

# Mjerenje i analiza kvalitete električne energije u industriji papira

---

Jesenović, Vedran

Master's thesis / Diplomski rad

2019

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:399488>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-27**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**  
**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

**Sveučilišni studij**

**MJERENJE I ANALIZA KVALITETE ELEKTRIČNE ENERGIJE U**  
**INDUSTRIJI PAPIRA**

**Diplomski rad**

**Vedran Jesenović**

**Osijek, 2019.**

## SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE U INDUSTRIJSKIM POSTROJENJIMA.....	2
2.1. Općenito o kvaliteti električne energije .....	2
2.2. Harmonici u elektroenergetskom sustavu .....	3
2.2.1. Definicija harmonika .....	3
2.2.2. Parni i neparni harmonici .....	7
2.2.3. Harmonijska rotacija faze i odnos faze i kuta .....	8
2.2.4. Uzroci naponskih i strujnih harmonika .....	12
2.2.5. Ukupno harmonijsko izobličenje (THD) .....	13
2.2.6. Harmonijski izvori iz komercijalnih opterećenja .....	13
2.2.7. Utjecaj harmonika na uređaje elektroenergetskog sustava.....	14
2.3. Naponski propadi i prekidi .....	17
2.3.1. Izvori naponskih propada i prekida .....	18
2.3.2. Procjena naponskih propada .....	22
2.3.3. Područja ranjivosti .....	22
2.3.4. Osjetljivost opreme na naponske propade.....	23
2.3.5. Procjena učinkovitosti prijenosnog i distribucijskog sustava na naponske propade .....	25
2.3.6. Osnovna načela zaštite.....	27
2.3.7. Rješenja na razini krajnjeg korisnika .....	28
3. HARMONICI U INDUSTRIJSKIM POSTROJENJIMA .....	32
3.1. Trofazni energetske pretvarači .....	32
3.1.1. Istosmjerni pogoni .....	34
3.1.2. Izmjenični pogoni .....	34
3.2. Lučni uređaji .....	35
3.3. Zasićeni uređaji .....	37
4. REZULTATI MJERENJA I ANALIZA .....	39
5. ZAKLJUČAK.....	47
LITERATURA .....	48
POPIS SLIKA I TABLICA.....	49
Sažetak: .....	51
Summary: .....	51
ŽIVOTOPIS .....	52

## 1.UVOD

U ovom radu prikazana je analiza kvalitete električne energije kako u teorijskom tako i na konkretnom primjeru mjerenja u tvornici proizvodnje papira. Kako u današnje vrijeme kvaliteta električne energije dobiva sve veći značaj, bitno je da svi pokazatelji kvalitete budu u granicama određenih standarda.

Na temelju izvedenih mjerenja analiziran je učinak viših harmonika i naponskih propada na promatrani stroj te su analizirani mogući izvori tih učinaka.

U drugom poglavlju detaljno su opisani harmonici u elektroenergetskom sustavu. Tu su dani svi grafički i matematički modeli harmonika koji se koriste za lakše razumijevanje problematike. U drugom poglavlju, također, opisana je teorija naponskih propada i njihov nastanak, te mogući načini sprječavanja neželjenih učinaka propada.

U trećem poglavlju detaljnije su opisani harmonici u industrijskim postrojenjima. Tu je razrađena problematika utjecaja pojedinih uređaja u industrijskom postrojenju na harmonike.

U četvrtom poglavlju analizirano je mjerenje u industrijskom postrojenju, te su dani zaključci na temelju obrade podataka u programu PQ log.

## **2. KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE U INDUSTRIJSKIM POSTROJENJIMA**

### **2.1. Općenito o kvaliteti električne energije**

Sama definicija kvalitete električne energije razlikuje se zavisno o tome tko ju promatra. Za početnu točku opskrbe električnom energijom kvaliteta električne energije predstavlja točnost od 99,98% da je njen sustav pouzdan. Kriteriji koji su postavljeni od strane regulatornih agencija obično su u tom smislu[1].

Proizvođači električne opreme definiraju kvalitetu električne energije kao karakteristike napajanja koje omogućuju ispravan rad opreme. Zajednička točka kvalitete električne energije u više područja je napajanje, te se može reći da je definicija kvalitete električne energije bilo koji problem koji se očituje u odstupanjima napona, struje ili frekvencije, a rezultira kvarovima ili pogrešnim radom električne opreme[2].

Postoje mnogi nesporazumi u vezi s uzrocima problema s kvalitetom električne energije. Tu se ponajprije misli na različite perspektive pogleda na kvar od strane proizvođača te krajnjeg kupca. Vrlo je često da se kvar koji se dogodio kod krajnjeg korisnika ne zabilježi kod proizvođača. Takav primjer je sklapanje kondenzatora, što je uobičajeno i normalno u sustavu, ali može uzrokovati prijelazne prenapone koji ometaju strojeve.

Također, jedan od primjera je trenutni kvar na drugim mjestima u sustavu koji uzrokuje da se napon trenutno spusti na mjestu dotičnog kupca. Takav događaj može uzrokovati da se pogon s promjenjivom brzinom isključi, a u mreži se neće prikazati poremećaj kod krajnjeg korisnika osim ako nije instaliran program za praćenje kvalitete električne energije.

Osim stvarnih problema s kvalitetom električne energije, postoje i problemi s kvalitetom električne energije koji mogu biti povezani s hardverom, softverom i kvarom upravljačkog sustava.

Kako se proširila svijest o sve većem utjecaju poremećaja kvalitete električne energije na industrijsku proizvodnju i općenitu kvalitetu života definirale su se organizacije koje su donijele na snagu norme za točno definiranje poremećaja[3].

Neke od vodećih organizacija su: IEEE (engl. Institute of Electrical and Electronic Engineers), IEC (engl. International Electrotechnical Commission) i CENLEC (engl. European Committee for Electrotechnical Standardization)[3].

Republika Hrvatska koristi standard HRN EN 50160, a on definira naponske karakteristike električne energije iz javnih distribucijskih mreža. Temeljni pokazatelji ovog standarda su: kolebanje napona i treperenje, harmonici, signalni naponi, frekvencija opskrbnog napona, nesimetričnost napona, naponski propadi, previsoki naponi i prekid opskrbe [3].

## 2.2. Harmonici u elektroenergetskom sustavu

### 2.2.1. Definicija harmonika

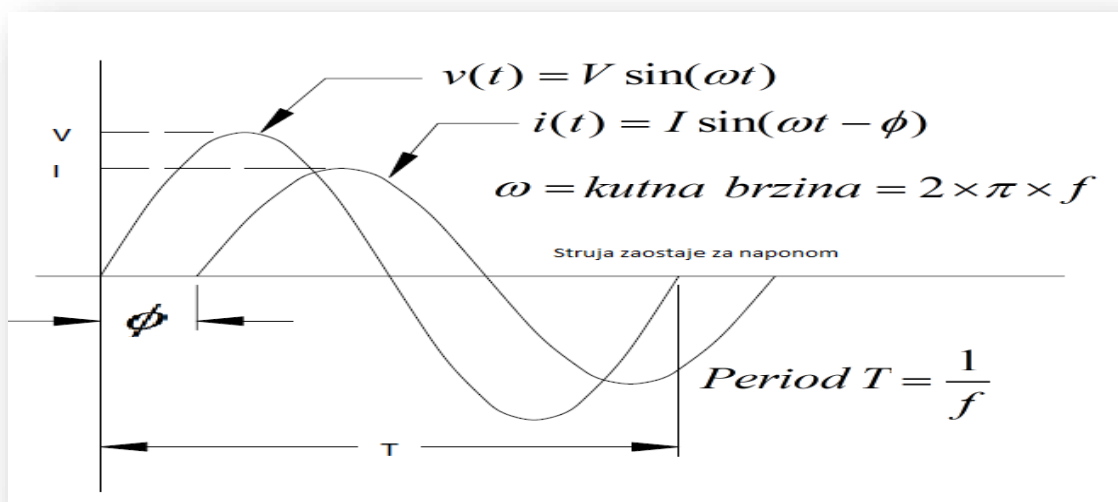
Funkcija sinusnog napona ili struje koja ovisi o vremenu  $t$  može biti predstavljena sljedećim izrazima:

$$\text{Funkcija napona, } v(t) = V \sin(\omega t) \quad (2-1)$$

$$\text{Funkcija struje, } i(t) = I \sin(\omega t \pm \phi) \quad (2-2)$$

Gdje je  $\omega = 2 \times \pi \times f$  poznat kao kutna brzina periodičkog valnog oblika i  $\phi$  je razlika u faznom kutu između napona i valnih oblika struje koji se nazivaju zajedničkom osi.

Znak faznog kuta  $\phi$  je pozitivan ako struja prethodi naponu ili negativan ako struja zaostaje za naponom. Slika 2.1. sadrži valne oblike napona i struje izražene jednadžbama (2-1) i (2-2) i koji predstavljaju čistu sinusoidu.

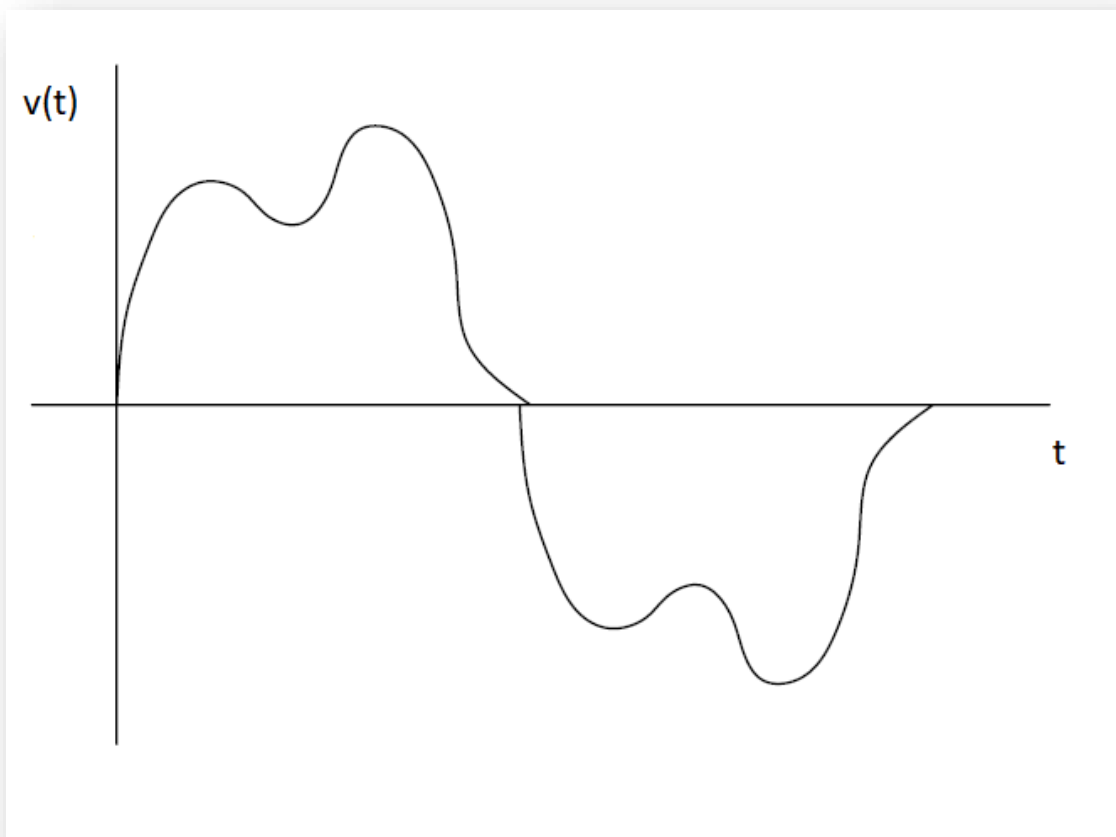


Slika 2.1. Sinusoidna naponska i strujna frekvencija vremena

Za periodički nesinusoidni valni oblik prikazan na slici 2.2. pojednostavljeni Fourierov izraz navodi:

$$v(t) = V_0 + V_1 \sin(\omega t) + V_2 \sin(2\omega t) + V_3 \sin(3\omega t) + \dots + V_n \sin(n\omega t) + V_{n+1} \sin((n+1)\omega t) + \dots \quad (2-3)$$

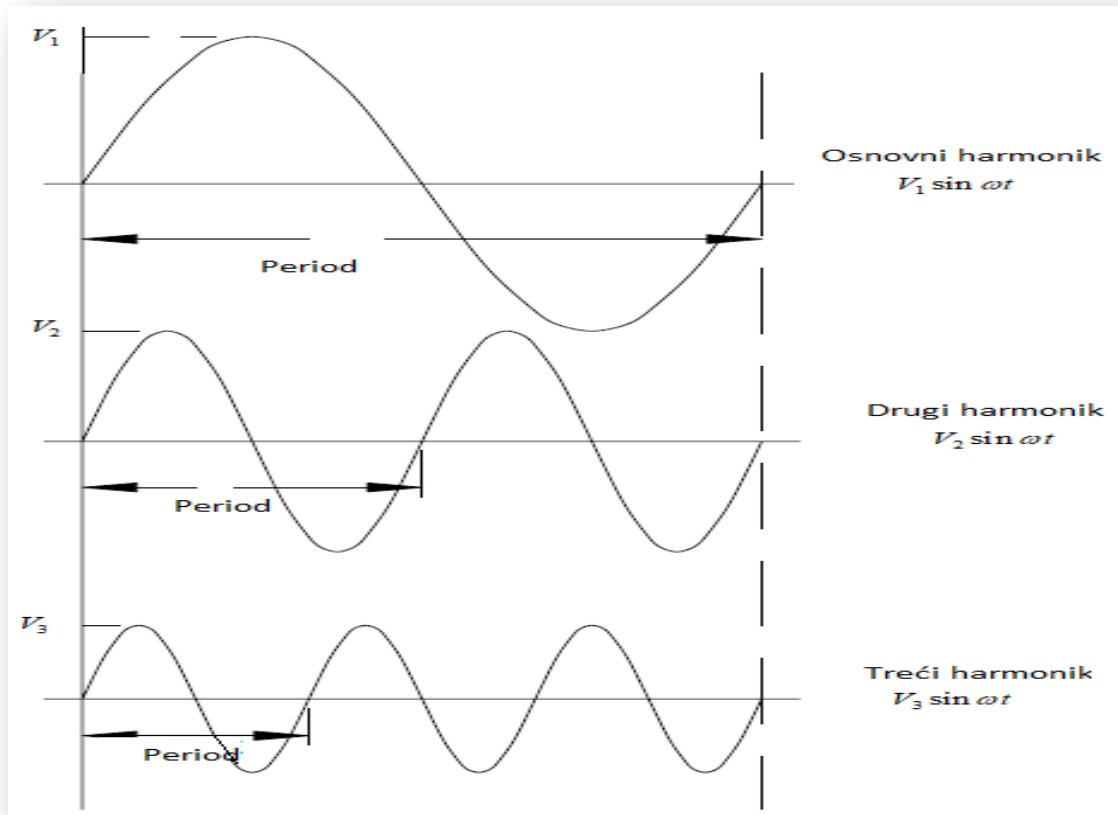
Fourierov red je beskonačna serija. U ovoj jednažbi,  $V_0$  predstavlja konstantu ili DC komponentu valnog oblika.  $V_1, V_2, V_3, \dots, V_n$  su vršne vrijednosti periodičkog valnog oblika. Osnovna frekvencija (ili prvi harmonik) ima frekvenciju  $f$ , drugi harmonik ima frekvenciju  $2 \times f$ , treći harmonik ima frekvenciju  $3 \times f$ , a  $n$ -ti harmonik ima frekvenciju  $n \times f$ .



**Slika 2.2. Nesinusoidni naponski valni oblik Fourierovog reda**

Značaj harmoničnih frekvencija može se vidjeti na slici 2.3. Drugi harmonik prolazi kroz dva kompletna perioda tijekom jednog perioda osnovne frekvencije, a treći harmonik prolazi kroz tri potpuna perioda tijekom jednog perioda osnovne frekvencije.  $V_1, V_2, V_3$  su vršne

vrijednosti harmonijskih komponenti koje čine kompozitni valni oblik, koji također ima frekvenciju  $f$ .



**Slika 2.3. Osnovni, drugi i treći harmonik**

Sposobnost da se izrazi nesinusoidni valni oblik kao zbroj sinusoidnih valova omogućuje korištenje uobičajenih matematičkih izraza i formula za rješavanje problema u elektroenergetskom sustavu. Da bih se pronašao učinak nesinusoidalnog napona ili struje na dio opreme, potrebno je samo odrediti učinak pojedinih harmonika i zatim vektorski sumirati rezultate kako bih se dobio neto učinak [2].

Slika 2.4. ilustrira kako se pojedinačni harmonici koji su sinusoidni mogu dodati kako bih se stvorio nesinusoidni valni oblik. Fourierov raspis u jednadžbi (2-3) pojednostavljen je kako bih se pojasnio koncept harmonijskih frekvencijskih komponenti u nelinearnoj periodičnoj funkciji. Kompleksniji izraz za periodični naponski val s temeljnom frekvencijom  $\omega = 2 \times \pi \times f$  je sljedeći,



$$v(t) = V_0 + \sum (a_k \cos k\omega t + b_k \sin k\omega t) \quad (\text{za } k=1 \text{ do } \infty) \quad (2-4)$$

Gdje su  $a_k$  i  $b_k$  koeficijenti individualnih harmonijskih komponenti. Pod određenim uvjetima, kosinusni ili sinusni izrazi mogu nestati, dajući nam jednostavniji izraz. Ako je funkcija parna funkcija, što znači  $f(-t) = f(t)$ , onda sinusni izrazi nestaju iz izraza. Ako je funkcija neparna  $f(-t) = -f(t)$ , tada kosinusni izrazi nestaju.

