

**UNIVERZITET U NOVOM SADU  
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA**



**Doc. dr Marko S. Vekić  
Prof. dr Vladimir A. Katić  
Doc. dr Zoltan Čorba**

**KVALITET ELEKTRIČNE  
ENERGIJE  
- RAČUNSKE I LABORATORIJSKE VEŽBE**

**- pomoćni udžbenik -**

**Novi Sad, 2018.**

**Autori: doc. dr Marko Vekić , prof. dr Vladimir Katić , doc. dr Zoltan Čorba**

**Naziv: KVALITET ELEKTRIČNE ENERGIJE – računske i laboratorijske vežbe**

**Vrsta publikacije: pomoćni udžbenik**

**Recenzenti:**

dr Lidija Korunović, van. prof

dr Stevan Grabić, van. prof

**Izdavač:** Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu

**Dizajn korica: xxx**

**Tehnički uredili:** Marko Vekić i Zoltan Čorba

**Priprema: xxx**

**Štampao:** Fakultet tehničkih nauka, GRID, Novi Sad

CIP klasifikacija

## Predgovor

Ovaj pomoćni udžbenik je namenjen studentima master studija Fakulteta tehničkih nauka na studijskim modulima Energetska elektronika i električne mašine, Elektroenergetski sistemi i Distribuitani elektroenergetski resursi u svrhu boljeg razumevanja izazova vezanih za pitanja kvaliteta električne energije. Autori su nastojali primeniti sveobuhvatan pristup kroz tri glavne celine ove knjige: računске zadatke, rad u laboratoriji i na terenu, te projektni zadatak. Posvećena je pažnja da se udžbenik prilagodi kako studentima čije je uže usmerenje energetska elektronika i elektromotorni pogoni, tako i studentima elektroenergetskih sistema, dajući dodatne napomene i objašnjenja tamo gde je potrebno. Čitalac će zaista primetiti da je za rešavanje pojedinih zadataka (prevashodno u Prvom delu) potrebno osnovno poznavanje rada pretvarača energetske elektronike kao npr. u *Izvorima harmonijskog izobličenja*, dok se npr. zadaci iz *Rezonanse* mogu uspešno uraditi pomoću znanja elektroenergetskih sistema. Međutim, najveći deo primera je zapravo spoj ova dva sveta i odlično odslikava samu srž predmeta kvaliteta električne energije, a to je međudejstvo potrošača i električne mreže.

Udžbenik je ustrojen u tri glavne celine s obzirom na način izvođenja nastave (računске vežbe, laboratorijske vežbe i projektni zadatak).

**I deo** sadrži računске zadatke koji čitaocu daju dublji uvid u osnovne pojmove, izazove i rešenja koja se primenjuju kroz poglavlja: Osnovni pojmovi, Harmonijska analiza, K-sačinilac, Izvori harmonijskog izobličenja, Rezonansa, Uvod u pasivne filtre, Otočni pasivni filtri, Aktivni filtri, Nesimetrija i propadi napona, Kompenzacija sačinioaca snage i propada napona, te na kraju Računarski zadaci.

Poglavljje *Osnovni pojmovi* uvode opis ukupnog harmonijskog izobličenja (THD), sačinioaca snage (eng. power factor, PF) i njegovu vezu sa sačinicom pomeraja (čuvenim „kosinusom  $\phi$ “) i sačinioцем izobličenja, vršnog sačinioaca (eng. crest factor, CF) itd.

*Harmonijska analiza* donosi matematički postupak – Fourier-ovu analizu u svrhu harmonijskog uvida u izobličene oblike napona i struja na nekoliko svojstvenih primera.

*K-sačinilac* objašnjava izazov rada transformatora u harmonijski izobličenom okruženju i daje pojmove vezane za takve izazove kao što su slabljenje (eng. degradation) opteretivosti, potreba za posebnim transformatorom sa ojačanim K-sačinioцем itd.

*Izvori harmonijskog izobličenja* produbljuju razumevanje načina na koji pojedini uređaji zagađuju električnu mrežu. Posebna pažnja je posvećena uređajima energetske elektronike, naročito ispravljačima i punjačima kao danas najmasovnijim i nezaobilaznim sklopovima.

*Rezonansa* daje uvid u izazove povezivanja kondenzatorskih baterija u datu sabirnicu, odnosno međudejstvo unete kapacitivnosti sa induktivnošću ostatka sistema (posmatrano iz date sabirnice).

*Uvod upasivne filtre* je poglavlje koje ima nešto širi cilj od samog projektovanja uobičajenih filtara u elektroenergetici a to je razumevanje samog pojma filtra, parametara kao što su prigušenje, prirodna učestanost, propusni opseg, fazno kašnjenje i presečna učestanost, kao i primena Bode-ovih dijagrama pri projektovanju. Jedna od zanimljivih posledica ovakvog pristupa je omogućavanje čitaocu da posmatra pojedine pojave „kroz naočare“ filtra, npr. napon i struju asinhronog motora.

*Otočni pasivni filtri* opisuju praktičan postupak projektovanja pasivnih filtara (R, L i C elementima) sa ciljem da se „zarobe“ dati viši harmonici struje i onemogući, odnosno bar suzbije njihov put od potrošača ka mreži.

Aktivni filtri daju statičku nalizu, odnosno dimenzionisanje samih filtara ne ulazeći u način njihovog upravljanja (dinamiku).

*Nesimetrija i propadi napona* opisuju dejstvo pojave nesimetrije na potrošačima kao što su propadi napona i treperenje (eng. flicker). Posebno je zanimljiv uticaj nesimetrije na asinhroni motor.

*Kompenzacija sačinioca snage i propada napona* opisuje postupke kompenzacije pasivnim elementima i uređajima kao što je DVR i to na razini statičke analize.

*Računarski zadaci* pomoću jednostavnijih programa u Matlab-u i simulacija potkrepljuju dublje računske zadatke i osvetljavaju pojave koje bi bilo teško provesti običnim analitičkim proračunima.

**II Deo** je posvećen pripremi studenata za rad u laboratoriji, počev od mera bezbednosti, zakonskih propisa, opisa mernih uređaja, pre svega korišćenog PQ metra, pa do samog potankog objašnjenja postupka merenja i načina obrade podataka.

**III Deo** sadrži primere ispitnih pitanja nastalih na osnovu nekoliko projektnih zadataka dobijenih kroz praktični rad studenata u laboratoriji i terenskim merenjima.

Autori se nadaju da će ovako skrojen pomoćni udžbenik biti od pomoći studentima u svladavanju osnovnih teorijskih, ali pre svega

praktičnih znanja iz širokih i uzbudljivih oblasti koje se tiču Kvaliteta električne energije. Čitaocima molimo i za razumevanje ukoliko smo učinili propuste. Svesni smo da uprkos želji da otklonimo greške i nedostatke, do njih po Drugom zakonu termodinamike neminovno dolazi i stoga ćemo biti zahvalni čitaocima ako ukažu na moguće omaške. Kao zanimljivost pomenimo da je Jean-Baptiste Joseph Fourier počeo primenu svojih čuvenih redova baš u termodinamici.

U Novom Sadu, 15.04.2018.

*Autori*

# Sadržaj

|                                                                      |            |
|----------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Uvod.....</b>                                                     | <b>1</b>   |
| <b>1. Računski i računarski zadaci .....</b>                         | <b>3</b>   |
| 1.1. Osnovni pojmovi .....                                           | 4          |
| 1.2. Harmonijska analiza.....                                        | 8          |
| 1.3. K - sačinilac .....                                             | 17         |
| 1.4. Izvori harmonijskog izobličenja .....                           | 20         |
| 1.5. Rezonansa.....                                                  | 46         |
| 1.6. Uvod u pasivne filtre – osnovni pojmovi.....                    | 50         |
| 1.7. Otočni pasivni filtri .....                                     | 65         |
| 1.8. Aktivni filtri .....                                            | 75         |
| 1.9. Nesimetrija i propadi napona .....                              | 83         |
| 1.10. Kompenzacija sačinioaca snage i propada napona ...             | 96         |
| 1.11. Računarski zadaci.....                                         | 104        |
| <b>2. Merenje kvaliteta električne energije.....</b>                 | <b>111</b> |
| 2.1. Bezbednost pri radu sa električnim naponom .....                | 112        |
| 2.1.1. Obaveze i prava poslodavca.....                               | 112        |
| 2.1.2. Obaveze i prava radnika.....                                  | 113        |
| 2.1.3. Radovi u beznaponskom stanju.....                             | 114        |
| 2.1.4. Radovi u blizini napona .....                                 | 114        |
| 2.1.5. Radovi pod naponom .....                                      | 114        |
| 2.1.6. Zaštitna sredstva za rad u električnim<br>postrojenjima ..... | 115        |
| 2.1.7. Bezbednost električnog merenja.....                           | 116        |
| 2.2. Uređaj za analizu kvaliteta električne energije CA 8332<br>119  |            |
| 2.2.1. Sadržaj mernog kompleta AKVEE C.A 8332 i C.A<br>8334          | 120        |

|         |                                                             |          |
|---------|-------------------------------------------------------------|----------|
| 2.2.2.  | Kratko uputstvo za rukovanje sa AKVEE C.A 8332 i C.A 8334   | 122      |
| 2.3.    | Uređaj za analizu kvaliteta električne energije FLUKE 43 B  | 128      |
| 2.3.1.  | Sadržaj mernog kompleta AKVEE Fluke 43B                     | .....129 |
| 2.3.2.  | Kratko uputstvo za rukovanje sa AKVEE Fluke 43B             | 130      |
| 2.4.    | Uvodna merenja sa AKVEE CA 8332B u laboratorijskim uslovima | .....132 |
| 2.4.1.  | Postupak merenja sa CA 8332B/ CA 8334B                      | .....133 |
| 2.4.2.  | Postupak merenja sa FLUKE 43B                               | .....135 |
| 2.5.    | Merenja na terenu                                           | .....137 |
| 2.5.1.  | Izbor parametara koji se čuvaju                             | .....138 |
| 2.5.2.  | Kratak opis mernih mesta                                    | .....138 |
| 2.5.3.  | Fotonaponska elektrana FTN1                                 | .....140 |
| 2.5.4.  | Fotonaponska elektrana FTN2 (string invertor)               | 140      |
| 2.5.5.  | Fotonaponska elektrana FTN2 (mikroinvertor)                 | 142      |
| 2.5.6.  | Računarski centar nastavnog bloka FTN                       | .....142 |
| 2.5.7.  | Nastavni bloka FTN-a                                        | .....143 |
| 2.5.8.  | Zgrada Jugodrava                                            | .....144 |
| 2.5.9.  | Kula FTN-a                                                  | .....145 |
| 2.5.10. | Amfiteatar FTN-a                                            | .....146 |
| 2.5.11. | Krilo "F"                                                   | .....147 |
| 2.5.12. | Mašinski institut                                           | .....148 |
| 2.5.13. | Zgrada ITC-a                                                | .....149 |
| 2.5.14. | Mali potrošači – razne sijalice                             | .....150 |
| 2.5.15. | Mali potrošači – elektronski uređaji i računari             | 150      |
| 2.5.16. | Punjač akumulatora                                          | .....151 |
| 2.6.    | Tematski istraživački rad                                   | .....152 |

|           |                                                                    |            |
|-----------|--------------------------------------------------------------------|------------|
| 2.6.1.    | Projektni zadatak.....                                             | 153        |
| 2.6.2.    | Pripreme za merenje .....                                          | 155        |
| 2.6.3.    | Teme projekta „Merenja kvaliteta električne energije na FTN“ ..... | 156        |
| 2.6.4.    | Merenje i izveštavanje.....                                        | 156        |
| 2.6.5.    | Prezentacija rezultata istraživanja.....                           | 158        |
| <b>3.</b> | <b>Primer ispitnih pitanja s odgovorima. ....</b>                  | <b>159</b> |
| 3.1.      | Ispitna pitanja.....                                               | 160        |
| 3.2.      | Odgovori .....                                                     | 163        |
| <b>4.</b> | <b>IZVORI .....</b>                                                | <b>183</b> |
| <b>5.</b> | <b>PRILOZI: .....</b>                                              | <b>185</b> |
| 5.1.      | Prilog 1 .....                                                     | 186        |
| 5.2.      | Prilog 2 .....                                                     | 196        |
| 5.3.      | Prilog 3 .....                                                     | 199        |

## Uvod

Izazovi kvaliteta električne energije su prisutni još od samog početka elektrifikacije. Nije trebalo čekati drugu polovinu XX veka kada se kvalitet električne energije uspostavlja kao naučna grana, pa da se uoče teškoće koje nastaju usled pojave izobličenog napona i struje, promene mrežne učestanosti, treperenja i propada napona, rezonanse itd. Naravno i krajem XIX veka je uočeno da se transformatori i električni motori ponekad pregrevaju iako nisu nazivno opterećeni, da je struja neutralnog voda često veća od struja faznih vodova, da izolacija ubrzano stari, da kondenzatori za kompenzaciju reaktivne snage ponekad eksplodiraju i da električno osvetljenje umarajuće treperi.

Inženjeri od tog vremena do danas su se borili da izađu na kraj s ovim izazovima, ali tek u drugoj polovini XX veka su pomenuti problemi i njihova moguća rešenja sistematizovani i okupljeni pod plašt naučne discipline Kvaliteta električne energije. Prvi i verovatno glavni razlog zašto je do toga došlo je činjenica da su razvojem elektronike, potrošački uređaji postali mnogo osetljiviji na poremećaje. S druge strane, sami potrošači zasnovani na ogromnom broju pretvarača energetske elektronike su počeli mnogo više „zagađivati“ mrežu. Javila se potreba uspostavljanja jasne odgovornosti i pravila igre u odnosu mreža – potrošač. Izazov je dodatno pojačan procesima rasprezanja (eng:deregulation, deregulacija) elektroenergetskog sistema i mogućnošću tržišne utakmice između više energetskih dobavljača gde potrošač može izabrati najpovoljnijeg prema svojim potrebama. Ugovoreni pokazatelji kvaliteta električne energije tada dobijaju prvorazredni značaj jer postaju merilo isporučene energije kao robe. Pojava rasprostranjenih (eng. distributed, tj. distribuiranih) energetskih izvora kakve su vetroelektrane, solarne i male hidroelektrane, elektrane na biogas i biomasu, kao i pojava skladišta električne energije (baterije velikog kapaciteta i superkondenzatori), te konačno električni i hibridni automobili unose nove izazove koji se ne mogu još u potpunosti ni sagledati.

Po svojoj prirodi Kvalitet električne energije je oblast koja povezuje dva sveta: dinamiku potrošača kakvi su uređaji energetske elektronike i elektromotorni pogoni sa statikom elektroenergetskog sistema, a dodatnu dimenziju predstavlja pritisak tržišta. Međutim, pojavom rasprostranjenih izvora i mogućnošću njihovog ostrvskog rada, odnosno pojavom mikromreža, klasični statički pristup je

doveden u pitanje i traže se novi modeli i rešenja pogotovo što sada tok snage nije jednostran. To dovodi do postavljanja izmenjenih zahteva u kvalitetu električne energije, a čije rešavanje svakako postaje uzbudljiv izazov budućim inženjerima.

Spomenimo još ovde da pristupi koje primenjuje oblast Kvaliteta električne energije u opisivanju i rešavanju konkretnih izazova proističu iz dubljih fizičkih pojava kao što su oscilacije, harmonici i rezonansa. Koliko šire značenje imaju ovi pojmovi potvrđuje i sledeća izjava:

“If you want to find the secrets of the universe, think in terms of energy, frequency and vibration.”

(„Ako želite proniknuti u tajne svemira, razmišljajte o tome kroz energiju, učestanost i treperenje“). Nikola Tesla.

## 1. Računski i računarski zadaci

Svrha ovog dela je da čitaocima pruži detaljniji uvid u pojedine pojmove i pitanja kvaliteta električne energije kroz proračune i računarske simulacije. Celine koje su ovde obrađene su:

- Osnovni pojmovi
- Harmonijska analiza
- K-sačinilac
- Izvori harmonijskog izobličenja
- Rezonansa
- Uvod upasivne filtre
- Otočni pasivni filtri
- Aktivni filtri
- Nesimetrija i propadi napona
- Kompenzacija sačinioca snage i propada napona
- Računarski zadaci

## 1.1. Osnovni pojmovi

1. Trofazni uravnoteženi sistem ima sledeće fazne napone:  $\widehat{U}_a = 1 \angle 0^\circ$  [r.j.],  $\widehat{U}_b = 1 \angle 240^\circ$  [r.j.] i  $\widehat{U}_c = 1 \angle 120^\circ$  [r.j.], kao i sledeće struje koje povlači dati potrošač:  $\widehat{I}_a = 0,75 \angle -20^\circ$  [r.j.],  $\widehat{I}_b = 0,65 \angle 270^\circ$  [r.j.] и  $\widehat{I}_c = 0,35 \angle 90^\circ$  [r.j.]. Izračunajte:

- prividnu snagu
- direktnu komponentu prividne snage
- inverznu komponentu prividne snage
- nultu komponentu prividne snage

Svrha ovog zadatka je da osveži čitaočevu znanje pojmova simetričnih komponenti [1] sa osvrtom na prividnu, radnu (aktivnu) i jalovu (reaktivnu) snagu, odnosno proračun sa svim potrebnim (nadamo se dosadnim) pojedinostima iz kompleksnog računa. Za označavanje kompleksnih brojeva, korišćena je "kapica", npr.  $\hat{V}$ , dok je predstava fazora data na uobičajen način preko temene vrednosti i ugla (faznog stava) date veličine, tj.  $\hat{V} = V \angle \varphi_V$ . Ovo je zapravo inženjerski pogodniji zapis Euler-ovog obrasca gde važi:  $\hat{V} = V \angle \varphi_V = V e^{j\varphi_V}$ .

Prividnu snagu računamo kao:

$$\begin{aligned}\hat{S} &= P + jQ = \widehat{U}_a \widehat{I}_a^* + \widehat{U}_b \widehat{I}_b^* + \widehat{U}_c \widehat{I}_c^* \\ &= 1 \angle 0^\circ \cdot 0,75 \angle 20^\circ + 1 \angle 240^\circ \cdot 0,65 \angle -270^\circ + 1 \angle 120^\circ \\ &\quad \cdot 0,35 \angle -90^\circ\end{aligned}$$

Operator \* predstavlja konjugovanje kompleksnog broja. Podsećanja radi, proizvod dva fazora zapisan preko temene vrednosti i faznog stava dobijamo tako što temene vrednosti pomnožimo, a fazne stavove saberemo. Tako imamo:

$$\hat{S} = P + jQ = 0,75 \angle 20^\circ + 0,65 \angle -30^\circ + 0,35 \angle 30^\circ$$

Ako dalje primenimo razvijeni Eulerov obrazac:  $T e^{j\theta} = T \cdot \cos(\theta) + jT \cdot \sin(\theta)$  dobijamo:

$$\begin{aligned}\hat{S} &= P + jQ = 0,75 \cdot \cos(20^\circ) + j0,75 \cdot \sin(20^\circ) + 0,65 \cdot \cos(-30^\circ) + j0,65 \cdot \sin(-30^\circ) \\ &\quad + 0,35 \cdot \cos(30^\circ) + j0,35 \cdot \sin(30^\circ) = (1,571 + j0,107) \text{ [r.j.]}\end{aligned}$$

b) Prividnu snagu direktne komponente određujemo kao:

$$\widehat{S}^d = P^d + jQ^d = \widehat{U}_a^d \cdot \widehat{I}_a^{d*} + \widehat{U}_b^d \cdot \widehat{I}_b^{d*} + \widehat{U}_c^d \cdot \widehat{I}_c^{d*} \quad (1)$$

pri čemu su:  $\widehat{U}_a^d, \widehat{U}_b^d, \widehat{U}_c^d, \widehat{I}_a^d, \widehat{I}_b^d, \widehat{I}_c^d$  direktna komponenta napona i struje. Simetrične komponente računamo na osnovu poznatog izraza iz gradiva analize elektroenergetskih sistema:

$$\begin{bmatrix} \widehat{U}_a^0 \\ \widehat{U}_a^d \\ \widehat{U}_a^i \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \hat{a} & \hat{a}^2 \\ 1 & \hat{a}^2 & \hat{a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \widehat{U}_a \\ \widehat{U}_b \\ \widehat{U}_c \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \widehat{U}_b^0 \\ \widehat{U}_b^d \\ \widehat{U}_b^i \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \hat{a}^2 & 1 & \hat{a} \\ \hat{a} & 1 & \hat{a}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \widehat{U}_a \\ \widehat{U}_b \\ \widehat{U}_c \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \widehat{U}_c^0 \\ \widehat{U}_c^d \\ \widehat{U}_c^i \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \hat{a} & \hat{a}^2 & 1 \\ \hat{a}^2 & \hat{a} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \widehat{U}_a \\ \widehat{U}_b \\ \widehat{U}_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

gde je:

$$\hat{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}} \quad (3)$$

Na osnovu(2) možemo lako uočiti da je :

$$\widehat{U}_b^d = \hat{a}^2 \widehat{U}_a^d, \text{ dok je } \widehat{U}_c^d = \hat{a} \widehat{U}_a^d \quad (4)$$

