500 ms dolazi do **opadanja brzine motora**, odnosno do **povećanja struje**, koju motor vuče iz mreže. Ovaj zaključak je dobijen na bazi istraživanja dva tipa elektromotornih pogona: sa indirektnom (**regulisani**) i sa **direktnom** konfiguracijom (slika 6.6) [11]. Na slikama 6.7 i 6.8 prikazani su primeri reagovanja brzine i mrežne struje za pomenute dve vrste pogona.



a)

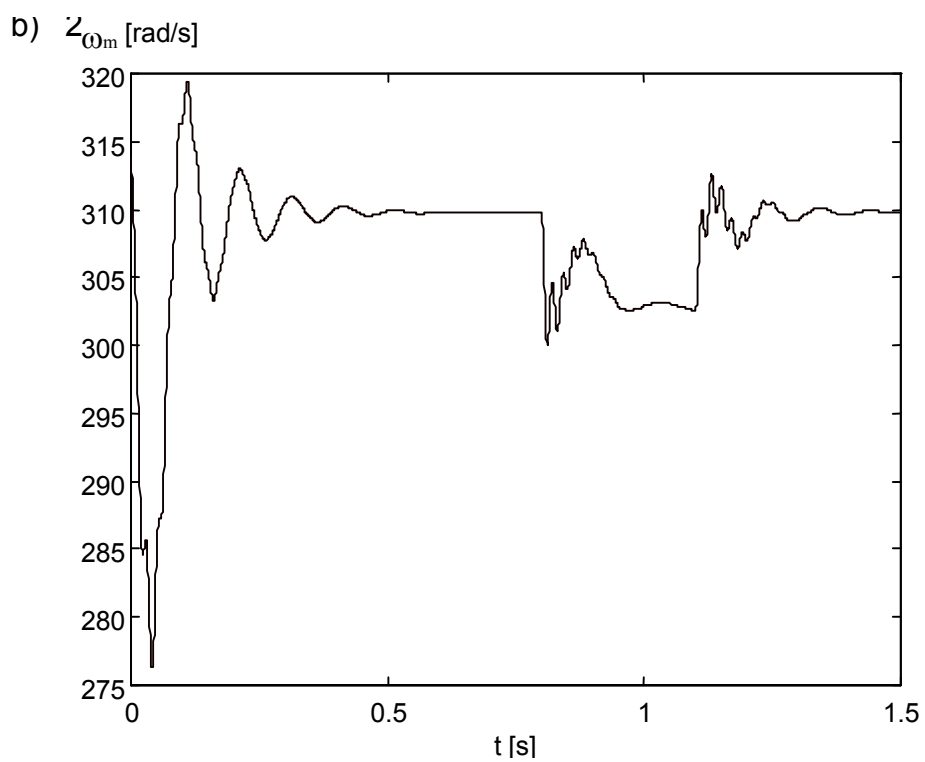
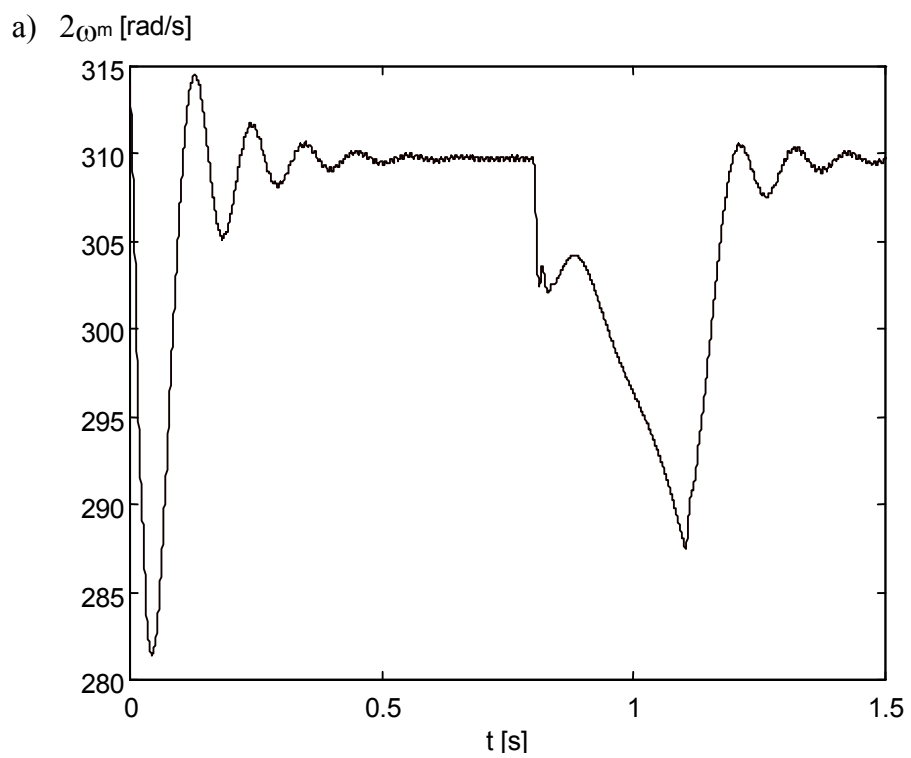


b)