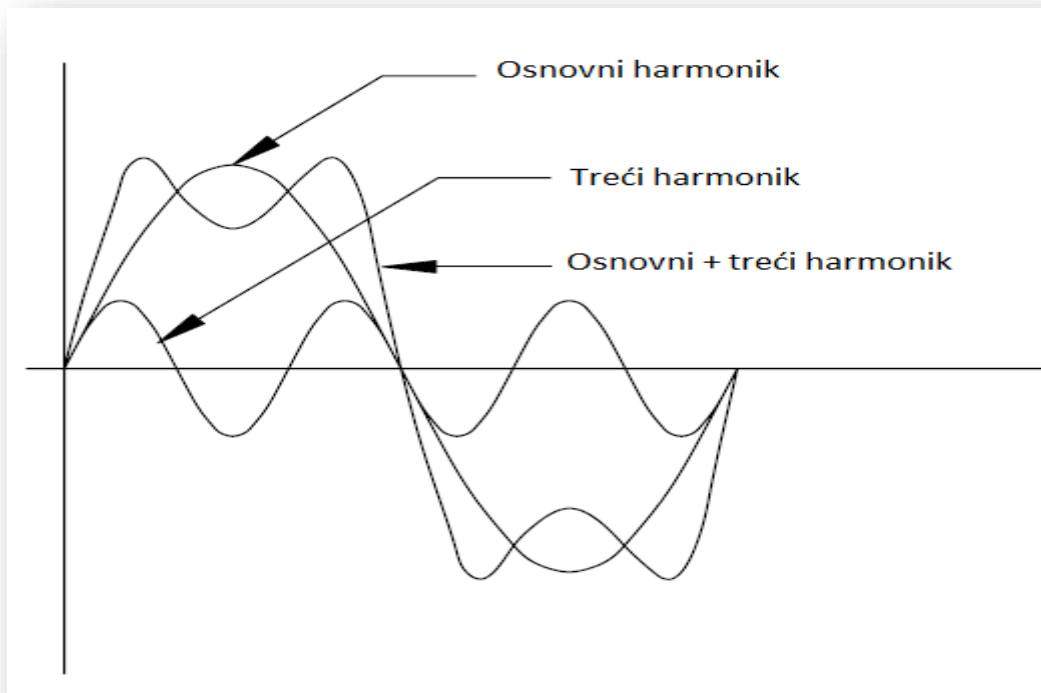
Za ovu analizu koristi se samo pojednostavljeni izraz koji uključuje sinusne izraze. Mora se napomenuti da ako postoje i sinusni i kosinusni izrazi onda utječu samo na kut pomaka harmonijskih komponenti i oblik nelinearnog vala, te se ne mijenja princip primjene Fourierovog reda.

Koeficijenti harmonijskih izraza funkcije  $f(t)$  sadržanih u jednadžbi (2-4) određuju se:

$$a_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} f(t) \cos ktdt, (k = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (2-5)$$

$$b_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} f(t) \sin ktdt, (k = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (2-6)$$

Koeficijenti predstavljaju vršne vrijednosti individualnih harmonijskih frekvencijskih izraza nelinearne periodičke funkcije koja predstavlja  $f(t)$ .



**Slika 2.4. Kreiranje nelinearnog valnog oblika dodavanjem osnovnog i trećeg harmonika u frekvencijski valni oblik [2, str.83]**

### 2.2.2. Parni i neparni harmonici

Kako i samo ime govori parni harmonici imaju parne brojeve (npr. 2, 4, 6, 8), a neparni neparne brojeve (npr. 3, 5, 7, 9). Harmonijski broj 1 dodijeljen je temeljnoj frekvencijskoj komponenti periodičnog vala. Harmonijski broj 0 predstavlja konstantnu ili istosmjernu komponentu periodičkog vala.

Istosmjerna komponenta je neto razlika između pozitivne i negativne polovice jednog potpunog perioda valnog oblika. Istosmjerna komponenta valnog oblika ima neželjene učinke, osobito na transformatore, zbog fenomena zasićenja jezgre.

Zasićenje jezgre uzrokovano je djelovanjem jezgre na razini magnetskog polja iznad koljena krivulje magnetizacije. Transformatori su dizajnirani da rade ispod koljena krivulje magnetizacije. Kada se na namotaju transformatora primjenjuju istosmjerni naponi ili struje, u jezgri transformatora postavljaju se velika istosmjerna magnetska polja. Zbroj izmjeničnih i istosmjernih magnetskih polja može prebaciti rad transformatora u područja koja su prošla krivulju zasićenja[2].

Rad u području zasićenja postavlja velike zahtjeve za električnom energijom. Gubitci transformatora se značajno povećavaju, što uzrokuje prekomjerno povećanje temperature. Vibracije jezgre postaju sve izraženije kao rezultat rada u području zasićenja.

Obično se na harmonike gleda kao na cijele brojeve, ali neki uređaji mogu proizvesti harmonike napona i struje koji nisu cijeli brojevi. Električne i lučne peći su primjeri opterećenja koja generiraju harmonike koji nisu cjelobrojni. U oba slučaja kada se luk stabilizira, ne cjelobrojni harmonici većinom nestanu, te ostaju samo cjelobrojni harmonici.

Većina nelinearnih opterećenja proizvodi harmonike koji su neparni višekratnici osnovne frekvencije. Trebaju postojati određeni uvjeti za proizvodnju parnih harmonika. Neravnomjerno protjecanje struje između pozitivne i negativne polovice jednog perioda rada može generirati parne harmonike. Struje magnetiziranja transformatora sadrže osjetne razine parnih harmonijskih komponenti, kao i lučne peći prilikom pokretanja[2].

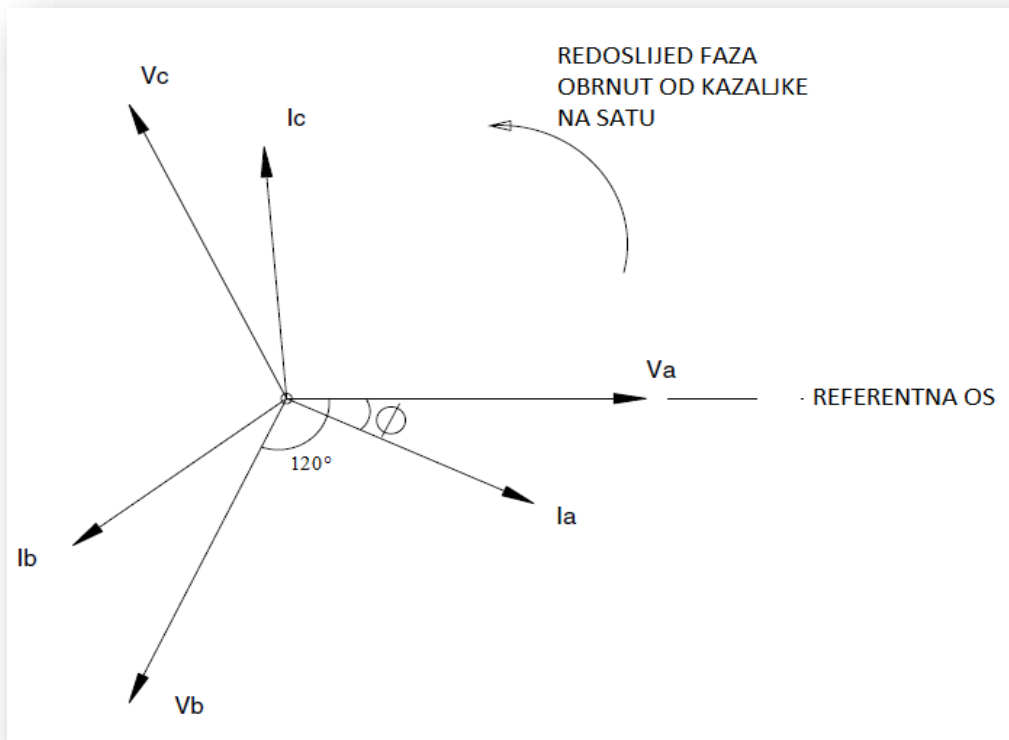
Međuharmonici imaju frekvencije ispod temeljne frekvencije i veoma su rijetki u elektroenergetskim sustavima. Kada su prisutni, temeljni razlog je rezonancija između harmoničnih struja ili napona sa induktivnošću i kapacitetom elektroenergetskog sustava.

Međuharmonici se mogu generirati kada je sustav visoko induktivan (lučna peć prilikom pokretanja) ili ako elektroenergetski sustav također sadrži velike kondenzatore za korekciju faktora snage ili filtriranje. Takvi uvjeti uzrokuju lagane oscilacije koje su relativno nedirnuti te rezultiraju naponskim propadima i flikerima.

### **2.2.3. Harmonijska rotacija faze i odnos faze i kuta**

Do sada su harmonici promatrani kao samostalni subjekti koji rade na stvaranju izobličenja valnog oblika u izmjeničnim naponima i strujama. Ovaj pristup je ispravan ako se promatraju jednofazni naponi i struje; međutim u trofaznom sustavu, harmonici jedne su ovisni o drugim fazama kako rotacijski tako i po faznom kutu [2].

U proučavanju elektroenergetskog sustava taj odnos je veoma važan. U uravnoteženom trofaznom električnom sustavu naponi i struje imaju položajni odnos kako je prikazano slikom 2.5.



**Slika 2.5. Balansiran trofazni sustav [2, str.86]**

Tri napona su međusobno udaljena za  $120^\circ$ , kao i tri struje. Normalna rotacija faza je a – b – c, što je suprotno od smjera kazaljke na satu i označeno kao pozitivni smjer faza. Za harmonijske analize, ti odnosi su još uvijek primjenjivi, ali se kao referenca koriste temeljne komponente napona i struje.

Svi ostali harmonici koriste temeljnu frekvencije kao referencu. Temeljne frekvencije imaju pozitivan redoslijed faza. Kut između temeljnog napona i temeljne struje je kut faktora snage.

Kako bi shvatili kako se harmonici uklapaju u prostorno – vremensku sliku moraju se pogledati trenutni harmonijski fazori. Slika se dodatno može pojednostaviti ograničavajući se samo na neparne harmonike, koji su pod normalnim i uravnoteženim uvjetima najrasprostraniji [2].

Sljedeći odnosi vrijede za komponente struje u trofaznom elektroenergetskom sustavu:

$$i_{a1} = I_{a1} \sin \omega t \quad (2-7)$$

$$i_{b1} = I_{b1} \sin(\omega t - 120^\circ) \quad (2-8)$$

$$i_{c1} = I_{c1} \sin(\omega t - 240^\circ) \quad (2-9)$$

Negativni kutovi pomaka pokazuju da su temeljni fazori  $i_{b1}$  i  $i_{c1}$  prate fazor  $i_{a1}$  prema navedenom kutu. Slika 2.6. a pokazuje osnovne strujne fazore.

Izrazi za treći strujni harmonik su:

$$i_{a3} = I_{a3} \sin 3\omega t \quad (2-10)$$

$$i_{b3} = I_{b3} \sin 3(\omega t - 120^\circ) = I_{b3} \sin(3\omega t - 360^\circ) = I_{b3} \sin 3\omega t \quad (2-11)$$

$$i_{c3} = I_{c3} \sin 3(\omega t - 240^\circ) = I_{c3} \sin(3\omega t - 720^\circ) = I_{c3} \sin 3\omega t \quad (2-12)$$

Izrazi za treće harmonike pokazuju da su u fazi te da je međusobni pomak između njih nula. Slika 2.6 b nam prikazuje fazore trećih harmonika.

Izrazi za pete strujne harmonike su:

$$i_{a5} = I_{a5} \sin 5\omega t \quad (2-13)$$

$$i_{b5} = I_{b5} \sin 5(\omega t - 120^\circ) = I_{b5} \sin(5\omega t - 600^\circ) = I_{b5} \sin(5\omega t - 240^\circ) \quad (2-14)$$

$$i_{c5} = I_{c5} \sin 5(\omega t - 240^\circ) = I_{c5} \sin(5\omega t - 1200^\circ) = I_{c5} \sin(5\omega t - 120^\circ) \quad (2-15)$$

Slika 2.6. c pokazuje fazore petih harmonika. Mora se primijetiti da je redosljed strujnih faza petog harmonika u smjeru kazaljke na satu i suprotan temeljnom. Peti harmonici su harmonici negativnog niza.

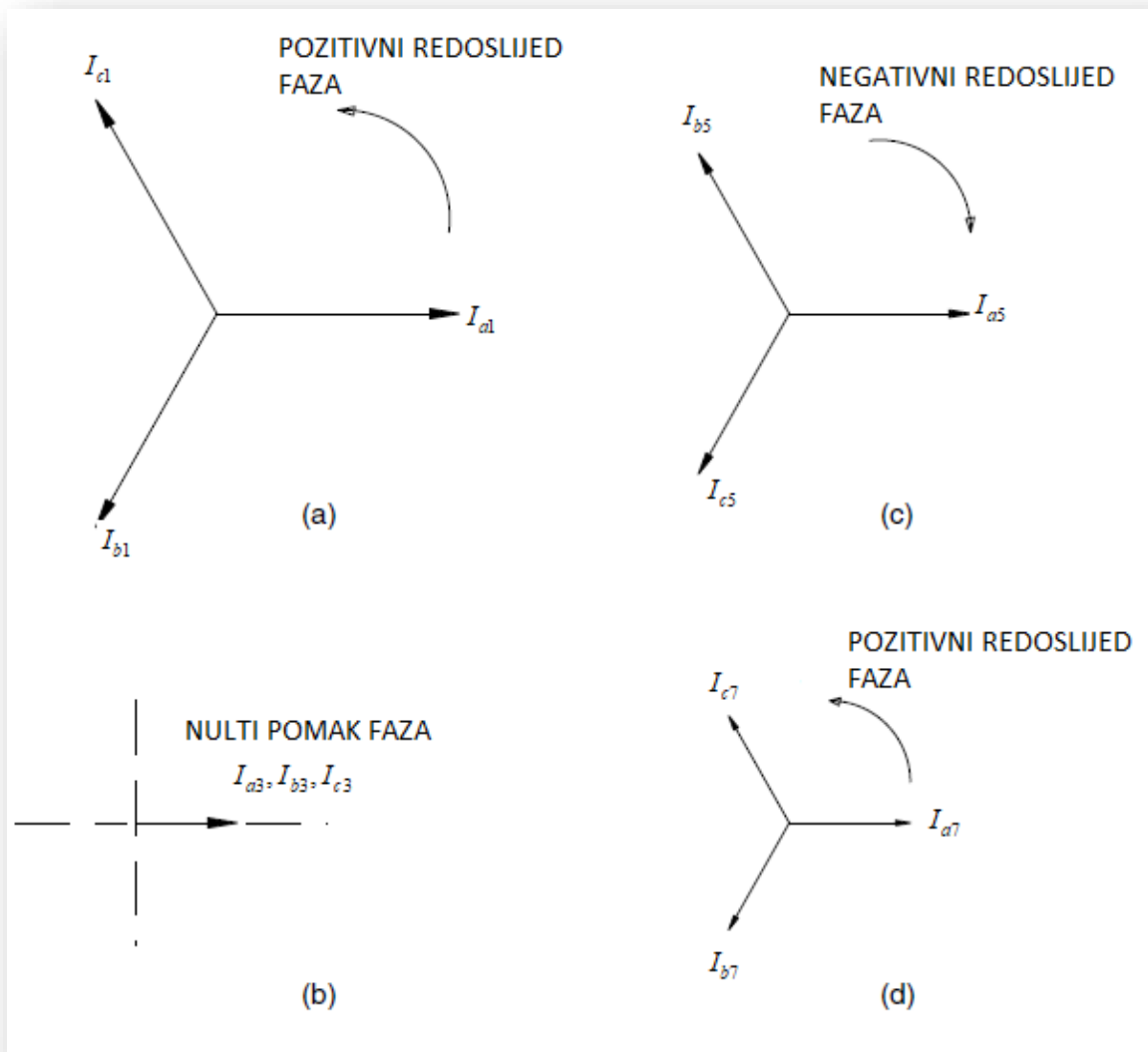
Slično tome, izrazi za sedme strujne harmonike su:

$$i_{a7} = I_{a7} \sin 7\omega t \quad (2-16)$$

$$i_{b7} = I_{b7} \sin 7(\omega t - 120^\circ) = I_{b7} \sin(7\omega t - 840^\circ) = I_{b7} \sin(7\omega t - 120^\circ) \quad (2-17)$$

$$i_{c7} = I_{c7} \sin 7(\omega t - 240^\circ) = I_{c7} \sin(7\omega t - 1680^\circ) = I_{c7} \sin(7\omega t - 240^\circ) \quad (2-18)$$

Na slici 2.6. d su prikazani fazori sedmih strujnih harmonika. Sedmi harmonici imaju isti fazni slijed kao i temeljni te su pozitivni harmonijski nizovi.



Slika 2.6. a) temeljni fazori, b) fazori trećeg harmonika, c) fazori petog harmonika, d) fazori sedmog harmonika [2, str. 87]

Tablica 2.1. razvrstava harmonike u smislu njihovih odgovarajućih redoslijeda nizova.

Tablica 2.1. Ovisnost harmonijskog niza o faznom slijedu

Harmonijski niz	Slijed
1, 4, 7, 10, 13, 16, 19	Pozitivan
2, 5, 8, 11, 14, 17, 20	Negativan
3, 6, 9, 12, 15, 18, 21	Nulti

#### 2.2.4. Uzroci naponskih i strujnih harmonika

Čisti sinusni valni oblik s nultim harmonijskim izobličenjem je samo hipotetska pretpostavka, ali ne i praktična. Valni oblik napona, čak i na mjestu nastanka, sadrži malu količinu izobličenja zbog neujednačenosti u magnetskom polju i diskretnoj prostornoj raspodjeli svitaka oko utora statora generatora[2].

