



CEFES

COST-EFFECTIVE & ENVIRONMENTALLY FRIENDLY ENERGY SYSTEMS

Vladimir Katić
Amir Tokić
Tatjana Konjić

KVALITET ELEKTRIČNE ENERGIJE



Novi Sad, Jun, 2007.

KVALITET ELEKTRIČNE ENERGIJE

Prof. dr Vladimir Katić

Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija

Doc. dr Amir Tokić,

Univerzitet u Tuzli, Fakultet Elektrotehnike, Tuzla, BIH

Doc. dr Tatjana Konjić

Univerzitet u Tuzli, Fakultet Elektrotehnike, Tuzla, BIH

Editor: Prof. dr Jovica Milanović

The University of Manchester, Manchester, U.K.



CEFES

COST-EFFECTIVE & ENVIRONMENTALLY FRIENDLY ENERGY SYSTEMS



EU TEMPUS PROJECT CD JEP-18126-2003

Napomena:

Ova knjiga urađena je i finansirana u sklopu projekta Evropske Unije **COST EFFECTIVE AND ENVIRONMENTALLY FRIENDLY ENERGY SYSTEMS - CEFES**
TEMPUS PROGRAMME CD_JEP-18126-2003

Note:

The publishing of this book is financed by the European Union project **COST EFFECTIVE AND ENVIRONMENTALLY FRIENDLY ENERGY SYSTEMS - CEFES**
TEMPUS PROGRAMME CD_JEP-18126-2003.

Učesnici projekta su:

 <p>ICCS-NTUA</p>	NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS, ICCS, Athens, Grčka, Nosilac projekta
 <p>MANCHESTER 1824</p>	THE UNIVERSITY OF MANCHESTER, Mančester, Velika Britanija
 <p>FEUP</p>	UNIVERSITY OF PORTO, Faculty of Engineering, Porto, Portugalija
 <p>INESC PORTO INSTITUTO DE ENGENHARIA DE SISTEMAS E COMPUTADORES DO PORTO</p>	INSTITUTE OF ENERGY SYSTEMS & COMPUTERS - INESC, Porto, Portugalija
 <p>UNIVERSITAS STUDIORUM TUZLAVENSIS MCMLXXVI</p>	UNIVERZITET U TUZLI, Fakultet elektrotehnike, Tuzla, BIH, Kordinator projekta
 <p>UNIVERSITAS STUDIORUM NOVI NEOPLANTENSIS</p>	UNIVERZITET U NOVOM SADU, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija
	UNIVERZITET "Sv. KIRIL I METODIJ", Elektrotehnički fakultet, Skopje, Makedonija



CEFES

COST-EFFECTIVE & ENVIRONMENTALLY FRIENDLY ENERGY SYSTEMS

Knjiga predstavlja osnovni materijal za predmet *Kvalitet električne energije* i namenjena je studentima postdiplomskih studija studijskog programa razvijenog u okviru COST EFFECTIVE AND ENVIRONMENTALLY FRIENDLY ENERGY SYSTEMS – CEFES, TEMPUS PROGRAMME CD_JEP-18126-2003. U izvodjenju nastave i pripremi materijala učestvovali su: Prof. Dr Vladimir Katić, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, Srbija, Doc. Dr Amir Tokić, Univerzitet u Tuzli, Tuzla, BIH, Doc. Dr Tatjana Konjić, Univerzitet u Tuzli, Tuzla, BIH i Prof. Dr Jovica Milanović, The University of Manchester, Manchester, U.K.

This book represents core material for the module *Power Quality* taught at the postgraduate studies developed within the framework of COST EFFECTIVE AND ENVIRONMENTALLY FRIENDLY ENERGY SYSTEMS – CEFES, TEMPUS PROGRAMME CD_JEP-18126-2003. The following academics participated in development of lecture notes and course delivery: Prof. Dr Vladimir Katić, University of Novi Sad, Novi Sad, Serbia, Assist. Prof. Dr Amir Tokić, University of Tuzla, Tuzla, BIH, Assist. Prof. Dr Tatjana Konjić, University of Tuzla, Tuzla, BIH and Prof. Dr Jovica Milanović, The University of Manchester, Manchester, U.K.

SADRŽAJ:

1. KVALITET ELEKTRIČNE ENERGIJE	1
1.1. Uvod	1
1.2. Kvalitet isporučene električne energije	3
1.3. Generisanje problema kvaliteta napona	3
1.4. Reakcija potrošača na pojave nekvalitetnog napona	4
1.5. Klasifikacija izobličenja napona	5
1.6. Indikatori (kvantifikatori) kvaliteta električne energije	7
1.7. Stanje u Srbiji	8
1.8. Literatura	10
2. POJMOVI I DEFINICIJE PARAMETARA KVALITETA	12
2.1. Osnovni parametri napona	12
2.1.1. Varijacija napona	12
2.1.2. Varijacija frekvencije	12
2.1.3. Nesimetrija napona	13
2.2. Deformacije talasnog oblika napona	14
2.3. Tranzijenti	14
2.3.1. Impulsni tranzijenti	14
2.3.2. Oscilatorni tranzijenti	14
2.4. Prelazni režimi sistema	17
2.4.1. Propad napona	17
2.4.2. Premašenje napona	17
2.4.3. Beznaponska pauza (kratkotrajna)	18
2.4.4. Podnapon	19
2.4.5. Prenapon	19
2.4.6. Beznaponska pauza	20
2.5. Ustaljeno stanje sistema	21
2.5.1. DC offset	21
2.5.2. Viši harmonici	21
2.5.3. Interharmonici	22
2.5.4. Urezi (rupe)	22
2.5.5. Fluktuacije napona	22
2.5.6. Šumovi	23
2.6. Sumarni pregled parametara kvaliteta električne energije	23
2.7. Literatura	26
3. STANDARDI I PREPORUKE	27
3.1. IEC Standard serije 61000	28
3.2. CENELEC - EN 50160	29
3.3. IEEE standardi o kvalitetu električne energije	30
3.4. Literatura	31
4. MONITORING KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE	32
4.1. Uvod	32
4.2. Ciljevi monitoringa	32
4.3. Predmet merenja i monitoringa	33
4.4. Izbor lokacije monitoringa	34

4.5. Dužina monitoringa.....	36
4.6. Pronalaženje izvora poremećaja.....	36
4.7. Napredni sistemi za monitoring.....	36
4.8. Sistemi za stalni monitoring kvaliteta električne energije.....	38
4.9. Istorijski razvoj instrumenata za merenje kvaliteta.....	39
4.10. Vrste instrumenata.....	40
4.11. Inteligentni sistemi za monitoring.....	47
4.12. Literatura.....	49
5. NAPONSKI TRANZIJENTI	50
5.1. Klasifikacija prenapona: IEC 71-1.....	50
5.2. Tranzijenti nastali kao posledica atmosferskih pražnjenja.....	52
5.3. Prenaponi nastali uključivanjem kondezatorskih baterija.....	54
5.4. Fenomen ferorezonancije.....	55
5.5. Prenaponi nastali uključivanjem neopterećenih transformatora.....	58
5.6. Osnovni principi prenaponske zaštite.....	60
5.7. Uređaji za prenaponsku zaštitu.....	61
5.7.1. Metal oksidni odvodnici prenapona.....	61
5.7.2. Niskopropusni električni filteri.....	62
5.7.3. Izolacioni transformatori.....	63
5.8. Programski paketi za analize tranzijentnih pojava.....	64
5.8.1. EMTP (Electromagnetic Transient Program).....	64
5.8.2. MATLAB/Simulink/Power System Blockset.....	66
5.9. Literatura.....	67
6. PROPADI NAPONA.....	68
6.1. Uvod.....	68
6.2. Negativni efekti pojave propada napona.....	70
6.2.1. Kontaktori.....	71
6.2.2. Kontrolna elektronika.....	71
6.2.3. Pretvarači energetske elektronike.....	71
6.2.4. Motori i radna mašina.....	72
6.2.5. Osvetljenje.....	74
6.3. Tehnička regulativa u vezi propada napona.....	74
6.4. Merenje i snimanje propada i poskoka napona.....	75
6.4.1. Merni sistem.....	76
6.4.2. Način prikaza rezultata merenja.....	76
6.5. Primeri rezultata merenja propada napona.....	78
6.5.1. Tekstilna industrija.....	79
6.5.2. Industrija papira i kartona.....	80
6.5.3. Naftna industrija.....	81
6.5.4. Procesna industrija.....	84
6.5.5. Turistički kompleks.....	85
6.6. Rešavanje problema propada napona.....	86
6.7. Literatura.....	88
7. VIŠI HARMONICI.....	89
7.1. Teorijska obrada viših harmonika.....	90
7.1.1. Furijeova transformacija.....	90
7.1.2. Diskretna Furijeova transformacija.....	92
7.1.3. Brza Furijeova transformacija.....	93
7.1.4. Prozorska Furijeova transformacija.....	94
7.1.5. Greške Furijeove transformacije.....	94

7.2. Osnovne formule harmonijske analize	95
7.2.1. <i>Struja i napon</i>	96
7.2.2. <i>Fazni stav harmonika</i>	96
7.2.3. <i>Snaga</i>	96
7.2.4. <i>Faktor snage</i>	98
7.2.5. <i>Definicije harmonijskih indikatora</i>	98
7.2.6. <i>Statistička predstava viših harmonika</i>	100
7.3. Izvori viših harmonika	101
7.3.1. <i>Ispravljači kao izvori viših harmonika</i>	101
7.3.2. <i>Električne mašine kao harmonijski izvori</i>	102
7.3.3. <i>Elektrolučne peći kao harmonijski izvori</i>	103
7.3.4. <i>Industrija kao izvor viših harmonika</i>	104
7.3.5. <i>Rezidencijalne oblasti (domaćinstva) kao izvori viših harmonika</i>	105
7.3.6. <i>Poslovne zgrade i računarski centri kao izvori viših harmonika</i>	106
7.4. Negativni efekti pojave viših harmonika u mreži	107
7.4.1. <i>Pojava rezonancije u mreži</i>	107
7.4.2. <i>Uticaj na kondenzatorske baterije</i>	108
7.4.3. <i>Uticaj na telekomandne signale</i>	110
7.4.4. <i>Uticaj na tačnost pokazivanja standardnih mernih instrumenata</i>	110
7.4.5. <i>Uticaj na električne mašine</i>	114
7.4.6. <i>Uticaj na telekomunikacione signale</i>	114
7.5. Standardi i preporuke	115
7.5.1. <i>Standardi i preporuke pojedinih zemalja</i>	116
7.5.2. <i>Grupa standarda IEC 61000-2-xx</i>	116
7.5.3. <i>Grupa standarda IEC 61000-3-xx</i>	117
7.5.4. <i>Granične vrednosti harmonika po CENELEC – EN 50160</i>	117
7.5.5. <i>IEEE 519 i IEEE 1159</i>	119
7.5.6. <i>Preporuke CIGRE-a</i>	120
7.5.7. <i>Poređenje graničnih nivoa za harmonike napona</i>	121
7.6. Merenje viših harmonika	122
7.6.1. <i>Kratak prikaz savremenih sistema za merenje</i>	122
7.6.2. <i>Strategija i ciljevi merenja</i>	123
7.6.3. <i>Načini prikazivanja rezultata merenja</i>	124
7.7. Metode smanjenja ili eliminisanja viših harmonika	128
7.8. Literatura	129
8. FLIKER	131
8.1. <i>Opis pojave</i>	131
8.2. <i>Priroda flikera</i>	132
8.3. <i>Granice flikera</i>	133
8.4. <i>Literatura</i>	134

1. KVALITET ELEKTRIČNE ENERGIJE

1.1. Uvod

Sa pokretanjem procesa demonopolizacije (deregulacije) elektroprivrede i uvođenjem konkurencije među distributerima električne energije, pitanje posledica tretiranja električne energije kao robe se postavlja u svim svojim aspektima. Kao jedan od važnih parametara, koji određuje cenu i atraktivnost proizvoda ili usluge, kvalitet, u ovom slučaju kvalitet električne energije, ima u poslednje vreme prvorazredni značaj i pažnju. To što se danas naširoko piše i govori o kvalitetu električne energije, što se održavaju brojni naučni i stručni simpozijumi i savetovanja, što se u celom svetu uveliko rade istraživački projekti, izlaze specijalizovani časopisi i što se pojavljuju konsultantske firme, proizvođači merne opreme i uređaja za poboljšanje kvaliteta, odnosno što postoji široko tržište za razne aspekte kvaliteta električne energije, ne znači da je elektroprivreda u ranijem prirodu manje pažnje poklanjala ovom problemu. On jednostavno nije bio dovoljno istaknut pod ovim imenom, već su se pitanja kvaliteta pojavljivala i rešavala kao posebni problemi pouzdanosti, stabilnosti, naponske regulacije, servisiranja i sl.

Električna energija zauzima posebno mesto u odnosu na ostale vidove energije (nafta, ugalj, gas, atomska energija, sunčeva energija, energija vetra, energija talasa i dr.). Mada se retko pojavljuje u prirodi (atmosferska pražnjenja, elektrostatički elektricitet i dr.) i ima veoma ograničene mogućnosti akumulacije (akumulatori), ona je danas jedan od najkvalitetnijih i najtraženijih oblika energije. Za njeno dobijanje koriste se drugi izvori (oblici) energije, a zajedničko im je da se pretvaraju u mehaničku energiju, odnosno primenjuju kao mehanička energija za pokretanje obrtnog dela električnog generatora (rotora), koji "proizvodi" električnu energiju.

Polazeći sa ovakve platforme, dobija se veoma široka postavka pitanja kvaliteta električne energije, odnosno može se govoriti o:

1. upotrebnom kvalitetu,
2. ekološkom kvalitetu,
3. komercijalnom kvalitetu i
4. tehničkom kvalitetu električne energije.

Upotrebni kvalitet električne energije karakteriše se velikom raspoloživošću električne energije, jednostavnošću primene, primenljivošću za razne aplikacije, postojanjem ogromnog broja uređaja, koji se napajaju ovim vidom energije, kao i primenom bez negativnih nuz efekata. Visoki upotrebni kvalitet doveo je do toga da se danas raspoloživost električne energije smatra jednim od osnovnih kvaliteta savremenog standarda ljudi.

Ekološki kvalitet je od izuzetne važnosti, jer se pogrešno smatra da je električna energija ekološki čista i time kvalitetna energija. On uzima u obzir uticaj na okolinu, živa bića i ljude kod proizvodnje (uticaj termoelektrana, atomskih centrala, hidrocentrala i sl.), prenosa (elektromagnetna polja, koridori i sl.) i potrošnje električne energije (elektromagnetna polja, elektromagnetna kompatibilnost i sl.).

Komercijalni kvalitet u sklopu tretiranja električne energije kao robe, dobija na značaju i pokriva pitanja odnosa sa potrošačima, odnosa sa javnošću i pitanja kvaliteta odnosa u lancu proizvodnja-prenos-distribucija električne energije ubrzano se rešavaju ili unapređuju. Novi odnosi, pojava berze, spot tržišta i sl. upućuju da se radi o složenoj problematici u čije rešavanje moraju biti uključene i druge struke – ekonomisti, menadžeri, finansijski stručnjaci bankari i dr.

Danas se načešće, kada se govori ili piše o kvalitetu električne energije, podrazumeva tehnički kvalitet. Njime se inženjeri široko bave još od početka korišćenja električne energije, jer je proces proizvodnje, prenosa i potrošnje električne energije jedinstven i simultan proces. Kao jedan od važnih parametara, koji određuje cenu i atraktivnost proizvoda ili usluge, tehnički kvalitet ima prvorazredni značaj i pažnju.

Zavisno od tačke gledišta, postoje različite definicije tehničkog kvaliteta električne energije. Tako na primer sa gledišta elektroenergetskog sistema, odnosno distributivne mreže, kvalitet električne energije posmatra se kao pouzdanost i prikazuje preko relacija i statističkih veličina. Tu se pre svega posmatra osnovna funkcija EES-a, a to je pouzdan i ekonomičan prenos električne energije od izvora do krajnjeg potrošača. S druge strane proizvođači električne opreme posmatraju kvalitet električne energije kao karakteristike sistema napajanja koji obezbeđuje ispravan rad električne opreme. Dakle, posmatraju se dva glavna aspekta:

1. kvalitet isporuke i
2. kvalitet isporučene električne energije (kvalitet napona) [1,2,3].

i mogu se postaviti dve definicije kvaliteta električne energije:

Definicija 1:

Kvalitet električne energije podrazumeva izvore, posledice i metode kontrole poremećaja, koji se prenose preko elektro-energetskog sistema i utiču na kvalitet napajanja krajnjih potrošača.

Definicija 2:

Kvalitet električne energije predstavlja bilo koji problem manifestovan u deformacijama napona, struje ili frekvencije, a koji za posledicu ima kvarove ili pogrešan rad električne potrošačke opreme.

Kvalitet isporuke obuhvata probleme pouzdanosti, efikasnosti i sigurnosti napajanja, koji se rešavaju u postupku planiranja, razvoja i tokom redovnog održavanja mreže. Oni su najčešće u fokusu aktivnosti i brige inženjera i stručnjaka elektroprivrede. I dok je prvi cilj tradicionalno uključen u osnove rada bilo kog elektroenergetskog sistema, dotle se drugom počela poklanjati detaljnija pažnja tek pojavom tzv. osetljivih potrošača (računara, procesne opreme u industriji, složenih uređaja i sklopova upravljanih mikroprocesorima i dr.). Problem kvaliteta isporučene električne energije vezan je za sveukupnu stabilnost rada sistema, poremećaje u tom radu i međusobne uticaje sistem-potrošač i uglavnom se prepoznaje kao *kvalitet napona*.

Kvalitet napona deo je i šire problematike elektromagnetne kompatibilnosti (EMC) [4], što je polazište i Međunarodne elektrotehničke komisije (IEC), kao i drugih međunarodnih standardnih organizacija. U redovnom korišćenju električne energije, elektro-energetski sistem, instalacije i električni uređaji generišu ili su podvrgnuti čitavom nizu smetnji, različite prirode i uzroka, koje se prepoznaju pod zajedničkim imenom elektromagnetne smetnje. One se mogu klasifikovati u tri grupe:

1. kondukcione smetnje, koje se prostiru ka ili dolaze od mreže,
2. smetnje zračenjem, koje potiču od elektromagnetnih polja i
3. smetnje koje potiču od elektrostatičkog pražnjenja.

Uticaj ovih smetnji može izazvati brojne negativne efekte, pa se njihov nivo mora ograničiti. S druge strane, kao posledica njihove egzistencije, svaki potrošač pre ili kasnije ih mora osetiti. Priroda tih izobličenja, njihov intenzitet, ozbiljnost i učestanost pojavljivanja varira od jedne lokacije ka drugoj, od jednih radnih uslova ka drugim. Zbog toga potrošač mora pokazati određen stepen imunosti na izobličenja napona. Balans između ovih naizgled oprečnih zahteva ("generisati smetnje što manje, a trpeti što više") predstavlja osnovu pojma elektromagnetne kompatibilnosti (EMC) [4].

Na kvalitet napona najozbiljniji uticaj imaju kondukcione smetnje i to njihov niskofrekventni deo. To se manifestuje kako u pogledu degradacije osnovnih parametara (efektivne vrednosti, simetričnosti i sl.), tako i u pogledu izobličenja talasnog oblika (harmonici, propadi napona, kratkotrajni prekidi, impulsni prenaponi i sl.).

1.2. Kvalitet isporučene električne energije

Kvalitet isporučene električne energije, sa aspekta elektrodistribucije, podrazumeva kvalitet napona na sabirnici na koju se priključuju razni potrošači – tačka zajedničkog priključenja (point of common coupling – PCC). On podrazumeva da se osnovne karakteristike napona – efektivna vrednost, frekvencija, simetričnost i talasni oblik (sinusoidalnost) drže u zadanim okvirima, odnosno na nominalnim vrednostima u ustaljenom stanju elektro-energetskog sistema.

Na karakteristike napona značajan uticaj imaju sami potrošači, naročito grupa nelinearnih potrošača (energetski elektronski potrošači sa snažnim poluprovodničkim prekidačkim komponentama), zatim tranzijentne pojave usled komutacija u elektroenergetskom sistemu, atmosferski prenaponi, pojave kratkih spojeva, zemljo-spojeva i sl., kao i rad elektroenergetskog sistema na granicama mogućnosti (naponske redukcije, “slaba” mreža i sl.), velike varijacije opterećenja na perifernim delovima, te drugi faktori.

Posledice nekvalitetnog napajanja su veoma teške, najčešće povezane sa značajnim finansijskim i materijalnim štetama. Resetovanje računara, gubljenje memorije, pojava pogrešnih podataka, prekidi u produkcioni lancima, pojava naponske rezonancije, zaustavljanje pogona, kvarovi kondenzatorskih baterija, otkazivanje upravljačkih sklopova, kraći vek električnih mašina i kablova, smetnje u telekomunikacijama, pojava flikera i dr. su neki od najčešće zabeleženih.

Da bi se poboljšao kvalitet ili posebno zaštitili osetljivi potrošači, elektrodistribucije preduzimaju veliki broj mera za stabilizaciju rada elektroenergetskog sistema i obezbeđenja kvalitetne isporuke. Investiraju se značajna sredstva u opsežne projekte istraživanja parametara kvaliteta, donose se tehničke regulative za limitiranje nivoa harmonika i flikera, uvode se strožije norme za priključenje nelinearnih potrošača [5], a u poslednje vreme se razvijaju specijalne metode i uređaji za isporuku električne energije garantovanog kvaliteta [6]. Poznat je projekt “Emeraude”, koji je elektroprivreda Francuske (Electricite de France - EDF) pokrenula pre nekoliko godina, a čiji cilj je da kroz sistem posebnih ugovora obezbedi željeni (ugovoreni) kvalitet svakom potrošaču [7].

I sami potrošači su u tom cilju spremni da ulože značajnija sredstva u specijalnu opremu ili uređaje za održanje kvaliteta napajanja, kao što su sistemi besprekidnog napajanja (uninterable power supply – UPS), filtri i sl. [8]. Procenjeno je da je početkom devedesetih godina poboljšavan kvalitet 30.000 GWh energije godišnje [9], a to tržište sve više se širi, posebno u oblasti malih UPS-ova za personalne računare u kućnoj upotrebi.

1.3. Generisanje problema kvaliteta napona

Problem kvaliteta električne energije uočen je davno, ali je smatrano da je značajno umanjeno poboljšanjima u projektovanju i načinu održavanja sistema, njegovoj kontroli i primenom usavršenih tehnika za detekciju i lokaciju grešaka u radu. Ankete i istraživanja kod potrošača, koja su vršena u SAD uglavnom su pokazivala da su potrošači zadovoljni kvalitetom električne energije i eventualna ulaganja u dalje poboljšanje smatraju nepotrebnim [8].

Međutim, početkom sedamdesetih godina dolazi do značajne promene u strukturi potrošača. Prvo se pojavila grupa potrošača, koji su se odlikovali velikom efikasnošću, ali nelinearnom karakteristikom - energetski elektronski pretvarači. Oni su omogućili upravljanje složenim elektromotornim pogonima sa velikom preciznošću. Kao posledica njihovog rada i masovnog

uvođenja u industriju, domaćinstva i dr., nivo harmonika u mreži izrazito se povećao [10]. Međutim, takvi pogoni, upravljani analogno/digitalnim elektronskim kolima, postali su osetljivi na pojave u mreži, te su podvrgnuti strožijim uslovima zaštite.

Zatim, došlo je do masovnog uvođenja čitavog niza složenih, veoma savršenih uređaja, kontrolisanih elektronskim ili mikroelektronskim kolima, koji su celokupno društvo uveli u tzv. informaciono doba, ali koji su se pokazali izuzetno osetljivi na izobličenja i harmonike u talasnom obliku napona. Zbog toga su nazvani osetljivi potrošači. Najpoznatiji su veliki računari, personalni računari, razne komercijalne kompjuterizovane mašine (blagajničke kase, elektronske vage, bankarske mašine i dr.), procesna oprema u industriji, mikrotalasne pećnice, TV i audio oprema, digitalni satovi i dr. [8].

Pojava i trend brzog širenja ovakvih potrošača, od kojih jedni doprinose degradaciji kvaliteta, a drugi zahtevaju pooštavanje normi i finiji kvalitet, oživeo je problem isporuke odnosno konzumacije kvalitetne električne energije. Potreba za brzim rešavanjem dovela je do reakcije potrošača, koji su pored žalbi distribuciji na kvalitet, počeli stvari sami da rešavaju ugradnjom uređaja za poboljšanje kvaliteta (UPS i sl.).

1.4. Reakcija potrošača na pojave nekvalitetnog napona

U slučaju pojedinačne ili učestale degradacije kvaliteta električne energije, potrošači će iskusiti neke od ranije pomenutih negativnih efekata. Pojava takvih problema će biti indikacija da nešto sa napajanjem nije u redu, mada, u opštem slučaju, uzrok ne mora biti u nekvalitetnom naponu na sabirnici (loše uzemljenje u instalaciji potrošača se često javlja kao uzrok [1]). Uobičajena reakcija potrošača je pritužba distributivnoj organizaciji na kvalitet napajanja. Međutim, distributivna organizacija može da bude nesvesna, svesna ili da očekuje probleme zbog lošeg kvaliteta napona.

U prvom slučaju žalba potrošača je indikacija da se nešto promenilo u elektro-energetskom sistemu i da je normalno dobar kvalitet napona degradirao ili je neki od njegovih činilaca izašao van tolerisanih granica. Tada distribucije u svetu uglavnom koriste pripremljenu proceduru za proveru navoda potrošača i lociranje uzroka izobličenja [11,12]. Polazi se od toga da potrošač, kod koga se javljaju problemi usled lošeg kvaliteta, ima tri opcije: da sam reši problem, da potraži pomoć od isporučioaca opreme koja otkazuje ili da se žali distribuciji. U slučaju da se opredeli za treću opciju, distribucija i potrošač prvo diskutuju i analiziraju problem. Cilj je da se utvrdi uzrok problema. Ako to nije moguće kroz razgovore, preduzimaju se posmatranja činioaca kvaliteta mreže tj. merenje i akvizicija, gde se beleže sva izobličenja u mreži, njihovo vreme pojavljivanja, trajanje, amplituda, spektar i dr. Smatra se da ovo posmatranje mora da traje minimalno dve nedelje. Nakon toga analiziraju se memorisani rezultati i utvrđuje uzrok. Ako je on u potrošačevoj opremi ili njegovom električnom sistemu, distribucija predlaže korektivne mere (na primer: popravka slabo urađenog uzemljenja ili loših kontakata, povećanje snage ili uvođenje stabilizatora napona i dr.). Ako je on u mreži, distribucija treba da obezbedi tehničke mere za njegovo otklanjanje (ako je to isplativo) ili da strožijim propisima limitira nivo harmonika ili flikera, koje nelinearni potrošači generišu u mrežu.

U drugom slučaju, distribucija treba da očekuje pritužbe potrošača, jer sama proizvodi takvu situaciju (naponske redukcije, slabo održavanje mreže i sl.) ili je mreža po konfiguraciji i izvorima "slaba" ili preopterećena i sl. Da bi na njih mogla reagovati na obostrano zadovoljstvo, predlaže se niz mera za popravku stanja, kao i obavljanje dugotrajnih merenja i nadzora činioaca kvaliteta radi prikupljanja relevantnih podataka [1,11]. Rezultati takvih istraživanja ne moraju se slagati sa sličnim, u drugim distributivnim organizacijama, jer zavise od brojnih faktora subjektivne i objektivne prirode. Oni takodje ne mogu biti podloga za donošenje generalnih zaključaka o mreži, već samo za onaj deo koji je posmatran. To upućuje da ovakav nadzor mora biti stalna praksa, do god se kvalitet ne oceni dobrim.

U trećem slučaju, distribucija smatra da ima dobar kvalitet, ali priključenje novih potrošača nelinearne prirode može da ga ugrozi. Tada se distribucija štiti odgovarajućim propisima, preporukama ili standardima, koji u sebi često uključuju i proceduru priključenja takvih potrošača [11]. Da bi olakšala primenu ovakvih propisa izradjuju se posebni grafici iz kojih se jednostavno može odrediti da li će potrošač kršiti ili ne pomenute propise [14].

1.5. Klasifikacija izobličenja napona

Uzroci pojave deformacija napona mogu biti različiti i vezani su za razne aspekte rada elektroenergetskog sistema i uticaja okoline na njega. Mogu se razlikovati sledeći uzroci:

- 1 rad nelinearnih potrošača (energetski elektronski pretvarači, indukciono i elektrolučne peći, zasićene električne mašine i dr.). Usled prekidačke prirode rada ili nelinearne karakteristike oni konzumiraju nesinusoidalnu struju i dovode do pojave deformacije mrežnog napona (stvaranja viših harmonika, flikera, rupa i ureza u naponu i šuma).
- 2 normalne operacije u mreži (neophodne prekidačke manipulacije, priključenja i remont opreme), koje mogu izazvati deformacije tranzijentne prirode i deformacije u prelaznim režimima.
- 3 dejstvo prirodnih faktora (atmosferske nepogode, udari munje u vazdušne vodove, grane drveća, sitne životinje, ptice i drugo), koji izazivaju zemljospojeve i međufazne kratke spojeve, prenapone, podnapone, propade napona i sl.
- 4 rad opreme i lokalnog energetskog sistema (startovanje velikih elektromotornih pogona, nagle dinamičke promene opterećenja ili rada pogona, nelinearnosti u električnim mašinama, fluorescentno osvetljenje itd.), koji izazivaju varijacije napona, propade napona i sl.

Na bazi ovih uzroka pojave izobličenja napona, vrši se detaljna klasifikacija činioaca kvaliteta električne energije, odnosno kvaliteta napona. Njihova klasifikacija na bazi literature i iskustava autora, data je u tabeli 1.

Mogu se definisati dve grupe činilaca, koje određuju kvalitet korišćenog napona: osnovni parametri i deformacije talasnih oblika.

U prvu grupu spadaju varijacija efektivne vrednosti napona, frekvencije i pojava nesimetrije u mreži. Ovi činiooci su osnovni parametri koji definišu pravilan rad sistema i njihova odstupanja su definisana standardima, kao dozvoljene tolerancije. Kvalitet je ugrožen, ako varijacije premaše tolerancije.

Tabela 1.1: Prikaz činilaca kvaliteta

Grupe činilaca	Činiooci kvaliteta	Izvor deformacija	Amplituda Trajanje Frekvencija	Negativni efekti kod potrošača tipa:
Osnovni parametri	1. Varijacija napona	Preopterećenje, pogrešno podešeni regulacioni transformatori	$> \pm 10\% U_n$ > 1 min. 50 Hz	Svi potrošači (u dužem periodu)
	2. Varijacija frekvencije	Preopterećenje elektroenergetskog sistema	U_n > 1 min. $> \pm 1\% f_n$	Asinhroni motori, El. satovi, Elektronika
	3. Nesimetrija	Veliki monofazni potrošači, neuravnoteženost	$> \pm 2\%$ > 1 min. 50 Hz	Trofazni motori, Transformatori

Deformacije talasnih oblika	Tranzijenti	4. Impulsi	Munje i uključenje potrošača	$< 15 U_n$ $< 200 \mu s$ $> 5 \text{ kHz}$	Računarska oprema, Elektronika
		5. Oscilacije	Uključenje kondenzatora	$< 15 U_n$ $< 50 \text{ ms}$ $5 \text{ kHz} - 5 \text{ MHz}$	Računarska oprema, Elektronika
	Prelazni režimi sistema	6. Propadi (ulegnuća)	Start motora	$0.1-0.9 U_n$ $10 \text{ ms} - 1 \text{ min.}$ 50 Hz	Računari, Elektronika
		7. Premašenje	Jednopolni kratki spojevi; javljaju se u neoštećenim fazama, isključenja regulisanih pogona	$1,05 - 1,8 U_n$ $20-200 \text{ ms}$ 50 Hz	Računari, Elektronika
		8. Kratka beznaponska pauza	Automatski ponovni uklop	0 V $20 - 500 \text{ ms}$ /	Restovanje računara, Elektronika
		9. Podnaponi	Planirani (naponske redukcije) Nepodešeni transformatori	$0,8 - 0,9 U_n$ $> 1 \text{ min.}$ 50 Hz	Računari, Elektronika, Kondenzatorske baterije
		10. Prenaponi	Pogrešno podešeni regulacioni transformatori	$1,2 - 1,4 U_n$ $> 1 \text{ min.}$ 50 Hz	Sijalice, El. motori, Izolacija, Računari i Elektronika
		11. Beznaponska pauza	Kvarovi u mreži	0 $> 1 \text{ min.}$ /	Svi potrošači, Posebno računari i elektronika
		Ustaljeno stanje sistema	12. Harmonici	Energetski pretvarači, regulisani pogoni, zasićene el. mašine, fluorescentna rasveta	$2 - 5\% U_n$ $0,3 \text{ ms}$ $150 \text{ Hz} - 5 \text{ kHz}$
	13. Urezi, rupe		Energetski pretvarači	$0,1 - 0,9 U_n$ $0,3 \text{ ms}$ $200-300 \text{ Hz}$	Računarska oprema
	14. Fliker (treperenje)		Mlinovi za čelik, Elektro lučne peći i sl.	$0,3 - 2,5 U_n$ $0,3 \text{ ms}$ $< 25 \text{ Hz}$	Sijalice, Elektronika, Računari
	15. Šum		Energetski pretvarači	$0,9 - 1,1 U_n$ $0,3 \text{ ms}$ $> 5 \text{ kHz}$	Računarska oprema

U drugu grupu mogu se uvrstiti deformacije tranzijentne prirode, deformacije zbog prelaznih režima i deformacije u ustaljenom stanju. One se međusobno razlikuju po trajanju ispoljavanja, spektru i uticaju na amplitudu napona. Uticaj ovih činioca na industrijske pogone se manje prati, što ima za posledicu da su često uzrok neželjenih pojava. Za njih nisu dovoljno razrađeni odgovarajući

propisi ili preporuke, niti metode zaštite. U ovoj monografiji razmatraće se samo ova druga grupa činilaca.

Od ovih činilaca u literaturi [15] izdvojena su četiri i klasifikovana prema prioritetu rešavanja, a na osnovu frekvencije pojavljivanja, teškoća u otklanjanju i stepena poznavanja: izobličenje napona (harmonici), fluktuacija napona i fliker, propadi i nesimetrija. Slična podela data je u literaturi [12], gde su kao glavni činioci kvaliteta izdvojeni oni koji izazivaju izobličenje napona (podnaponi, premašenja, beznaponske pauze, impulsi) i harmonici. I u [16] su izdvojeni harmonici, fliker i nesimetrija, a slično je zaključeno i na Savetovanju JUKO-CIGRE Studijskog komiteta 31 “Kvalitet električne energije” u Vrnjačkoj Banji 1992. godine [17].

1.6. Indikatori (kvantifikatori) kvaliteta električne energije

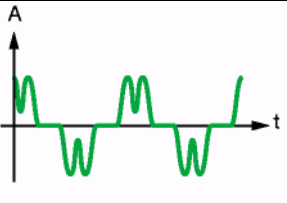
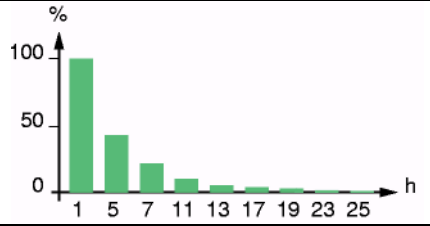
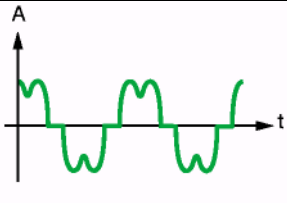
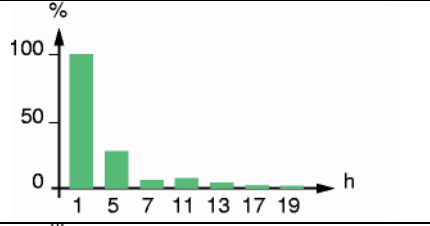

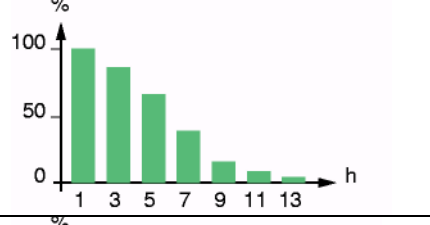
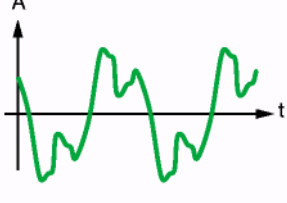
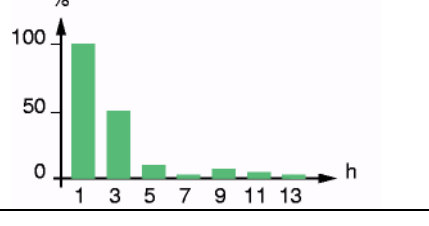
Postoje različiti indikatori, koji opisuju ili kvantifikuju nivoe odstupanja kvaliteta od željenog ili nominalnog. Oni imaju za zadatak da kondenzuju kompleksne pojave u vremenskom i frekventnom domenu u jedan jedini broj. Svi indikatori se mogu izraziti jasnim matematičkim formulama, ali se neki moraju dopuniti i statističkim prikazima. Njihova zajednička osobina je da se mogu relativno lako izračunati ili izmeriti, te da su postupci računanja i merenja standardizovani, tako da se rezultati mogu porediti sa velikom tačnošću. To takođe omogućava i donošenje standarda, preporuka i drugih tehničkih propisa vezanih za limitiranje njihovih nivoa, dužine trajanja i učestanosti pojavljivanja. U tabeli 1.2 dati su neki opšte prihvaćeni indikatori, njihova matematička definicija i najčešća oblast primene.

Tabela 1.2 - Neki indikatori kvaliteta električne energije

Indikator	Definicija	Glavna primena
Ukupna harmonijska distorzija (THDU, THDI)	$\sqrt{\frac{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2}{U_1^2}}, \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}{I_1^2}}$	Opisivanje nivoa viših harmonika, standardi
Individualna harmonijska distorzije (HD Uh, HD Ih)	$\frac{U_h}{U_1}, \frac{I_h}{I_1}$	Opisivanje nivoa viših harmonika, standardi
Faktor snage (PF, λ)	$P_{tot} / U_{eff} \cdot I_{eff} $	Naplata reaktivne i harmonijske snage (mogućnost)
Fliker faktor	$\Delta U / U $	Opis uticaja nelinearnih potrošača preko neregularnog rada žarulja
Faktor varijacije napona (efekt. vrednost i trajanje)	$U_{eff} / U_{nom} \cdot 100 [\%]$ Δt	Varijacije napona, propadi ili poskoci napona, podnaponi, prenaponi, beznaponske pauze
Faktor nesimetrije	$ U_- / U_+ $	Nesimetrija trofaznih mreža
Krest faktor	U_{peak} / U_{eff}	Vek trajanja dielektrika

U tabeli 1.3 su za neke od izvora harmonika dati karakteristični talasni oblici struje, nivoi harmonika i ukupna harmonijska distorzija. Navedeni nelinearni potrošači se u domenu svojih primena mogu odlikovati veoma dobrim performansama, ali sa aspekta indikatora kvaliteta električne energije koji opisuje nivo viših harmonika, veliki su izvori harmonika.

Tabela 1.3 Karakteristike određenih izvora harmonika

Nelinearni potrošači	Talasni oblik struje	Spektar	THDI [%]
Regulisani pogoni			44%
Ispravljači/punjači			28%
Uređaj za obradu podataka (PC i sl.)			115%
Fluorescentno osvetljenje			53%

1.7. Stanje u Srbiji

Problem kvaliteta električne energije u Srbiji je stalno aktuelan. Pred svaku zimsku sezonu donose se odgovarajuće procene i prognoze o kvalitetu isporuke električne energije za te periode, odnosno o realnim potrebama stanovništva i industrije. Da bi se obezbedile dovoljne količine energije vrše se remont i druge odgovarajuće pripreme proizvodnih jedinica, a planira se i uvoz. Za nama su ostala vremena kada se uvođenjem redukcija rešavao problem manjka, mada i dalje ostaju strahovanja da bi prevelika potrošnja mogla izazvati velike kvarove na nisko-naponskoj mreži. Pitanja dobrog održavanja i kvalitetnog remonta generatora, turbina, dalekovoda, rasklopnih postrojenja i drugih delova elektro-energetskog sistema indirektno brinu svakog stanovnika Srbije, isto kao i pitanja tarifnog sistema ili cene električne energije. Ova pitanja su vezana za domen kvaliteta isporuke električne energije, koja nisu predmet ove studije.

Medjutim, to ne znači da se o "fizičkom" kvalitetu električne energije u Srbiji ne vodi računa. Veoma pomno se prate i koriguju varijacije osnovnih parametara, koje su ipak neki put veće od dozvoljenih. Već više od 15 godina poklanja se dosta pažnje kvalitetu napona, odnosno pojavi viših harmonika i nesimetrije u mreži. Sada se intenzivno radi na podizanju nivoa znanja i donošenju odgovarajućih preporuka za buduće aktivnosti. Akcije se vode kroz naučno-istraživačke projekte i studije, kao i kroz naučne i stručne skupove u zemlji, postavljanjem kvaliteta električne energije kao posebnih (preferencijalnih) tema.

Do sada su završene dve značajne studije vezane za kvalitet električne energije [18,19], a i u novom ciklusu naučnih projekata koje finansira Ministarstvo za nauku, tehnologije i razvoj, jedan segment je posvećen ovoj problematici [20]. Proučavana je ova problematika sa teorijskog

stanovišta, kao i matematičke analize. U sklopu studije je realizovan odgovarajući merni sistem za praćenje pojedinih činilaca kvaliteta i izvršena su opsežna merenja i praćenja u pojedinim tačkama sistema. Sumiranjem rezultata ovih merenja u dužem periodu, kao i njihovim objedinjavanjem na nivou EPS-a, dobija se adekvatnija predstava o kvalitetu električne energije u Srbiji. Ove studije i njihovi rezultati detaljnije će biti opisane u poglavlju 3.

Dobar deo rezultata ovih studija, kao i drugih istraživanja, sumiran je u monografiji, koja je za svoju tematiku uzela više harmonike, kao najizraženiji problem u mnogim elektroenergetskim sistemima u svetu, pa i kod nas [21].

Na domaćim naučnim i stručnim skupovima ova problematika je prisutna na savetovanjima JUKO-CIGRE-a, JUKO-CIRED-a, simpozijumima Energetska elektronika – Ee i konferenciji ETRAN i INDEL (Banja Luka).

U okviru JUKO-CIGRE-a referati sa ovom tematikom pojavljuju se već više od 15 godina. Stavljanjem pojedinih činilaca kvaliteta, viših harmonika i propada napona, u preferencijalne teme Studijskog komiteta 36 – Elektromagnetna kompatibilnost (STK-36), kao i stalni interes za ovim problemima u okviru Studijskog komiteta 31 – Distributivne mreže (STK-31), rezultovao je pojavom vrednih referata na temu viših harmonika, kompenzacije reaktivne snage, nesimetrije i flikera [22]. Kao posebnu aktivnost STK 31, treba pomenuti veoma uspešnu stručnu konsultaciju “Kvalitet električne energije” održanu još 1992. godine [17]. Osnovne konstatacije i preporuke sa tog skupa ukazuju na uzroke pojave niskog kvaliteta i na potrebne aktivnosti za njegovu popravku. Od činilaca vezanih za "fizički" kvalitet, posebno su istaknuti problem nesimetrije i prisustva viših harmonika, kao i problem održavanja napona u propisanim granicama zbog niskog stepena kompenzacije reaktivne snage, nedovoljne izgradjenosti mreže i neadekvatnog vođenja pogona. Reorganizacijom JUKO CIRED-a 2003. god. ova problematika je oblast delovanja novog komiteta C4 – Tehničke performanse sistema.

U drugoj stručnoj organizaciji JUKO-CIRED, koja je počela da deluje 1998. godine, osnovana je Stručna komisija STK2 - “Kvalitet električne energije” u kojoj je na tri savetovanja prezentirano preko trideset referata [23]. Referati se uglavnom bave višim harmonicima, propadima napona, kao i pojavama prenapona i problemima lošeg uzemljenja. Ova konferencija se od oktobra 2004. god. održava kao regionalna, odnosno okuplja stručnjake Balkanskih i srednje-Evropskih zemalja. Petnaest od 27 prijavljenih radova za konferenciju 2004. god., koji su prošli rigoroznu recenziju, pokazuju da je ova problematika u fokusu stručnjaka ne samo u Srbiji nego i u širem okruženju.

Na simpozijumima Energetska elektronika, koji se od 1995. godine održavaju u Novom Sadu, kvalitet električne energije se proučava u vezi sa radom energetske elektronske pretvarača i njihovom interakcijom sa mrežom kao posebna tema [24]. S obzirom na međunarodni karakter simpozijuma moguće je dobijena znanja uporediti sa iskustvima naučnika iz inostranstva, što dodatno obogaćuje i podiže kvalitet saznanja.

Jugoslovenska konferencija ETRAN-a, koja se održava svake godine, u okviru svoje sekcije za elektroenergetiku objavljuje radove o pojedinim problemima kvaliteta električne energije [25]. Uglavnom su ovi radovi vezani za rad elektromotornih pogona, bilo kao teoretska razmatranja, bilo kao prikaz i analiza slučajeva iz prakse (case studies). Na XLV konferenciji ETRAN-a u Aranđelovcu 2001. god. uvodno predavanje je bilo posvećeno kvalitetu električne energije u Srbiji i svetskim standardima, što pokazuje interesovanje naučnika i stručnjaka za ovu problematiku kod nas [26].

Konferencija Industrijska elektronika – INDEL, koja se već 10-tak godina održava u Banja Luci, takođe jedan deo aktivnosti posvećuje posebnoj problematici kvaliteta električne energije [27]. U fokusu su uglavnom propadi napona i njihov uticaj na pravilan rad industrijskih elektronskih uređaja, kao i druga problematika (viši harmonici, standardi i sl.).

Od domaćih časopisa, radovi iz ovog područja se pojavljuju uglavnom u “Elektroprivredi” i “Elektrodistribuciji”, kao i u časopisu “Tehnika-Elektrotehnika”. Ipak, njihova učestalost je daleko manja nego na gore pomenutim konferencijama i drugim naučnim skupovima, tako da ih je tematski teško grupisati.

Ova studija je fokusirana na problematiku pojave i delovanja viših harmonika, mada će biti predstavljeni i drugi parametri kvaliteta električne energije – propadi napona, fliker i dr. Viši harmonici su posebno interesantni, jer su kontinualno prisutni u mreži, a njihov nivo tokom godina polako raste. Brojni negativni efekti se ispoljavaju iznenada, potpuno nenajavljeno, upravo kao posledica stalnog prisustva harmonika u elektro-energetskom sistemu, konfiguracije mreže i mesta i tipa priključenih potrošača. S druge strane, problematika viših harmonika je relativno nepoznat inženjerima u praksi i neophodan je dublji uvid i stvaranje jasnije slike.

Isto tako i propadi napona imaju veliki značaj, s obzirom na sve veći broj elektronskih i mikroelektronskih uređaja i sklopova u industrijskoj eksploataciji. Ovi uređaji su izuzetno osetljivi na propade, što dalje izaziva lančano isključenje kompletnih pogona i duže zastoje u proizvodnji. S obzirom na izražene ekonomske efekte ove pojave, poznavanje propada napona i načina za njihovo eliminisanje je od velike važnosti za našu, ali i sve ostale privrede sveta.

Pitanje flikera je odavno poznato, ali je zbog loših metoda rešavanja, a i pojavljivanja novih izvora i dalje aktuelno. Neodgovarajući tehnički propisi u elektrodistributivnim organizacijama, doprinose ponovnoj aktuelizaciji ovog problema i zahtevaju nova rešenja.

1.8. Literatura

1. 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.
2. D.Sabin, A.Sundaram, "Quality Enhances Reliability", *IEEE Spectrum*, Vol.33, No.2, Feb.1996, pp.34-41.
3. V.Strezoski, V.Katić, M.Nimrihter, D.Janjić, "Main Aspects of the Quality of Electric Energy Supply", *Monograph: Contemporary Problems in Power Engineering*, Edited by D.Gvozdenac, J.Xypteras, M.Dimić, FTN, Novi Sad/Thessaloniki, 1995, pp.31-49.
4. W.Gunselmann, "The new European EMC-Directive-technical recommendations and economic consequences", *Power Quality News*, Vol.1, No.2, 1995, pp.34-35.
5. 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.
6. N.Hingorani, "Introducing Custom Power", *IEEE Spectrum*, Vol.32, No.6, June 1995, pp.41-48.
7. <http://www.edf.com>
8. IEEE WG on Voltage Flicker and Service to Critical Loads, "Power Quality-Two Different Perspectives", *IEEE Tran. on Power Delivery*, Vol.5, No.3, July 1990, pp.1501-1513.
9. V.Tahiliahi, H.Mehta, "CUSTOM POWER - Utility's Response to Power Quality Issues", *Int. Conf. on Power Quality*, Munchen, Oct.1992.
10. CIGRE - WG 36.05: "Harmonics, Characteristic Parameters, Methods of Study, Estimates of Existing Values in the Network", *Electra*, No.77, Jul.1981, pp.35-54.
11. A.Aruda, F.Cavalcanti, N.Silva Vilares, R.Montelli, R.Almeida, S.Yagi: "Power System Harmonics and Flicker Survey", CIGRE, 1992 Session, Paris, paper no.36-202.
12. D.Koval: "Power System Disturbance Patterns", *IEEE Tran. on Industry Applic.*, Vol.26, No.3, May/June 1990, pp.556-562.
13. J.Arrillaga, D.Bradley, P.Bodger: "Power System Harmonics", John Wiley & Sons, Chichester, 1985.

-
14. W.Xu: "A Practical Harmonic Guideline for Adjustable Speed Drive Applications", IEEE Tran. on Power Delivery, Vol.7, No.1, Jan.1992, pp.427-433.
 15. CIGRE - WG 36.05: "Report on the Results of the International Questionnaire Concerning Voltage Disturbances", Electra, No.99, Jul.1985, pp.47-56.
 16. A.Robert, J.Marquet: "Assesing Voltage Quality With Relation to Harmonics, Flicker and Unbalance", CIGRE, 1992 Session, Paris, paper no.36- 203.
 17. JUKO-CIGRE, STK-31: Stručna konsultacija "Kvalitet električne energije", Vrnjačka Banja, Okt.1992.
 18. V.Katić: "Energetski elektronski pretvarači kao izvori viših harmonika u distributivnoj mreži - I deo", *Studija za SOUR Elektrovojvodina*, Novi Sad, mart 1990.
 19. Studija: "Kvalitet električne energije u elektrodistributivnim mrežama", (Nosilac: V.Katić), Studija za JP Elektroprivreda Srbije, Beograd, 1997-2000.
 20. Projekat 3202: "Unapređenje elektrodistributivnih sistema", (Nosilac projekta: dr V.Strezoski; Saradnici: dr V.Katić i dr.), Ministarstvo za nauku, tehnologije i razvoj Republike Srbije, Program tehnološkog razvoja, Beograd, 2002-2005.
 21. V.Katić: "Kvalitet električne energije – viši harmonici", Monografija, Univerzitet u Novom Sadu - Fakultet tehničkih nauka, Edicija Tehničke nauke - Monografije, Br. 6, Novi Sad, 2002.
 22. Zbornici sa Savetovanja JUKO CIGRE: XVII-XXVIII Savetovanje JUKO CIGRE, 1985-2007.
 23. Zbornici radova sa Savetovanja JUKO-CIRED: I-V Savetovanje JUKO CIRED, 1998-2006. (CD-ROM)
 24. Zbornici radova sa Međunarodnog simpozijuma Energetska elektronika: Ee'95, Ee'97, Ee'99, Ee 2001, Ee 2003, Ee2005, Ee2007, Novi Sad, 1995-2007.
 25. Zbornici radova sa Jugoslovenske konferencije ETRAN, 1995-2007.
 26. V.Katić: "Svetski standardi i kvalitet električne energije u Srbiji", XLV konferencija ETRAN, Uvodni rad, Bukovička Banja - Arandjelovac, Jun 2001, pp.43-52.
 27. Zbornici radova sa konferencije Industrijska elektronika - INDEL, Banja Luka, 1996-2006.