Zamenjujući (4) u (1) dobija se prividna snaga direktne komponente:

$$\widehat{S}^d = P^d + jQ^d = \widehat{U}_a^d \cdot \widehat{I}_a^{d*} + \hat{a}^2 \widehat{U}_a^d \cdot (\hat{a}^2 \widehat{I}_a^d)^* + \hat{a} \widehat{U}_a^d \cdot (\hat{a} \widehat{I}_a^d)^* \quad (5)$$

Uvažavajući lako proverljive algebarske jednakosti:  $(\hat{X}\hat{Y})^* = \hat{X}^* \hat{Y}^*$  i  $(\hat{a}^n)^* = \hat{a}^{-n}$ , izraz (5) postaje:

$$\widehat{S}^d = P^d + jQ^d = 3\widehat{U}_a^d \cdot \widehat{I}_a^{d*} \quad (6)$$

Odnosno uvažavajući (2) u izračunavanju (6):

$$\widehat{S}^d = P^d + jQ^d = 3 \cdot \frac{1}{3} \cdot (\widehat{U}_a + \hat{a} \widehat{U}_b + \hat{a}^2 \widehat{U}_c) \cdot \frac{1}{3} (\widehat{I}_a + \hat{a} \widehat{I}_b + \hat{a}^2 \widehat{I}_c) \quad (7)$$

Uvrštavajući brojne vrednosti u (7) imamo:

$$\begin{aligned} \widehat{S}^d = P^d + jQ^d &= \frac{1}{3} \cdot \left( 1 \cdot e^{j0} + e^{j\frac{2\pi}{3}} \cdot 1 \cdot e^{j240^\circ} + e^{j\frac{4\pi}{3}} \cdot 1 \cdot e^{j120^\circ} \right) \\ &\cdot \left( 0,75 \cdot e^{-j20} + e^{j\frac{2\pi}{3}} \cdot 0,65 \cdot e^{j270^\circ} + e^{j\frac{4\pi}{3}} \cdot 0,35 \right. \\ &\cdot \left. e^{j90^\circ} \right) = (1,571 + j0,107) [\text{r.j.}] \end{aligned} \quad (8)$$

Napomena: u ovom zadatku su naponi i struje mreže očigledno nesimetrični, ali su izabrani tako da se ukupna prividna snaga i prividna snaga direktne komponente poklapaju. Čitalac iz ovoga ne bi trebao nikako izvući zaključak da je ovo pravilo. Jednostavno, hteli smo pokazati da nesimetrija može biti takva da ipak postoji samo direktna komponenta prividne snage. Iz ovoga dalje sledi da je prividna snaga inverzne i nulte komponente u ovom zadatku ravna nuli. Međutim, zbog vežbanja ćemo ukratko provesti službeni proračun da se to potvrdi.

c) Slično kao u proračunu pod b), imamo:

$$\widehat{S}^i = P^i + jQ^i = 3\widehat{U}_a^i \cdot \widehat{I}_a^{i*} = 0 \quad (9)$$

Čitaocu se toplo preporučuje da pokaže verodostojnost izraza (9), prateći po koracima postupak za proračun direktne komponente dat pod b).

d) Konačno, jasno je da je:

$$\widehat{S}^0 = P^0 + jQ^0 = 3\widehat{U}_a^0 \cdot \widehat{I}_a^{0*} = 0 \quad (10)$$

**2. Temena vrednost osnovnog harmonika napona iznosi 280 V, a ukupno harmonijsko izobličenje (THD) tog napona je 15%. Izračunajte njegovu efektivnu vrednost.**

Ukupno harmonijsko izobličenje (THD) računamo po njegovoj definiciji [2]:

$$THD^2(U) = \frac{\sum_{n=2} U_n^2}{U_1^2} \quad (11)$$

gde su  $U_1, U_2 \dots U_n$  temene vrednosti pojedinih harmonika. Imajući u vidu da su harmonici sinusnog oblika, između temene vrednosti  $U_n$  i efektivne vrednosti  $U_{neff}$  napona za bilo koji harmonik važi:

$$U_{neff} = \frac{U_n}{\sqrt{2}} \quad (12)$$

Na osnovu poslednje dve jednačine THD se može računati i kao:

$$THD^2(U) = \frac{\sum_{n=2} U_{neff}^2}{U_{1eff}^2} \quad (13)$$

S druge strane, efektivna vrednost napona se uz pomoć efektivnih vrednosti pojedinih harmonika može izračunati na sledeći način:

$$U_{eff}^2 = \sum_{n=1} U_{neff}^2 \quad (14)$$

Na osnovu (13) i (14) možemo dobiti jednostavan izraz za eksplicitnu vrednost THD-a:

$$THD^2(U) = \frac{U_{eff}^2 - U_{1eff}^2}{U_{1eff}^2} = \left( \frac{U_{eff}}{U_{1eff}} \right)^2 - 1 \quad (15)$$

Odatle je:

$$U_{eff} = U_{1eff} \sqrt{1 + THD^2(U)} \quad (16)$$

Nakon uvrštavanja brojnih vrednosti:  $U_{eff} = \frac{280}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + 0,15^2} = 200,2 \text{ V}$

**3. Harmonijsko izobličenje napona u nekoj sabirnici je 8%, a struje koju potrošač uzima 23%. Izračunati prividnu snagu osnovnog harmonika ako je pri tom ukupna prividna snaga potrošača 92 kVA.**

Ukupnu prividnu snagu računamo kao:

$$S = \sqrt{3} \cdot U_{eff} \cdot I_{eff} \quad (17)$$

Poučeni jednačinom (16), izraz (17) postaje:

$$\begin{aligned} S &= \sqrt{3} \cdot U_{1eff} \sqrt{1 + THD^2(U)} \cdot I_{1eff} \sqrt{1 + THD^2(I)} \\ &= S_1 \cdot \sqrt{1 + THD^2(U)} \cdot \sqrt{1 + THD^2(I)} \end{aligned} \quad (18)$$

odakle je prividna snaga prvog harmonika:

$$S_1 = \frac{S}{\sqrt{1 + THD^2(U)} \cdot \sqrt{1 + THD^2(I)}} \quad (19)$$

Uvrštavanjem brojnih vrednosti se dobija:

$$S_1 = \frac{92 \text{ kVA}}{\sqrt{1 + 0,08^2} \cdot \sqrt{1 + 0,23^2}} = 89,37 \text{ kVA}$$

Za više pojedinosti vezanih za harmonike, njihovo dejstvo, propise i preporuke, čitalac se upućuje na [3] – [9].

**4. Reaktivna snaga osnovnog harmonika na čistoj induktivnosti iznosi 1 kVar. Efektivne vrednosti napona osnovnog i viših harmonika date su donjom tabelom:**

| n          | 1   | 5  | 7  | 11 | 13 | 17 | 19 |
|------------|-----|----|----|----|----|----|----|
| $U_{neff}$ | 194 | 22 | 31 | 18 | 11 | 5  | 2  |

**Kolika je ukupna reaktivna snaga na toj induktivnosti?**

Na čistoj induktivnosti ili bolje rečeno na teretu koji je izrazito reaktivan, jalovu (reaktivnu) snagu n-tog harmonika računamo kao:

$$Q_L = \sum_n U_{neff} \cdot I_{neff} \quad (20)$$

Veza između napona i struje osnovnog i viših harmonika na izrazito induktivnom teretu je data jednakostima:

$$U_1 = j\omega_0 L I_1, \quad U_n = j\omega_0 L I_n \quad (21)$$

odnosno:  $\frac{U_{neff}}{U_{1eff}} = n \frac{I_{neff}}{I_{1eff}}$ , pa je odnos između ukupne reaktivne snage i reaktivne snage osnovnog harmonika:

$$\frac{Q_L}{Q_{L1}} = \frac{\sum_n U_{neff} \cdot I_{neff}}{U_{1eff} \cdot I_{1eff}} = \sum_n \frac{1}{n} \left( \frac{U_{neff}}{U_{1eff}} \right)^2 \quad (22)$$

odakle je:  $Q_L = Q_{L1} \sum_n \frac{1}{n} \left( \frac{U_{neff}}{U_{1eff}} \right)^2$ . Uvrštavanjem brojnih vrednosti dobija se:

$$Q_L = 1 \text{ kVAR} \cdot \left[ 1 + \frac{1}{5} \cdot \left( \frac{22}{194} \right)^2 + \frac{1}{7} \cdot \left( \frac{31}{194} \right)^2 + \frac{1}{11} \cdot \left( \frac{18}{194} \right)^2 + \frac{1}{13} \cdot \left( \frac{11}{194} \right)^2 + \frac{1}{17} \cdot \left( \frac{5}{194} \right)^2 + \frac{1}{19} \cdot \left( \frac{2}{194} \right)^2 \right]$$

$$= 1007,2 \text{ Var}$$

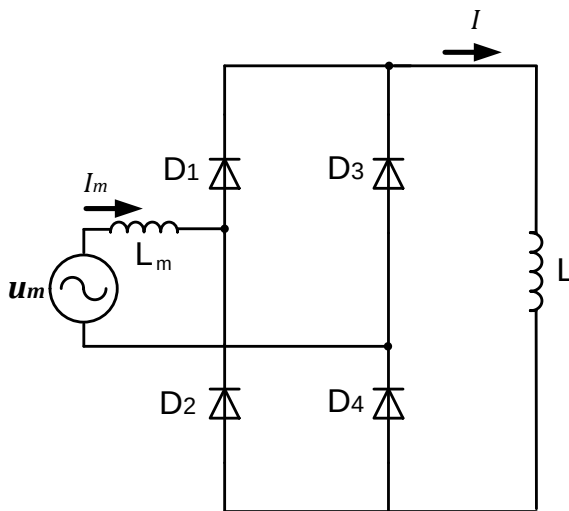
Napomena: u slučaju jako visokih harmonika, tj. učestanosti, zbog prisutnog površinskog dejstva ne bi bila ista kao kod niskih harmonika. Ovaj se slučaj međutim retko dešava pošto su harmonici napona i struje od značaja prisutni na srazmerno niskim učestanostima.

## 1.2. Harmonijska analiza

**1. Jednofazni diodni ispravljač povezan na električnu mrežu na izlazu ima jako veliku induktivnost  $L$ . Temena vrednost struje tereta  $I$  je 10 A. Odrediti harmonijski sastav struje koju taj ispravljač uzima iz mreže, kao i ukupno harmonijsko izobličenje (engl: *Total Harmonic Distortion*, skraćeno: *THD*) Zanimariti uticaj induktivnosti  $L_m$  na ulazu ispravljača.**

Ovaj zadatak ima za cilj prikazati postupak proračuna harmonijskog sastava datog signala. Postupak je naravno isti bilo da se radi o naponu, struji ili nekoj drugoj veličini. Ovde smo izabrali jedan, kako će se videti jednostavan strujni talasni oblik u svrhu lakšeg razumevanja samog proračuna.

Pre nego što krenemo na izradu zadatka, daćemo nekoliko bitnih izvoda iz teorije. Odlomak koji sledi čitalac ne mora da prelazi ukoliko je upoznat sa načelima harmonijske analize i Fourier-ovim redom

Slika 1: Strujni ispravljač sa velikom izlaznom induktivnosti  $L$ 

Da bismo imali opisno shvatanje značenja Fourier-ovog reda, krenimo od jedne analogije. Neka tačka se u trodimenzionalnom ortogonalnom prostoru (kartezijanskom sistemu) opisuje pomoću 3 upravna (ortogonalna) jedinična vektora, koje obično označavamo kao  $\vec{i}$ ,  $\vec{j}$  i  $\vec{k}$  ili  $\vec{e}_x$ ,  $\vec{e}_y$  i  $\vec{e}_z$ . Za njih važi načelo upravnosti koje svedeno na ovaj slučaj kaže da proizvod upravnih vektora mora biti ravan nuli, dok proizvod samog vektora sa sobom mora dati neku konačnu vrednost. Za pojedinosti, čitalac se upućuje na [10]. S druge strane, ako posmatramo proizvoljne periodične signale, intuitivno se potkrada misao da bi se oni mogli nekako dovesti u vezu ili čak predstaviti pomoću dobro poznatih prostoperiodičnih funkcija, čuvenih sinus-a i cosinus-a, tim više, što te funkcije sin i cos imaju osobinu ortogonalnosti kao i kartezijanski vektori. Međutim, sreću ovde kvari činjenica da za razliku od tačke u 3-D prostoru, za opis prostoperiodične funkcije, potrebno je beskonačno mnogo tačaka.

To suštinski znači da je minimalan broj vektora (tzv. baza prostora) beskonačna i izgledala bi ovako:  $\{1, \cos(\omega t), \sin \omega t, \cos(2\omega t), \sin(2\omega t) \dots \cos(n\omega t), \sin(n\omega t) \dots\}$ . Čitalac može lako pokazati da važi upravnost bilo kojeg para  $\cos(n\omega t), \sin(n\omega t)$ .

Ostaje pitanje kako da se onda jedan periodičan signal prikaže preko date baze. Odgovor daje Fourier-ov red.

Iz matematičke analize je poznato da se svaka periodična funkcija  $f(t)$  pod određenim uslovima može prikazati u obliku:

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \cos(n\omega_0 t) + B_n \sin(n\omega_0 t) \quad (23)$$

pri čemu je:

$\omega_0 = 2\pi f_0$ , gde je  $f_0$  osnovna (fundamentalna) učestanost, npr. 50 Hz ili 60 Hz, a signal na toj učestanosti zovemo *osnovni harmonik* dok je  $n\omega_0 t$ , signal na n-tom umnošku osnove učestanosti i zovemo ga *viši harmonik*.

Činioci  $A_0$ ,  $A_n$  i  $B_n$  se izračunavaju na osnovu sledećih jednakosti:

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (24)$$

$$A_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \cos(n\omega_0 t) dt \quad (25)$$

$$B_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \sin(n\omega_0 t) dt \quad (26)$$

Pošto se električne veličine kao što su struje i naponi najčešće daju u funkciji ugla, zbog pogodnijeg računanja se integracija uz jednostavnu smenu vrši po uglu:

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega_0 t) d(\omega_0 t) \quad (27)$$

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega_0 t) \cdot \cos(n\omega_0 t) d(\omega_0 t) \quad (28)$$

$$B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega_0 t) \cdot \sin(n\omega_0 t) d(\omega_0 t) \quad (29)$$

Primetimo da je  $A_0$  zapravo dobro nam poznata jednosmerna komponenta koja se srazmerno lako određuje, a često, kako ćemo videti, formalan proračun po (24) ili (27) nije potreban. Račun ostalih komponenti  $A_n$  i  $B_n$  izgleda još složeniji. Međutim, postoje jednostavne osobine koje umnogome olakšavaju ceo postupak. Osobine glase:

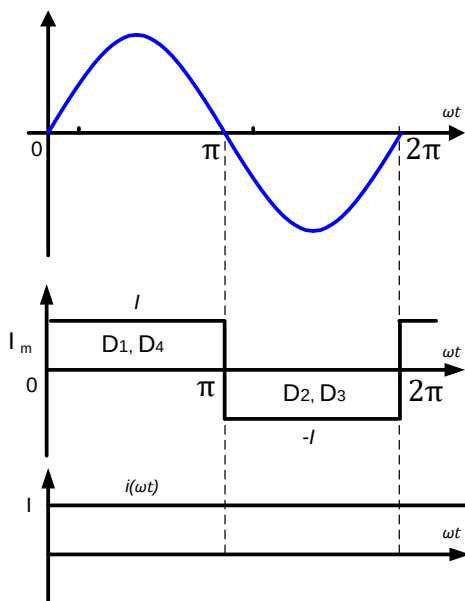
Ako je ispunjeno:  $f(-\omega_0 t) = -f(\omega_0 t)$ , nema *cosinus*-nih članova, tj. članova  $A_n$ . Ova osobina se zove neparnost.

Ako je ispunjeno:  $f(-\omega_0 t) = f(\omega_0 t)$ , nema *sinus*-nih članova, tj. članova  $B_n$ . Ova osobina se zove parnost.

Ako je ispunjeno:  $f(\omega_0 t \pm \pi) = -f(\omega_0 t)$ , nema jednosmernu komponentu, tj.  $A_0$ .

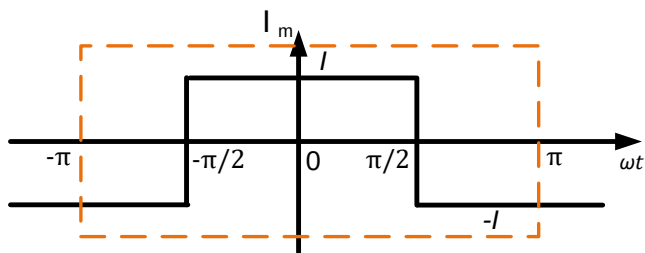
Na kraju, podsetimo i na činjenicu, da granice integracije ne moraju biti od 0 do  $2\pi$ . Bitno je naravno da zahvatimo jednu punu periodu, trajanja  $2\pi$ , dok granice mogu biti proizvoljne, npr. od  $-\pi$  do  $\pi$ .

Nakon ovog izleta u teorijska znanja, može se pristupiti izradi samog zadatka. Analiza rada ovog kola se obično počinje sa poslednjim grafikom koji prikazuje izlaznu struju, tj. struju potrošača  $I$  (slika 2). Pošto pretpostavljamo da je izlazna induktivnost jako velika, to znači da je struja  $I$  skoro potpuno izglačana, ovde prikazana kao idealno ravna. U trenutku ugla paljenja  $\omega t = \alpha$  provodi dijagonala D1-D4 i nastavlja da provodi čak i kada ulazni napon padne na nulu, sve dok druga dijagonala D2-D3 u trenutku  $\omega t = \pi + \alpha$  ne stekne uslov provođenja. U tom trenutku se odvija trenutna komutacija i struju preuzima ova druga dijagonala. U ovom toku misli imali smo dve pretpostavke: da je izlazna induktivnost  $L$  velika i ne dopušta promenu struje  $I$ , kao i da je ulazna induktivnost  $L_m$  zanemarljiva, pa je komutacija trenutna.



Slika 2: Rad idealnog strujnog ispravljača

Naš zadatak je da analiziramo harmonijski sastav struje  $I_m$ . U tu svrhu bismo mogli naravno računati integrale po definicijama 15-17 u granicama 0 do  $2\pi$ , a možemo i manipulacijom granicama integracije koristiti osobine parnosti. Postavićemo koordinatni početak tako da valni oblik struje  $I_m$  bude paran. Granice integracije su u tu svrhu uokvirene isprekidanom linijom (slika 3).



Slika 3: Prilagođen izbor koordinatnog sistema

Očigledno je da ne postoji jednosmerna komponenta kao i da važi uslov parnosti (npr:  $I_m\left(-\frac{\pi}{4}\right) = I_m\left(\frac{\pi}{4}\right) = I$ ,  $I_m\left(-\frac{2\pi}{3}\right) = I_m\left(\frac{2\pi}{3}\right) = -I$ ). Zato računamo samo cosinusne članove  $A_n$ .

$$\begin{aligned}
 A_n &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} I_m \cdot \cos(n\omega_0 t) d(\omega_0 t) \\
 &= \frac{1}{\pi} \left[ \int_{-\pi}^{-\pi/2} -I \cdot \cos(n\omega_0 t) d(\omega_0 t) + \int_{-\pi/2}^{\pi/2} I \cdot \cos(n\omega_0 t) d(\omega_0 t) + \int_{\pi/2}^{\pi} -I \cdot \cos(n\omega_0 t) d(\omega_0 t) \right] \quad (30)
 \end{aligned}$$

Gornji izraz nije teško izračunati, ali možemo ga dodatno pojednostaviti koristeći osobinu parnosti. Naime, vrednost gornjeg integrala je jednaka dvostrukoj vrednosti sledećeg izraza:

$$A_n = 2 \frac{1}{\pi} \left[ \int_0^{\pi/2} I \cdot \cos(n\omega_0 t) d(\omega_0 t) + \int_{\pi/2}^{\pi} -I \cdot \cos(n\omega_0 t) d(\omega_0 t) \right] \quad (31)$$

Koristeći činjenicu da je  $\int \cos(n \cdot x) dx = \frac{1}{n} \sin(n \cdot x)$ , gornji integral postaje:

$$A_n = 2 \frac{I}{n \cdot \pi} \left[ \sin(n\omega_0 t) \Big|_0^{\pi/2} - \sin(n\omega_0 t) \Big|_{\pi/2}^{\pi} \right] = 4 \frac{I}{n \cdot \pi} \sin \frac{n\pi}{2} \quad (32)$$

U gornjem proračunu smo uvažili činjenicu da je  $\sin(n\pi) = 0 \forall n$ . Iz (32) je jasno da je vrednost koeficijenta  $A_n$  ravan nuli za bilo koji paran broj  $n$ . To znači da valni oblik ulazne struje koji posmatramo nema parne harmonike, što je važan zaključak. Pregled vrednosti prvih nekoliko harmonika su date u donjoj tabeli.

| $n$   | 1                | 2 | 3                  | 4 | 5                 | 6 | 7                  |
|-------|------------------|---|--------------------|---|-------------------|---|--------------------|
| $A_n$ | $\frac{4I}{\pi}$ | 0 | $-\frac{4I}{3\pi}$ | 0 | $\frac{4I}{5\pi}$ | 0 | $-\frac{4I}{7\pi}$ |

Uočavamo da su 1., 5., 9... harmonik pozitivni, dok su 3., 7., 11... negativni (u protivfazi).