Izobličenje na mjestu generiranja je obično vrlo nisko, obično manje od 1%. Stvoreni napon prenosi se stotinama kilometara, transformira se na više razina i na kraju se distribuira krajnjem korisniku. Korisnička oprema generira struje koje su bogate harmonijskim frekvencijskim komponentama, posebno u komercijalnim i industrijskim instalacijama.

Harmonične struje putuju do izvora napajanja, strujna izobličenja rezultiraju dodatnim izobličenjem napona zbog impedancijskih napona povezanih s različitim uređajima za distribuciju energije, kao što su prijenosni i distribucijski vodovi, transformatori, kabeli, sabirnice.

Nisu sva izobličenja napona posljedica toka izobličene struje kroz impedanciju elektroenergetskog sustava. Na primjer, statički izvor neprekidnog napajanja (UPS) može generirati znatna izobličenja napona radi prirode njegovog rada.

Normalni izmjenični napon se pretvara u istosmjerni i zatim se opet pretvara u izmjenični u pretvaraču UPS-a. Ukoliko ne postoje uređaji da oblikovanje valnog oblika strujnog kruga, naponski valni oblik generiran u UPS-u ima tendenciju da bude izobličen[2].

Nelinearna se opterećenja šire u elektroenergetski sustav, naponska izobličenja su sve učestalija, te postaju sve veća protjecanjem od izvora do opterećenja zbog impedancija u krugu. Strujna izobličenja su većinom izazvana opterećenjima. Čak i opterećenja koja su linearna mogu generirati nelinearne struje ako je valni oblik naponskog izvora značajno izobličen.

Kada nekoliko energetske korisnika dijeli zajednički dalekovod, izobličenje napona izazvano strujnim harmonicima jednog korisnika, može utjecati na ostale korisnike. Zbog toga se izdaju standardi koji će ograničiti količinu strujnih harmonika koju pojedini energetske korisnici mogu injektirati u izvor.

Glavni razlozi strujnih izobličenja su nelinearna opterećenja zbog fluorescentne rasvjete, pogona s promjenjivom brzinom, računala i obrade podataka, lučnih peći i slično. Lako se može dočarati okruženje u kojemu se generira širok spektar harmonijskih frekvencija te se prenosi na

druga opterećenja ili druge energetske korisnike stvarajući tako neželjene rezultate diljem sustava.

### 2.2.5. Ukupno harmonijsko izobličenje (THD)

THD (Total Harmonic Distortion) je mjerilo za efektivnu vrijednost harmonijske komponente deformiranog valnog oblika. THD indeks može biti izračunat za napone i struje te glasi:

$$THDU = \sqrt{\sum_2^{40} (U_h)^2} \frac{100\%}{U_1} \quad (2-19)$$

Gdje je THDU ukupno izobličenje napona,  $\sum_2^{40} (U_h)^2$  je zbroj vrijednosti napona svakog od 2 do 40 harmonika, a  $U_1$  je nazivni napon.

THD je veoma korisna veličina za puno primjena, ali njegove limite moramo poštovati. Može biti koristan kao veličina koja nam govori koliko će se još dodatne topline primijeniti kada se iskrivljeni napon proširi teretom. Također, može nam dati naznaku dodatnih gubitaka uzrokovanih strujom koja teče vodičem. Ali, to ipak nije dobar pokazatelj za naponski poremećaj unutar kapaciteta zato jer se odnosi na vršnu vrijednost naponskog valnog oblika, a ne na toplinsku vrijednost[2].

THD se najčešće koristi da bi se opisao harmonijski poremećaj napona. Naponski harmonici se gotovo uvijek referiraju na temeljne vrijednosti valnog oblika. Zbog toga što temeljni napon odstupa za samo par postotaka, a naponski THD je gotovo uvijek smislen broj.

Varijacije THD-a tijekom određenog vremena često prate različite uzorke koji predstavljaju nelinearne aktivnosti opterećenja u sustavu.

### 2.2.6. Harmonijski izvori iz komercijalnih opterećenja

Mnoga opterećenja instalirana u današnjim elektroenergetskim sustavima su generatori strujnih harmonika. U kombinaciji s impedancijom električnog sustava, opterećenja također stvaraju harmonike napona. Nelinearna opterećenja stoga se mogu promatrati kao harmonijski strujni i naponski generatori.



Pogoni s promjenjivom brzinom vrlo učinkovito obavljaju funkcije upravljanja brzinom. No oni su generatori velikih harmonijskih struja. Fluorescentna rasvjeta koristi manje električne energije za jednak svjetlosni tok kao i žarulje za žarnom niti, ali u procesu proizvode značajne harmonijske struje.

Fluorescentna rasvjeta primarno izaziva treći i peti harmonik. Valni oblik također može sadržavati i male tragove parnih harmonika. Strujni valni oblik je ravan na vrhu zbog pokretanja luka unutar plinske cijevi, što uzrokuje da napon i struja u cijevi ostanu nepromijenjeni za dio svake polovice ciklusa.

Masovno korištenje osobnih računala rezultiralo je strujama viših harmonika u komercijalnim zgradama. Kod osobnih računala i monitora prevladavaju treći i peti harmonik.

### **2.2.7. Utjecaj harmonika na uređaje elektroenergetskog sustava**

Sama tema harmonika u elektroenergetskom sustavu zanimljiva je radi štetnih utjecaja na sustav. Ono što harmonike čini tako štetnima je činjenica učinci da harmonika nisu vidljivi sve dok se ne pojavi kvar. Uvid u to kako harmonici mogu biti u interakciji unutar elektroenergetskog sustava i kako oni mogu utjecati na komponente elektroenergetskog sustava važni su za prevenciju kvarova [2].

#### **a) Transformatori**

Harmonici mogu utjecati na transformatore na dva načina. Naponski harmonici stvaraju dodatne gubitke u jezgri transformatora jer harmonijski naponi više frekvencije tvore petlju histerezu, koja se preklapa s temeljnom petljom. Svaka petlja predstavlja veću potrebu za magnetizacijom i veće gubitke u jezgri.

Drugi i ozbiljniji učinak harmonika je uslijed struja harmonijskih frekvencija u namotaju transformatora. Harmonijske struje povećavaju efektivnu vrijednost struje koja teče u namotaju transformatora što rezultira dodatnim  $I^2R$  gubitcima. Povećani su i gubici vrtložnih struja u namotajima[2].

Vrtložne struje su cirkulirajuće struje inducirane u vodičima prilikom propuštanja magnetskog toka. Koncentracije vrtložnih struja su veće na krajevima namotaja. Gubici vrtložnih struja namota povećavaju se kao kvadrat harmonijske struje i kvadrat frekvencije struje.

Tako je gubitak vrtložne struje proporcionalan sa  $I_h^2 \times h^2$ , gdje je  $I_h$  efektivna vrijednost harmonijske struja reda h, a h je redoslijed ili broj harmonijskih frekvencija. Vrtložne struje zbog harmonika mogu značajno povećati temperaturu namotaja transformatora. Transformatori koji opskrbljuju velika nelinearna opterećenja moraju biti smanjeni da bi mogli upravljati harmonicima [2].

Taj faktor smanjenja se temelji na postotku harmonijskih struja u opterećenju i nazivnim gubitcima u vrtložnim strujama namota. Te se on računa prema formuli:

$$K = \sum_{h=1}^n \left( \frac{I_h}{I_{rms}} \right)^2 h^2. \quad (2-20)$$

Gdje je h red višeg harmonika,  $I_h$  efektivna vrijednost struje višeg harmonika, a  $I_{rms}$  efektivna vrijednost struje tereta.

#### b) Izmjenični motori

Primjena izobličenog napona na motor rezultira dodatnim gubitcima u magnetskoj jezgri motora. Gubici histereze i vrtložnih struja u jezgri povećavaju se kada se na namotajima motora pojave harmonijski naponi viših frekvencija.

Gubici histereze rastu s frekvencijom, a gubici vrtložnih struja povećavaju se kao kvadrat frekvencije. Također, harmonijske struje uzrokuju dodatne  $I^2R$  gubitke u namotima motora.

Drugi učinak, i mnogo ozbiljniji jesu torzijske oscilacije zbog harmonika. Tablica 2.1. klasificira harmonike u jednu od tri kategorije. Dva najistaknutija harmonika koja se nalaze u tipičnom elektroenergetskom sustavu su peti i sedmi harmonik. Peti harmonik je negativni slijed harmonika, a rezultirajuće magnetsko polje se vrti u suprotnom smjeru od temeljnog polja brzinom koja je pet puta veća od temeljne. Sedmi harmonik je pozitivan slijed harmonika sa rezultirajućim magnetskim poljem koje se okreće u istom smjeru kao i temeljno polje brzinom koja je sedam puta veća od temeljne[2].

Neto efekt je magnetsko polje koje se vrti pri relativnoj brzini 6 puta većoj od brzine rotora. To inducira struje u šipkama rotora s frekvencijom šest puta većom od temeljne. Nastala interakcija između magnetskih polja i rotorski induciranih struja proizvodi torzijske oscilacije

osovine motora. Ako se frekvencija oscilacije podudara s prirodnom frekvencijom rotirajućih elemenata motora, može doći do ozbiljnog oštećenja motora.

Pretjerane vibracije i buka u motoru koji radi u harmonijskom okruženju treba se istražiti da bih se spriječili kvarovi. Motori koji rade u strogo harmonijskom okruženju moraju biti specijalno dizajnirani za primjenu. Proizvođači motora proizvode motore koje pokreću pogoni s promjenjivom brzinom za smanjenje gubitaka. .

#### c) Kondenzatori

Kondenzatori se obično nalaze u komercijalnim i industrijskim elektroenergetskim sustavima kako bih se ispravio nizak faktor snage. Kondenzatori su dizajnirani za rad s maksimalnim naponom od 110% nazivnog napona i 135% nazivne jalove snage. Kada su visoke razine napona i strujni harmonici prisutni, razine su često premašene, te dolazi do kvarova.

Budući da je reaktancija kondenzatora obrnuto proporcionalna frekvenciji, harmonijske struje mogu pronaći put do kondenzatora. Kondenzator se ponaša kao sudoper, apsorbira zalutale strujne harmonike i uzrokuje preopterećenja, koje dovodi kvara u njemu.

Ozbiljnije stanje s mogućnošću znatnog oštećenja uzrokuje fenomen koji se naziva harmonijska rezonancija. Uvjeti rezonancije nastaju kada induktivna i kapacitivna reaktancija postanu jednake sa jednom harmonijskom frekvencijom.

Postoje dva tipa rezonancije, a to su serijska i paralelna. U okruženju bogatom harmonicima, mogu postojati i serijska i paralelna rezonancija. Ako u elektroenergetskom sustavu postoji visoka razina harmonijskog napona ili struje koja odgovara frekvenciji rezonancije, može doći do znatne štete na kondenzatoru kao i na drugim uređajima elektroenergetskog sustava.

#### d) Kabeli

Struja koja teče kabelom proizvodi  $I^2R$  gubitke. Kada strujni teret sadrži harmonijski sadržaj, pojavljuju se dodatni gubitci. Efektivna otpornost kabela raste s frekvencijom radi fenomena znanog kao skin efekt. Skin efekt nastaje kao nejednolika raspodjela električne struje kroz presjek vodiča. Porastom frekvencije izmjenične struje ona teče po površini vodiča te povećava njegov otpor.

#### e) Sabirnički kanalni razvodi

Većina komercijalnih višestrukih instalacija sadrže sabirničke kanalne razvode koji služe kao primaran izvor električne energije do raznih katova. Sabirnički kanalni razvodi koji sadrže više sabirnica podložne su nelinearnom opterećenju, pogotovo ako neutralna sabirnica nosi velike razine trostrukih harmonijskih struja (treći, deveti, itd.) u najgorim mogućim uvjetima, neutralna sabirnica može biti u situaciji da nosi struju jednaku 173% faznih struja[2].

U slučajevima kada se očekuju znatne neutralne struje, sabirnički kanalni razvodi moraju biti odgovarajuće smanjeni.

#### f) Zaštitni uređaji

Harmonijske struje utječu na rad zaštitnih uređaja. Osigurači i uređaji za termičko preopterećenje motora skloni su smetnjama kada su izloženi nelinearnim strujama. Taj faktor se mora uzeti u obzir pri dimenzioniranju zaštitnih uređaja za korištenje u harmonijskom okruženju.

Na elektromehaničke releje također utječu harmonici. Ovisno o konstrukciji, elektromehanički releji mogu raditi brže ili sporije od očekivanog vremena za rad samo na osnovnoj frekvenciji. Na te faktore mora se paziti prije postavljanja releja u rad.

### **2.3. Naponski propadi i prekidi**

Naponski propadi i prekidi povezani su s problemima kvalitete električne energije. Oboje su obično posljedica kvarova u elektroenergetskom sustavu i prekidnih radnji za izoliranje oštećenih dijelova. Karakteriziraju ih varijacije napona izvan okvira normalnog raspona napona [1].

Naponski propad je kratkotrajno smanjenje efektivne vrijednosti napona uzrokovanog kvarovima u elektroenergetskom sustavu i pokretanjem velikih opterećenja, kao što su motori. Trenutačni prekidi (obično ne duži od 2 - 5 s) uzrokuju potpuni gubitak napona i rezultat su radnji poduzetih od strane ovlaštenih opskrbljivača koji pokušavaju ukloniti prolazne kvarove u sustavu [1].

Trajni prekidi dulji od 1 minute općenito su posljedica trajnih kvarova. Elektroenergetska poduzeća suočena su sa sve većim brojem pritužbi na kvalitetu električne

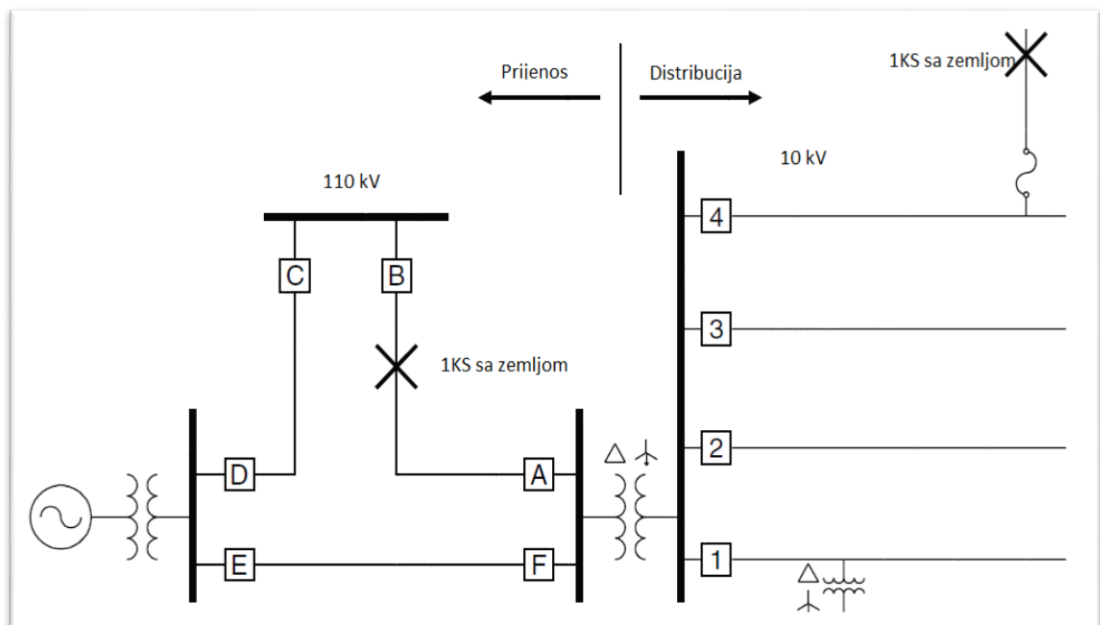
energije zbog propada i smetnji. Priljev digitalnih računala i ostalih tipova elektroničke opreme su glavni uzrok problema [3].

Industrije se sve više oslanjaju na automatiziranu opremu kako bi ostvarile maksimalnu produktivnost da mogu ostati konkurentne. Stoga naponski propadi i prekidi imaju značajan ekonomski utjecaj.

### 2.3.1. Izvori naponskih propada i prekida

Naponski propadi i prekidi općenito su uzrokovani kvarovima (kratkim spojevima) u elektroenergetskom sustavu. Slijedi primjer kupca koji je napajan iz napojnog voda osiguran prekidačem 1 prikazanom na dijagramu na slici 2.7. Ako je kvar na istom napojnom vodu, kupac će uvidjeti pad napona prilikom kvara kada prekidač otvori da bi uklonio kvar. Ako je kvar prolazan, ponovno aktiviranje prekidača trebalo bi biti uspješno i kvar će biti uspješno otklonjen.

Obično će trebati 5 do 6 perioda da bi prekidač ponovo uklopio te se u tom vremenu događaju naponski propadi. Prekidač će ostati otvoren minimalno 12 perioda do 5 sekundi ovisno o praksi ponovnog uključivanja. Osjetljiva oprema će se gotovo sigurno isključiti tijekom ovog kvara.