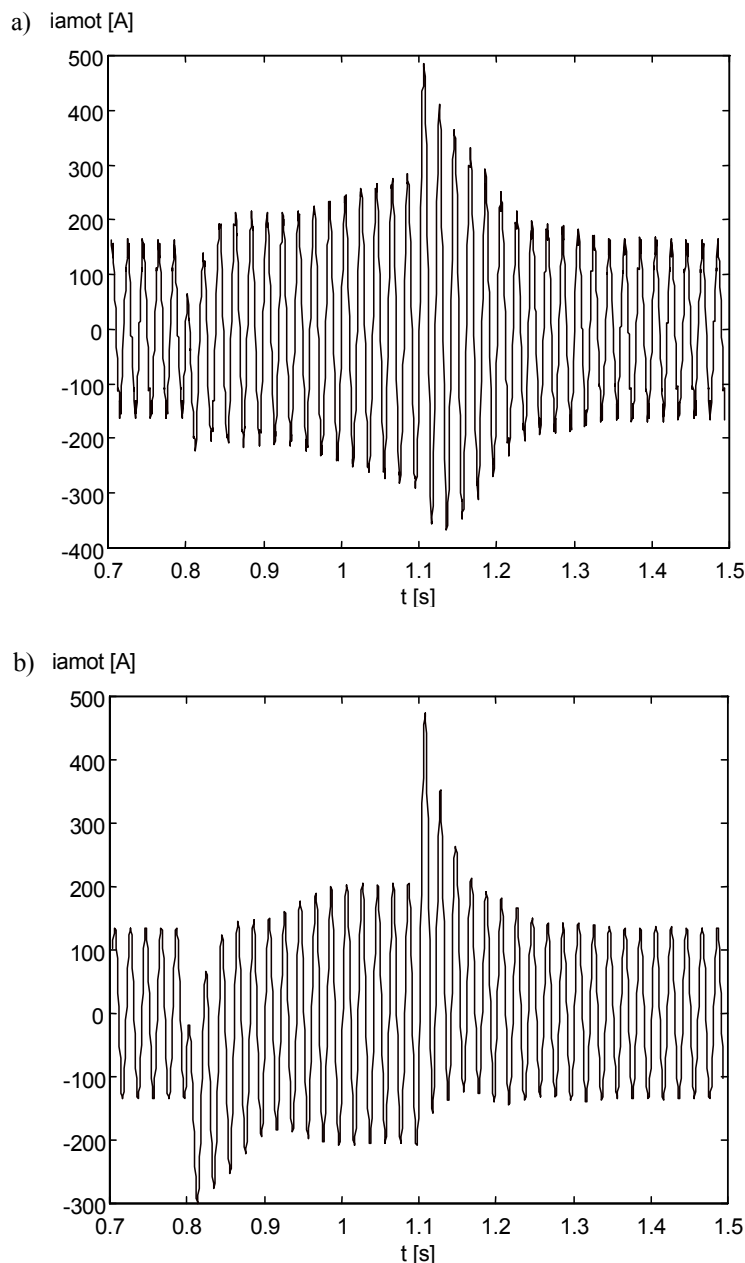
Slika 6.6 - Pogon sa asinhronim motorom: a) indirektna konfiguracija; b) direktna konfiguracija.

Kako propad traje njegova dubina raste, što u trenutku prestanka propada dovodi do povlačenja velike struje iz mreže, koja sprečava da napon, uslovno rečeno, u trenutku povrati svoju nominalnu vrednost, odnosno dolazi do produženog naponskog propada. Slično, ali još izraženije, se dešava pri intenzivnijim propadima, sve do toga da pogon ne može više da se oporavi, odnosno zaustavlja se. **Produženi propad** može da ima **negativno dejstvo** i na uređaje u blizini pogona, naročito na **osetljivu računarsku opremu** i **precizne industrijske procese**.

Uočena pojava produženog propada ukazuje da se rešavanju problema propada mora postupiti kompleksnije. Najjednostavnije rešenje, koje se sastoji u **produženju vremena reagovanja zaštite**, ne daje uvek očekivani rezultat. Razlog je upravo produženje trajanja propada. Priroda motora i radne mašine utiču na pojavu takvih naponskih i strujnih prilika koje dovode do reagovanja zaštite ili dolazi do nedopustivih oscilacija u brzini. Da bi se ova grupa problema rešila neophodno je primeniti neki od metoda kompenzacije propada napona [12].



Slika 6.7 - Brzina motora pri pojavi naponskog propada (30%, 300 ms) u $t=0,8$ s: a) indirektna konfiguracija; b) direktna konfiguracija [11].



Slika 6.8 - Struja motora pri pojavi naponskog propada (30%, 300 ms) u $t=0,8$ s: a) indirektna konfiguracija; b) direktna konfiguracija [11].

6.2.5. Osvetljenje

Pored ovog, ugroženo je i osvetljenje. Neke svetiljke se **gase** pri naponu od oko **80%** nominalne vrednosti i zahtevaju vreme da bi se ponovo upalile. Propadi napona koji gase ove svetiljke često se pogrešno tumače kao odsustvo napona. Merenja u SAD pokazala su da se ova pojava može očekivati u proseku **dva puta mesečno** [13]. Iskustva autora sa merenja u **domaćoj industriji** su da je naš prosek bar **dva puta veći**.

6.3. TEHNIČKA REGULATIVA U VEZI PROPADA NAPONA

Kratkotrajni poremećaji napona, propadi ili poskoci napona postali su poslednjih godina najozbiljniji poremećaj. Uzrok tome je uvođenje veoma sofisticirane (mikroprocesorske) opreme u industrijske pogone, kao i kompjuterizacija poslovanja i drugih dnevnih aktivnosti ljudi. Ova oprema je veoma osetljive na nagle promene napona, posebno na gubitak napajanja, bez obzira koliko kratko trajao. U tom slučaju dolazi do gubitaka performansi uređaja, prekida proizvodnje, resetovanja računara, gubitka informacija i sl.

Sve ovo je nateralo proizvođače računarske opreme da donesu sopstvene propise o varijaciji napajanja, tkzv. CBEMA krive, odnosno kasnije ITIC (1996) krive [14,15]. Na slici 6.9 prikazane su obe ove krive. Ove krive definišu dozvoljeno odstupanje efektivne vrednosti napona od nominalnog, kao i trajanje tog odstupanja. Ako je propad napona većeg intenziteta i dužeg trajanja od dozvoljenog, oprema će otkazati.