2. POJMOVI I DEFINICIJE PARAMETARA KVALITETA

Kvalitet isporučene električne energije se definiše nizom parametara, koji su sumarno predstavljeni u tabeli 1.1. Oni su podeljeni u osnovne parametre i deformacije talasnih oblika, koje se mogu javiti tokom tranzijentnih pojava, u prelaznim režimima ili u ustaljenom stanju. U ovom poglavlju oni će biti ukratko detaljnije opisane.

2.1. Osnovni parametri napona

U osnovne parametre napona, odnosno prvu grupu činilaca kvaliteta spadaju:

1. varijacija efektivne vrednosti napona,
2. varijacija frekvencije i
3. pojava nesimetrije u mreži.

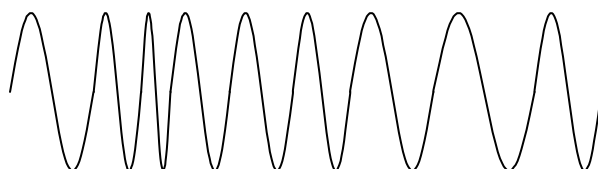
Ovi parametri definišu pravilan rad sistema i njihova odstupanja su definisana standardima. Kvalitet je ugrožen, ako varijacije premaše dozvoljene limite.

2.1.1. Varijacija napona

Varijacija napona je promena efektivne vrednosti sa amplitudom manjom ili većom od 10% nazivne vrednosti. Dugotrajne varijacije napona su promene napona koje traju duže od 1min. One se obično bliže opisuju terminima koji označavaju amplitudu varijacije napona (podnapon, prenapon ili beznaponska pauza). Ove varijacije napona nastaju usled spore promene potrošnje koja je vezana na mrežu i usled pogrešno podešenih regulacionih transformatora.

2.1.2. Varijacija frekvencije

Varijacija frekvencije je povećanje ili smanjenje frekvencije sistema. Trajanje varijacije frekvencije može biti od nekoliko perioda do nekoliko časova. Varijacije frekvencije se definišu kao varijacije osnovne frekvencije elektroenergetskog sistema od svoje specificirane nazivne vrednosti (na primer 50Hz ili 60Hz). Na slici 2.1 dat je primer talasnog oblika napona pri varijaciji frekvencije.



Slika 2.1 - Primer talasnog oblika napona pri varijaciji frekvencije.

Frekvencija elektroenergetskog sistema je u direktnoj vezi sa brzinom obrtanja generatora u sistemu. Frekvencija u svakom momentu zavisi od balansa između potrošnje i kapaciteta raspoloživih generatora. Kada se ovaj balans naruši pojavljuju se male promene frekvencije. Varijaciju frekvencije mogu izazvati i slaba regulacije brzine lokalnih generatora, kratki spojevi na

velikom delu elektroenergetskog sistema, ispadi velikih potrošačkih blokova (pogona), ispadi generatorski jedinica velike snage i sl.

Veličina promene frekvencije i njegovo trajanje zavisi od karakteristika potrošnje i odziva generatora na promene potrošnje.

Varijacije frekvencije koje prevazilaze usvojene limite za rad u normalnom ustaljenom stanju elektroenergetskog sistema su uzrokovani kvarovima u najvećem delu prenosnog sistema, isključenjem velikih grupa potrošača, ili isključenjem velikih generatorskih izvora.

2.1.3. Nesimetrija napona

Nesimetrija jednog višefaznog sistema je maksimalno odstupanje faznog napona među trima fazama od srednje vrednosti faznog napona podeljeno sa srednjom vrednošću faznog napona. Tako se nesimetrija može izračunati u procentima

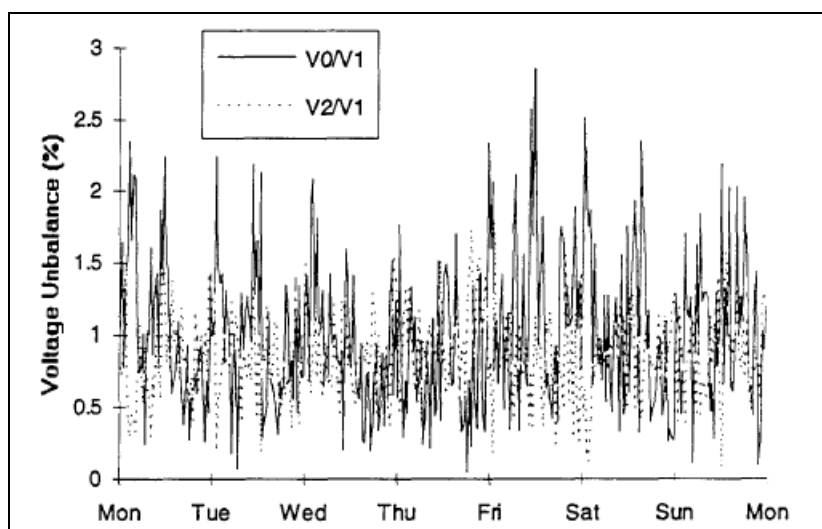
$$\Delta U_i = 100 \cdot \max_i \frac{U_i - U_{avg}}{U_{avg}}, \quad (2.1)$$

gde je U_i napon i-te faze, a U_{avg} srednja vrednost faznog napona. Nivo nesimetrije se definiše Forteskjeovim komponentama i to odnosom komponente napona inverznog redosleda (ili komponente napona nultog redosleda) osnovnog harmonika ((U_{1_i}) ili (U_{1_0})) prema komponenti napona direktnog redosleda osnovnog harmonika ((U_{1_d})):

$$\Delta U_i = \frac{|U_{1_i}|}{|U_{1_d}|} \text{ i } \Delta U_0 = \frac{|U_{1_0}|}{|U_{1_d}|} \quad (2.2)$$

Generalno, napon inverznog redosleda (ili nultog redosleda) nastaje zbog nesimetričnih opterećenja koja dovode do nejednakih struja triju faza. Na slici 2.2 je prikazana nesimetrija u toku nedelju dana jednog distributivnog fidera koji napaja stambenu potrošnju.

Nesimetrija nastaje u slučajevima nepravilnosti u radu kondenzatorskih baterija, recimo kada pregori osigurač jedne faze trofazne kondenzatorske baterije. Jednopolni ili dvopolni kratki spojevi takođe uzrokuju nesimetriju sve dok ne odreaguje zaštita.



Slika 2.2 - Nesimetrija napona na sabirnici sa koje se napaja stambena potrošnja.

2.2. Deformacije talasnog oblika napona

Druga grupa činilaca kvaliteta podrazumeva parametre, koji utiču na sinusoidalni oblik napona na sabirnicama i varijacije njegove efektivne vrednosti, kao i na talasni oblik struje, koju potrošači kozumiraju. Oni se mogu podeliti na tri podgrupe na osnovu dužine perioda nastajanja, odnosno trajanja:

- deformacije tokom tranzijenata,
- deformacije u prelaznim stanjima sistema (kratkog i dugog trajanja) i
- deformacije u ustaljenom stanju sistema.

Ova grupa činilaca direktno definiše kvalitet isporučene električne energije, odnosno kvalitet napajanja. Njoj se poslednjih godina poklanja sve veća pažnja, jer je uočen niz negativnih efekata, pre svega kod modernih računara i računarske opreme, sofisticiranih mikro-elektronskih uređaja, ali i standardne električne opreme, te drugih tkzv. osetljivih potrošača. Naročito predstavljaju problem kratkotrajne varijacije napona (propadi i poskoci napona), viši harmonici, fliker i slične deformacije.

2.3. Tranzijenti

Tranzijent označava pojavu ili veličinu koja se menja između dva uzastopna ustaljena stanja tokom vremenskog intervala, koji je kratak u poređenju sa razmatranim vremenskim opsegom. Tranzijent može biti jednosmerni impuls bilo kog polariteta ili prigušen oscilatorni talas sa prvim maksimumom ma kog polariteta. Tako se tranzijenti mogu podeliti u dve kategorije, impulsne i oscilatorne. Ovi termini odražavaju talasni oblik tranzijenta struje ili napona.

2.3.1. Impulsni tranzijenti

Impulsni tranzijenti se javljaju iznenada, bez promene frekvencije ustaljenog stanja napona, struje ili obe veličine, i po polaritetu su jednosmerani (prvobitno ili pozitivan ili negativan). Oni predstavljaju kratkotrajne poremećaje velike amplitudne vrednosti, velike brzine uspona i veoma brze promene stacionarnog stanja talasnih oblika napona i/ili struje.

Impulsni tranzijenti se obično opisuju vremenom uspona i vremenom kašnjenja. Ove pojave se takođe mogu opisati spektralnim sastavom. Na primer, $1,2/50\mu\text{s}$ 2000V znači da impulsni tranzijent dostiže svoju maksimalnu vrednost od 2000V za $1,2\mu\text{s}$, a onda slabi do polovine svoje maksimalne vrednosti za $50\mu\text{s}$. Frekventno područje tranzijentna je veće od 5 kHz (visoka frekvencija), a dužina trajanja je 30 – 200 μs .

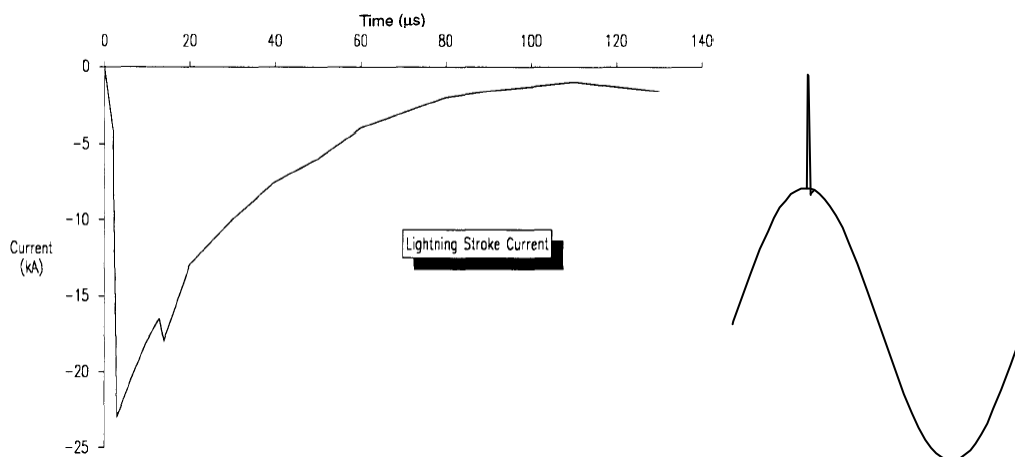
Najčešći uzrok impulsnih tranzijenata je atmosfersko pražnjenje. Slika 2.3 prikazuje tipični tranzijent struje koji uzrokuje atmosfersko pražnjenje i odgovarajući impulsni tranzijent.

Pošto se radi o visokim frekvencijama, impulsni tranzijenti se brzo prigušuju aktivnim otpornostima kola i ne prostiru se daleko od svog izvora. Od mesta do mesta unutar jedne građevine mogu postojati značajne razlike u karakteristikama tranzijenta. Impulsni tranzijenti mogu pobuditi rezonantna kola elektroenergetskog sistema i uzrokovati naredni tip smetnje, oscilatorne tranzijente. Najčešće posledice ovih tranzijenata su kvarovi transformatora, kvarovi odvodnika prenapona i oštećenja električne opreme.

2.3.2. Oscilatorni tranzijenti

Oscilatorni tranzijent je iznenadna pojava koja ne uzrokuje promene frekvencije ustaljenog stanja napona, struje ili obe veličine, a koja obuhvata vrednosti i pozitivnog i negativnog polariteta.

Jedan oscilatorni tranzijent se sastoji od napona ili struje čija trenutna vrednost brzo menja znak. On se opisuje spektralnim sastavom (pretežno frekvencijom), trajanjem i amplitudom. Podklase koje se odnose na spektralni sastav su definisane u tabeli 1.1. Opsezi frekvencija za ovu podelu su izabrane da bi se podudarale sa uobičajenim tipovima oscilatornih tranzijentnih pojava u elektroenergetskom sistemu. Kao i impulsni tranzijent, oscilatorni tranzijent se može izmeriti sa ili bez obuhvatanja osnovne frekvencije. Kada se opisuje tranzijent, važno je naznačiti amplitudu sa i bez osnovne komponente.

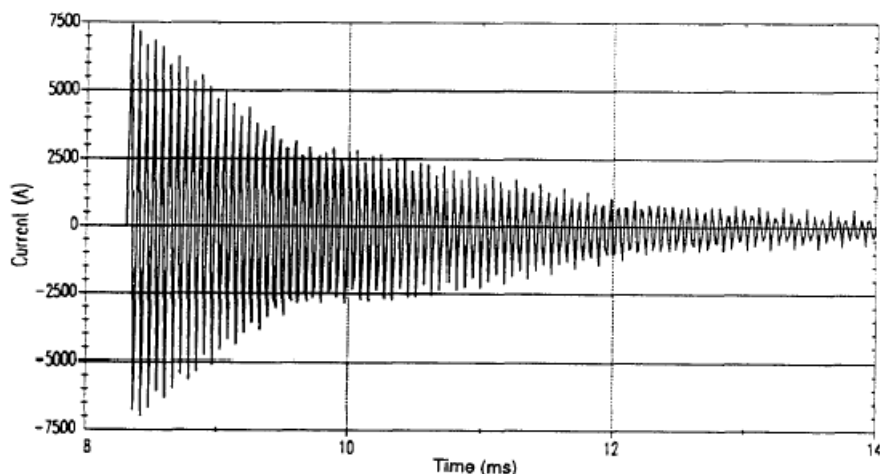


Slika 2.3 - Struja atmosferskog pražnjenja (levo), koja može dovesti do impulsnog tranzijenta napona (desno).

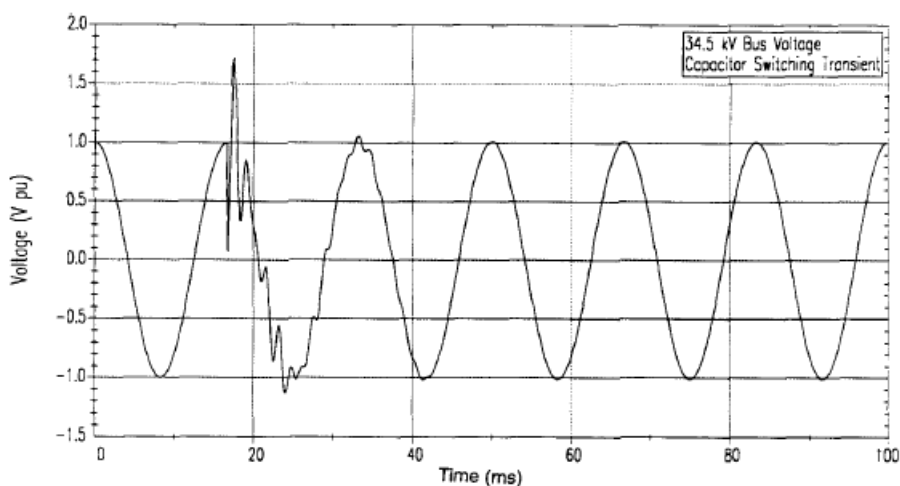
Oscilatorni tranzijenti sa osnovnom frekvencijom većom od 500kHz i tipičnim trajanjem koje se meri mikrosekundama (ili nekoliko perioda osnovne frekvencije) smatraju se oscilatornim tranzijentima visoke frekvencije. Ovi tranzijenti skoro uvek nastaju usled neke vrste prekidanja (komutacija). Oscilatorni tranzijenti visoke frekvencije često su rezultat odziva lokalnog sistema na impulsni tranzijent. Uređaji energetske elektronike proizvode oscilatorne tranzijente napona kao rezultat komutacije i RLC snubber-ima (kolima za prigušenje). Ovi tranzijenti mogu biti u oblasti kHz, traju nekoliko perioda svoje osnovne frekvencije, ponavljaju se nekoliko puta u osnovnoj periodi frekvencije mreže (zavisno od pulsnoeg broja uređaja) i imaju amplitudu od 0,1r.j.

Tranzijent sa komponentom osnovne frekvencije između 5 i 500kHz sa trajanjem koje se meri desetinama mikrosekundi (ili nekoliko perioda svoje osnovne frekvencije) naziva se tranzijent srednje frekvencije. Priključenje kondenzatora jednog pored drugog proizvodi oscilatorne tranzijente struja frekvencije od nekoliko desetina kiloherca. Ova pojava nastaje kada se kondenzatorska baterija priključi u blizini kondenzatorske baterije koja već radi. Priključena baterija "vidi" drugu bateriju kao putanju niske impedanse (koja je ograničena samo induktivnošću čvora na koji su baterije vezane). Slika 2.4 prikazuje tranzijent rezultujuće struje usled priključenja kondenzatorske baterije u blizini. Priključenje kabla rezultira oscilatornim tranzijentima napona u istom frekvencijskom opsegu. Tranzijenti srednje frekvencije takođe mogu biti rezultat odziva sistema na jedan impulsni tranzijent.

Tranzijent čija je osnovna frekvencija manja od 5kHz i traje od 0,3 ms do 50ms naziva se tranzijent niske frekvencije. Ova vrsta pojave je česta u prenosnim i distributivnim mrežama, a uzrokuju je mnoge vrste događaja, naročito priključenje kondenzatorske baterije. Rezultujući talasni oblik napona je poznat inženjerima koji se bave elektroenergetskim sistemima i mogu se lako klasifikovati korišćenjem svojstava koja se nadalje razmatraju. Priključenje kondenzatorske baterije obično uzrokuje oscilatorni naponski tranzijent osnovne frekvencije između 300 i 900Hz. Tranzijent ima maksimalnu amplitudu koja se može približiti 2r.j., ali je obično 1,3-1,5r.j. i traje između 0,5 i 3 periode zavisno od prigušenja sistema (slika 2.5).



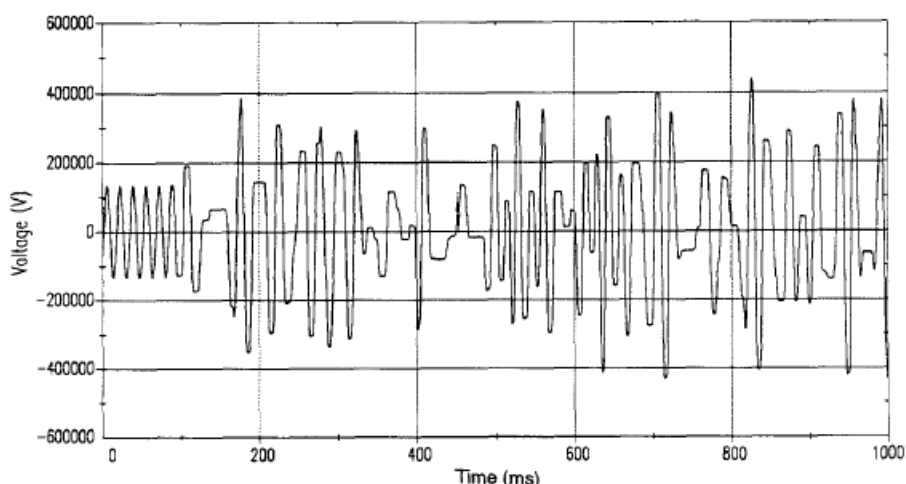
Slika 2.4 - Oscilatorni tranzijent, koji nastaje usled priključenja kondenzatora u blizini drugog



Slika 2.5 - Oscilatorni tranzijent niske frekvencije koji nastaje zbog priključenja kondenzatorske baterije

Oscilatorni tranzijenti sa osnovnim frekvencijama manjim od 300Hz se takođe mogu pojaviti u distributivnim mrežama. Ovi su generalno povezani za ferorezonansom i priključenjem transformatora. Tranzijenti koji obuhvataju redne kondenzatore mogu takođe da pripadnu toj kategoriji. Oni se pojavljuju kada rezonansa sistema uzrokuje povećanje komponenti niske frekvencije u transformatorskoj pobudnoj struji (drugi, treći harmonik) ili kada neobične okolnosti uzrokuju ferorezonansu, kao što je prikazano na slici 2.6.

Najčešće posledice oscilatornih tranzijenata su kvarovi osetljive električne opreme, prenaponi na mestu ugradnje kondenzatorskih baterija, kvarovi ili greške u radu osetljive elektronske opreme, pojava šuma u komunikacionim signalima, otkazi napajanja i sl.



Slika 2.6 - Oscilatorni tranzijent niske frekvencije koji uzrokuje ferorezonansa jednog neopterećenog transformatora

2.4. Prelazni režimi sistema

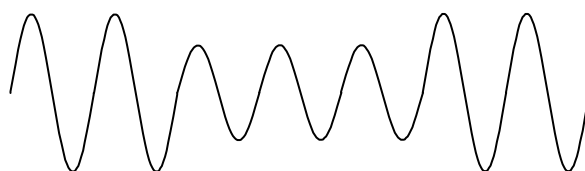
U prelazne režime spadaju propadi, premašenja, beznaponske pauze, podnaponi, prenaponi i beznaponske pauze duže od 1 minuta. Prelazni režimi sistema se mogu, shodno trajanju, podeliti na tri kategorije:

1. trenutni (0,5-30perioda),
2. prolazni (30perioda-3s),
3. privremeni (3s-1min).

Imajući u vidu ovu podelu, propadi, premašenja i beznaponske pauze takođe mogu biti trenutni, prolazni ili privremeni, a u skladu sa svojom dužinom trajanja.

2.4.1. Propad napona

Propad napona je smanjenje napona do vrednosti između 0,1 i 0,9 r.j. pri frekvenciji sistema u trajanju od 0,5 periode do 1min. Tipične vrednosti su oko 0,7 r.j. Uzroci propada su lokalni ili udaljeni kratki spojevi u elektroenergetskom sistemu, rad elektrolučnih peći, rad uređaja za elektrootporno zavarivanje, startovanje velikih električnih motora ili drugih potrošača velike snage. Najčešće posledice su ispadi osjetljive električne opreme, resetovanje računara i druge računarske i digitalne opreme, treperenje sijalica sa užarenim vlaknom i dr. Na slici 2.7 je predstavljen talasni oblik propada napona. O propadima će biti detaljnije pisano u nastavku, pa se ovde neće dalje tretirati.

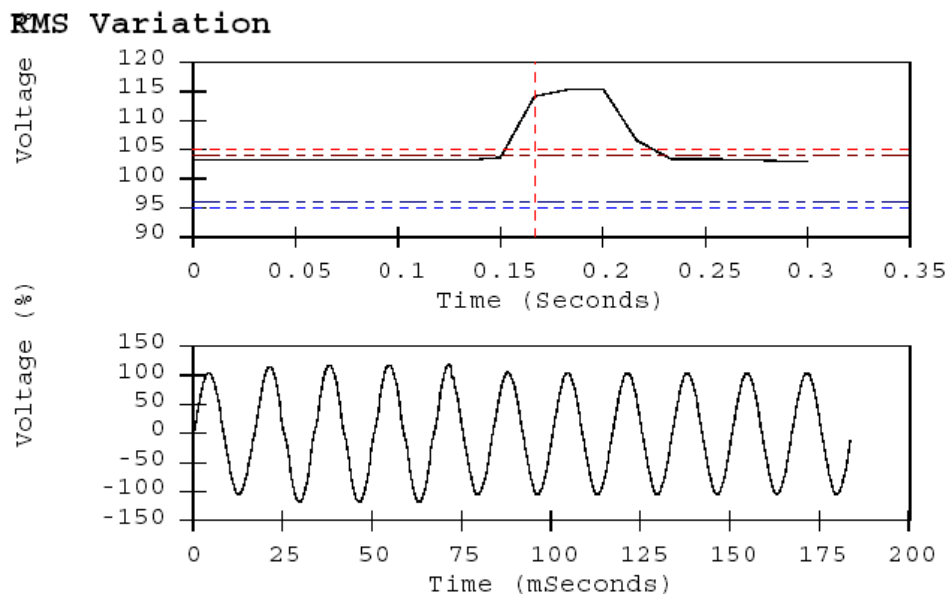


Slika 2.7 – Talasni oblik kratkog propada napona.

2.4.2. Premašenje napona

Premašenje napona je povećanje efektivne vrednosti napona na frekvenciji sistema u trajanju od 0,5 periode do 1min. Tipične vrednosti premašenja su 1,1-1,8 r.j. Premašenje se, dakle opisuje amplitudom (rms vrednošću) koja je uvek veća od 1,1 r.j. i trajanjem.

Kao i propadi, i premašenja se vezuju za kvarove u sistemu, ali su mnogo ređa od propada napona. Premašenje se može pojaviti pri jednofaznom kratkom spoju sa zemljom u sistemu što dovodi do prolaznog povećanja napona zdravih faza. Premašenje takođe može nastati prilikom isključenja velikih potrošača ili prilikom uključenja kondenzatorskih baterija velike snage. Slika 2.8 prikazuje premašenje napona usled jednofaznog kratkog spoja sa zemljom.



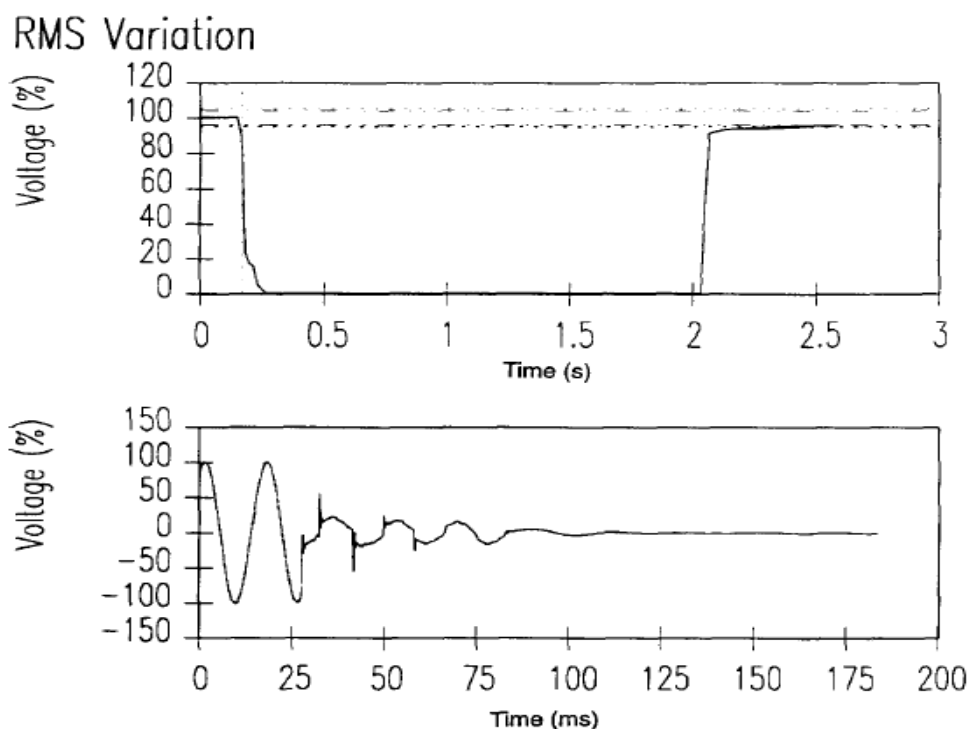
Slika 2.8 - Trenutno premašenje napona usled jednofaznog kratkog spoja sa zemljom

Amplituda premašenja napona tokom kvara u sistemu je funkcija mesta kvara, impedanse sistema i uzemljenja. Za sistem sa izolovanim zvezdištem, fazni napon zdravih faza će biti 1,73r.j. tokom jednofaznog kratkog spoja. U blizini transformatorske stanice sistema sa uzemljenim zvezdištem neće biti porasta napona zdravih faza zato što je sprega transformatora obično trougao-zvezda čime se postiže mala impedansa nultog redosleda za struju kvara.

2.4.3. Beznaponska pauza (kratkotrajna)

Kratkotrajna beznaponska pauza u zavisnosti od trajanja, može biti prolazna ili privremena.

Prolazna beznaponska pauza je potpuni gubitak napona ($U < 0,1r.j.$) jedne ili više faza u vremenskom intervalu od 0,5 perioda do 3s. Kao i kod propada i premašenja, u ovom vremenskom intervalu se mogu izdvojiti trenutne beznaponske pauze koje traju između 0,5 periode i 30 perioda, pa su tada privremene beznaponske pauze između 30 perioda i 3s. Beznaponske pauze prolaznog karaktera u elektrodistributivnim sistemima često nastaju usled automatskog ponovnog uključenja koje se primenjuje radi eliminisanja prolaznih kvarova u elektroenergetskom sistemu. Prilikom automatskog ponovnog uključenja, vod koji je pogođen kvarom ostaje bez napona u kratkom vremenskom intervalu, a onda se opet napaja. Ovaj interval omogućava da kvar prođe i da se vazduh dejonozuje. Praksa je veoma različita od distribucije do distribucije – neke primenjuju beznaponsku pauzu od 12 perioda, a neke i do 1min. Kada je beznaponska pauza kratka, koliko je i vreme reagovanja prekidačkih uređaja ($< 1s$), obično se radi o tzv. trenutnim ponovnim uključenjima. Treba primetiti da mnoga elektrodistributivna preduzeća primenjuju vremenske intervale tako duge da nastaju privremene, a ne prolazne beznaponske pauze. Drugi uzroci prolaznih beznaponskih pauza se odnose na mehaničke prekidače za prebacivanje opterećenja (od jednog izvora na drugi), slabe privremene veze i kvarove u blizini potrošnje koji obaraju napon na skoro 0 volti ($< 0,1r.j.$). Na slici 2.9 je prikazana efektivna vrednost i talasni oblik napona tokom prolazne beznaponske pauze koja nastaje usled kvara i delovanja automatskih prekidača.

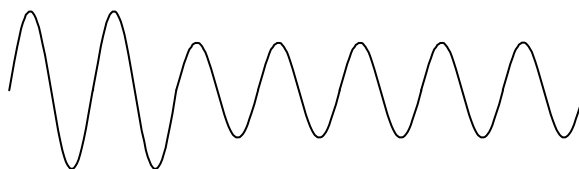


Slika 2.9 - Prolazna beznaponska pauza usled kvara i rada automatskih prekidača

Privremena beznaponska pauza je vrsta prelaznog režima kratkog trajanja. To je potpuni gubitak napajanja ($<0,1r.j.$) jedne ili više faza u toku vremenskog intervala između 3s i 1min. Privremene beznaponske pauze uzrokuju iste pojave kao i prolazne beznaponske pauze.

2.4.4. Podnapon

Podnapon je pojava napona, koji ima vrednost manju od nazivne u vremenskom intervalu dužem od 1min. Tipične vrednosti su 0,8-0,9r.j. Prenaponi mogu biti rezultat uključivanja velikih potrošača ili isključivanja kondenzatorskih baterija dok oprema za regulaciju napona ne vrati napon unutar dozvoljenih limita. Nepravilno postavljanje prenosnog odnosa transformatora, kao i struje preopterećenja, mogu dovesti do podnapona u sistemu. Podnapon može biti i planirani i to kada se želi postići manja potrošnje smanjenjem napona mrežne frekvencije. Najčešće posledice pojave podnapona su problemi u radu opreme koja zahteva konstantan napon napajanja, kao što su elektronski uređaji, referentne vrednosti i sl. Na slici 2.10 je prikazan jedan primer talasnog oblika napona tokom pojave podnapona.

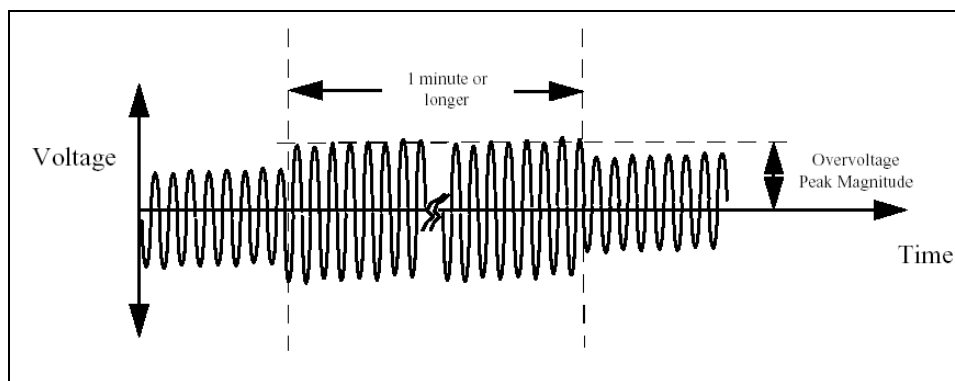


Slika 2.10 - Talasni oblik napona tokom pojave podnapona.

2.4.5. Prenapon

Prenaponi –koriste se da opišu specifičan prelazni proces dogog trajanja. Odnose se na izmereni napon koji ima vrednost veću od nazivne vrednosti u vremenskom intervalu dužem od 1min, a tipične vrednosti su od 1,1 do 1,2r.j. Prenaponi su rezultat događaja suprotnih onima koji dovode do podnapona, na primer isključivanje velikih potrošača ili uključivanje kondenzatorskih

baterija. Slabe mogućnosti sistema u regulaciji napona i kontroli, kao i nepravilno podešenje prenosnog odnosa transformatora može takođe dovesti do prenapona u sistemu. Slika 2.11 prikazuje tipičan talasni oblik prenapona.

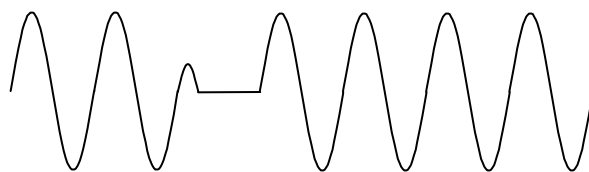


Slika 2.11 - Tipičan talasni oblik prenapona

2.4.6. Beznaponska pauza

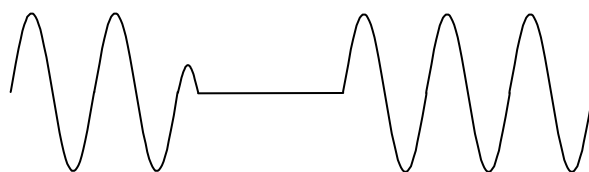
Beznaponska pauza je smanjenje napojnog napona do 0V (<0,1r.j.) u vremensko intervalu od nekoliko perioda pa do 3 minuta. Beznaponska pauza spada u kategoriju varijacija napona, koje izazivaju ozbiljne posledice, naročito u procesnoj industriji i obično zahteva ručnu intervenciju i restauraciju. Javlja se kao trenutna, momentalna, privremena i dugotrajna.

Trenutni prekid napajanja ima dužinu trajanja od 0,5 – 30 perioda i prikazan je na slici 2.12.



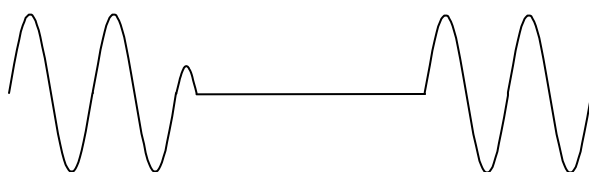
Slika 2.12 - Trenutni prekid napajanja

Momentalni prekid napajanja ima dužina trajanja od 30 perioda – 3 s sa amplituda napona < 0.1 p.u., i dat je na slici 2.13.



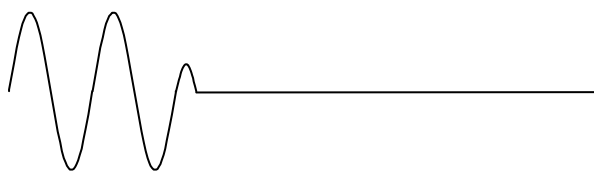
Slika 2.13 - Momentalni prekid napajanja

Privremeni prekid napajanja je nestanak napona u trajanju od 3 s – 1 min i prikazan je na slici 2.14.



Slika 2.14 - Privremeni prekid napajanja

Dugotrajna beznaponska pauza je u stvari prekid napajanja u trajanju od 1 min – 3 minuta, sa amplitudama napona < 0.1 p.u., a prikazan je na slici 2.15.



Slika 2.15 – Dugotrajna beznaponska pauza.

Uzroci ovih pojava se nalaze u privremenim kratkim spojevima u EES-u, usled udara groma, tokom otklanjanja kvara nastalog spojem dva voda drvenim granama i sl., kao i usled neotklonjenih kratkih spojeva u sistemu. Najčešće posledice su prekidi rada industrijskih pogona, isključenje ili resetovanje računara, pogrešan rad računarske i elektronske opreme i uređaja i sl., a dovode do velikih gubitaka u proizvodnji, poslovanju i smanjenju dohotka (neostvorena proizvodnja).

2.5. Ustaljeno stanje sistema

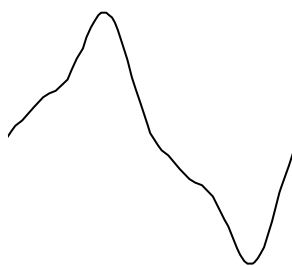
Deformacije u ustaljenom stanju obuhvataju DC offset (jednosmernu komponentu), više harmonike, interharmonike, ureze (rupe), fluktuaciju napona i šum.

2.5.1. DC offset

DC offset je prisustvo jednosmernog napona ili struje u ac elektroenergetskom sistemu. Ova pojava može nastati usled geomagnetnih poremećaja ili usled polutalasnog ispravljanja. Da bi se produžio vek trajanja svetiljki sa užarenim vlaknom mogu se koristiti diode koje smanjuju efektivnu vrednost napona koji se dovodi svetiljki ispravljanjem talasnog oblika.

2.5.2. Viši harmonici

Viši harmonici napona su komponente napona čije su frekvencije celobrojni umnošci osnovne frekvencije, odnosno one za koju je EES projektovan (obično 50Hz ili 60Hz). Nelinearni potrošači, kao što su energetska pretvarači u elektronskoj opremi, industrijskim pogonima, računarima i dr. generišu nesinusoidalne talasne oblike struje pri napajanju sinusnim naponom, odnosno injektiraju više harmonijske komponente struje u sistem. Proticanjem duž impedanse sistema, ove komponente izazivaju pad napona, odnosno imaju za posledicu njegovo izobličenje (slika 2.16). Obično se javljaju viši harmonici reda do nekoliko kHz, a od praktičnog značaja su interesantni harmonici reda do 100-tog (5 ili 6 kHz). Najčešće posledice su pojava rezonancije u sistemu, umanjena pouzdanost, kraći radni vek električne opreme, greške u upravljačkim sistemima i dr. O ovim deformacijama biće više reči u nastavku.



Slika 2.16 - Tipičan talasni oblik napona, koji je izobličen višim harmonicima.

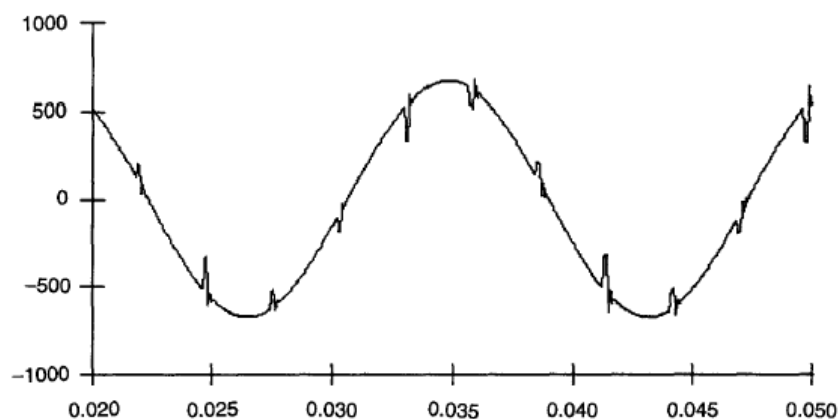
2.5.3. Interharmonici

Interharmonici su komponente čija frekvencija nije celobrojni umnožak frekvencije za koju je napojni sistem projektovan (na primer 50Hz ili 60Hz). Interharmonike obično uzrokuju statički frekvencijski konvertori, ciklokonvertori, asinhroni motori, uređaji sa lukom. Signali koji se prenose elektroenergetskim vodovima se takođe mogu smatrati interharmonicima. Frekvencija interharmonika može biti jedna diskretna frekvencija (asinhroni motori) ili se može pojaviti kao široki spektar mnogih uređaja (uređaji sa lukom). Interharmonici se mogu naći u mrežama svih naponskih nivoa.

2.5.4. Urezi (rupe)

Urezi (rupe) predstavljaju prekidanje ili drugu smetnja u talasnom obliku napona, koja traje kraće od 0,5 periode, a koja je inicijalno suprotnog polariteta u odnosu na talas. Zbog toga se oduzima od normalnog talasnog oblika u iznosu maksimalne vrednosti smetnje. To podrazumeva potpuni prekid napajanja u trajanju do 0,5 periode. Međutim, urez nije prelazni proces kratkog trajanja niti tranzijent, pošto se obično odnosi na ustaljeno stanje. On se pojavljuje u svakoj periodi talasnog oblika na sličan način i to u vremenskom intervalu koji je mnogo duži od 1min. Ako se pojava koja ima karakteristike ureza pojavi u toku samo jedne periode, onda se naziva impulsni tranzijent.

Trofazni konvertori koji generišu jednosmernu struju su najznačajniji uzrok ureza napona (slika 2.17). To je periodična smetnja napona koju uzrokuje normalni rad uređaja energetske elektronike. Intenzitet ureza u nekoj tački sistema je određen induktivnošću izvora i induktivnošću između konvertora i tačke u kojoj se vrši merenje. Urez je detaljno opisan u standardu IEEE 519.



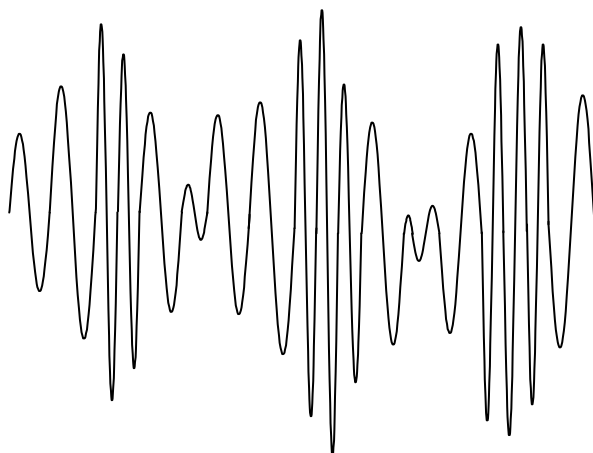
Slika 2.17 - Primer ureza napona usled rada konvertora.

2.5.5. Fluktuacije napona

Fluktuacije napona su niz slučajnih promena napona ili periodična promena anvelope napona čija amplituda ne prevazilazi opseg napona od 0,95 do 1,1r.j. Svaka potrošnja koja ima značajnu varijaciju u vremenu, posebno svoje reaktivne komponente, može biti uzrok fluktuacije napona.

Flikeri napona su naponske fluktuacije pri kojima ljudsko oko postaje osjetljivo na promjene inteziteta svjetlosti električnih lampi. Ove fluktuacije uglavnom nastaju pri naglim promjenama struje opterećenja, naročito njene reaktivne komponente (efekat $L \cdot di/dt$). Na slici 2.18 je dat primer ovakvih fluktuacija.

Najčešći uzroci pojave fluktuacije napona su rad elektrolučnih peći, uređaja sa elektro-otpornim zavarivanjem, pogoni intermitiranih opterećenja i dr. Posledice se ogledaju u pojavi svetlostnog flikera, neispravnog rada osetljivih potrošača i dr.



Slika 2.18 - Fluktuacije (flikeri) napona

2.5.6. Šumovi

Šumovi su neželjeni električni signali koji proizvode nepoželjna dejstva u kolima upravljačkih sistema u kojima se pojavljuju. Šumovi imaju široki spektralni sastav niži od 200 kHz, a tipična vrednost amplitude šuma je manja od 1% amplitude napona. Ovi neželjeni signali se dodaju naponu ili struji faznih provodnika elektroenergetskog sistema ili se mogu naći u neutralnim provodnicima ili signalnim vodovima. Mogu ga sačinjavati električni signali koji se prostiru kroz provodnike električnog kola ili oni koji se zrače elektromagnetnim putem kroz okolinu. Na primer, šum se može uneti spregom dvaju kola među kojima ne postoji fizička veza. Pored toga, šum koji je uzrokovan radom uređaja koji vuče veliku struju iz mreže, može se naći u provodniku za uzemljenje opreme.

Frekvencijski opseg i nivo amplitude šuma zavise od izvora šuma i karakteristika sistema. Šum u elektroenergetskom sistemu može biti uzrokovan uređajima energetske elektronike, upravljačkim kolima, opremom koja proizvodi luk, ispravljačima i prekidačkim izvorima. Problemi sa šumom se često povećavaju usled neodgovarajućeg uzemljenja. U suštini šum predstavlja svako izobličenje signala koje se ne može klasifikovati kao harmonijsko izobličenje ili tranzijent.

2.6. Sumarni pregled parametara kvaliteta električne energije

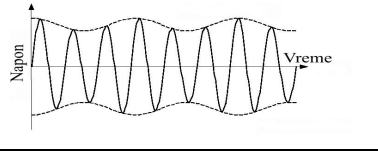
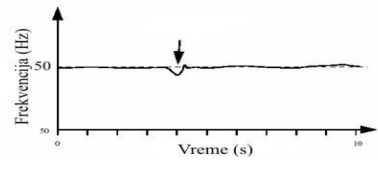
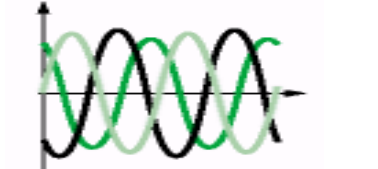
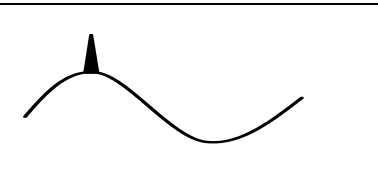
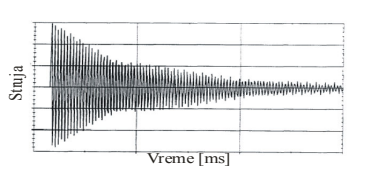
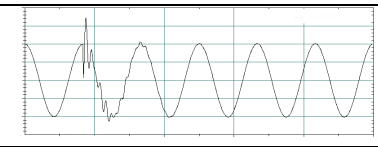
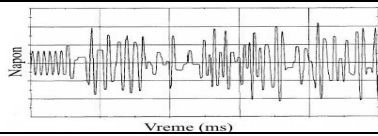
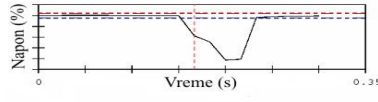
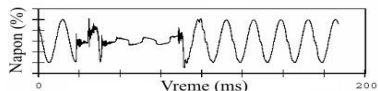
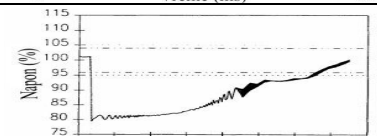
U tabeli 2.1 je dat sumarni pregled svih parametara kvaliteta električne energije sa naznakom njihovog izvora (sam elektroenergetski sistem ili potrošač).

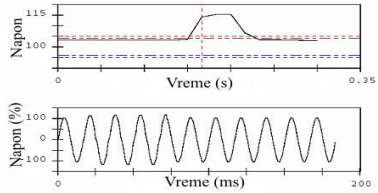
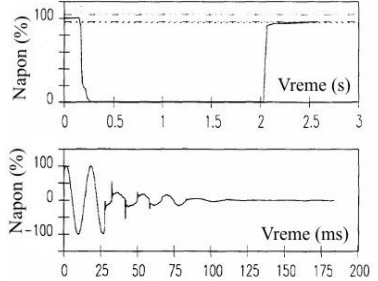
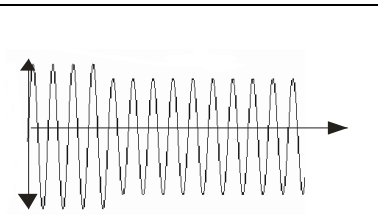
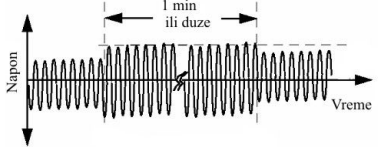
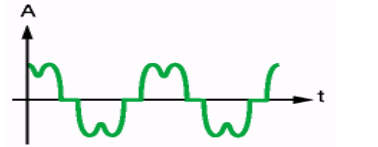
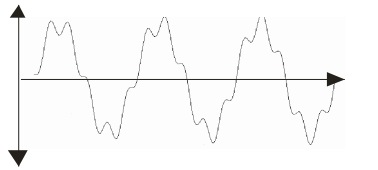
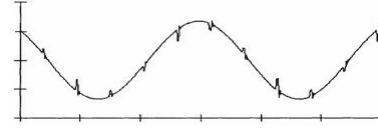
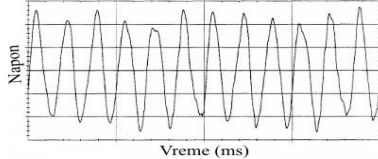
Za identifikaciju, klasifikaciju i procjenu problema kvaliteta električne energije koriste različite metode i pristupi kao što su:

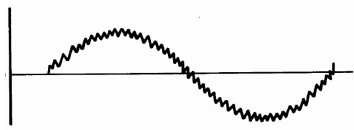
- Brza Fourierova transformacija (FFT),
- Kalmanov filter,
- Wavelet transformacija,
- kratkotrajna Fourierova transformacija,
- statističke metode,
- neuronske mreže,
- fuzzy logika,
- S transformacija itd.

s tim da u zavisnosti od tipa deformacije primenjuju se i različite metode, odnosno tehnike obrade. O njima će biti detaljnije pisano kod opisa pojedinih deformacija.

Tabela 2.1 – Parametri kvaliteta i njihovi izvori

Činilac kvaliteta	Karakteristični talasni oblik	EES kao izvor	Potrošnja kao izvor
Varijacija napona		Pogrešno podešeni regulacioni transformatori	Spore promene potrošnje
Varijacija frekvencije		Preopterećenje EES-a, kvarovi u prenosnom sistemu, isključenje velikih generatora,	Isključenje velikih grupa potrošača
Nesimetrija		Jednopolni ili dvopolni kratki spojevi	Nesimetrična potrošnja, nepravilnosti u radu kondenzatorskih baterija
Impulsi		Atmosfersko pražnjenje	
Oscilacije		Oscilatorni tranzijent	Priključenje kondenzatora u blizini drugih, uključenje kabla
		Komutacija	Priključenje kondenzatora
		Ferorezonansa i uključenje transformatora	
Propad		Kvarovi u mreži	
			
			Uključenje velikih potrošača, startovanje motora velike snage

Činilac kvaliteta	Karakteristični talasni oblik	EES kao izvor	Potrošnja kao izvor
Premašenje		Jednopolni kratak spoj,	Isključenje velikih potrošača, uključenje kondenzatorskih baterija velike snage
Beznaponska pauza		Kvarovi, slabe privremene veze	
Podnapon		Pogrešno podešeni regulacioni transformatori, struje preopterećenja, planirani -smanjenje potrošnje smanjenjem napona mrežne frekvencije.	Uključivanje velikih potrošača, isključivanja kondenzatorskih baterija
Prenapon		Slaba regulacija napona i kontrola, neparavno postavljanje prenosnog odnosa transformatora	Isključivanje velikih potrošača, uključivanje kondenzatorskih baterija
DC offset		Geomagnetni poremećaji	Polutalarno ispravljanje
Harmonici		Nelinearni uređaji	Nelinearna potrošnja
Interharm.		Signali koji se prenose elektroenergetskim vodovima	Statički frekvencijski konvertori, ciklokonvertori, asinhroni motori, uređaji sa lukom
Urezi, rupe			Energetski pretvarači
Fluktuacije napona			Lučne peći, startovanje motora, periodično uključivanje/isključivanje velikih potrošača

Činilac kvaliteta	Karakteristični talasni oblik	EES kao izvor	Potrošnja kao izvor
Šum			Uređaji energetske elektronike, upravljačka kola, oprema koja proizvodi luk, ispravljači, prekidački izvori

2.7. Literatura

1. International Electrotechnical Commission, Electromagnetic Compatibility. The role and contribution of IEC standards, IEC, 2001.
2. IEEE P1433/D5A, Draft Standard Glossary of Power Quality Terminology, July, 1999.
3. IEEE Std 1159-1995, *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, 1995.
4. *Degradation of PQ: origins – characteristics – definitions*, Cahier Technique Schneider Electric, no. 199, pp. 6-15.
5. V.Katić: “Kvalitet električne energije – viši harmonici”, Monografija, Univerzitet u Novom Sadu - Fakultet tehničkih nauka, Edicija Tehničke nauke - Monografije, Br. 6, Novi Sad, 2002.
6. V. Katić, Lj. Nikolski, Pregled istraživanja kvaliteta isporučene električne energije, Prvo jugoslovensko savetovanje o elektrodistributivnim mrežama, Zlatibor, 5-8. oktobar 1998, R-2.02.