Slika 2.7. Lokacije kvarova u elektroenergetskom sustavu [1, str. 47]

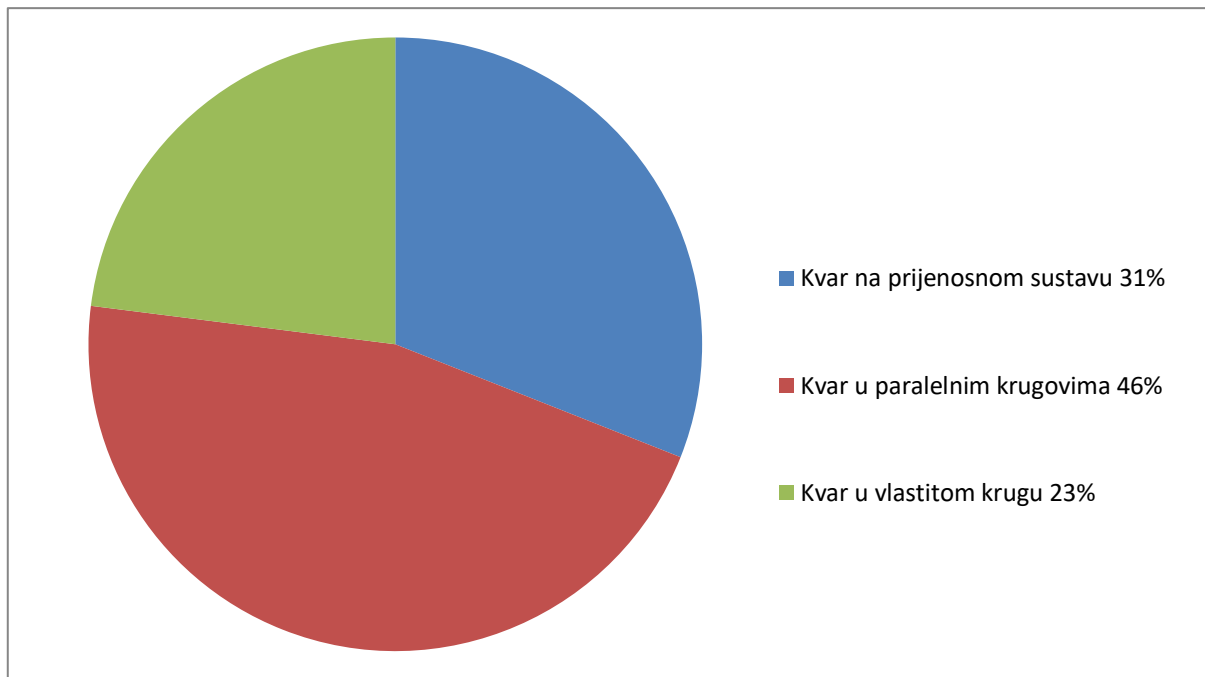
Mnogo češći događaj bio bi kvar na jednom od drugih napojnih vodova trafostanice, tj. kvar na paralelnomvodu ili kvar negdje na prijenosnom sustavu. U oba slučaja, kupac će osjetiti naponske propade tijekom trajanja kvara u sustavu. Čim prekidači uklope da bi uklonili kvar, kupcu će se vratiti normalan napon.

Mora se primijetiti da za uklanjanje kvara na prikazanom prijenosnom sustavu na slici 2.7., oba prekidača A i B moraju raditi. Prijenosni prekidači će obično otkloniti grešku u 5 do 6 perioda. U tom slučaju postoje dvije linije napajanja distribucijske trafostanice i samo jedna ima kvar.

Stoga bi kupci koji se napajaju iz te trafostanice trebali očekivati samo propade, a ne i prekide. Prijenosni kvar na napojnomvodu 4 može se očistiti ili poprečnim osiguračem ili prekidačem, ovisno o praksi zaštite izvora. Bilo koji kvar na određenoj lokaciji može izazvati smetnje u radu opreme kupca.

Važnost kvarova na prijenosnom i distribucijskom sustavu ovisit će o karakteristikama samog sustava (kao što su podzemna i nadzemna mreža) i osjetljivost pojedine opreme na naponske propade. Na slici 2.8. vidi se jedan primjer kvarova koji su uzrokovali nepravilan rad opreme kod industrijskog korisnika.

Mora se primijetiti da je najmanji postotak vjerojatnosti kvara sa strane industrijskog korisnika. Ovim se može vidjeti važnost naponskih propada te njihovih utjecaja na opremu.



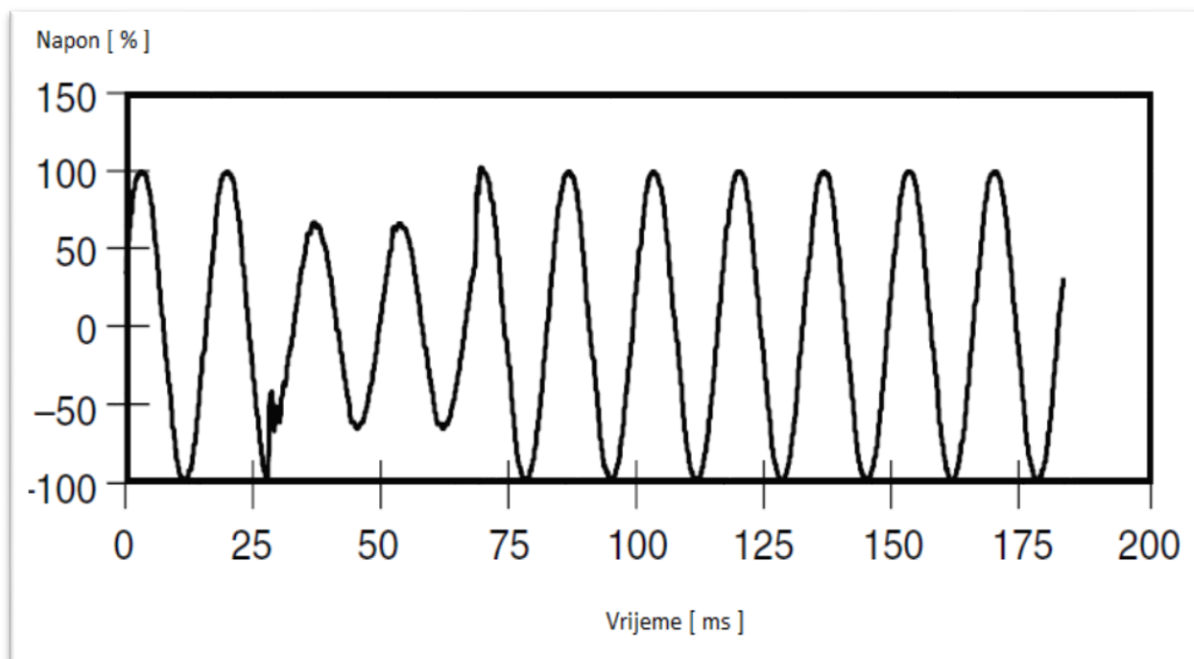
**Slika 2.8. Lokacije kvarova koji uzrokuju nepravilan rad opreme u industrijskim postrojenjima[1, str. 48]**

Zanimljivi kvarovi u mreži mogu se vidjeti i na slikama 2.9. i 2.10. koji su zabilježeni instrumentom 8010 PQNode na dvije lokacije u elektroenergetskom sustavu. Na slici je prikazano prvih 175 ms trenutnog valnog oblika.

Slika 2.9. prikazuje karakteristično mjerenje na ispravnom dijelu mreže, dok slika 2.10. prikazuje trenutačni prekid. U ovom slučaju prekidač uspijeva otkloniti kvar vrlo brzo, u prosjeku za 2,5 periode. Prekidač može imati razne varijacije postavki.

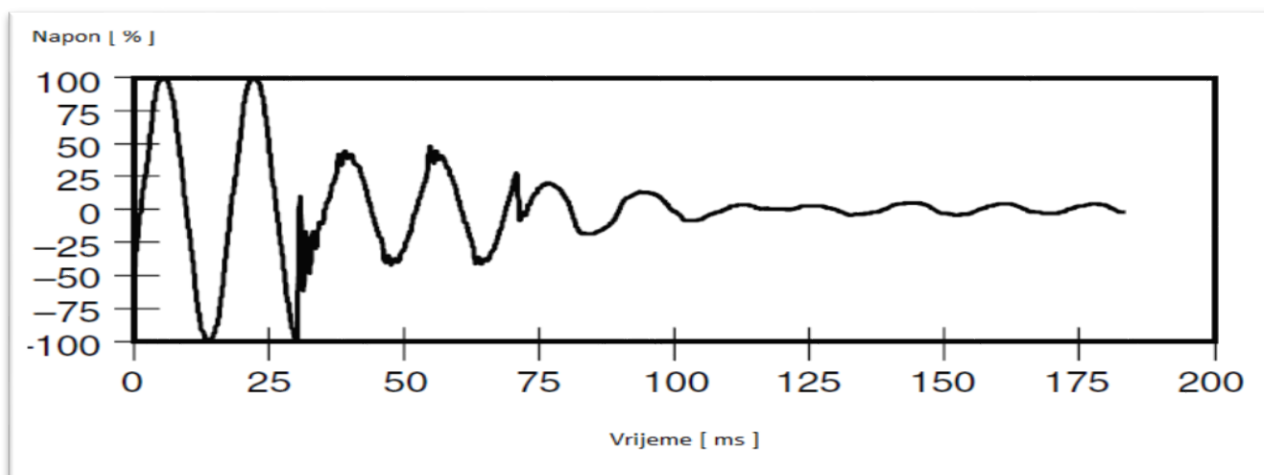
U ovom slučaju prekidač je postavljen tako da ima dva brza otklona kvara i dva spora otklona.

Na slici 2.9. vidi se samo kratak propad oko 65% preostalog napona za prvi brzi otklon te identičan propad za drugi otklon. Iako se može zaključiti da taj kratak propad nije od velikog značaja za mrežu, mnogi industrijski procesi mogu zastati.



**Slika 2.9. Naponski propad prilikom kratkog spoja na paralelnom vodu [1, str. 49]**

Na slici 2.10. vidi se naponski propad prije otklona i nakon toga dva brza otklona kvara. Vrijeme otklona je oko 2 sekunde, što je i prosječno vrijeme za otklon propada. Do dva otklona dolazi jer se pretpostavlja da se prvim otklonom nije riješio problem.



**Slika 2.10. Kratki spoj u mreži sa dva brza otklona preko prekidača [1, str. 50]**



### 2.3.2. Procjena naponskih propada

Veoma je bitno poznavati očekivane naponske propade u energetsom sustavu kako bi se mogli dizajnirati objekti i razviti specifikacije opreme te osigurao optimalan rad proizvodnih pogona.

U nastavku je opisan opći postupak rada s industrijskim kupcima kako bi se mogla osigurati kohezija između karakteristika elektroenergetskog sustava i rada postrojenja [1] :

- Odrediti broj i karakteristike naponskih propada koji su posljedica kvarova u prijenosnom sustavu.
- Odrediti broj i karakteristike naponskih propada koji proizlaze kao posljedica kvarova iz distribucijskog sustava.
- Odrediti osjetljivost opreme na naponske propade. Time će se odrediti stvarni učinak proizvodnog procesa na temelju naponskih propada izračunatih u koracima 1 i 2.
- Procijeniti ekonomičnost različitih rješenja koja bi mogla poboljšati performanse, bilo na elektroenergetskom sustavu ili unutar postrojenja kupca.

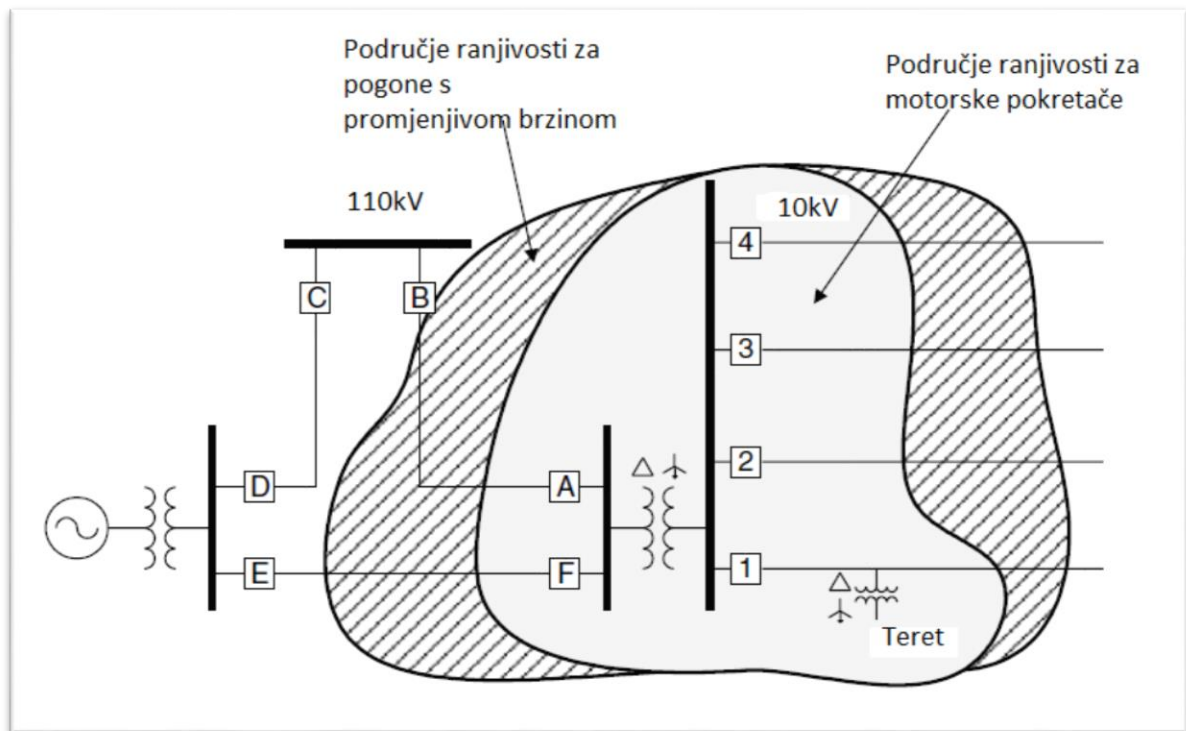
### 2.3.3. Područja ranjivosti

Područje ranjivosti može se definirati kao minimalna količina napona koji dio opreme može podnijeti ili tolerirati bez kvarova (kratkih spojeva) u radu. Također područje ranjivosti može se pojasniti definicijom da je ono granica osjetljivosti na naponske propade[1] .

Područje ranjivosti određeno je ukupnim brojem krugova izloženosti smetnjama koje mogu uzrokovati da naponske veličine padnu ispod minimalnog napona potrebnog za normalan rad opreme.

Na slici 2.11. prikazan je slučaj područja ranjivosti za motorski pokretač i pogon s promjenjivom brzinom u postrojenju krajnjeg korisnika koji se napaja iz distribucijskog sustava. Tereti će biti izloženi kratkim spojevima i na prijenosnom i distribucijskom sustavu.

Stvaran broj naponskih propada koje postrojenje može očekivati određeno je kombiniranjem područja ranjivosti sa očekivanim kvarovima za taj dio sustava[1].



**Slika 2.11. Područja ranjivosti[1, str. 51]**

#### **2.3.4. Osjetljivost opreme na naponske propade**

Većina opreme unutar nekoga postrojenja ima različitu osjetljivost na naponske propade. Osjetljivost opreme na naponske propade ovisi o mnogo parametara kao što su: specifični tip tereta, upravljačke postavke, aplikacije. Tako da je većinom teško odrediti koja karakteristika naponskog propada najčešće uzrokuje greške u radu opreme. Najčešće karakteristike koje promatramo kod naponskih propada su trajanje i amplituda.

Osjetljivost opreme mogu se podijeliti u tri kategorije[1]:

- Oprema osjetljiva samo na amplitudu naponskog propada.

U ovu kategoriju mogu se uključiti niskonaponski releji, motorski pokretači te mnogo tipova automatiziranih strojeva. Uređaji u ovoj kategoriji su osjetljivi na maksimalnu ili minimalnu naponsku amplitudu tijekom naponskog propada.

- 2. Oprema osjetljiva i na amplitudu i na trajanje naponskog propada.

U ovu grupu mogu se ubrojiti svi uređaji koje koriste elektronička napajanja. Takva oprema je izvan funkcije ili radi s greškom kada je izlazni napon napajanja manji od dozvoljenih

vrijednosti. Također, važna karakteristika ovoga tipa opreme je i trajanje tj. kada je efektivni napon ispod dozvoljenog praga na kojem oprema radi.

- 3. Oprema osjetljiva na druge značajke osim amplitude i trajanja.

Na neke uređaje utječu i druge karakteristike propada, kao što su nesimetrija faza prilikom propada ili bilo kakve tranzijentne oscilacije koje se događaju prilikom poremećaja.

Opterećenja generalno mogu biti pod utjecajem veoma kratkih trajanja događaja, a gotovo svi naponski propadi traju četiri do pet perioda. Tako je jedna od najčešćih metoda za ispitivanje osjetljivosti opreme na naponske propade je korištenje amplituda– vrijeme grafikona koji je prikazan na slici 2.12.

Slika prikazuje amplitudu naponskog propada koja će izazvati kvar u opremi kao funkciju trajanja propada.