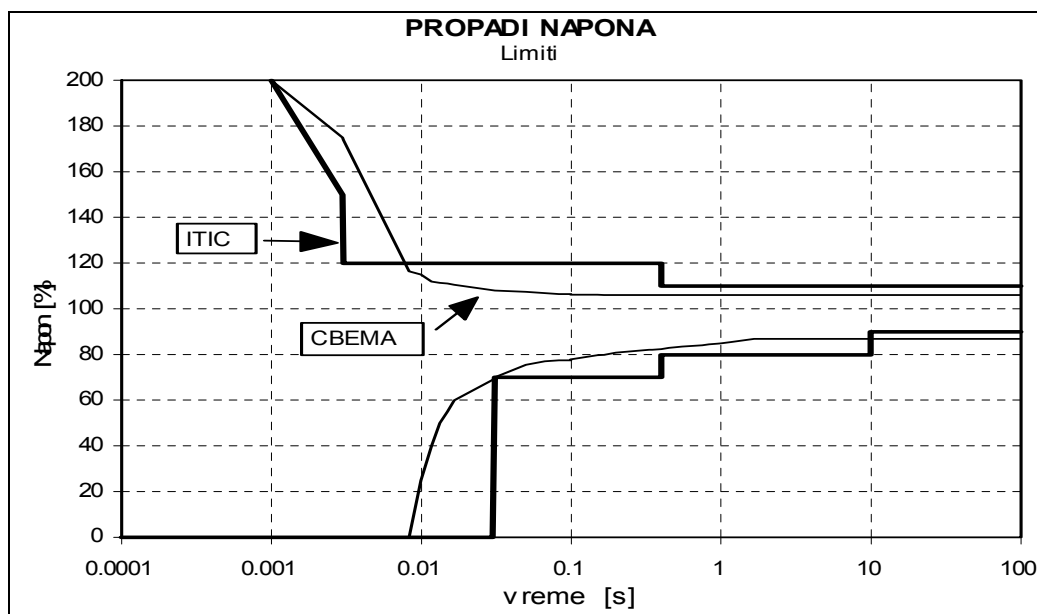
Pored intenziteta i trajanja propada, kao mera kvaliteta, definiše se i učestanost pojavljivanja preko $SARFI_x$ indeksa (**System Average RMS (Variation) Frequency Index**) [16]. $SARFI_x$ reprezentuje prosečan broj definisanih propada ili poskoka efektivne vrednosti napona trajanja između 10 ms i 1 min, koji se dogode tokom procenjenog perioda napajanja po potrošaču:

$$SARFI_x = \frac{\sum N_i}{N_T} \quad (6.1)$$

gde je x – prag propada ili poskoka napona (10%, 50%, 70%, 80%, 90%, 110%, 120% i 140 %), N_i – broj potrošača koji osećaju poremećaj napona zbog događaja i , N_T – broj potrošača koji se napajaju sa posmatrane sabirnice. Predlaže se da se $SARFI_x$ indeksi definišu za sisteme podeljene u 3 kategorije: 1. kategorija - Najbolji ili sistemi sa malim brojem otkaza, 2. kategorija – Prosečni sistemi i 3. kategorija – Seoski sistemi ili sistemi sa velikim brojem otkaza. Na primer, za propade napona i $x = 90\%$ i 70% predlažu se sledeće vrednosti:

Broj propada	1. kategorija	2. kategorija	3. kategorija
$SARFI_{70}$	< 10	10 – 30	> 30
$SARFI_{90}$	< 30	30 - 100	> 100

Ovakav pristup je bitan kao preduslov za [definisanje mere kvaliteta u sklopu ugovora o isporuci](#) kvalitetne električne energije, kakve sve više distribucija u svetu potpisuje sa svojim potrošačima.



Slika 6.9 – Prikaz CBEMA i ITIC limita za propade i poskoke napona.

6.3. MERENJE I SNIMANJE PROPADA I POSKOKA NAPONA

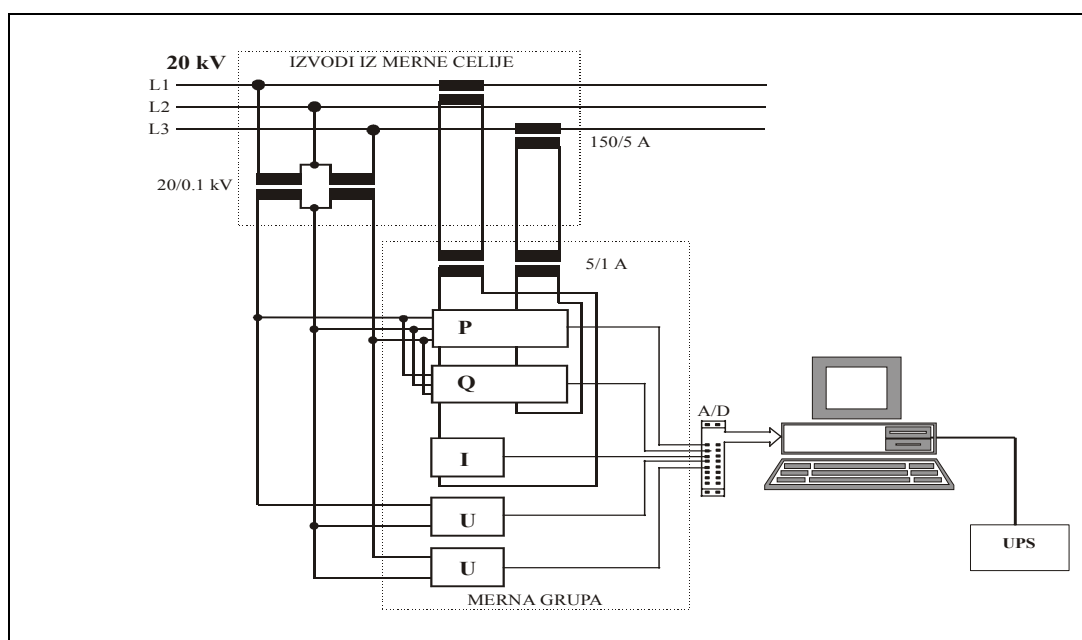
Propadi i poskoci napona predstavljaju tranzijentne pojave, koje traju relativno kratko (od 10 ms do nekoliko sekundi) sa malom učestanošću pojavljivanja. [Merenje](#) ovih pojava [zahteva posebno konstruisan merni sistem](#), koji će vršiti [konstantan monitoring](#) situacije u mreži i kad se pojavi propad ili poskok napona, izvršiti njegovo merenje i [snimanje](#) na neki memorijski medijum.