3. 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 3.1, 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 (*Committee 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*) – **CIREN**,
- Međunarodna unija proizvođača i distributera električne energije - **UNIPED**.

Tabela 3.1 - 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. Fliker
11. Urezi (rupe) napona (“notches”)
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.

3.1. 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: Obrađuje 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 3.2, 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) prema javnoj mreži i Klasa 3 – Industrijske mreže. U tabeli 3.3 prikazani su preporučeni nivoi kompatibilnosti za najvažnije parametre kvaliteta.

Tabela 3.2 – 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>16A/fazi
	IEC 61000-6-4	Radio frekventne smetnje
	IEC 61000-3-3	Fluktuacija napona i fliker
	IEC 61000-6-1	Propadi napona
Industrija	IEC 61000-4-11	Propadi i kratkotrajni prekidi
	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 3.3 – 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 - $\Delta f/f_{nom}$	$\pm 1\%$	$\pm 1\%$	$\pm 2\%$

3.2. 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 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 3.4 su sumirane numeričke vrednosti parametara za NN mreže.

Tabela 3.4 - Parametri NN mreže po EN 50160 [6].

Karakteristika	Granične vrednosti	Interval merenja	Period posmatranja	Procenat prihvatanja
Frekvencija	49,5Hz - 50,5Hz 47Hz - 52Hz	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%

3.3. IEEE standardi o kvalitetu električne 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 3.5 dat je spisak IEEE standarda po raznim temama (aspektima) kvaliteta električne energije.

Tabela 3.5 – IEEE standardi vezani za kvalitet električne energije

TEMATIKA	RELEVANTNI IEEE STANDARD				
Definicije parametara kvaliteta elek. 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				

3.4. 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.

4. MONITORING KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE

4.1. Uvod

Jedan od najvažnijih koraka u praćenju pouzdanosti rada sistema je monitoring karakteristika elektroenergetskog sistema. Monitoring može pomoći pri određivanju uzroka poremećaja, pa čak i pri identifikaciji stanja u sistemu, koja su bila pre nego što su izazvala prekid ili poremećaj.

Monitoring kvaliteta električne energije (snage) predstavlja proces prikupljanja, analize i interpretacije merenih podataka u svrhu izvlačenja korisnih informacija. Proces prikupljanja podataka obično se vrši kontinuiranim merenjem napona i struje u određenom vremenskom periodu. Proces analize i interpretacije tradicionalno se vršio manuelno, ali razvoj oblasti prenosa i obrade signala i oblasti veštačke inteligencije omogućio je dizajniranje i implementaciju inteligentnih sistema za automatsku analizu i interpretaciju merenih podataka, sa sve manjom intervencijom eksperta.

4.2. Ciljevi monitoringa

Pre nego što se započnu bilo kakve aktivnosti vezane za monitoring kvaliteta električne energije, potrebno je jasno definisati ciljeve monitoringa. Oni veoma često utiču na izbor opreme za monitoring, pragove okidanja, metode za akviziciju i pohranjivanje podataka, te zahteve vezane za analizu i interpretaciju merenja. Oni su višestruki i mogu se sumirati u 5 tačaka:

1. *Monitoring u svrhu karakterisanja rada sistema:* predstavlja jedan od najopštijih zahtjeva. Proizvođači električne energije mogu smatrati ovaj cilj važnim, ako imaju potrebu da razumeju rad sistema, kako bi postigli da sistem zadovolji potrebe potrošača. Razumevanjem kvaliteta električne energije pri normalnom radu sistema, omogućena je brza identifikacija problema, koja može pomoći korisniku da podesi rad svoje osjetljive opreme prema stvarnim karakteristikama kvaliteta električne energije. Opisivanje karakteristika sistema predstavlja "proaktivni" pristup monitoringu.
2. *Monitoring u svrhu okarakterisanja posebnih problema (identifikacija i rešavanje problema):* Mnoga odeljenja, koja se bave kvalitetom ili rukovodioci postrojenja rešavaju probleme vršeći kratkotrajni monitoring na posebnim mestima na korisničkoj strani ili na mestu nepovoljnog opterećenja. Ovo je "reaktivni" način monitoringa, i načešće identifikuje uzroke nekompatibilnosti opreme, što je prvi korak u traženju rešenja.
3. *Monitoring kao deo povećane usluge vezane za kvalitet električne energije:* Mnogi proizvođači električne energije trenutno razmatraju dodatne usluge koje mogu ponuditi korisnicima. Jedna od tih usluga mogla bi biti nuđenje različitih nivoa kvaliteta, kako bi se zadovoljile potrebe posebnih potrošača. Proizvođač i korisnik mogu zajedno postići ovaj cilj modifikujući energetski sistem ili instalirajući opremu na korisničkom ulazu. U oba slučaja, monitoring postaje neophodan za uspostavljanje različitih usluga i verifikovanje postignutog ugovorenog kvaliteta električne energije.
4. *Monitoring kao deo planiranog održavanja ili održavanja u "poslijednji čas":* Prikupljeni podaci tokom vremena mogu se analizirati kako bi obezbijedili informacije vezane za posebna radna stanja opreme. Tako na primjer, uzastopno iskrenje na podzemnom kablju ukazuje na

mogući kvar na kablu. Dakle, uz pomoć monitoringa, remont opreme može biti brzo naređen kako bi se izbegao katastrofalni kvar.

5. *Monitoring kao deo nadzora postrojenja na licu mesta:* Nadzor postrojenja na licu mesta obavlja se kako bi se procenio interes za kvalitetom električne energije i performanse opreme u postrojenju. Nadzor će uključiti kontrolu montaže i uzemljenja, priključenja opreme, te naponskih i strujnih karakteristika opreme u postrojenju. Monitoring kvaliteta električne energije, pomoću infracrvenog skeniranja i vizuelnog pregleda, predstavlja važan dio celokupnog nadzora. Inicijalni nadzor na licu mesta trebao bi biti tako dizajniran da da što je moguće više informacija o korisničkom postrojenju. Ova informacija je posebno važna kada je cilj monitoringa usmeren ka određenom problemu kvaliteta električne energije. Informacije koje je moguće prikupiti nadzorom na licu mesta su:
- priroda problema (gubici podataka, kvarovi komponenti, višefunkcijsko upravljanje sistemom, itd.)
 - karakteristike osetljive opreme (informacije o načinu dizajniranja opreme ili bar upustvo o načinu korišćenja)
 - vremenski intervali pojavljivanja problema
 - koincidentni problemi ili poznate operacije (npr. priključivanje kondenzatora) koje se pojavljuju u isto vreme
 - mogući izvori varijacija kvaliteta električne energije u postrojenju (startovanje motora, uključivanje kondenzatora, rad elektroenergetske opreme, itd.)
 - električni podaci o sistemu (veličine transformatora, impedansi, informacija o opterećenju, podaci o kablovima, itd.).

Kada su jednom prikupljene navedene osnovne informacije u razgovoru sa korisnikom, nadzor na licu mesta trebao bi da omogući verifikaciju električnih podataka o sistemu, integritet montaže i uzemljenja, nivo opterećenja i osnovne karakteristike kvaliteta električne energije.

4.3. Predmet merenja i monitoringa

Kvalitet električne energije uključuje različite uslove rada elektroenergetskog sistema. Važni poremećaji mogu se kretati od veoma visokih frekventnih impulsa uzrokovanih grmljavinom, ili strujnih "seckanja" tokom prekidanja strujnog kruga do dugotrajnih prenapona. Opseg različitih stanja, koja moraju biti okarakterisana predstavljaju izazov kako za specifikaciju karakteristika monitoring opreme, tako i za zahteve pri prikupljanju podataka.

Da bi bilo moguće okarakterisati pojedine poremećaje potrebno je snimati različite parametre i primeniti različite metode. Tako na primer, za opisivanje tranzijenata potrebno je visoko frekventno odabiranje (uzorkovanje, semplovanje) aktuelnog talasnog oblika. Propadi napona mogu se okarakterisati dijagramom efektivne vrijednosti napona tokom vremena. Dok se prekid može jednostavno definisati vremenskim periodom.

Intenzivni monitoring svih različitih tipova varijacija kvaliteta na mnogo lokacija može biti prilično skup u smislu potrebnog hardvera, komunikacijskih troškova, organizacije podataka i pripremanja izveštaja. Dakle, prioriteta u monitoringu trebali bi biti određeni na osnovu ciljeva. Projekti za testiranje performansi sistema treba da obuhvate razuman program realizacije monitoringa. Projekti dizajnirani da procene saglasnost sa IEEE Standardom 519-1992 i EN 50160 za nivo harmonijske distorzije predviđaju monitoring nivoa harmonika u stacionarnom stanju. Drugi projekti usmereni ka specifičnim industrijskim problemima mogu zahtevati samo monitoring varijacija efektivne vrednosti, kao za naponske propade.

Ponekad kada se žele opisati poremećaji u sistemu dovoljno je vršiti merenje naponskog signala. Na primjer, naponi daju informaciju o kvalitetu snage koja je isporučena postrojenjima, te tranzijentima i propadima napona kojima je izložena korisnička oprema. Međutim, postoji i

ogroman broj informacija koje je moguće izvući iz struje prilikom poremećaja, a koje mogu pomoći pri utvrđivanju uzroka poremećaja, kao i činjenice da li je oprema bila izložena ili ne poremećaju.

Merenja struje omogućavaju opisivanje harmonika uzrokovanih nelinearnim opterećenjem sistema. Strujna merenja na pojedinim opterećenjima su validna za određivanje izvora harmonika. Strujna merenja sprovode se u kolima napojnih vodova ili na mestu priključenja korisnika okarakterisanog grupom opterećenja ili kompletnog postrojenja kao izvora harmonika. Strujna merenja na distributivnom nivou moguće je iskoristiti za opisivanje celokupne grupe korisnika ili svih napojnih vodova.

Merenja napona pomažu pri opisivanju odziva sistema na generisane harmonike struje. Visoki nivoi naponskih harmonika na specifičnim frekvencijama će ukazivati na rezonantna stanje. Da bi se odredio frekventni odziv sistema potrebno je da se istovremeno meri i napon i struja.

4.4. Izbor lokacije monitoringa

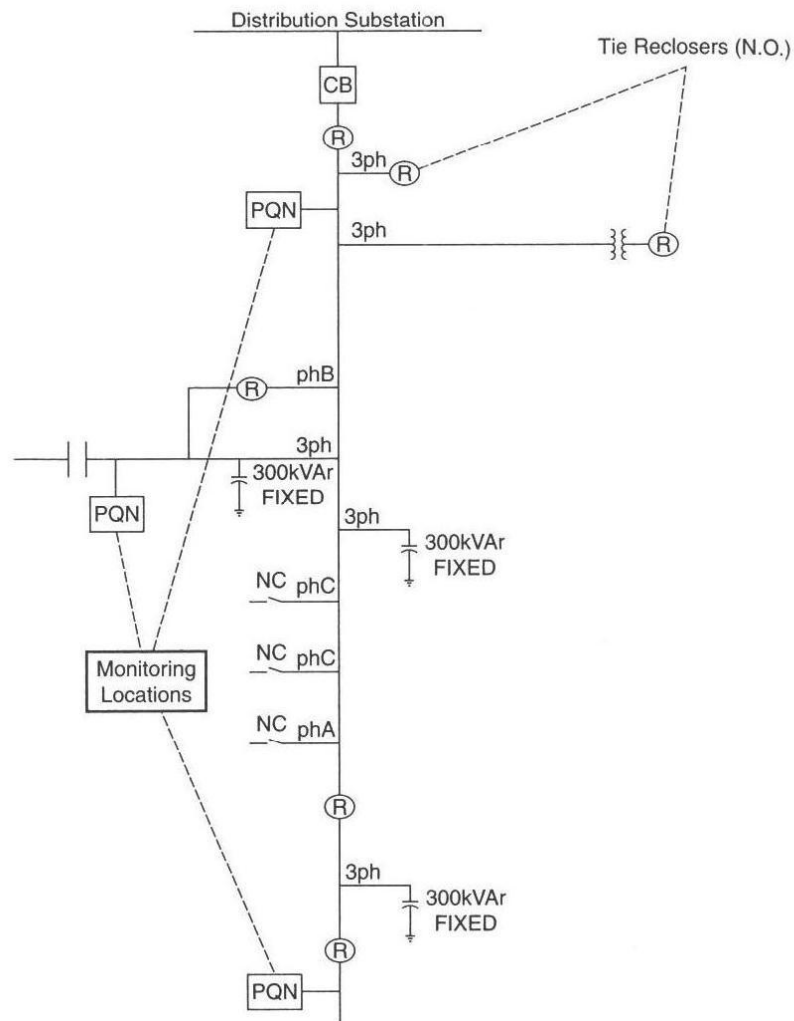
Očigledno je da bi svi oni koji se bave monitoringom kvaliteta želeli da nadgledaju uslove rada sistema na svim lokacijama u sistemu sve vreme, kako bi što bolje shvatili celokupan problem kvaliteta električne energije. Međutim, takav monitoring bi bio neekonomičan. Na sreću, vršenje merenja na svim mogućim lokacijama obično nije neophodno, jer merenja izvršena na nekoliko strategijskih lokacija mogu biti dovoljna da opišu karakteristike celokupnog sistema.

Kao primer dobrog odabira mesta monitoringa može da posluži iskustvo iz projekta EPRI DPQ (<http://my.epri.com>) [1,3]. Primarni cilj Projekta bio je *okarakterisati kvalitet električne energije na distributivnim napojnim vodovima u USA*. Monitoring napojnih vodova započeo je u junu 1992 godine i završen je u septembru 1995. U kampanji prikupljanja podataka učestvovalo je dvadeset i četiri preduzeća na oko 300 mernih mesta. Monitoring u ovom Projektu napravljen je da bi se obezbedio statistički validan skup podataka o različitim fenomenima vezanim za kvalitet električne energije.

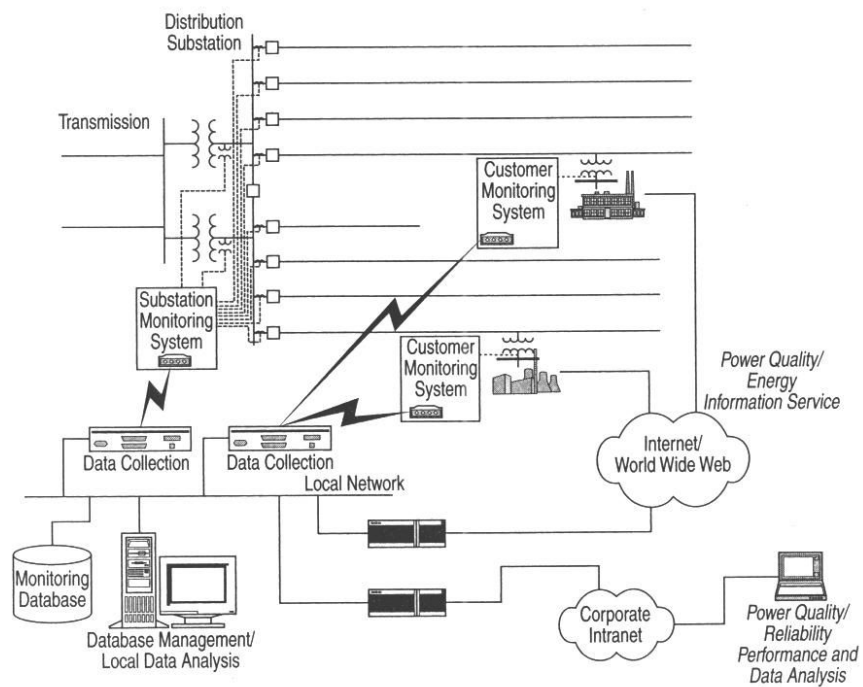
Iako je primarni cilj projekta bio monitoring primarnih distributivnih napojnih vodova, monitoring je urađen na stvarnim napojnim krugovima. Jedan monitor bio je lociran blizu transformatorske stanice, dok je pozicija za druga dva izabrana slučajno (Slika 4.1). Slučajnim izborom udaljenih mesta, omogućeno je da celokupni rezultati projekta predstavljaju opšte stanje kvaliteta na distributivnim napojnim vodovima. Naravno da nije u potpunosti realno da se sa tri izabrane lokacije može okarakterisati stanje kvaliteta na svim pojedinačnim napojnim vodovima u sistemu.

Pri izboru lokacije za monitoring veoma bitno je da lokacija opreme za monitoring bude što je moguće bliža uređaju na koji deluju varijacije kvaliteta električne energije. Važno je da oprema za monitoring "vidi" iste promene kao što ih "vidi" i osetljiva oprema. Visokofrekventni tranzijenti mogu se prilično razlikovati na osetljivoj opremi i monitorskoj opremi ako između istih postoji znatna udaljenost.

Dobar izbor lokacija za monitoring je postavljanje monitorske opreme i na odgovarajućoj transformatorskoj stanici i na ulazu posmatranog korisnika. Na slici 4.2 prikazan je tipičan primer sistema za monitoring postavljen na transformatorsku stanicu i na stranu korisnika. Slika takođe ilustruje mogućnost korištenja Interneta u svrhu pristupa prikupljenim podacima za sve zainteresovane strane.



Slika 4.1 - Tipična šema monitoringa distributivnog napojnog voda [1]



Slika 4.2 - Sistem za monitoring kvaliteta električne energije [1]

4.5. Dužina monitoringa

Dužina monitoringa zavisi od postavljenih ciljeva monitoringa. Na primer, ako je cilj rešavanje problema uzrokovano naponskim propadima na udaljenim kvarovima u sistemu, zahtevano vreme monitoringa će biti duže zbog toga što je pojava takvog kvara u sistemu verovatno retka. Ako je problem vezan za kapacitivna uklapanja, moguće je da za karakterisanje takvog stanje bude potrebno i nekoliko dana. Da bi problemi sa harmonicima i flikerima bili opisani potrebno je vršiti snimanja najmanje 7 dana, što je i propisano u EN50160 standardu.

Dužina monitoringa postaje sve manje bitna zbog sveopšteg trenda za kontinuiranim monitoringom, koristeći prednosti različite vrste opreme, koja može dati informaciju o sistemu.

4.6. Pronalaženje izvora poremećaja

Prvi korak u identifikaciji izvora poremećaja je povezivanje talasnog oblika poremećaja sa mogućim uzrocima. Kada je jednom definisana kategorija uzroka poremećaja, identifikacija postaje znatno jasnija. Neke opšte preporuke mogu pomoći u tom procesu:

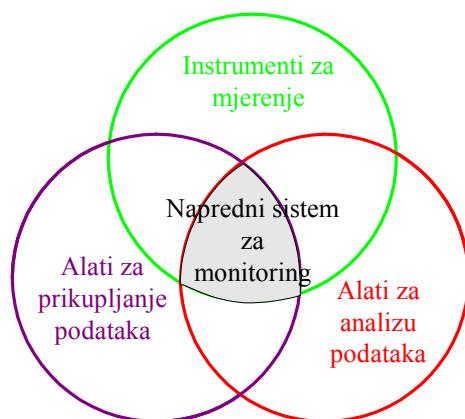
- Visokofrekventene varijacija napona će biti ograničene na lokacije bliske izvoru poremećaja. Niskonaponski krugovi (600V i niže) često veoma brzo prigušuju visokofrekventne komponente zbog otpora strujnog kola, tako da će se ove frekventne komponente pojaviti samo ako je monitor postavljen veoma blizu izvora poremećaja.
- Prekidi snage koji se dešavaju blizu lokacija monitoringa uzrokuju veoma naglu promenu napona. Prekidi snage na udaljenim lokacijama od mesta monitoringa će uzrokovati opadanje napona zbog pohranjivanja energije u rotirajućim uređajima i kondenzatorima.
- Najviši nivoi harmonijskih distorzija napona će se pojaviti u blizini kondenzatora, što uzrokuje rezonantne probleme. U ovom slučaju obično će jedna frekvencija dominirati u harmonijskom spektru napona.

4.7. Napredni sistemi za monitoring

Program za monitoring mora biti dizajniran na osnovu odgovarajućih ciljeva, te pružiti informaciju odmah i u pogodnom formatu. Najnapredniji sistemi za monitoring bili bi stalno instalisani sistemi za monitoring sa mogućnosti automatskog prikupljanja informacija o kvalitetu električne energije u stacionarnim stanju, o potrošnji energije, kao i o poremećajima. Na slici 4.3 može se uočiti da napredni sistem za monitoring predstavlja presek kvalitetnih instrumenata za merenja, alata za prikupljanje podataka i alata za analizu prikupljenih podataka.

Instrumenti za merenje imaju sledeće karakteristike:

- Backup prikupljenih podataka čak i kada dođe do poremećaja u napajanju
- Kućište instrumenta – zavisi od izvedbe (prenosivi ili za stalnu postavku)
- Širina uzorkovanja (Sampling rate) – potrebno je da bude dovoljno brza za efektivnu vrijednost, tranzijente, te merenja energije i harmonika
- Jednostavan za upotrebu, postavljanje i programiranje
- Procesna moć – koliko mnogo podataka je ograničeno izvedbom instrumenta?
- Komunikacija – mogućnosti korištenja Ethernet-a, TCP/IP.

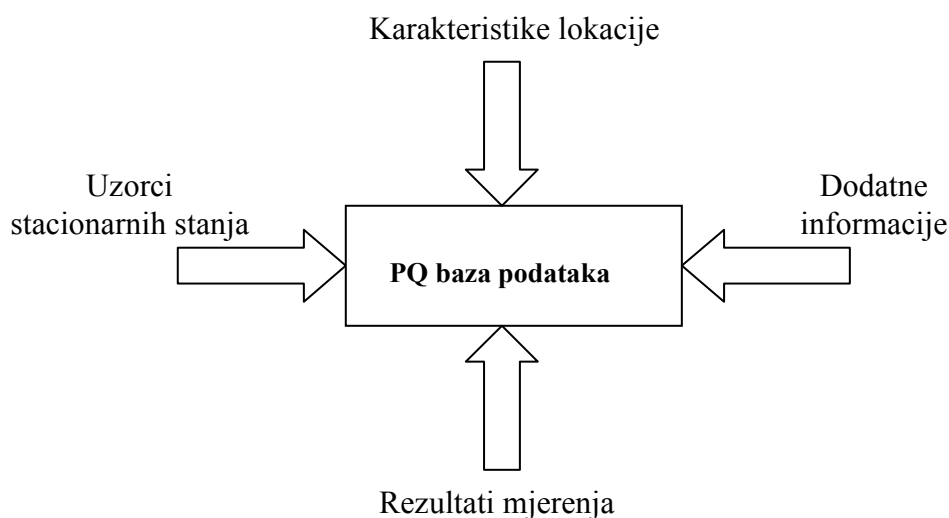


Slika 4.3 - Napredni sistem za monitoring

Alati za prikupljanje i analizu podataka imaju sledeće karakteristike:

- open data base arhitektura (ODBC)
- format podataka koji će omogućiti razmjenu prikupljenih podataka među različitim aplikacija (PQDIF - *The Power Quality Data Interchange Format*)
- automatizacija prikupljanja podataka i generisanja izveštaja/signalizacije
- ubacivanje teksta i grafike u druge aplikacije (Excel, Word)
- pregled informacija i ispisivanje izveštaja.

Podaci koji se prikupljaju tokom monitoringa pohranjuju se u bazu podataka kvaliteta električne energije (PQ baza podataka). Podaci koji se pohranjuju u bazu su rezultati merenja, uzorci stacionarnih stanja, karakteristike lokacije kao i dodatne informacije vezane za pojedine probleme (Slika 4.4).



Slika 4.4 - PQ baza podataka

Osnovni programi za analizu prikupljenih podataka pohranjenih u PQ bazi podataka obično se isporučuju sa instrumentima za merenje. Postoji više programa koji se mogu koristiti kako za analizu pojedinačnih mjerenja (npr. TOP - <http://www.electrotek.com/top/>), tako i za analizu podataka za sisteme (npr. PQView). Ovi programi omogućavaju korisniku da dobije statističke informacije, automatske izveštaje, te karakteristike opreme i sistema.

Na osnovu monitoringa kvaliteta električne energije mogu se dobiti sledeće važne informacije koje omogućuju:

- procenu uticaja varijacija kvaliteta električne energije na proces proizvodnje
- optimiziranje potrebnih investicija
- razvoj bolje specifikacije potrebne opreme
- kvalitetnije ugovore sa elektroprivrednim preduzećima
- markiranje mogućih problema na opremi (motorima, transformatorima, prekidačima, filterima, itd.)

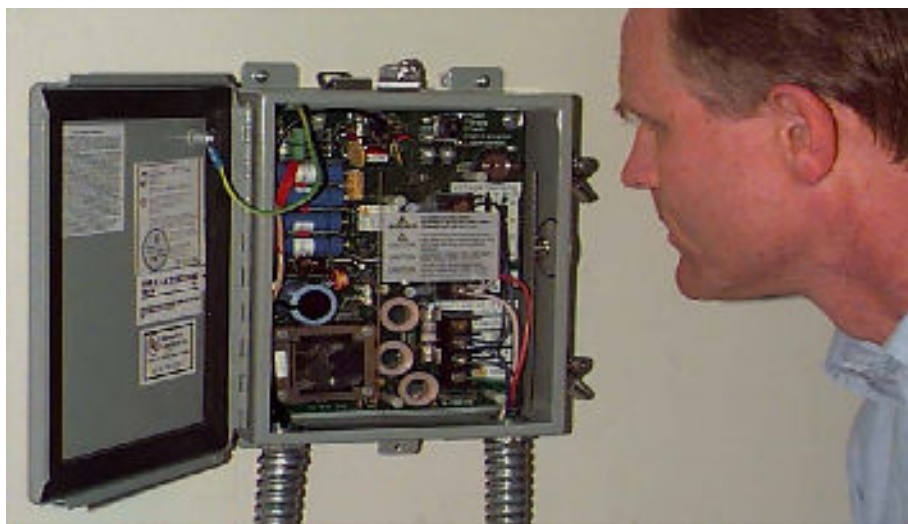
4.8. Sistemi za stalni monitoring kvaliteta električne energije

Sistemi za stalni monitoring kvaliteta električne energije, kao što je sistem prikazan na slici 4.2, koriste prednosti širokog spektra opreme koja ima sposobnost pohranjivanja snimljene informacije o kvalitetu električne energije. Neke od kategorija opreme koja može biti inkorporirana u celokupni sistem monitoringa su:

1. *Digitalni instrument za registrovanje kvarova* – nije posebno proizveden za monitoring kvaliteta električne energije. Ipak, ovi uređaji se tipično aktiviraju (trigeruju) pri pojavi kvarova i snimaju naponske i strujne talasne oblike, koji opisuju kvarove. Ovo ih čini validnim da mogu da opišu distorzije efektivne vrijednosti, kao što su naponski propadi tokom kvara u elektroenergetskom sistemu. Ovi uređaji se mogu iskoristiti i za utvrđivanje nivoa harmonika.
2. *Inteligentni releji i drugi inteligentni elektronski uređaji* – mnoge vrste opreme, koja se koristi u trafostanicama, mogu se ponašati kao inteligentni elektronski uređaji sa sposobnosti monitoringa. Proizvođači uređaja kao što su releji i automatski prekidači, koji svakako kontrolišu struju dodaju sposobnost ovim uređajima da registruju poremećaje i čine informaciju raspoloživom za celokupni sistem monitoringa. Ovi uređaji mogu biti locirani kako na napojnom vodu tako i u trafostanicama.
3. *Instrumenti za registrovanje napona*. Snabdjevači električne energije koriste različite instrumente za registrovanje napona kako bi pratili varijacije napona u stacionarnom stanju na distributivnom nivou. Sve više je na tržištu sofisticiranih modela instrumenata koji su sposobni da registruju trenutne promjene napona, naponskih prilika, pa čak i nivo harmonijskih distorzija. Uobičajeno je da ovi instrumenti snimaju maksimum, minimum i prosečni napon unutar specificiranog vremena odabiranja (npr. 2 s). Sa ovakvom veličinom odabiranja instrument je u mogućnosti da potpuno adekvatno registruje veličinu naponskog propada. Međutim, to ne bi bilo moguće sa vremenom odabiranja manjim od 2 s.
4. *Monitori snage*. Gotovo da je postalo uobičajeno da se za monitoring sistema u industrijskim postrojenjima koriste instrumenti, koji mogu registrovati i snagu. Ovi instrumenti su obično postavljeni na ulazu korisnika. Njihove karakteristike obično uključuju snimanje talasnog oblika za procenu nivoa harmonijske distorzije, naponskog profila varijacije efektivne vrijednosti u stacionarnom stanju, te naponskog propada. Nije uobičajeno da ovi instrumenti imaju mogućnost snimanja tranzijenata.
5. *Instrumenti specijalno namenjeni za monitoring kvaliteta električne energije*. Instrument za monitoring koji je razvio EPRI za pomenuti DPQ projekat sa slike 4.1 je namenski dizajniran da meri kompletan opseg varijacija kvaliteta električne energije. Karakteristika tog instrumenta je mogućnost monitoringa struje i napona u sve tri faze i u nuli. Pogodni su za postavljanje u trafostanicama, na napojnim vodovima i mestima priključka korisnika.

Sistem za stalni monitoring ima iste karakteristike kao i prenosivi analizatori. Međutim, ovi sistemi moraju da zadovolje još i visoke performanse po pitanju komunikacije (klijent-server arhitektura, mrežni interface ili modem). Pored toga ovaj sistem ima mogućnost da radi pojedinačno kao prenosiva aplikacija ili trajno postavljen u mreži.

Primer takvog sistema je pejdžer za kvalitet električne energije (slika 4.5), koji ima stalno postavljene na mestu merenja. Pomoću ovakvog uređaja moguće je registrovati tranzijente, harmonike, propade napona, nesimetrije itd. Neophodna je telefonska linija kojom je omogućeno da se signalizira poremećaj tačno određenim osobama (lista do pet imena).



Slika 4.5 - PQ pejdžer

4.9. Istorijski razvoj instrumenata za merenje kvaliteta

Prvu opremu za monitoring su predstavljale ogromne, teške kutije. Podaci su zapisivani na papirne trake. Jedan od prvih instrumenata iz ove oblasti je napravljen 1920 godine u General Electric-u, a korišten je za registriranje udara groma. Podaci su bili više kvalitativni nego kvantitativni, s obzirom da se registrovala samo pojava, a ne i njen intenzitet na papirnoj traci. Tako da je bilo prilično teško izvršiti interpretaciju podatka.

Značajan napredak u razvoju uređaja za merenje kvaliteta je napravljen 1960. godine, kada je Martzloff razvio instrument, koji je mogao registrovati talasni oblik napona pri udaru groma. Vremenski horizont razvoja opreme za monitoring kvaliteta električne energije s uporednim razvojem tehnologije i tržišta prikazan je na slici 4.6.

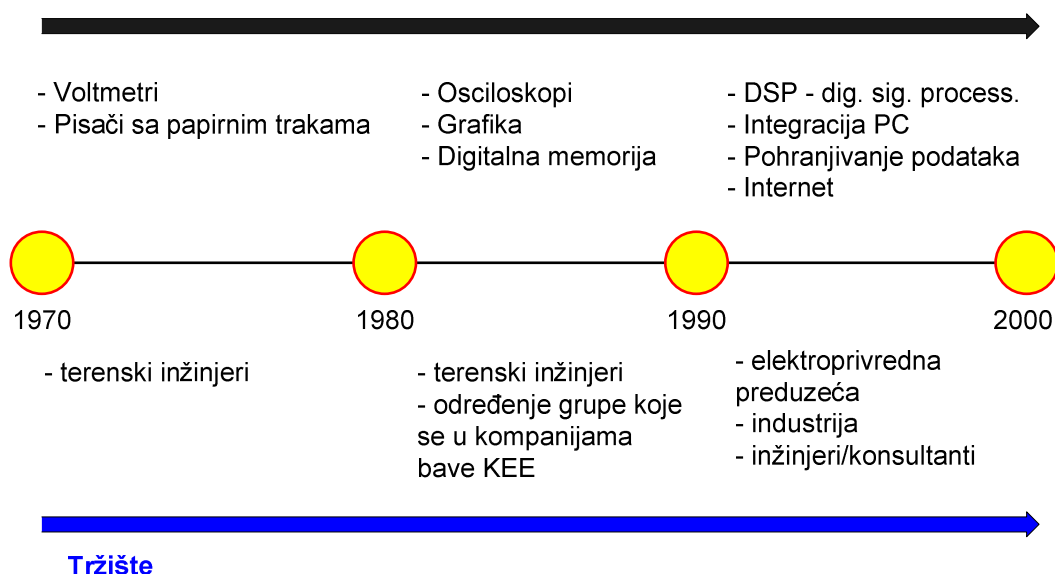
Mnogi inženjeri smatraju da se, ustvari, prva generacija instrumenata za monitoring pojavila sredinom sedamdesetih godina prošlog vijeka (1975. godine), kada je Dranetz Engineering Laboratory „izbacila“ na tržište seriju 606, koja je predstavljala monitor/analizator poremećaja snage na liniji.

Druga generacija instrumenata za monitoring pojavila se sredinom osamdesetih godina prošlog veka. Monitori ove generacije su imali grafički displej i digitalnu memoriju u koju se mogle pohraniti informacije o poremećajima, uključujući događaje u stacionarnom stanju i tranzijente.

Sredinom devedesetih godina prošlog veka pojavila se i treća generacija opreme, koja je nastala kao rezultat EPRI-jevog DPQ projekta. Ova generacija monitora ustvari je predstavljala deo kompletnog sistema za monitoring sa softverskim alatima za prikupljanje i analizu podataka.

Bazirano na iskustvu EPRI DPQ projekta, zaključeno je da veoma važan aspekt u monitoringu kvaliteta predstavlja informacioni sistem. Dakle, razvoj nove generacije opreme za monitoring kvaliteta električne energije je usmeren na zadovoljavanje potreba novih informacionih sistema, kao na primjer, mogućnost "otkrivanja" znanja ili informacija iz prikupljenih podataka, te veoma brze procjene istih. Ove vrste instrumenata uključuju ekspertne sisteme i napredne komunikacijske tehnologije.

Tehnologija



Slika 4.6 - Razvoj opreme za monitoring kvaliteta električne energije

Osnovne karakteristike opreme za monitoring kvaliteta električne energije sumirane su u Tabeli 4.1.

Tabela 4.1. Osnovne karakteristike opreme za monitoring kvaliteta električne energije

	Nekad	Sada
Rezolucija podataka	14 bitni A/D	20 bitni A/D
Uzimanje uzoraka	14 uzoraka/periodu	640 uzoraka/periodu
Memorija	papir/flopy disk	16 MB 48 MB 20 GB
Komunikacijska brzina	1200 bitni modem or RS 232	10 – 400 Mb/s
Troškovi	\$\$\$\$	\$\$

4.10. Vrste instrumenata

Zavisno od fenomena, koji se istražuje u upotrebi su brojni različiti instrumenti. Osnovne kategorije instrumenata su:

- Test uređaji za ispitivanje uzemljenja i spojeva u postrojenju
- Multimetri
- Osciloskopi
- Analizatori poremećaja
- Harmonijski analizatori
- Kombiovani analizatori poremećaja i harmonika
- Flikermetri
- Monitori energije.

Mnogi problemi kvaliteta električne energije predstavljeni od strane korisnika uzrokovani su problemom uzemljavanja i/ili spajanja unutar postrojenja. Ovaj problem je moguće veoma često identifikovati vizuelnom kontrolom spojeva i panela u postrojenju, kao i specijalnim *uređajima za ispitivanje uzemljenja i spojeva* u postrojenju (Slika 4.7).



Slika 4.7 - Uređaj za provjeru uzemljenja (LEM)

Nakon prvobitnog testa svih spojeva i uzemljenja, može biti neophodno napraviti brzu provjeru naponskih i/ili strujnih nivoa u postrojenju. Preopterećenje kola, podnaponi, prenaponi i nesimetrije mogu se detektovati na ovaj način. Za ova merenja jedino su potrebni jednostavni *multimetri* (slika 4.8). Signali koji se mere ovi instrumentima su:

- Napon između faze i zemlje
- Napon između faze i nule
- Napon između nule i zemlje
- Međufazni napon
- Fazne struje
- Struje u nuli.



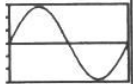
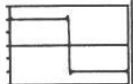
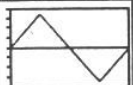
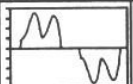

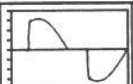
Slika 4.8 - Digitalni multimetri (Fluke, LEM)

Najvažniji faktor, kojeg treba razmotriti pri selekciji i korištenju multimetra je metod preračunavanja, odnosno, koju veličinu instrument meri, a koju pokazuje. Najčešće instrumenti pokazuju efektivnu vrednost merenog signala. Međutim, postoje različite metode koje se koriste za izračunavanja efektivne vrijednosti. Postoje tri najčešće metode:

1. *metod vršne vrednosti* – instrument registruje maksimalnu vrednost, te zatim tu vrednost podeli sa 1.414 kako bi se dobila efektivna vrednost. Ovo je tačno samo ukoliko je signal sinusoidalan.
2. *metod usrednjavanja* – instrument određuje prosečnu (srednju) vrednost čistog signala. Za čisto sinusoidalni signal, ova vrednost je vezana za efektivnu vrednost konstantom 1.11.
3. *stvarna efektivna vrijednost* – efektivna vrednost signala je mera zagrevanja. Jedan od metoda detektovanja stvarne efektivne vrednosti je korišćenje termičkog detektora za merenje vrednosti zagrevanja. Moderniji digitalni multimetri koriste digitalno preračunavanje efektivne vrednosti tako što korenuje signal na bazi uzimanja uzoraka, usrednjavanja tokom perioda i onda vađenja drugog korena iz rezultata.

Pomenute različite metode daju isti rezultat u slučaju čiste sinsoide, ali mogu dati prilično različit odgovor za izobličene signale. Da bi se dobili što tačniji rezultati koriste se različite korekcije rezultata zavisno od vrste talasa (Tabela 4.2).

Tabela 4.2. Uporedba metoda za merenja napona i struje s multimetrom [1]

		<i>Meter Type</i>		
		True RMS	Peak Method	Average Responding
		<i>Circuit Type</i>		
		RMS Converter	Peak / 1.414	Sine Avg. X 1.11
Sine Wave		100 %	100 %	100 %
Square Wave		100 %	82 %	110 %
Triangle Wave		100 %	121 %	96 %
ASD Current		100 %	127 %	86 %
PC Current		100 %	184 %	60 %
Light Dimmer		100 %	113 %	84 %

Osciloskopi su veoma korisni u koliko se ima potreba za testom u realnom vremenu. Pogled na talasni oblik napona i struje može dati mnogo informacija o tome šta se dešava, čak i bez neke detaljne harmonijske analize talasnog oblika. Moguće je dobiti informaciju o amplitudi napona i struja, pogledati očigledne poremećaje u talasnom obliku i tako detektovati svaku veću varijaciju signala.

Danas je na tržištu moguće naći različite vrste osciloskopa. Digitalni osciloskopi sa mogućnosti pohranjivanja podataka su veoma korisni, zato što snimljeni talas može biti sačuvan i naknadno analiziran. Digitalni osciloskopi su obično opremljeni i komunikacijskom opremom koja omogućava prenos podataka na računar, te daljnju obradu podataka odgovarajućim softverskim paketima.

Najnovije izvedbe osciloskopa su ručno-držeći osciloskopi, koji imaju mogućnost prikazivanja talasnog oblika, kao i mogućnost procesuiranja signala. Ovi osciloskopi su lako

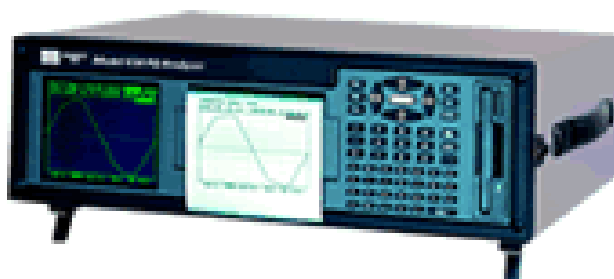
prenosivi, te kao takvi su posebno pogodni za snimanja na licu mesta. Jedan takav tipičan osciloskop je prikazan na slici 4.9. Pojedini osciloskopi imaju mogućnost da analiziraju i harmonike.

Analizatori i monitori poremećaja spadaju u kategoriju uređaja, koji su specijalno dizajnirani za merenja kvaliteta. Oni tipično mogu meriti široki spektar poremećaja u sistemu od veoma kratkotrajnih tranzijenata napona do dugotrajnih ispada ili podnapona. Najčešće se informacije zapisuju na papirne traka, mada većina uređaja ima dodatnu opremu tako da informacija može biti zapisana i na disk. Postoje dve kategorije ovih uređaja:

1. konvencionalni analizatori
2. grafički opremljeni analizatori (Slika 4.10).

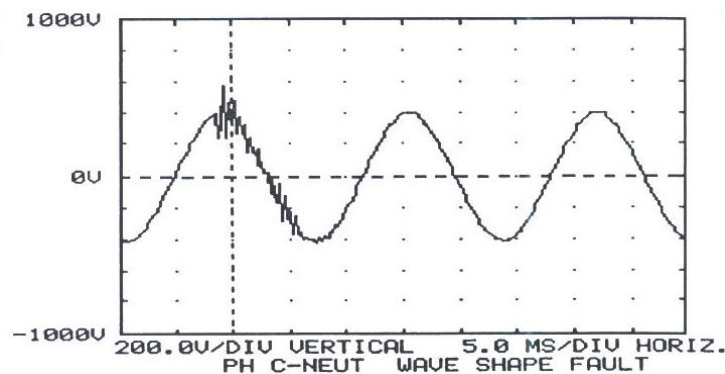


Slika 4.9 - Ručno-držeći osciloskop (Fluke)



Slika 4.10 - Grafički opremljen analizator poremećaja (Dranetz BMI 658)

Često je teško odrediti karakteristiku poremećaja ili tranzijenta samo na osnovu sumarnih informacija dobivenih pomoću konvencionalnih analizatora. Na primer, oscilatorni tranzijent ne može biti efikasno opisan pomoću vršne vrednosti i trajanja. Zbog toga je postao gotovo imperativ da grafički opremljeni analizatori poremećaja imaju mogućnost registrovanja talasnog oblika radi detaljne analize problema vezanog za kvalitet električne energije (slika 4.11).



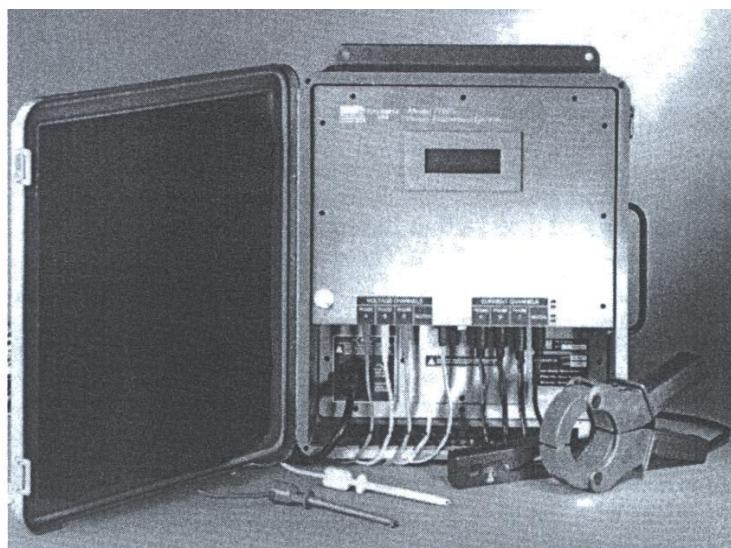
Slika 4.11 - Izlaz grafički opremljenog analizatora [1]

Instrumenti iz kategorije analizatora poremećaja imaju veoma ograničene mogućnosti po pitanju harmonijskih analiza. Neki od veoma moćnih analizatora imaju dodatne module koji mogu biti korišćeni za izračunavanje brzih Furierovih transformacija (FFT - Fast Furier Transformation) kako bi se odredili harmonici nižeg reda. Međutim, svako značajnije merenje harmonika će zahtevati instrument koji je dizajniran za spektralnu analizu ili harmonijsku analizu. U osnovi, postoje tri kategorije ovih instrumenata:

1. jednostavni analizatori
2. spektralni analizatori opšte namene
3. harmonijski analizatori specijalne namene.

U poslednje vrijeme u instrumentima se kombinuju harmonijska samplovanja i funkcije monitoringa snage, kao i sve funkcije monitoringa poremećaja. Izlazi su grafički bazirani, a podaci se prikupljaju na daljinu putem telefonskih linija u centralnu bazu podataka.

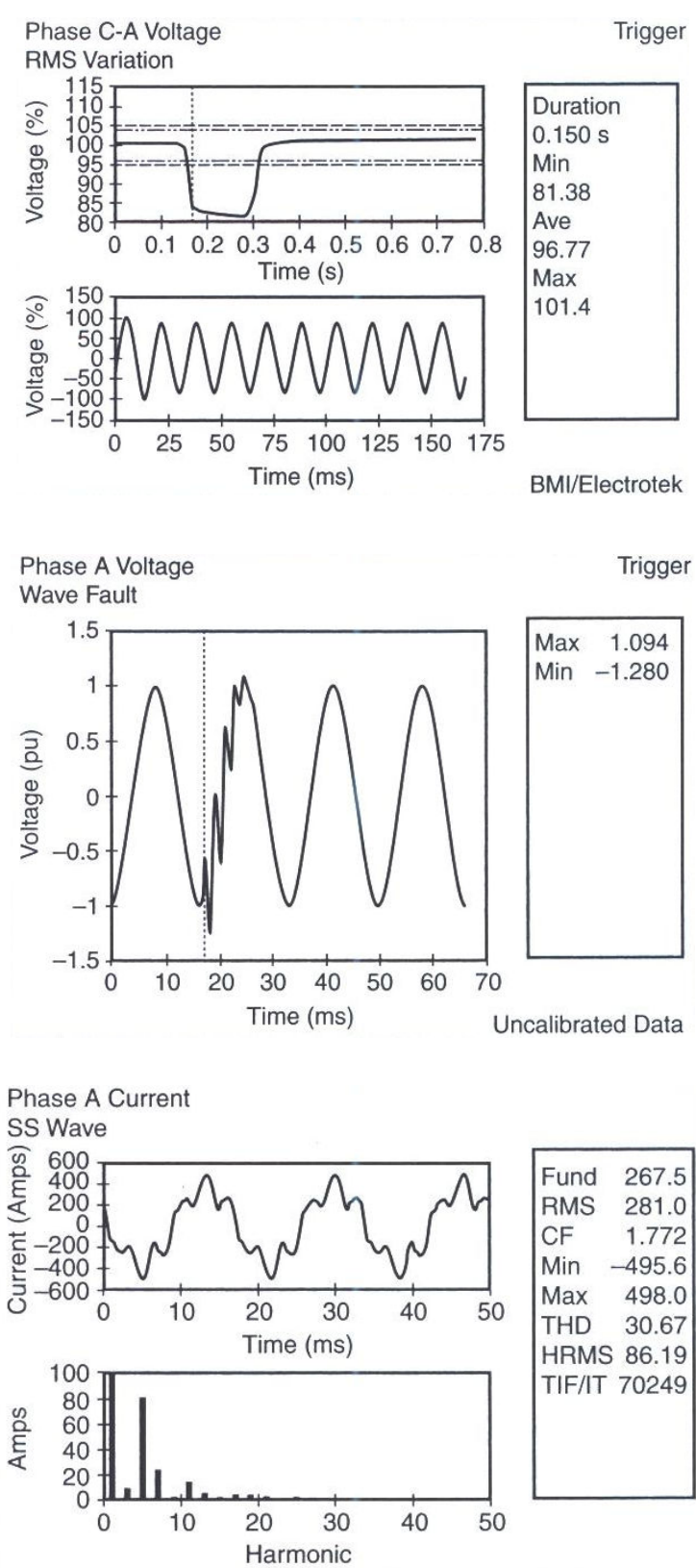
Primer jedanog takvog instrumenta prikazan je na slici 4.12. Ovaj instrument je dizajniran kako za upotrebu u elektroprivrednim kompanijama, tako i kod krajnjih korisnika. Ima mogućnost istovremenog praćenja trofaznog napona i struje, što je veoma važno za dijagnosticiranje problema. Instrument kupi "sirove" podatke i pohranjuje ih u memoriju odakle ih je moguće očitati i daljinski.



Slika 4.12 - Instrument za monitoring poremećaja, harmonika i drugih pojava u stacionarnom stanju (Dranetz-BMI) [1]

Off-line analiza vrši se veoma moćnim softverskim paketima, koji mogu dati različite vrste izlaza kao što su neki prikazani na slici 4.13. Dijagram na vrhu pokazuje tipičan izgled naponskog

propada. Na srednjem dijagramu je prikazan tipičan talas nastao usled rada kapacitivnog prekidača. Donji dijagram pokazuje mogućnost merenja i analiziranja harmonika.



Slika 4.13 - Izlaz iz kombinovanog analizatora poremećaja i harmonika [1]

Flikermetri - Kolebanje napona izaziva promene osvetljaja sijalica sa užarenim vlaknom, koja može stvoriti vizualni fenomen treperenja, odnosno *fliker*. Učestala pojava flikera daje veoma

neprijatan osjećaj. Intenzitet nelagodnosti raste značajno sa amplitudom kolebanja. Pri čestom ponavljanju, čak i veoma male amplitude mogu uzrokovati neprijatan osjećaj. Prema standardu EN 50160 tačka 1.3.15 fliker se definiše na slijedeći način: *Utisak nestalnosti vizualne slike prouzrokovan svetlosnim efektom čija se luminanca (jačina svijetlosti) ili spektralna raspodela menja tokom vremena.*

Dugi niz godina, razvijaju su različite metode za merenje flikera. Sjedinjene Američke Države još uvijek nemaju odgovarajući standard, ali postoje IEEE standardi 141-1993 i 519-1992. U drugim zemljama, utvrđena je standardna metodologija merenja flikera. UIE - IEC flikermetar predstavlja standard za merenja flikera u Evropi, kao i u drugim državama, koje su usvojile IEC standard. IEC metod za merenje flikera, definisan IEC standardom 61000-4-15 (prethodno 868), je veoma napredan pristup merenju flikera.

Eksperimentalna istraživanja merenja i ocenjivanja pojava flikera sežu prilično daleko u prošlost. Sedamdesetih godina su u svijetu postojala četiri modela instrumenata, koja su davala rezultate, koje međusobno nije bilo moguće porediti. U različitim državama flikermetri su bili zasnovani na različitim mernim metodama, iako su svi simulirali lanac sijalica-oko-mozak [2]. Tako su se pojavile i različite interpretacije reprezentativnih vrijednosti flikera kao što su: "fliker doza", "funkcija kumulativne gustoće vjerovatnoće djelovanja" (CPF – Cumulative Probability Function), "merna tačka kolebanja napona" i "V10". Najpoznatija četiri flikermetra su bila:

1. Britanski flikermetar – ERA meri efektivnu vrednost kolebanja napona u frekventnom području od 0,5 do 27 Hz i upotrebljava približnu vremensku konstantu 100 sekundi.
2. Francuski flikermetar – EDF meri kolebanja napona u frekventnom području od 0,5 do 25 Hz i formira kvadratni koren srednje vrednosti promena. Ta srednja vrednost omogućava ocenjivanje "fliker doze", koja odgovara nivou osjetljivosti kojeg testni subjekt može raspoznati.
3. Nemački flikermetar – EGF raspoznaje i filtrira komponente napona napajanja. Flikermetar sadrži 12 filtera, čije središnje frekvencije su u opsegu od 0,7 do 28 Hz. Merač daje trenutne vrednosti flikera, koje može zapisati u određenom vremenskom intervalu.
4. Japanski flikermetar – V10 sličan je francuskom instrumentu s tim da upotrebljava krivu osjetljivosti dobivenu sa 100 W sijalicom sa užarenom niti.