Harmonijski sastav struje možemo dakle predstaviti kao:

$$I_m(t) = \frac{4I}{\pi} \left[ \cos(\omega t) - \frac{1}{3} \cos(3 \cdot \omega t) + \frac{1}{5} \cos(5 \cdot \omega t) - \frac{1}{7} \cos(7 \cdot \omega t) + \dots - \dots \right]$$

Ukupno harmonijsko izobličenje (THD) možemo računati po definiciji kao:

$$THD^2(I_m) = \frac{\sum_{n=2} I_{mn}^2}{I_{m1}^2} \quad (33)$$

Odnosno, ako to primenimo na izračunati harmonijski sastav, imamo:

$$THD^2(I_m) = \frac{\left(-\frac{4I}{3\pi}\right)^2 + \left(\frac{4I}{5\pi}\right)^2 + \left(-\frac{4I}{7\pi}\right)^2 + \left(\frac{4I}{9\pi}\right)^2 + \dots}{\left(\frac{4I}{\pi}\right)^2} \quad (34)$$

U teoriji bismo trebali uvažiti beskonačno mnogo članova u gornjem izrazu što je naravno nemoguće i nepotrebno. U stvarnosti je dovoljno uzeti u obzir prvih tridesetak harmonika, ponekad i manje za dobru procenu. Međutim, vrednost THD-a možemo izračunati i nedvosmisleno na osnovu (15):

$$THD^2(I_m) = \left(\frac{I_{meff}}{I_{1eff}}\right)^2 - 1 \quad (35)$$

Efektivnu vrednost osnovnog harmonika struje  $I_m$  računamo jednostavno na osnovu temene vrednosti kao:  $I_{m1eff} = \frac{I_{m1}}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{4I}{\pi} I = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I$

Ukupnu efektivnu vrednost struje  $I_m$  možemo izračunati po definiciji:

$$I_{meff}^2 = \int_T I_m^2(t) dt \quad (36)$$

Međutim, ovaj integral ne moramo i doslovno izračunati, pošto je jasno da je u intervalu  $-\pi/2$  do  $\pi/2$  (slika 3) efektivna vrednost struje jednaka njenoj trenutnoj vrednosti  $I$  (efektivna vrednost, odnosno energetska sadržaj jednosmerne struje ravan je njenoj trenutnoj jednosmernoj vrednosti u ovom slučaju). U intervalima  $(-\pi, -\pi/2)$  i  $(\pi/2, \pi)$  gde je vrednost struje negativna, njeno energetska dejstvo je i dalje pozitivno (što je formalno jasno i iz gornjeg izraza), pa je ovde efektivna vrednost

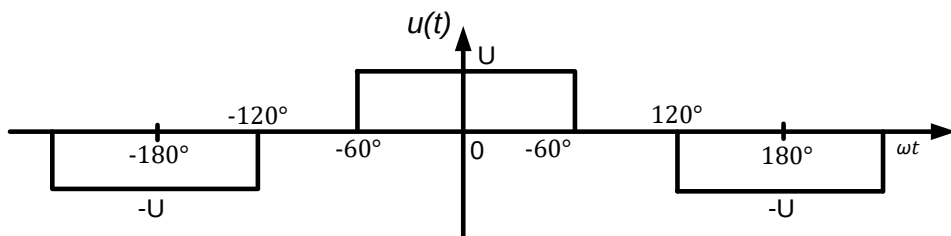
jednaka kao na intervalu  $(-\pi/2, \pi/2)$ . To znači da je efektivna vrednost struje:  $I_{meff} = I$  u celjoj periodu.

Ako sad ovu vrednost uvrstimo u (35), imamo:

$$THD^2(I_m) = \left( \frac{I}{\frac{2\sqrt{2}}{\pi} I} \right)^2 - 1 = \frac{\pi^2}{8} - 1 \Rightarrow THD(I_m) = 48\% \quad (37)$$

Za napredne metode harmonijske analize čitalac se upućuje na [11] - [13]

**2. Talasni oblik napona je dat na slici. Odredite njegov harmonijski sastav, izračunajte THD i uporedite rešenje s prošlim zadatkom.**



Slika 4: Talasni oblik napona

Kao i u prošlom zadatku, lako se proverava da važi osobina parnosti, kao i da ne postoji jednosmerna komponenta. Računamo dakle samo tzv. cosinusne članove:

$$A_n = \frac{1}{\pi} \left[ \int_{-\pi}^{-2\pi/3} -U \cdot \cos(n\omega_0 t) d(\omega_0 t) + \int_{-\pi/3}^{\pi/3} U \cdot \cos(n\omega_0 t) d(\omega_0 t) + \int_{2\pi/3}^{\pi} -U \cdot \cos(n\omega_0 t) d(\omega_0 t) \right] \quad (38)$$

Nakon provedenog proračuna sličnog kao u prethodnom zadatku, dobijamo:

$$A_n = \frac{2U}{n\pi} \left[ \sin \frac{2n\pi}{3} + \sin \frac{n\pi}{3} \right] \quad (39)$$

Za jasniji uvid u harmonijski sastav, pogodnije je dva sabirka u gornjoj zagradi svesti na jedan član. U tu svrhu primenjujemo trigonometrijski izraz:  $\sin(\alpha) + \sin(\beta) = 2\sin \frac{\alpha+\beta}{2} \cos \frac{\alpha-\beta}{2}$ . Primenujući ovu jednakost na (39) dobijamo:

$$A_n = \frac{2U}{n\pi} \left[ \sin \frac{2n\pi}{3} + \sin \frac{n\pi}{3} \right] = \frac{2U}{n\pi} \cdot 2\sin \frac{n\pi}{2} \cos \frac{n\pi}{6} = \frac{4U}{n\pi} \cdot \sin \frac{n\pi}{2} \cos \frac{n\pi}{6} \quad (40)$$

Gornji izraz nam kazuje da su svi parni harmonici i oni čiji je redni broj deljiv s 3 (tzv. trokratnici, eng: triplens) ravni nuli, a to je veoma značajan i lep rezultat. Pregled temenih vrednosti prvih nekoliko harmonika je dat u donjoj tabeli.

| $n$   | 1                        | 5                          | 7                         | 11                          | 13                         |
|-------|--------------------------|----------------------------|---------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| $A_n$ | $\frac{2\sqrt{3}}{\pi}U$ | $-\frac{2\sqrt{3}}{5\pi}U$ | $\frac{2\sqrt{3}}{7\pi}U$ | $-\frac{2\sqrt{3}}{11\pi}U$ | $\frac{2\sqrt{3}}{11\pi}U$ |

Traženi harmonijski sastav napona je dakle:

$$A_n = \frac{2\sqrt{3}}{\pi}U \left[ 1 - \frac{1}{5} + \frac{1}{7} - \frac{1}{11} + \frac{1}{13} - \dots + \dots \right] \quad (41)$$

Efektivnu vrednost napona možemo računati po (36), pa bi odgovarajući integral izgledao ovako:

$$U_{eff}^2 = \frac{2}{2\pi} \left[ \int_0^{\pi/3} U^2 d(\omega t) + \int_{2\pi/3}^{\pi} (-U)^2 d(\omega t) \right] \quad (42)$$

Proračun ovog integrala je jednostavan, ali možemo ga u potpunosti izbeći ako uočimo sa slike 4 da je u toku jedne periode (od  $-\pi$  do  $\pi$ ) ispunjenost napona  $2/3$ . Naime, u trajanju od  $2\pi$ , postoje dve "rupe" od po  $60^\circ$ , pa je ispunjenost napona prisutna u  $2\pi - 2 \cdot \frac{\pi}{3} = \frac{4\pi}{3}$  što čini  $2/3$  periode.

Stoga je:

$$U_{eff}^2 = \frac{2}{3}U^2 \Rightarrow U_{eff} = \sqrt{\frac{2}{3}}U \quad (43)$$

Efektivna vrednost osnovnog harmonika na osnovu (41) iznosi  $U_{eff1} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi}U = \frac{\sqrt{6}}{\pi}U$

Konačno, THD računamo kao u (35):

$$THD^2(u) = \left( \frac{\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}U}{\frac{\sqrt{6}}{\pi}U} \right)^2 - 1 = \frac{\pi^2}{9} - 1 \Rightarrow THD(u) = 31,1\% \quad (44)$$

Iz (37) i (44) zaključujemo da se ukupno harmonijsko izobličenje značajno smanjilo sa 48% na oko 31% zahvaljujući činjenici što postoje "rupe" u naponu. Upravo ovaj pristup se koristi u PWM tehnikama kada se želi postići birano smanjivanje harmonika, tzv. *Selective Harmonic Elimination*.

3. Mali potrošač ima sledeći harmonijski sadržaj napona i struje datih u efektivnim veličinama:

|                        | Napon [V] | Struja [A] | Sačinilac snage |
|------------------------|-----------|------------|-----------------|
| Jednosmerna komponenta | 10        | 1          |                 |
| Osnovni harmonik       | 230       | 10         | 30°             |
| Treći harmonik         | 90        | 5          | 0°              |
| Peti harmonik          | 30        | 2          | 10°             |

a) Pretpostavite da se jednostavni uređaji koriste za merenje snage i sačinioća snage tako da se izmere samo osnovni harmonici. Šta su očitavanja?

b) Koje su stvarne vrednosti snage i sačinioća snage?

c) Ako je cena električne energije 6 RSD/kWh, izračunati koliki je gubitak novca usled viših harmonika godišnje ako je ovakav teret uključen svakog dana u trajanju od 10 sati.

a) Merač snage dakle meri samo veličine na osnovnoj učestanosti, tj:

$$P_1 = U_1 \cdot I_1 \cdot \cos(\varphi_1) = 230 \cdot 10 \cdot \cos(30^\circ) = 2 \text{ kW} \quad (45)$$

Sačinilac snage je ovde  $PF_1 = \cos(30^\circ) = 0,866$

b) Stvarna vrednost snage koju teret uzima iz mreže je:

$$P = U_{dc} \cdot I_{dc} + U_1 \cdot I_1 \cdot \cos(\varphi_1) + U_3 \cdot I_3 \cdot \cos(\varphi_3) + U_5 \cdot I_5 \cdot \cos(\varphi_5) \quad (46)$$

$$= 2 \text{ kW} + 90 \cdot 5 \cdot \cos(0^\circ) + 30 \cdot 2 \cdot \cos(10^\circ) = 2,5 \text{ kW}$$

Stvarni sačinilac snage je:

$$PF = \frac{P}{U \cdot I} = \frac{P_{dc} + P_1 + P_3 + P_5}{\sqrt{U_{dc}^2 + U_1^2 + U_3^2 + U_5^2} \cdot \sqrt{I_{dc}^2 + I_1^2 + I_3^2 + I_5^2}} = 0,884 \quad (47)$$

c) Snaga harmonika je :  $2500 - 200 = 500 \text{ W}$

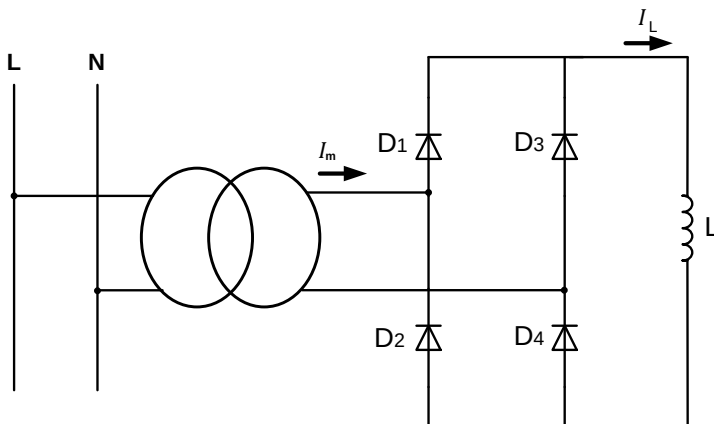
Godišnja energija harmonika je:  $500 \cdot 10 \cdot 365 = 1825 \text{ kWh}$

Cena koja se plaća za harmonijsko izobličenje je godišnje  $1825 \cdot 6 = 10950 \text{ RSD}$

Dodatne korisne pojedinosti vezane za dejstvo harmonika prema potrošaču i električnoj mreži čitalac može naći u: [14] – [15]

### 1.3. K - sačinilac

1. Izračunajte K-sačinilac jednofaznog transformatora povezanog na diodni most (slika 5) koji napaja teret stalnom jednosmernom strujom. U razmatranju uvažiti harmonike zaključno s 11-im.



Slika 5: Jednodazni ispravljač povezan na transformator

K-sačinilac (engl: *K-factor*) jeste pokazatelj koji vrednuje harmonijski sastav struje transformatora prema učešću harmonika u zagrevanju transformatora. Pri tom se efektivnoj vrednosti svakog harmonika pridružuje njegov redni broj da bi se dobilo težinsko vrednovanje. Ukoliko je vrednost sačinioa  $K$  ravna 1, potrošač koji se napaja iz datog transformatra je u potpunosti linearan (ne uzrokuje harmonijsko izobličenje struje). S druge strane, što je vrednost  $K$  veća, to je izobličenje izraženije.

$K$  - sačinilac računamo kao [16] :

$$K = \sum h^2 I_h^2 \quad (48)$$

gde je  $h$  redni broj harmonika struje, a  $I_h$  njegova relativna vrednost u odnosu na efektivnu vrednost ukupne struje kao bazne vrednosti, tj:  $I_h^{\text{efektivno,relativno}} = \frac{I_h^{\text{efektivno,apsolutno}}}{I_{\text{ukupno}}^{\text{apsolutno}}}$ . Od sada, pa nadalje  $I_h^{\text{efektivno,relativno}}$  ćemo označavati jednostavno

$I_h$  podrazumevajući da je to relativni iznos efektivne vrednosti  $h$ -tog harmonika struje.

Na osnovu zadatka 1 iz poglavlja *Harmonijska analiza* znamo da je harmonijski sastav struje tereta strujnog ispravljača (ispravljača koji na svom izlazu daje konstantnu struju) jednak:

$$i(t) = \frac{4}{\pi} I \cdot \left[ \sin(\omega t) - \frac{1}{3} \sin(3\omega t) + \frac{1}{5} \sin(5\omega t) - \frac{1}{7} \sin(7\omega t) + \dots \right] \quad (49)$$

pri tom se odgovarajuće (apsolutne) efektivne vrednosti dobiju tako što svaku temenu vrednost harmonika podelimo sa  $1/\sqrt{2}$ . To znači da su efektivne vrednosti gornjih harmonika:  $\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{4}{\pi} I$  za osnovni (prvi) harmonik,  $\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{4}{\pi} I \cdot \frac{1}{3}$  za treći harmonik,  $\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{4}{\pi} I \cdot \frac{1}{5}$  za peti i tako redom. S druge strane, znamo da je efektivna vrednost ukupne struje koju povlači strujni ispravljač, a samim tim i posmatrani transformator jednaka njegovoj temenoj vrednosti u slučaju pravougaonog valnog oblika kako je to pokazano jednačinom (37), tj:  $I_{eff} = I$ . Tada su normalizovane vrednosti harmonijskih struja:  $\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{1}{5} \cdot \frac{4}{\pi} I \cdot \frac{1}{5}$  itd.

Konačno, na osnovu (48) K-sačinilac dobijamo kao:

$$K = 1^2 \cdot \left( \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{4}{\pi} \right)^2 + 3^2 \cdot \left( \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{1}{3} \right)^2 + 5^2 \cdot \left( \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{1}{5} \right)^2 + \dots + \quad (50)$$

Možemo uočiti da je:  $\frac{I_n}{I_1} = \frac{\frac{1}{n} \cdot \frac{4I}{\pi}}{\frac{4I}{\pi}} = \frac{1}{n}$

Na osnovu toga je:  $K = \sum_n \left( n \cdot \frac{I_n}{I_1} \right)^2 = \sum_n \left( n \cdot \frac{1}{n} \right)^2 = \sum_n (1)^2 = 1 + 1 + 1 + \dots + 1 = n$

Ako  $n \rightarrow \infty$  onda i K-sačinilac teži beskonačnosti, što je naravno u stvarnosti besmisleno.

Ovaj primer odslikava da je nemoguće primeniti K-sačinilac na jedan teorijski primer kakav je struja pravougaonog oblika. Naime, K-sačinilac težinski vrednuje više harmonike, a pravougaoni signal dobija svoj oblik upravo uvažavajući veoma visoke, teorijski beskonačne harmonike. U tom smislu K-sačinilac isto vrednuje veoma visoke harmonike kojih u stvarnosti i nema kao i niže harmonike, što je posledica činjenice da ovakav oblik struje sa okomitim ivicama nije u stvarnosti moguć.

U ovom zadatku je proračun međutim ograničen na prvih jedanaest harmonika. Teorijski gledano, trebali bismo ih uzeti beskonačno mnogo što je sa inženjerskog i praktičnog stanovišta besmisleno, pošto je dejstvo visokih harmonika u ovom slučaju veoma maleno, a sa fizičke strane zbog površinskog efekta, struje na harmonijskim visokim učestanostima ne prodiru duboko u jezgro, pa ne uzrokuju značajne vrtložne struje.

Dakle,

$$K = 1^2 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{4}{\pi}\right)^2 + 3^2 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{1}{3}\right)^2 + 11^2 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{1}{11}\right)^2 = 4,86$$

**2. Harmonijski sastav struje sekundara transformatora čiji su podaci 3 MVA, 11 kV / 690 V, D-Yg je data tabelom:**

| $n$       | 1   | 5  | 7  | 11 | 13 | 17 | 19 | 23 | 25  |
|-----------|-----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| $I_n$ (%) | 100 | 19 | 13 | 8  | 5  | 3  | 2  | 1  | 0,9 |

**Može li taj transformator raditi u datom harmonijskom okruženju?**

Da bismo utvrdili da li je harmonijsko izobličenje prihvatljivo, računamo  $K$  sačinilac na osnovu (48):

$$K = \sum_n \left(n \cdot \frac{I_n}{I_1}\right)^2 = \left(1 \cdot \frac{100}{100}\right)^2 + \left(5 \cdot \frac{19}{100}\right)^2 + \dots + \left(25 \cdot \frac{0,9}{100}\right)^2 \quad (51)$$

$$= 4,436$$

$K$  sačinilac je dakle veći od 4, pa ne bi trebalo koristiti standardni transformator s punim opterećenjem u ovakvom harmonijskom okruženju. Rešenje bi bilo koristiti poseban transformator čiji je  $K$  sačinilac jednak 4. Drugo, skromnije rešenje bi bilo da se koristi običan transformator, ali pri smanjenom opterećenju. Po standardu IEEE C57 110-1986, smanjeno opterećenje se računa na osnovu slabljenja opteretivosti  $D$  (degradation):

$$D = \frac{1,15}{1 + 0,15 \cdot K_N} \quad (52)$$

gde je  $K_N$  svedeni  $K$  sačinilac, tj. sveden po efektivnoj vrednosti struje na sledeći način:

$$K_N = \frac{\sum n^2 I_n^2}{I_{eff}^2} = \frac{\sum n \left(n \cdot \frac{I_n}{I_1}\right)^2}{\left(\frac{I_{eff}}{I_1}\right)^2} = \frac{K}{1 + THD^2} \quad (53)$$

THD računamo na osnovu definicije i date tabele:

$$THD^2 = \frac{1}{I_1^2} \sum_{n=2} \left(n \cdot \frac{I_n}{I_1}\right)^2 = \frac{1}{(100)^2} [19^2 + 13^2 + \dots + 0,9^2] = 25,18 \% \quad (54)$$

Dalje je:

$$K_N = \frac{4,436}{1 + 0,2518^2} = 4,171$$

Konačno, slabljenje opteretivosti iznosi:

$$D = \frac{1,15}{1 + 0,15 \cdot 4,171} = 0,7074 \quad (55)$$

Dakle, ako bismo koristili običan transformator, on bi u datom harmonijskom okruženju mogao raditi sa oko 70% svog nazivnog opterećenja.