6.3.1. Merni sistem

[Pojava propada](#) ili poskoka napona znači da je došlo do [odstupanja](#) efektivne vrednosti napona od zadatih granica (na primer $\pm 10\%$ U_n), a potrebno je memorisati kompletnu pojavu od nekoliko perioda napona pre nastanka do nekoliko perioda nakon njenog prestanka. [Posebnost](#) ovakvog [merenja](#) je što se s jedne strane zahteva [visoka rezolucija](#) i praćenja i merenja i memorisanja, jer se radi o pojavama reda desetina milisekunda do reda sekunda, koje treba zapaziti, izmeriti i snimiti, a s druge strane [rad u dugom vremenskom intervalu](#), koji nije manji od [30 dana](#), jer se radi o pojavama koje se relativno retko pojavljuju. Da bi se zadovoljio ovakav zahtev, neophodno je korišćenje savremene računarske opreme, sa velikim

memorijskim kapacitetima. Kao dodatan problem, javlja se ostvarivanje brze i kvalitetne A/D konverzije, kao ulaznog sklopa u računar.

Na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu je razvijen jedan takav merni sistem, sa kojim je izvršeno više ciklusa merenja u proizvodnim pogonima različitog karaktera, a koji je prikazan na slici 6.10. Zbog zahteva za potpunijom analizom, pored međufaznih napona, prate se i struje u dve faze, aktivna i reaktivna snaga. Sistem se sastoji od preciznih i brzih mernih pretvarača napona, struje, aktivne i reaktivne snage, specijalne A/D kartice i PC računara. Računar je opremljen i uređajem za besprekidno napajanje, tako da je beležio i pojave kratkotrajnih prekida napajanja. Za potrebe rada sistema, sačinjen je odgovarajući softver, koji je beležio sve propade napona van zadatog opsega (korišćene su granice $\pm 5\%$). Frekvencija merenja je zadata na 20 Hz, radi uočavanja propada napona u intervalu manjem od 0,1 s. Sistem može da meri pojave najmanje 30 dana, a i duže po potrebi ili zahtevu situacije. Ovaj sistem je upotrebljen više puta, a rezultati merenja su dati u nastavku.



Slika 6.10 - Šema mernog sistema za merenje i praćenje propada i poskoka napona,

6.3.2. Način prikaza rezultata merenja

Prikaz rezultata merenja je poseban problem, jer je potrebno na pregledan način iskazati ogroman broj podataka, koji se prikupi praćenjem pojava u dugačkom vremenskom periodu (30 ili više dana) i registrovanjem deformacija, koje su različitog trajanja i intenziteta. Zbog toga se primenjuje više načina prikaza rezultata merenja i praćenja:

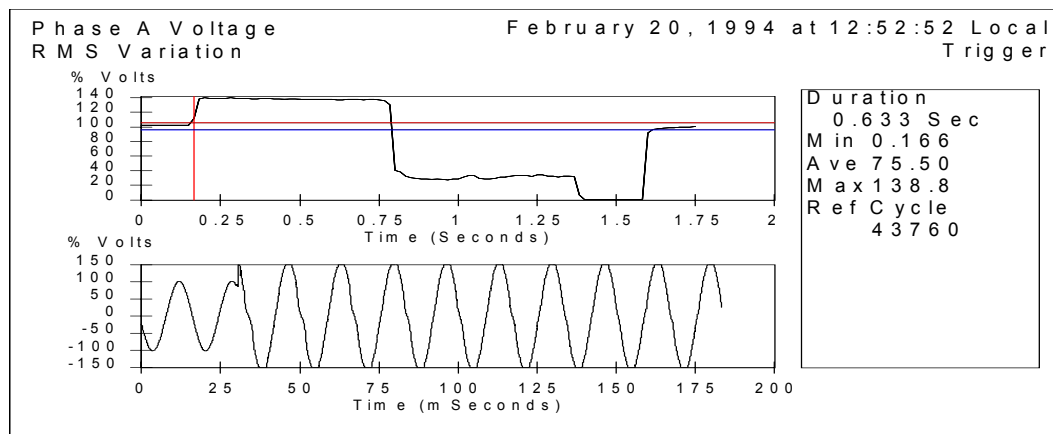
- 1) kontinualni vremenski prikaz
- 2) diskretni vremenski prikaz, i
- 3) statistički prikaz i analiza.

Kontinualni vremenski prikaz daje izgled propada napona u dva oblika:

- 1) u obliku promene vremenskog (talasnog) oblika napona neposredno pre, tokom i kratko vreme nakon završetka propada napona, i
- 2) u obliku promene efektivne vrednosti napona u vremenskom prozoru kao pod 1.

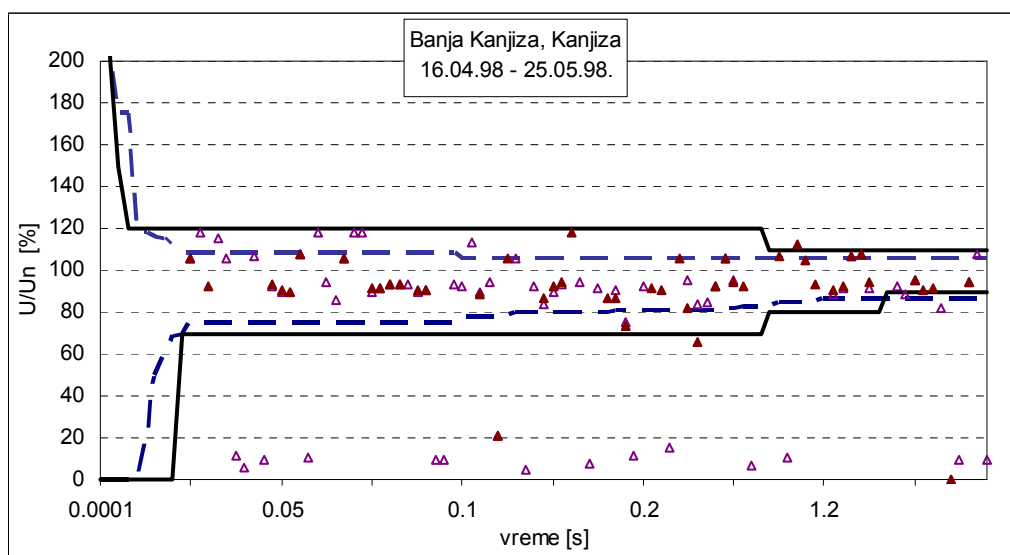
Na slici 6.11 dat je primer **kontinualnog vremenskog prikaza** sa dijagramima u oba oblika iz [1]. Karakterizacija pojave je data kroz dužinu trajanja propada i minimalnu, srednju i maksimalnu vrednost napona tokom propada. U suštini, na slici je prikazana jedna situacija, gde se prvo javlja poskok (premašenje) napona, a nakon toga propad, koji je opet praćen kratkotrajnom beznaponskom pauzom.