Pri UIE (međunarodnom udruženju za elektrotermiju) je osamdesetih godina započeo razvoj međunarodnog flikermetra. Radna grupa pri Udruženju je svojim prijedlogom za merenje i ocenjivanje flikera postavila svetski standard za takva merenja. Značaj takvog standarda je pre svega u tome, da su rezultati merenja međusobno komparativni, što je preduslov za određivanje i postavljanje standarda, koji tako obavezuje i dobavljače i korisnike i za obe strane je prihvatljiv. Međunarodni (UIE) flikermetar je projektovan na osnovu osobina delovanja 60 W sijalice sa užarenom niti koja, među svim sijalicama, ima najneugodniji odziv na promene napona.

Fliker je potrebno ocenjivati u odgovarajućem vremenskom intervalu. Zbog slučajne prirode, njegova se veličina u vremenu posmatranja može jako menjati. Trenutna vrijednost flikera određuje se tako da se ne provjeravaju samo dobijeni maksimalni nivoi, već i koliko vremena je u posmatranom području prekoračen određeni nivo flikera. Period posmatranja mora biti izabran tako da je pogodan za različita opterećenja. Rezultati moraju pokazati reakciju prosečnog posmatrača pri različitim vrstama flikera. Bira se interval dug 10 minuta. Interval je dovoljno dug, da smanji uticaj retkih promena napona, kao i da nestručna osoba uoči smetnju i interval smetnje. Istovremeno je interval i dovoljno kratak da je moguće detaljno okarakterisati smetnje uređaja sa dugim preklopnim vremenom (duty cycle).

Intenzitet flikera definisan od strana UIE-IEC mernih metoda flikera ocenjuje se sledećim veličinama:

- **kratkotrajna jačina (P_{st}) flikera**, koja se meri u periodu od 10 minuta; moguće ju je izračunati na osnovu izraza:

$$P_{st} = \sqrt{0.0314P_{0.1} + 0.0525P_{1s} + 0.0657P_{3s} + 0.28P_{10s} + 0.08P_{50s}} \quad (4.1)$$

gde su procenti $P_{0.1}$, P_{1s} , P_{3s} , P_{10s} i P_{50s} nivoi flikera koji su nadmašeni u 0.1%, 1%, 3%, 10% i 50% vremena, respektivno.

- **dugotrajna jačina (P_{lt}) flikera**, koja se računa iz sekvenci od 12 P_{st} - vrednosti tokom dvosatnog intervala pomoću sledeće jednačine:

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{sti}^3}{12}} \quad (4.2)$$

Standard *EN 61000-3-3: Elektromagnetna kompatibilnost* navodi granične vrednosti za kratkotrajni (P_{st}) i dugotrajni (P_{lt}) fliker za opremu priključenu na niskonaponsku distributivnu mrežu:

- vrednost P_{st} ne bi smela biti veća od 1.0,
- vrednost P_{lt} ne bi smela biti veća od 0.65,
- stacionarna vrednost relativne promene napona ne bi smela prekoračiti 3%.

Manje dorečen je zahtjev standarda EN 50160, koji određuje manje vrednosti za fliker u srednjenaponskim i visokonaponskim mrežama.

Pod normalnim uslovima rada, u bilo kojem periodu u toku jedne sedmice, jačina dugotrajnog flikera uzrokovana kolebanjem napona mora biti $P_{lt} \leq 1$ u 95% vremena. Reakcija na fliker je subjektivna i može veoma zavistiti od uzroka flikera i perioda tokom kojeg je prisutan. U nekim slučajevima $P_{lt}=1$ daje povod neprijatnom osjećaju, dok u drugim slučajevima veće vrijednosti P_{lt} ne prouzrokuju smetnje.

Posmatrajući generalno sve instrumente za monitoring, može se zaključiti da je pri izboru opreme potrebno razmatrati veliki broj faktora, zavisno o primene instrumenta. Neki od važnijih faktora na koje treba obratiti pažnju su:

- Broj kanala (napona i/ili struja)
- Temperaturna specifikacija instrumenta
- Ulazni naponski opseg
- Zahtevi za napajanjem
- Sposobnost merenja trofazno
- Ulazna izolacija (izolacija između pojedinih kanala i od svakog ulaza ka zemlji)
- Sposobnost merenja struje
- Kućište instrumenta
- Jednostavnost upotrebe
- Dokumentacija
- Mogućnost komunikacije (modem, mrežna oprema)
- Softveri za analizu

Fleksibilnost instrumenta je takođe veoma važna. Što je više funkcija moguće obezbediti na jednom instrumentu to je smanjen broj potrebnih instrumenata.

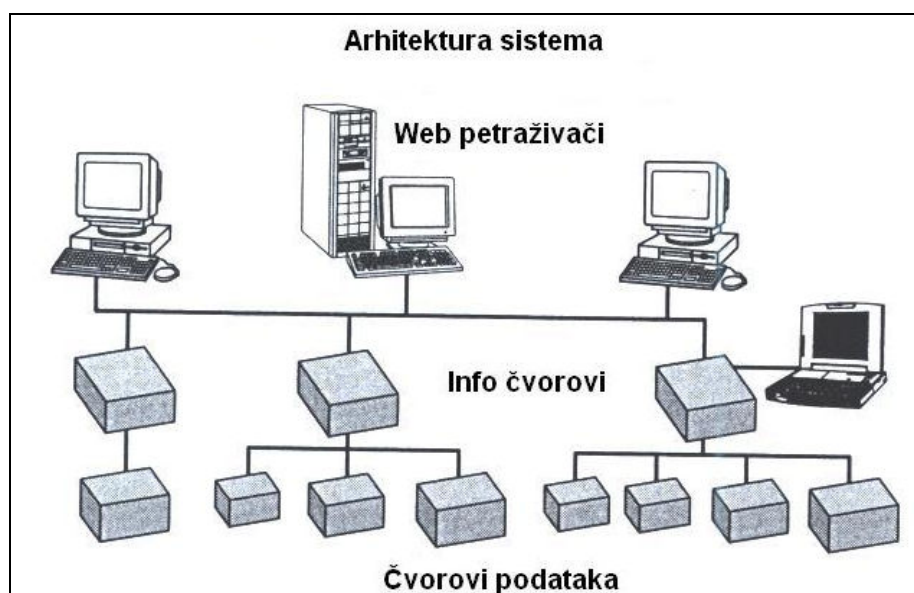
4.11. Inteligentni sistemi za monitoring

Svi prethodno opisani instrumenti su dizajnirani za prikupljanje podataka. Neki instrumenti mogu poslati podatke putem telekomunikacijske linije na centralnu procesorsku lokaciju za njihovu analizu i inerpertaciju. Međutim, jedna od uobičajenih karakteristika ovih instrumenata je da

nemaju mogućnost analize, interpretacije i određivanja šta se dešava u sistemu na licu mesta. Oni jednostavno snimaju i prenose podatke za kasniju obradu.

Nakon završetka EPRI DPQ projekta, zaključeno je da su takvi instrumenti neadekvatni. Novi trend u oblasti monitoringa kvaliteta električne energije je da se mereni podatak odmah transformiše u korisnu informaciju i prezentuje korisniku. Potrebno je da se svi navedeni koraci izvrše na jednom mestu u sistemu. Dakle, da bi ispunili ove zahtjeve, novo-proizvedeni monitori kvaliteta su razvijeni sa integrisanim inteligentnim sistemima. Ovakva vrsta monitora spada u kategoriju inteligentnog monitora kvaliteta u kome se informacija direktno kreira i momentalno je na raspolaganju korisniku. Ovi instrumenti omogućavaju inženjerima da preduzmu neophodne i adekvatne radnje i reaguju u veoma kratkom vremenu.

Jedan takav inteligentni monitor kvaliteta razvili su Electrotek Concepts, Dranetz-BMI, EPRI i Tennessee Valley Authority (Slika 4.14). Karakteristika ovog sistema je analiza podataka sa veoma brzim širenjem informacije putem Internet tehnologije, e-pošte, pejdžera i faxova. Sistem sadrži komponente, koji izvršavaju akviziciju podataka, grupisanje podataka, komunikaciju, Web vizualizaciju i komponente za upravljanje preduzećem. "Čvorovi podataka" predstavljaju komponentu za akviziciju podataka, koja meri stvarne parametre sistema (napon, struju, itd.). Komponenta za grupisanje podataka, komunikaciju, Web vizualizaciju i upravljanje preduzećem predstavljaju posebno dizajniran kompjuterski sistem nazvan "Info čvor". Komunikacija između čvorova za akviziciju i Info čvorova uspostavlja se pomoću serijskog kabla RS-232/485/422 ili Ethernet komunikacije korišćenjem standardnih protokola. Jedan ili više uređaja za akviziciju ili "čvorova podataka" mogu biti konektovani na "Info čvor". Info čvor ima svoj vlastiti upravljački softver koji upravlja kompletnom funkcionalnosti monitoring sistema. On se ponaša kao *data-base menadžer* za posebnu namjenu i Web server. Različiti inteligentni sistemi posebne namene su implementirani u ovaj kompjuterski sistem. Kako se Info čvor ponaša i kao Web server, bilo koji korisnik sa Internet priključkom može pristupiti podacima i analizirati rezultate zapamćene u memoriji sistema. Sistem za monitoring podržava standardni protokol za transfer dokumenata (FTP – file transfer protocol). Zbog toga baza podataka može biti ručno arhivirana pomoću FTP-a jednostavno kopirajući bazu podataka na bilo koji lični računar koji ima mogućnost pristupa sistemskom računaru putem mreže ili modema. Posrednički softver može se koristiti za arhivirane podatke iz grupe Info čvorova.



Slika 4.14 - Arhitektura inteligentnog sistema

4.12. Literatura

1. Dugan C. Roger, et.al.: *Electrical Power System Quality*, second edition, Mc Graw Hill, 2002
2. Konjić T., Sarajlić N., Voršić J.: *Mjerenje podharmonijskog kolebanja napona*, BHK CIGRE, Neum, Septembar 2001, I36.01, str.36-36
3. Web stranice:
 - <http://my.epri.com>
 - <http://www.electrotek.com>
 - <http://www.pqmonitoring.com>
 - <http://www.sola-hevi-duty.com>
 - <http://www.lincopower.com>
 - <http://www.scrcontrols.com>
 - <http://www.bonitron.com>
 - <http://www.softswitch.com>
 - www.fluke.co.uk
 - www.lem.com
 - www.dranetz-bmi.com

5. NAPONSKI TRANZIJENTI

Delovanje groma, kvarovi kao i različite sklopne manipulacije unutar elektroenergetske mreže generišu tranzijente struje čije su posledice prenaponi unutar elektroenergetskog sistema. U zavisnosti o vrednostima amplituda, dužini trajanja i talasnom obliku ovi prenaponi mogu imati neznatan uticaj na normalan rad elemenata elektroenergetskog sistema i elektronske opreme ili mogu prouzrokovati njihovo pogrešno funkcionisanje, kvarove i potpune ispaide sa napojne mreže.

5.1. Klasifikacija prenapona: IEC 71-1

Prema IEC 71-1 standardu prenapon je definisan na sledeći način: “Prenapon je bilo koji napon između faznog provodnika i zemlje ili između faznih provodnika, a koji ima temenu vrednost koja premašuje odgovarajuću najveću dozvoljenu temenu vrednost propisanu za električnu opremu”. U okviru ovog standarda, naponi i prenaponi se klasifikuju prema njihovom obliku i dužini trajanja. Prema tome naponi i prenaponi se dele u sledeće grupe:

- Trajni napon pogonske frekvencije (*power frequency – pf*) je napon konstantne efektivne vrednosti sa nazivnom frekvencijom napajanja u sistemu koji je trajno priključen na stezaljke opreme.
- Privremeni, prolazni prenapon (*temporary*) je prenapon pogonske (*pf*) frekvencije relativno dugog vremena trajanja: Može biti neprigušen ili slabo prigušen. U nekim slučajevima njegova frekvencija može biti nekoliko puta manja ili veća od pogonske frekvencije.
- Tranzijentni, prelazni prenapon (*transient*) je kratkotrajni prenapon od svega nekoliko milisekundi ili manje, oscilatornog ili neoscilatornog karaktera, obično jako prigušen. Tranzijentni prenaponi se dijele na:
 - a) Prenapon sporog uspona čela: je tranzijentni prenapon, obično jednog polariteta, sa vremenom trajanja čela $20 \mu\text{sec} < T_1 < 5000 \mu\text{sec}$ i ukupne dužine trajanja $T_2 < 20 \text{msec}$.
 - b) Prenapon brzog uspona čela: je tranzijentni prenapon, obično jednog polariteta, sa vremenom trajanja čela $0.1 \mu\text{sec} < T_1 < 20 \mu\text{sec}$, i ukupne dužine trajanja $T_2 < 300 \mu\text{sec}$.
 - c) Prenapon veoma brzog uspona čela: je tranzijentni prenapon, obično jednog polariteta, sa vremenom trajanja čela $T_1 < 0.1 \mu\text{sec}$, i ukupne dužine trajanja $T_2 < 3 \text{msec}$, obično superponiran sa dodatnim oscilacijama frekvencija $30 \text{kHz} < f < 100 \text{MHz}$.
- Kombinovani (privremeni prenapon, prenapon sporog uspona čela, prenapon brzog uspona čela, prenapon veoma brzog uspona čela) prenapon, koji se sastoji od dva ili više komponentnih prenapona istovremeno, a koji opterećuje izolaciju opreme priključenu između faze i zemlje. Realno, svi prenaponi su ustvari kombinovani prenaponi.

Modelovanje komponenti elektroenergetskog sistema u širokom spektru frekvencija je praktički nemoguće. Zbog ovog razloga, i zbog naročitih svojstava specifičnog elementa elektroenergetske mreže, koji igraju značajne uloge u analiziranoj prelaznoj pojavi, potrebno je u zasebnim frekventnim područjima načiniti odgovarajuće modele elemenata. Tabela 5.1. pokazuje četiri osnovne grupe frekvencija, sa nekim preklapanjima, i njima pridružena odgovarajuća prenaponska stanja, u kojima se različito modeluju pojedini elementi mreže.

Tabela 5.1.

Grupa	Frekventno područje:	U vremenskom domenu to su:	Za analize aktuelni:
I	0.1 Hz – 3 kHz	Niskofrekventne oscilacije	Privremeni prenaponi
II	50 Hz – 20 kHz	Talasi sporog uspona čela	Sklopni prenaponi
III	10 kHz – 3 MHz	Talasi brzog uspona čela	Atmosferski prenaponi
IV	100 kHz – 50 MHz	Talasi vrlo brzog uspona čela	Prenaponi nastali podskakivanjima kontakata prekidača

Tabela 5.2 daje pregled različitih uzroka prelaznih pojava unutar elektroenergetskog sistema zajedno sa pripadajućim frekventnim područjima istih.

Tabela 5.2

Izvor	Frekventno područje
Uključenje transformatora Ferorezonancija	(DC) 0,1 Hz – 1 kHz
Rasterećenje	0,1 Hz – 3 kHz
Otklanjanje kvara Inicijalizacija kvara	50 Hz – 3 kHz 50 Hz – 20 kHz
Uključenje voda Automatsko ponovno uključenje	50 Hz – 20 kHz (DC) 50 Hz – 20 kHz
Prelazni povratni napon Kvar na priključcima Kvar na vodu	50 Hz – 20 kHz 50 Hz – 100 kHz
Podskakivanje kontakata prekidača	10 kHz – 1 MHz
Atmosferska pražnjenja Kvarovi u postrojenjima	10 kHz – 1 MHz
Sklopne operacije rastavljača i kvarovi u GIS	100 kHz – 50 MHz

U pojednostavljenim analizama kvaliteta električne energije prenaponski tranzijenti se dijele u dve osnovne grupe:

- a) impulsivni tranzijenti i
- b) oscilatorni tranzijenti

Osnovni uzroci prenaponskih tranzijentnih pojava u elektroenergetskom sistemu su:

- a) atmosferska pražnjenja
- b) uključivanje/isključivanje kondezatorskih baterija
- c) uključivanje neopterećenih transformatora
- d) ferorezonancija
- e) uključivanje/isključivanje voda
- f) rasterećenja ili potpuni ispadi opterećenja
- g) inicijalizacija i otklanjanje kratkih spojeva itd.

5.2. Tranzijenti nastali kao posledica atmosferskih pražnjenja

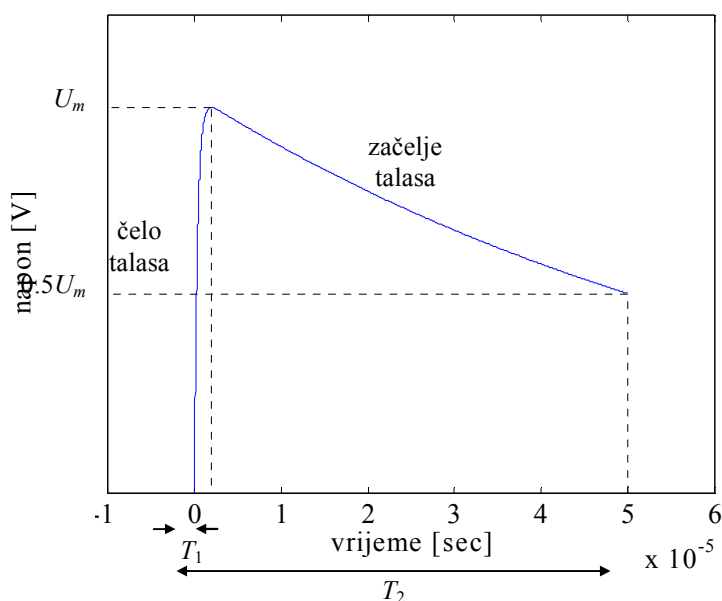
Prenaponi atmosferskog porekla nastaju kao posledica atmosferskog elektriciteta i njihov uticaj na elektroenergetsku mrežu je teško izbeći. Ova vrsta prenapona može nastati usled statičkog elektriciteta ili direktnog pražnjenja u vidu groma.

Amplitude prenapona, koje nastaju kao posledica statičkog elektriciteta, mogu dostići vrednosti do nekoliko stotina kilovolti. Prenosni vodovi u mreži najčešće imaju galvansku vezu sa zemljom (kao što je npr. zvezdište energetskih transformatora ili uzemljenje preko mernih transformatora), preko koje se statički elektricitet odvodi u zemlju. Iz ovih razloga ovi prenaponi ne predstavljaju veliku opasnost za visokonaponske vodove.

Mnogo opasniji prenaponi nastaju prilikom udara groma direktno u vodove ili u njihovoj neposrednoj blizini. Jedan od najvažnijih parametara groma je jačina struje, koja može dostići vrednosti i do 1000 kA, za udare pozitivnog polariteta, odnosno do 200 kA, za udare negativnog polariteta, ali se kod proračuna obično uzima da ona iznosi 40 do 60 kA. Struja groma u vremenskom domenu ima oblik talasa sa naglim porastom i laganim padom (slika 2.3). Osim jačine struje veoma su bitni strmina čela kao i brzina opadanja talasa. Čelo talasa traje do 50 μs za udare pozitivnog polariteta, 10 do 15 μs za udare negativnog polariteta, a dužina celog strujnog talasa je do 0.1 s za udare pozitivnog polariteta, odnosno do 100 μs za udare negativnog polariteta.

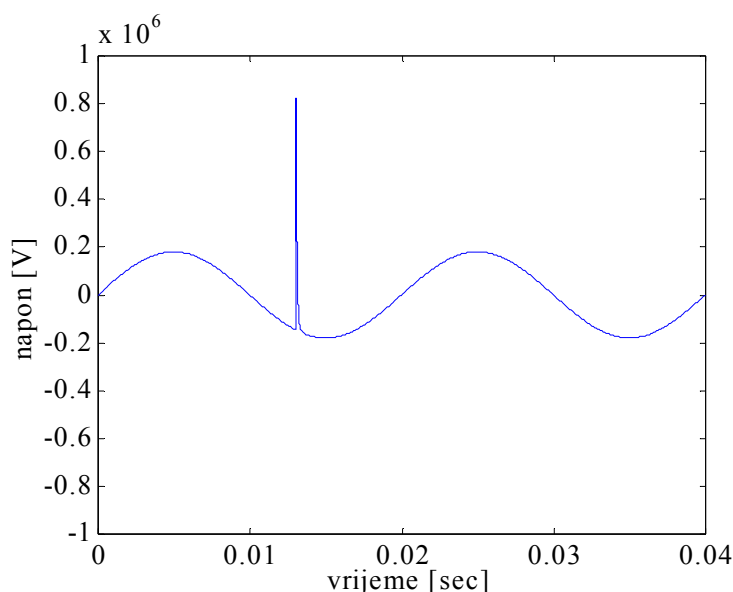
Atmosferski prenaponi su direktna posledica generisane struje groma i oni imaju talasni oblik analogan talasnom obliku struje groma. Veličina nastalih prenapona zavisi od jačine struje groma i veličine talasnog otpora voda, koja za nadzemne vodove iznosi oko 400 Ω , a za kablovske oko 50 Ω . Nastali prenaponi se u obliku putujućih prenaponskih talasa kreću na obe strane od mesta udara ili indukovanja. Direktni udar groma u fazni vod, kod dobro izoliranih vodova, prouzrokuje nastanak prenapona reda i do nekoliko miliona volti. Takvu vrednost prenapona nije u stanju izdržati nijedna do danas poznata izolacija. Ovi prenaponi izazivaju najveći broj oštećenja i kvarova na vodovima, postrojenjima i ostaloj električnoj opremi.

Slika 5.1 predstavlja vremenski oblik standardnog prenaponskog talasa 1,2/50 μs , tj. talasa čije je vreme uspona čela do temene vrijednosti $T_1=1,2 \mu\text{s}$ i vreme opadanja do polovine temene vrednosti na začelju $T_2=50 \mu\text{s}$.



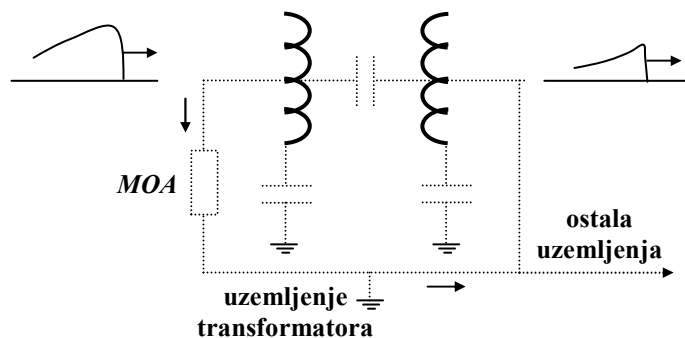
Slika 5.1 - Standardni prenaponski talas $T_1=1,2 \mu\text{s}$, $T_2=50 \mu\text{s}$.

Slika 5.2 pokazuje tipičan primer impulsnog prenaponskog talasa na prenosnoj liniji, nastalog kao posledica indukovanja atmosferskog pražnjenja. Amplituda prenaponskog talasa nastalog atmosferskim pražnjenjem se prigušuje prolaskom kroz sistem tako da talasni oblik impulsnog tranzijenta ima različit izgled na različitim mestima sistema.



Slika 5.2 - Impulсни prenaponski tranzijent nastao kao posledica atmosferskog pražnjenja

Zbog visoke frekvencije tranzijenta nastalog atmosferskim pražnjenjem, nastali prenaponski talasi se uglavnom prostiru duž kapacitivnih puteva transformatora, i to preko kapacitivne veze između namota primara i sekundara kao i kapacitivne veze između obeju namota i zemlje (slika 5.3). Praktični slučajevi konstruktivnih izvedbi transformatora pokazuju da kapacitet između namota i zemlje može da bude veći od kapaciteta između samih namota, tako da se većina prenaponskog talasa skreće u zemlju.

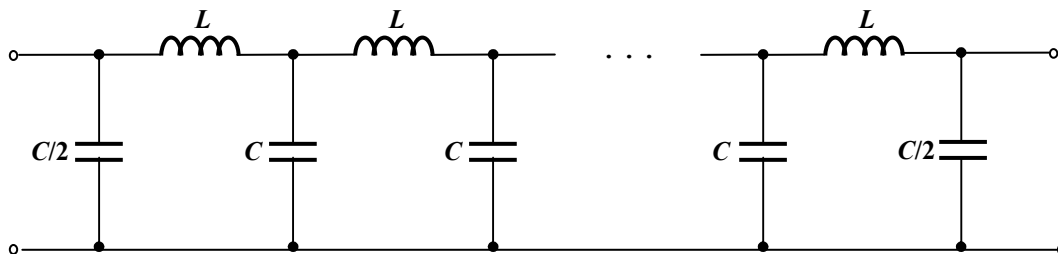


Slika 5.3 - Putevi širenja visokofrekventnih prenaponskih talasa nastalih delovanjem groma.

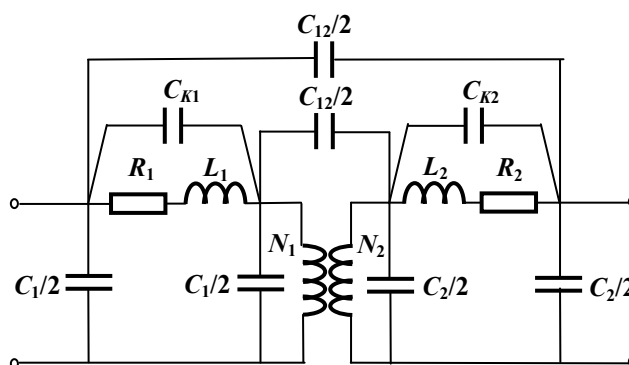
Dodatno, ako transformator sa primarne strane ima ugrađen odvodnik prenapona, tada pri odvođenju struje groma kroz njega može da dođe do porasta potencijalne razlike lokalnog uzemljenja transformatora na nekoliko kV, u odnosu na ostala uzemljenja u blizini. Ovo vrlo često može da ima za posledicu neispravan rad elektroničke opreme, koja ima vezu sa pomenutim uzemljenjem.

Atmosferska pražnjenja pre svega utiču na ispravan rad elemenata elektroenergetskog sistema kao što su transformatori, odvodnici prenapona, generatori itd., izlažući ih mehaničkim i termičkim naprezanjima. Pored toga osetljiva elektronska oprema može biti značajno ugrožena putujućim talasima nastalim pri udarima groma.

Za analize atmosferskih pražnjenja moraju se uvažiti odgovarajući modeli elemenata elektroenergetskog sistema, koji pripadaju njemu pripadajućem frekventnom području, reda 10 kHz – 1 MHz. Tako se prenosna linija modeluje distribuiranim parametrima kao na slici 5.4, dok se transformator dominantno predstavlja sa odgovarajućim ekvivalentnim kapacitetima između namota primara i sekundara, sopstvenim kapacitetima namota kao i ekvivalentnim kapacitetima između obeju namota i zemlje (slika 5.5).



Slika 5.4. Model prenosne linije aplikativan za analize atmosferskih pražnjenja



Slika 5.5. Model transformatora aplikativan za analize atmosferskih pražnjenja

5.3. Prenaponi nastali uključivanjem kondezatorskih baterija

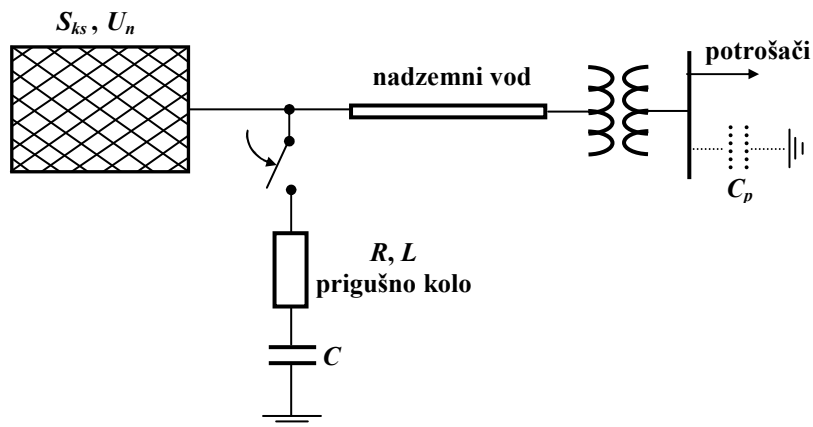
Kondezatorske baterije se koriste radi:

- poboljšanja faktora snage i
- podizanju napona sistema u uslovima preopterećenja.

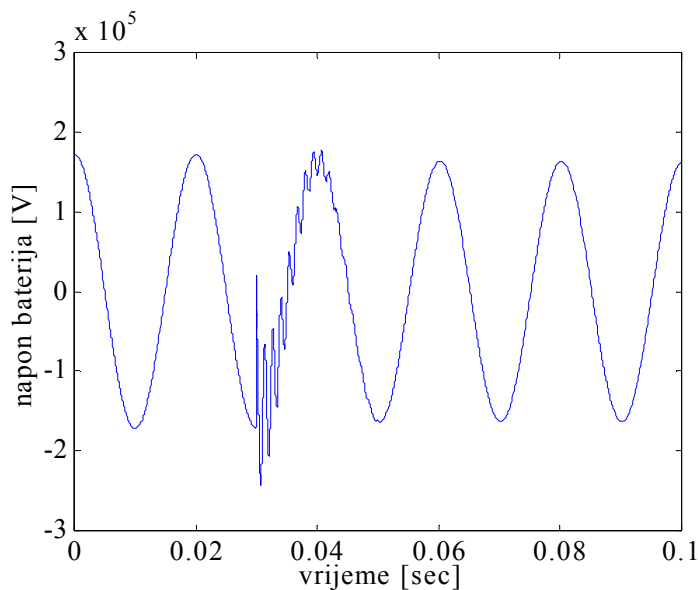
U uslovima pogoršanja faktora snage ili preopterećenja dolazi do uključivanja kondezatorskih baterija na mrežu. Pri uključivanju baterija na sistem, pojednostavljeno gledajući, dolazi do interakcije kapaciteta baterija sa induktivitetom sistema, rezultujući u oscilatorni tranzijent, koji se može prigušiti ugradnjom odgovarajućih $R - L$ kola. Pojednostavljeni model priključenja kondezatorskih baterija na mrežu dat je na slici 5.6.

Tipičan talasni oblik oscilatornog prenaponskog tranzijenta nastalog uključivanjem kondezatorskih baterija dat je na slici 5.7. Frekvencija generisane tranzijentne pojave je obično reda ispod 5 kHz uz maksimalnu dužinu trajanja od oko 50 msec. Prenaponi nastali uključivanjem kondezatorskih baterija su obično reda od 1,0 do 2,0 p.u. zavisno od prigušenja u sistemu. Tranzijent, prikazan na slici 5.7, se dalje prostire kroz distributivni transformator u sistem lokalnih potrošača. Amplituda i dužina trajanja prenapona nastalog uključivanjem kondezatorskih baterija se može dodatno povećati u slučaju da je na strani potrošača, na niskonaponskoj strani distributivnog transformatora, već instaliran kondezator kao što je to kondezator C_p na slici 5.6.

Prenaponski tranzijent nastao uključivanjem kondezatorskih baterija generalno može uticati na ispravan rad elektronske opreme priključene na niskonaponskoj strani transformatora. Takođe, nekada prenaponska zaštita može delovati prepoznavajući ovaj prenapon kao uzrok mogućeg oštećenja opreme i zbog toga isključiti potrošač sa napajanja. Na sličan način se može desiti da prekostrujna zaštita reaguje isključujući potrošač, budući da vrednosti struja uzrokovane uključivanjem kondezatorskih baterija mogu znatno premašiti nazivne vrijednosti.



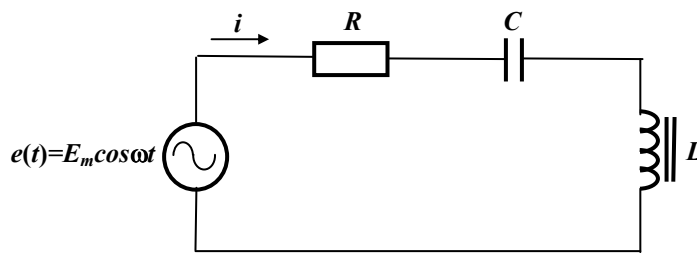
Slika 5.6 - Pojednostavljeni model priključenja kondezatorskih baterija na mrežu



Slika 5.7 - Oscilatorni tranzijentni prenapon nastao uključivanjem kondezatorskih baterija

5.4. Fenomen ferorezonancije

U linearnim električnim kolima pojam rezonancije se definiše kao stanje kola kada je prinudna učestanost izvora jednaka sopstvenoj učestanosti kola. Pri rezonanciji se javljaju povećanja amplituda napona i struje u kolu. Amplitude su ograničene omskim otporom kola. U nelinearnim električnim kolima najčešći nelinearni parametar je induktivnost feromagnetika transformatora. Zbog toga se pojava analogna rezonanciji kod linearnih električnih kola u nelinearnim kolima naziva ferorezonancija. Prema konfiguraciji elemenata električnog kola razlikuje se serijska i paralelna ferorezonanciju. Neka je serijska veza otpornosti R , kapacitivnosti C i nelinearne induktivnosti L data kao na slici 5.8.



Slika 5.8 - Serijsko ferorezonantno kolo.

Jednačina naponske ravnoteže za ovo električno kolo je:

$$e(t) = \sqrt{2}E \cos \omega t = Ri(t) + \frac{d}{dt}[Li(t)] + \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i(\tau) d\tau \quad (5.1)$$

ili u fazorskoj formi:

$$\bar{E} = \bar{U}_R + \bar{U}_L + \bar{U}_C = R\bar{I} + jU_L - j\frac{1}{\omega C}\bar{I} = R\bar{I} + j\left(U_L - \frac{1}{\omega C}\bar{I}\right) \quad (5.2)$$

Uz pretpostavku $\bar{I} = Ie^{j0}$ dobija se:

$$E^2 = R^2 I^2 + \left(U_L - \frac{1}{\omega C} I\right)^2 \quad (5.3)$$

Jednačina (5.3) može se podeliti na dva izraza:

$$U_{LC} = \left|U_L - \frac{1}{\omega C} I\right| \quad (5.4)$$

$$E^2 = R^2 I^2 + U_{LC}^2 \quad (5.5)$$

Iz (5.5) se dobija:

$$\frac{I^2}{\left(\frac{E}{R}\right)^2} + \frac{U_{LC}^2}{E^2} = 1 \quad (5.6)$$

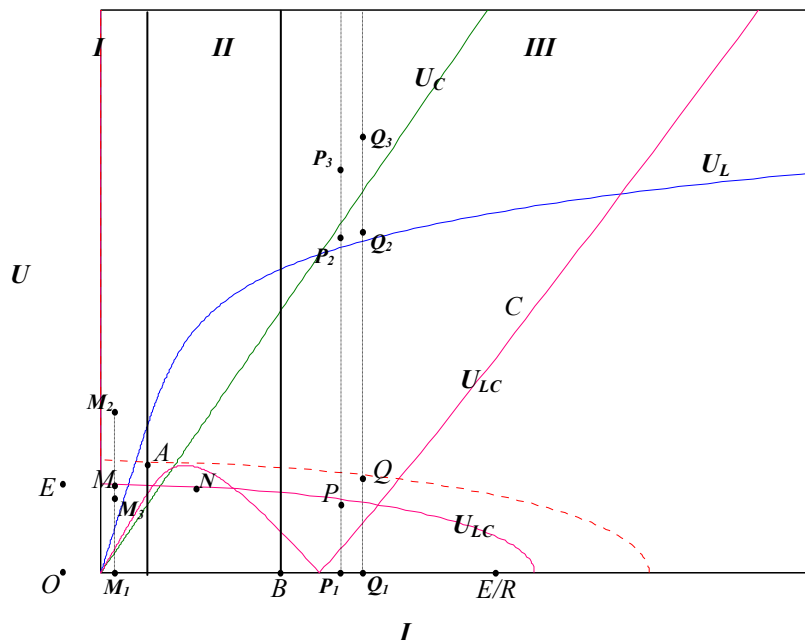
što predstavlja centralnu elipsu sa poluosama E/R i E u I - U koordinatnom sistemu, što je predstavljeno na slici 5.9. Takođe, dati su i karakteristika magnećenja nelinearne induktivnosti kao $U_L = \xi(I)$ i napon na kondenzatoru sa $U_C = \frac{1}{\omega C} I$. Sad se mogu nacrtati dve krive date jednačinama (5.4) i (5.5), odnosno (5.6).

Ove dvije krive se seku u tri ili u samo jednoj tački, zavisno o vrednosti napona izvora E . Za vrednost napona izvora E , kao na slici 5.9, postoje tri tačke preseka M , N i P . Tačka A , u kojoj kriva (5.4) ima maksimalnu vrednost, odgovara koljenu krive magnećenja. Tačka B odgovara rezonantnom režimu rada, jer su induktivni i kapacitivni padovi napona u kolu jednaki, a u kolu teče čisto aktivna struja. Razlikuju se tri oblasti:

- I* oblast, stabilna jer sa povećanjem napona E dolazi do povećanja struje u kolu,
- II* oblast, nestabilna jer sa povećanjem napona E dolazi do smanjenja struje u kolu, i
- III* oblast, stabilna ali sa velikim vrednostima struja u kolu.

Dakle, sa povećanjem napona izvora E radna tačka se kreće po krivoj (5.4) sve do tačke A u kojoj elipsa tangira ovu krivu. Daljim povećanjem napona radna tačka skače u tačku Q na delu BC krive gde ponovo nastupa stabilno stanje, ali sa velikom strujom u kolu. Vrednosti napona na induktivitetu i kapacitetu su $U_L = d(Q_1, Q_2)$, $U_C = d(Q_1, Q_3)$. Očito su vrednosti prenapona na ovim elementima znatno veće od vrednosti napona izvora E . Zanimljivo je da ponovnim smanjivanjem napona izvora radna tačke se neće vratiti na polazni deo krive OA , nego se seli u tačku P . I u ovoj

tački se zadržavaju velike vrednosti struje u kolu, te napona na reaktivnim elementima kola $U_L = d(P_1, P_2)$, $U_C = d(P_1, P_3)$. Dakle, jedna vrednost napona izvora E može imati dve odgovarajuće radne tačke, jedna (M) sa malim vrednostima struje u kolu kao i napona na skladištima energije $U_L = d(M_1, M_2)$, $U_C = d(M_1, M_3)$. Druga tačka (P) sa velikim vrednostima pomenutih veličina.



Slika 5.9 - Grafička analiza fenomena ferorezonancije

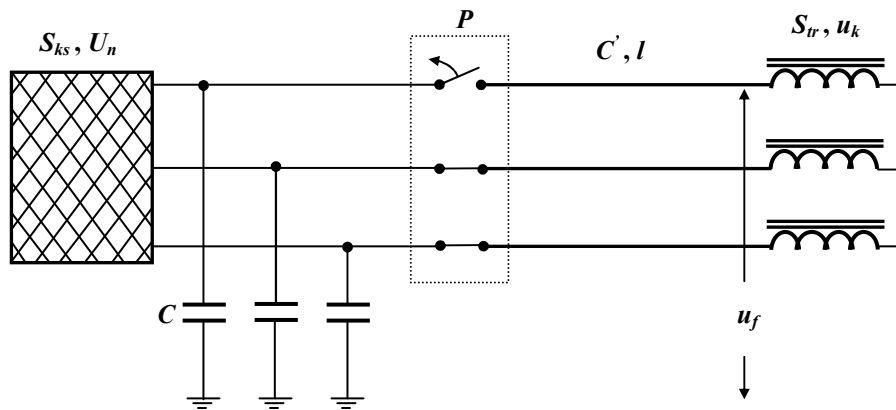
Prelaz iz tačke A na tačku P moguć je uz izvesno povećanje napona izvora, a to je praktično moguće pri nekoj sklopnoj operaciji uključanja/isključenja u analiziranom električnom kolu. Pojava kada pri operaciji uključanja/isključenja u električnom kolu dolazi do velikih vrednosti struje kola, kao i prenapona na pojedinim elementima kola, zove se ferorezonancija. Ovako velika struja i prenapon može značajno oštetiti izolaciju pomenutih elemenata u kolu.

Može se napomenuti da:

- ferorezonancija nastupa u svim slučajevima kada je kapacitivni otpor kola između induktivnog otpora kola pre i posle zasićenja, tj. oblast u kojoj nastupa ferorezonancija je mnogo šira od nego kod obične rezonancije. Drugim rečima, do pojave ferorezonancije dolazi ukoliko je prinudna učestanost izvora između sopstvenih učestanosti kola u nezasićenom i zasićenom području feromagnetskog jezgra.
- amplituda struje nije ograničena aktivnim otporom kola nego zasićenjem magnetnog kola (npr. struje i prenaponi su veći pri smanjenju otpora sa $R \neq 0$ na vrednost $R = 0$).
- prenaponi usled ferorezonancije nastupaju odmah nakon promene stanja kola i teoretski traju beskonačno dugo (sve dok se napon izvora ne isključi ili ne dođe do proboja izolacije, prekida kola i sl.)

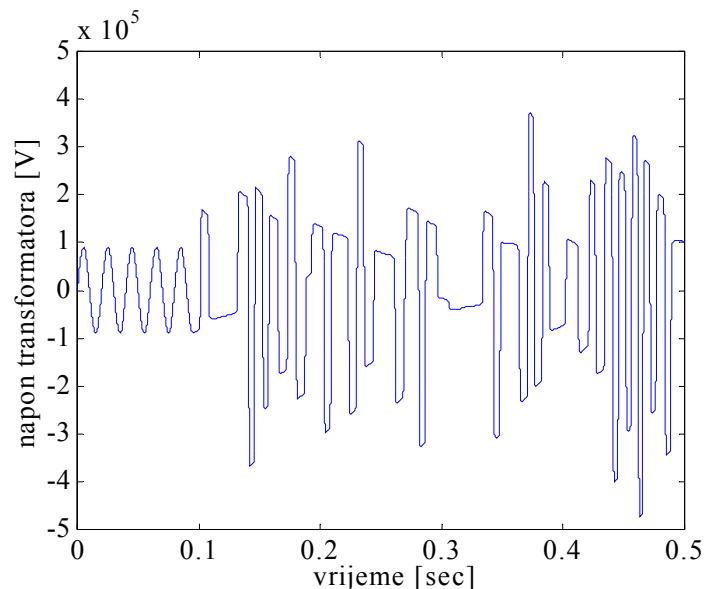
Praktični primeri ferorezonancije nastaju pri uključanju serijske kompenzacije sa slabo opterećenim transformatorima, isključenju naponskih mernih transformatora kada ferorezonantno kolo čine kondenzator za izjednačavanje potencijala na polovima prekidača i naponski transformator i neregularne operacije trofaznih prekidača. Neka je dato trofazno električno kolo, kao na slici 5.10, gde su povezani dugački kabl (podužnih parametara C' i I) i neopterećeni transformator sa izolovanom neutralnom tačkom. Transformator se uključuje ili isključuje preko trofaznog prekidača P . U slučaju neregularne sklopne operacije prekidača može doći do značajnih prenapona između nekorektno prekinutog faznog voda i zemlje. Povećanje napona nastaje usled ferorezonancije

uspostavljene između kapaciteta kabla i nelinearnog induktiviteta nekorektno prekinutog faznog namota transformatora.



Slika 5.10 - Pojednostavljena shema za izučavanje efekta ferorezonancije u trofaznom sistemu

Slika 5.11 pokazuje rezultat simulacije ferorezonantnog prenaponskog stanja registrovanog upravo na neregularno isključenoj fazi u toku prvih 0,5 sec.

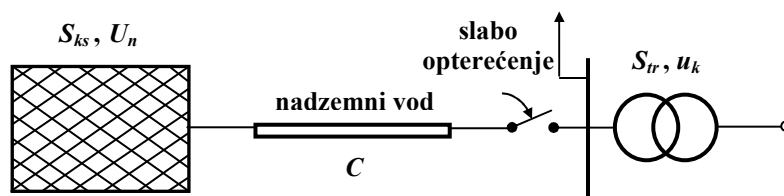


Slika 5.11 - Ferorezonantni fazni napon u neregularno isključenoj fazi

Kao posledica ferorezonancije mogu nastupiti trajni simetrični ili nesimetrični talasni oblici deformisanog napona i struje. Rezultujući talasni oblici mogu imati fundamentalnu frekvenciju sistema ili parne odnosno neparne subharmonijske frekvencije. Ferorezonancija može dovesti i do talasnih oblika sa slučajnim frekvencijama oscilovanja, pojava tkzv. haotične ferorezonancije. Posledica ferorezonantnih prenapona su termička i mehanička naprezanja transformatora, odvodnika prenapona i kvarovi električne i elektronske opreme.

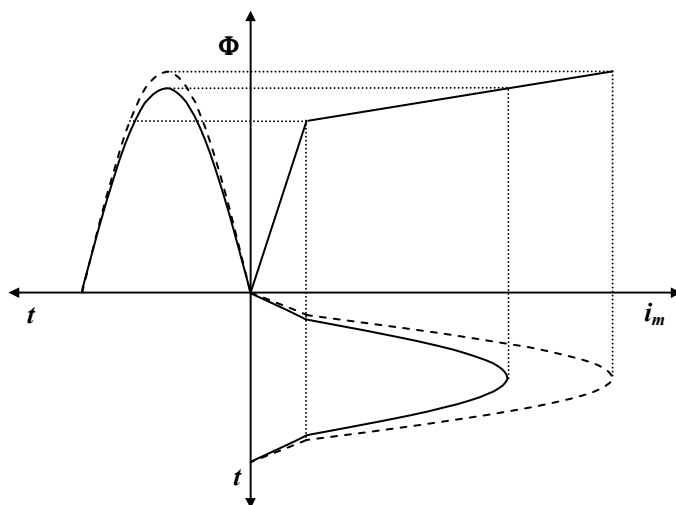
5.5. Prenaponi nastali uključivanjem neopterećenih transformatora

Pojednostavljena zamenska shema priključenja neopterećenog transformatora, preko nadzemnog voda kapaciteta C , na mrežu data je na slici 5.12:

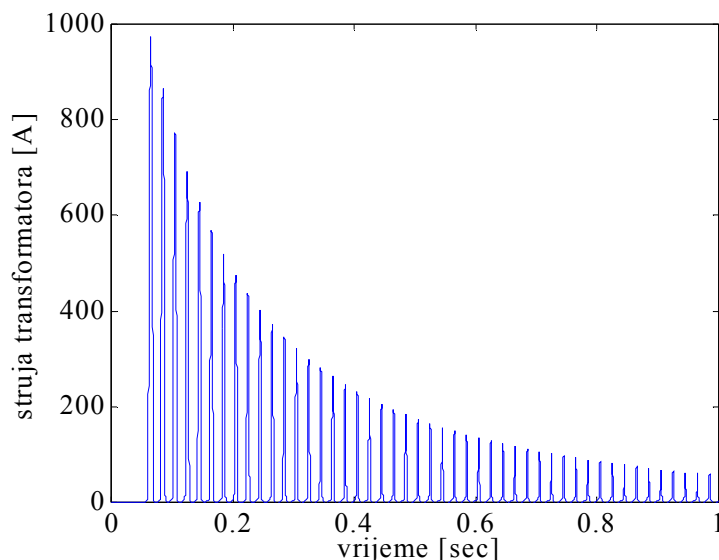


Slika 5.12 - Uključenje neopterećenog transformatora

Pri normalnim uslovima rada struja uključanja neopterećenog transformatora je reda oko 1% nazivne struje transformatora. Međutim, uključenje transformatora u trenutku kada napon sistema, prolazi kroz nultu vrednost dovodi do jakih strujnih udara, koji su zbog nelinearnog karaktera transformatora nesinusoidalne veličine, slike 5.13 i 5.14. Detaljnije analize pokazuju dominantno prisustvo prvih 7-10 harmonijskih komponenti struje.



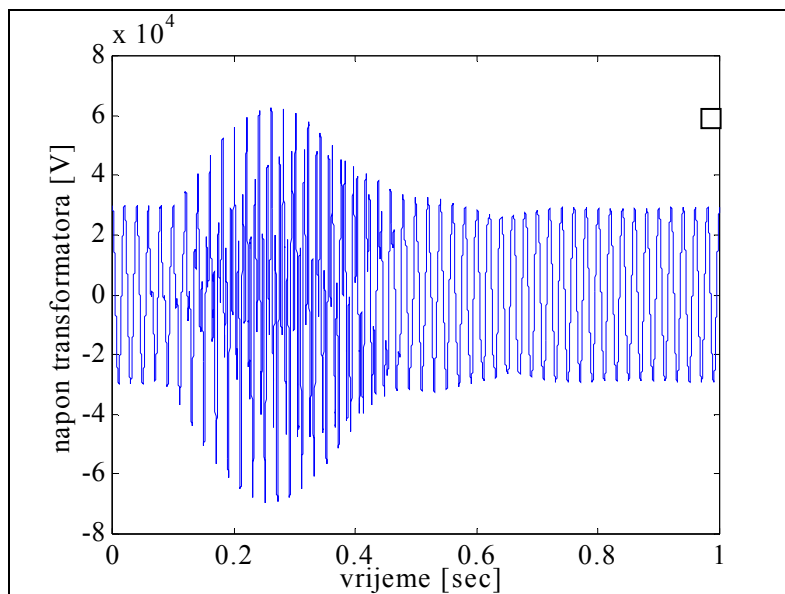
Slika 5.13 - Nesinusoidalna struja magnetiziranja transformatora



Slika 5.14 - Talasni oblik struje uključanja neopterećenog transformatora

Ukoliko se desi da više harmonijske komponente generisane strujom transformatora koincidiraju sa rezonantnim frekvencijama sistema može doći do privremenih, niskofrekventnih, nesinusoidalnih prenapona na priključcima transformatora. Najvažnija karakteristika ovih prenapona je relativno velika dužina trajanja (preko 100 perioda, ekstremno i preko 10 sekundi). Primer talasnog oblika privremenog prenapona na priključcima neopterećenog transformatora,

nastalog nakon njegovog priključenja na mrežu, dat je nas slici 5.15. Odvodnici prenapona instalirani uz transformatore mogu biti jako termički opterećeni ovom vrstom prenapona. Zagrevanje odvodnika bitno zavisi od posmatrane konfiguracije mreže i od parametara sistema kao i odgovarajućih početnih uslova (trenutak uključenja prekidača, remanentni magnetizam transformatora itd.). Amplituda, dužina trajanja ovakvih privremenih prenapona, a samim time i zagrevanje odvodnika prenapona, znatno su izraženiji u uslovima slabih elektroenergetskih sistema.



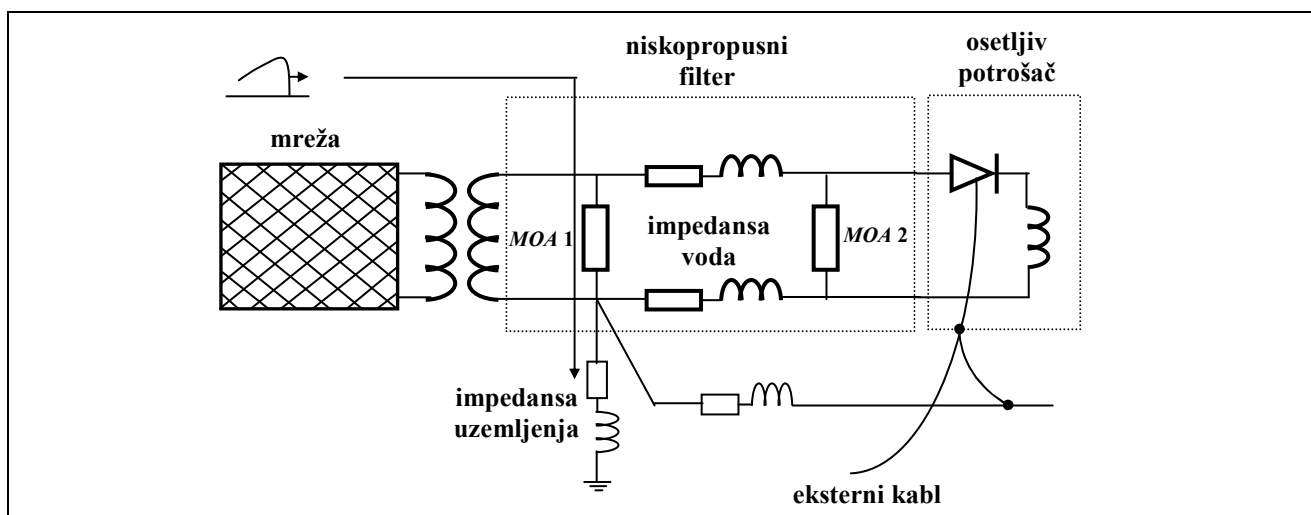
Slika 5.15 - Privremeni prenapon na transformatoru nakon njegovog priključenja

Ostali primeri nastanka tranzijentih prenapona u elektroenergetskom sistemu nastaju pri:

- Uključenje nadzemnih vodova ili kablova
- Inicijalaciji i otklanjanju kratkih spojeva u sistemu
- Isključenju (prekidanju) malih induktivnih i malih kapacitivnih struja
- Rasterećenjima ili potpunom ispadu opterećenja itd.