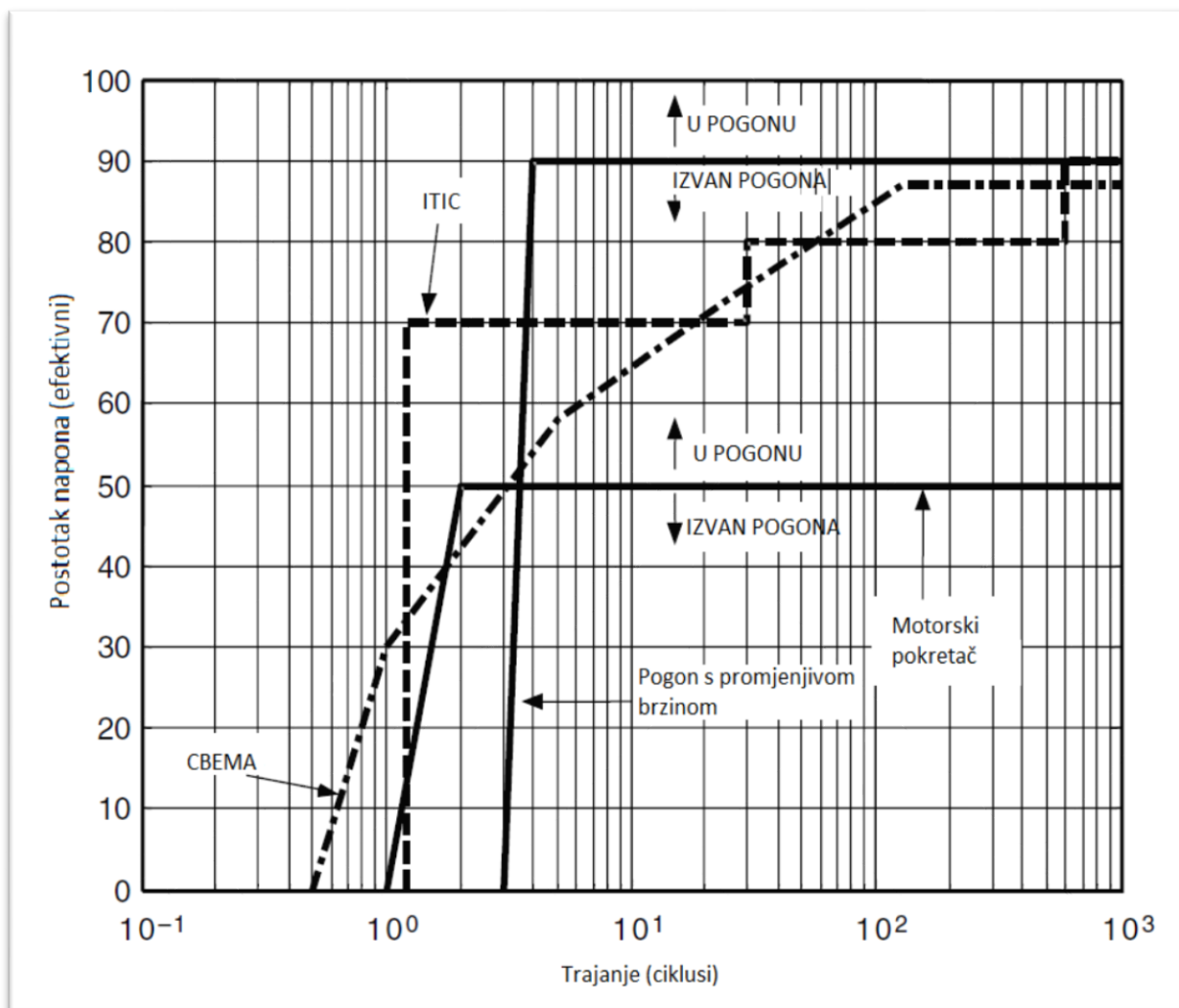
Krivulja ITIC objavljena od strane Information Technology Industry Council-a predstavlja tipične karakteristike osjetljivosti opreme. Tipični tereti će se najvjerojatnije isključiti kada napon dosegne vrijednost ispod ITIC krivulje[1].

Krivulja pogona s promjenjivom brzinom predstavlja propusnost osjetljivih uređaja na naponske propade. Uređaji prestaju raditi nakon propada ispod 0,9 p.u. koji traje četiri perioda. Krivulja pokretača motora predstavlja propusnost prema naponskim propadima. Pokretač prestaje raditi za naponske propade ispod 0,5 p.u. koji traju više od jednog perioda.

Područje ranjivosti za motorske pokretače koje je opisano u slici 2.11. sugerira da će greške u tome području izazvati pad napona ispod 0,5 p.u. za krajnje korisnike.

Motorski pokretači koji imaju minimalnu propusnost na naponske propade od 0,5 p.u mogli bih se isključiti kada se u području ranjivosti dogodi kvar koji uzrokuje naponski propad sa trajanjem dužim od jednog perioda.

Međutim, kvarovi izvan područja ranjivosti neće izazvati pad napona ispod 0,5 p.u. Ista definicija će vrijediti i za područje ranjivosti kod pogona s promjenjivom brzinom.



Slika 2.12. Tipične krivulje za propusnost naponskih propada kod opreme[1, str. 53]

### 2.3.5. Procjena učinkovitosti prijenosnog i distribucijskog sustava na naponske propade

Utjecaj naponskih propada na određeno potrošačko postrojenje ovisit će o tome da li je potrošač napajan iz prijenosnog ili distribucijskog sustava. Ako je potrošač napajan samo iz prijenosnog sustava, njegovi utjecaji na naponske propade ovisit će samo o kvarovima prijenosnog sustava[1].

Dok, ako je potrošač napajan iz distribucijskog sustava, utjecaj na naponske propade ovisit će i o prijenosnom i distribucijskom sustavu.

Kratki spojevi na prijenosnim vodovima i naknadno otvaranje zaštitnih uređaja rijetko uzrokuju kvar kod bilo kojeg potrošača zbog međusobno povezane prirode većine suvremenih prijenosnih mreža. Iako ti kratki spojevi uzrokuju naponske propade.

Ovisno o osjetljivosti određene opreme, pogon može prestati raditi, te time izazvati značajne financijske gubitke. Stoga je svojstvo procjene naponskih propada na mjestu krajnjeg korisnika veoma važno.

Područje ranjivosti opisuje sve lokacije kratkih spojeva koji mogu utjecati na nepravilan rad opreme. Tip kratkog spoja se također mora uzeti u obzir. Jednofazni kratki spoj sa zemljom neće izazvati isti naponski propad kao trofazni kratki spoj.

Karakteristike na opremi krajnjeg korisnika također ovise o tome kako će se naponske razine mijenjati pomoću transformatora i kako je oprema spojena. Tu se mora uzeti u obzir važnost priključka transformatora i priključaka opreme u određivanju stvarnog napona koji će poteći opremom tijekom kratkog spoja na napojnom sustavu.

Potrošači napajani iz distribucijskih naponskih razina su ovisni o kratkim spojevima i na prijenosnom i distribucijskom sustavu. Analiza na razini distribucije mora uključiti i trenutačne prekide koji su nastali djelovanjem zaštitnih uređaja za uklanjanje kvarova.

Te smetnje će najvjerojatnije izazvati kvar na osjetljivoj opremi. Cjelokupni učinak naponskih propada kod krajnjeg korisnika je zbroj očekivanih naponskih propada u prijenosnom i distribucijskom sustavu.

Najbitnije informacije za izračun učinka naponskih propada kod distribucijskog sustava su sljedeće: broj vodova napajanih iz trafostanice, prosječna duljina voda, prosječna reaktancija voda, reaktancija kratkog spoja u trafostanici, prosječni kvarovi u vodu (uključujući trofazni kratki spoj sa zemljom i jednofazni kratki spoj sa zemljom po kilometru u mjesecu) [1].

Postoje dvije moguće lokacije kvara u distribucijskom sustavu: kvar na paralelnim vodovima, kvar na istom vodu:

- Kvar na paralelnim vodovima

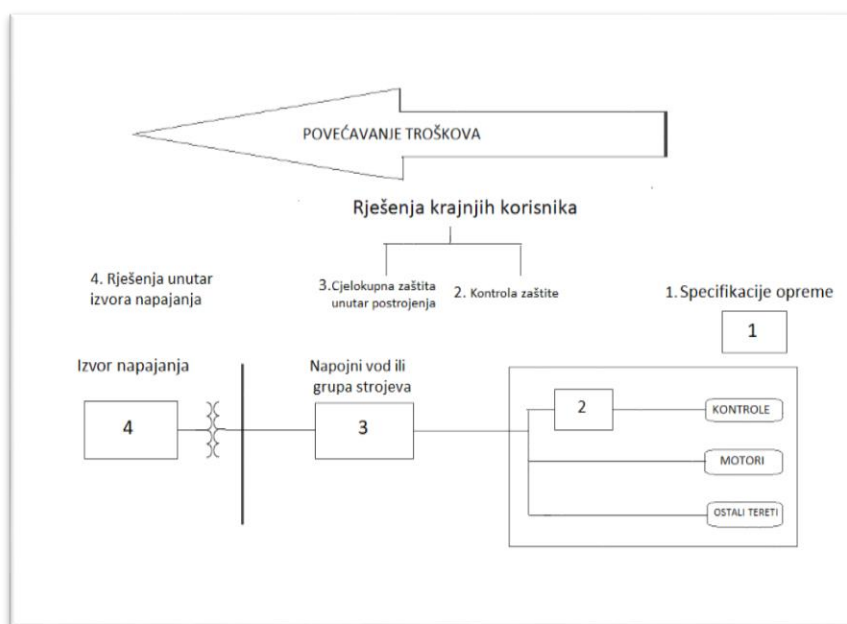
Očekivani napon kod krajnjeg potrošača u slučaju kratkog spoja na paralelnim vodovima može biti procijenjen izračunavanjem naponske amplitude u trafostanici. Na naponsku amplitudu u trafostanici utječe konfiguracija elektroenergetskog sustava, kvar na impedanciji, lokacija i zaštitna shema sustava.

- Kvar na istom vodu

U ovom slučaju očekivana amplituda naponskog propada na lokaciji krajnjeg korisnika je procijenjena kao funkcija lokacije kratkog spoja na istom vod. Procjena je valjana samo za lokacije kvarova koje rezultiraju propadom, ali neće rezultirati trenutnim prekidom, koji će se izračunati posebno.

### 2.3.6. Osnovna načela zaštite

Moraju se uzeti u obzir sve razine elektroenergetskog sustava počevši od izvora, krajnjeg korisnika i proizvođača opreme da bih se smanjio broj naponskih propada i smanjila osjetljivost opreme na naponske propade. Slika 2.13. prikazuje alternative rješavanja naponskih propada i njene relativne troškove.



**Slika 2.13. pristupi za poboljšanje propusnosti naponskih propada**

Kako se vidi na samom na grafikonu, općenito je jeftinije rješavati problem na najnižoj razini tj. blizu opterećenja. Najbolji način je ukomponirati propusnost na naponske propade u samu specifikaciju opreme.

Nekoliko ideja u nastavku bih se lako moglo ukomponirati u specifikacije nabavke opreme da bih se izbjegao problem naponskih propada [1].

- Proizvođači opreme bi trebali imati krivulju propusnosti naponskih propada koje bi bile dostupne korisnicima kako bih se izvršila početna procjena opreme.
- Tvrtka koja nabavlja novu opremu treba uspostaviti postupak koji ocjenjuje važnost opreme. Ako je oprema kritična po prirodi, tvrtka mora biti sigurna da oprema ima adekvatnu propusnu karakteristiku prije kupnje.
- Oprema mora imati propusnost na naponske propade od najmanje 70% minimalnog napona.

Pronalazak rješenja na višim nivoima raspoložive snage čine ta rješenja skupljima. Ako tražena propusna karakteristika ne može postići u fazi specifikacije, moguće je posegnuti za sustavom neprekidnog napajanja (UPS). To je primjenjivo kada strojevi mogu sami riješiti propad ili smetnju, ali kontrole bi ih automatski isključile.

Na bloku 3 prikazanom na slici 2.13. potrebna je neka vrsta rezervnog napajanja s mogućnošću održavanja opterećenja za kratko vrijeme. Blok 4 predstavlja izmjene na elektroenergetskom sustavu kako bih se značajno smanjio broj naponskih propada i smetnji.

### **2.3.7. Rješenja na razini krajnjeg korisnika**

Rješenja za poboljšanje pouzdanosti i učinkovitosti postrojenja mogu se primijeniti na mnogo različitih razina. Različite dostupne tehnologije trebaju za razini specijalnih zahtjeva procijeniti optimalno rješenje za poboljšanje performansi naponskih propada. Rješenja možemo podijeliti po različitim razinama primjene [1]:

- Zaštita za mala opterećenja.

U ovu grupu ubrajaju se mali strojevi, u mnogo slučajeva to su jednofazni tereti.

- Zaštita za pojedinačnu opremu ili grupu opreme do 300 kVA

Kako obično sva opterećenja u postrojenju ne trebaju zaštitu, ovo može biti veoma ekonomična metoda za rješavanje kritičnih opterećenja. Osobito ako je potreba za zaštitom tih opterećenja rješava u fazi projektiranja postrojenja.

- Zaštita velikih skupina opterećenja na niskonaponskoj razini.

Ponekad je tako velik dio postrojenja kritičan ili treba zaštitu, pa je potrebno zaštititi veliku skupinu tereta na prikladnom mjestu (servisni ulaz) .

- Zaštita na srednjem naponu ili na sustavu napajanja.

Ako cijelo postrojenje treba zaštitu ili poboljšanje kvalitete električne energije, trebaju se razmotriti rješenja na sredjenaponskoj razini.

Mnoge tehnologije mogu se upotrijebiti za rješenje ovih problema na svim razinama napona te će biti opisane u idućim poglavljima.

- Ferorezonantni transformatori

Ferorezonantni transformatori mogu podnijeti stanja koja uzrokuju naponski propadi, također ih nazivamo transformatori konstantnog napona.

Posebno su korisni za opterećenja malih snaga. Oni su u osnovi 1:1 transformatori koji imaju visoku uzbudnu karakteristiku na krivulji zasićenja, čime se osigurava da izlazni napon nije pod utjecajem varijacija ulaznog napona.

- Serijski kompenzatori

Prednosti elektroničkih tehnologija i novih topologija za ove uređaje rezultirali su novim mogućnostima za osiguravanje smanjenja naponskih propada kod kritičnih opterećenja.

Jedna od bitnijih novih opcija je uređaj koji može povećati napon, injektirajući napon u seriji sa preostalim naponom, tijekom naponskog propada.

Te uređaje nazivamo aktivni serijski kompenzatori. Dostupni su u rasponu veličina od malih jednofaznih uređaja (1 do 5 kVA) do velikih uređaja koje možemo primijeniti na sredjenaponske sustave (2 MVA i veće).

- Sustavi neprekidnog napajanja (UPS)

Možemo ih podijeliti u tri kategorije: on – line UPS, standby UPS i hibridni UPS.

#### a) On – line UPS

Dolazni izmjenični napon pretvara se u istosmjerni koji puni bateriju. Taj istosmjerni napon se opet pretvara u izmjenični te napaja teret. Ako se u dolaznom izmjeničnom naponu dogodi kvar, inverter se napaja iz baterije i nastavlja napajati teret.

#### b) Standby UPS



Naziva se i off – line UPS – om budući da se normalni napon koristi kako bih se napajala oprema sve dok se ne otkrije smetnja, te tada prekidač prenosi opterećenje na baterijski inverter. Važno je vrijeme prijenosa između normalnog izvora napajanja do baterijskog invertera.

c) Hibridni UPS – ovi

Sličnog su dizajna kao i standby UPS – ovi. Koriste naponski regulator na izlazu UPS – a da bi osigurali regulaciju opterećenja i trenutnu propusnost kada se vrši prijelaz iz normalnog u UPS pogon.

- Motor – generator set

Motor – generator setovi dolaze u različitim veličinama i konfiguracijama. To je starija tehnologija koja je i dalje korisna za izoliranje kritičnih opterećenja od propada i smetnji u elektroenergetskom sustavu.

Sam koncept je dosta jednostavan, motor pogoni generator koji pokreće teret. Zamašnjaci na istom vratilu osiguravaju veću inerciju za povećanje vremena propusnosti. Kada napajanje pretrpi poremećaj, inercija stroja i zamašnjaka održava napajanje nekoliko sekundi.

Iako su jednostavnog koncepta, imaju određene nedostatke za određene vrste opterećenja kao što su: postoje gubitci povezani sa strojevima, buka i održavanje, pad napona i frekvencije prilikom smetnji.

- Sustavi za pohranu energije zamašnjaka

Moderni sustavi za pohranu energije zamašnjaka koriste zamašnjake velikih brzina i energetske elektronike za produženje vremena propusnosti sa 10 sekundi na 2 minute. U ovom slučaju zamašnjaci rade u vakuumu i koriste magnetske ležajeve za znatno smanjenje gubitaka u stanju mirovanja.

Konstrukcije sa čeličnim rotorima mogu postići brzinu do 10 000 okretaja u minuti. Budući da je količina pohranjene energije proporcionalna kvadratu brzine, velika količina energije može se uskladištiti u malom prostoru.

Rotor služi kao jednodijelni uređaj, motor i generator. Za pohranu energije, rotor se okreće brzinom kao motor. Kada je energija potrebna, rotor i armatura se ponašaju kao generator. Kako rotor usporava pri korištenju energije, kontrolni sustav automatski povećava polje da bi se kompenzirao smanjeni napon.

- Uređaji za supervodljivu magnetsku pohranu energije

Ovi uređaji se mogu koristiti za ublažavanje naponskih propada i kratkih smetnji. Skladištenje energije u uređaju osigurava se električnom energijom pohranjenoj u struji koja teče u supervodljivom magnetu.

Budući da je zavojnica bez gubitaka, energija se može osloboditi trenutno. Pomoću naponskih regulatora i invertera ova se energija može ubrizgati u zaštićeni električni sustav za manje od jednog perioda kako bih se kompenzirao pad napona prilikom propada.

Određene prednosti koje ovi uređaji imaju nad UPS sustavima su: manji prostor za pohranu energije, brži prijenos uskladištene energije u zaštićeni sustav te neograničeni periodi punjenja i pražnjenja.

### **3. HARMONICI U INDUSTRIJSKIM POSTROJENJIMA**

Moderna industrijska postrojenja karakterizira široka primjena nelinearnih opterećenja. Ta opterećenja mogu činiti značajan dio ukupnih opterećenja i ubacivati strujne harmonike u elektroenergetski sustav, uzrokujući harmonijsko izobličenje napona[2].

Ovaj harmonijski problem je još složeniji jer sva nelinearna opterećenja imaju relativno nizak faktor snage. Industrijska postrojenja često koriste kondenzatore kako bi poboljšali faktor snage te izbjegli kaznene troškove.