Ovakvi prikazi su pogodni za predstavljanje i analizu pojedinačnih propada. Na bazi njihovih karakteristika može se odrediti da li su oni mogli biti uzrok ispada pogona ili resetovanja računara. Takođe, njihov oblik može da ukaže i na verovatni uzrok pojave propada, što je bitno kod određivanja odgovornosti za nastale štete [17].



Slika 6.11 – Primer kontinualnog vremenskog prikaza [14].

Diskretni vremenski prikaz je posebno pogodan za analizu kompletnih rezultata merenja. Na primer, pri merenju u Banji Kanjiža snimljen je 81 propad ili poskok napona u 40 dana merenja. Očigledno je da bi kontinualni vremenski prikaz bio prilično nezgodan za sveobuhvatnu analizu. Zbog toga je usvojen diskretan vremenski prikaz, gde se propad ili poskok napona prvo definišu sa svojim intenzitetom (dubinom, ali maksimalnom vrednošću) i trajanjem, a zatim se upisuju u dijagram. Ovakav prikaz je definisan i odgovarajućim standardima, odnosno takozvanim CBEMA i ITIC krivama tolerancije i dat je na slici 6.12. Vidi se da CBEMA (plavo) i ITIC (crno) krive pomažu da se jednostavno odredi kvalitet sabirnice. Sve pojave, koje su iznad gornje, odnosno ispod donje krive tolerancije, mogu biti ili jesu uzročnik nepravilnosti ili otkaza u radu priključenih uređaja.

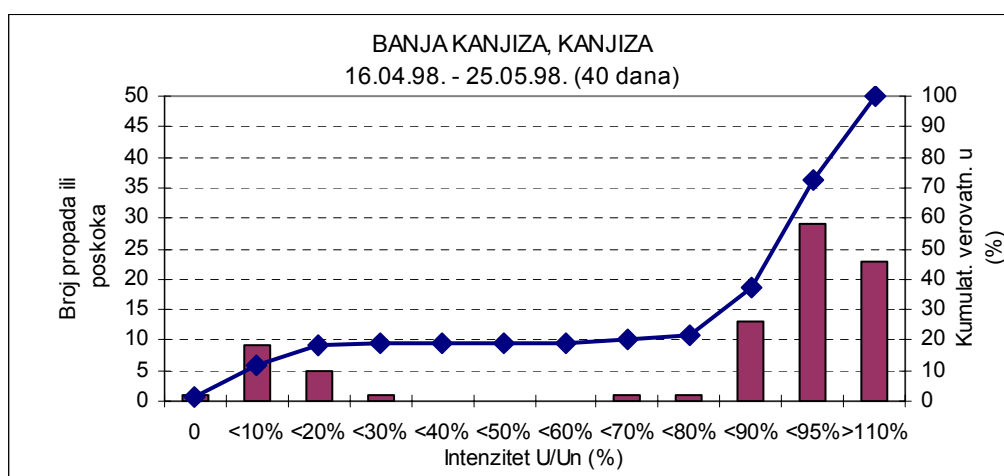
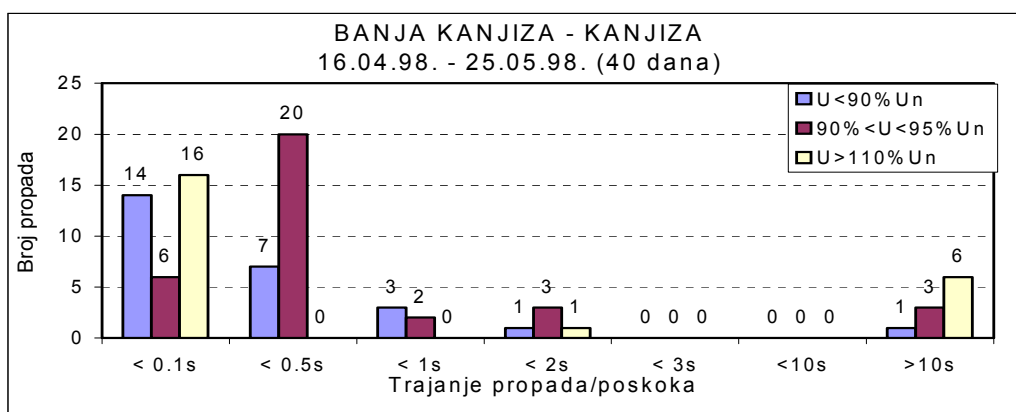


Slika 6.12 – Propadi napona u Banji Kanjiža.

Statistički prikaz je pogodan s obzirom na **veliki broj podataka**, koji se prikupi tokom ovakvih merenja. To omogućava predstavu u obliku pogodnom za **generalnije zaključke** o uzrocima ovih pojava. Najčešće se daje **pregled broja propada ili poskoka napona** po **intenzitetu** i po **trajanju**. Pored ovog prikazuje se i **kumulativna verovatnoća** pojavljivanja propada odgovarajućeg intenziteta ili trajanja. Još jedan statistički prikaz je takođe veoma koristan - **broj poremećaja napona tokom dana**. Mogući su i drugi oblici prikazivanja (u **3 dimenzije**, i sl.).

Na slici 6.13 je primer statističkog prikaza rezultata merenja u Banji Kanjiža, gde je na slici 6.13.a) data zavisnost broja propada i poskoka od vremena trajanja i delimično po amplitudi, a na slici

6.13.b) broj propada i poskoka po intenzitetu (U/U_n), kao i kumulativna verovatnoća. Statistika po amplitudi pokazuje da je gro propada u opsegu $80\%U_n < U < 95\%U_n$ i $U > 110\%U_n$, ali da su veoma kratkog trajanja – obično ispod 500 ms. Ipak, postoji i određen broj propada na niske amplitude ($10\%U_n < U < 20\%U_n$), kao i propada/poskoka dužeg trajanja ($t > 10$ s), koji su uzroci primećenih otkaza. Ova pojava je statistički opisana kumulativnom verovatnoćom, koja pokazuje da se čak u 20% vremena (dakle u 8 dana od 40 dana) može očekivati pojava propada napona na samo 20% nominalnog napona.