## 1.4. Izvori harmonijskog izobličenja

1. Jednofazni diodni most ima RE potrošač na svom izlazu pri čemu je  $R_L = 1 \Omega$ ,  $E = 275 \text{ V}$ . Napaja se s izvora  $230 \text{ V}$ ,  $50 \text{ Hz}$ . Provodnici napojnog voda imaju otpor  $50 \text{ m}\Omega$  svaki. Izračunati:

a) Efektivnu vrednost struje mreže

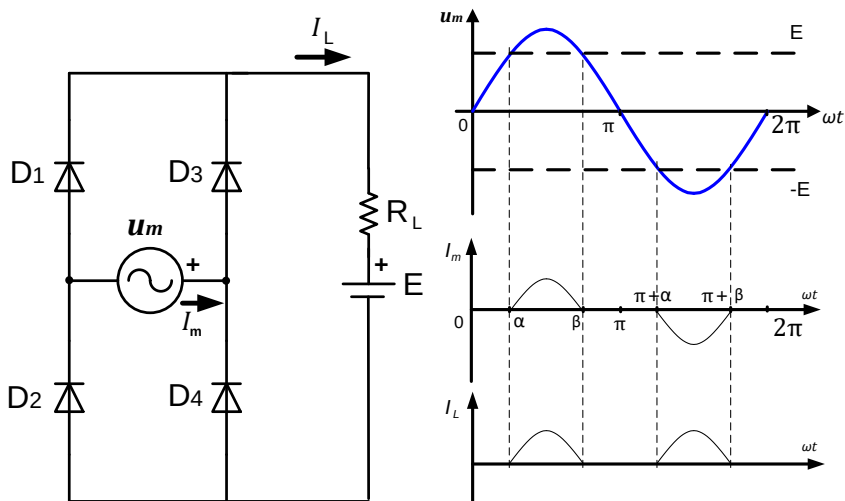
b) THD

c) vršni sačinilac (eng. *Crest Factor*) CF

Ako se primeni idealni otočni kompenzator da popravi sačinilac snage na 1, proračunati:

d) Efektivnu vrednost struje mreže

e) Odnos gubitaka u napojnomvodu pre i posle kompenzacije



Slika 6: Jednodazni ispravljač sa RE potrošačem

Jednofazni ispravljač sa odgovarajućim talasnim oblicima struje mreže  $I_m$  i struje RE potrošača  $I_L$  su dati na slici 6. Oblik struje je uslovljen činjenicom da diodni most provodi samo kada je moduo napona  $u_m$  mreže veći od stalnog naponskog izvora  $E$ , tj:

$$I_L(\omega t) = \begin{cases} \frac{U_m \sin(\omega t) - E}{R}, & \alpha < \omega t < \beta \\ \frac{U_m \sin(\omega t) + E}{R}, & \pi + \alpha < \omega t < \pi + \beta \\ 0 & \text{ostalo} \end{cases} \quad (56)$$

Dijagonala D1-D4 provodi za  $\alpha < \omega t < \beta$ , dok D2-D3 provodi u intervalu  $\pi + \alpha < \omega t < \pi + \beta$ . Trenutke provođenja  $\alpha$  i  $\beta$  određujemo iz:

$$U_m \sin(\alpha) = E \Rightarrow \alpha = \arcsin \frac{E}{U_m} = \arcsin \frac{275}{230\sqrt{2}} = 1,0679 \text{ rad} \quad (57)$$

Na osnovu simetrije sinusoide, ugao  $\beta$  računamo kao  $\beta = \pi - \alpha = 2,0737 \text{ rad}$ .

a) Efektivnu vrednost struje mreže računamo kao:

$$I_{meff}^2 = 2 \cdot \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\beta} \left( \frac{U_m \sin(\omega t) - E}{R} \right)^2 d(\omega t) \quad (58)$$

Ovaj integral možemo odrediti ručno ili primenom jedne od software-skih alata kakva je *Matlab-ova MuPad* ili *Mathematica*. Zbog jednostavnijeg proračuna, možemo uvesti smene  $I_1 = \frac{U_m}{R}$ ,  $I_2 = \frac{E}{R}$ .

Ukupna otpornost  $R$  je ravna zbiru otpornosti  $R_L$  i otpornosti voda (fazni i neutralni provodnik). Uvrštavajući vrednosti imamo:  $R = 1 + 2 \cdot 0,05 = 1,1 \Omega$

Rešavanjem integrala i uvrštavajući brojne vrednosti, dobijamo:  $I_{meff} = 19,911 \text{ A}$ .

b) THD možemo računati kao:

$$THD^2(I_m) = \left( \frac{I_{meff}}{I_{1eff}} \right)^2 - 1 \quad (59)$$

Ostaje dakle da izračunamo osnovni harmonik struje:

$$\begin{aligned}
 I_{m1eff} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot 2 \cdot \frac{1}{2\pi} \left[ \int_{\alpha}^{\pi-\alpha} (I_1 \cdot \sin(\omega t) - I_2) \cdot \sin(\omega t) d(\omega t) \right. \\
 &\quad \left. + \int_{\pi+\alpha}^{2\pi-\alpha} (I_1 \cdot \sin(\omega t) + I_2) \cdot \sin(\omega t) d(\omega t) \right] \\
 &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left[ 2 \cdot I_1 \left( \frac{\pi}{2} - \alpha + \frac{1}{2} \sin(2\alpha) \right) - 4 \cdot I_2 \cdot \cos(\alpha) \right]
 \end{aligned} \tag{60}$$

Kada uvrstimo brojne vrednosti, dobije se  $I_{m1eff} = 14,891 \text{ A}$

Sada se THD dobije kao:  $THD = \sqrt{\left(\frac{15,081}{10,728}\right)^2} - 1 = 88,76\%$

c) Vršni sačinilac dobijamo kao odnos temene vrednosti struje i efektivne vrednosti te struje:

$$CF = \frac{I_{pk}}{I_{meff}} \tag{61}$$

Vršnu vrednost struje dobijemo kao:  $I_{pk} = \frac{U_{m-E}}{R} = \frac{230\sqrt{2}-275}{1,1} = 45,699 \text{ A}$

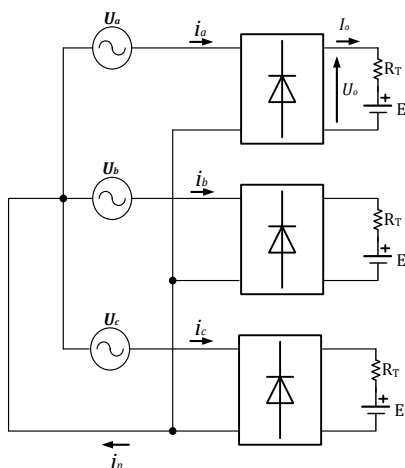
Sada je:  $CF = \frac{45,600}{19,911} = 2,29$

d) Po uslovu zadatka, nakon kompenzacije, struja mreže postaje sinisna, tj. sadrži samo osnovni harmonik, pa je:  $I_{meffnovo} = I_{m1eff} = 14,891 \text{ A}$

e) Gubici na provodnicima su Jouleovi gubici i zavise s kvadratom struje. Dakle, odnos gubitaka pre i posle kompenzacije je:  $\frac{P_g^{staro}}{P_g^{novo}} = \frac{19,911^2}{14,891^2} = 1,788$

Ukoliko se čitalac želi podsetiti osnova kola energetske elektronike, upućujemo ga na: [17]-[20].

2. Tri jednofazna ispravljača, svaki opterećen sa istim RE potrošačem,  $R_T=1\ \Omega$ ,  $E=300\text{ V}$  su povezani na tri faze i neutralni vod kao na slici 7. Otpornosti faznih vodova i neutralnog voda su iste i iznose po  $0,05\ \Omega$ . Izračunajte:



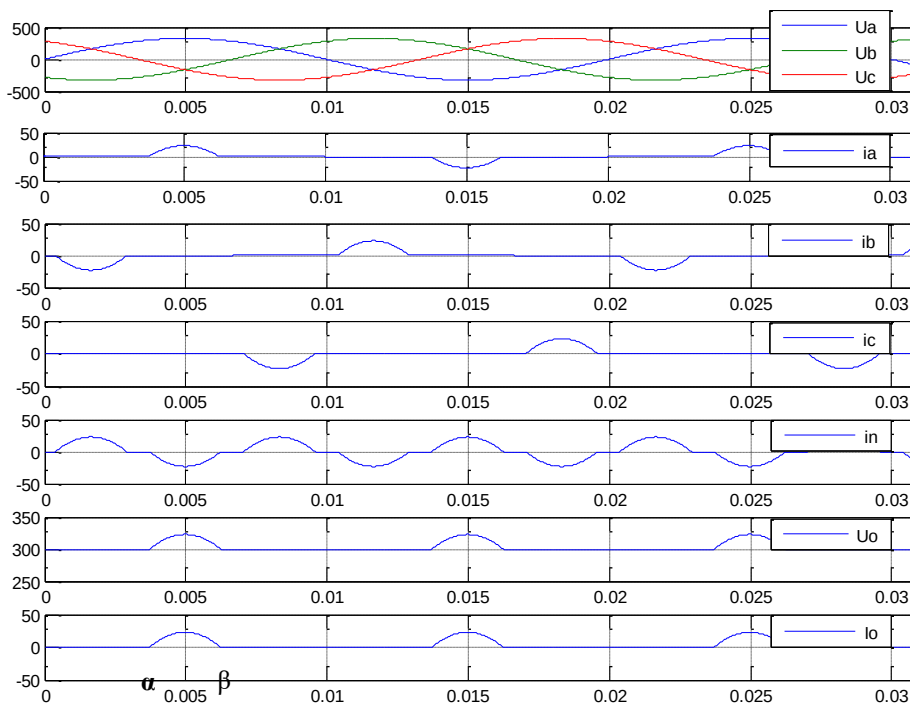
Slika 7: Tri jednofazna ispravljača povezana na trofazni četverožilni sistem

a) Efektivne vrednosti faznih struja

b) Efektivnu vrednost struje neutralnog voda

c) Ako bi se primenio kompenzator čiji je zadatak da kompenzuje sačinilac snage u sve tri faze na vrednost 1, koliki bi bio odnos gubitaka pre i posle te kompenzacije?

Na slici 8 dati su fazni naponi, fazne struje, struja neutralnog voda, kao i napon i struja tereta. U rešavanju se oslanjamo na prethodni zadatak, pa ugao početka i kraja vođenja diodnog mosta povezanog na prvi fazni provodnik dobijamo na osnovu izraza (57). Naravno, uglove za preostale dve faze dobijamo smicanjem za  $\pm 120^\circ$ , ali to nam nije od daljeg značaja pošto je sistem simetričan, pa se sve vrednosti kao što su efektivne vrednosti struja i vrednosti pojedinih harmonika iste u za sve tri faze.



Slika 8: Struje i naponi od značaja

a) Efektivnu vrednost mrežne fazne struje dobijemo na osnovu (58):

$$I_{mef} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \left[ \frac{\pi - 2\alpha + \sin(2\alpha)}{2} I_1^2 + (\pi - 2\alpha) I_2^2 - 4I_1 I_2 \cdot \cos(\alpha) \right]} \quad (62)$$

$$= 8,416 \text{ A}$$

gde je  $R$  ukupna otpornost po jednoj fazi, odnosno:  $R = 1 + 2 \cdot 0,05 = 1,1 \Omega$ , dok su  $I_1 = \frac{U_m}{R}$ , a  $I_2 = \frac{E}{R}$

b) Neutralni vod u slučaju da nema viših harmonika ne bi provodio nikakvu struju, pošto je zbir tri fazne struje u svakom trenutku u takvom idealnom slučaju nula. Međutim, u slučaju da postoje viši harmonici, stanje je značajno drugačije (Tabela 1).

Tabela 1: Viši harmonici u smislu simetričnih komponenti

|                  | Fazni stav faze a  | Fazni stav faze b                                         | Fazni stav faze c                                         |
|------------------|--------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Osnovni harmonik | $\omega t$         | $\omega t - 2\pi/3$                                       | $\omega t + 2\pi/3$                                       |
| Drugi harmonik   | $2 \cdot \omega t$ | $2 \cdot (\omega t - 2\pi/3) = 2 \cdot \omega t + 2\pi/3$ | $2 \cdot (\omega t - 2\pi/3) = 2 \cdot \omega t + 2\pi/3$ |
| Treći harmonik   | $3 \cdot \omega t$ | $3 \cdot (\omega t - 2\pi/3) = 3 \cdot \omega t$          | $3 \cdot (\omega t + 2\pi/3) = 3 \cdot \omega t$          |
| Peti harmonik    | $5 \cdot \omega t$ | $5 \cdot (\omega t - 2\pi/3) = 5 \cdot \omega t + 2\pi/3$ | $5 \cdot (\omega t + 2\pi/3) = 5 \cdot \omega t - 2\pi/3$ |
| Sedmi harmonik   | $7 \cdot \omega t$ | $7 \cdot (\omega t - 2\pi/3) = 7 \cdot \omega t - 2\pi/3$ | $7 \cdot (\omega t + 2\pi/3) = 7 \cdot \omega t + 2\pi/3$ |
| Deveti harmonik  | $9 \cdot \omega t$ | $9 \cdot (\omega t - 2\pi/3) = 9 \cdot \omega t$          | $9 \cdot (\omega t + 2\pi/3) = 9 \cdot \omega t$          |

Iz gornje tabele vidimo da se svi harmonici koji nisu deljivi sa tri ponašaju ili kao fazori direktnog redosleda sa faznim stavovima  $(0, -2\pi/3, 2\pi/3)$  ili kao fazori inverznog redosleda  $(0, 2\pi/3, -2\pi/3)$ , dok se trokratnici ponašaju kao nulta komponenta. Iz toga dalje sledi da će kroz neutralni vod postojati samo trokratnici, odnosno da struju neutralnog voda možemo izračunati kao:

$$I_n(t) = 3 \cdot (I_{m3}(t) + I_{m9}(t) + I_{m15}(t) + \dots) \quad (63)$$

Za praktične potrebe su dovoljni treći, deveti i petnaesti harmonik. Parni trokratnici kao 6,12, itd. ne postoje u ovakvom obliku struje, pa ih ne razmatramo. Efektivna vrednost struje neutralnog voda je onda:

$$I_{neff} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot 3 \cdot \sqrt{I_{m3}^2 + I_{m9}^2 + I_{m15}^2} = 3 \cdot \sqrt{I_{m3eff}^2 + I_{m9eff}^2 + I_{m15eff}^2} \quad (64)$$

što se u većini slučajeva može svesti na  $I_{neff} \approx 3 \cdot I_{m3eff}$ , no ovde ćemo uvažiti i deveti i petnaesti harmonik

Slično kao u (60), na osnovu svojstva neparnosti, harmonike računamo iz:

$$I_{keff} = \frac{1}{\sqrt{2}} B_n = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot 2 \cdot \frac{2}{2\pi} \int_0^{\pi-\alpha} (I_1 \cdot \sin(\omega t) - I_2) \cdot \sin(k \cdot \omega t) \cdot d(\omega t) \quad (65)$$

Koristeći programski paket Matlab, odnosno njegov alat Mupad, za treći, deveti i petnaesti harmonik ( $k=3,9,15$ ) dobijamo:

$$I_{3eff} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \left[ \frac{\sin(2\alpha) \cdot (\cos(2\alpha) - 1)}{2} I_1 - \frac{2}{3} \cos(3\alpha) \cdot I_2 \right] = 4,723 \text{ A} \quad (66)$$

$$I_{9eff} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \left[ \left( \frac{\sin(10\alpha)}{10} - \frac{\sin(8\alpha)}{8} \right) I_1 - \frac{2}{9} \cos(9\alpha) \cdot I_2 \right] = 1,027 \text{ A}$$

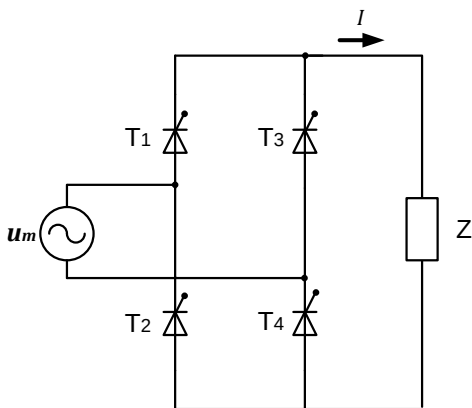
$$I_{15eff} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \left[ \left( \frac{\sin(16\alpha)}{16} - \frac{\sin(14\alpha)}{14} \right) I_1 - \frac{2}{15} \cos(15\alpha) \cdot I_2 \right] = 0,458 \text{ A}$$

Na osnovu izraza za  $I_{3eff}$  se zapravo dobije negativna vrednost, tj.  $I_{3eff} = -4,723 \text{ A}$ , zato što smo efektivne vrednosti računali tako što smo odgovarajuće temene vrednost podelili sa  $\frac{1}{\sqrt{2}}$ . Negativna vrednost odgovarajućeg Fourier-ovog sačinioca  $B_3$  kazuje da je treći harmonik u protivfazi sa osnovnim, no njegovo učešće u efektivnoj vrednosti struje je pozitivno, pa smo uzeli pozitivnu vrednost, tj.  $I_{3eff} = 4,723 \text{ A}$ . Sada, na osnovu (64) i (66), efektivna vrednost struje neutralnog voda je:  $I_{neff} = 3 \cdot \sqrt{4,723^2 + 1,027^2 + 0,458^2} = 14,567 \text{ A}$ . Oдавde vidimo da je zbog jake nesimetrije neutralni vod više opterećen od faznih provodnika. Sa slike 8 uočavamo da je učestanost struje neutralnog voda tri puta veća od učestanosti faznih struja, što je naravno potvrda izrazitog učešća trećeg harmonika, dok su ostali trokratnici znatno manje izraženi.

c) Gubici pre kompenzacije su:  $P_{g0} = 3 \cdot 0,05 \cdot 8,416^2 + 0,05 \cdot 14,567^2 = 21,234 \text{ W}$

Posle kompenzacije fazne struje postaju sinusne, pa nema struje neutralnog voda. Odatle su gubici:  $P_{g1} = 3 \cdot 0,05 \cdot 8,416^2 = 10,6244 \text{ W}$ . Odnos gubitaka pre i posle kompenzacije je:  $\frac{21,234}{10,624} = 2$

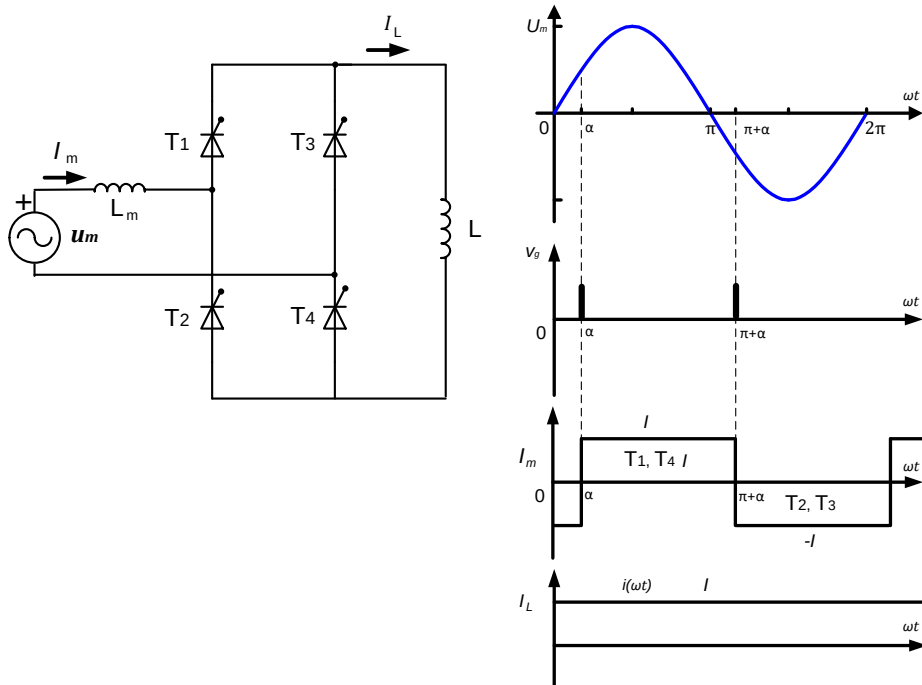
**3. Jednofazni tiristorski ispravljač sa slike 9 se napaja iz mrežnog naizmeničnog napona efektivne vrednosti 230 V. Pri tom je ugao paljenja tiristora  $\alpha=60^\circ$ . Pretpostavite da ispravljač napaja teret nazivnom strujom stalne nepromenljive vrednosti od 20 A. Izračunati:**



Slika 9: Jednofazni tiristorski ispravljač

- Ukupno harmonijsko izobličenje THD mrežne struje (struje na ulazu u ispravljač)
- Izobličenje mrežne struje pri punom teretu (Total Demand Distortion) TDD
- Pokazatelj izobličenja (Distortion Index) DIN mrežne struje.
- Sačinilac izobličenja (Distortion Factor) DF, sačinilac pomeraja (Displacement Factor) DPF i sačinilac snage (Power Factor) PF

Prvo ćemo razmotriti talasne oblike struja i napona od značaja:



Slika 10: Jednofazni tiristorski ispravljač i talasni oblici

Gornji dijagrami su urađeni pod pretpostavkom da je ulazna induktivnost jako mala tako da je komutacija trenutna.

a) Talasni oblik struje mreže je istovetan talasnom obliku sa slike 2 osim što je pomećen za ugao vođenja  $\alpha$ . Zato je THD isti kao u tom slučaju. Možemo ga ponovo izračunati na sličan način, no za tim nema potrebe. Potpuno harmonijsko izobličenje je dakle,  $THD(I_m) = 48\%$ .

b) Prvo ćemo objasniti pojam izobličenja mreže pri punom teretu (TDD)

**TDD** (izobličenje punog tereta, eng: *Total Demand Distortion*) se uvek računa kao harmonijsko izobličenje u odnosu na najveću struju koju zahteva dati potrošač (za koju je potrošač predviđen). S druge strane, **THD** se računa u odnosu na trenutnu struju potrošača koja naravno ne mora biti najveća moguća. To znači da TDD daje bolji uvid na harmonijski uticaj datog potrošača prema ostatku sistema. Naime, THD može da bude prilično visok, ali je pri tom vrednost struje mala, pa je i uticaj harmonijskog izobličenja datog tereta mali. S druge strane možemo primetiti da su pokazatelji TDD i THD potpuno jednaki pri punom opterećenju, dok sa padom tereta, vrednost THD-a opada u odnosu na TDD.