5.6. Osnovni principi prenaponske zaštite

Osnovni principi prenaponske zaštite potrošača predstavljeni su na slici 5.16. Oni se ogledaju u nekoliko postupaka:



Slika 5.16 - Osnovni principi prenaponske zaštite

a) skrenuti strujni talas od potrošača:

Odvodnik prenapona *MOA1*, instaliran između faznog provodnika i uzemljenja, služi za skretanje strujnog talasa prema zemji. Njegova osnovna funkcija je preuzimanje većine energije tranzijenta na sebe ne dozvoljavajući da ta energija ne dopre do osetljivih potrošača.

b) ograničiti napon na osetljivoj opremi

Odvodnik prenapona *MOA2*, instaliran između faznog provodnika i uzemljenja, služi za zaštitu izolacije osetljivih potrošača kada je iza odvodnika prenapona *MOA1* prošla dovoljna energija tranzijenta, koja može da ugrozi potrošač.

c) povezati sva uzemljena na zajedničku referentnu tačku

Važno je povezati sve eksterne kablove na zajedničku referentnu tačku uzemljenja. Može se desiti situacija da eksterni kablovi imaju druge referentne tačke uzemljenja u odnosu na lokalno uzemljenje električne opreme. U tom slučaju, npr. pri udaru groma, može doći do povećanja potencijalne razlike između pomenutih referentnih tačaka uzemljenja na nekoliko kV, rezultirajući u probodu izolacije između pomenutih uzemljenja što za posledicu ima pogrešan rad ili oštećenja osetljive opreme.

d) napraviti niskopropusni filter koristeći principe blokiranja i ograničavanja

Za veoma skupu i osetljivu opremu, koja je velike važnosti, npr. Kompjuteri, koji nose velike memorijske jedinice, potrebno je dodatno ugraditi niskopropusne, induktivne filtere, koji sprečavaju putovanje strujnog talasa groma iz sistema u opremu. Blokiranje i ograničavanje visokofrekventnih strujnih talasa se obezbeđuje ugradnjom serijskih induktiviteta.

5.7. Uređaji za prenaponsku zaštitu

5.7.1. Metal oksidni odvodnici prenapona

Jedan od glavni uređaja za prenaponsku zaštitu jesu metal oksidni odvodnici prenapona (*metal oxide arrester – MOA*). Metal oksidni odvodnici su napravljeni od MO blokova, koji su povezani visoko nelinearnim vezujućim slojevima, koji deluju kao barijera, odnosno oni se ponašaju tako da u zoni nazivnog napona obezbeđuju visoku otpornost odvodnika, a u zoni iznad nazivne tj. u zaštitnoj zoni, usled efekta usmeravanja elektrona, obezbeđuju veoma nisku otpornost odvodnika.

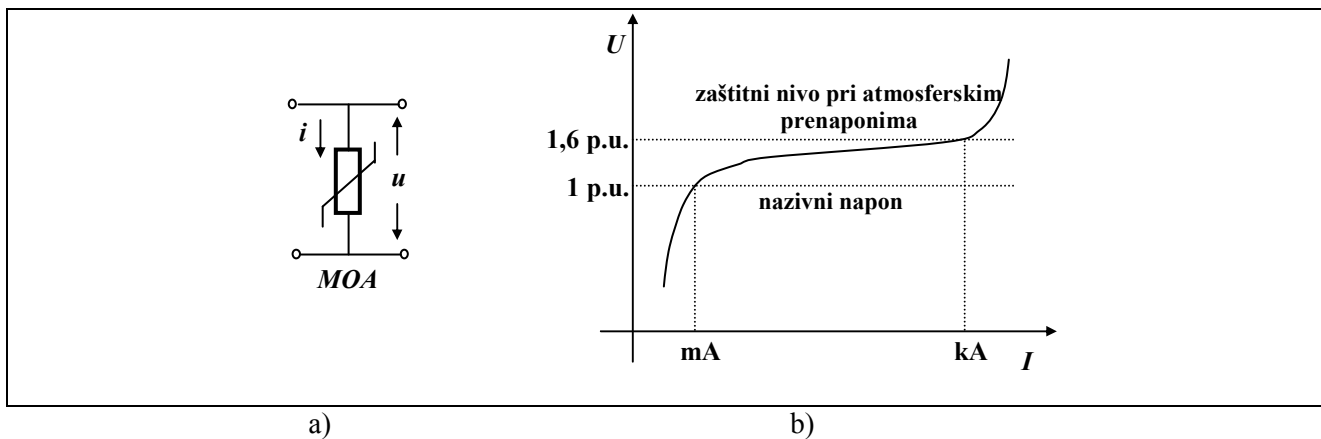
Na slici 5.17 dati su model i strujno naponska karakteristika metal oksidnog odvodnika prenapona. Ova karakteristika je opisana nelinearnom funkcijom tipa:

$$I = \alpha U^\beta \quad (5.7)$$

gde je koeficijent α određen dimenzijama odvodnika, dok β definiše nelinearnost odvodnika. Obično je $\beta \geq 40$.

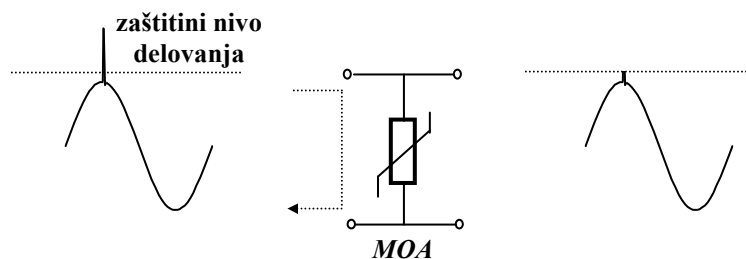
Neke od osnovnih prednosti metal oksidnih odvodnika prenapona u odnosu na tradicionalne silicijum karbidne odvodnike za iskrištem su:

- bolja sposobnost apsorpcije energije i mogućnost paralelnog spajanja više odvodnika
- niži zaštitni nivo
- bolja sposobnost ograničenja prenapona većih strmina uspona
- manje dimenzije i jednostavnija konstrukcija
- mogućnost kontrole stanja u normalnom pogonu



Slika 5.17 - a) Model i b) strujno – naponska karakteristika odvodnika prenapona

U nominalnom režimu rada kroz odvodnik, koji je inače trajno priključen na štice objekta, teče veoma mala struja reda mA. U prenaponskim uslovima, kada prenapon premaši zaštitni nivo provođenja, npr. vrednost 1,6 p.u., struja kroz odvodnik je reda kA. Zavisno od amplitudne vrednosti i dužine trajanja prenaponskog talasa, odvodnik prenapona može biti termički preopterećen, oštećen ili potpuno uništen u toku preuzimanja energije tranzijenta na sebe. U sistemima, gde se očekuju jaka termička naprezanja, štice objekata ugrađuju se paralelne veze više odvodnika prenapona. Pojednostavljeni način delovanja odvodnika prenapona dat je na slici 5.18.



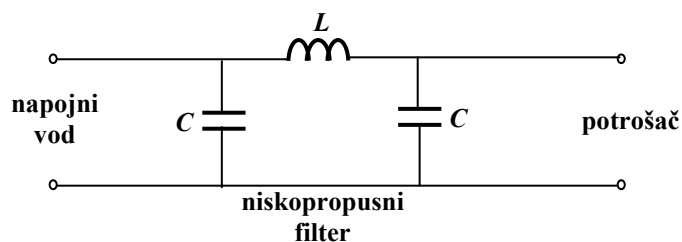
Slika 5.18 - Pojednostavljeni način delovanja odvodnika prenapona

Metal oksidni odvodnici prenapona mogu se vezati između: faznog i neutralnog provodnika, neutralnog provodnika i uzemljenja, faznog provodnika i zemlje, te između faznih provodnika, tzv. linijski odvodnici prenapona. Ipak, i odvodnici prenapona imaju jedan osnovni nedostatak, a to je da praktično odvede prenaponski talas kada njegova vrednost premaši odgovarajući zaštitni nivo odvodnika. Međutim, mogu postojati trajne deformacije napona, kao što su npr. Šumovi, koji još uvek nemaju dovoljno veliku amplitudu da bi odvodnici mogli reagovati. U tom smislu efikasniji su niskopropusni električni filteri.

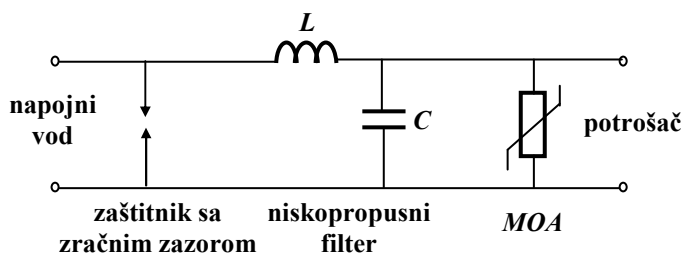
5.7.2. Niskopropusni električni filteri

Osnovni model niskopropusnog filtera dat je na slici 5.19. Osnovna funkcija niskopropusnog filtera je da propušta signale nazivne frekvencije, a da prigušuje ili skreće ka zemlji sve visokofrekventne signale.

Generalno gledajući, niskopropusni filteri su uvek građeni od serijskog induktiviteta i paralelnog kondenzatora, koji obezbeđuju niskoomski put prema zemlji za određeni opseg frekvencija. U nekim rešenjima prenaponskih zaštitnih uređaja, pored filtera dodatno se ugrađuju i odvodnici prenapona paralelno sa kondenzatorima. Slika 5.20 predstavlja najčešće korišteni hibridni zaštitni uređaj, koji kombinuje dve različite vrste odvodnika prenapona zajedno sa niskopropusnim filterom.



Slika 5.19 - Model niskopropusnog filtera

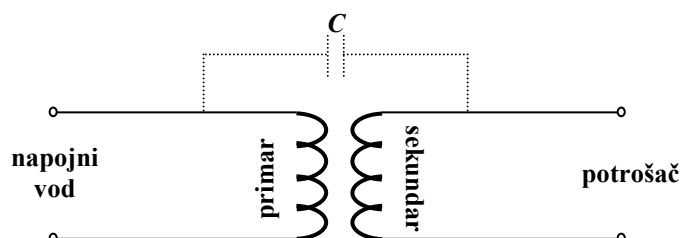


Slika 5.20 - Hibridni tranzijentni zaštitni uređaj

Zaštitnik sa vazдушnim zazorom, postavljen na početku uređaja, služi pre svega za odvođenje što veće količine energije tranzijenta. Niskopropusni filter služi za redukovanje transfera visokofrekventnih tranzijenata na stranu potrošača. Serijski induktor prigušuje ili blokira visokofrekventne tranzijente i preusmerava ih kroz prvi zaštitnik. Paralelni kondenzator služi za ublažavanje brzine uspona prenaponskog tranzijenta. Drugi odvodnik, MOA, služi za limitiranje prenapona na nivo koji je podnosiv za štice opremu. Neke druge mogućnosti izgradnje hibridnog zaštitnog uređaja su dva odvodnika MOA na početku i kraju uređaja, te sa ili bez još jednog paralelnog kondenzatora posle prvog odvodnika.

5.7.3. Izolacioni transformatori

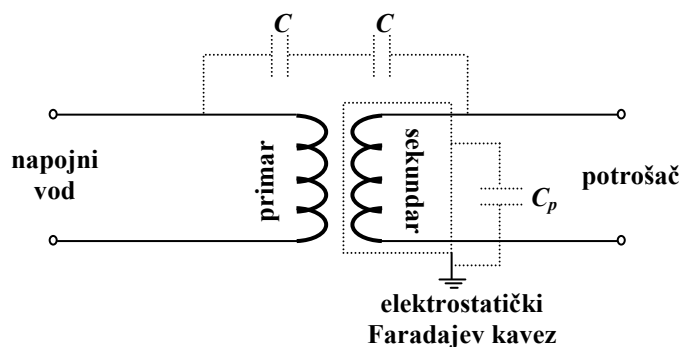
Normalni transformatori služe za galvansko odvajanje potrošača od napojne mreže, tako da se poremećaj u naponu izvora proporcionalno prenosnom odnosu transformatora umanjuje i prenosi na niskonaponsku stranu. S druge strane, induktivni karakter transformatora prigušuje prenos poremećenih visokofrekventnih signala sa primara na sekundar transformatora. Međutim, visokofrekventni impulsi još uvek mogu relativno lako proći na sekundarnu stranu potrošača preko kapacitivne veze primar – sekundar, slika 5.21.



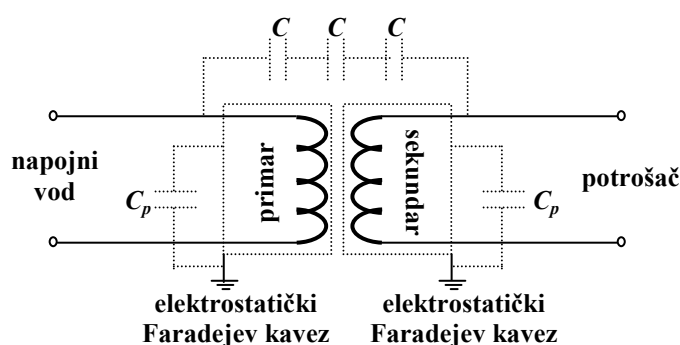
Slika 5.21 - Izolacioni transformator

U vezi sa tim ugrađuju se elektrostatički Faradejevi kavezi, koji umanjuju međunamotajnu kapacitivnost, jer se ponašaju kao da generišu više kapaciteta spojenih u seriji. Na takav način se visokofrekventni impulsi skreću sa puta prema sekundaru na put ka zemlji. Načini proizvodnje

izolacionih transformatora sa jednim ili dva elektrostatička Faradejeva kaveza dati su na slikama 5.22 i 5.23. Postoji i opcija rešenja sa tri Faradejeva kaveza, gde treći kavez sadrži pomenuta dva.



Slika 5.22 - Izolacioni transformator sa jednim Faradejevim kavezom



Slika 5.23 - Izolacioni transformator sa dva Faradejeva kaveza

Ostali načini prigušenja ili eliminisanja tranzijentnih prenapona ili prekostruja su ugradnja predotpora ili primena kontrolisanog uključivanja. Ovo je posebno aplikativno pri uključivanju kondenzatorskih baterija ili uključivanju transformatora.

5.8. Programski paketi za analize tranzijentnih pojava

Standardni programski paketi za analize elektromagnetnih tranzijentnih pojava generalno imaju sličan pristup u modelovanju električnih elemenata. Međutim, razlike postoje u veličinama odgovarajućih biblioteka, gde su pohranjeni elementi, kao i u bibliotekama numeričkih metoda koji izvršavaju simulacije. Svi današnji komercijalni programi, s obzirom na korištene numeričke metode, mogu se podijeliti na dve velike grupe:

- metodi s konstantnim korakom integracije: EMTP-ATP, PSCAD/EMTDC, NETOMAC i
- metodi s promenljivim korakom integracije: MATLAB/Simulink/Power System Blockset, PSPICE, SABER.

U nastavku će se ukratko predstaviti mogućnosti modelovanja u dva najpoznatija programa za analize elektromagnetskih prelaznih pojava: EMTP-ATPa i MATLAB/Simulink/ Power System Blockseta.

5.8.1. EMTP (Electromagnetic Transient Program)

EMTP (*Electromagnetic Transient Program*) je danas zasigurno najrašireniji namjenski program za analize elektromagnetnih prelaznih pojava u elektroenergetskom sistemu. Ovaj program

trenutno ima nekoliko verzija pri čemu je u Evropi najraširenija verzija poznata pod imenom ATP (*Alternative Transient Program*).

ATP je univerzalni program za digitalno simuliranje elektromagnetnih prelaznih pojava. Ovaj programski paket ima naročite karakteristike u vezi broja pohranjenih modela. Program ima grafički korisnički interfejs (*GUI - graphical user interface*) realizovan u okviru grafičkog preprocesora ATPDraw, koji omogućava relativno jednostavnu konstrukciju modela električnih kola. ATP je baziran na aplikaciji implicitnog trapeznog pravila koje diferencijalne jednačine komponenti mreže pretvara u odgovarajuće algebarske jednačine.

Tako, za induktivitet L , uz oznake na slici 5.24.a, struja grane k - m u vremenskom domenu se može izračunati preko relacije:

$$i_{k,m}(t) = i_{k,m}(t - \Delta t) + \frac{1}{L} \int_{t-\Delta t}^t (v_k(\tau) - v_m(\tau)) d\tau \quad (5.8)$$

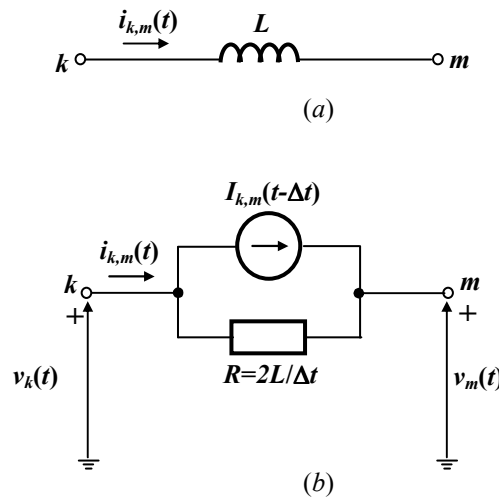
Aproksimacijom integrala u (5.8) trapeznom pravilom, dolazi se do relacije:

$$i_{k,m}(t) = \frac{\Delta t}{2L} [v_k(t) - v_m(t)] + I_{k,m}(t - \Delta t) \quad (5.9)$$

gde je ekvivalentni strujni izvor $I_{k,m}(t - \Delta t)$ poznat iz prethodnog koraka kao:

$$I_{k,m}(t - \Delta t) = i_{k,m}(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{2L} [v_k(t - \Delta t) - v_m(t - \Delta t)] \quad (5.10)$$

Linearni induktivitet se zamenjuje svojim ekvivalentom preko odgovarajućeg otpora R i strujnog izvora I , slika 5.24.b. Ekvivalentni model je tačniji ukoliko je korak integracije Δt manji.



Slika 5.24 - (a) Linearni induktivitet; (b) ekvivalentni model

Analogno se formiraju ekvivalentni za kapacitet i otpor. Finalno se za linearne mreže sa n čvorova realizuje metoda napona čvorova u matričnoj formi:

$$[G][v(t)] = [i(t)] - [I] \quad (5.11)$$

gde su:

- $[G]$ - matrica provodnosti čvorova, konstantna i simetrična, formata nxn
- $[v(t)]$ - vektor napona čvorova u trenutku t , formata $nx1$
- $[i(t)]$ - vektor injektiranih struja u čvorove u trenutku t , formata $nx1$
- $[I]$ - poznati vektor generisan poznatim ekvivalentnim strujnim izvorima, formata $nx1$.

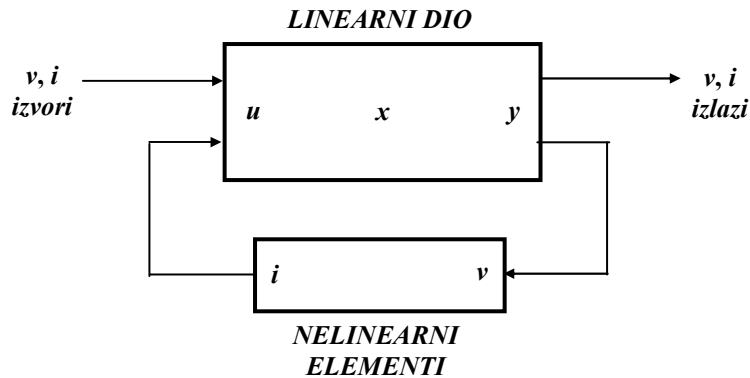
Linearne matrične jednačine se rešavaju po nepoznatom vektoru $[v(t)]$, uglavnom Gausovim algoritmom ili triangularnom faktorizacijom matrice $[G]$.

Nelinearni elementi u okviru EMTP-a se modeluju na dva osnovna načina: linearizacijom deo po deo nelinearne krive ili pak direktnom nelinearnom analitičkom funkcijom. Tako se nelinearni induktiviteti u okviru ovog programa lineariziraju po segmentima, dok se nelinearni otpori predstavljaju analitičkim nelinearnim funkcijama. Pri predstavljanju nelinearnog otpora direktnom nelinearnom funkcijom npr. $v_{k,m}(t) = f(i_{k,m}, t)$ u okviru ovog programa koriste se kompenzacione metode.

5.8.2. *MATLAB/Simulink/Power System Blockset*

MATLAB/Simulink/Power System Blockset (PSB) je programski paket za modelovanje, simuliranje i analizu elektroenergetskih dinamičkih sistema u okviru poznatog alata MATLAB. Paket podupire linearne i nelinearne sisteme modelirane u kontinualnom vremenu ili diskretnim vremenskim trenucima, ili pak na oba načina. PSB sadrži sveobuhvatnu blok-biblioteku izvora, linearnih i nelinearnih elemenata, konektora te pratećih blok podsistema. Modeli se izgrađuju po hijerarhijskom principu. Sistem sa može videti sa najvišeg nivoa gde ulazeći u pojedine blokove tj. smanjujući nivo, razaznaju se detalji istih. Ovaj pristup daje uvid u način organizovanja modela i opis interakcije njegovih pojedinih dijelova. Na osnovu izgrađenog modela u simulacionom paketu se formiraju odgovarajuće diferencijalne i diferentne jednačine u *MATLAB* ili *C* jeziku. Nakon odabranih integracionih metoda simulacija se pokreće sa odgovarajućeg PSB menija ili sa komandnog prozora *MATLAB/Command Window*. Rezultate simulacija je moguće pratiti u toku izvršenja simulacije. Takođe, još u toku izvršenja mogu se menjati parametri modela i trenutno pratiti eventualne promene u toku izvršenja. Simulacioni rezultati se pohranjuju u *MATLAB/Workspace* za post-procesiranje, analizu i vizualizaciju. Svi demo modeli prezentirani u PSB-u utemeljeni su na dugogodišnjem iskustvu “*Power System Testing*” i “*Simulation Laboratory*” Hydro-Quebec, velikog elektroenergetskog postrojenja lociranog u Kanadi. S druge strane, razvijeni matematički aparat rezultat je dugogodišnjeg rada najmoćnije svjetske programske kuće ovog tipa “*The MathWorks*” SAD.

U okviru PSB-a model električnog sistema je predstavljen u dva osnovna dijela: model u prostoru stanja za linearni dio električnog kola i model povratne veze (koji koristi model strujnih izvora) za nelinearne elemente. Svaki blok u okviru PSB elemenata ima tri generalne karakteristike: u -vektor ulaza, y -vektor izlaza i x -vektor varijabli stanja, slika 5.25. Ulazne veličine determinišu naponski i strujni izvori, dok su izlazne veličine mereni naponi i struje. Nelinearni elementi kao što su transformator ili odvodnik prenapona, prekidači, itd. se modeluju nelinearnom funkcijom $\varphi(v,i)=0$. Svaki nelinearni element koristi napon na njegovim krajevima kao ulaznu veličinu povratne veze, te na osnovu toga, daje informaciju o struji kao izlaznoj veličini povratne veze koja se zatim injektira u linearni dio kola.



Slika 5.25 - PSB blok model nastao korištenjem prostora stanja i povratne veze

Budući da PSB radi u MATLAB/Simulink okruženju svaki njegov blok se automatski prevodi u odgovarajuću sistemsku funkciju tkzv. *S*-funkciju. Pojedinačni *PSB* blokovi, odnosno odgovarajuće *S*-funkcije, se potom povezuju generišući na kraju *S*-funkciju celog sistema. *S*-funkcije se zapisuju kao MATLAB *M*-fajovi, gde su pohranjene sve relevantne informacije o modelu. Specijalnom sintaksom pozivnih funkcija izgrađena je interakcija *M*-filea i izabranog numeričkog postupka *ODE* (*ordinary differential equations*) solvera, koji rešava postavljeni zadatak.

MATLAB/Simulink, a samim time i PSB, imaju veoma bogatu biblioteku numeričkih solvera. Također, PSB ima velike mogućnosti postprocesiranja, budući da ima linkove sa ostalim *toolbox*ima, kao što su *PDE* (*partial differential equations*) *toolbox*, *Image Processing toolbox*, *DATAFUN* (*data analysis and Fourier transformation*) *toolbox*, *SPLINE toolbox* itd.

Na kraju treba istaći da oba programska paketa, svaki na svoj način, imaju jasne komparativne prednosti: EMTP-ATP je superioran u pogledu broja i sofisticiranosti modela, dok je MATLAB/Simulink/PSB jasno dominantan u pogledu izbora numeričkih solvera, kao i u pogledu postprocesiranja. Ipak i jedan i drugi program imaju niz lokalnih limitirajućih faktora (npr. ograničenja pri modeliranju elemenata), te neke negativne efekte nastale kao posledice izgradnje i funkcionisanja samog programa (npr. efekat numeričkih oscilacija u oba programa, efekat numeričke nestabilnosti u oba programa, “overshooting” kod EMTP-ATP-a, algebarska petlja kod MATLAB/PSB-a) itd.

5.9. Literatura

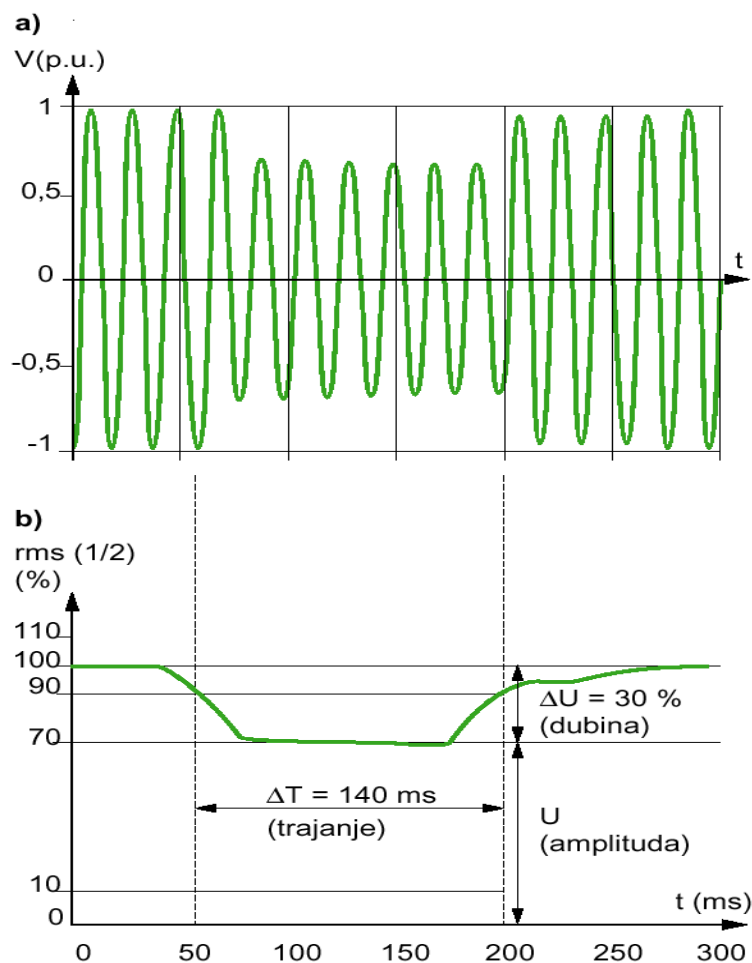
1. R. Dugan, M. McGranaghan, W. Beaty: “*Electric Power System Quality*”, McGraw Hill, New York, 1996.
2. L. Čalasan, M. Petkowska: „*MATLAB i dodatni moduli Control System Toolbox i Simulink*“, Mikro knjiga, Beograd, 1995.
3. P. Hase: “*Overvoltage protection of low voltage systems*”, IEE Power Eng. Series 33, IEE, London, 2000.
4. B. Guru, H. Hiziroglu: “*Electric Machinery and Transformers*”, 3rd Ed., Oxford University Press, Oxford, 2001.

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.

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, regulatori brzine, robotika) je tim osetljivija na propade napona, što se složenost opreme povećava i što je oprema uključena u osetljivije procese. Čak su i releji i kontaktori za startovanje motora osetljivi na propade napona, te svojim ispadom mogu izazvati prekid procesa.

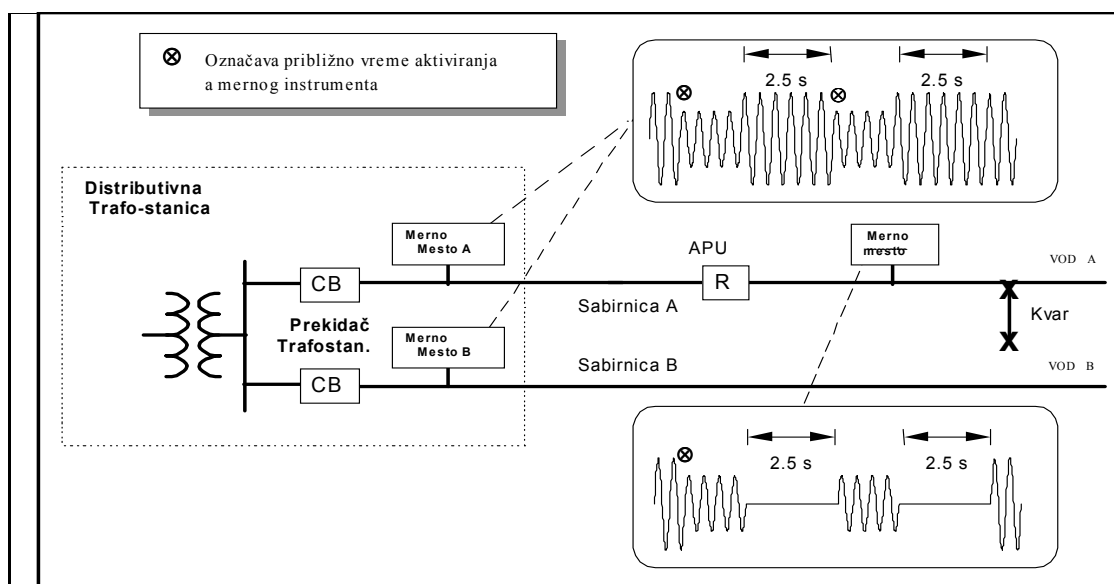


Slika 6.1 – a) Vremenski oblik napona tokom propada, b) Karakteristični parametri propada napona.

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 tridridaset 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 uključenje (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.

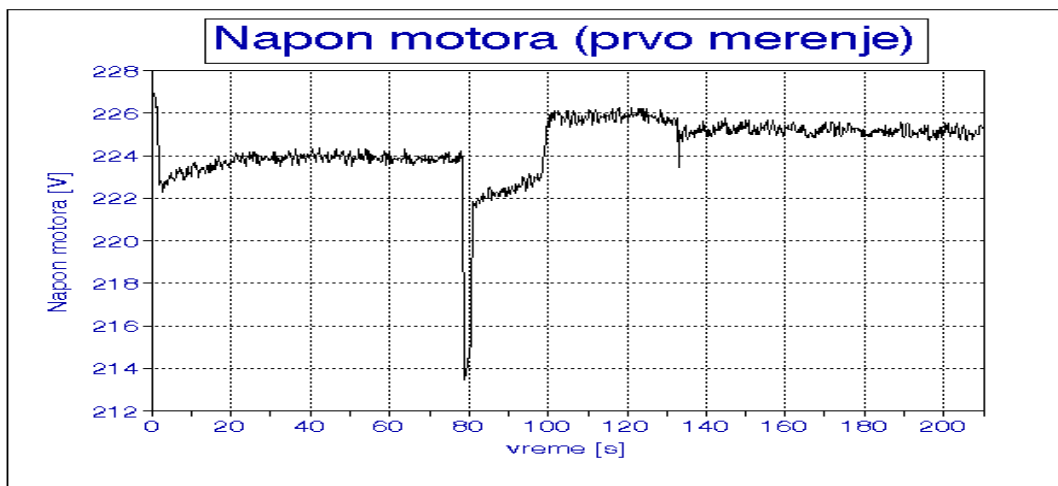
Iako distributeri preduzimaju određene mere da bi sprečili kvarove u električnoj mreži oni se ne mogu u potpunosti eliminisati. Često su ti kvarovi privremeni, što znači da prestaju nakon što se izvrši isključenje i ponovno uključenje odgovarajućih prekidača (APU = automatski ponovni uklop). Na primer,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

Velika složenost savremenih elektromotornih 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 katalogima proizvođača kontaktora ili ne navode podaci o opsegu napona napajanja ili se navodi da je taj opseg od 0.85 do 1.1 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

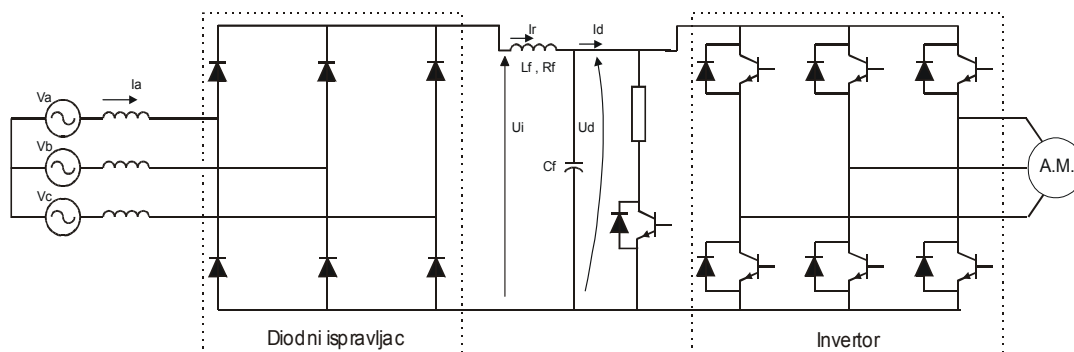
Kontrolna elektronika se uglavnom sastoji od mikrokontrolera i PLC-a, koji su i najosetljiviji na propade napona. Za ove uređaje postoje standardi ITIC (Information Technology Industry Council) i CBEMA (Computer Business Equipment Manufacturers Association). Ovih standarda se uglavnom pridržavaju svi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

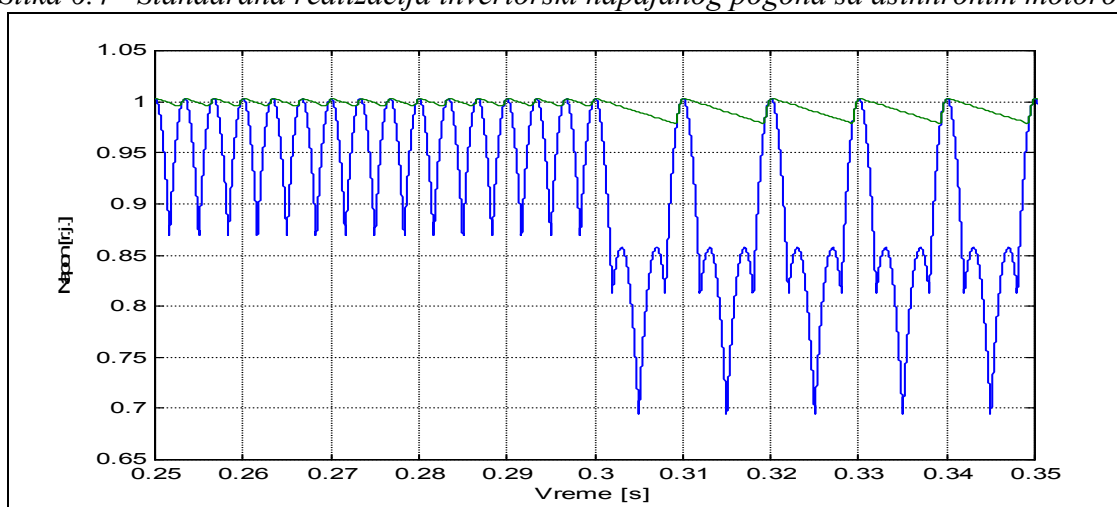
6.2.3. Pretvarači energetske elektronike

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 napajanoj 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

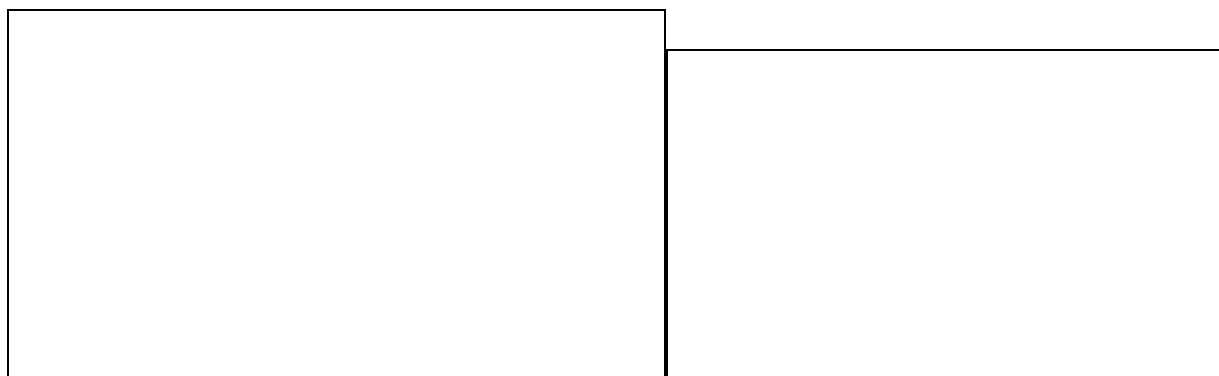
Pojava propada napona u elektroenergetskom sistemu je neminovnost, koja se ne može izbeći. Zato je potrebno u najvećoj mogućoj meri istražiti njihov uticaj na razne vrste električnih uređaja. Takođe je potrebno istražiti mogućnost predviđanja pojave naponskih propada na osnovu podataka dobijenih dugogodišnjim praćenjem njihovog pojavljivanja u određenim delovima

elektroenergetskog sistema. Ovi naponski propadi znatno utiču na pravilan rad elektromotornih pogona i mogu da nanese 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].

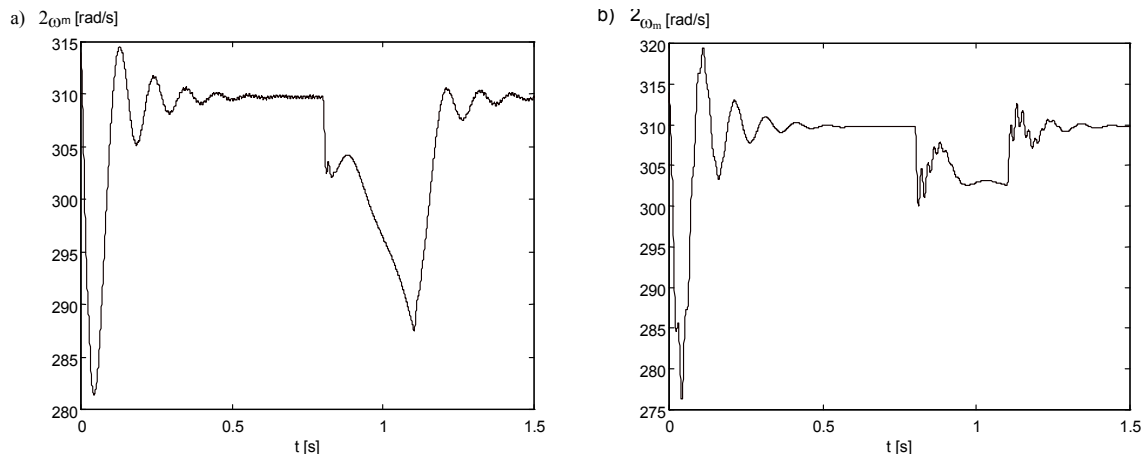
Pri pojavi propada napona (u sve tri faze istovremeno) od 15% i trajanja 500 ms dolazi do opadanja brzine motora, odnosno do povećanja struje, koju motor vuče iz mreže. Ovaj zaključak je dobijen na bazi istraživanja dva tipa elektromotornih pogona: sa indirektnom (regulisani) i sa direktnom konfiguracijom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



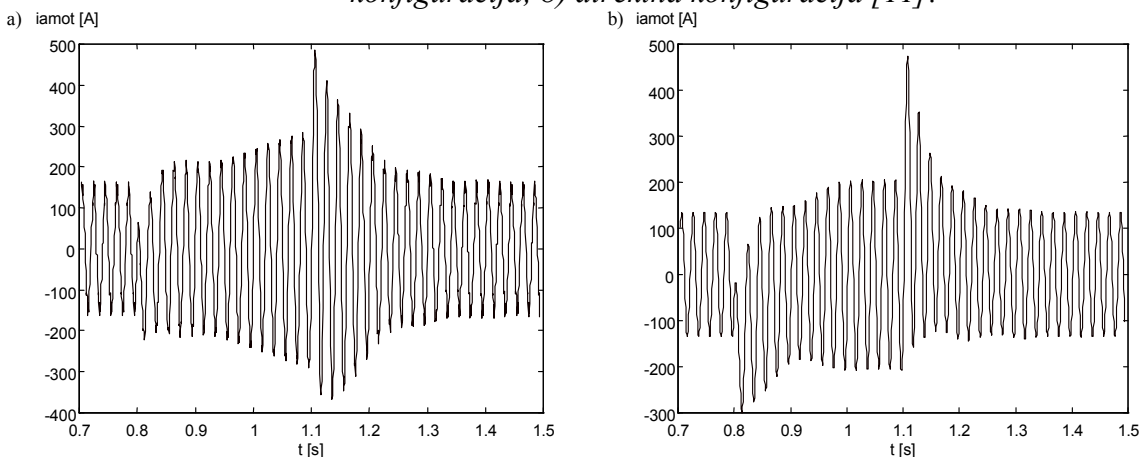
Slika 6.6 - Pogon sa asinhronim motorom: a) indirektna konfiguracija; b) direktna konfiguracija.

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, tzv. 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.

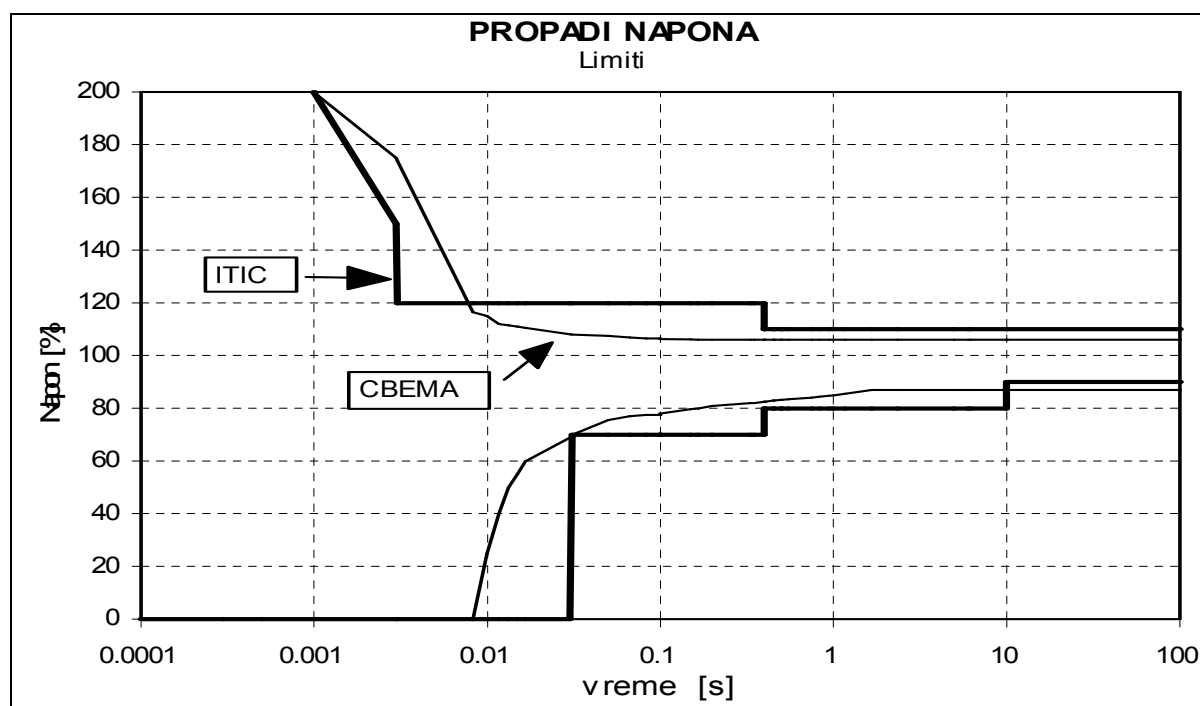
Pored intenziteta i trajanja propada, kao mera kvaliteta, definiše se i učestanost pojavljivanja preko $SARFI_x$ indeksa (System Average RMS (Variation) Frequency Index) [16]. $SARFI_x$ reprezentuje prosečan broj definisanih propada ili poskoka efektivne vrednosti napona trajanja između 10 ms i 1 min,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

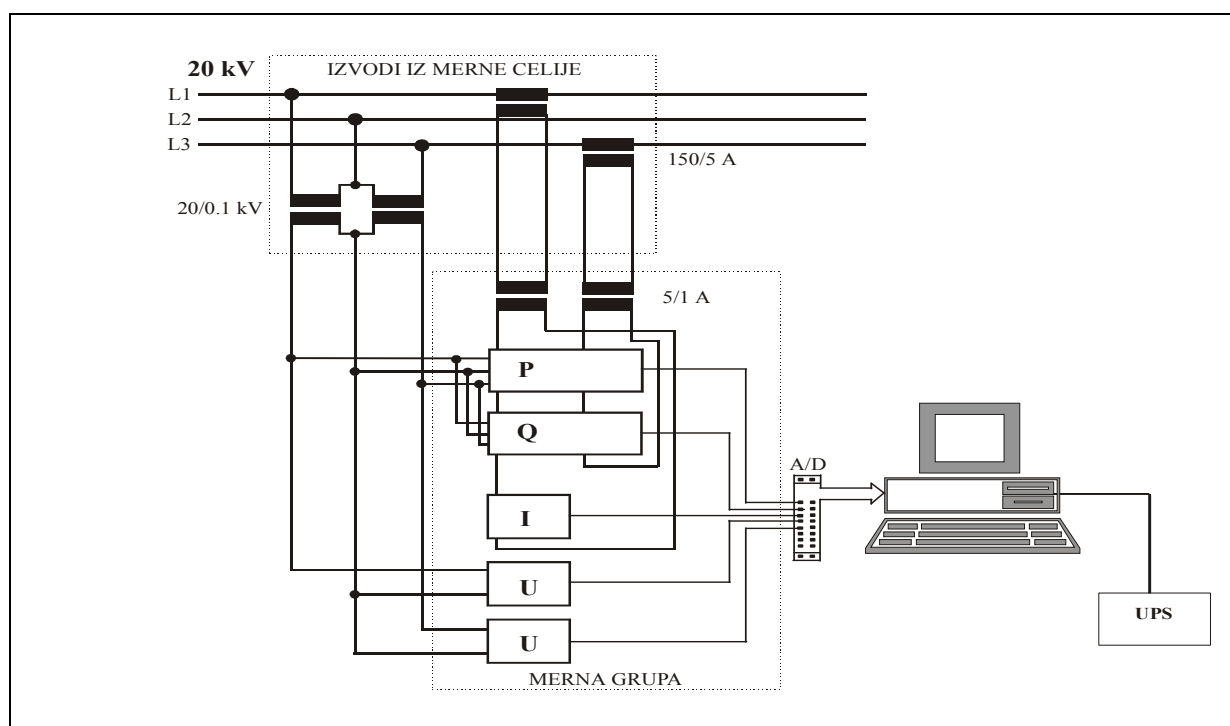
6.4. Merenje i snimanje propada i poskoka napona

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.

6.4.1. 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 razvijem 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,

6.4.2. 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:

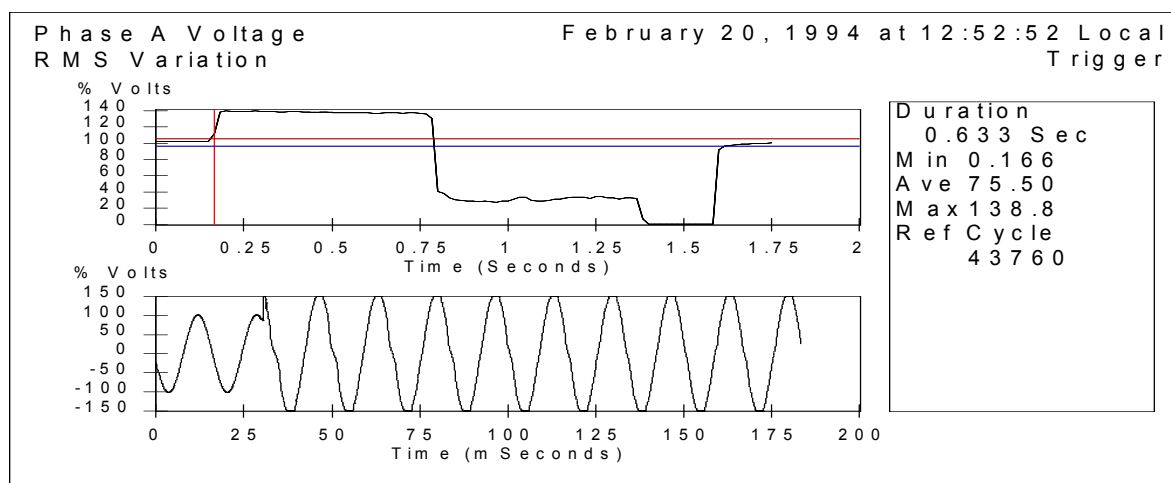
1. kontinualni vremenski prikaz
2. diskretni vremenski prikaz, i
3. statistički prikaz i analiza.

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.