Slika 6.13 – Banja Kanjiža, Kanjiža: Statistika broja propada u odnosu na dužinu trajanja (gore), Statistika broja propada u odnosu na intenzitet propada (dole).

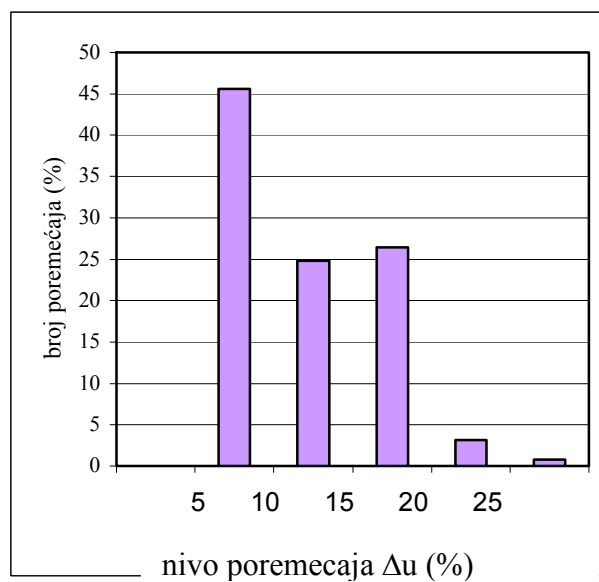
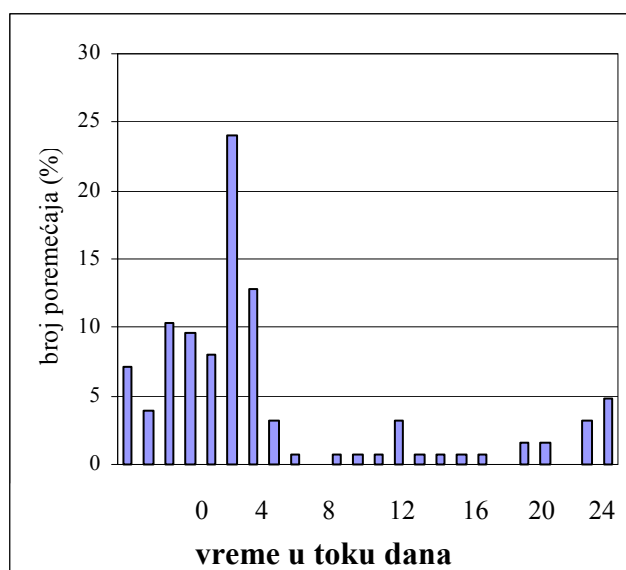
6.3.3. Primeri rezultata merenja propada napona

Prekid nekog industrijskog procesa zbog propada napona može izazvati velike troškove. Ti troškovi uključuju: opadanje produktivnosti, troškove ponovnog započinjanja rada, oštećeni proizvod –

škart, redukciju kvaliteta proizvoda, odlaganje isporuke i nezadovoljstvo potrošača. Važno je shvatiti da čitav proces u fabrici zavisi od osetljivosti jednog dela opreme ili čak pojedinačnog relea. Dok CBEMA ili ITIC limitii predlažu “standardnu” osetljivost na propade napona, moderna fabrička oprema ima različito ponašanje za vreme stvarnog događanja propada napona.

Opšti proces uključuje kontrolere, regulatore, kontaktore, robotiku, odnosno i analogna i digitalna elektronska kola. Kada se ceo proces prekine, teško je utvrditi zbog kojeg dela opreme se to desilo.

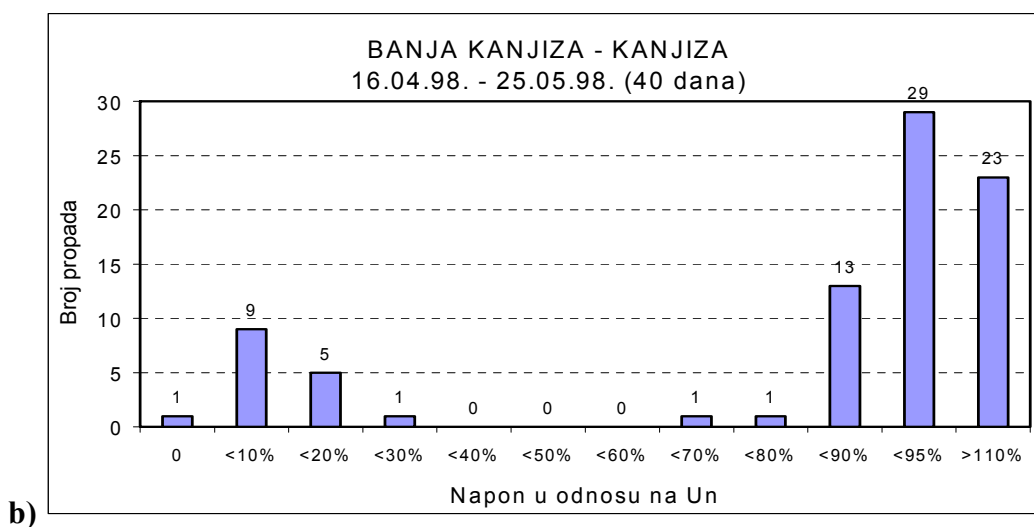
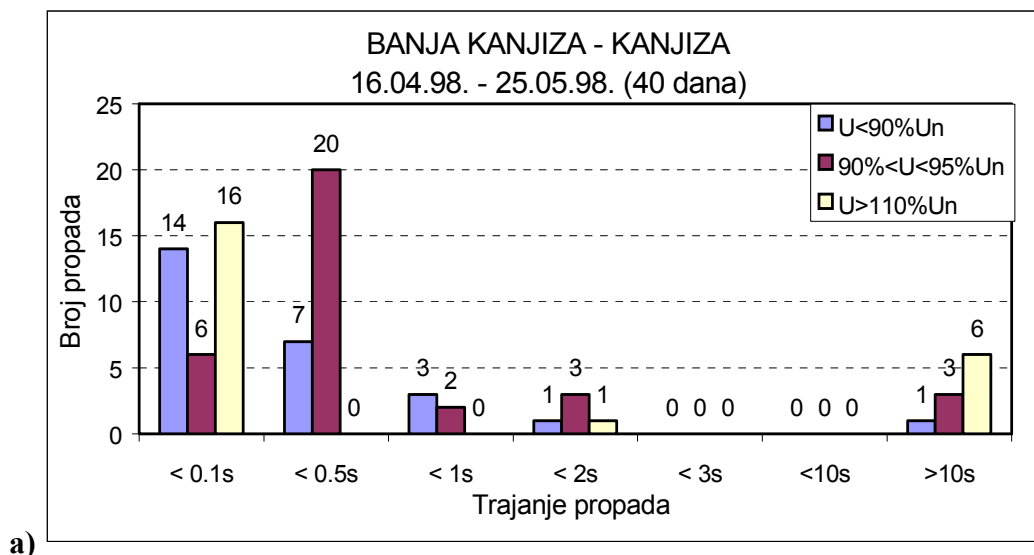
Rezultati dužih merenja na više lokacija u Vojvodini (“Dunav” Čelarevo, “Lepenka” Novi Kneževac, NIS Rafinerija nafte “Novi Sad” Novi Sad, Banja Kanjiža Kanjiža, MSK Kikinda) su delom opisani u [18], a delom su obrađeni na slikama 6.14 – 6.16. Rezultati merenja u Rafineriji Novi Sad, gde se pogon uglavnom sastoji od asinhronih motora bez regulacije brzine, pokazuju da propadi, koji su unutar krivih tolerancija, uglavnom obezbeđuju i neprekidnost rada pogona. Međutim, kod fabrike “Dunav” Čelarevo svaki propad je izazvao prekid rada pogona. Treba napomenuti da se ovde radi o potpuno regulisanim elektromotornim pogonima, korišćenjem savremenih energetske pretvarača sa sofisticiranom upravljačkom elektronikom, te da je mreža radila sa naponskom redukcijom od 5%. Slično snimanje urađeno je i u fabrici “Lepenka” Novi Kneževac, a rezultati su dati na slici 6.14. Takođe, radi se o savremeno regulisanom elektromotornom pogonu u kom se često registruju ispadi. Pokazuje se da propadi napona van CBEMA krivih tolerancije izazivaju prekide u radu pogona. Dnevni raspored pojave propada pokazuje očekivano veliki broj u jutarnjim časovima, s tim da je gro propada 5-15%Un. Veliki broj kratkih propada je zabeležen na merenjima u Kanjiži (slika 6.15) i Kikindi (slika 6.16). Statistika po amplitudi pokazuje da je opet gro u opsegu $80\%U_n < U < 95\%U_n$ i $U > 110\%U_n$, ali i da se relativno često pojavljuju duboki propadi.