TDD možemo računati na sledeći način:

$$TDD = \frac{\text{Osnovni harmonik date struje tereta}}{\text{Osnovni harmonik nazivne struje tereta}} THD \quad (67)$$

Pošto je struja tereta jednaka nazivnoj, sledi da je u posmatranom slučaju TDD jednak THD-u, odnosno:  $TDD = THD = 48\%$ .

c) Količnik izobličenja DIN (distortion index) nam govori koliki je odnos viših harmonika datog napona ili struje u odnosu na efektivnu vrednost tog napona ili struje:

$$DIN^2(I_m) = \frac{\sum_{n=2} I_{mn}^2}{I_{meff}^2} \quad (68)$$

Razlika u odnosu na THD je što THD daje odnos viših harmonika i osnovnog harmonika, dok DIN uvažava efektivnu vrednost. Polazeći od gornje definicije DIN-a, možemo naći jednostavnu vezu s THD-om:

$$\begin{aligned} DIN^2(I_m) &= \frac{\sum_{n=2} I_{mn}^2}{I_{meff}^2} = \frac{I_{meff}^2 - I_{1eff}^2}{I_{meff}^2} = 1 - \left( \frac{I_{1eff}}{I_{meff}} \right)^2 \\ &= 1 - \frac{1}{1 + THD^2} = \frac{THD^2}{1 + THD^2} \end{aligned} \quad (69)$$

Ako uvrstimo da je  $THD = 48\%$ , dobijemo:  $DIN(I_m) = 43.6\%$ .

d) Da bismo pronašli sačinilac izobličenja DF (Distortion Factor), krenućemo od definicije sačinioa snage PF:

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{P}{S_1} \cdot \frac{S_1}{S} \quad (70)$$

Količnik  $\frac{P}{S_1}$  se naziva sačinilac pomeraja (Displacement Factor) DPF. To je zapravo čuveni "kosinus fi", koji govori koliko je učešće radne (aktivne) snage u prividnoj snazi osnovnog harmonika, a određeno je uglom između osnovnog harmonika napona i struje.

U našem slučaju, sa slike 10 je očigledno da je pomeraj između napona mreže  $U_m$  i struje mreže  $I_m$  ravan uglu  $\alpha=60^\circ$ , pa je  $DPF = \cos(60^\circ) = 0,5$ .

Količnik  $\frac{S_1}{S}$  predstavlja učešće prividne snage osnovnog harmonika u ukupnoj prividnoj snazi, a to je zapravo merilo prisutnosti ukupnog izobličenja. Ovaj količnik zato predstavlja sačinilac izobličenja (Distortion Factor) DF.

Izračunaćemo ga na sledeći način:

$$DF = \frac{S_1}{S} = \frac{U_{1eff} \cdot I_{1eff}}{U_{eff} \cdot I_{eff}} = \frac{U_{1eff}}{U_{eff}} \cdot \frac{I_{1eff}}{I_{eff}} \quad (71)$$

Pošto je napon mreže po pretpostavci sinusni,  $\frac{U_{1eff}}{U_{eff}} = 1$ , dok količnik  $\frac{I_{1eff}}{I_{eff}}$  računamo na osnovu (35):

$$DF = \frac{S_1}{S} = \frac{U_{1eff} \cdot I_{m1eff}}{U_{eff} \cdot I_{meff}} = \frac{U_{1eff}}{U_{eff}} \cdot \frac{I_{m1eff}}{I_{meff}} = 1 \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + THD^2(I_m)}} = 0,9 \quad (72)$$

Sačinilac izobličenja PF na osnovu (70) jednak je proizvodu DF i DPF, pa imamo:

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{P}{S_1} \cdot \frac{S_1}{S} = DPF \cdot DF = 0,5 \cdot 0,9 = 0,45 \quad (73)$$

**4. Jednofazni diodni most povlači iz mreže struju čiji je THD = 60%, a sačinilac pomeraja 0,95. Snaga koju uzima iz mreže je 2 kW. Efektivna vrednost napona mreže je 230 V, a učestanost 50 Hz. Vršni sačinilac mrežne struje (Crest Factor) CF iznosi 2. Izračunajte:**

**a) Sačinilac snage**

**b) Temenu vrednost struje**

a) Slično kao i u prošlom zadatku, na osnovu (70) i (72) imamo:

$$PF = DPF \cdot \frac{U_{1eff}}{U_{eff}} \cdot \frac{I_{1eff}}{I_{eff}} = DPF \cdot 1 \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + THD^2(I)}} = 0,95 \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + 0,6^2}} = 0,81662 \quad (74)$$

b) Temena vrednost struje  $I_{pk}$  možemo izračunati iz njene efektivne vrednosti i vršnog sačinioa CF:

$$CF = \frac{I_{pk}}{I_{eff}} \quad (75)$$

Trebamo dakle prvo naći efektivnu vrednost struje mreže:

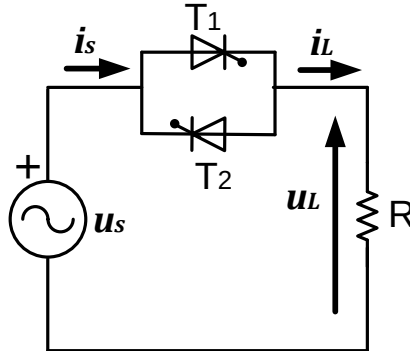
$$P = U_{eff} \cdot I_{eff} \cdot PF \Rightarrow I_{eff} = \frac{P}{PF \cdot U_{eff}} \quad (76)$$

Sada je temena vrednost struje:

$$I_{pk} = CF \cdot \frac{P}{PF \cdot U_{eff}} = 2 \cdot \frac{2000}{0,81662 \cdot 230} = 22,32 \text{ A} \quad (77)$$

**5. Jednofazni regulator napona sa slike je opterećen čisto otpornim potrošačem od 5  $\Omega$ . Ulazni napon mu je 220 V pri 50 Hz. Ugao paljenja tiristora je 130°. Izračunajte:**

- Efektivnu vrednost napona potrošača
- Ukupno harmonijsko izobličenje struje mreže (ulazne struje)
- Sačinilac pomeraja (DPF)
- Sačinilac izobličenja (DF)
- Sačinilac snage (PF)
- Snagu potrošača i snagu koja se uzima iz mreže
- Vršni sačinilac (CF)

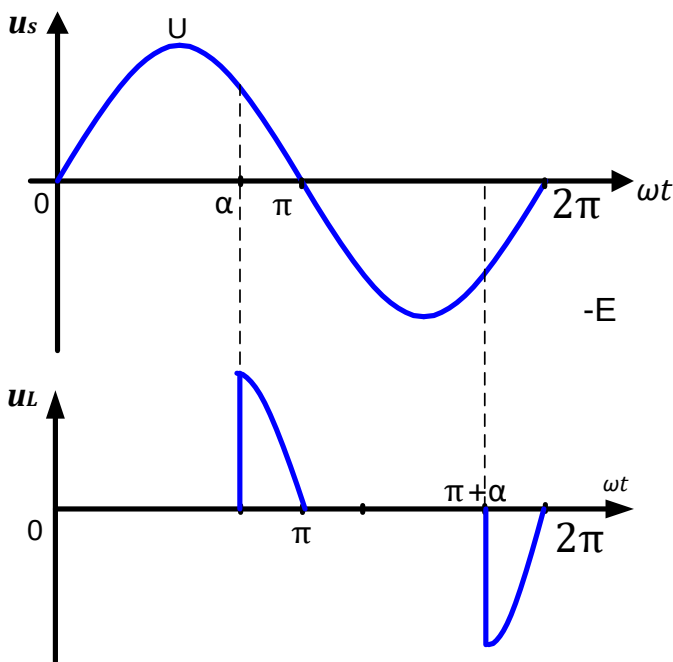


Slika 11: Naponski regulator opterećen otpornim potrošačem.

a) Efektivnu vrednost napona potrošača  $u_L$  ćemo odrediti na osnovu dijagrama sa slike 12.

Polazeći od definicije efektivne vrednosti neke veličine imamo:

$$U_{Leff}^2 = 2 \cdot \frac{1}{2\pi} \left[ \int_{\alpha}^{\pi} (U_{smax} \cdot \sin(\omega t))^2 \cdot d(\omega t) \right] \quad (78)$$



Slika 12: Talasni oblici ulaznog i izlaznog napona naponskog regulatora

Ovaj integral se dalje rešava kao:

$$U_{Leff}^2 = \frac{U_{smax}^2}{\pi} \left[ \int_{\alpha}^{\pi} \frac{1 - \cos(2\omega t)}{2} \cdot d(\omega t) \right] \quad (79)$$

pa se daljim računom dobije:

$$U_{Leff} = \sqrt{2} U_{seff} \sqrt{\frac{\pi - \alpha + \frac{1}{2} \sin(2\alpha)}{2\pi}} \quad (80)$$

Uvrštavanjem brojnih vrednosti:

$$U_{Leff} = 220\sqrt{2} \sqrt{\frac{\pi - \frac{130}{180}\pi + \frac{1}{2} \sin\left(2 \cdot \frac{130}{180}\pi\right)}{2\pi}} = 76,533 \text{ V} \quad (81)$$

b) Ukupno harmonijsko izobličenje struje mreže je jednako ukupnom harmonijskom izobličenju napona potrošača pošto su im talasni oblici istog oblika (potrošač je otporni), pa možemo koristiti gornji dijagram pri harmonijskoj analizi. Ovde ne možemo primeniti niti jedno od pravila simetrije, pa nam ne preostaje ništa

drugo nego da računamo Fourier-ove koeficijente (i cosinusni i sinusni) za osnovni harmonik po definiciji:

$$A_1 = \frac{1}{\pi} \left[ \int_{\alpha}^{\pi} I \cdot \sin(\omega_0 t) \cdot \cos(\omega_0 t) d(\omega_0 t) + \int_{\pi+\alpha}^{2\pi} I \cdot \sin(\omega_0 t) \cdot \cos(\omega_0 t) d(\omega_0 t) \right] \quad (82)$$

Gde je  $I = \frac{U_{smax}}{R}$ . Koristeći dalje trigonometrijsku jednakost  $\sin(2x) = 2 \sin(x) \cos(x)$  imamo:

$$A_1 = \frac{I}{\pi} \left[ \int_{\alpha}^{\pi} \frac{\sin(2\omega_0 t) d(\omega_0 t)}{2} + \int_{\pi+\alpha}^{2\pi} \frac{\sin(2\omega_0 t) d(\omega_0 t)}{2} \right] \quad (83)$$

$$= \frac{I}{2\pi} (\cos(2\alpha) - 1)$$

Na sličan način tražimo "sinusni" koeficijent B1:

$$B_1 = \frac{1}{\pi} \left[ \int_{\alpha}^{\pi} I \cdot \sin(\omega_0 t) \cdot \sin(\omega_0 t) d(\omega_0 t) + \int_{\pi+\alpha}^{2\pi} I \cdot \sin(\omega_0 t) \cdot \sin(\omega_0 t) d(\omega_0 t) \right] \quad (84)$$

odnosno:

$$B_1 = \frac{I}{\pi} \left[ \int_{\alpha}^{\pi} \frac{1 - \cos(2\omega_0 t)}{2} d(\omega_0 t) + \int_{\pi+\alpha}^{2\pi} \frac{1 - \cos(2\omega_0 t)}{2} d(\omega_0 t) \right] \quad (85)$$

$$= \frac{I}{2\pi} (2\pi - 2\alpha + \sin(2\alpha))$$

Efektivna vrednost osnovnog harmonika struje se sada dobije na osnovu njegovih upravnih projekcija A1 i B1 kao:

$$I_{s1eff} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{A_1^2 + B_1^2} = \frac{I}{2\pi\sqrt{2}} \sqrt{(\cos(2\alpha) - 1)^2 + (2\pi - 2\alpha + \sin(2\alpha))^2} \quad (86)$$

$$= 9,793 A$$

Efektivnu vrednost struje mreže dobijemo u ovom slučaju jednostavno na osnovu efektivne vrednosti napona potrošača primenjujući Ohmov zakon:

$$I_{seff} = I_{Leff} = \frac{U_{Leff}}{R} = 15,306 \text{ A} \quad (87)$$

$$THD^2(I_s) = \left( \frac{I_{seff}}{I_{s1eff}} \right)^2 - 1 \Rightarrow THD(I_s) = 120,1\% \quad (88)$$

c) Sačinilac pomeraja je zapravo kosinus ugla (faznog stava) osnovnog harmonika struje mreže  $I_s$

Fazni stav osnovnog harmonika struje računamo kao argument upravnih projekcija  $A_1$  i  $B_1$ :

$$\varphi_1 = \arctg \frac{A_1}{B_1} = \arctg \frac{\cos(2\alpha) - 1}{2\pi - 2\alpha + \sin(2\alpha)} = -57,06^\circ \quad (89)$$

što znači da osnovni harmonik struje kasni za naponom.

Otuda je sačinilac pomeraja DPF jednak cosinusu razlike ugla napona i struje:

$$DPF = \cos(0 - \varphi_1) = 0,5437 \quad (90)$$

d) Sačinilac izobličenja je odnos prividne snage prvog harmonika i ukupne prividne snage koja se povlači iz mreže:

$$DF = \frac{S_1}{S} = \frac{U_{s1eff} \cdot I_{s1eff}}{U_{seff} \cdot I_{seff}} = \frac{I_{s1eff}}{I_{seff}} = \frac{9,7935}{15,306} = 0,6398 \quad (91)$$

e) Sačinilac snage je po definiciji proizvod sačinioca izobličenja i sačinioca pomeraja, pa je:

$$PF = DF \cdot DPF = 0,5437 \cdot 0,6398 = 0,348 \quad (92)$$

f) Snaga koja se razvija na potrošaču je:

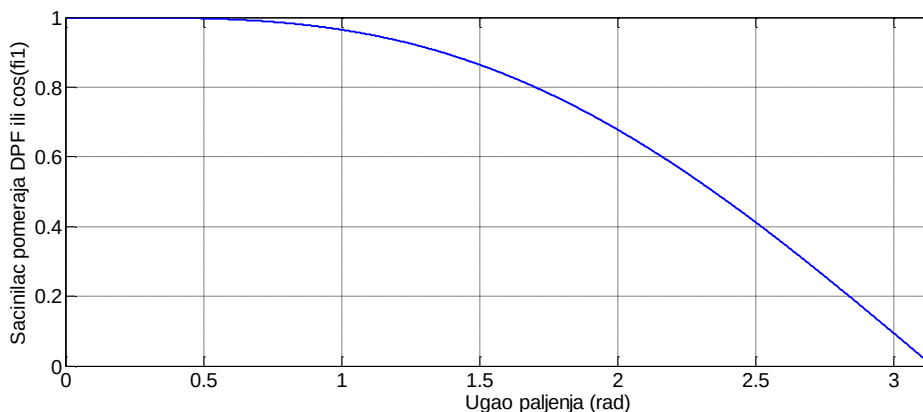
$$P_s = \frac{U_{Leff}^2}{R} = \frac{76,533^2}{5} = 1171 \text{ W} \quad (93)$$

Aktivna snaga koja se povlači iz mreže je jednaka snazi potrošača pošto zanemarujemo gubitke na tiristorima. Reaktivna snaga koja se povlači iz mreže je:

$$\begin{aligned} Q_s &= U_{seff} \cdot I_{seff} \cdot \sin(0 - \varphi_1) \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + THD^2(I_s)}} \\ &= 230 \cdot 15,306 \cdot \sin(57,06^\circ) \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + 1,201^2}} = 1890 \text{ VAr} \end{aligned}$$

Ovde moramo naglasiti jednu bitnu pojedinost. Naime, čitalac bi mogao pomisliti da je aktivna snaga koja se razvija na potrošaču uz zanemarenje gubitaka ravna prividnoj snazi koja se povlači iz mreže pošto je teret po uslovu zadatka čisto

otporni. Međutim, to nije slučaj. Uređaji energetske elektronike zahvaljujući svom prekidačkom dejstvu mogu da unesu fazni pomeraj bez obzira na prirodu potrošača. U ovom slučaju, ugao paljenja tiristora je neposredno odgovoran za činjenicu da osnovni harmonik struje i napona nisu u fazi. Pošto oni nisu u fazi, jasno je da regulator napona uzima iz mreže i radnu i reaktivnu snagu, bez obzira što potrošač troši samo radnu. Ovo je jako bitna činjenica koja ukazuje da je potrebno vršiti kompenzaciju jalove snage u prisustvu uređaja energetske elektronike.



Slika 13: Zavisnost sačinioca pomeraja od ugla paljenja tiristora

Gornji dijagram je dobijen na osnovu jednakosti (89). Jasno se sagledava da porastom ugla paljenja učešće radne snage opada, odnosno raste učešće jalove snage.

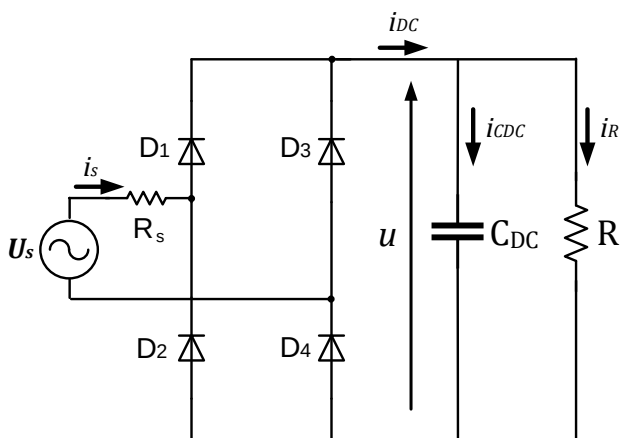
g) Vršni sačinilac dobijemo kao odnos vršne i efektivne vrednosti struje. Vršna vrednost u našem slučaju postoji u trenutku ugla paljenja, tj:

$$I_{svrh} = I \cdot \sin(\alpha) = \frac{U}{R} \sin(\alpha) = \frac{220\sqrt{2}}{5} \sin(130^\circ) = 47,667 \text{ A} \quad (94)$$

Odatle je:

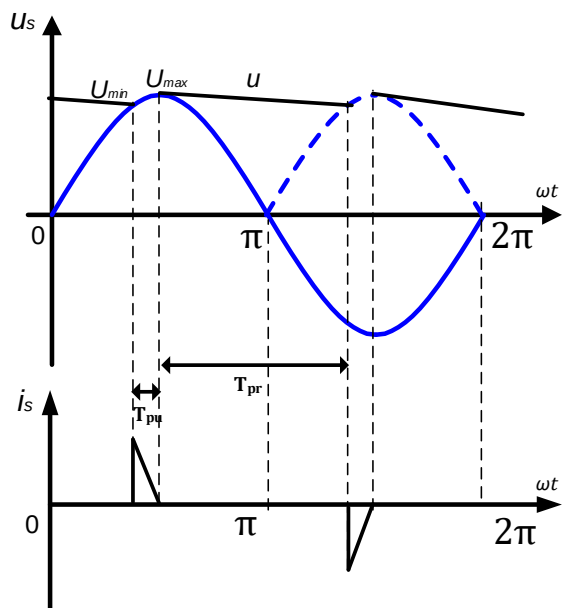
$$CF = \frac{47,667}{15,306} = 3,114 \quad (95)$$

5. Jednofazni diodni most (slika 14) se napaja iz naizmeničnog izvora efektivne vrednosti napona 230 V i učestanosti 50 Hz. Most napaja otporni teret  $R=100\Omega$ . Proračunajte vrednost filtarskog kondenzatora  $C_{dc}$  tako da valovitost napona datog potrošača bude manja od 5%. Za tako postignutu valovitost proračunajte srednju vrednost napona tereta, kao i reaktivnu snagu osnovnog harmonika koja se uzima iz mreže. Kako izbor filtarskog kondenzatora utiče na harmonijsko izobličenje struje mreže?



Slika 14: Jednofazni naponski diodni ispravljač

Odgovarajući talasni oblici koji opisuju rad ovog ispravljača u ustaljenom stanju su dati na slike 15.