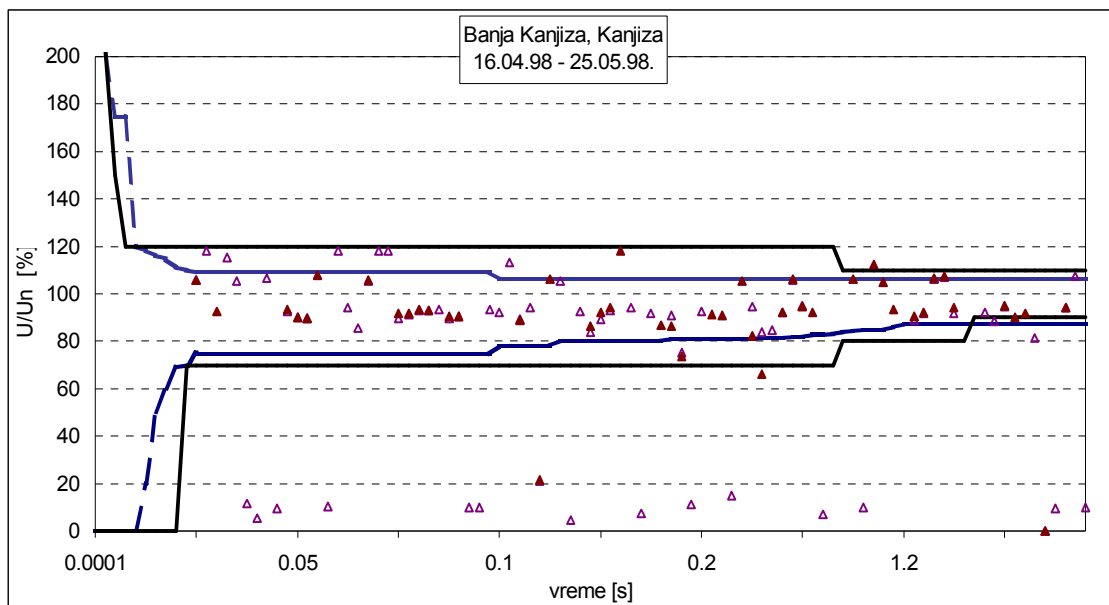
Na slici 6.11 dat je primer kontinualnog vremenskog prikaza sa dijagramima u oba oblika iz [1]. Karakterizacija pojave je data kroz dužinu trajanja propada i minimalnu, srednju i maksimalnu vrednost napona tokom propada. U suštini, na slici je prikazana jedna situacija, gde se prvo javlja poskok (premašenje)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



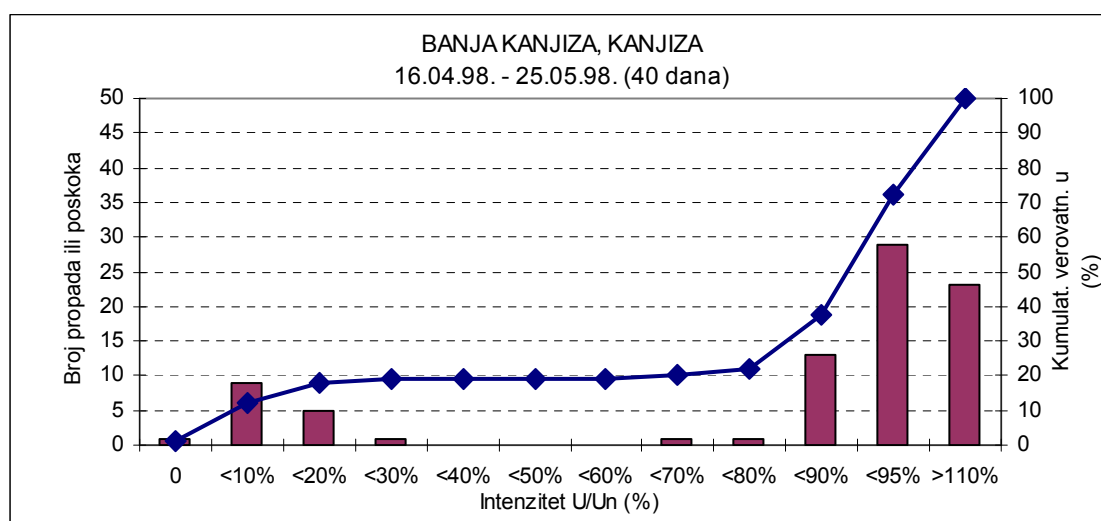
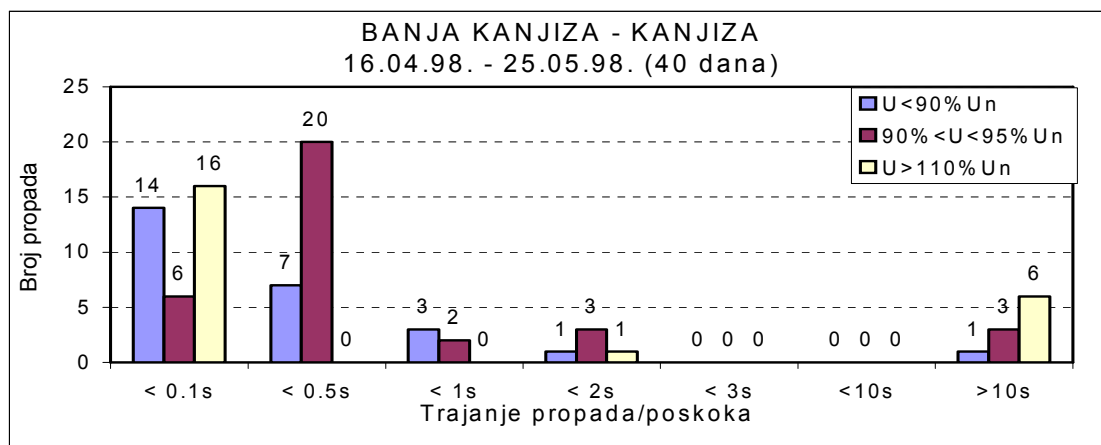
Slika 6.12 – Propadi napona u Banji Kanjiža.

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.

6.5. 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 limiti 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. U nastavku će biti prikazani neki rezultati merenja u različitim industrijskim granama i pogonima u Vojvodini sa opisom realnih problema usled pojave propada napona.

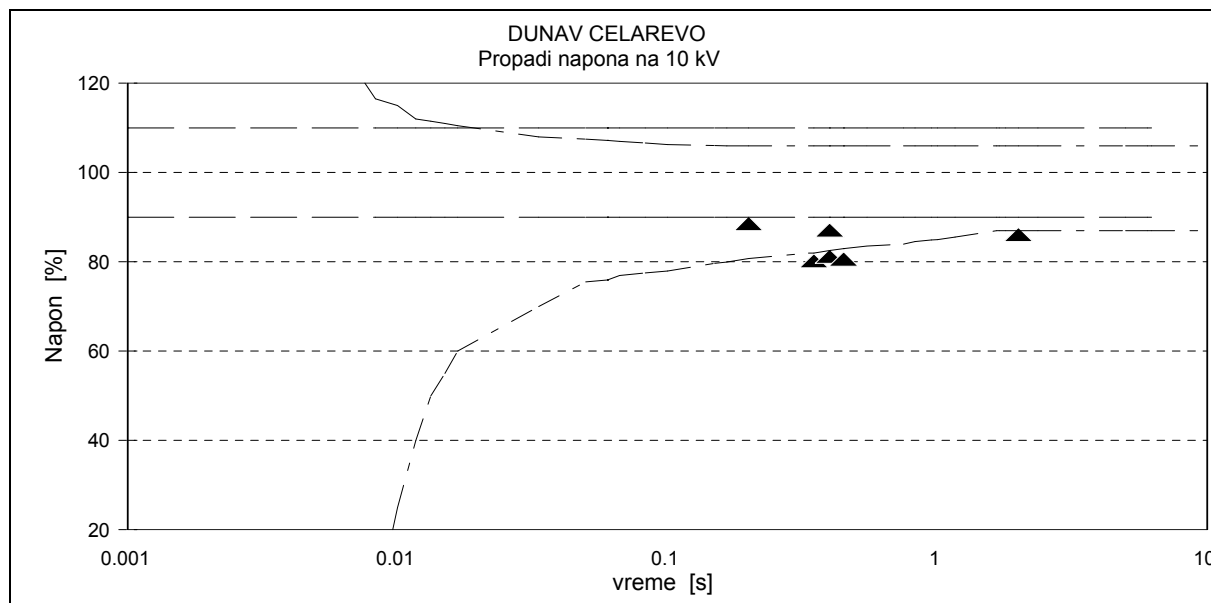


Slika 6.13 – Banja Kanjiža, Kanjiža: Statistika broja propada u odnosu na dužinu trajanja (gore), Statistika broja propada u odnosu na intenzitet propada (dole).

6.5.1. Tekstilna industrija

Tekstilna industrija je veoma osetljiva na propade napona, jer se u jednom veoma složenom procesu upliću niti sa većeg broja različitih vretena i formira tkanje, koje se zatim preko sistema valjaka namotava na kalem. Pri tome je moguće da u pogonu radi više desetina ovakvih visoko automatizovanih razboja. Svaki poremećaj u napajanju, može da dovede do otkazivanja kompleksnog elektromotornog pogona, koji je upravljani nekim digitalnim mikro-elektronskim sklopom (mikroprocesor, PLC ili sl.) sa složenim algoritmom rada (na primer: reagovanja podnaponske zaštite). Ovakav otkaz dovodi do prekida proizvodnje, pojave škarta, a za ponovno pokretanje proizvodnje potrebno je više sati. Nesumljive su velike ekonomske štete od jednog, izuzetno kratkog poremećaja u napajanju, kakav je propad napona.

Ovakve probleme, koji su bili pojačani činjenicom da se u pogonu proizvode tkanja od plastičnih vlakana za vreće za pakovanje poljoprivrednih proizvoda, prijavili su u tekstilnom kombinatu «Dunav» iz Čelareva. Problem je bio izraženiji zbog toga što je postupak otklanjanja posledica propada obuhvatao i čišćenje mašine za izvlačenje veoma finih plastičnih vlakana iz otopljenog granulata na čijem kraju se dobijala namotana vretena za razboj. Merenja su vršena u periodu avgust – septembar 1995. godine (slika 6.14). Zabeleženo je samo šest propada napona ispod granice 90% Un, s tim da su 4 bila ispod CBEMA limita. Kako se ovo poklopilo sa izveštajima iz pogona o otkazima, tj. prekidima proizvodnje, ovo je bilo ozbiljna indikacija o niskom nivou kvaliteta napajanja fabrike. Kasnije je utvrđeno da problem nastaje zbog čestih kvarova na 110 kV dalekovodu sa kojim se napaja Čelarevo.



Slika 6.14 - Propadi napona na 10 kV sabirnici tekstilnog kombinata "Dunav" Čelarevo (avg.-sep. 1995.).

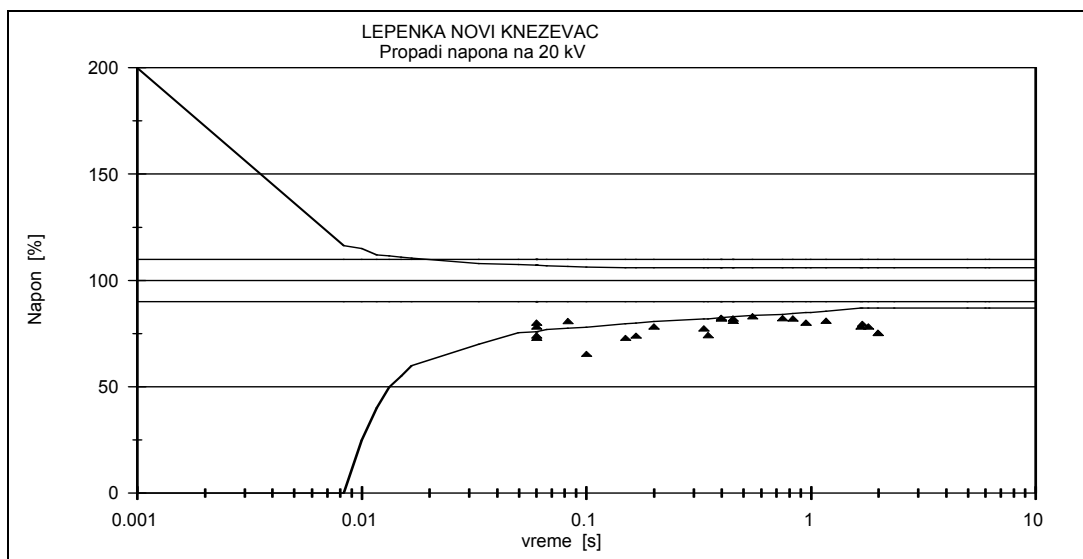
6.5.2. Industrija papira i kartona

Slični problemi se mogu javiti i u industriji papira i kartona, gde proces proizvodnje obuhvata jedinstvenu proizvodnu liniju, čija dužina može biti i više od 100 metara. Savremeni elektromotorni pogoni sa više desetina motora (najčešće, naizmenični pogon regulisan sa frekventnim pretvaračima sa vektorskim upravljanjem), koji pokreću veliki broj različitih valjaka za obradu papira/kartona od sirovine do finalnog proizvoda, veoma su osetljivi na kvalitet napajanja.

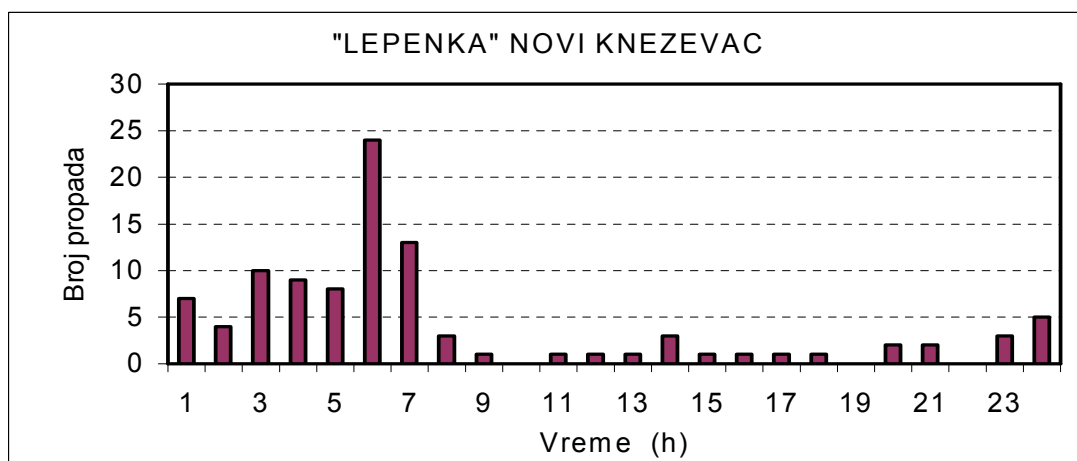
Primer iz fabrike «Lepenka» iz Novog Kneževca, gde je vršeno merenje, se odnosi na proizvodnju kartonske ambalaže (lepenka), a rezultati merenja predstavljeni su na slici 6.15. Snimanje je vršeno u intervalu od 45 dana i tada je uočeno 139 propada napona van opsega $\pm 5\%$ U_n , za koji je bila deklarirana proizvođačka tolerancija varijacija napona mreže za napajanje elektromotornog pogona. Rezultati merenja su pokazali da je veliki broj propada zabeležen i ispod granice od $90\% U_n$ ($-10\% U_n$), od kojih su nekoliko bili duži od 1 sekunde, što je bio nesumljiv uzrok ispada. Upoređenjem sa zapisima iz pogona, utvrđeno je da propadi van CBEMA krivih tolerancije izazivaju prekide u radu pogona.

Da bi se bolje sagledali rezultati merenja, iskorišćen je statistički prikaz (slika 6.16). Na slici 6.16.a prikazan je prosečan broj poremećaja ispod $95\% U_n$ u toku jednog dana. Može se uočiti da je najveći broj poremećaja u jutarnjim satima. To ukazuje da jedan od uzroka može biti zaprljanost izolatora, koji su u jutarnjim časovima i ovlašeni usled kondenzacije, pa dolazi do kratkotrajnih proboja. Ovi proboji mogu aktivirati i brze APU, pa se mogu dešavati ranije opisane situacije.

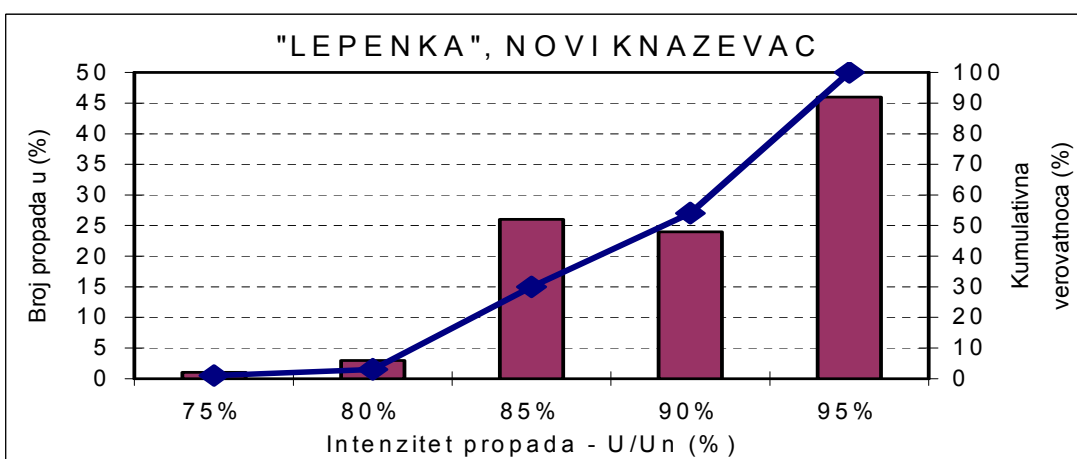
Na slici 6.16.b dat je procentualni broj poremećaja u zavisnosti od nivoa propada napona. Pokazuje se da je kod otprilike 45% poremećaja propad napona bio u granicama do $-10\% U_n$, dok je veći broj poremećaja (oko 55%) je izvan dozvoljenog opsega.



Slika 6.15 - Propadi napona na 20 kV sabirnici u fabrici "Lepenka" Novi Kneževac (sept.-okt. 1995.).



a)



b)

Slika 6.16 - "Lepenka", Novi Kneževac: a) Statistika broja propada u toku dana, b) Statistika broja propada u odnosu na intenzitet propada.

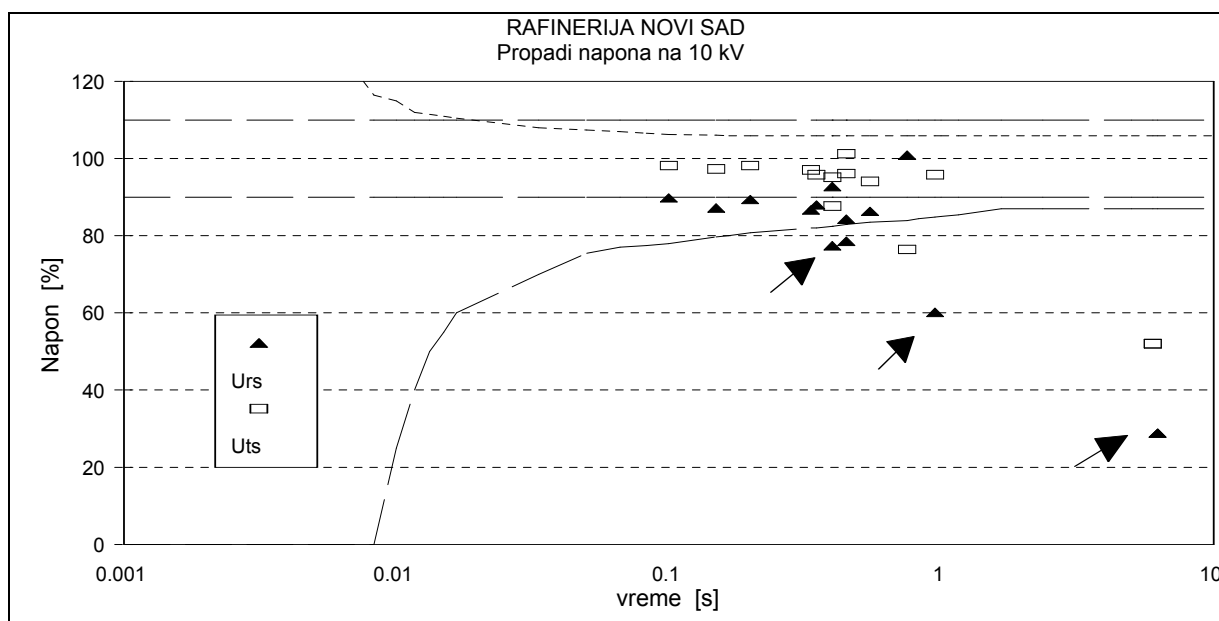
6.5.3. Naftna industrija

Naftna industrija je karakteristična za područje Vojvodine, jer se tu nalaze proizvodni pogoni, transporni sistem (naftovodi) i postrojenja za preradu (rafinerije nafte), kao i sistemi za distribuciju i prodaju nafte i njenih derivata. U svim ovim delovima nalaze se složeni i veoma brojni

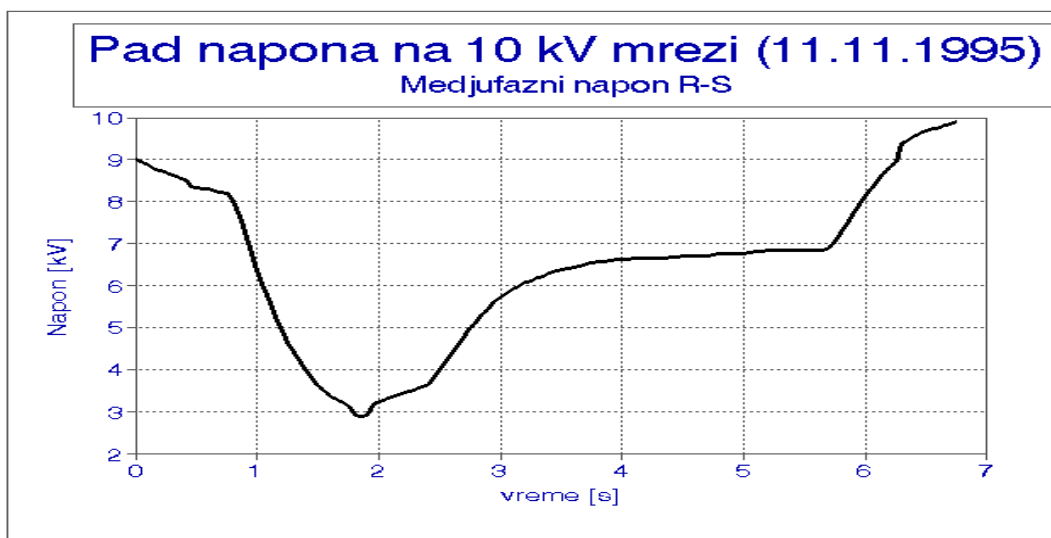
bilo regulisani, bilo neregulisani elektromotorni pogoni sa velikim brojem motornih jedinica. Na primer, samo u Rafineriji nafte «Novi Sad» nalazi se oko 1300 raznih motora razmeštenih na više desetina hektara u raznim procesnim celinama. Zbog ovakve velike koncentracije motora i potrebe da se svaki štiti od podnapona, ovakva postrojenja su osetljiva na naponske prilike i obično imaju posebno sigurne sisteme napajanja iz elektroenergetske mreže.

Međutim, upravo u Rafineriji nafte «Novi Sad» su primećeni problemi za koje je posumljano da su vezani za nedovoljan kvalitet napajanja. Zbog toga je u periodu od oktobar – decembar 1995. godine izvršeno merenje naponskih prilika u trafo-stanici “Kotlarnica” 10kV/0,4kV, koja se nalazi u krugu rafinerije i to na 10kV strani. Merene su efektivne vrednosti međufaznih napona Urs i Ust i pri tome memorisane vrednosti koje su odstupale više od $\pm 10\%$ Un. U tim slučajevima je registrovan vremenski dijagram promene efektivne vrednosti, do povratka napona u dozvoljene okvire. Dobijeni podaci su upoređeni sa podacima dežurnih ekipa u pogonima.

Registrovano je 13 propada napona trajanja od 0,1 do 6,25 sekundi, s tim da je najčešće trajanje bilo od 100 do 500 ms. Na slici 6.17 prikazani rezultati merenja zajedno sa CBEMA krivama. Pogon se uglavnom sastoji od asinhronih motora bez regulacije brzine. Na osnovu obaveštenja iz Rafinerije, u tri slučaja je u posmatranom periodu registrovan prekid rada pogona izazvan proradom zaštite. Na slici 6.17 strelicama su označeni ovi slučajevi. Tok napona tokom jednog od ovih propada prikazan je na slici 6.18. Uočavaju se tri dela: nagli pad, kratkotrajno ustaljenje na nešto nižoj vrednosti i konačno povratak na nominalni napon. Ovaj oblik je karakterističan, bez obzira da li propad traje par stotina mili sekundi ili nekoliko sekundi.

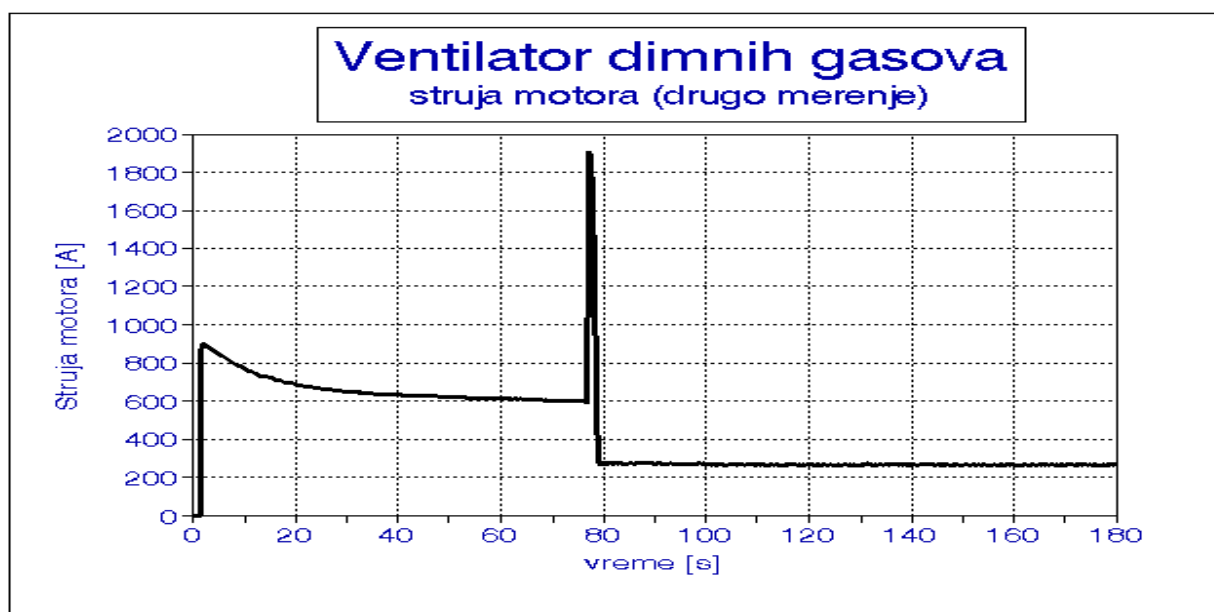


Slika 6.17 - Propadi napona na 10 kV sabirnici u Rafineriji Novi Sad (okt-dec. 1995.).

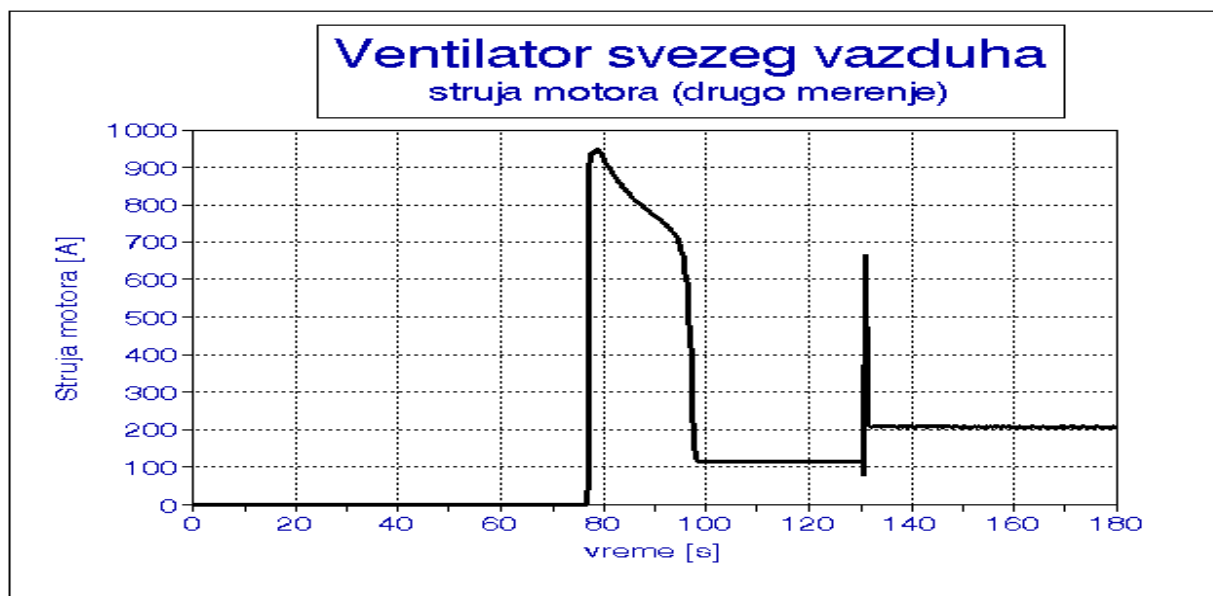


Slika 6.18 - Snimak propada napona na sabirnicama 10 kV.

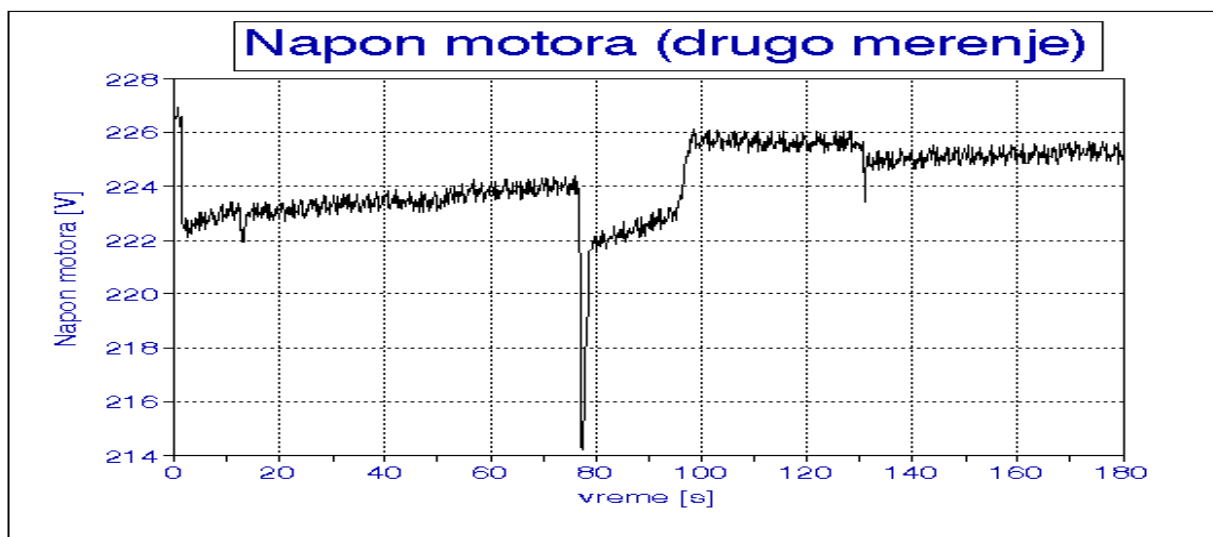
Za stanje kvaliteta električne energije u rafineriji karakteristično je da poremećaji mogu da dođu ne samo sa strane mreže, nego i iz same rafinerije. To je posledica postojanja i primene veoma snažnih elektromotornih pogona, koji prilikom startovanja povlače velike struje iz mreže. Kao posledica toga dolazi do pojave propada napona, koji u zavisnosti od stanja u mreži, može da izazove i otkaze u samom postrojenju. Na slici 6.19 dat je prikaz snimljene pojave na niskonaponskoj sabirnici pri startovanju asinhronih motora snage 315kW (ventilator dimnih gasova) i 200kW (ventilator svežeg vazduha). Vidi se da oba motora startuju pomoću automatske preklopke zvezda/trougao i da pri tome povlače visoke pikove struje (slike 6.19.a i 6.19.b). U tim trenucima dolazi do izrazitih propada napona, koji idu do -5% nominalnog (slika 6.19.c).



a)



b)



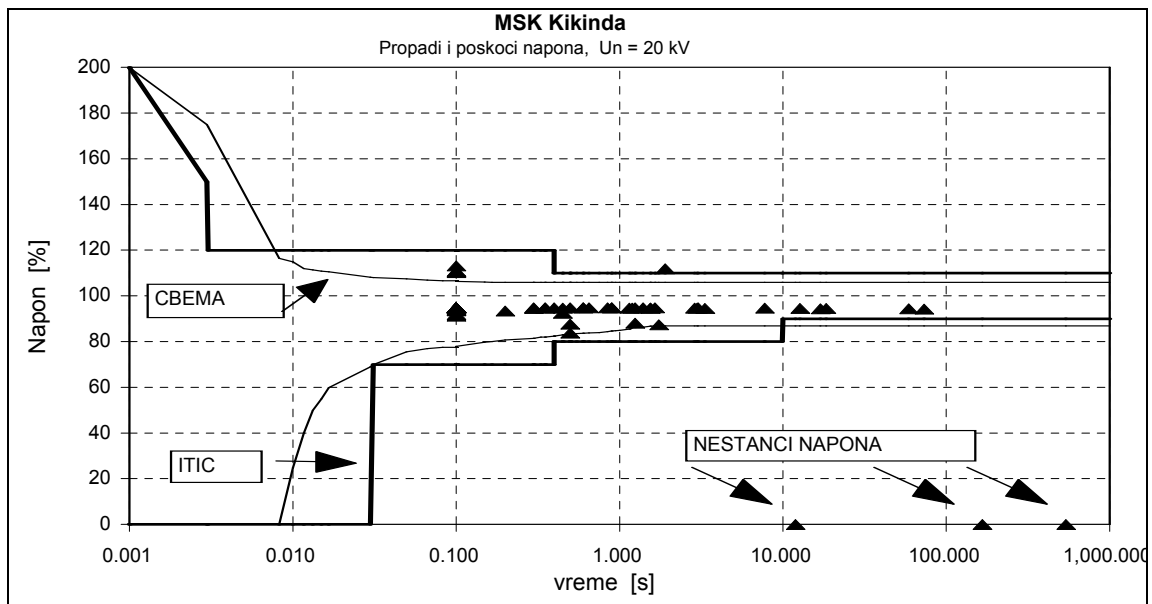
c)

Slika 6.19 - Rezultati merenja struje i napona pri startovanju velikih e.m.p. struja motora 315 kW, b) struja motora 200 kW, c) napon na priključnim sabirnicama.

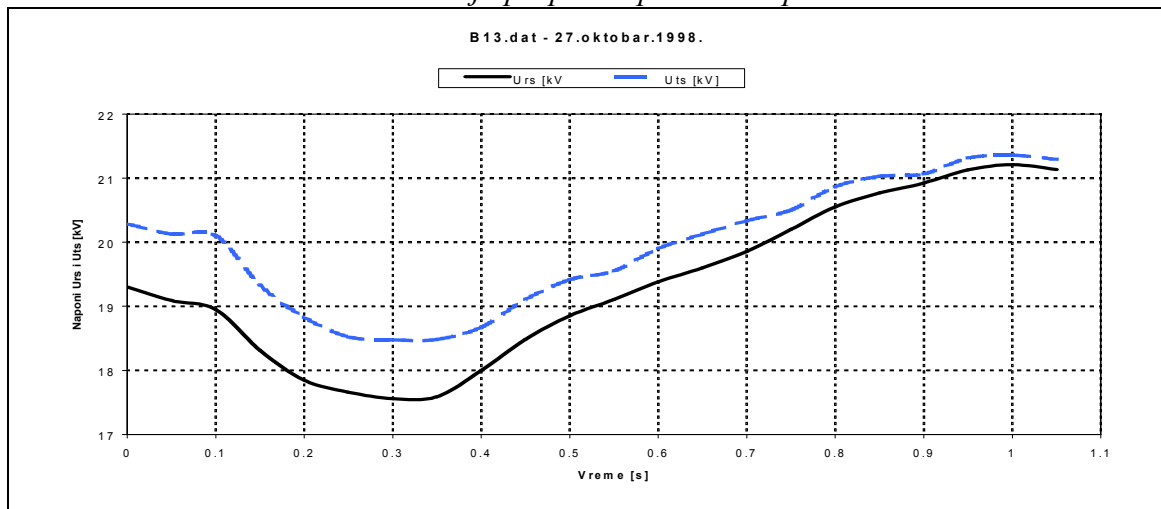
6.5.4. Procesna industrija

U velikom broju industrijskih pogona obavljaju se složeni tehnološki procesi, koji zahtevaju stabilno i pouzdano napajanje, kao i kvalitetan napon. Odstupanje od osnovnih parametara dovodi ne samo do otkazivanja u radu električnih uređaja, nego i do pojave lošijeg kvaliteta proizvoda i u slučajevima kada električna oprema nije otkazala (na primer: niža temperatura grejača, manja brzina elektro-motora i sl.).

Zbog pomenute osetljivosti kvaliteta proizvodnje na parametre električne energije u Metalno-sirćetnom kombinatu (MSK) u Kikindi izvršen je niz merenja na 20 kV sabirnicama sa kojih se napaja celo postrojenje. Rezultati merenja su ukazali da se javlja veliki broj propada, ali da je većina od njih unutar CBEMA i ITIC krivih (slika 6.20). Na slici 6.21 prikazan je tok jednog propada napona predstavljen sa dva međufazna napona, koji je po obliku karakterističan za ovaj tip industrijskog postrojenja. Pored propada napona, povremeno se javljaju i kratke beznaponske pauze, koje su svakako uzrok otkaza u postrojenju.



Slika 6.20 – Rezultati merenja propada i poskoka napona u MSK Kikinda.

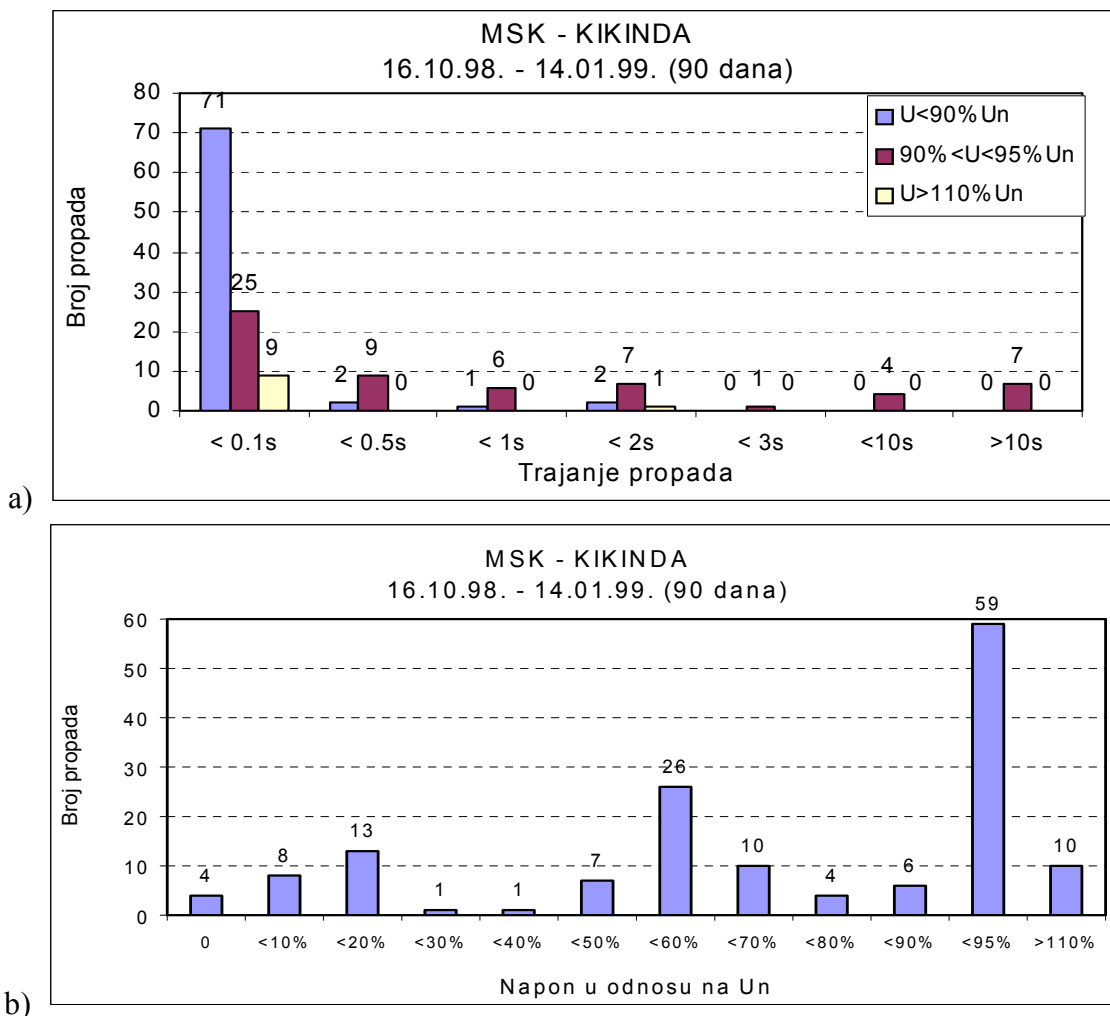


Slika 6.21 - Snimak propada napona na sabirnicama 20 kV.

Prilikom merenja uočen je i veliki broj kratkotrajnih propada manje i veće dubine, pa je napravljena statistička analiza. U statističkom prikazu (slika 6.22) uočava se ovaj veliki broj. Ova pojava nije karakteristična za mrežu, već je posledica upravljanja celokupnog elektro-energetskog sistema u tom periodu. Tada su na snazi bile tkz. naponske redukcije, odnosno da bi se održala stabilnost sistema, nominalni napon je spušten za 5-10%.

6.5.5. Turistički kompleks

U turističkoj “industriji” nema složenih elektromotornih pogona ili drugih velikih električnih uređaja, koji bi bili osetljivi na kvalitet napajanja. Međutim, ipak i ovaj kompleks veoma zavisi od stanja u mreži. U velikim hotelima, banjskim lečilištima ili drugim sličnim turističkim objektima nalazi se veliki broj malih uređaja i opreme od kojih značajno zavisi kvalitet boravka gostiju. To su najčešće video i audio uređaji, TV prijemnici, PC i druga računarski bazirana oprema. U lečilištima, tu spadaju i skupi medicinski instrumenti i oprema, pa i oprema za laboratorijska ispitivanja i provere. Pored toga, veoma važan je i pravilan rad sistema za prečišćavanje vode, tople vode i grejanja, klimatizacije i dr.



Slika 6.22 – MSK Kikinda: a) Statistika broja propada u odnosu na dužinu trajanja, b) Statistika broja propada u odnosu na dubinu propada.

Banjski kompleks Banje Kanjiža je probleme osjetio u svom računarskom centru u kom se stiču podaci ne samo o boravku gostiju, nego i o njihovom medicinskom tretmanu i progresu lečenja. Računari su se često resetovali, pa su se na taj način gubile ili morale ponovo unositi značajne informacije. Rezultati merenja obrađeni u diskretnom (slika 6.12) i statističkom prikazu (slika 6.13) su pokazali da u mreži ima veliki broj poremećaja ovog tipa i da su oni uzrok pomenutih problema.

6.6. Rešavanje problema propada napona

Propadi postaju problem za industriju zbog sve više automatike i elektronskih kontrolera, koji se u industriji koriste. Posledica je otkazivanje ove opreme, ali i u problemima ponovnog startovanja proizvodnje. Automatizovana oprema nije jednostavna za restartovanje, a često i deo proizvoda mora da se odbaci kao škart. Problemi se javljaju i u drugim sektorima, gde se sve više koristi PC i druga računarska oprema, pa i u domaćinstvima.

Uzrok propada u distributivnoj ili prenosnoj mreži su zemljospojevi i trofazni kvarovi, dok kod potrošača startovanje velikih motora ili priključenje velikih opterećenja. Procena uslova za kvar u distributivnoj i prenosnoj električnoj mreži može se koristiti za predviđanje propada koji se javljaju kod korisnika.

Da bi se broj propada, a time i problemi koje oni prouzrokuju smanjili neophodno je merenje, snimanje i praćenje ovih pojava u električnoj mreži duži vremenski period (bar 30 dana). Tom prilikom se dobija veliki broj podataka, pa se prikaz i obrada rezultata može vršiti u obliku kontinualnih vremenskih prikaza, diskretnih vremenskih prikaza i statističke analize.

Za analizu pojedinačnih propada, najpogodniji oblik je kontinualni vremenski prikaz, na osnovu kog se mogu dobiti bitni parametri propada, kao i pretpostaviti verovatak uzrok.

Diskretni vremenski prikaz služi za poređenje rezultata merenja sa propisanim graničnim vrednostima – CBEMA i ITIC krive. Na bazi toga se može proceniti potencijalna opasnost od ispada računarskih sistema ili industrijskih pogona i procesa.

Statistički prikaz je pogodan za dalju analizu, utvrđivanje i lociranje uzroka propada ili poskoka, a potom za preduzimanje odgovarajućih mera za smanjivanje ili eliminisanje njihovog uticaja.

Utvrđivanjem stanja i uzroka propada napona mogu se projektovati i mere za njihovo otklanjanje.

Pojedinačni računari, računarski sistemi i mreže mogu se danas uspešno zaštititi od propada napona primenom sistema besprekidnog napajanja (UPS – Uninterruptible Power Supply). Ovi sistemi se široko komercijalno proizvode i u zavisnosti od modela i veličine akumulatorskih baterija, obezbeđuju kvalitetno napajanje od 15 min do više sati. Oni su stalno uključeni, te pored osiguravanja od propada ili poskoka napona, obezbeđuju i zaštitu od nestanka napona. Za veće računarske sisteme u bankama, osiguravajućim društvima i sl., u slučaju nekvalitetnog napajanja dužeg od 30 sekundi, koriste se i dizel agregati.

Međutim, u industriji je veoma teško odrediti pravu strategiju za eliminisanje uticaja propada napona, zbog slučajnog karaktera pojavljivanja. Pored trivijalnih metoda, produžavanjem vremena reagovanja zaštite i sl., moguća rešenja kod potrošača leže u obezbeđenju izvora besprekidnog napajanja za kontrolno-signalna kola, motor-generatorskih grupa sa zamajnim masama za velike motore i dr. Sa strane mreže, mere mogu da idu na stranu povećanja snage, boljeg održavanja prenosne mreže (čišćenje i pregled izolatora, kontrola zaštite, redovni remont i dr.), rekonfiguraciju mreže i sl.

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 propadu 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 prouzrokovan pojavom propada napona. Ako neophodni podaci postoje mogu se uporediti troškovi primene poboljšanja i troškovi gubitaka proizvodnje.

Rešenja mogu biti primenjena kod krajnjeg korisnika, koji ima osetljivu 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 ekonomična 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 i veću imunost na ove deformacije. 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.

6.7. Literatura

5. R. Dugan, M. McGranaghan, W. Beaty: "Electric Power System Quality", McGraw Hill, New York, 1996.
6. N. Petrović: "Besprekidnost napajanja kao kvalitet isporučene energije", *JUKO CIGRE, STK-31, Stručna konsultacija Kvalitet električne energije*, Vrnjačka Banja, Okt.1992, str.49-58.
7. D. Sabin, A.Sundaram: "Quality Enhances Realibility", *IEEE Spectrum*, Vol.33, No.2, Feb.1996, pp.34-41.
8. 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.
9. Proizvođački katalogi firmi: *Rade Končar kontaktori i releji, Skopje; Minel ELIP, Beograd i Lovato S.P.A., Bergamo (Italia)*
10. W.E. Reid: Power Quality Issues – Standards and Guidelines, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.32, No. 3, 1996., pp. 625-632.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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).
16. 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.
17. D.Mueller, M.McGranaghan, "Effects of Voltage Sags in Process Industry Applications", *Electrotek Concepts Inc.*, www.electrotek.com.
18. 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.
19. Heydt G., *Electric Power Quality: A Tutorial Introduction*, *IEEE Computer Application in Power*, Vol.11, No.1, pp.15-18, 1998.
20. 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.
21. IEEE Standard 1159-1995, "IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality", IEEE, New York, 1995.
22. V.Katić, Lj.Gerić, R.Jevremović: "Kvalitet električne energije u industrijskim pogonima", *XXIII Savetovanje JUKO-CIGRE*, Herceg Novi, Maj 1997, R36-12.

7. VIŠI HARMONICI

Krajem pedesetih i tokom šezdesetih godina došlo je do naglog razvoja snažnih poluprovodničkih komponenata (tiristori i snažni bipolarni tranzistori). Pojavljuju se poluprovodnički energetska elektronski pretvarači, koji u potpunosti potiskuju one sa vakuumskim elementima. Većinu energetskih elektronskih pretvarača čine oni koji se vezuju na naizmjeničnu mrežu (ispravljači, mrežom komutirani invertori, regulatori naizmjeničnog 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 energetska 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 elektroločnih 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:

$$HDU_n = (U_n / U_1) 100(\%) \quad HDI_n = (I_n / I_1) 100(\%) \quad (7.1)$$

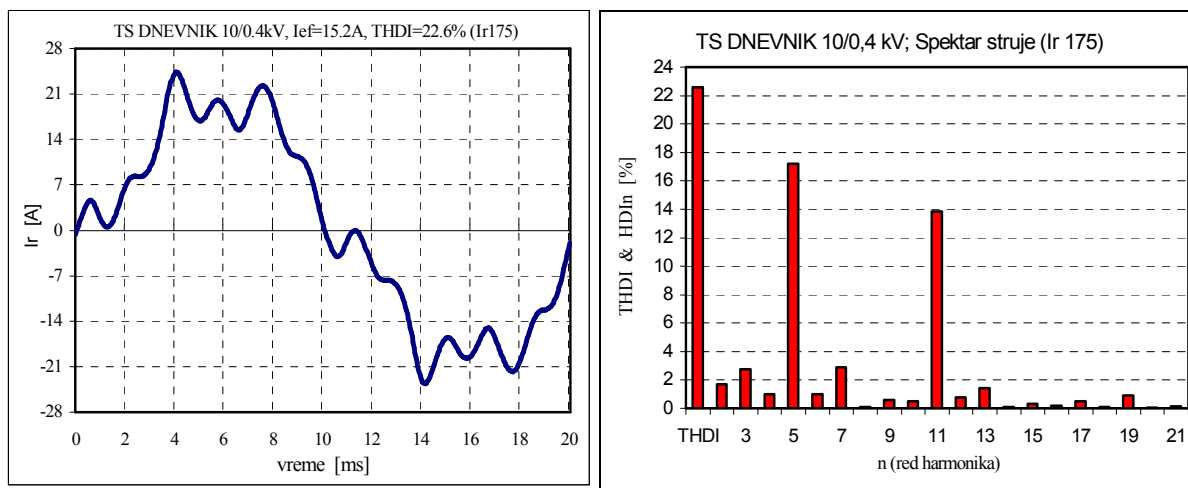
Ukupna harmonijska distorzija (THD) se definiše kao kvadratni koren odnosa sume kvadrata efektivnih vrednosti pojedinačnih harmonijskih komponenti i efektivne vrednosti fundamentalnog harmonika i takođe se izražava u procentima:

$$THDI = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 / I_1^2} \cdot 100 (\%) \quad THDU = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2 / U_1^2} \cdot 100 (\%) \quad (7.2)$$

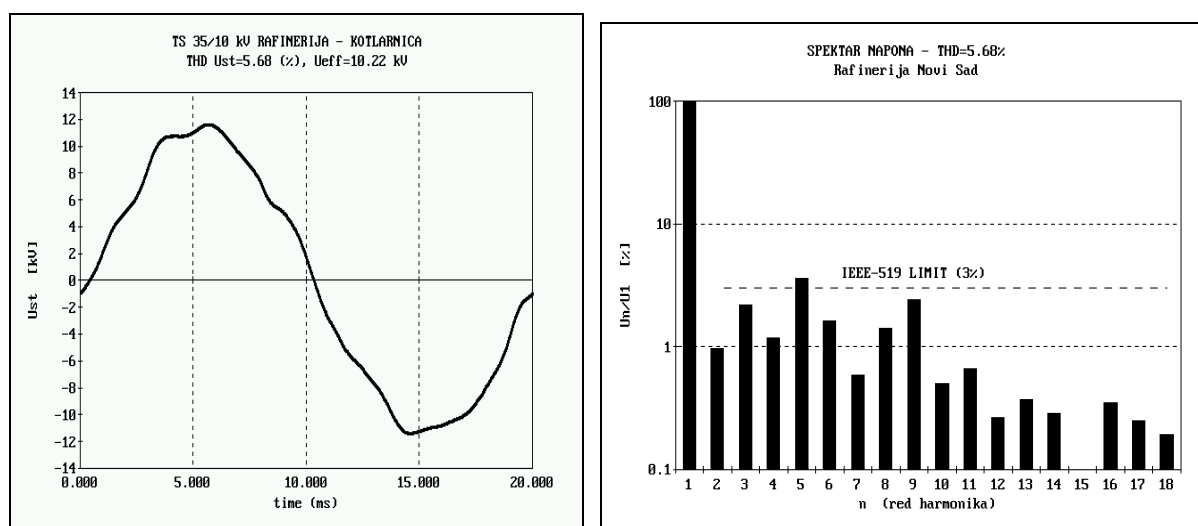
Uobičajeno je da se za kvalitetan rad uređaja podrazumeva da je nivo ukupne harmonijske distorzije napona napajanja manji od 5 - 8 %, a nivo ukupne harmonijske distorzije struje manji od 5 - 20 % u zavisnosti od snage kratkog spoja mreže i snage samog potrošača [3].

Kao primer mogućih pojava viših harmonika u mreži, na slikama 7.1 i 7.2 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 7.1), dok je napon snimljen na 10 kV izvodu sa kog se napaja deo postrojenja u “NIS-Rafinerija nafte Novi Sad”, Novi Sad (slika 7.2). Može se uočiti znatno odstupanje od sinusnog talasnog oblika, kao i prisustvo viših harmonika, koji su po amplitudi iznad dopuštenih nivoa definisanih u standardu IEEE-519 [5].



Slika 7.1 - Talasni oblik struje i njen spektar na 0,4 kV izvodu u TS DNEVNIK, Novi Sad.