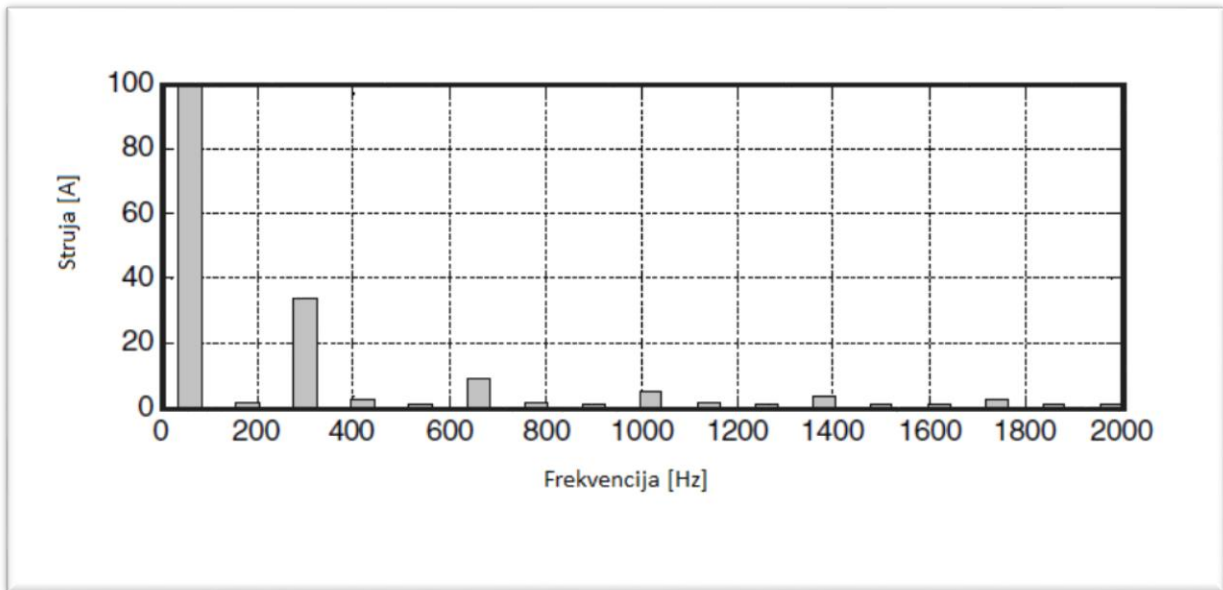
Primjena kondenzatora za korekciju faktora snage može potencijalno povećati harmonijske struje iz nelinearnih opterećenja, što dovodi do stvaranja rezonantnih uvjeta unutar postrojenja. Najviša razina izobličenja napona obično se javlja u niskonaponskoj sabirnici gdje se kondenzatori primjenjuju[2].

Rezonantni uvjeti uzrokuju pregrijavanje motora i transformatora i pogrešno rukovanje osjetljivom elektroničkom opremom. Nelinearna industrijska opterećenja mogu se podijeliti u više kategorija koje će biti pobliže opisani u idućim potpoglavljima.

#### **3.1. Trofazni energetske pretvarači**

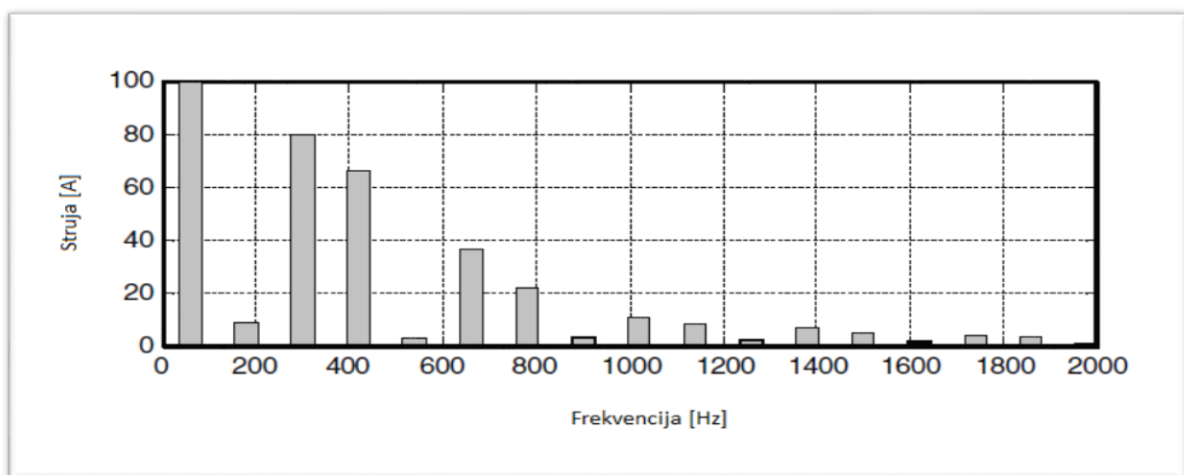
Trofazni elektronički energetske pretvarači razlikuju se od jednofaznih pretvarača uglavnom zbog toga što ne generiraju struje trećeg harmonika. To je velika prednost jer je struja trećeg harmonika najveća komponenta harmonika.

Međutim, oni i dalje mogu biti značajni izvori harmonika na svojim karakterističnim frekvencijama, kako je i prikazano slikom 3.1. To je tipični pogon s promjenjivom brzinom sa strujnim izvorom. Harmonijski spektar na slici 3.1. također je tipičan za pogon istosmjernog motora ulaznom strujom.



**Slika 3.1. Harmonijski spektar za strujni inverter pogona s promjenjivom brzinom [1, str. 193]**

Pogoni pomoću naponskog invertera (kao što su pogoni pulsno – širinskom modulacijom) imaju mnogo veće razine izobličenja kao što je prikazano slikom 3.2.



**Slika 3.2. Harmonijski spektar pulsno – širinske modulacije pogona s promjenjivom brzinom [1, str. 194]**

Ulaz u pogon pulsno – širinske modulacije općenito je dizajniran kao trofazna verzija sklopnog napajanja u računalima. Ispravljač je spojen direktno iz izmjenične sabirnice na veliki kondenzator na istosmjernoj sabirnici.

Uz malu namjernu induktivnost, kondenzator se puni u vrlo kratkim impulsima, stvarajući karakterističan valni oblik struje s visokim izobličenjem.

### **3.1.1. Istosmjerni pogoni**

Ispravljanje je jedini korak potreban za istosmjerne pogone. Stoga imaju prednost kod relativno jednostavnih upravljačkih sustava. U usporedbi sa izmjeničnim pogonskim sustavima, istosmjerni nudi širi raspon brzina i veći početni moment. Međutim troškovi nabave i održavanja istosmjernih motora vrlo su visoki, dok se trošak elektroničkih uređaja sve više smanjuje. Stoga, ekonomski razlozi ograničavaju upotrebu istosmjernih pogona za potrebe regulacija brzine i zakretnog momenta istosmjernog motora[2].

Najviše istosmjernih pogona koriste šesteropulsni ispravljač, dok veći pogoni koriste dvanaestpulsni ispravljač. Oni reduciraju tiristorsku struju i smanjuju neke veće izmjenične strujne harmonike. Dvije najveće harmonijske struje u šesteropulsnom pogonu su peta i sedma. One su ujedno i najveći problem sustava. Dvanaestpulsni ispravljač u primjeni eliminira oko 90% petih i sedmih harmonika. Nedostaci dvanaestpulsnog pogona su veći troškovi u elektronici i potreba za dodatnim transformatorom.

### **3.1.2. Izmjenični pogoni**

U izmjeničnim pogonima izlaz ispravljača se invertira kako bih se proizveo izmjenični napon promjenjive frekvencije za motor. Inverteri se mogu podijeliti na naponske invertere te strujne. Naponski inverteri zahtijevaju konstantan istosmjerni ulazni napon u inverter faza. To se postiže sa kondenzatorom ili oscilatorom na istosmjernoj vezi. Strujni inverter zahtijeva konstantnu ulaznu struju, stoga se induktiviteti spojeni u seriju smješteni u istosmjernoj vezi.

Izmjenični pogoni uglavnom koriste standardne kavezne indukcijske motore. Ti motori su robusni, relativno niski u cijeni i zahtijevaju malo održavanja. Sinkroni motori koriste se tamo gdje je precizna kontrola brzine veoma bitna.

Popularna konfiguracija izmjeničnih pogona koristi naponske invertere koji koriste pulsno - širinsku modulaciju za sintetiziranje izmjeničnog valnog oblika. Pogonu pomoću naponskog invertera pulsno - širinske modulacije nudi najbolju energetska učinkovitost za radnje u širokom rasponu brzina za pogone do najmanje 500 KS.

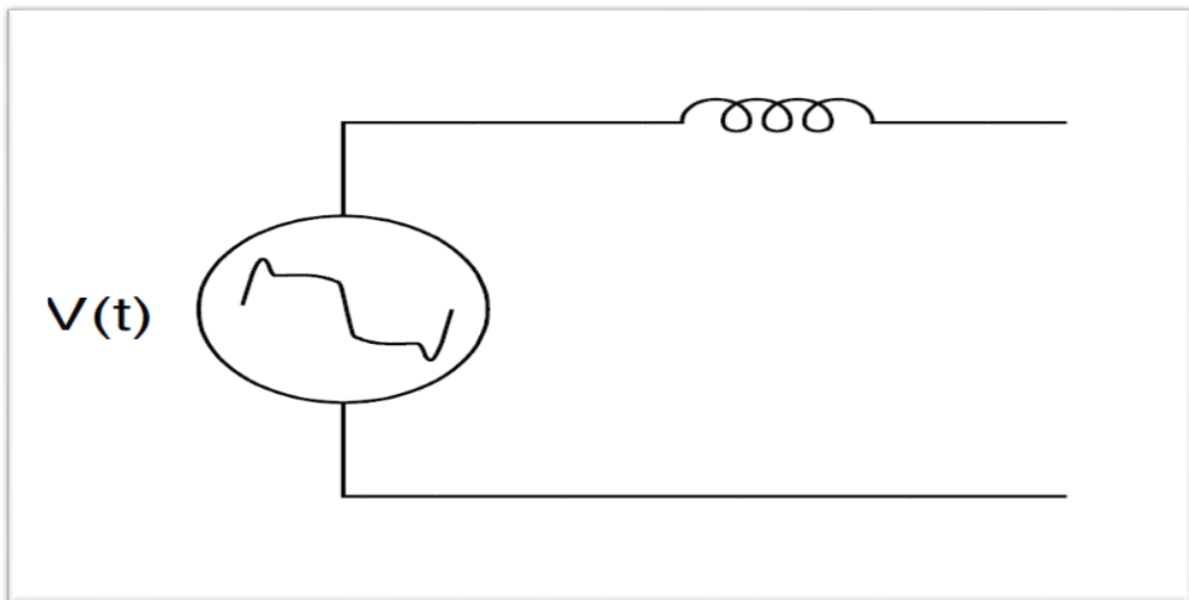
Još jedna prednost pogona pomoću pulsno – širinske modulacije je da razliku od ostalih pogona, nije potrebno mijenjati izlazni napon ispravljača za kontrolu brzine motora. Na taj način se tiristorski ispravljači mogu zamijeniti diodama i tiristorski kontrolni krug će biti eliminiran.

Pogoni velikih snaga koriste silicijske ispravljače i invertere. Oni mogu biti šesteropulsni, ili kao veliki istosmjerni pogoni, dvanestpulsni. Naponski inverteri ograničeni su na radnje koje ne zahtijevaju brze promjene brzine.

Naponski inverteri imaju dobre karakteristike ubrzanja/usporenja, ali zahtijevaju kapacitivni faktor snage. Pogon pomoću strujnog invertera mora biti dizajniran za upotrebu sa specifičnim motorom.

### 3.2. Lučni uređaji

U ovu kategoriju ubrajaju se lučne peći, elektrolučni zavarivači, i rasvjetna tijela (fluorescentna, natrijeve pare, pare žive) s magnetskim (umjesto elektroničkim) prigušnicama. Luk je u osnovi naponski izvor u seriji s reaktancijom koja limitira struju na razumnu vrijednost. A to se može vidjeti na slici 3.3.



Slika 3.3. Ekvivalentni krug za lučne uređaje

Naponsko - strujne karakteristike električnog luka su nelinearne. Nakon paljenja luka, napon se smanjuje kako se struja luka povećava, a ograničava je samo impedancija

elektroenergetskog sustava. To daje luku izgled negativnog otpora za dio svog radnog ciklusa kao što je primjena u fluorescentnoj rasvjeti.

U primjenama kod elektrolučnih peći ograničavajuća impedancija je primarno kabel peći i vodi se određenim doprinosom iz elektroenergetskog sustava te transformatora peći.

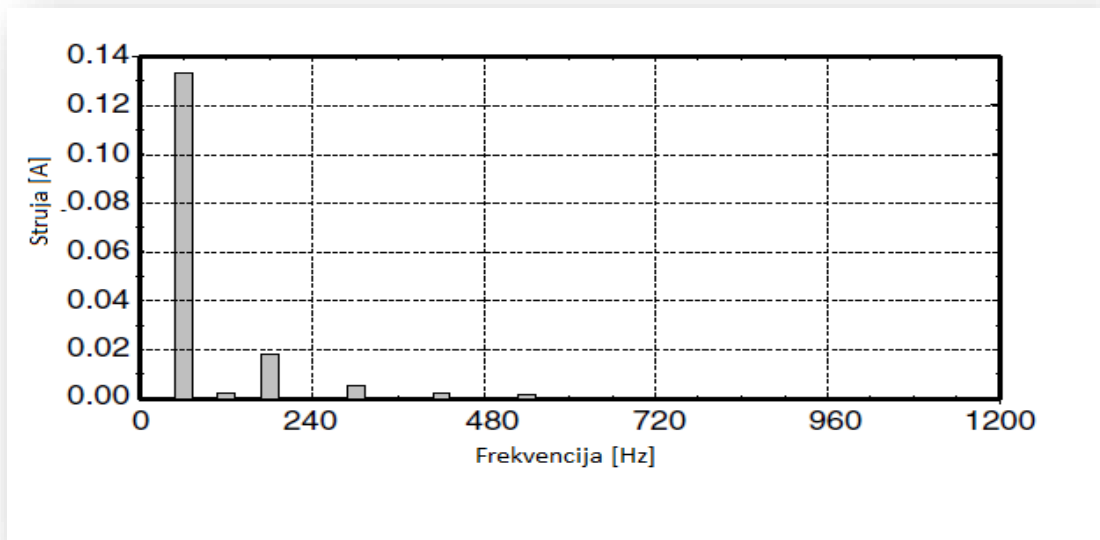
Električni luk sam po sebi se najbolje predstavlja kao izvor naponskih harmonika. Ako bih se sonda smjestila izravno preko luka, mogao bih se uočiti nešto poput trapezoidnog valnog oblika.

Njegova amplituda je u velikoj mjeri funkcija duljine luka. Međutim, impedancija prigušnica ili vodova peći ponaša se kao odbojnik tako da je napon samo umjereno iskrivljen. Tako se čini da je teret električnog luka relativno stabilan harmonijski izvor struje, što je prikladno za većinu analiza.

Iznimka je kada je sustav blizu rezonancije i Theveninov ekvivalentni model koji koristi valni oblik napona luka daje realnije odgovore.

Sadržaj harmonika u teretu lučne peći i drugim lučnim uređajima je sličan magnetskom teretu prikazanom na slici 3.4. Trofazni lučni uređaji mogu se postaviti tako da prekidaju trostruke harmonike kroz priključak transformatora. Međutim, ovaj prekid možda neće djelovati u trofaznim lučnim pećima zbog čestih neuravnoteženih operacija prilikom faze taljenja.

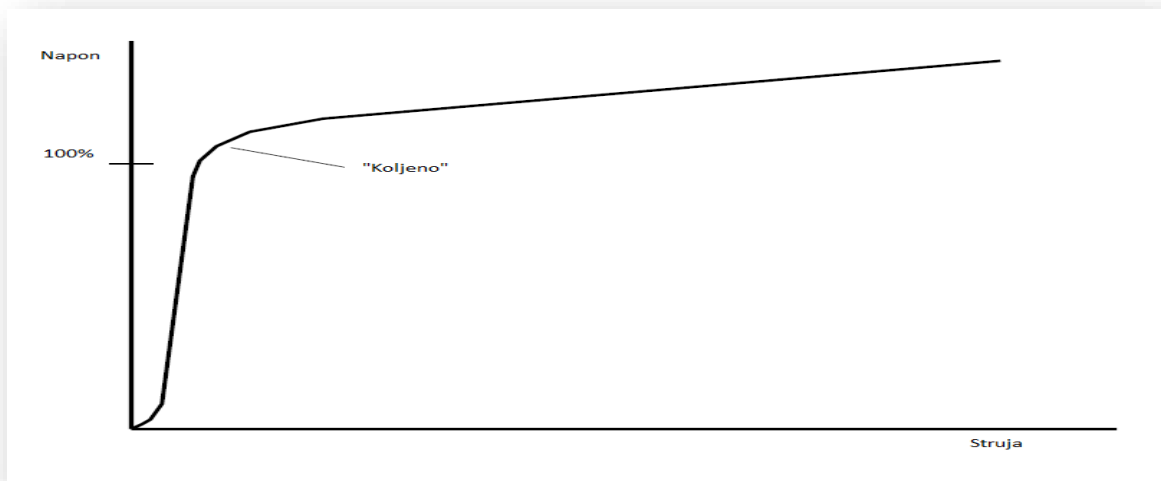
Tijekom faze rafiniranja, kada je luk konstantniji, prekid je bolji.



Slika 3.4. Harmonijski spektar fluorescentne lampe [1, str. 191]

### 3.3. Zasićeni uređaji

Uređaji koji spadaju u ovu kategoriju uključuju transformatore i ostale elektromagnetske uređaje sa čeličnom jezgrom, uključujući motore. Harmonici nastaju zbog nelinearnih karakteristika magnetiziranja čelika koje možemo vidjeti na slici 3.5.