Slika 15: Talasni oblik napona i struje jednofaznog diodnog mosta

Rad ovog jednostavnog pretvarača dobro nam je poznat iz gradiva energetske elektronike. Podsećanja radi, daćemo kratko objašnjenje. U kolu sa slike 14 postoje dva naponska izvora - električna mreža neograničene snage i vrlo ograničeno

skladište energije u liku filtarskog kondenzatora  $C_{DC}$ . U trenucima kada je moduo mrežnog napona veći od napona na kondenzatoru (odnosno potrošača  $R$ ), kondenzator se dopunjava strujom mreže (igličasta struja  $i_s$  sa slike 15). Dijagonale mosta  $D_1$ - $D_4$  i  $D_2$ - $D_3$  vode naizmenično:  $D_1$ - $D_4$  u pozitivnoj poluperiodi, a  $D_2$ - $D_3$  u negativnoj. U trenucima kada je moduo napona mreže manji od napona kondenzatora, a to je u praksi najveći deo vremena diodni most ne vodi jer su diode blokirane (katodni potencijal je veći od anodnog), pa se filtarski kondenzator prazni preko tereta  $R$ . Brzina ili sporost pražnjenja zavisi od umnoška  $R$  i  $C_{DC}$ , koju zovemo vremenskom konstantom pražnjenja. U trenutku kada diodni most počinje voditi, napon na potrošaču  $R$  je najmanji i označićemo ga kao  $U_{min}$ . Diodni most prestaje voditi kada napon mreže prevali svoju temenu vrednost koju ćemo označiti  $U_{max}$ . Razlika između  $U_{max}$  i  $U_{min}$  se naziva valovitost. Cilj je naravno da bude što manja kako bi teret imao što "jednosmerniji", odnosno izglacaniji ravan napon. Prvi zadatak nam je da dovedemo u zavisnost kapacitivnost filtarskog kondenzatora sa valovitošću. Krenimo od pražnjenja. U tom slučaju važi:

$$i_{DC} = -i_R \Leftrightarrow C_{DC} \frac{du(t)}{dt} + \frac{u(t)}{R} = 0 \quad (96)$$

Početni uslov gornje jednačine je  $u(0) = U_{max}$ . Sada je rešenje:

$$u(t) = U_{max} \cdot e^{-t/\tau_{DC}} \quad \text{gde je } \tau_{DC} = R \cdot C_{DC} \text{ tj. vremenska konstanta pražnjenja} \quad (97)$$

Napon tereta dostiže najmanju vrednost nakon vremena  $T_{pr}$  (slika 15):

$$U_{min} = u(T_{pr}) = U_{max} \cdot e^{-T_{pr}/\tau_{DC}} \quad (98)$$

Valovitost računamo kao:

$$\Delta U = U_{max} - U_{min} = U_{max} - U_{max} \cdot e^{-T_{pr}/\tau_{DC}} = U_{max}(1 - e^{-T_{pr}/\tau_{DC}}) \quad (99)$$

Eksponencijalni član u prošlom izrazu možemo razviti u Taylor-ov red po izrazu:

$$e^{-kt} = 1 - kt + \frac{k^2}{2!}t^2 - \frac{k^3}{3!}t^3 + \dots - \dots \quad (100)$$

Uvažićemo samo prva dva člana, tj:  $e^{-kt} \approx 1 - kt$ , pa valovitost možemo izračunati približno kao:

$$\Delta U = U_{max} \left( 1 - 1 + \frac{T_{pr}}{\tau_{DC}} \right) = \frac{T_{pr}}{\tau_{DC}} U_{max} \quad (101)$$

Uočimo da je  $T_{pu} + T_{pr} = T/2$ ,  $T=1/f$ , tj. punjenje i pražnjenje kondenzatora se događa svaki put u jednoj poluperiodi. Osim toga vidljivo je da je vreme pražnjenja  $T_{pr}$

mnogo veće od vremena punjenja  $T_{pu}$ , pa možemo usvojiti :  $T_{pu} \approx T/2$ . Ovakvo približenje je opravdano jer "produžavanjem" vremena pražnjenja na čitavu poluperiodu idemo na stranu sigurnosti, pošto na taj način pretpostavljamo da je pražnjenje trajalo duže, odnosno napon više pao nego stvarno, pa je valovitost veća od one stvarne. Sada valovitost možemo približno proračunati kao:

$$\Delta U \approx \frac{T}{2 \cdot \tau_{DC}} U_{max} = \frac{1}{2 \cdot f \cdot \tau_{DC}} U_{max} \quad (102)$$

Sačinilac valovitosti ili ripple factor RF se obično određuje kao odnos polovine ukupne valovitosti  $\Delta U/2$  i srednje vrednosti napona tereta (filtarskog kondenzatora) na sledeći način:

$$RF = \frac{1/2 \cdot \Delta U}{U_{sr}} \quad (103)$$

Gde je  $U_{sr}$  srednja vrednost napona tereta koju dobijemo kao:

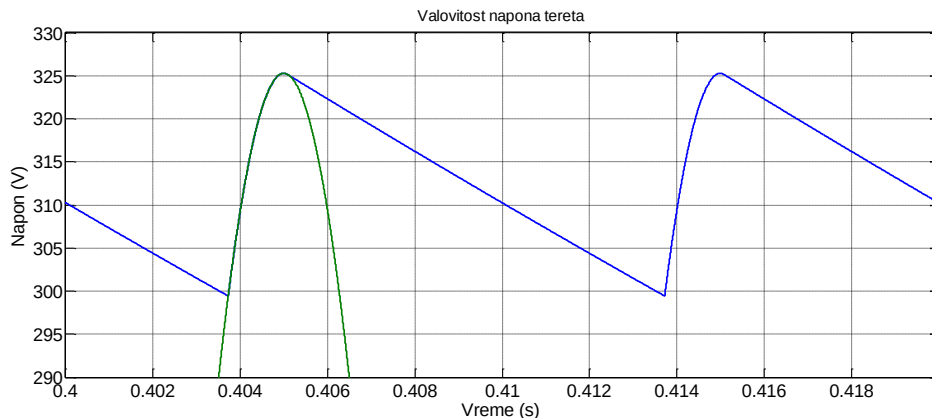
$$U_{sr} = U_{max} - \frac{\Delta U}{2} \quad (104)$$

Ako sad uvrstimo (102) i (104) u (103) imamo:

$$RF = \frac{\frac{1}{4 \cdot f \cdot \tau_{DC}} U_{max}}{1 - \frac{1}{4 \cdot f \cdot \tau_{DC}} U_{max}} = \frac{1}{4 \cdot f \cdot \tau_{DC} - 1} \quad (105)$$

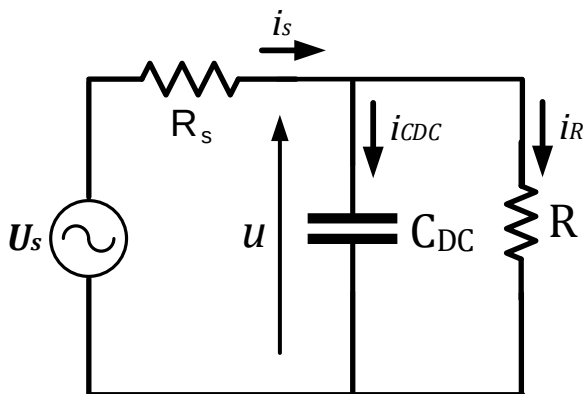
Odatle je:  $\tau_{DC} = \frac{1}{4f} \left(1 + \frac{1}{RF}\right)$ , odnosno  $C_{DC} = \frac{1}{4fR} \left(1 + \frac{1}{RF}\right) = \frac{1}{4 \cdot 50 \cdot 100} \left(1 + \frac{1}{0,05}\right) = 1,05 \text{ mF}$ , odnosno usvajamo da je  $C_{DC} = 1 \text{ mF}$ . Stvarna vrednost vremenske konstante pražnjenja je onda:  $\tau_{DC} = 0,001 \cdot 100 = 100 \text{ ms}$ . Valovitost je:  $\Delta U = \frac{1}{2 \cdot 50 \cdot 100 \cdot 10^{-3}} \cdot 230 \cdot \sqrt{2} = 32,527 \text{ V}$ . Srednja vrednost napona tereta je:  $U_{sr} = 230 \cdot \sqrt{2} - \frac{32,527}{2} = 309 \text{ V}$

Proračun ćemo proveriti simulacijom. Na slici 16 su prikazani uvećani rezultati simulacije za valovitost napona tereta. Možemo uočiti da se napon kreće između 300 i 325 V. Odatle je valovitost 25 V, a srednja vrednost napona 312,5. Odatle je sačinilac valovitosti RF,  $RF = 25/312,5 = 4\%$ . Dakle, valovitost je manja od proračunate zato što smo pri proračunu išli na stranu sigurnosti.



Slika 16: Rezultati simulacije napona tereta

Na kraju ćemo još ispitati izobličenje struje mreže. Kako smo već rekli, struja mreže postoji u igličastom obliku tokom trajanja vremena punjenja filtarskog kondenzatora  $T_{pu}$ . U tom slučaju zamensko kolo je dato na slici 17.



Slika 17: Zamensko kolo u toku dopunjavanja kondenzatora

Jednačine koje opisuju rad kola su:

$$i_s = \frac{u_s - u}{R_s}, \quad i_s = i_{CDC} + i_R, \quad i_{CDC} = C_{DC} \frac{du(t)}{dt}, \quad i_R = \frac{u(t)}{R} \quad \Rightarrow \quad R_s \cdot C_{DC} \frac{du(t)}{dt} + \left(1 + \frac{R_s}{R}\right) \cdot u(t) = u_s(t) \quad (106)$$

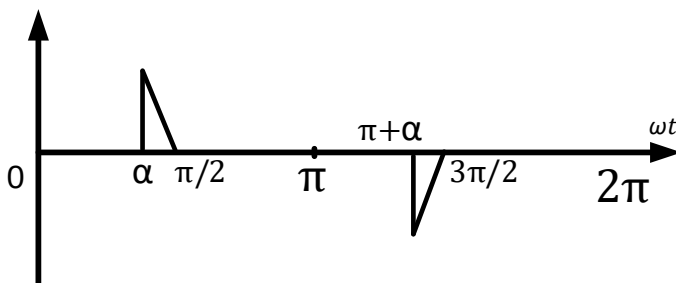
U gornjoj jednakosti napon mreže  $u_s(t)$  možemo predstaviti kao:  $u_s(t) = U_{max} \cdot \sin(\omega t)$ ,  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ . Proizvod  $R_s \cdot C_{DC}$  je zapravo vremenska konstanta punjenja i označićemo ju kao  $\tau_s$ , tj.  $\tau_s = R_s \cdot C_{DC}$ . Zbog jednostavnijih proračuna, usvojimo još da je  $1 + \frac{R_s}{R} = k$ . Sada (128) nakon manjeg sređivanja postaje:

$$\frac{du(t)}{dt} + \frac{k}{\tau_s} \cdot u(t) = \frac{U_{max}}{\tau_s} \cdot \sin(\omega t) \quad (107)$$

Početni uslov za ovu linearnu diferencijalnu jednačinu prvog reda je  $u(0) = U_{min}$ , dok njeno rešenje možemo izračunati ručno ili korišćenjem nekog od dostupnih programskih pomagala kakva je *Wolfram Mathematica* ili *Matlabov Mupad*. Rešenje je:

$$u(t) = \left[ U_{min} + \frac{\omega}{\tau_s \cdot \left( \omega^2 + \left( \frac{k}{\tau_s} \right)^2 \right)} U_{max} \right] e^{-\frac{k}{\tau_s} t} - \frac{\omega \cdot \cos(\omega t) - \frac{k}{\tau_s} \cdot \sin(\omega t)}{\tau_s \cdot \left( \omega^2 + \left( \frac{k}{\tau_s} \right)^2 \right)} U_{max} \quad (108)$$

Struju mreže  $i_s$  dobijemo iz (106). Fourier-ova analiza uz pomoć papira i olovke u slučaju struje  $i_s$  bila bi naporna pre nego teška, ali ne bi nam donela značajnije iskoristive podatke. Granice integrala su  $(\alpha, \pi/2)$  i  $(\pi+\alpha, 3\pi/2)$ .



Slika 18: Granice integracije za proračun osnovnog harmonika i efektivne vrednosti struje

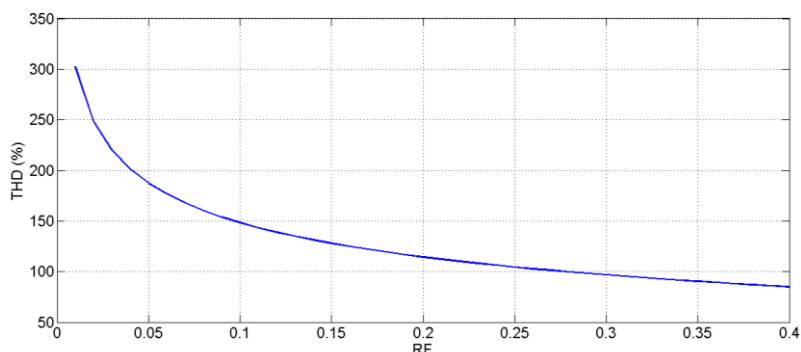
Ugao, odnosno trenutak  $\alpha$  dobijamo jednostavno iz:

$$U_{min} = U_{max} - \Delta U = U_{max} \cdot \sin(\alpha) \Rightarrow \alpha = \arcsin\left(1 - \frac{1}{2 \cdot f \cdot \tau_{DC}}\right) \quad (109)$$

Imajući ovo u vidu, osnovni harmonik, odnosno THD ćemo pronaći uz pomoć računara. Za efektivnu vrednost struje osnovnog harmonika dobijemo 5,2 A, dok je njegov ugao 16,23°. Iz ovog proračuna, ali i sa slike 18 je sasvim jasno da napon mreže koji je ovde sinusni i osnovni harmonik struje mreže nisu u fazi.

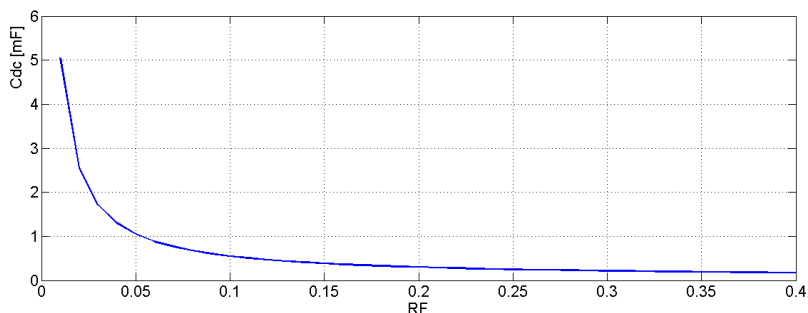
Ovo za sobom povlači da ispravljač bez obzira što je opterećen čisto otpornim potrošačem, uzima iz mreže osim radne i jalovu snagu što je posledica opisanog nelinearnog načina rada samog mosta. Ovo je možda neintuitivno, no rezultati jasno potvrđuju da ispravljač u svom radu troši reaktivnu snagu.

Reaktivna snaga osnovnog harmonika u našem slučaju je:  $Q_1 = 230 \cdot 5,2 \cdot \sin(16,23^\circ) = 334,34 \text{ VAr}$



Slika 19: Zavisnost THD-a od valovitosti

Na slici 19 su prikazani rezultati koji daju zavisnost THD-a od valovitosti. Proračun je izvršen za 20 različitih vrednosti RF, RF=1/100...40/100.



Slika 20: Zavisnost THD-a mrežne struje od RF-a (valovitosti napona) izlaznog napona

Sa slike je jasno da što je valovitost izlaznog napona manja, to je harmonijsko izobličenje ulazne mrežne struje očekivano veće, pošto filterarski kondenzator postaje sve veći (slika 20), a samim tim i sporije se prazni, pa je za njegovo dopunjavanje potrebna sve izobličenija, "igličasta" struja.

## 6. Tri jednofazna ispravljača od kojih je:

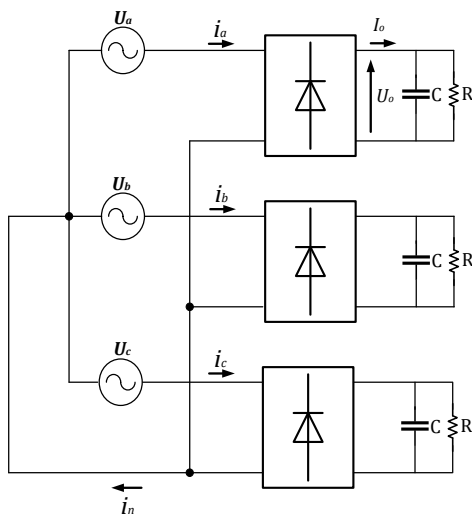
a) svaki opterećen sa istim RC potrošačem,  $R=100\ \Omega$ ,  $C=1\ \text{mF}$  su povezani na tri faze i neutralni vod kao na slici 21.

b) svaki opterećen izrazito induktivnim potrošačem velike vrednosti, tako da je struja potrošača 10 A.

Otpornosti faznih vodova i neutralnog voda su iste i iznose po  $0,05\ \Omega$ . Razmotrite harmonijski sastav struje u faznim vodovima i neutralnom vodu.

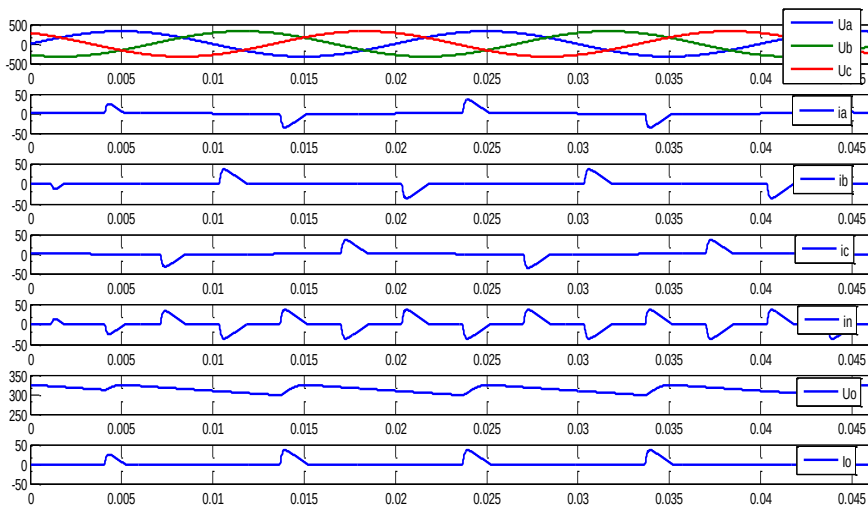
a) Ovaj zadatak je sličan zadatku sa slike 7, s tim što ovde razmatramo naponske RC jednofazne ispravljače povezane na trofaznu mrežu, što je mnogo značajni slučaj u praksi. Nevolja je što je ovakav sklop nepodesan za analitičke proračune što smo mogli videti iz prethodnih zadataka. Zato ćemo pri analizi koristiti rezultate simulacija. Talasni oblici odgovarajućih signala su dati na slici 22. Odatle možemo uočiti da je učestanost struje neutralnog voda tri puta veća od učestanosti faznih vodova, pa zaključujemo da je ovde potpuno izrazit treći harmonik, što smo i očekivali na osnovu analize i rezultata drugog zadatka.

Harmonijski spektar fazne struje je dat na slici 23, dok je struja neutralnog voda i njen spektar dat na slici 24. Poredeći spektre uočavamo da je treći harmonik tri puta veći u neutralnom vodu u odnosu na fazni vod, što važi i za ostale trokratnike.



Slika 21: Struje i naponi tri jednofazna ispravljača od značaja

Uočimo sada pojedinosti vezane za struju faznog voda, npr. faze  $a$ .



Slika 22: Talasni oblici signala od značaja

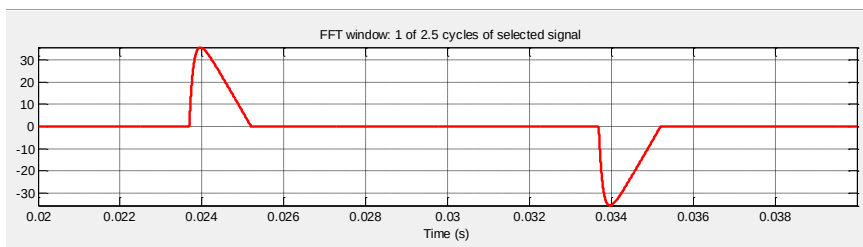
b) U slučaju induktivno opterećenih (strujnih) diodnih ispravljača, harmonijski sastav faznih struja smo već proračunali u zadatku 1 iz poglavlja *Harmonijska analiza*. Te su struje pravougaonog oblika sa THD-om od 48% i efektivnom vrednošću struje od 10 A.

Kroz neutralni vod će postojati neparni trokratni karmonici: 3., 9., 15., 21...Na osnovu jednačine (32) imamo:  $A_3 = -\frac{4I}{3\pi}$ ,  $A_9 = \frac{4I}{9\pi}$ ,  $A_{15} = -\frac{4I}{15\pi}$ ,  $A_{21} = \frac{4I}{21\pi}$ , pri čemu je struja  $I$  po uslovu zadatka,  $I=10$  A.