Slika 7.2 - Talasni oblik napona i njegov spektar na 10 kV izvodu u Rafineriji Novi Sad.

7.1. 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 umnožake osnovne frekvencije [2]. Harmonijska analiza je proces izračunavanja veličine i faze osnovnog i harmonika višeg reda.

7.1.1. 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:

$$x(t + kT) = x(t) \quad (7.3)$$

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:

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos\left(n \frac{2\pi t}{T}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin\left(n \frac{2\pi t}{T}\right) \quad (7.4)$$

gde su a_0 , a_n i b_n koeficijenti niza - Furijeovi koeficijenti definisani sa:

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cos\left(n \frac{2\pi t}{T}\right) dt \quad (7.5)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \sin\left(n \frac{2\pi t}{T}\right) dt \quad (7.6)$$

Prvi član Furijeovog niza, nulti harmonik $X_0 = a_0/2$ se dobija iz (7.5) za $n=0$ i naziva se srednja vrednost funkcije:

$$X_0 = \frac{a_0}{2} = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) dt \quad (7.7)$$

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

$$X_0 = \frac{a_0}{2} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} x(\omega t) d(\omega t) \quad (7.8)$$

$$a_n = \frac{2}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} x(\omega t) \cos(n\omega t) d(\omega t) \quad (7.9)$$

$$b_n = \frac{2}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} x(\omega t) \sin(n\omega t) d(\omega t) \quad (7.10)$$

Furijeov red se može napisati i u obliku sume harmonika:

$$x(t) = X_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} X_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (7.11)$$

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

$$X_n = \sqrt{\frac{a_n^2 + b_n^2}{2}}, \quad \varphi_n = \arctg \frac{a_n}{b_n} \quad (7.12)$$

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

$$X(f_n) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) e^{-j2\pi f_n t} dt, \quad f_n = nf \quad (7.13)$$

a originalna vremenska funkcija je:

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} X(f_n) e^{j2\pi f_n t}, \quad f_{-n} = -f_n \quad (7.14)$$

Kada se Furijeov 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 (7.13), postaje kontinualna i beskonačna funkcija frekvencije:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j2\pi f t} dt \quad (7.15)$$

Izraz za funkciju u vremenskom domenu postaje:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f) e^{-j2\pi f t} df \quad (7.16)$$

Izraz (7.15) i (7.16) formiraju Furijeov transformacioni par, odnosno definišu **Furijeovu transformaciju** (*Fourier Transform - FT*), s tim da (7.15) definiše direktnu transformaciju, a (7.16) inverznu transformaciju.

7.1.2. 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 ($f_s=1/T_s$) 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 $x^d(t)$:

$$x^d(t) = x(t) \cdot D(t) = x(t) \cdot \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(t - nT_s) \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (7.17)$$

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:

$$x[n] = x(nT_s) \quad n=0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (7.18)$$

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:

$$DFT = X[k] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j\frac{2\pi kn}{N}} \quad (7.19)$$

Inverzna diskretna Furijeova transformacija je:

$$x[n] = \sum_{k=0}^{N-1} X[k] e^{j \frac{2\pi kn}{N}} \quad (7.20)$$

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, Furijeova transformacija je najpogodnija za numeričko rešavanje.

7.1.3. Brza Furijeova transformacija

U primeni DFT pokazuje se da izračunavanje spektra funkcije po jednačini (7.19) zahteva rešavanje sledeće matrice:

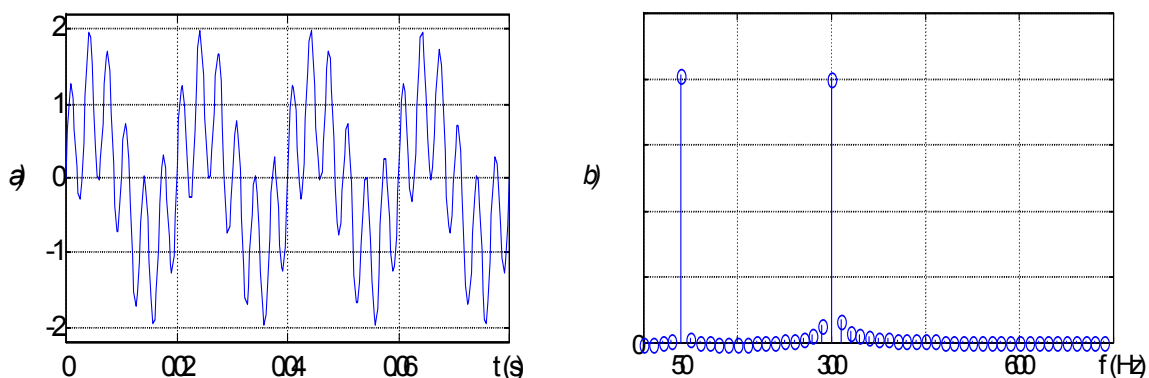
$$[X[k]] = \frac{1}{N} [W^{kn}] \cdot [x[n]] \quad , \quad k = 0 \dots N-1 \quad , \quad n = 0 \dots N-1 \quad , \quad W = e^{-j2\pi/N} \quad (7.21)$$

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

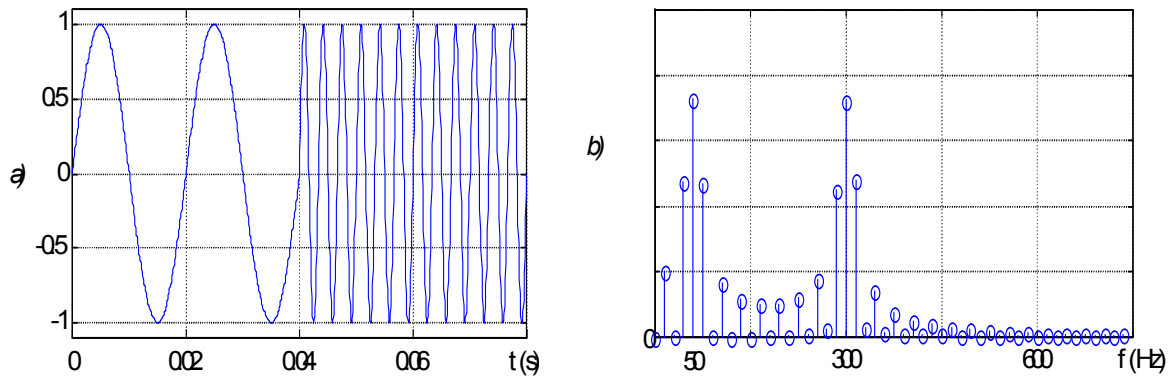
Računanje N harmonika iz N odbiraka zahteva N^2 kompleksnih operacija množenja. U savremenim zahtevima za trenutnu (on-line) frekventnu analizu signala, gde je N često reda nekoliko stotina, vreme procesiranja može da predstavlja ograničavajući faktor.

Posmatranjem matrice $[W^{kn}]$ uočeno je da se ona može transformisati tako da se postigne jednakost pojedinih komponenata: $W^{N/2} = -W^0$, $W^{N+2/2} = -W^1$ 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 7.3 i 7.4 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 (7.3) – (7.12), 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 7.3 - Stacionaran signal (a) i njegov frekventni spektar (b)



Slika 7.4 - Nestacionaran signal (a) i njegov frekventni spektar (b)

7.1.4. 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 transformacijom sa tom razlikom što se ulazni signal $x(t)$ množi sa prozorskom funkcijom $w(t)$ čija se pozicija translira u vremenu za iznos τ .

$$WFT(f, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)w(t - \tau)e^{-j2\pi ft} dt \quad (7.22)$$

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

$$WDFT = \sum_n x[n]w[n - m]e^{-j\frac{2\pi kn}{N}} \quad (7.23)$$

Za svaki prozor $w_{m_0} = w[n - m_0]$, $WDFT$ daje skup kompleksnih brojeva $WDFT[k, m_0]$, $k=0,1,\dots,N-1$, 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 7.4) obrađen Prozorskom Furijeovom transformacijom dobija izgled kao na slici 7.5. Vidi se da WFT prati vremensku promenu frekvencije. Međutim problem može da nastane ako se određene frekvencije menjaju i u samom prozoru.

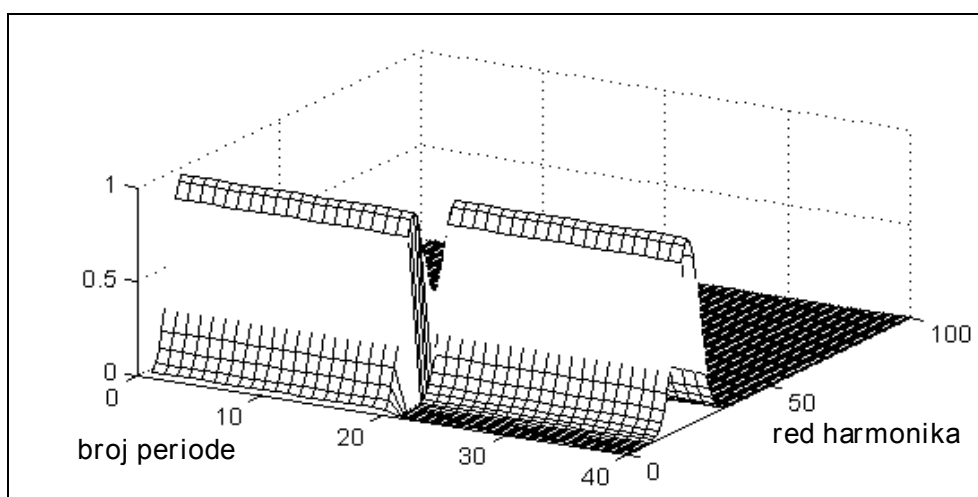
7.1.5. Greške Furijeove transformacije

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.



Slika 7.5 - Primer sa slike 7.4. i WFT.

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 polutalaska 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.

7.2. 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.

7.2.1. 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:

$$i(\omega t) = \sqrt{2}I_1 \sin(\omega t - \phi_1) + \sum_{n=2}^{\infty} \sqrt{2}I_n \sin(n\omega t - \phi_n) \quad (7.24)$$

$$u(\omega t) = \sqrt{2}U_1 \sin(\omega t - \phi_1) + \sum_{h=2}^{\infty} \sqrt{2}U_h \sin(h\omega t - \phi_h) \quad (7.25)$$

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:

$$I_{eff} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} \quad U_{eff} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} U_h^2} \quad (7.26)$$

7.2.2. Fazni stav harmonika

U trofaznim simetričnim sistemima prisustvo viših harmonika se iskazuje i u uticaju na fazni stav. Matematički izraz (7.25) za trofazni napon sad postaje:

$$\begin{aligned} u_{Rh}(\omega t) &= \sqrt{2}U_h \sin(h\omega t - \phi_h) \\ u_{Sh}(\omega t) &= \sqrt{2}U_h \sin(h\omega t - 2h\pi/3 - \phi_h) \\ u_{Th}(\omega t) &= \sqrt{2}U_h \sin(h\omega t + 2h\pi/3 - \phi_h) \end{aligned} \quad (7.27)$$

Iz (7.27) 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 7.1.

Tabela 7.1 – 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].

7.2.3. Snaga

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

$$\begin{aligned}
p(\omega t) &= u(\omega t) \cdot i(\omega t) = \left[\sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} U_h \sin(h\omega t - \phi_h) \right] \cdot \left[\sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_n \sin(n\omega t - \phi_n) \right] = \\
&= \sum_{h=n=1}^{\infty} U_h I_h [\cos(\phi_h - \phi_n) - \cos(2h\omega t - \phi_h - \phi_n)] + \\
&\quad + \sum_{\substack{h \neq n \\ h=1, n=1}}^{\infty} U_h I_n \{ \cos[(h-n)\omega t - \phi_h + \phi_n] - \cos[(h+n)\omega t - \phi_h - \phi_n] \}
\end{aligned} \tag{7.28}$$

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

$$\begin{aligned}
p(\omega t) &= \sum_{h=n=1}^{\infty} U_h I_h [\cos \phi_h - \cos(2h\omega t - \phi_h)] + \\
&\quad + \sum_{\substack{h \neq n \\ h=1, n=1}}^{\infty} U_h I_n \{ \cos[(h-n)\omega t + \phi_n] - \cos[(h+n)\omega t - \phi_n] \}
\end{aligned} \tag{7.29}$$

Aktivna snaga, koja se oslobađa na nekom potrošaču je:

$$\begin{aligned}
P &= \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u(\omega t) \cdot i(\omega t) d(\omega t) = \\
&= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left\{ \sum_{h=n=1}^{\infty} U_h I_h [\cos \phi_h - \cos(2h\omega t - \phi_h)] + \right\} d(\omega t) + \\
&\quad + \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left\{ \sum_{\substack{h \neq n \\ h=1, n=1}}^{\infty} U_h I_n \{ \cos[(h-n)\omega t + \phi_n] - \cos[(h+n)\omega t - \phi_n] \} \right\} d(\omega t)
\end{aligned} \tag{7.30}$$

odnosno:

$$P = \sum_{h=1}^{\infty} P_h = \sum_{h=1}^{\infty} U_h I_h \cos \phi_h \tag{7.31}$$

Prividna snaga je:

$$\begin{aligned}
S &= U \cdot I = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} U_h^2} \cdot \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} = \sqrt{\sum_{h=n=1}^{\infty} U_h^2 \cdot I_h^2 + \sum_{\substack{h \neq n \\ h=1, n=1}}^{\infty} U_h^2 \cdot I_n^2} = \\
&= \sqrt{\sum_{h=n=1}^{\infty} U_h^2 \cdot I_h^2 \cos^2(\phi_h) + \sum_{h=n=1}^{\infty} U_h^2 \cdot I_h^2 \sin^2(\phi_h) + \sum_{\substack{h \neq n \\ h=1, n=1}}^{\infty} U_h^2 \cdot I_n^2}
\end{aligned} \tag{7.32}$$

Ako se analogno (7.31), a u skladu sa Boudeanu-ovom teorijom [8], definiše ekvivalentna reaktivna snaga u prisustvu harmonika:

$$Q = \sum_{h=1}^{\infty} Q_h = \sum_{h=1}^{\infty} U_h I_h \sin \phi_h \tag{7.33}$$

dobija se

$$S = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} P_h^2 + \sum_{h=1}^{\infty} Q_h^2 + \sum_{\substack{h \neq n \\ h=1, n=1}}^{\infty} U_h^2 \cdot I_n^2} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} S_h^2 + \sum_{\substack{h \neq n \\ h=1, n=1}}^{\infty} U_h^2 \cdot I_n^2} \quad (7.34)$$

Iz (7.34) 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:

$$D = \sqrt{\sum_{\substack{h \neq n \\ h=1, n=1}}^{\infty} U_h^2 \cdot I_n^2} \quad (7.35)$$

Sad je prividna snaga data sa:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (7.36)$$

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.

7.2.4. 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:

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{\sum_{h=1}^{\infty} U_h I_h \cos \varphi_h}{\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} U_h^2} \cdot \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}} \quad (7.37)$$

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

$$\lambda = \frac{\sum_{h=1}^{\infty} U_h I_h \cos \varphi_h}{\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} U_h^2} \cdot \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}} \approx \frac{I_1 \cos \varphi_1}{\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}} = \frac{I_1}{I_{eff}} \cos \varphi_1 = \frac{\cos \varphi_1}{\sqrt{THDI_{ac}^2 + 1}} \quad (7.38)$$

7.2.5. 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:

$$\begin{aligned} HDI_n &= (I_n / I_1) 100 (\%) \\ HDU_n &= (U_n / U_1) 100 (\%) \end{aligned} \quad (7.39)$$

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:

$$THDI = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 / I_1^2} \cdot 100 = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} HDI_n^2} (\%) \quad (7.40)$$

$$THDU = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2 / U_1^2} \cdot 100 = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} HDU_h^2} (\%) \quad (7.41)$$

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)

$$TDDI = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_L} \cdot 100 (\%) \quad (7.42)$$

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 ljudskog uha na različitim frekvencijama. Definiše se kao:

$$TIF_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} (w_n I_n)^2}}{I_{eff}} \quad (7.43)$$

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 - psofometrijske 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:

$$TIF_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} (5c_n f_n I_n)^2}}{I_{eff}} \quad (7.44)$$

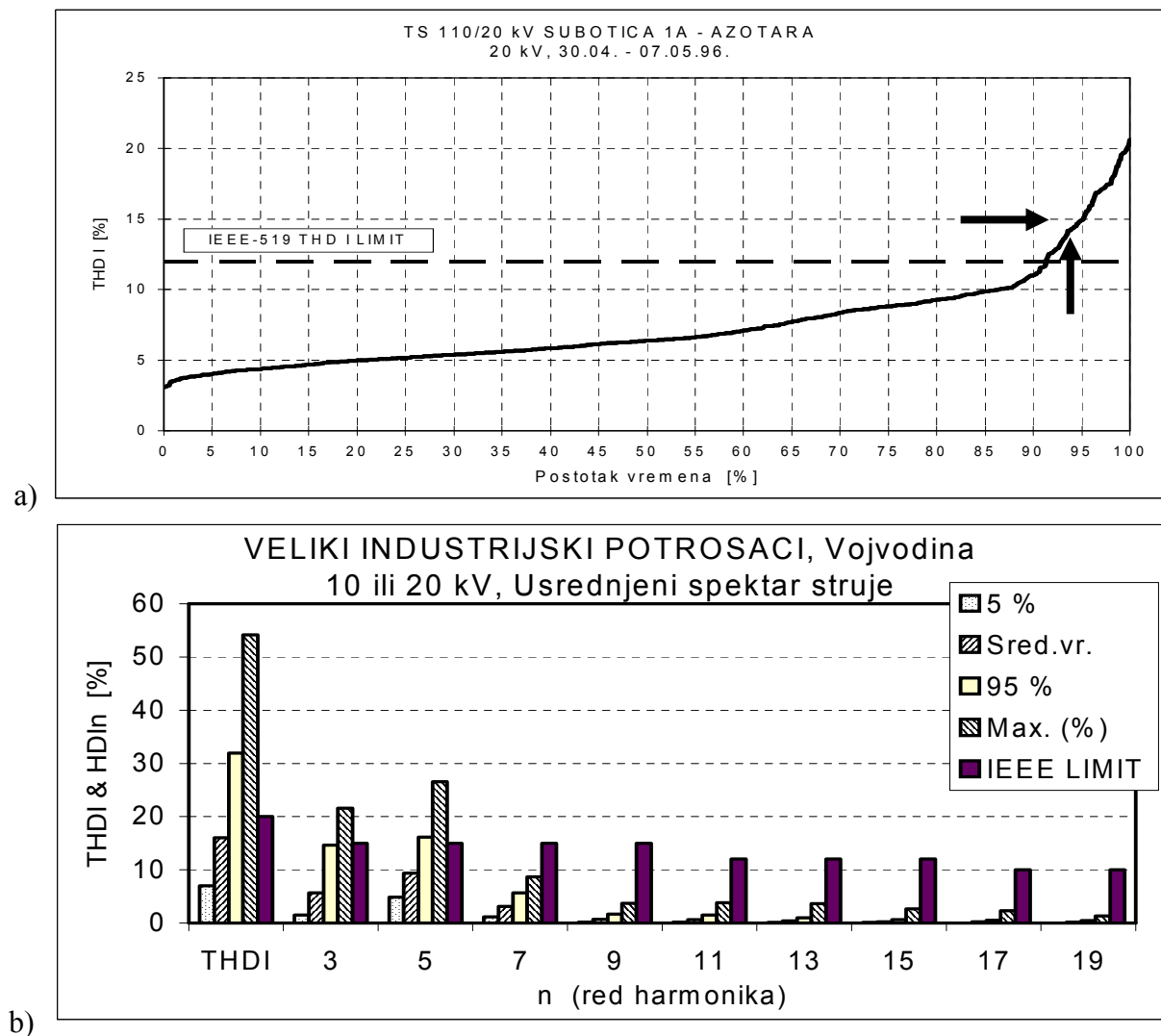
gde je c_n vrednost "C-message" težinske funkcije na frekvenciji n -tog harmonika f_n .

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

$$K = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} n^2 (I_n / I_1)^2}{\sum_{n=1}^{\infty} (I_n / I_1)^2} \quad (7.45)$$

7.2.6. 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 7.6 je prikazan statistički dijagram (histogram) za THDI u obliku 95% verovatnoće (slika 7.6.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 7.6.b).



Slika 7.6 - Primeri statističke obrade rezultata : a) 95% verovatnoća b) Usrednjeni spektar STRUJE kod velikih industrijskih potrošača 10 ili 20 kV.

7.3. 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 neprilika i sl., i na kraju u domenu potrošnje, kao posledica rada nelinearnih potrošača. Najčešći nelinearni potrošači su energetske elektronske pretvarači. To su pretvarači energetske elektronike, koji se karakterišu prekidačkim načinom rada snažnih elektronskih komponenti. Razlikuju se pretvarači naizmjenične struje u jednosmernu – *ispravljači*, jednosmerne struje u naizmjeničnu – *invertori*, jednosmerne struje u jednosmernu – *čoperi* i naizmjenične struje u naizmjeničnu – *naizmjenični pretvarači*. Pored energetskih elektronskih pretvarača u mreži postoje još nekoliko značajnih "zagađivača": energetske transformatori, rotirajuće električne mašine, elektrolučne peći i fluorescentne sijalice.

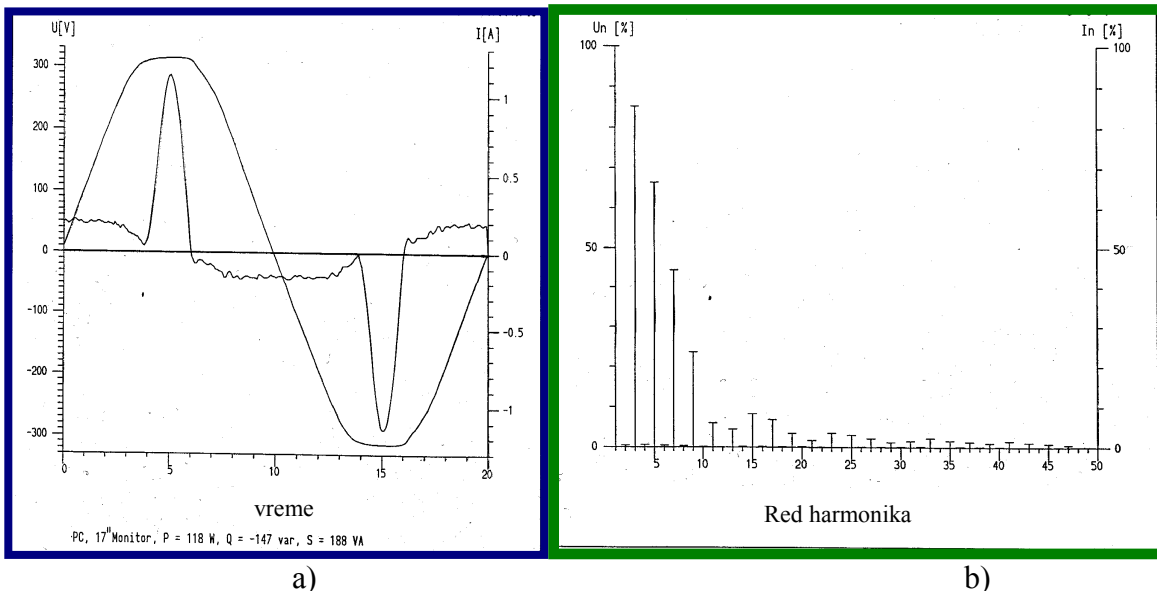
7.3.1. Ispravljači kao izvori viših harmonika

Ispravljači, kao najčešće korišćeni energetske elektronske 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 naizmjenične komponente - viši (parni) harmonici.

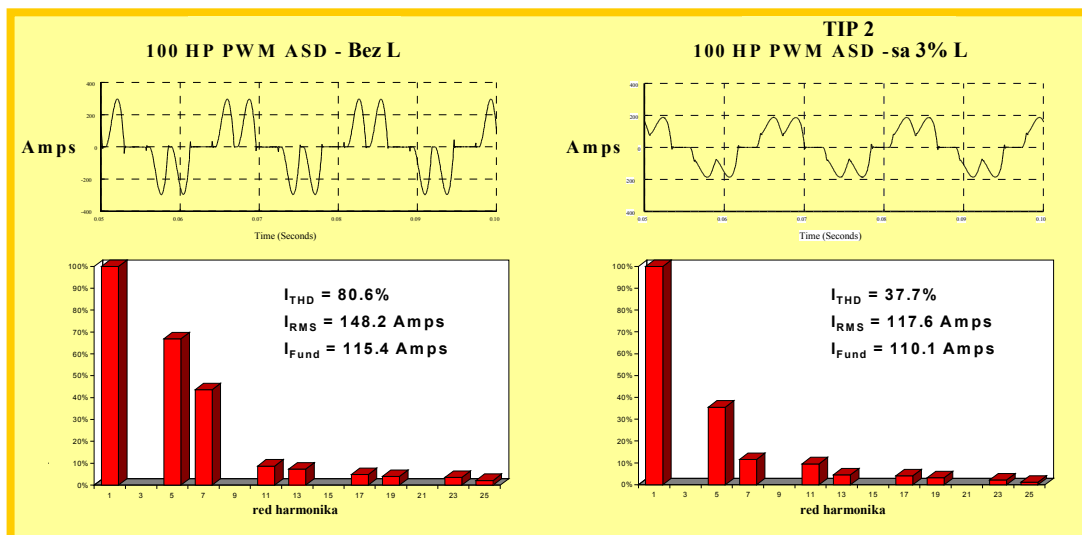
Monofazni ispravljači se upotrebljavaju u napojnom delu elektronskih uređaja i od njih se zahteva da generišu stabilne jednosmerne napone, da budu što jednostavnije konstrukcije i visoke pouzdanosti. Iz tih razloga, najčešće se radi o diodnim ispravljačima sa filterskim kondenzatorom na jednosmernoj strani ili u novije vreme o jednosmernim prekidačkim napajanjima, 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 7.3 prikazan oscilogram talasnog oblika napona i struje (slika 7.3.a) i spektar struje (slika 7.3.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-ti, 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 7.4). Može se primetiti da je kritičniji prvi slučaj (slika 7.4.a), gde pojedinačni harmonik, 5-ti, dostiže vrednost od 70% osnovnog i gde je ukupna harmonijska distorzija (THDI) oko 80%. Dodavanje 3% prigušnice u filter jednosmernog kola (LC filter), ublažava deformaciju struje (slika 7.4.b), tako da 5-ti harmonik ima znatno manje izobličenje (oko 30%), a i THDI je 37,7%. Slično se može primetiti i za 7-ti 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.



Slika 7.3 - a) Talasni oblik napona i struje mreže monofaznog ispravljača; b) Spektar struje.



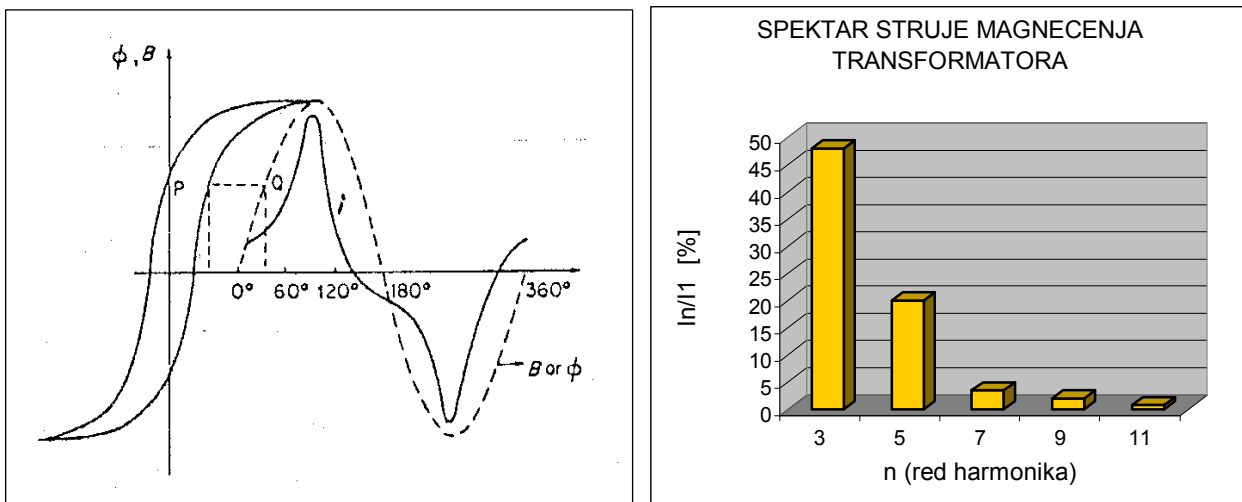
Slika 7.4 – Trofazni ispravljač u sklopu frekventnog pretvarača: Talasni oblik i spektar struje za slučaj ispravljača sa C filterom (levo) i sa LC filterom (desno).

7.3.2. 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 magnećenja, čak i u praznom hodu, struja magnećenja 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 7.5.a).

Na slici 7.5.b) predstavljen je spektar struje magnećenja 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.



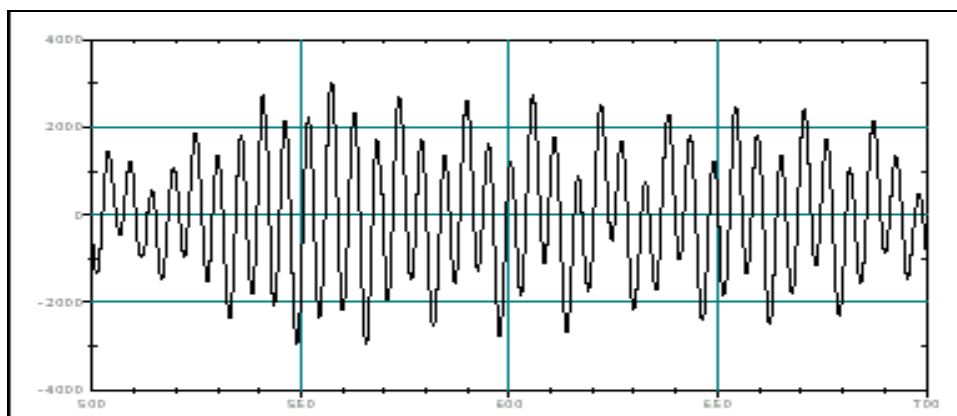
Slika 7.5 - Struja magnećenja transformatora sa uticajem histerezisa: a) talasni oblik, b) spektar.

Kao dodatni uzrok pojave harmonika kod transformatora može biti i jednosmerna komponenta struje magnećenja. Jednosmerna komponenta je posledica nesimetričnog oblika histerezisa, 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 naizmenične pobude. Da bi se ovi harmonici smanjili, u standardima ili preporukama elektrodistributivnih organizacija se zabranjuje ili posebno uslovljava priključivanje ispravljača sa srednjom tačkom.

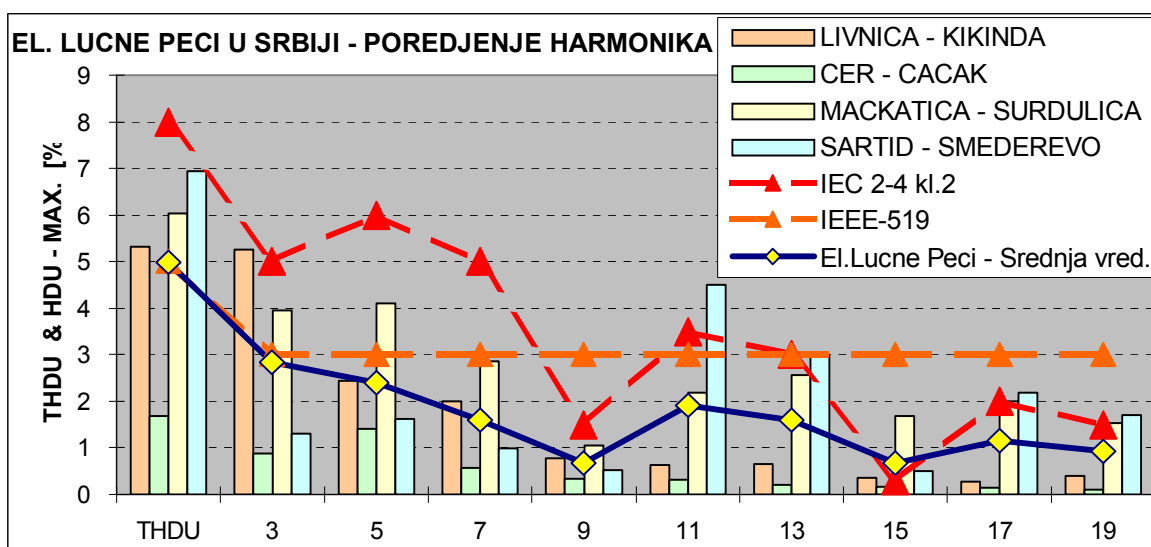
Od rotirajućih električnih mašina kao izvori harmonika u mreži mogu da se jave sinhrona i asinhrona mašina, ali je intenzitet harmonika je obično mali.

7.3.3. 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 7.6 dat je primer talasnog oblika 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 7.7 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 7.6 – Promena struje tokom rada elektro-lučne peći.

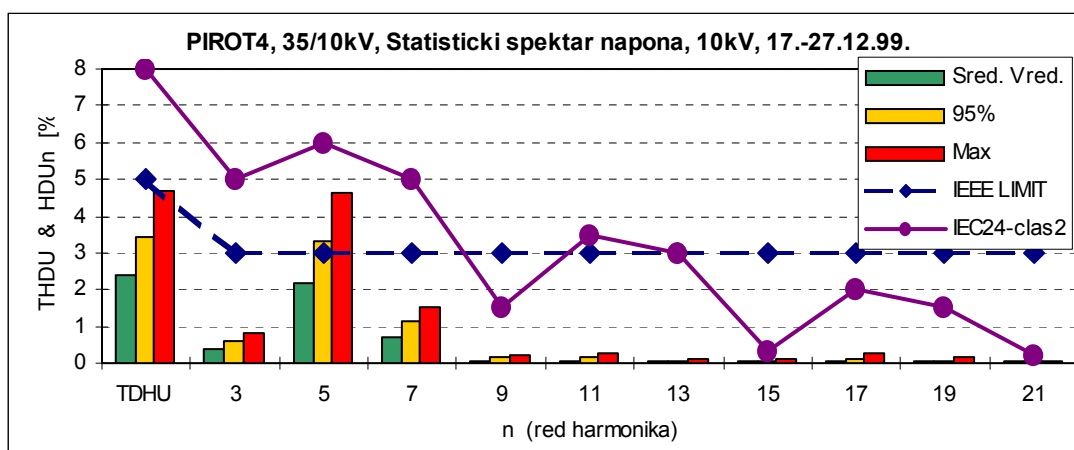


Slika 7.7 – Sumarni pregled harmonika napona elektro-lučnih peći u Srbiji.

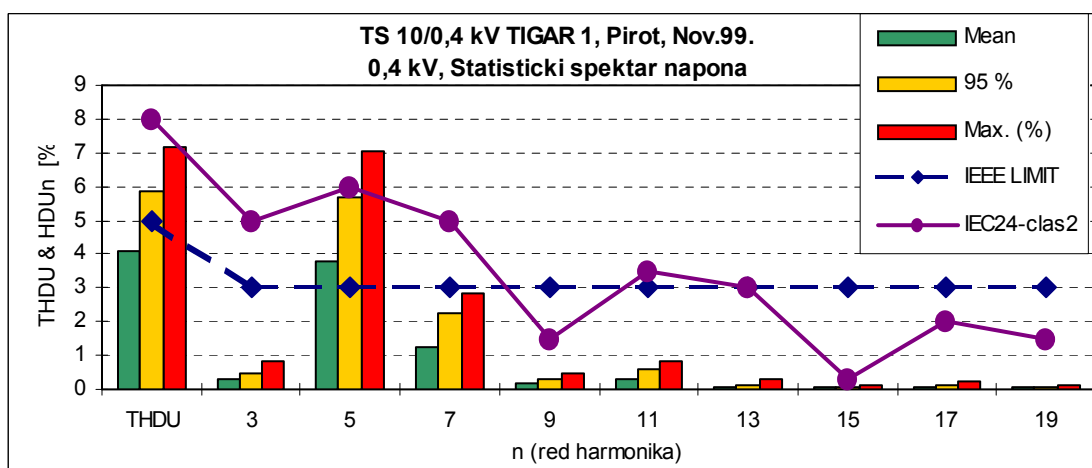
7.3.4. Industrija kao izvor viših harmonika

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 7.2, dok su na slikama 7.8.a) i 7.8.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.



a)



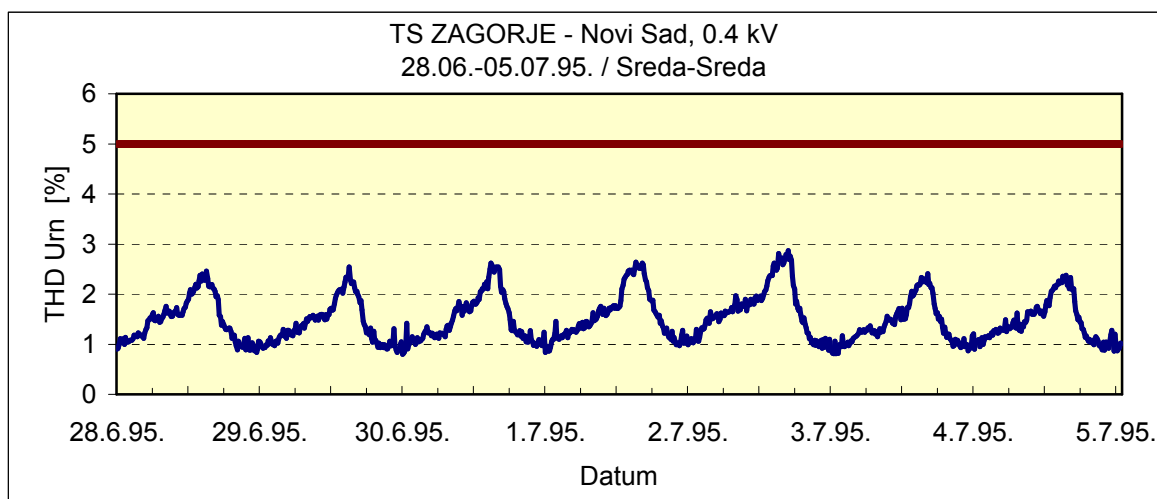
b)

Slika 7.8 – Statistički spektar napona na sabirnicama industrije “Tigar”, Pirot. a) Prikaz na sabirnicama distributivne TS, b) Prikaz na sabirnicama industrijske TS.

7.3.5. 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-igrice, 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 7.9). 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 7.9 – Primer promene THDU u stambenoj zoni tokom jedne nedelje.

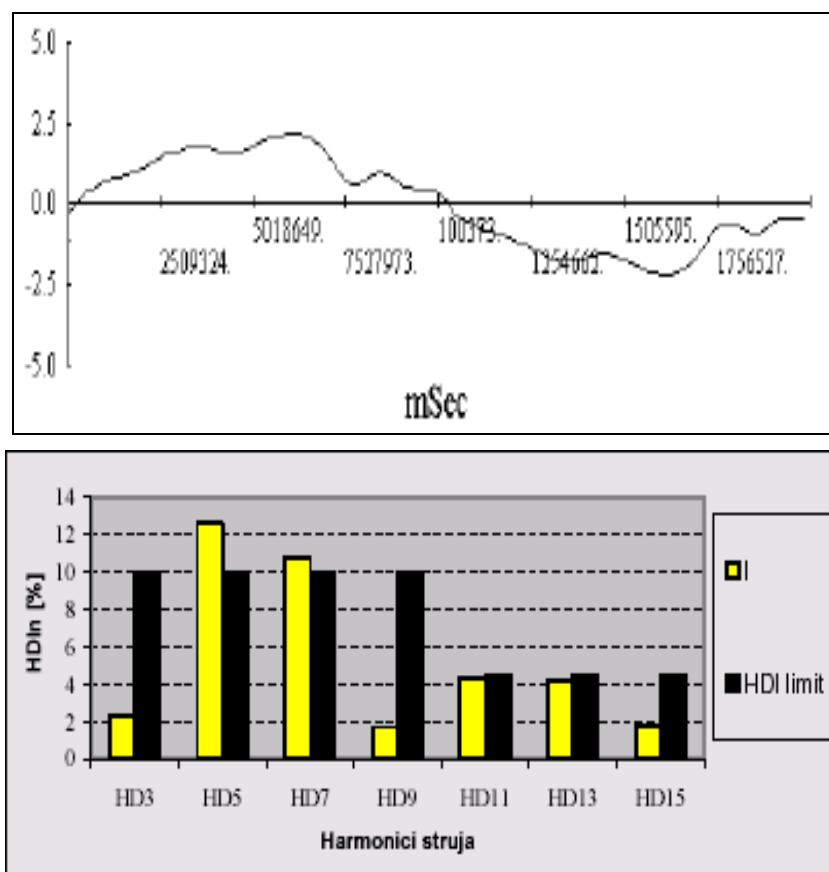
Za ovu grupu potrošača karakteristično je generisanje trećeg harmonika, što je vezano za primenu monofaznih ispravljača. Prostiranje trećeg harmonika dalje u mrežu jednostavno se sprečava sprežanjem distributivnog transformatora u trougao. Međutim, zbog nesimetrije ili dugih uzroka, treći harmonik može prodrati 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.

7.3.6. 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, laserskih 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 naizmjeničnog sa frekventnim pretvaračima (novije verzije). Detaljnije o ovakvim izvorima je dato u prethodnim poglavljima.

U ranijem periodu urađeno je više istraživanja stanja u poslovnim zgradama. Na slici 7.1 je prikazan primer dobijenih rezultata: talasni oblik i spektar stuje u transformatorskoj stanici (TS) "Dnevnik" na 0,4 kV nivou iz koje se napaja poslovna zgrada i štamparija 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 7.10 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 7.10 – Talasni oblik struje jedne faze (gore) i njen spektar (dole) na sabirnici TS (PCC) poslovne zgrade NIS-a.

7.4. 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.

7.4.1. 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. Javljuju 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 7.11.a) predstavljena je ekvivalentna šema u slučaju paralelne rezonancije.

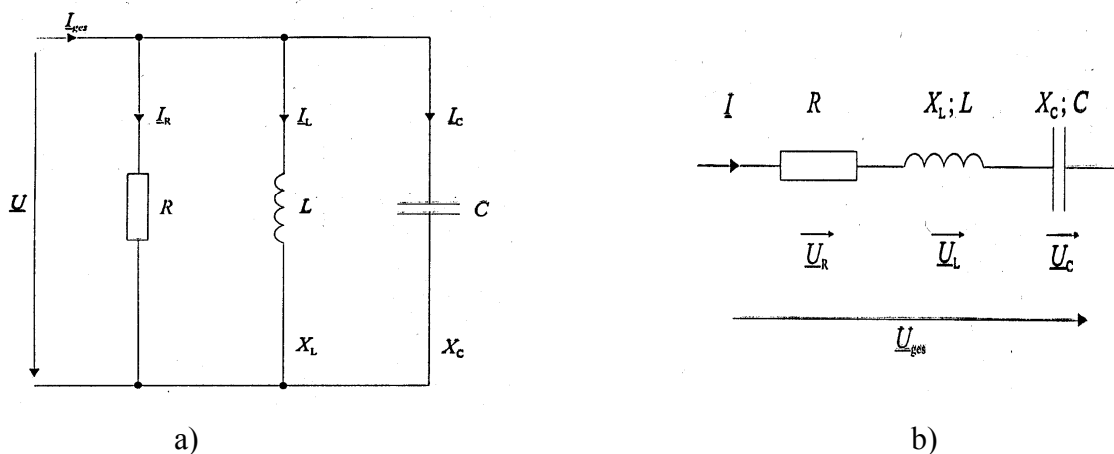
Ako se izvor smatra induktivnim tada je rezonantna frekvencija definisana sa

$$f_{rp} = f \sqrt{\frac{S_{SC}}{S_C}} \quad (7.46)$$

gde je f_{rp} - paralelna rezonantna frekvencija, f - frekvencija osnovnog harmonika, S_{SC} - nominalna snaga kratkog spoja izvoa (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 7.11.b) prikazana je ekvivalentna šema ovakve veze. Ako u mreži postoje visoko-frekventne komponente, tada za njih impedansa ove veze postaje jako mala, pa velika struja teče kroz kondenzator i za relativno male harmonijske napone..



Slika 7.11 – Ekvivalentno kolo: a) paralelne rezonancije, b) redne rezonancije.

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

7.4.2. 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:

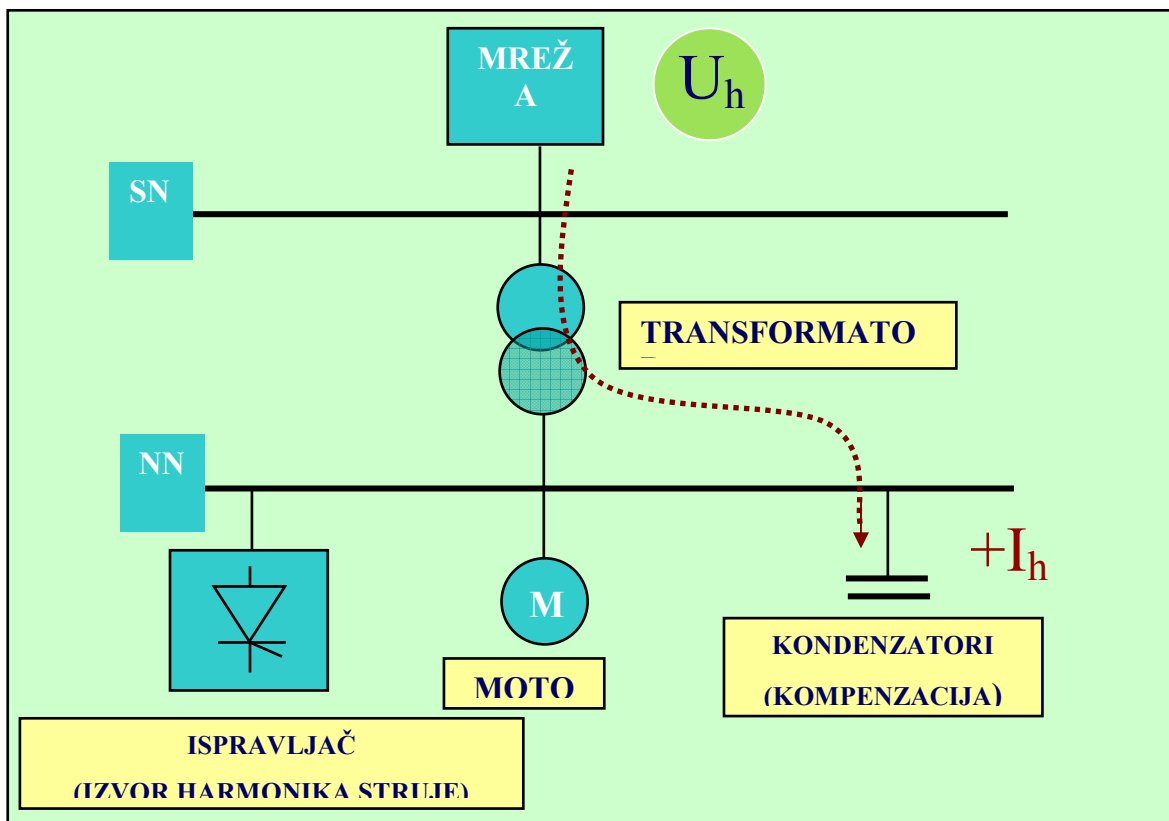
$$P_g = \sum_{n=1}^{\infty} C \operatorname{tg} \delta \omega_n U_n^2 \quad (7.47)$$

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:

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} Q_n \quad (7.48)$$

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 probouju u dielektriku (uništenju). Na slici 7.12 prikazan je slučaj redne rezonancije, kad harmonici iz mreže (U_h) izazivaju dodatno strujno naprezanje kondenzatora (I_h). Na slici 7.13 prikazan je slučaj paralelne rezonancije, kad harmonici struje generisani od nelinearnog potrošača (u ovom slučaju ispravljača) izazivaju pojavu dodatnog naponskog naprezanja kondenzatora (U_h).

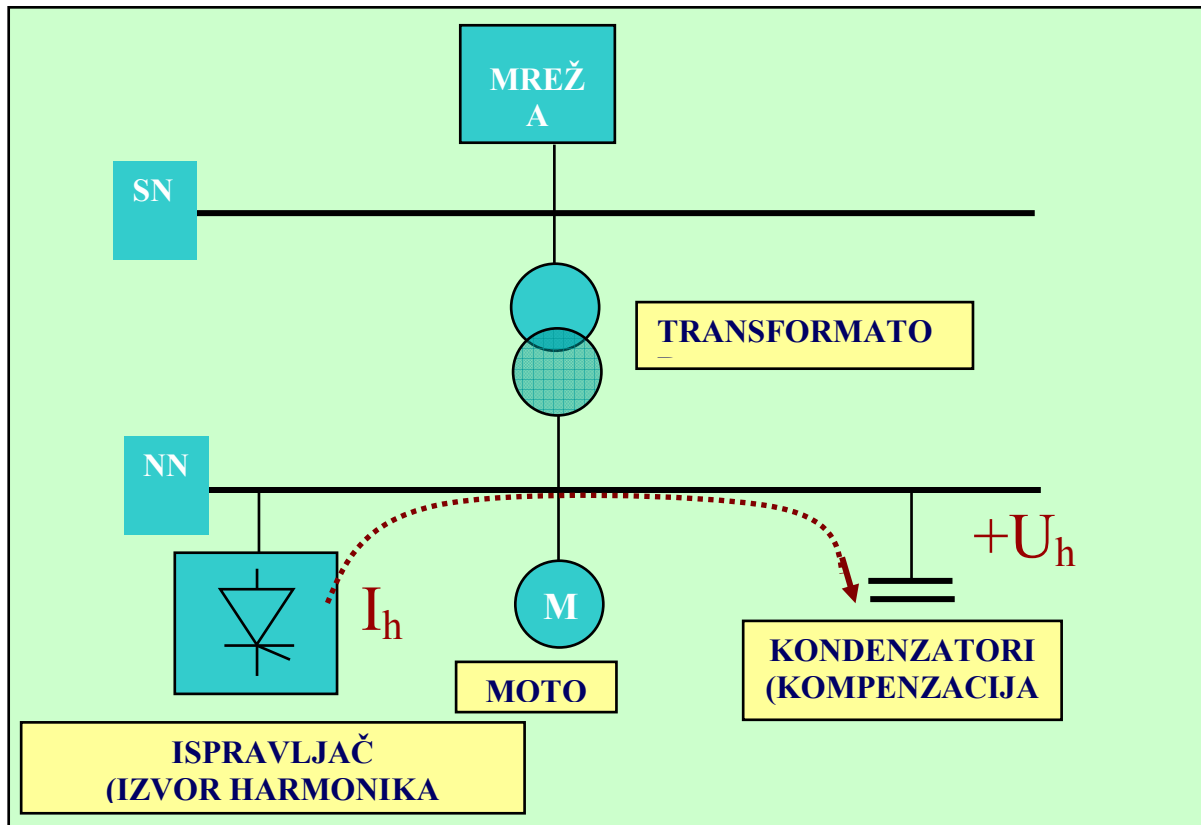


Slika 7.12 - Uticaj redne rezonancije

Kondenzatori se izrađuju prema različitim standardima, koji specificiraju različite nivoe strujnog naprezanja. 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 javlja posle rada sa strujama iznad tih limita.

7.4.3. Uticaj na telekomandne signale

Prisustvo harmonika u mreži je čest uzrok smetnji za telekomandne signale. Ovi signali koriste energetski 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 7.13 - Uticaj paralelne rezonancije

7.4.4. 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.