Slika 3.5. Magnetska karakteristika transformatora



Energetski transformatori su dizajnirani da rade normalno neposredno ispod točke „koljena“ magnetske karakteristike. Gustoća radnog toka transformatora odabire se na temelju komplicirane optimizacije troškova čelika, buke, gubitaka bez tereta i brojnih drugih čimbenika.

Mnoge elektroprivrede kazniti će prodavače transformatora različitim iznosima za gubitke bez opterećenja i sa opterećenjem, a prodavač će pokušati zadovoljiti specifikacije sa transformatorom koji ima najmanju cijenu. Visok trošak štete na gubitke zbog praznog hoda ili buke općenito će rezultirati većim udjelom čelika u jezgri i višom krivuljom zasićenja koja će dati niže harmonijske struje.

Iako je uzbuna struja transformatora bogata harmonicima pri normalnom radnom naponu, tipično je manje od 1% ocijenjeno kao struja punog opterećenja. Transformatori nisu toliko važni kao elektronički energetski pretvarači i elektrolučni uređaji koji mogu proizvesti harmonijske struje i do 20% i više.

Međutim, njihov učinak će biti primjetan, posebno u distribucijskom sustavu, gdje se nalaze na stotine transformatora.

## 4. REZULTATI MJERENJA I ANALIZA

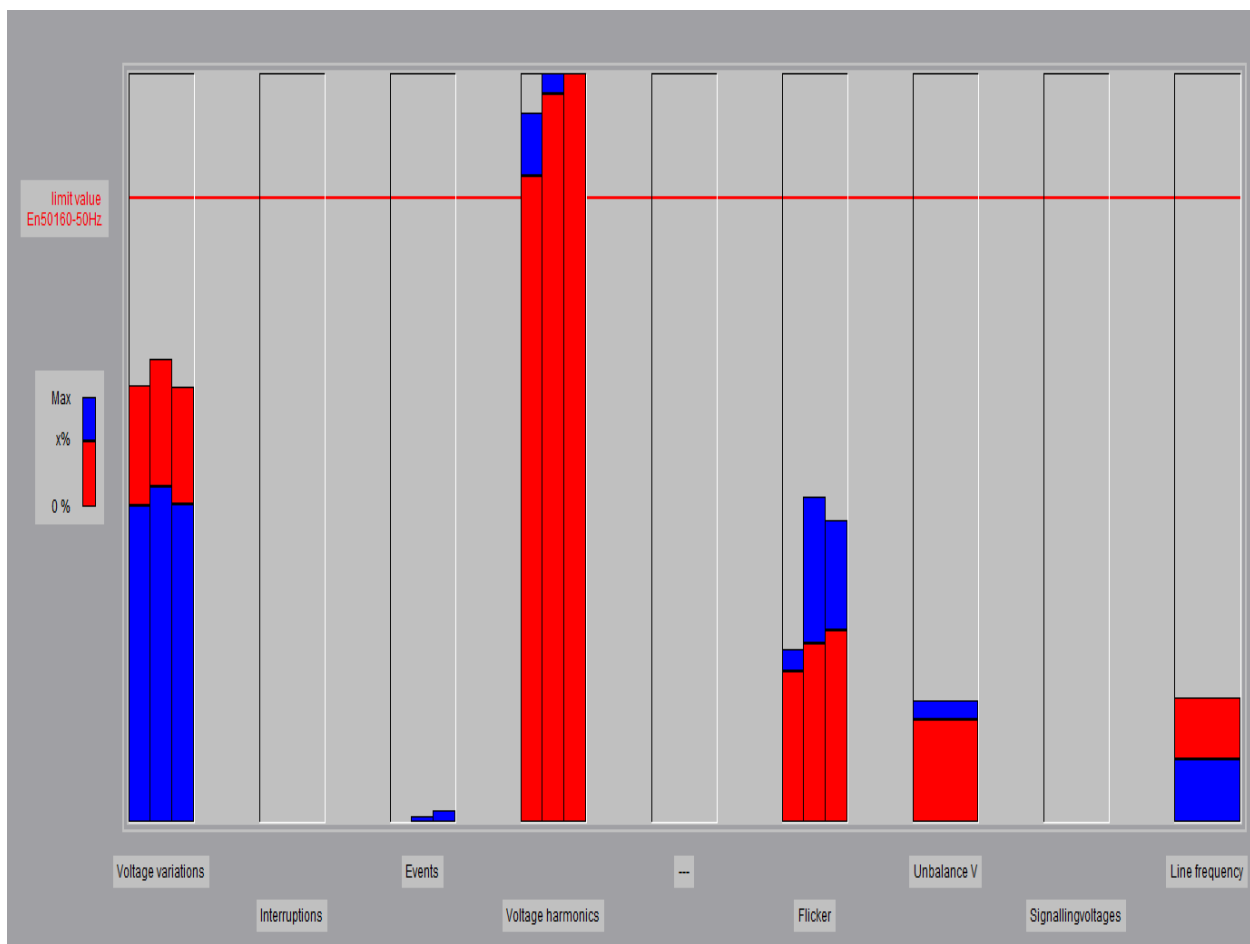
Mjerenja su provođena u rasponu od tjedan dana u tvrtci Duropack Belišće. Na slici 4.1. prikazani su osnovni podatci stroja na kojem se vršilo mjerenje.

Information about measurement - C:\Users\Vedran\Desktop\PapF061.PQL

Company:	Belisce Duropack		
Department:	Papirstroj 2		
Line:	Prematac Napajanje F 06.1		
Transformer:			
Reference:			
Measurement code:			
<hr/>			
Measurement function:	A		
Measurement period:	Mo, 20.5.2013 12:30:00 - Mo, 27.5.2013 12:30:00		
Intervals:	10 minutes, linear		
Measurement segments :	not programmed		
<hr/>			
Voltage			
Power Type:	Wye		
Nominal voltage:	230 V		
Input Range:	230 V, P-N, 50 Hz		
Voltage transformer:	-		
Min-Max-value:	0.5 periods		
Interharmonics:	not programmed		
Events:	-10.00/+10.00% of 230 V, linear		
Hysteresis:	0.00 %		
<hr/>			
Current	Phase	Neutral	
Input Range:	1500 A	1500 A	
Max. clamp current:	3000 A	3000 A	
Number of CTs:	3	1	
Additional CT:	-	-	
Max-value:	0.5 periods	0.5 periods	
<hr/>			
Power			
Min-Max-value:	1 minute		



Slika 4.1. Osnovni podatci o stroju na kojem je vršeno mjerenje

Analiza mjerenja je provedena u programskom paketu PQ log. Raspon analize mjerenja postavljen je na tjedan dana. Prvi korak pri analizi je prikazati sve parametre koji se promatraju te njihove vrijednosti. Te se shodno tome na slici 4.2. i 4.3. vidi da naponski harmonici prelaze maksimalnu dozvoljenu vrijednost prema normi HRN EN 50160:2012. Dok su vrijednosti napona, flikera, frekvencije u dozvoljenim vrijednostima.



Slika 4.2. Grafička analiza svih parametara mjerenja

Parameter	Maximum value				x%-value			
	Unit	En50160-50Hz.gwd	L1	L2	L3	L1	L2	L3
Voltage variations		230V				95%-value		
Maximum 100% / 95%	% [Vn]	+10 / +10	-2.15	-2.14	-1.98	-2.15	-2.14	-1.98
Minimum 100% / 95%	% [Vn]	-15 / -10	-7.61	-8.10	-7.65	-6.99	-7.41	-6.97
Interruptions < 0%	Number of	100	0	0	0	-		
Events	Number of	100	0	1	2	-		
Voltage harmonics						95%-value		
23. Harm. 100% / 95%	% [Vn]	1.5 / 1.5	1.71	1.86	2.06	1.55	1.75	1.91
Current harmonics	A		No			95%-value		
Flicker Pst 100% / 95%	Pst	1 / 1	0.279	0.522	0.484	0.244	0.288	0.308
Unbalance V 100% / 95%	%	2 / 2	0.39			0.33		
Signalling voltages	% [Vn]		No			95%-value		
frequency		50 Hz				99.5%-value		
Maximum 100% / 99.5%	%	+4 / +1	0.40			0.20		
Minimum 100% / 99.5%	%	-6 / -1	-0.40			-0.20		

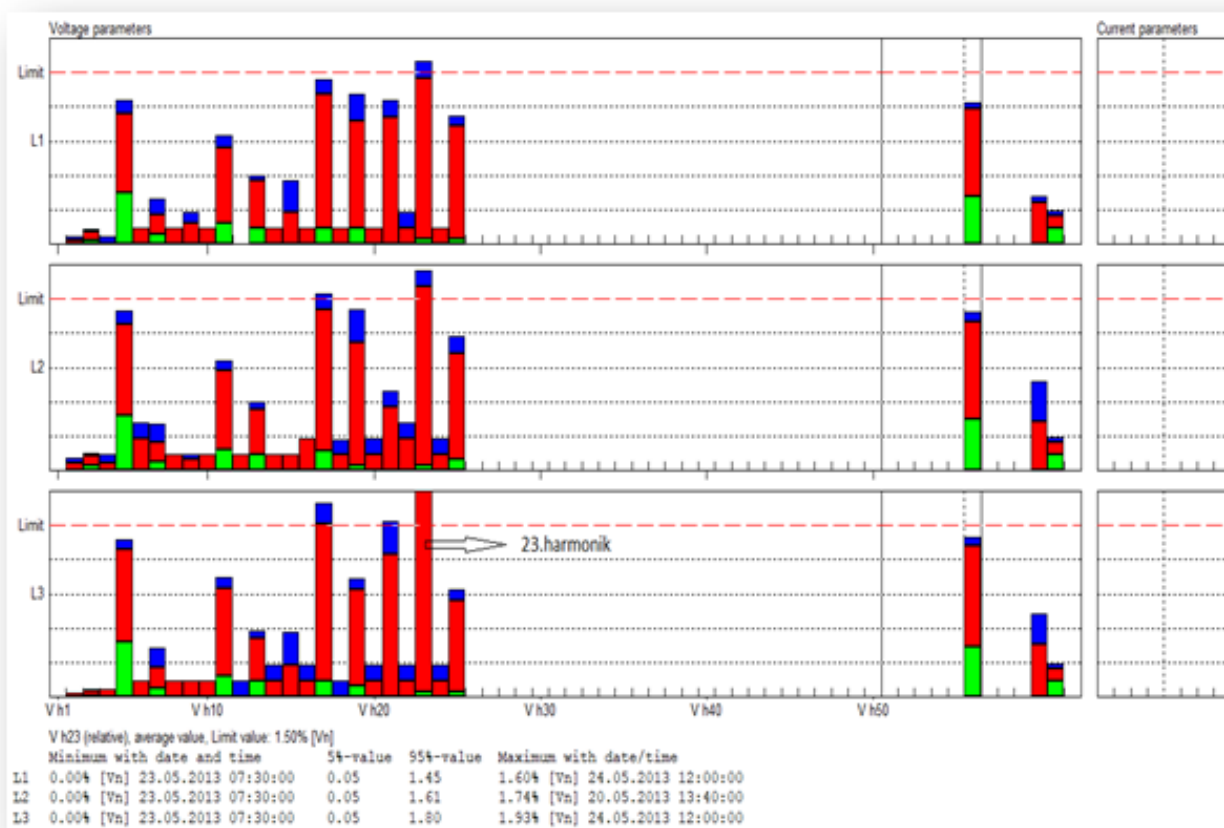
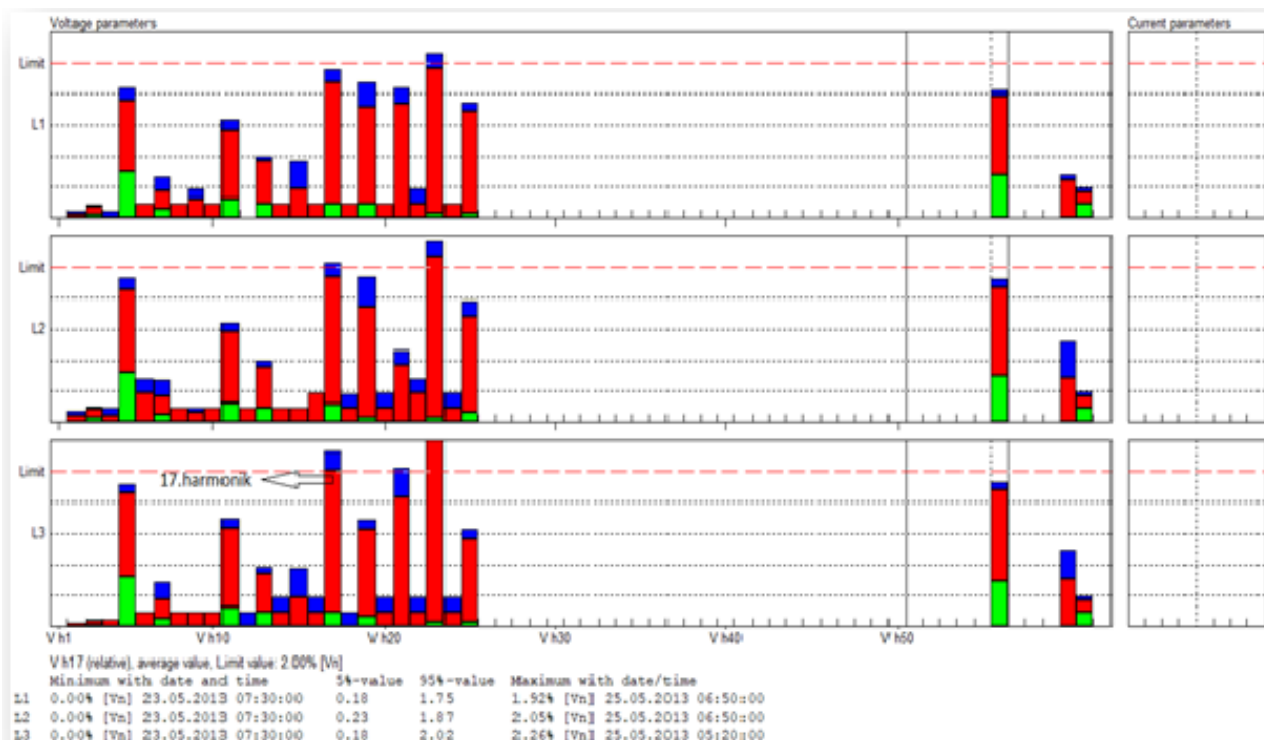
 Max value above limit value  
 x% (95% / 99.5% / 99%) value above limit value

Slika 4.3. Maksimalne vrijednosti svih parametara mjerenja

Nakon toga stupa se u podrobniju analizu naponskih harmonika koji imaju nedozvoljene vrijednosti. Na slici 4.4. vidljivi su naponski harmonici u sve tri faze. U sve tri faze 23. harmonik je premašio dozvoljene vrijednosti koje su određene normom.

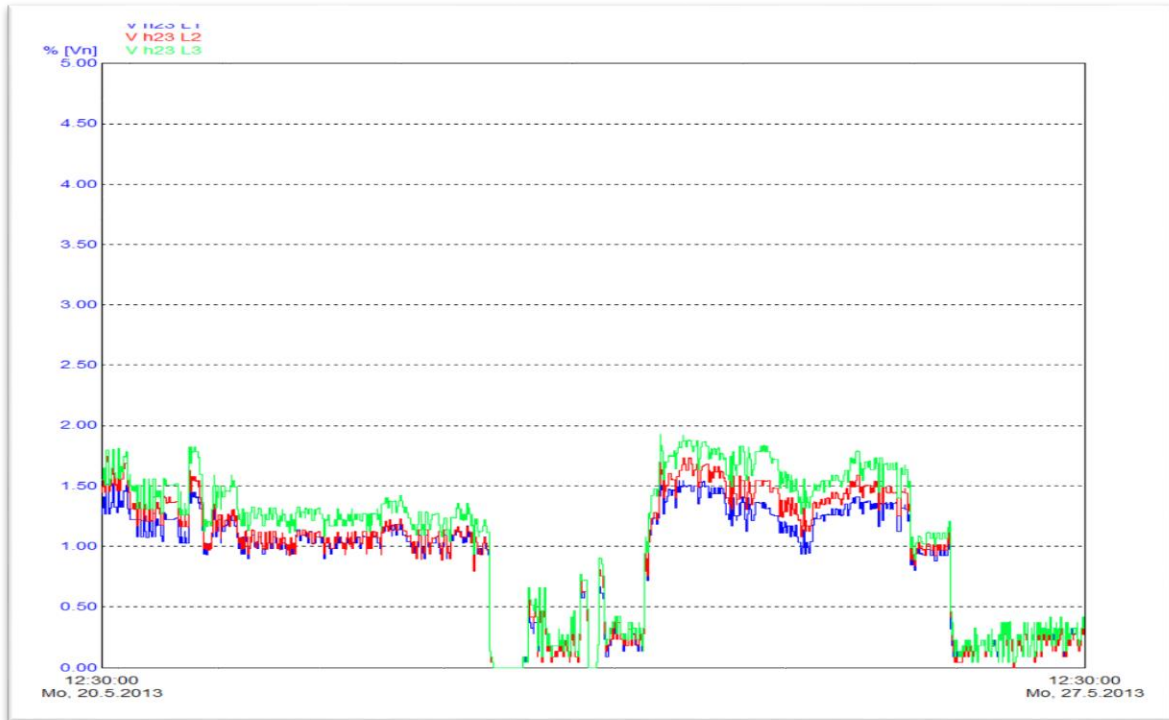
Norma za 23. naponski harmonik je 1,5%, a na grafu je vidljivo da on prelazi tu dozvoljenu vrijednost. Također na slici 4.4. vidi se da i 17. harmonik premašuje dozvoljene vrijednosti norme koja iznosi 2,0 %.