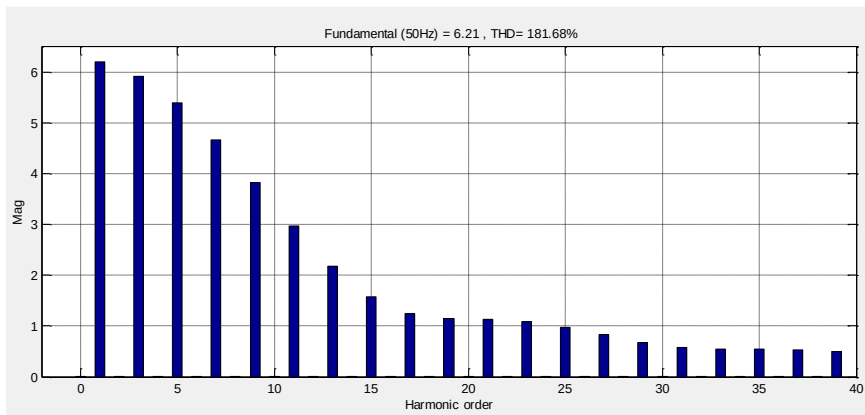
Efektivna vrednost struje neutralnog voda je:

$$I_{eff} = 3 \cdot \frac{4}{\pi} I \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{9}\right)^2 + \left(\frac{1}{15}\right)^2 + \left(\frac{1}{21}\right)^2} \approx 10 \text{ A}$$

U ovom slučaju je efektivna vrednost struje neutralnog voda dakle ravna faznim strujama.

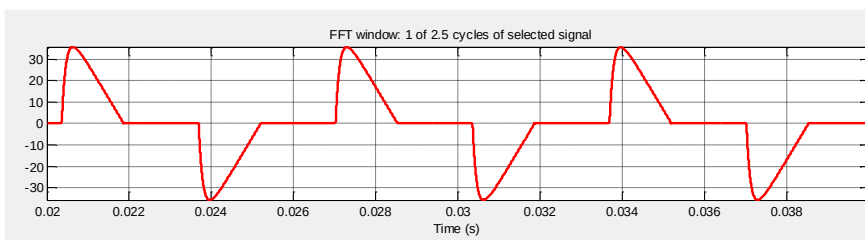


a) Talasni oblik struje

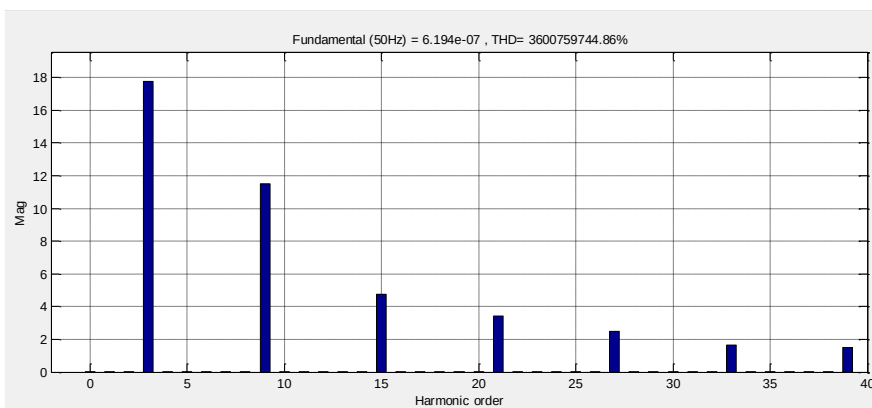


## a) Harmonijski sastav struje

Slika 23: Struja faznog voda



## a) Talasni oblik struje



## b) Harmonijski sastav struje

Slika 24: Struja neutralnog voda i njen harmonijski sastav

**6. Jednofazni diodni most se napaja iz izvora naizmjenične struje efektivne vrednosti napona 230 V i učestanosti 50 Hz. Otpornost tereta je  $50 \Omega$ , a induktivnost 10 mH. Proračunati filtarsku induktivnost ispravljača prema mreži tako da valovitost bude manja od 10 %.**

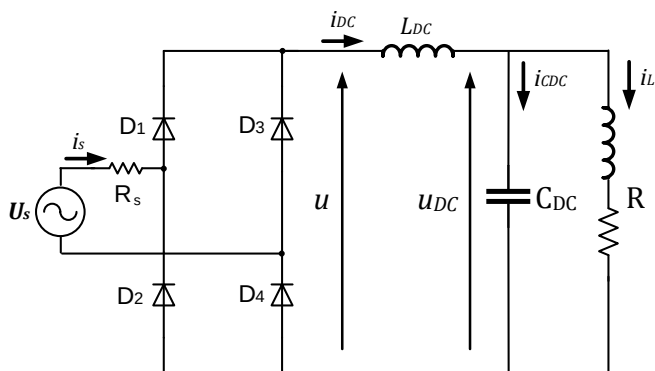
U petom zadatku ovog poglavlja smo videli da se jednosmerni napon potrošača može posmatrati kao zbir idealno ravnog napona koji zovemo srednja vrednost i naizmjenične komponente koju zovemo valovitost. Obe komponente možemo posmatrati kao posledicu struje  $i_{DC}$  (slika 25) koja dolazi iz diodnog mosta. Zamisao da ograničimo valovitost napona tereta jeste da ograničimo valovitost struje  $i_L$ , a to bismo mogli postići koristeći činjenicu da kondenzator primi na sebe valovitu komponentu (setimo se da pun kondenzator predstavlja otvorenu vezu za ravnu jednosmernu struju, dok je istovremeno niska impedansa naizmjeničnih veličina za razumno velike kapacitivnosti).

To znači da za  $n$ -ti harmonik, impedansa tereta mora biti mnogo veća od impedanse filtarskog kondenzatora kako bi harmonijska struja „izabrala“ putanju u  $C_{DC}$ :

$$|R + j \cdot n \cdot \omega_0 \cdot L| \gg \left| \frac{1}{j \cdot n \cdot \omega_0 \cdot C_{DC}} \right| \quad (110)$$

Usvojimo da je npr. impedansa tereta 10 puta veća od impedanse kondenzatora, pa je:

$$\sqrt{(R)^2 + (n \cdot \omega_0 \cdot L)^2} = 10 \cdot \frac{1}{n \cdot \omega_0 \cdot C_{DC}} \quad (111)$$



Slika 25: Diodni most sa induktivnim filtrom

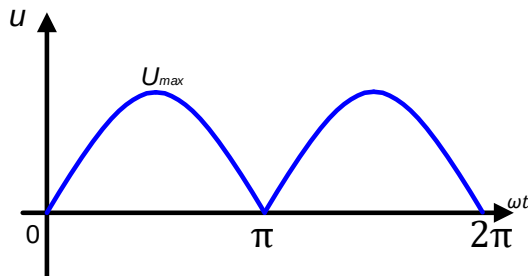
Dalje,  $n$ -ti harmonik napona na teretu računamo preko naponskog razdelnika:

$$U_{DCn} = \frac{\left| \frac{1}{j \cdot n \cdot \omega_0 \cdot C_{DC}} \right|}{\left| j \cdot n \cdot \omega_0 \cdot L_{DC} + \frac{1}{j \cdot n \cdot \omega_0 \cdot C_{DC}} \right|} \cdot U_n \quad (112)$$

gde je  $u$  napon neposredno iza diodnog mosta, a  $U_n$  njegov  $n$ -ti harmonik.

Ukupno izobličenje je naravno prouzrokovano svim harmonicima napona  $u$ .

Zapravo, da nema filteruskog kondenzatora  $C_{DC}$ , napon na teretu bi bio (slika 26):



Slika 26: Talasni oblik napona tereta u slučaju da nema filteruskog kondenzatora

Njegov harmonijski sastav možemo dosta jednostavno dobiti "ručnom" primenom Furier-ove analize (jednačine (28) i (29)). Uočimo da ovakav jednosmerni napon ima samo cosinusne članove pošto je simetričan u odnosu na okomitu osu. Račun pojednostavljuje trigonometrijski izraz:

$\sin(x) \cdot \cos(x) = \frac{1}{2} \left[ \sin \frac{x+y}{2} + \sin \frac{x-y}{2} \right]$ . Uvažavajući ove činjenice, dobijemo harmonijski sastav gornjeg signala kao:

$$U_n = -\frac{4}{\pi} U_{max} \frac{\cos^2 \frac{n\pi}{2}}{n^2 - 1} \quad (113)$$

Iz ove jednačine je jasno da ne postoji harmonik na osnovnoj učestanosti ( $n=1$ ). To je posve prirodno, pošto je u pitanju jednosmerni signal. Ako bi kojim slučajem postojao osnovni harmonik, onda bi to bio naizmjenični signal, podignut ili spušten u odnosu na vodoravnu osu u zavisnosti veličine temene vrednosti osnovnog harmonika i jednosmerne komponente. Jednačina (113) kaže još jedan bitan podatak: temena vrednost viših harmonika opada s kvadratom ( $\sim 1/(n^2-1)$ ). Zato ćemo se usredsrediti u ovom zadatku da smanjimo učešće najvećeg neželjenog harmonika, a to je drugi:  $U_2 = -\frac{4}{3\pi} U_{max}$ . Uz pretpostavku da želimo odstraniti drugi harmonik, jednačina (111) postaje:  $\sqrt{(R)^2 + (2 \cdot \omega_0 \cdot L)^2} = 10 \cdot \frac{1}{2 \cdot \omega_0 \cdot C_{DC}}$  odakle dobijamo izraz za traženu vrednost filteruskog kondenzatora:

$$C_{DC} = \frac{1}{\omega_0} \sqrt{\frac{25}{(R)^2 + (2 \cdot \omega_0 \cdot L)^2}} = 0,31 \text{ mF} \quad (114)$$

Srednju vrednost napona dobijemo na osnovu (24)

$$U_{DCsr} = 2 \cdot \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi U_{max} \cdot \sin(\omega_0 t) \cdot d(\omega_0 t) = \frac{2}{\pi} U_{max} \quad (115)$$

Iz (103) dobijamo vezu između sačinioaca valovitosti (RF), srednje vrednosti i naizmenične komponente koju unosi drugi harmonik u našem slučaju, pošto smo usvojili da je on najviše odgovoran za valovitost napona tereta:

$$\begin{aligned} RF = \frac{\frac{1}{2} U_{DC2}}{U_{DCsr}} &= \frac{\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{(2 \cdot \omega_0)^2 \cdot L_{DC} \cdot C_{DC} - 1} \cdot \frac{4}{3\pi} U_{max}}{\frac{\frac{2}{\pi} U_{max}}{1}} \\ &= \frac{4}{3} \cdot \frac{1}{(2 \cdot \omega_0)^2 \cdot L_{DC} \cdot C_{DC} - 1} \end{aligned} \quad (116)$$

odakle dobijamo:

$$L_{DC} = \frac{1}{(2 \cdot \omega_0)^2 \cdot C_{DC}} \left[ 1 + \frac{4}{3 \cdot RF} \right] = 117 \text{ mH} \quad (117)$$

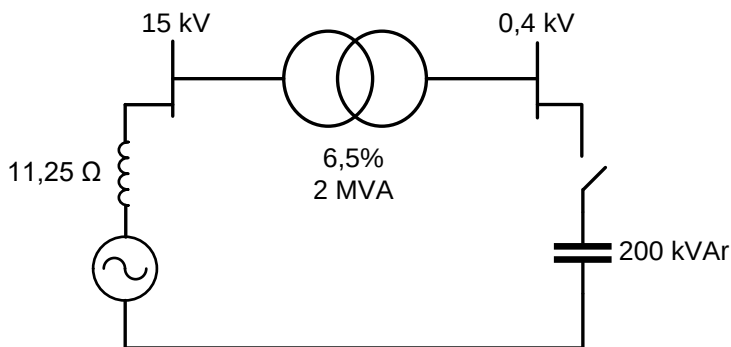
Pošto smo na ovaj način odstranili drugi harmonik, napon na teretu, odnosno njegova srednja vrednost će biti negde oko  $\frac{2}{\pi} U_{max}$ . Proverite to simulacijom za date i proračunate brojne vrednosti u ovom zadatku.

Dalje izučavanje uticaja pretvarača energetske elektronike na harmonijsko zagađenje električne mreže se može nastaviti kroz: [21]-[24]

## 1.5. Rezonansa

### 1. Istražiti slučaj priključenja kondenzatorske baterije na mrežu sa slike u smislu pojave rezonanse.

Kada se kondenzatorska baterija priključi na sekundar transformatora, njena kapacitivnost može stupiti u rednu rezonansu sa ukupnom induktivnošću koju baterija "vidi" sa niskonaponske strane. Ukupna induktivnost je ravna zbiru induktivnosti mreže i rasipnoj induktivnosti transformatora.

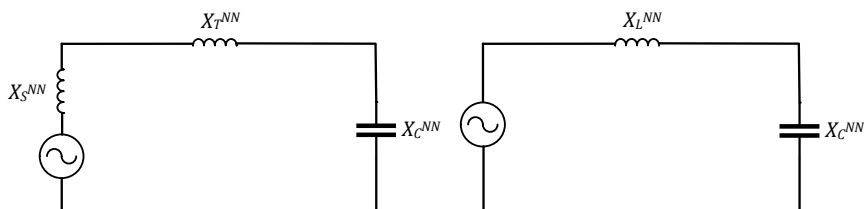


Slika 27: Priključenje kondenzatorske baterije

Ove induktivnosti je potrebno svesti na niskonaponsku stranu (ili umesto toga impedansu baterije na visokonaponsku) da bismo mogli ispitati rezonansu (slika 28). Svedene reaktanse mreže i transformatora možemo sažeti u zamensku impedansu  $X_L^{NN}$ , pri čemu je naravno:

$$X_L^{NN} = X_S^{NN} + X_T^{NN} \quad (118)$$

Sada treba ispitati rednu rezonansu reaktansi  $X_L^{NN}$  i  $X_C^{NN}$  na rezonantnoj učestanosti  $\omega = \omega_r$ . Naš je zadatak zapravo pronaći tu rezonantnu učestanost, odnosno pri kom harmoniku (zvaćemo ga rezonantni,  $n_r$ ) će redno vezana induktivnost i kapacitivnost stupiti u rezonansu.



Slika 28: Zamenske šeme sa impedansama svedenim na niskonaponsku stranu

Dakle, neka je:

$$X_L^{NN} = n_r \cdot \omega_0 \cdot L^{NN}, \quad X_C^{NN} = \frac{1}{n_r \cdot \omega_0 \cdot C^{NN}}, \quad \omega_r = n_r \cdot \omega_0 \quad (119)$$

gde je  $\omega_0$  kružna učestanost osnovnog harmonika. Ukupna impedansa redno vezanih reaktansi induktivnosti i kapacitivnosti iznosi:

$$\begin{aligned}
 X_e^{NN} &= X_L^{NN} - X_C^{NN} = n_r \cdot \omega_0 \cdot L^{NN} - \frac{1}{n_r \cdot \omega_0 \cdot C^{NN}} \\
 &= \frac{(n_r \cdot \omega_0)^2 \cdot L^{NN} \cdot C^{NN} - 1}{n_r \cdot \omega_0 \cdot C^{NN}}
 \end{aligned} \quad (120)$$

Rezonansa nastupa kada je ukupna reaktansa  $X_e^{NN}$  ravna 0, a to će se desiti kada je:

$$(n_r \cdot \omega_0)^2 \cdot L^{NN} \cdot C^{NN} - 1 = 0 \quad (121)$$

što možemo preurediti na sledeći način:

$$\begin{aligned}
 n_r \cdot \omega_0 \cdot L^{NN} \cdot n_r \cdot \omega_0 \cdot C^{NN} &= 1 \Leftrightarrow n_r^2 \cdot X_{L0}^{NN} \cdot \frac{1}{X_{C0}^{NN}} = 1 \Rightarrow n_r \\
 &= \sqrt{\frac{X_{C0}^{NN}}{X_{L0}^{NN}}}
 \end{aligned} \quad (122)$$

pri čemu je  $X_{L0}^{NN}$  reaktansa ukupne induktivnosti osnovnog harmonika na niskonaponskoj strani, dok je  $X_{C0}^{NN}$  reaktansa kondenzatorske baterije pri osnovnom harmoniku na niskonaponskoj strani. Poslednja jednakost je veoma zanimljiva jer dovodi u vezu redni broj rezonantnog harmonika sa odnosom rednih reaktansi na osnovnom harmoniku. Ostaje još da proračunamo te reaktanse:

$$X_{C0}^{NN} = \frac{U_{NN}^2}{Q_C} = \frac{400^2}{200000} = 0,8 \, \Omega \quad (123)$$

Reaktansu rasipanja transformatora na niskonaponskoj ćemo izračunati na osnovu podatka o naponu kratkog spoja  $u_k$ :

$$X_T^{NN} = u_k \frac{U_{NN}^2}{S_T} = \frac{6,5}{100} \frac{400^2}{2000000} = 0,0052 \, \Omega \quad (124)$$

Reaktansu mreže svedenu na niskonaponsku stranu ćemo odrediti pod pretpostavkom da transformator nema gubitaka što je opravdano u ovakvim proračunima, a posebno na srednjem i visokom naponu (zašto?). To znači da je snaga na visokonaponskoj i niskonaponskoj strani jednaka:

$$\frac{U_{VN}^2}{X_S^{VN}} = \frac{U_{NN}^2}{X_S^{NN}} \Rightarrow X_S^{NN} = \left( \frac{U_{NN}}{U_{VN}} \right)^2 \cdot X_S^{VN} = \left( \frac{400}{15000} \right)^2 \cdot 11,25 = 0,008 \, \Omega \quad (125)$$

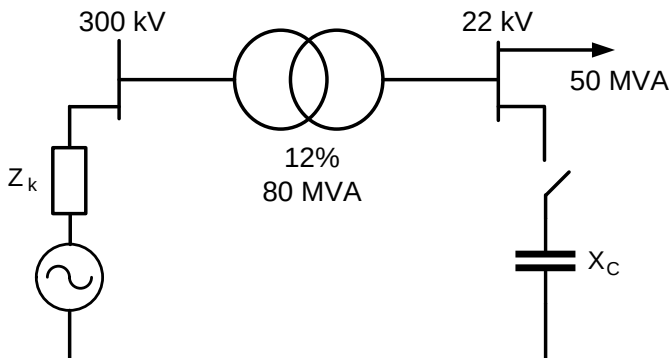
Sada računamo (118) kao:  $X_L^{NN} = 0,008 + 0,0052 = 0,0132 \, \Omega$

Konačno, traženi rezonantni harmonik je:  $n_r = \sqrt{\frac{0,8}{0,0132}} = 7,785$

Kritični su dakle 7. i 8. harmonik.

**2. Transformator 300/22 kV/kV, 80 MVA sa  $u_k = 12\%$  napaja teret od 50 MVA, sačinioća snage 0,9. U istoj sabirnici postavljena je kondenzatorska baterija sa namerom da se popravi sačinilac pomeraja na 0,95. Razmotrite koji harmonik bi stupio u rezonansu pri uključenju kondenzatorske baterije. Snaga kratkog spoja u posmatranoj sabirnici prema visokonaponskoj strani je 2000 MVA.**

Da bismo odredili rezonantni harmonik pri priključenju kondenzatorske baterije, potrebno je odrediti ukupnu reaktansu induktivnosti i kapacitivnosti. Pošto se kondenzatorska baterija nalazi na niskonaponskoj strani, pogodno je sve reaktanse svesti na tu stranu.



**Slika 29: Priključenje kondenzatorske baterije sa ciljem popravke sačinioća snage**

Imamo dve induktivne reaktanse: reaktansu rasipanja transformatora i impedansu, u našem slučaju reaktansu (pošto se radi o visokom naponu) kratkog spoja  $Z_k$ , odnosno  $X_k$ . Reaktansu kratkog spoja s visokonaponske strane računamo kao:

$$X_k^{VN} = \frac{U_V^2}{S_{KS}} = \frac{(300 \cdot 10^3)^2}{2000 \cdot 10^6} = 45 \, \Omega \quad (126)$$

Sada trebamo svesti ovu reaktansu i reaktansu rasipanja transformatora na niskonapovsku stranu po izrazu (126):

$$X_k^{NN} = \left(\frac{22}{300}\right)^2 \cdot 45 = 0,242 \, \Omega, \quad (127)$$

$$X_T^{NN} = u_k \frac{U_{NN}^2}{S_T} = \frac{12}{100} \frac{(22 \cdot 10^3)^2}{80 \cdot 10^6} = 0,726 \, \Omega$$

Ukupna redna reaktansa induktivnosti na osnovu (118) je:  $X_L^{NN} = 0,242 + 0,726 = 0,968 \, \Omega$

Reaktansu kondenzatorske baterije ćemo pronaći iz činjenice da je sačinilac pomeraja tereta tj.  $\cos(\varphi)$  porastao sa 0,9 na 0,95. Iz toga možemo izračunati reaktivnu snagu

koju kondenzator utiskuje, a iz te snage i napona na kondenzatoru nalazimo traženu reaktansu. Dakle, reaktivna snaga pre uključenja baterije je:

$$Q_{L1} = S_L \cdot \sin(\varphi_1) = 50 \cdot \sqrt{1 - 0,9^2} = 21,794 \text{ MVar} \quad (128)$$

a nakon uključenja:

$$Q_{L2} = S_L \cdot \sin(\varphi_2) = 50 \cdot \sqrt{1 - 0,95^2} = 15,612 \text{ MVar} \quad (129)$$

Reaktivna snaga koju baterija dodaje je:

$$Q_C = Q_{L1} - Q_{L2} = 6,137 \text{ MVar} \quad (130)$$

pa je reaktansa:

$$X_C^{NN} = \frac{U_{NN}^2}{Q_C} = \frac{22000^2}{6,137 \cdot 10^6} = 78,87 \, \Omega \quad (131)$$

Napokon, po (122) rezonantni harmonik računamo kao:  $n_r = \sqrt{\frac{78,87}{0,968}} = 9$

Kritičan bi bio dakle deveti harmonik u ovom slučaju.