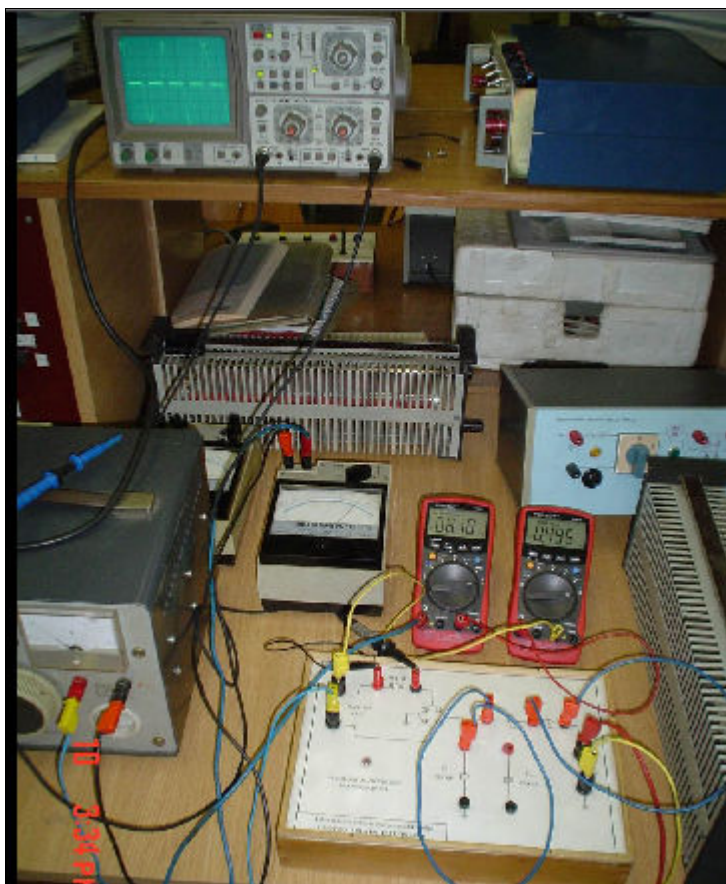
Instrumenti za merenje struje i napona, koji se danas koriste u elektrodistribuciji ili industriji, uglavnom se pojavljuju u dva oblika:

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 harmonica, 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 7.14 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 $I = 0,81 \text{ A}$, dok je ista vrijednost očitana sa analognog mernog instrumenta takođe $0,81 \text{ A}$ (na slici 7.14 leva dva instrumenta). Međutim, na drugom (standardnom) univerzalnom mernom instrumentu, pokazivanje je $I = 0,495 \text{ A}$. Vidi se da je razlika u pokazivanju ova dva instrumenta, pri relativno malom priključenom opterećenju, izuzetno velika - preko 60%.

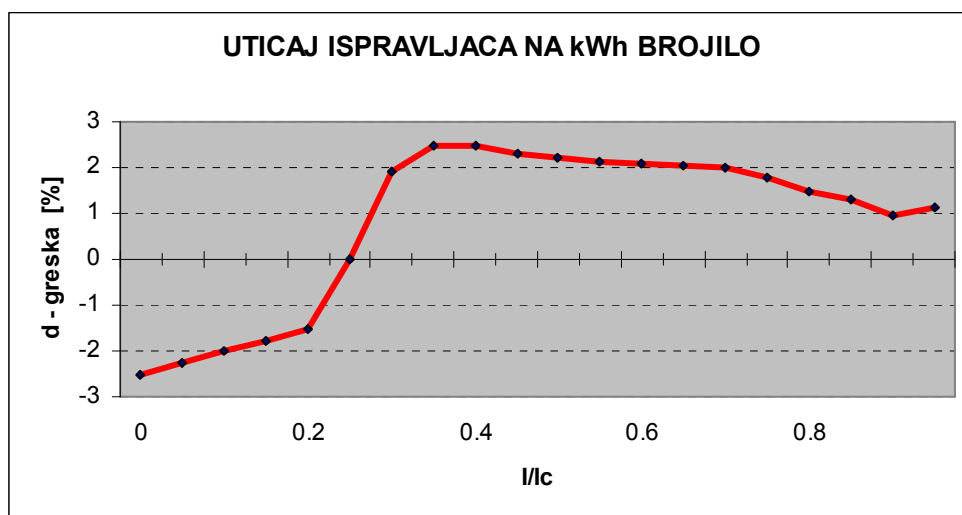




Slika 7.14 – Razlike u pokazivanju univerzalnog mernog instrumenata pri merenju nesinusoidalnih struja.

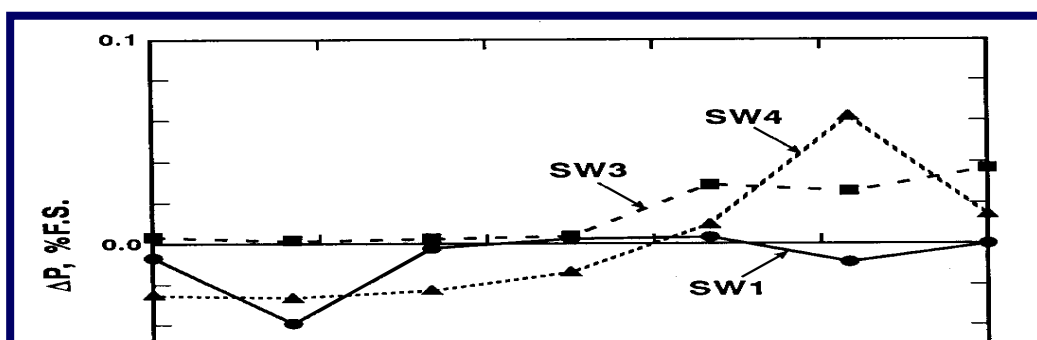
Instrumenti za merenje snage, vatmetri, nisu bili predmet posebnog ispitivanja, odnosno uticaj harmonika na pokazivanje vatmetra nije u literaturi posebno istraživano. Međutim, smatra se da je njegov uticaj zanemarljiv, mada ga ne treba isključiti.

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 7.15 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 7.15 – Greška pokazivanja usled struje ispravljača.

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 7.16 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 7.16 – Greška pokazivanja digitalnog kWh brojila [9].

7.4.5. 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 multipl 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:

$$P_{dod(h)} = k_{F(h)} \cdot R_{dc} \cdot i_{(h)}^2 \quad , \quad k_{F(h)} \geq 1 \quad (7.49)$$

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.

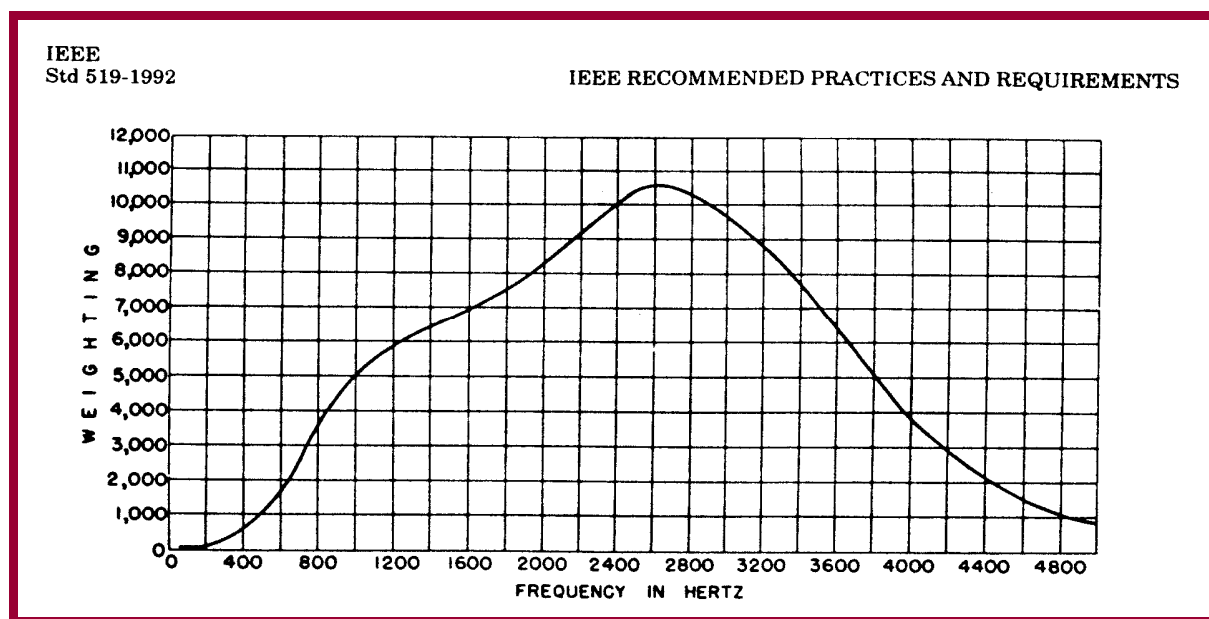
7.4.6. Uticaj na telekomunikacione signale

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:

$$TIF = 5 \cdot P_f \cdot f \quad (7.50)$$

gde je P vrednost "C-message" težinske funkcije na frekvenciji f. Na slici 7.17 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 7.17 - 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 7.2): 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 7.2. - Smernice za dopuštene vrednosti I x T proizvoda

Kategorija	Opis	I x 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

7.5. Standardi i preporuke

Problematikom 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, javljaja 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 šedesetih 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 energetskih 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.

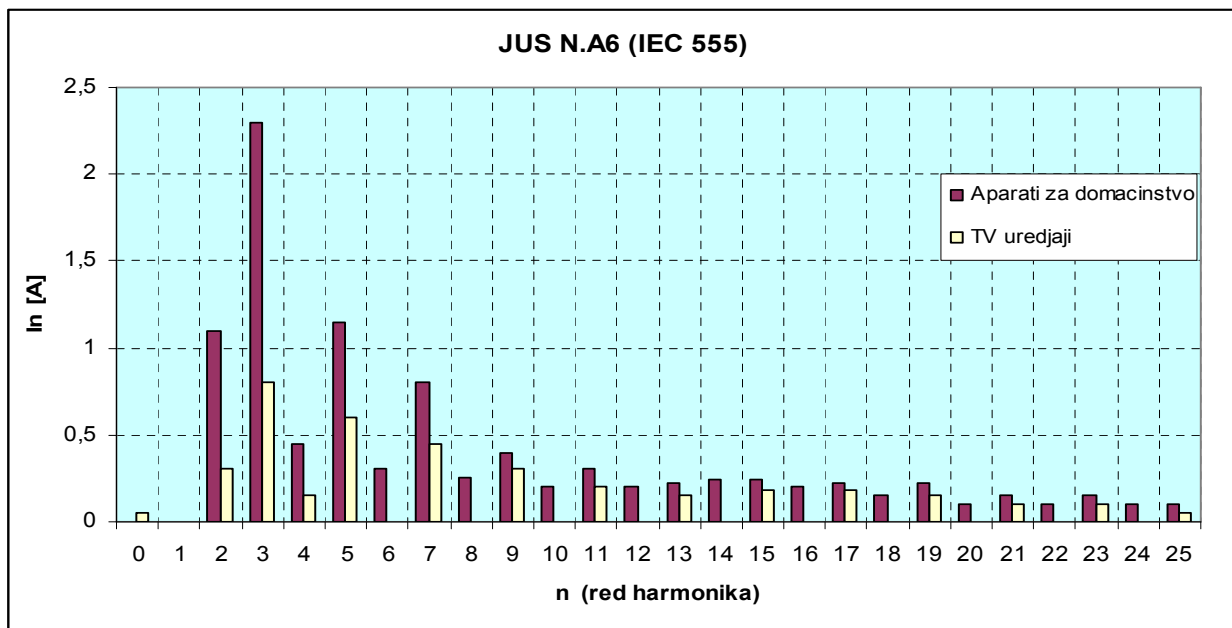
7.5.1. Standardi i preporuke pojedinih zemalja

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 7.18). Nakon raspada Jugoslavije rad na ovoj problematici se ugasio, tako da standard za industrijske potrošače niti je izdat niti je u planu njegova izrada.

7.5.2. 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 nivo kompatibilnosti u industrijskim pogonima, odnosno propisuje dozvoljene nivo 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 7.19 prikazani su limiti za više harmonike za sve tri klase.



Slika 7.18 - Limiti za harmonike mrežne struje prema JUS N.A6 standardu : a) za kućne i slične aparate b) za TV aparate.

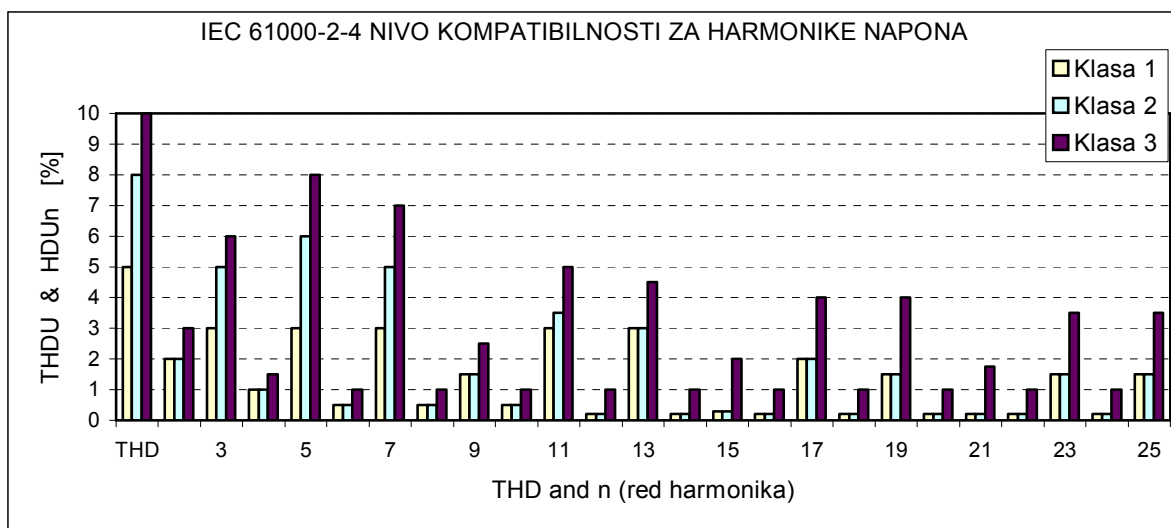
7.5.3. Grupa standarda IEC 61000-3-xx

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 7.3.

7.5.4. 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 7.4 dat je pregled graničnih vrednosti viših harmonika napona za NN i SN distributivnu mrežu



Slika 7.19 – Limiti za harmonike napona prema IEC 61000-2-4 [10].

Tabela 7.3 – 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						
- Predpostavlja se simetrično opterećenje						

Tabela 7.4 - 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				

7.5.5. 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 energetskih 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 7.5 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 7.6. 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 7.20 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.

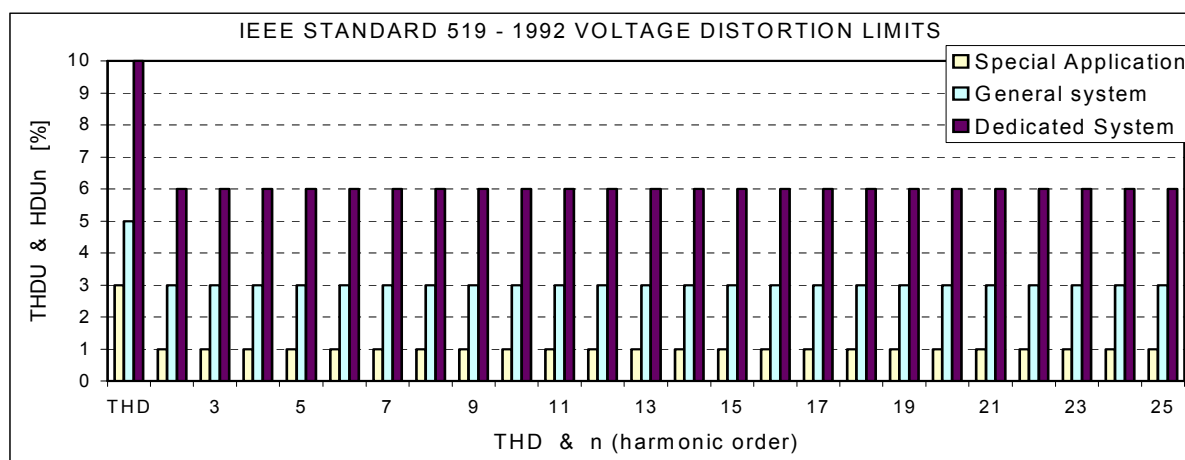
Tabela 7.5 - Limiti za harmonike struje po izmenjenom IEEE-519 (USA)

	MAKSIMALNO DOZVOLJENI HARMONICI STRUJE U ODNOSU NA FUNDAMENTALNI U (%) ZA NAPONSKI NIVO OD 2.4 kV DO 69 kV					UKUPNA HARMONIJSKA DISTORZIJA THDI _{ac} (%)
	POJEDINAČNA HARMONIJSKA DISTORZIJA RED HARMONIKA (n) - SAMO NEPARNI					
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 7.6 - 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.



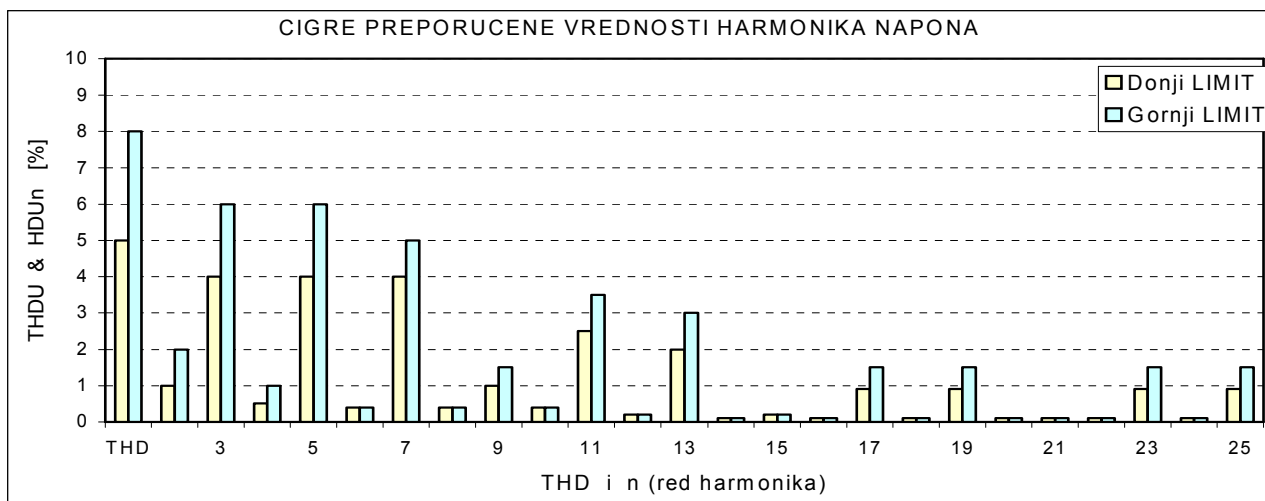
Slika 7.20 – IEEE 519 standard: limiti za harmonike napona.

7.5.6. 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 performance 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 7.21 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 7.19).

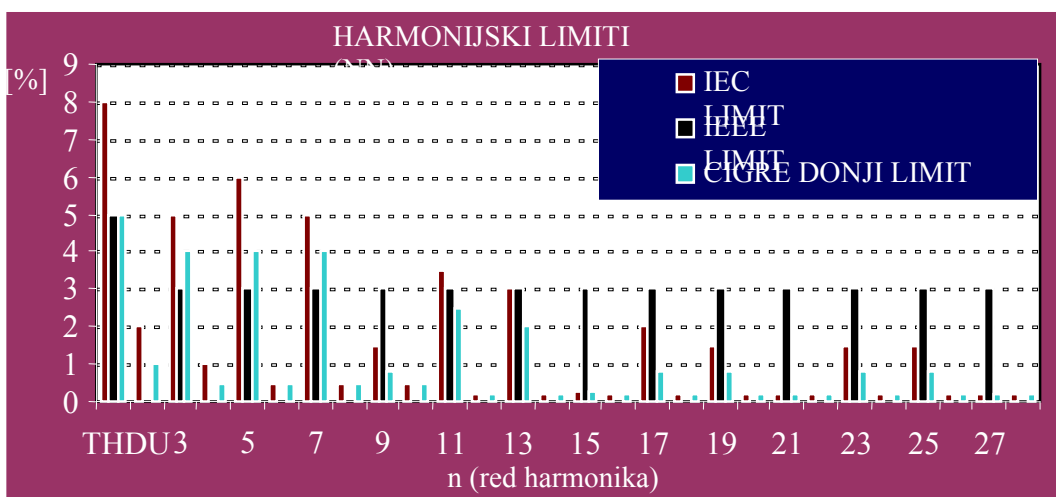


Slika 7.21 – Granični nivoi po preporukama CIGRE-a [17].

7.5.7. 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 ($THDU_{limit}=8\%$). 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 7.22 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 7.22 - Poređenje IEC, IEEE-519 i CIGRE (donjeg) limita za NN mrežu.

7.6. 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 smeru 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 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.

7.6.1. Kratak prikaz savremenih sistema za merenje

Početak 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 klještim, 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 bezžičnu). 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.

7.6.2. 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.

7.6.3. 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.

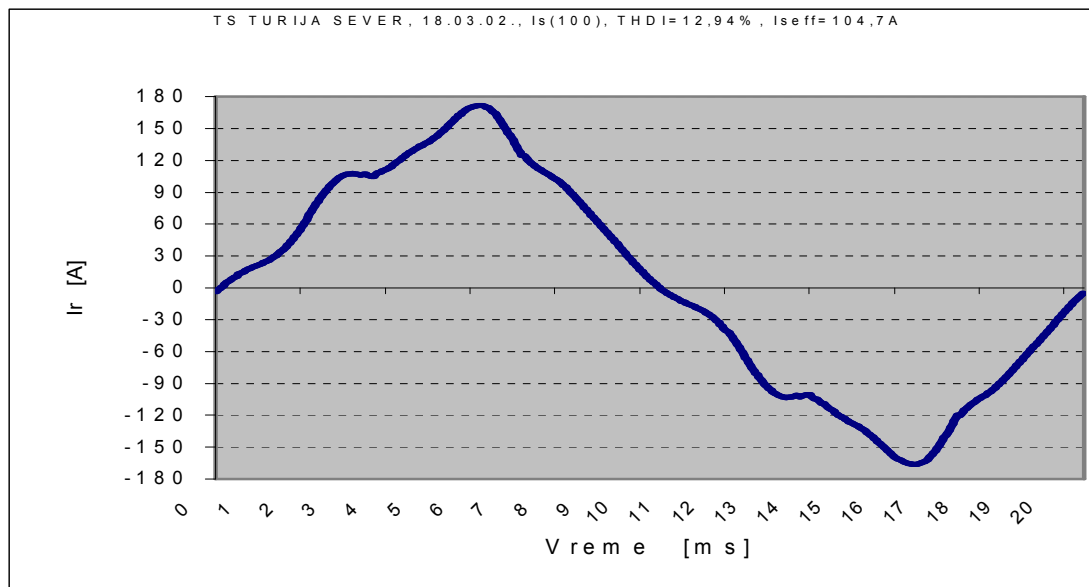
Kvalitetan prikaz rezultata merenja viših harmonika je od velikog značaja za razumevanje pojave i pravilno tumačenje dobijenih rezultata. Cilj je da se na jednostavan način obuhvati veliki broj podataka i da se kroz prikaz uputi nedvosmislena poruka o postojanju ili nepostojanju problema. U praksi se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

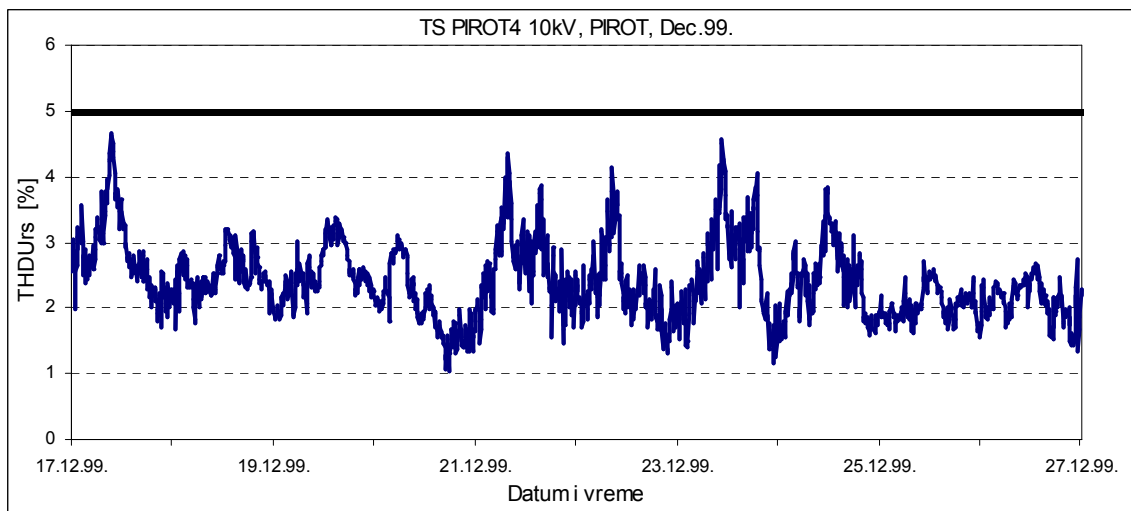
1. u obliku izgleda vremenske funkcije napona ili struje (posredno), i
2. u obliku vremenske promene ukupne ili pojedinačne harmonijske distorzije (THD ili HD) – relativne vrednosti.

Na slici 7.23 dat je primer izgleda talasnog oblika struje i napona snimljenog tokom merenja u distributivnoj mreži na nisko-naponskim sabirnicama sa izraženim harmonijskim izobličenjem. Lako se može uočiti odstupanje od sinusnog oblika, odnosno prisustvo viših harmonika.



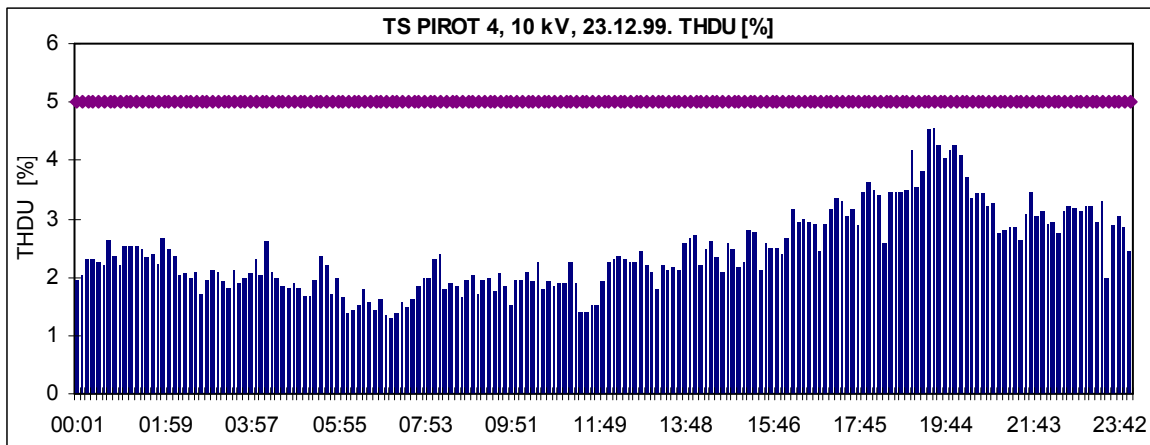
Slika 7.23 - Primer talasnog oblika struje snimljenog na 0,4 kV izvodu.

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 7.24 prikazan je primer prikaza vremenske promene THDU tokom jednog mernog ciklusa (10 dana) snimljen na srednje-naponskim sabirnicama.



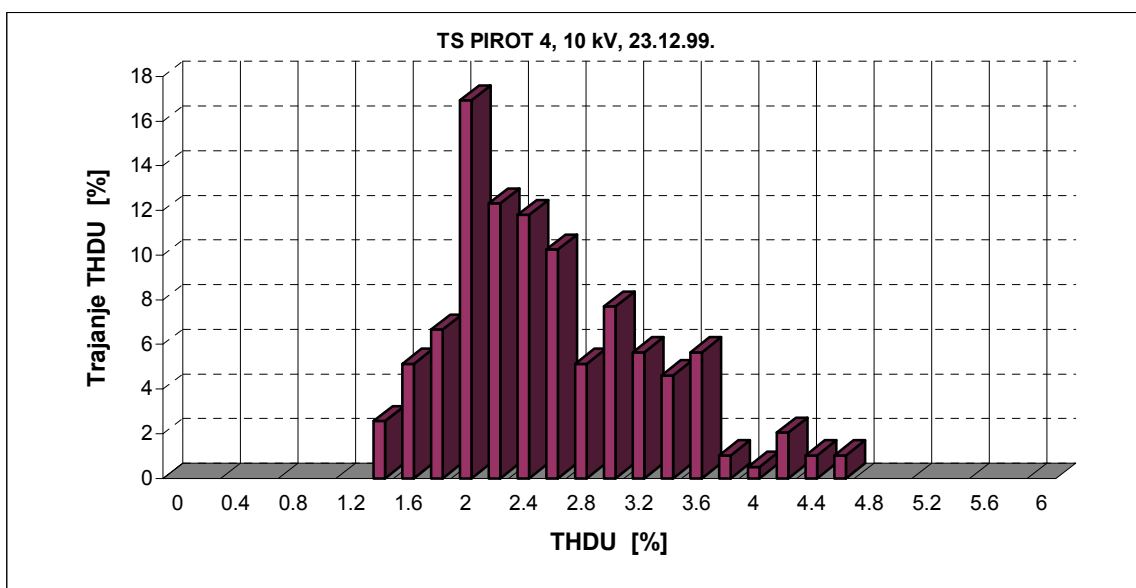
Slika 7.24 - Vremenska promena harmonika napona (THDU) na sabirnicama 10kV.

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 7.24), zbog velikog broja podataka (1008 merenja), takva diskretnost se vizuelno gubi. Međutim, ako se dijagram uveliča, na primer, posmatranjem dnevnog dijagrama, ona postaje očigledna. Na slici 7.25 predstavljen je jedan takav dnevni dijagram, izvađen iz rezultata merenja datih na slici 7.24. Ovakav prikaz ukazuje na skokovite promene sadržaja viših harmonika, što se može povezati sa dinamikom rada nelinearnih potrošača – harmonijskih izvora.



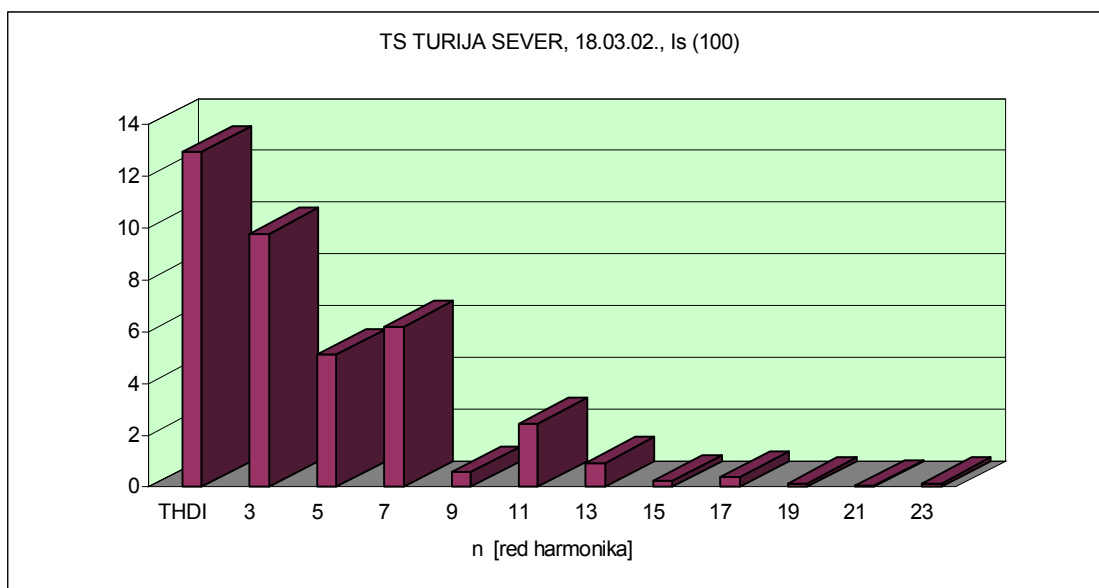
Slika 7.25 – Diskretni vremenski prikaz promene THDU tokom jednog dana.

Za analizu kompletnih rezultata merenja, pogodno je da diskretni vremenski prikaz daje vremensko trajanje pojedinih nivoa THD ili harmonika. Na slici 7.26 dat je primer takvog prikaza za THDU u slučaju merenja prikazanog na slici 7.25. Vidi se, na primer, da se najčešće javlja izobličenje od THDU = 2%, oko 17% vremena, zatim THDU=2,2%, oko 12% vremena, itd., odnosno da se izobličenje između THDU=2% i THDU=3% javlja u 63,2% vremena. Ovakvo predstavljanje je pogodno za procenu o mogućnosti pojave nekog negativnog efekta.



Slika 7.26 – Diskretni vremenski prikaz - trajanje THDU (u %) tokom jednog dana.

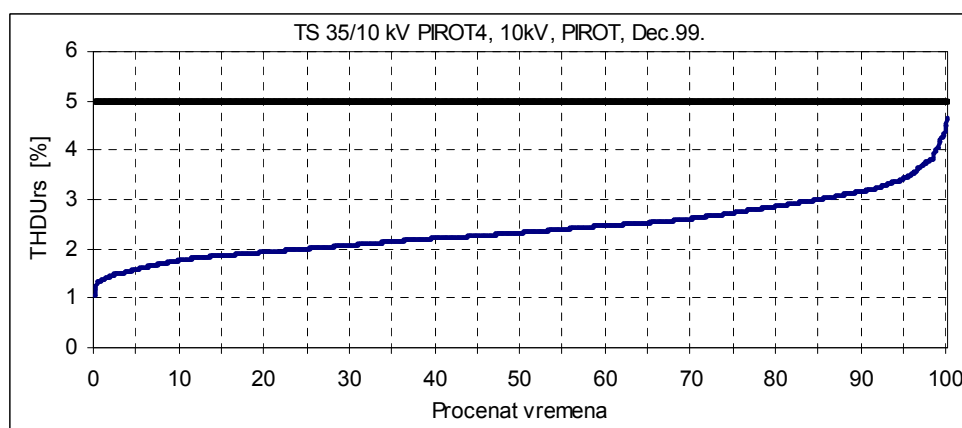
Prikaz u frekventnom domenu je rezultat primene Furijeove transformacije na talasni oblik signala. On ukazuje koji su harmonici prisutni ili dominantni i na taj način indirektno na uzroke i opasnosti njihovog prisustva. Na primer, spektar talasnih oblika sa slike 7.23 dat je na slici 7.27. Ovakav prikaz je pogodan i za analizu prostiranja harmonika u mreži.



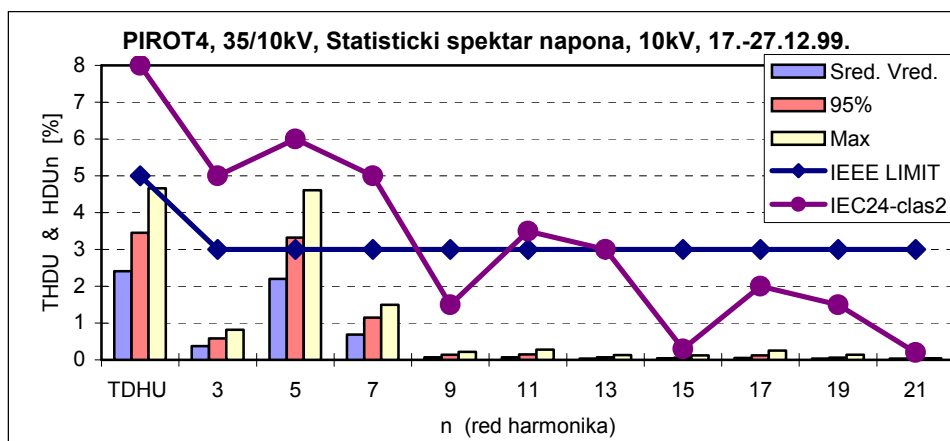
Slika 7.27 - Spektar struje sa slike 7.23.

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 7.28 prikazan je statistički dijagram za THDU za rezultate merenja sa slike 7.24. 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 7.29 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 7.28 – Kumulativna verovatnoća – THDU sa slike 5.24.



Slika 7.29 – Statistički spektar napona na sabirnicama industrije “Tigar”, Pirot.

7.7. 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 sprezanjem 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, sprezanjem 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 pridodatom prigušnicom. Rezonantna frekvencija filtera se proračunava uvek da bude nešto ispod frekvencije najnižeg dominantnog harmonika. Time se obezbeđuje 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 energetska elektronska 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 otklanjanje 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 kondenzatora 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 dovela do pregorevanja osigurača kondenzatorskih 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 ($HDU_2 \approx 1,5\%$, $HDU_4 \approx 1\%$). 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.

7.8. 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 Elektrovojdine", 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 Symmetrical Components", *Power Quality Assurance*, Jan/Feb. 1997.
8. C.I.Budeanu: "Puissances reactives et fictives", *Instytut Romain de l'Energie*, Bucharest, 1927.

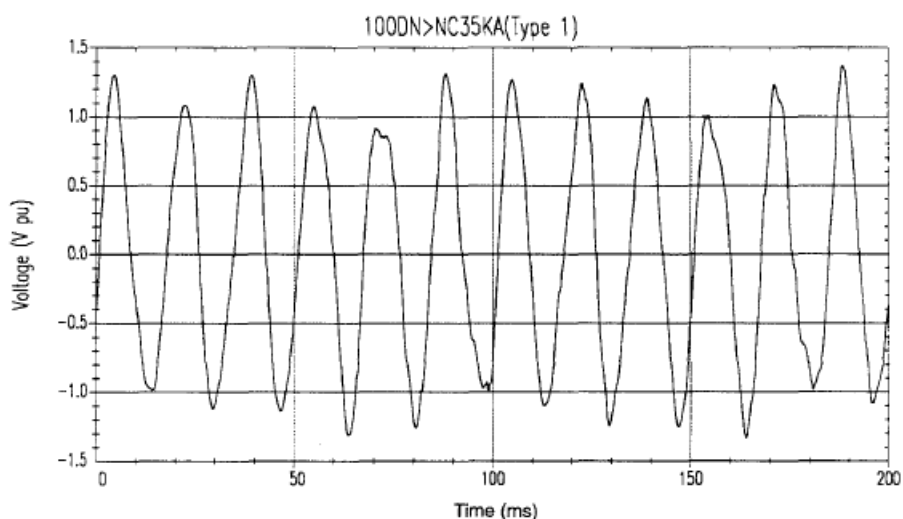
-
9. IEEE Tutorial Course: “*Nonsinusoidal Situations: Effects on the Performance of Meters and Definitions of Power*”, Organized by A.Emanuel, IEEE, 1990.
 10. IEC Standard 61000-2-4: “*Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2-4: Environment - Compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances*”, International Standard, IEC, Geneva, 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, Geneva, 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.

8. FLIKER

8.1. Opis pojave

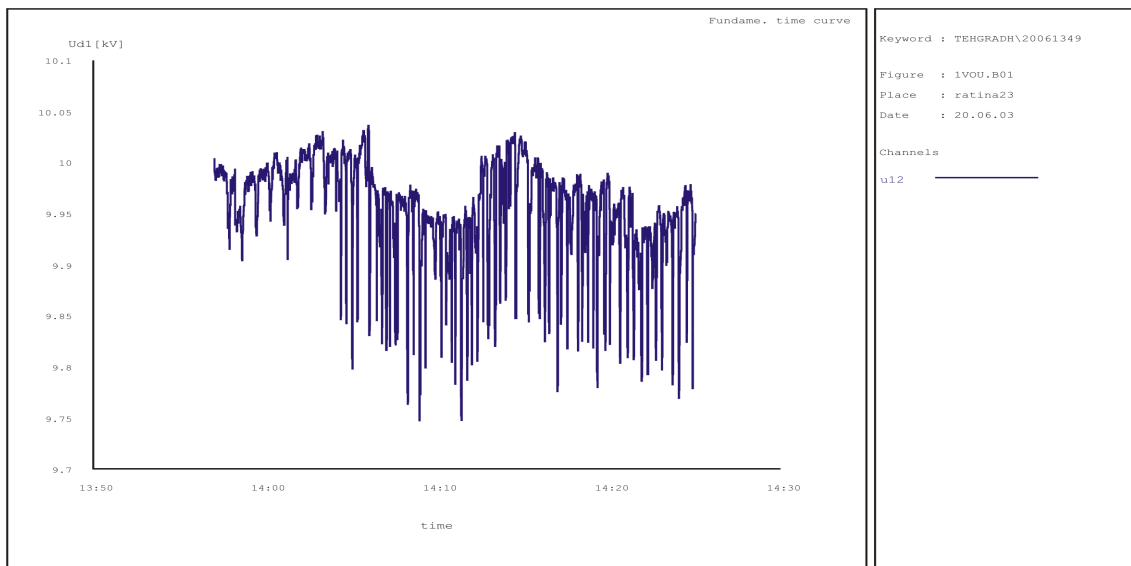
Pojava brze promene efektivne vrednosti napona poznata je pod imenom fliker. Javlja se prilikom rada mašina ili uređaja, koji povlače velike vrednosti struje u kratkim vremenskim intervalima (start velikih asinhronih motora, rad elektrolučnih peći, elektrolučno zavarivanje, rad mašina sa elektro-otpornim zavarivanjem i sl.).

Najčešći uzrok nastanka flikera u prenosnom i distributivnom EES-u Srbije su elektro-lučne peći, kao i startovanje motora i periodično uključivanje/isključivanje velikih potrošača (na primer: uređaja za elektro-otporno ili tačkasto zavarivanje). Na slici 8.1 prikazan je primer oscilograma napona pri radu elektro-lučne peći. Uočljive su varijacije amplitude napona, koje zbog svoje niže frekvencije izazivaju treperenje svetlosti žarulja.



Slika 8.1 - Fluktuacije napona koje uzrokuje rad lučne peći

U poslednje vreme često se javlja fliker izazvan malim industrijskim postrojenjima za fabrikovanje građevinskih armatura, koje koriste mašine na bazi tačkastog zavarivanja. Zbog prirode postupka zavarivanja, kao i velikog broja varova u minuti, mreža rad ovih mašina vidi kao periodične kratke spojeve učestanosti oko 1 Hz. Na slici 8.2 prikazan je dijagram efektivne vrednosti napona na 10 kV sabirnici TC 10/0,4 kV sa koje se napaja jedno takvo postrojenje. Uočavaju se manji ili veći propadi u zavisnosti da li radi jedna ili obe mašine. Pri tome dolazi i do izobličenja struje, ali ono nije kritično (slika 8.3). Ovi poremećaji se šire mrežom i mogu ozbiljno da poremete rad okolnih potrošača, pogotovu ako su oni sastavljeni od osetljivih elektronskih ili mikroelektronskih sklopova [1].



Slika 8.2 - Varijacija napona (fliker) na 10 kV kod rada uređaja sa tačkastim zavarivanjem.

8.2. Priroda flikera

Uočavanje flikera bazirano je na čovekovoju percepciji treperenja sijalica sa užarenim vlaknom (230V, 60W) sa frekvencijama od 10^{-2} do 30 Hz. Treperenje svetlosti iritira čoveka i ometa ga u redovnom radu. Na bazi niza testova na velikim grupama ljudi, definisane su tri zone flikera u zavisnosti od nivoa i učestanosti varijacije:

1. neprimetljiv,
2. vrlo primetan i
3. nepodnošljiv.

Na slici 7.3 prikazane su pomenute zone na bazi istraživanja kompanije «General Electric» (USA), koje se najčešće koriste [2]. Posmatra se fliker u ustaljenom stanju, gde se oscilacije napona ponavljaju sa određenom učestanošću. Dijagram predstavlja dopušteno kolebanje napona V_t u [%] u funkciji broja oscilacija. Kolebanje napona V_t definisano je sa:

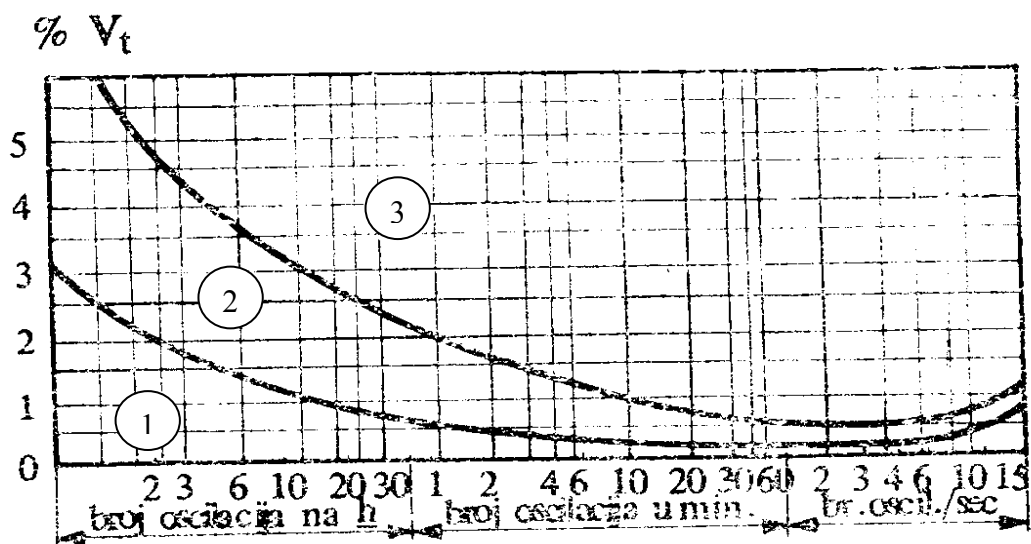
$$V_t = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_n} \cdot 100 \quad [\%] \quad (8.1)$$

gde su U_{\max} , U_{\min} , U_n – maksimalna, minimalna i nominalna vrednost napona u tački napajanja, respektivno. Za dato (prisutno) kolebanje napona može se očitati broj oscilacija koji izaziva neprimetljiv, odnosno nepodnošljiv fliker ili obrnuto.

Pored smetnji koje izaziva kod čoveka, fliker utiče i na rad uređaja priključenih na mrežu u kojoj se javlja [3]. Za taj slučaj definisani su posebni indikatori od kojih se najčešće koriste:

P_{st} – kratkotrajni fliker indikator, koji definiše jačinu flikera u kraćim intervalima (reda minuta),
 P_{lt} – dugotrajni fliker indikator, koji definiše jačinu flikera u dužim intervalima (reda sati).

Najčešće se koristi kratkotrajni fliker indikator. Vrednost $P_{st} = 1$ se smatra maksimalnom dopuštenom vrednošću (limitom) za uređaje čija nazivna struja ne prelazi 75 A, dok za veće uređaje dopuštena vrednost je u granicama $0,6 < P_{st} < 1$ [3,4].



Slika 8.3 – Fliker krive na bazi istraživanja u kompaniji “General Electric” [1].

8.3. Granice flikera

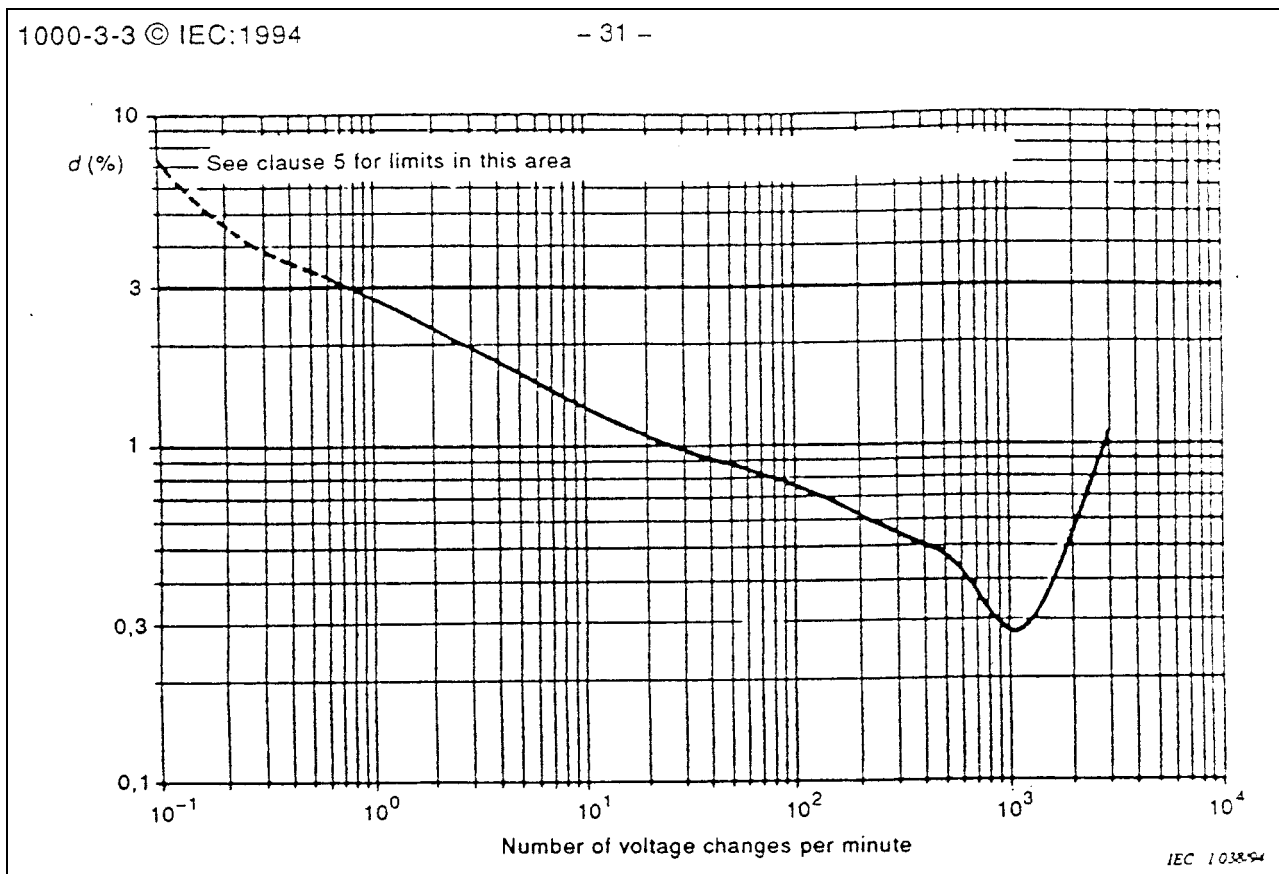
Radi lakšeg korišćenja, limit $P_{st} = 1$ predstavlja se grafički za različite oblike kolebanja napona. Na slici 7.4 predstavljen je kriva definisana IEC standardom 1000-3-3 za slučaj sa pravougaonim oblikom kolebanja, što odgovara radu uređaja za elektrootporno zavarivanje [3]. Sa dijagrama se može odrediti najveće dopušteno kolebanje napona (d_{lim}) u % za poznati broj oscilacija napona pri kom je $P_{st} = 1$. Ako je stvarna (izmerena) procentualna varijacija napona (d) veća od dopuštene (d_{lim}), tada je fliker indikator veći od 1, tj. fliker je nedopušteno velik. Upotrebom krive sa slike 8.2 može se izračunati i stvarna vrednost fliker indikatora, korišćenjem relacije:

$$P_{st} = d / d_{lim} \quad (8.2)$$

Za uređaje veće snage, čija ulazna struja prelazi 75 A, definiše se i jednostavan računski način za određivanje P_{st} . Ako je varijacija napona u ustaljenom stanju $d_c < 3\%$, odnosno maksimalna varijacija napona $d_{max} < 4\%$, tada je kratkotrajni fliker faktor definisan sa:

$$P_{st} = \sqrt[3]{S_L / S_{TR}} \quad (8.3)$$

gde je S_L nazivna prividna snaga potrošača, a S_{TR} – nazivna prividna snaga napojnog transformatora.



Slika 8.4 – Granice flikera za $P_{st}=1$ pri pravougaonim varijacijama napona [2].

8.4. Literatura

1. D.Dujić, V.Katić, D.Reljić: "Power Quality at Supply Input of a Small Industrial Plant with Resistance Spot Welding Machines, a Case Study", International PCIM Conference 2004 - Power Electronics, Intelligent Motion, Power Quality, May 25 - 27, 2004, ISBN 3-928643-39-8, Nürnberg (Germany), pp.824-829.
2. Ejup Hot: "Elektrotermička konverzija energije", Svjetlost, Sarajevo, 1985.
3. International Electrotechnical Commission, "International Standard IEC 1000-3-3: Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3: Limits - Section 3", IEC, Geneve, 1994.
4. International Electrotechnical Commission, "International Standard IEC 1000-3-5: Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3: Limits - Section 5", IEC, Geneve, 1994.

Tempus Joint European Project
CD JEP-18126-2003



Treba da se ubaci bar kod!