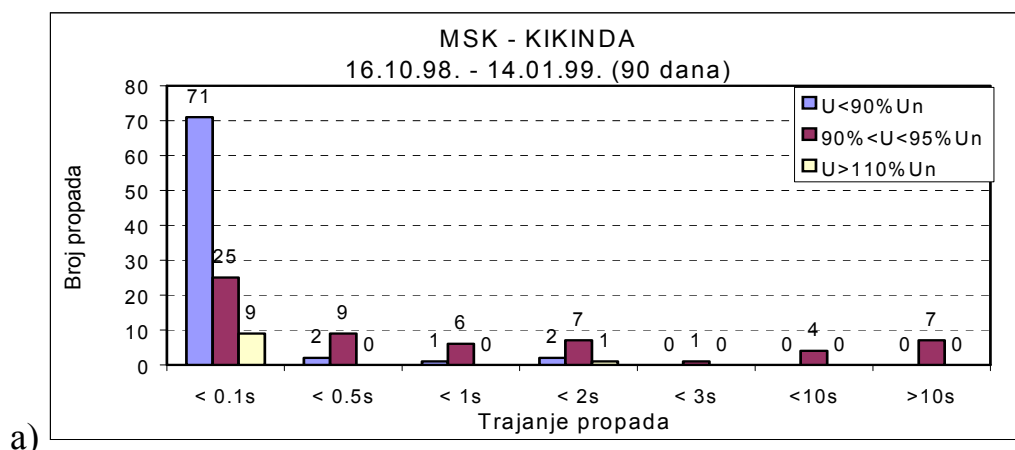
a)

b)

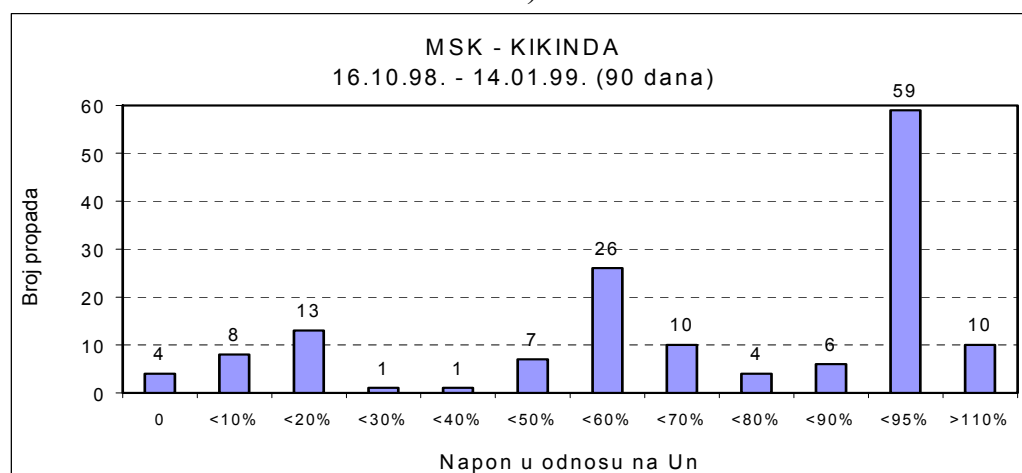
Slika 6.14 - “Lepenka”, Novi Kneževac: a) Statistika broja propada u toku dana, b) Statistika broja propada u odnosu na dubinu propada.



Slika 6.15 – Banja Kanjiža, Kanjiža: a) Statistika broja propada u odnosu na dužinu trajanja, b) Statistika broja propada u odnosu na dubinu propada.



b)



Slika 6.16 – MSK Kikinda: a) Statistika broja propada u odnosu na dužinu trajanja, b) Statistika broja propada u odnosu na dubinu propada.