Kao moguće izvore ovih prekoračenja mogu se navesti sklopovi energetske elektronike koje injektiraju struje viših harmonika te samo pokretanje motora koje može generirati prolazne harmonike.



Slika 4.4. Vrijednosti 17. i 23. harmonika

Na slici 4.5. se može još detaljnije pogledati kako se kretala vrijednost 23. harmonika te se vidi u kojoj mjeri je bila prekoračena dozvoljena vrijednost od 1,5% .



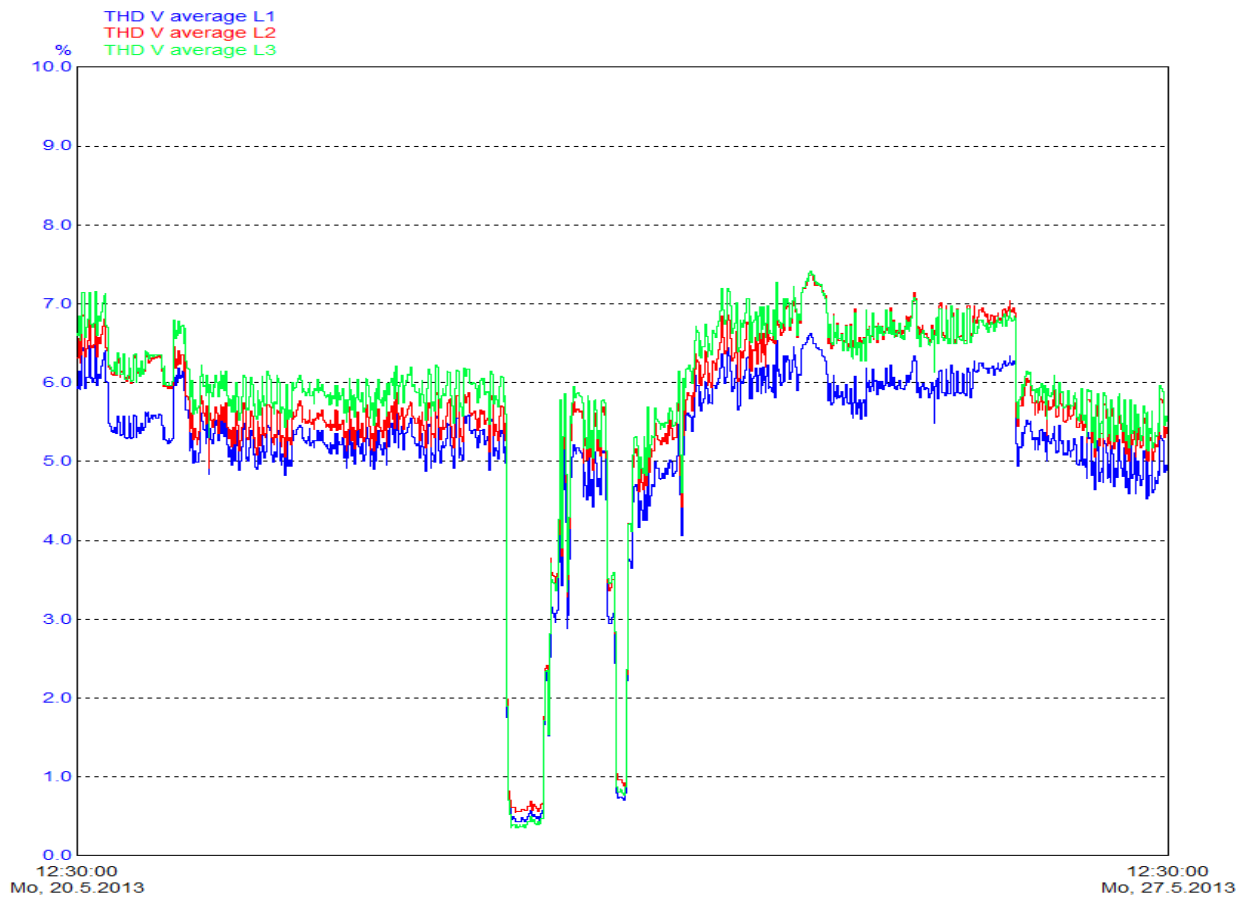
**Slika 4.5. Prikaz 23. harmonika**

Pomoću programa PQ log, mogu se prikazati i kritične vrijednosti najčešćih harmonika koji se pojavljuju u procesima. Tako slika 4.6. prikazuje kritične vrijednosti 3., 5., 7., i 9. harmonika te se vidi da je u određenim trenutcima mjerenja kritičan samo 5. harmonik, pošto je njegova dozvoljena vrijednost 6,00%.

3. Harmonic	% [Vh1]		
	% [Vh1]	26.05.2013/06:00:00	0.55
	% [Vh1]	26.05.2013/06:40:00	0.55
	% [Vh1]	26.05.2013/06:50:00	0.50
	% [Vh1]	26.05.2013/04:50:00	0.50
	% [Vh1]	25.05.2013/15:00:00	0.50
5. Harmonic	% [Vh1]		
	% [Vh1]	26.05.2013/12:50:00	6.03
	% [Vh1]	26.05.2013/13:00:00	5.98
	% [Vh1]	26.05.2013/07:40:00	5.97
	% [Vh1]	26.05.2013/12:20:00	5.93
	% [Vh1]	26.05.2013/10:20:00	5.93
7. Harmonic	% [Vh1]		
	% [Vh1]	23.05.2013/13:40:00	1.50
	% [Vh1]	23.05.2013/13:40:00	1.45
	% [Vh1]	23.05.2013/13:50:00	1.45
	% [Vh1]	23.05.2013/14:40:00	1.40
	% [Vh1]	23.05.2013/13:50:00	1.40
9. Harmonic	% [Vh1]		
	% [Vh1]	26.05.2013/08:00:00	0.30
	% [Vh1]	26.05.2013/11:40:00	0.25
	% [Vh1]	26.05.2013/07:50:00	0.25
	% [Vh1]	26.05.2013/08:10:00	0.25
	% [Vh1]	26.05.2013/10:00:00	0.25

**Slika 4.6. Prikaz karakterističnih vrijednosti 3.,5.,7. i 9. harmonika**

Na slici 4.7. prikazan je naponski THD te je vidljivo je on u granicama dozvoljenih vrijednosti tj. da ne prelazi granicu 8%. No na grafu se vidi da THD u jednom periodu pada na vrlo malu vrijednost, a to možemo objasniti time da je stroj radio smanjenim opterećenjem.



Slika 4.7. Prikaz naponskog THD-a

Na slici 4.8. prikazana je naponska analiza, točnije broj naponskih propada i tu se uočava da su postojala samo 3 propada, te je sve u granicama dozvoljenog broja propada.

Phase L1, L2, L3	< 20 ms	20...< 100 ms	100...< 500 ms	0.5...< 1 s	1...< 3 s	3...< 20 s	20...< 60 s	>= 1 min
Swell > 10.00%								
Dip > 10.00%								
10...< 15 %		1						
15...< 30 %		1	1					
30...< 60 %								
60...< 99 %								
Interruption								

Recording as events from -10.00 / +10.00% of the nominal voltage

**█** Dip according to UNIPEDA measurement guide

Number of swells	0
Number of Dips	3
Number of short interruptions (<3 min)	0
Number of long interruptions (>=3 min)	0
Number of interruptions	0
Total events and interruptions	3
Total number of allowed events	100
Total number of allowed interruptions	100

Slika 4.8. Numerička naponska analiza

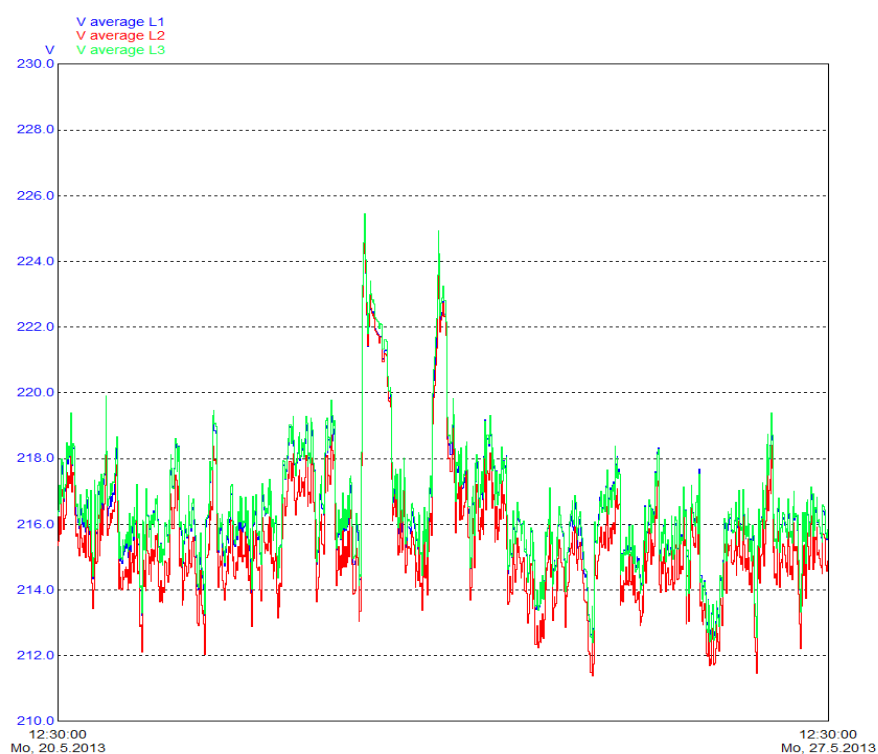


Na slici 4.9. prikazane su vrijednosti kritičnih napona, no i oni su i dalje u okviru norme koja kaže da napon mora biti u  $\pm 10\% U_n$  za 95% tjedna, te  $+10/-15\% U_n$  za 5% tjedna.

Parameter		Measurement value			
	Unit		L1	L2	L3
Voltage variations	V				
	V	25.05.2013/09:20:00		211.38	
	V	26.05.2013/21:00:00		211.47	
	V	25.05.2013/09:00:00		211.48	
	V	25.05.2013/08:50:00		211.48	
	V	26.05.2013/10:50:00		211.69	

**Slika 4.9. Kritične vrijednosti napona**

Na slici 4.10. je grafički prikazan napon u sve 3 faze, te se tu također vidi promjena, koju možemo usporediti sa promjenom naponskog THD-a, pri smanjenju opterećenja, napon nam se povećao.



**Slika 4.10. Grafički prikaz napona u sve tri faze**

## 5. ZAKLJUČAK

Ovaj rad sadrži teorijsku obradu harmonika i naponskih propada te korištenje softverskih alata za analizu rezultata mjerenja kvalitete električne energije. Ovaj rad je prikazao važnost kvalitete električne energije u industrijskim postrojenjima. Te u kojoj mjeri ona može utjecati na kvarove u elektroenergetskom sustavu.

Praćenje kvalitete električne energije napredovalo je od strogog rješavanja problema do praćenja rada elektroenergetskog sustava. Povećana količina prikupljenih podataka zahtijeva naprednije alate za analizu.

Glavni zadatak je pronaći izvor smetnji, te ih ukloniti. Kao što je sama analiza mjerenja pokazala, 23.harmonik pravi probleme u sustavu.

Također, zaključeno je da razvoj sklopova energetske elektronike i komponiranje njih samih u postrojenja dolazi do povećanja mogućnosti nastajanja problema po pitanju kvalitete električne energije.

U konačnosti kvaliteta električne energije je jednako bitna i na izvoru napajanja i na strani krajnjeg korisnika, te je vrlo bitno održavati sve parametre kvalitete u sklopu dozvoljenih vrijednosti po važećim standardima.

## LITERATURA

- [1] Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan, Surya Santoso, H. Wayne Beaty "Electrical Power Systems Quality, The McGraw-Hill Companies, USA, 2004.
- [2] C. Sankran, "Power Quality", CRC Press LLC, 2002.
- [3] Predavanja: Kvaliteta napona u elektroenergetskom sustavu, Doc.dr.sc. Zvonimir Klaić
- [4] Angelo Baggini, "Handbook of Power Quality", John Wiley & Sons Ltd, England, 2008.
- [5] Alexander Kusko, Marc T.Thompson, " Power Quality in Electrical Systems "The McGraw-Hill Companies, USA, 2007.
- [6] Z. Klaić, S. Nikolovski: Mjerenje i analiza kvalitete električne energije prema Europskoj normi EN 50160 u Slavoniji; 7. savjetovanje HO CIGRE, Cavtat, 2005., R. C6-07.
- [7] Z. Klaić, S. Nikolovski: KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE – MJERENJA PREMA NORMI EN 50160; 6. savjetovanje Cavtat, 2003., C4-14.
- [8] «Značajke napona u distributivnim mrežama-Europska norma 50160»,stručni članak, Ivo Novaković –Zagreb, Alex Mc Eacher –USA
- [9] A. Milković, Z Tonković: Mjerenje kvalitete električne energije u srednjenaponskoj elektrodistribucijskoj mreži;Studija, Institut za elektroprivredu i energetiku, Zagreb, listopad 2005.
- [10] Dr.sc. Amir Tokić, "Uvod u kvalitet električne energije ", Fakultet u Tuzli, 2008.

## **POPIS SLIKA I TABLICA**

Slika 2.1. Sinusoidna naponska i strujna frekvencija vremena (str. 3)

Slika 2.2. Nesinusoidni naponski valni oblik Fourierovog reda(str. 4)

Slika 2.3. Osnovni, drugi i treći harmonik (str. 5)

Slika 2.4. Kreiranje nelinearnog valnog oblika dodavanjem osnovnog i trećeg harmonika u frekvencijski valni oblik [2, str.83] (str. 7)

Slika 2.5. Balansiran trofazni sustav [2, str.86] (str. 9)

Slika 2.6. a) temeljni fazori, b) fazori trećeg harmonika, c) fazori petog harmonika, d) fazori sedmog harmonika [2, str. 87] (str. 11)

Slika 2.7. Lokacije kvarova u elektroenergetskom sustavu [1, str. 47] (str. 18)

Slika 2.8. Lokacije kvarova koji uzrokuju nepravilan rad opreme u industrijskim postrojenjima[1, str. 48] (str. 19)

Slika 2.9. Naponski propad prilikom kratkog spoja na paralelnom vodu [1, str. 49] (str. 20)

Slika 2.10. Kratki spoj u mreži sa dva brza otklona preko prekidača [1, str. 50] (str. 21)

Slika 2.11. Područja ranjivosti[1, str. 51] (str. 22)

Slika 2.12. Tipične krivulje za propusnost naponskih propada kod opreme[1, str. 53] (str. 24)

Slika 2.13. Pristupi za poboljšanje propusnosti naponskih propada (str. 26)

Slika 3.1. Harmonijski spektar za strujni inverter pogona s promjenjivom brzinom [1, str. 193] (str. 32)

Slika 3.2. Harmonijski spektar pulsno – širinske modulacije pogona s promjenjivom brzinom [1, str. 194] (str. 32)

Slika 3.3. Ekvivalentni krug za lučne uređaje (str. 34)

Slika 3.4. Harmonijski spektar fluorescentne lampe [1, str. 191] (str. 36)

Slika 3.5. Magnetska karakteristika transformatora (str. 36)

Slika 4.1. Osnovni podaci o stroju na kojem je vršeno mjerenje (str. 38)

Slika 4.2. Grafička analiza svih parametara mjerenja (str. 39)

Slika 4.3. Maksimalne vrijednosti svih parametara mjerenja (str. 39)

Slika 4.4. Vrijednosti 17. i 23. Harmonika (str. 41)

Slika 4.5. Prikaz 23. Harmonika (str. 42)

Slika 4.6. Prikaz karakterističnih vrijednosti 3.,5.,7. i 9. Harmonika (str. 43)

Slika 4.7. Prikaz naponskog THD-a (str. 44)

Slika 4.8. Numerička naponska analiza (str. 44)

Slika 4.9. Kritične vrijednosti napona (str. 45)

Slika 4.10. Grafički prikaz napona u sve tri faze (str. 46)

Tablica 2.1. Ovisnost harmonijskog niza o faznom slijedu (str. 11)

**Sažetak:**

Zadatak rada bio je analizirati kvalitetu električne energije na mjernom mjestu u tvornici papira. U radu su teorijski obrađeni harmonici i naponski propadi te njihov utjecaj na postrojenja. Detaljnije su opisani harmonici u industrijskom postrojenju te koji uređaji utječu na njihovu pojavu. Mjerenje i analiza su izvršeni u programskom alatu PQ log te su svi dobiveni rezultati analizirani.

***Ključne riječi:*** harmonici, naponski propadi, kvaliteta, kratki spoj, PQ log, HRN EN 50160

**Summary:**

The task of the paper was to analyze the quality of the electrician at the measuring point in the paper mill. The paper deals with harmonics and voltage decays and their effects on plants. The harmonics in the industrial zone of the plant, which regulate the influence on its appearance, are described in more detail. Measurement and analysis were performed in the PQ log tool to get all the results analyzed.

***Keywords:*** harmonics, voltage sags, quality, short circuit, PQ log, HRN EN 50160

## **ŽIVOTOPIS**

Vedran Jesenović rođen je 3. listopada 1994. godine u Osijeku. Osnovnu školu pohađao je u Osnovnoj školi Čeminac te je završio svih osam razreda s odličnim uspjehom. Nakon završene osnovne škole upisuje se u Prvu srednju školu Beli Manastir, smjer elektrotehničar, te završava sva četiri razreda sa odličnim uspjehom. Poslije završene srednje škole upisuje preddiplomski studij na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku, sadašnji Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija koji završava u redovnom roku. Godine 2016. upisuje diplomski studij smjera elektroenergetika kojeg trenutno pohađa.

Potpis: \_\_\_\_\_