6.4. REŠAVANJE PROBLEMA PROPADA NAPONA

Zbog slučajnog karaktera pojavljivanja propada napona, veoma je teško odrediti pravu strategiju za eliminisanje njihovog uticaja. Pored trivijalnih metoda, produžavanjem vremena reagovanja zaštite i sl., moguća rešenja leže u obezbeđenju izvora besprekidnog napajanja, povećanju snage i boljem održavanju prenosne mreže (čišćenje i pregled izolatora, kontrola zaštite, redovni remont i dr.), ali i u ulaganjima u naponsku regulaciju kod samih potrošača.

Analiza alternativnih poboljšanja opreme u fabrici i distributivne električne mreže zahteva poređenje troškova i dobiti koja se ovim ostvaruje. Na primer, troškovi osetljive opreme po nekoj od metoda za poboljšanje funkcionalnosti pri ulegnuću napona određuju se kao korist od oporavka izgubljene proizvodnje, materijala, kvaliteta

proizvodnje, a neophodno je odrediti i odgovornost korisnika. Moguće je [ustanoviti gubitak produktivnosti u fabrikama](#), koji je prouzrokovao [pojavom propada napona](#). Čak se može snimiti i broj prekida prouzrokovanih propadom napona u zadnjih nekoliko meseci ili godina. Ako neophodni podaci postoje mogu se [uporediti troškovi primene poboljšanja](#) i [troškovi gubitaka proizvodnje](#).

Rešenja mogu biti primenjena [kod krajnjeg korisnika](#), koji ima opremu ili na proces, koji je [osetljiv na propad napona](#) ili prekid. Na primer, osetljiva oprema može biti zaštićena [zaštitom](#) u [električnoj mreži](#), [zaštitom objekta](#) u kome se nalazi ili se ugrađuje i [merenjem](#) u [korisničkom sistemu](#), kako bi se popravile performanse. Individualna rešenja se moraju identifikovati kao ekonomska perspektiva. [Najekonomičnije](#) je da [zaštita](#) bude [u blizini osetljive opreme](#) ili da je čak i ugrađena u nju.

[Na duge staze](#), najbolje rešenje, u slučaju mogućih problema sa propadom napona, je [kupovina opreme](#) koja ima [poboljšane karakteristike](#). Kako proizvođači postaju sve više svesni ove potrebe to će takva oprema [postati standardna](#). Već sada proizvođači nude nove modele ili jednostavne modifikacije koje opremu čine boljom.

6.5. LITERATURA

1. R. Dugan, M. McGranaghan, W. Beaty: “*Electric Power System Quality*”, McGraw Hill, New York, 1996.
2. N. Petrović: “Besprekidnost napajanja kao kvalitet isporučene energije”, *JUKO CIGRE, STK-31, Stručna konsultacija Kvalitet električne energije*, Vrnjačka Banja, Okt.1992, str.49-58.
3. D. Sabin, A.Sundaram: “Quality Enhances Reliability”, *IEEE Spectrum*, Vol.33, No.2, Feb.1996, pp.34-41.
4. A. Kelley, J. Cavaroc, J. Ledford, L. Vassalli: Voltage Regulator for Contactor Ridetrough; *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.36, No. 2, 2000., pp. 697-704.
5. Proizvođački katalozi firmi: *Rade Končar kontaktori i releji, Skopje; Minel ELIP, Beograd i Lovato S.P.A., Bergamo (Italia)*
6. W.E. Reid: Power Quality Issues – Standards and Guidelines, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.32, No. 3, 1996., pp. 625-632.
7. M.H.J. Bollen, L.D. Zhang: Analysis of Voltage Tolerance of AC Adjustable-Speed Drives for Three-Phase Balanced and Unbalanced Sags; *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.36, No. 3, 2000., pp. 904-910.

8. J.L. Duran-Gomez, P.N. Enjeti, O.W. Byeong: Effect of Voltage Sags on Adjustable-Speed Drives: A Critical Evaluation and an Approach to Improve Performance; *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 35, No. 6, 1999., pp. 1440-1449.
9. S. Govindarajan, M. Cox, F. Berry, "Survey of Harmonic Levels on the SW Electric Power Company System", *IEEE Tran. on Power Delivery*, Vol.6, No.4, Oct.1991, pp.1869-1875.
10. A. Von Jouanne, P.N. Enjeti, B. Banerjee: Assessment of Ride-Through Alternatives for Adjustable-Speed Drives; *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.35, No. 4, 1999., pp. 908-916.
11. M. Hajder, V. Katić: "Uticaj propada napona na rad elektromotornih pogona sa asinhronim motorima", II Jugoslovensko savetovanje o elektrodistributivnim mrežama, JUKO-CIRED, Herceg Novi, Sep.2000, R-2.5 (publikovano na CD-ROM-u).
12. D. Raca, V. Katić: "Analiza efikasnosti metoda za eliminisanje efekata propada napona u elektromotornom pogonu sa asinhronim motorom", III Simpozijum Industrijska elektronika – INDEL 2000, Banja Luka (R.Srpska), Nov.2000, pp.79-84.
13. D.Mueller, M.McGranaghan, "Effects of Voltage Sags in Process Industry Applications", *Electrotek Concepts Inc.*, www.electrotek.com.
14. F.Martzloff, T.Gruzs: "Power Quality Site Surveys: Facts, Fiction and Fallacies", *IEEE Tran. on Industry Applic.*, Vol.24, No.6, Nov./Dec. 1988, pp.1005-1018.
15. Heydt G., Electric Power Quality: A Tutorial Introduction, *IEEE Computer Application in Power*, Vol.11, No.1, pp.15-18, 1998.
16. D.Brooks, R.Dugan, M.Waclawiak: "Indices for Assessing Utility Distribution System RMS Variation Performance", *IEEE Tran. On Power Delivery*, Vol.13, No.1, Jan.1998, pp.254-259.
17. IEEE Standard 1159-1995, "*IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*", IEEE, New York, 1995.
18. V.Katić, Lj.Gerić, R.Jevremović: "Kvalitet električne energije u industrijskim pogonima", *XXIII Savetovanje JUKO-CIGRE*, Herceg Novi, Maj 1997, R36-12.