Napomena: rešenje zadatka je postavljeno tako da se kompenzacijom želi postići manje učešće reaktivne, odnosno veće učešće aktivne snage u ukupnom kapacitetu (prividnoj snazi). Rešenje se moglo postaviti i tako da se pošlo od pretpostavke da aktivna snaga treba biti ista pre i posle kompenzacije (potrošač stalne snage).

## 1.6. Uvod u pasivne filtre – osnovni pojmovi

1. Razmotrite kako bi se pomoću RC niskopropusnog filtra potisnuli peti i sedmi harmonik u izlaznom naponu tako da:
  - a) osnovni harmonik ne padne na manje od 90% svoje izvorne vrednosti
  - b) peti harmonik oslabi najmanje za 90% svoje izvorne vrednosti. Šta se dešava u ovom slučaju s osnovnim harmonikom?

RC filter spada u filtre prvog reda. Red nekog filtra, odnosno električnog kola u opštem slučaju određuje broj energetskih skladišta. Pasivna skladišta energije su kapacitivnosti i induktivnosti. Prenosna funkcija niskopropusnog filtra se može izraziti u obliku:

$$G(s) = \frac{1}{1 + s\tau} \quad (132)$$

Osobina ovog filtra je da unosi kašnjenje -20 dB po dekadi. Pol  $p$  se nalazi u tački  $1 + s\tau = 0$ , tj.  $p = s = -\frac{1}{\tau}$ .

Ako  $G(s)$  predstavimo u oblasti učestanosti tako što zamenimo Laplace-ov operator  $s$  sa  $j\omega$ , sledi:

$$G(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega\tau} \quad (133)$$

čija su temena vrednost (moduo) i ugao (faza) za datu učestanost  $\omega$  dati izrazima:

$$G(\omega) = |G(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}}, \quad \varphi(\omega) = -\arctg(\omega\tau) \quad (134)$$

Uočimo da je pojačanje ovog filtra za  $\omega = 0$  ravno 1. To znači da filter propušta jednosmerne vrednosti bez slabljenja. Na visokim učestanostima  $1 + (\omega\tau)^2 \approx (\omega\tau)^2$ , odnosno:  $G(\omega) \approx \frac{1}{\omega\tau}$ .

Od značaja je da utvrdimo tzv. propusni opseg filtra  $\omega_{BW}$  (eng: *bandwidth*)

Granica propusnog opsega je ona učestanost pri kojoj će pojačanje filtra biti  $G(\omega_{BW}) = \frac{1}{\sqrt{2}}$ . Jasno je da je smisao propusnog opsega utvrditi prelomnu tačku, tj. učestanost  $\omega_{BW}$  kada slabljenje filtra postaje značajno. Zašto baš  $\frac{1}{\sqrt{2}}$ , a ne npr.  $\frac{1}{2}$ ? Zapravo, propusni opseg se utvrđuje kao učestanost gde snaga ulaznog signala padne na polovinu. Pošto je snaga složena veličina kao proizvod napona i struje, to znači da je za slabljenje snage na jednu polovinu potrebno da napon i struja srazmerno padnu na  $\frac{1}{\sqrt{2}}$ .

Pronađimo presečnu učestanost  $\omega_{BW}$ .

$$G(\omega = \omega_{BW}) = G(\omega_{BW}) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega_{BW} \cdot \tau)^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (135)$$

odakle dobijamo:

$$\omega_{BW} = \frac{1}{\tau} \quad (136)$$

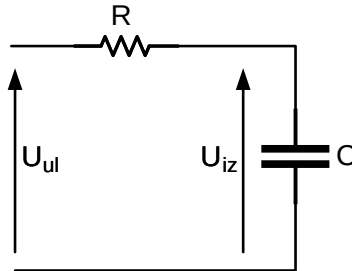
Propusni opseg je dakle skup učestanosti od nulte ( $\omega = 0$ ) pa do učestanosti  $\omega = \omega_{BW}$ . U tom opsegu učestanosti filter propušta ulaznu veličinu sa malim slabljenjem tj. vrednosti izlazne veličine  $U_{IZ}(\omega)$  su veće od  $\frac{1}{\sqrt{2}} U_{UL}(\omega)$ , gde je  $U_{UL}(\omega)$  ulazna veličina (npr. napon).

Predimo sada na izradu samog zadatka gde ćemo proći kroz navedene pojmove.

a) RC kolo u ulozi niskopropusnog filtra je dato na slici 30. Prenosnu funkciju  $\frac{U_{IZ}(\omega)}{U_{UL}(\omega)}$  možemo jednostavno naći iz naponskog razdelnika:

$$\hat{U}_{IZ}(j\omega) = \frac{\hat{Z}_c(j\omega)}{\hat{Z}_c(j\omega) + R} \hat{U}_{UL}(j\omega) \quad (137)$$

gde je  $\hat{Z}_c(j\omega)$  impedansa tj. reaktansa kapacitivnosti na proizvoljnoj učestanosti  $\omega$ ,  $\hat{Z}_c(j\omega) = \frac{1}{j\omega C}$ , pa je:



Slika 30: RC kolo kao niskopropusni filter

$$\hat{U}_{IZ}(j\omega) = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{\frac{1}{j\omega C} + R} \hat{U}_{UL}(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega RC} \hat{U}_{UL}(j\omega) \quad (138)$$

odnosno:

$$G(j\omega) = \frac{\hat{U}_{IZ}(j\omega)}{\hat{U}_{UL}(j\omega)} = \frac{1}{1 + j\omega RC} \quad (139)$$

Ako uporedimo poslednji izraz sa (133), jasno uočavamo da dato RC kolo zaista predstavlja niskopropusni filter prvog reda pri čemu je:

$$\tau = RC \quad (140)$$

Odavde je jasno zašto smo izabrali oznaku  $\tau$  za parametar filtra. Naime, ovaj parametar tako izabran odgovara vremenskoj konstanti RC kola.

Po zahtevu zadatka treba pronaći parametre filtra R i C tako da osnovni harmonik ( $\omega_0 = 2 \cdot 50 \cdot \pi = 100\pi$ ) izlaznog napona ne padne ispod 90% u odnosu na ulazni napon. Uslov je dakle da pojačanje na osnovnoj učestanosti bude:

$$G(\omega_0) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega_0 \tau)^2}} = 0,9 \quad (141)$$

odakle je:

$$\tau = \frac{1}{\omega_0} \sqrt{\frac{1}{0,81} - 1} = \frac{1}{100\pi} \cdot 0,4843 = 1,54 \text{ ms} \quad (142)$$

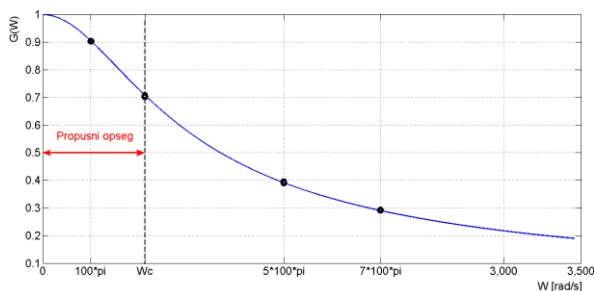
Iz (9) i (10) sledi da je:

$$R \cdot C = 1,54 \cdot 10^{-3} \quad (143)$$

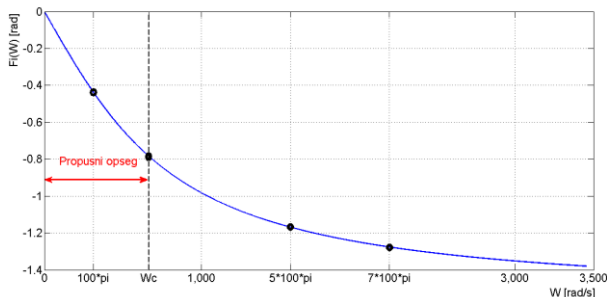
Pošto imamo dve promenljive a jedan izraz koji ih povezuje, jasno je da se jedna od njih može izabrati proizvoljno. U praksi bi se otpornik birao spram najveće dozvoljene struje, odnosno snage koja bi se razvila na tom otporniku. U ovom zadatku nemamo podatak o visini ulaznog napona, pa se izbor parametara može uraditi s jednim stepenom slobode (otpornik ili kondenzator). Međutim, za ovaj odabir ipak mora postojati određen osećaj. Naime, razuman izbor kapacitivnosti bio bi od nekoliko  $\mu\text{F}$  pa do nekoliko  $\text{mF}$ . Izaberimo stoga npr:

$$C = 1,5 \text{ mF}, R = 1 \Omega \quad (144)$$

Pri čemu smo izabrali okruglu vrednost za kapacitivnost. Nacrtajmo sada za ovako proračunat parametar  $\tau$  prenosnu funkciju filtra u funkciji kružne učestanosti  $\omega$ .



#### a) Pojačanje



#### b) promena faznog stava

Slika 31: Filtrar prvog reda

Sa slike 31 se vide propusni opseg kao i tačke od značaja (osnovni, peti i sedmi harmonik). Sa grafika se mogu pročitati i pojačanja, odnosno bolje reći slabljenja za svaki harmonik, kao i promena faznog stava, odnosno kašnjenja, pošto su sve promene ugla negativne. Iako u ovom slučaju dijagrami sa slike 31 daju sasvim jasnu predstavu, ovakva vrsta dijagrama nije praktična. Naime, da smo hteli prikazati iste pojave na opsegu učestanosti do 50. harmonika, to bi značilo nedopustivo dugačku vodoravnu osu ili ako bismo je "sabili" onda bi učestanosti bile neprihvatljivo guste i potpuno nepregledne. Iz tog razloga se koristi logaritamska raspodela gde svaki veći podeok predstavlja tzv. dekadu (1, 10, 100 ... 10n). Okomita osa sa pojačanjima u apsolutnom iznosu je zamenjena vrednostima logaritma na sledeći način:

$$G_d(\omega)[dB] = 20 \cdot \log(G(\omega)) \quad (145)$$

Ovako određeno pojačanje se izražava u dB. Od sada nadalje ćemo za pojačanje u dB koristiti upisnik  $d$  u oznaci kao  $G_d$  u gornjoj jednačini. Pojačanje (slabljenje) na presečnoj učestanosti iznosi u dB:

$$G_d(\omega = \omega_c) = 20 \cdot \log\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) \approx -3 \text{ dB} \quad (146)$$

Sada možemo nacrtati dijagrame sa logaritamskom skalom koji su poznati kao Bode-ovi dijagrami (slika 32). Možemo uočiti da negativna decibelska pojačanja odgovaraju pojačanjima od 0 do 1 za apsolutno pojačanje prenosne funkcije, što je u skladu sa svojstvima logaritamske funkcije i sasvim pogodno kada je u pitanju slabljenje.

Sa slike 31 ili slike 32 možemo pronaći koliko će oslabiti peti, odnosno sedmi harmonik u ovom slučaju kada je osnovni pao na 90% ulazne vrednosti. Međutim, ta pojačanja možemo analitički odrediti koristeći (134).

$$G(\omega_5) = G(\omega = 5 \cdot 100\pi) = \frac{1}{\sqrt{1 + (5 \cdot 100\pi \cdot 1,5 \cdot 10^{-3})^2}} \quad (147)$$

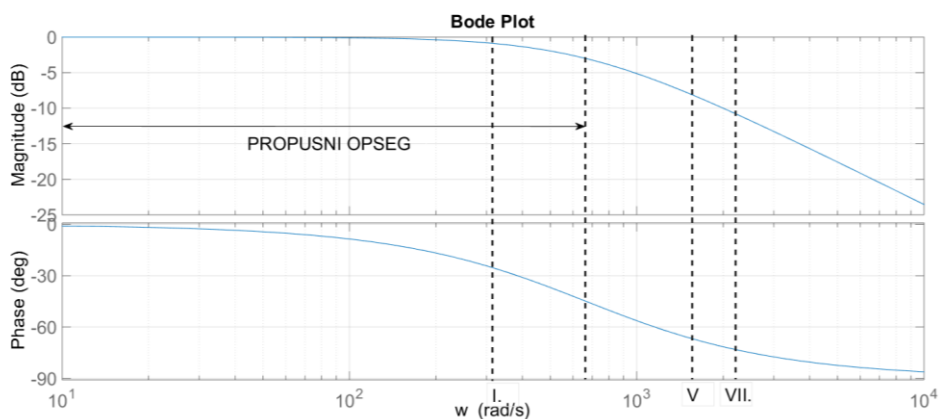
$$= 0,3907$$

$$G(\omega_7) = G(\omega = 7 \cdot 100\pi) = \frac{1}{\sqrt{1 + (7 \cdot 100\pi \cdot 1,5 \cdot 10^{-3})^2}} \quad (148)$$

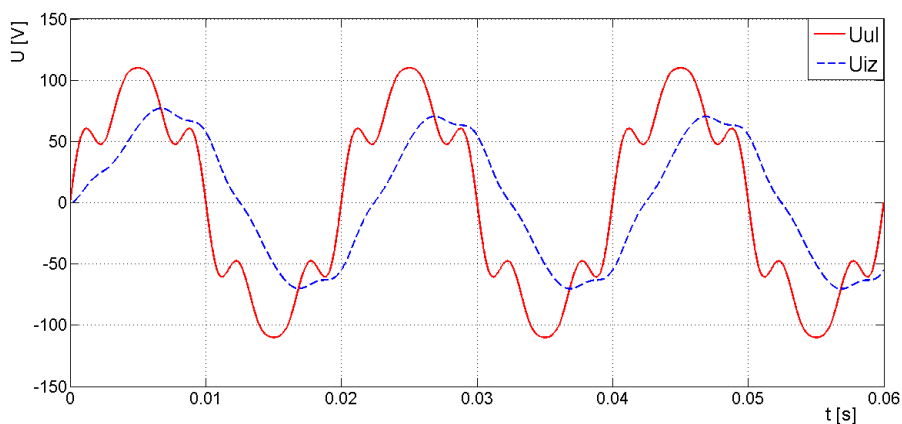
$$= 0,2901$$

Dakle, peti harmonik napona je pao na oko 40% ulazne vrednosti, a sedmi na oko 30%. Uočimo takođe da je na učestanosti propusnog opsega fazno kašnjenje 45°.

Da bismo zaključili ovaj deo zadatka, pogledaćemo valne oblike ulaznog i izlaznog napona. Za ulazni napon ćemo uzeti da ima prvi harmonik čija temena vrednost iznosi 100 V, peti harmonik sa 20 V i sedmi sa 10 V. Učestanost osnovnog harmonika je 50 Hz.



Slika 32: Bode-ovi dijagrami - pojačanje (gore) i ugao, tj. faza (dole) za RC filter



Slika 33: Talasni oblik ulaznog napona (puna linija) i isfiltriranog izlaznog napona (isprekidana linija)

Bilo bi zanimljivo uporediti efektivne vrednosti i THD napona pre i posle filtriranja. Očigledno je da je RC filter smanjio efektivnu vrednost i uneo kašnjenje, kao i da je valni oblik pobolšan. Utvrdićemo koliko.

$$\begin{aligned}
 U_{ul}^{eff} &= \sqrt{\left(\frac{U_1^{eff}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{U_5^{eff}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{U_7^{eff}}{\sqrt{2}}\right)^2} \\
 &= \sqrt{\left(\frac{100}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{20}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{10}{\sqrt{2}}\right)^2} = 72,457 \text{ V}
 \end{aligned}
 \tag{149}$$

$$THD_{ul} = \frac{\sqrt{\left(\frac{U_5^{eff}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{U_7^{eff}}{\sqrt{2}}\right)^2}}{\left(\frac{U_1^{eff}}{\sqrt{2}}\right)^2} = \frac{\sqrt{\left(\frac{20}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{10}{\sqrt{2}}\right)^2}}{\frac{100}{\sqrt{2}}} = 22,4\% \quad (150)$$

Nakon filtriranja:

$$U_{iz}^{eff} = \sqrt{\left(\frac{U_{1iz}^{eff}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{U_{5iz}^{eff}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{U_{7iz}^{eff}}{\sqrt{2}}\right)^2} \quad (151)$$

$$= \sqrt{\left(\frac{0,9 \cdot 100}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{0,39 \cdot 20}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{0,29 \cdot 10}{\sqrt{2}}\right)^2}$$

$$= 63,9 \text{ V}$$

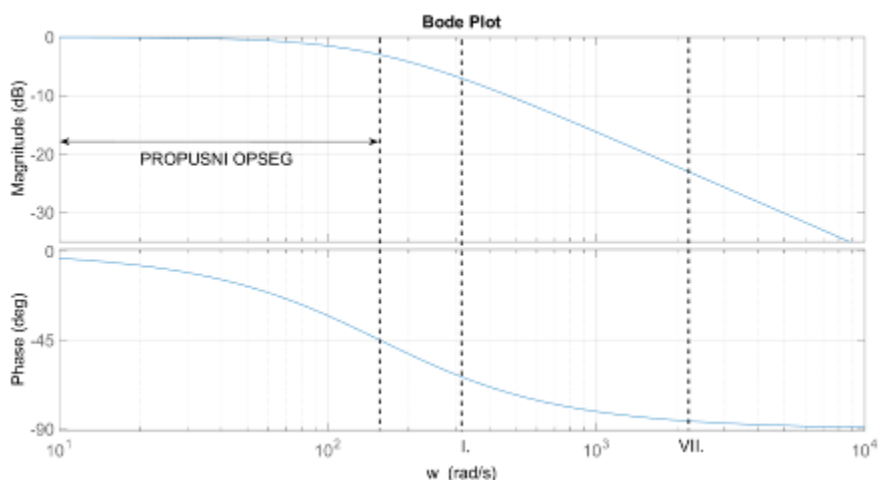
$$THD_{iz} = \frac{\sqrt{\left(\frac{U_{5iz}^{eff}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{U_{7iz}^{eff}}{\sqrt{2}}\right)^2}}{\left(\frac{U_{1iz}^{eff}}{\sqrt{2}}\right)^2} = \frac{\sqrt{\left(\frac{0,39 \cdot 20}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{0,29 \cdot 10}{\sqrt{2}}\right)^2}}{\frac{0,9 \cdot 100}{\sqrt{2}}} \quad (152)$$

$$= 9,3\%$$

b) Ovde treba proračunati R i C tako da peti harmonik padne na 10% svoje ulazne vrednosti. Iz jednačine (3) sledi:

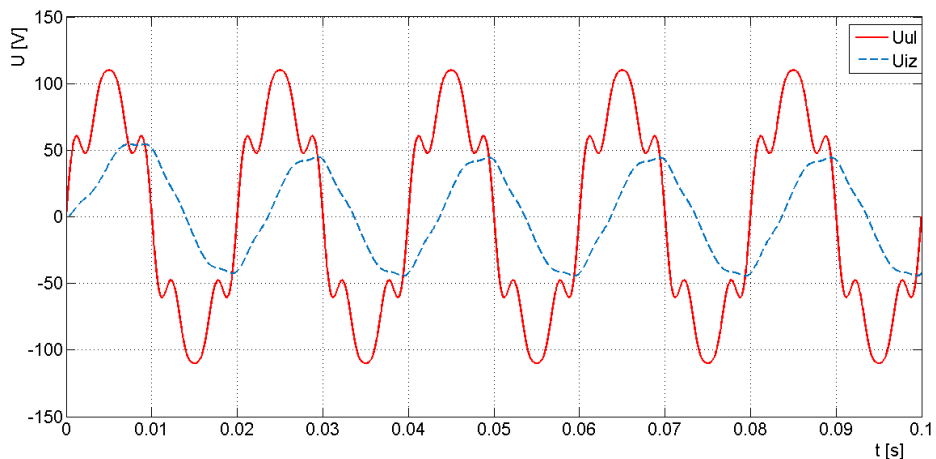
$$G(5 \cdot \omega_0) = \frac{1}{\sqrt{1 + (5 \cdot \omega_0 \tau_5)^2}} = 0,1 \quad (153)$$

odakle se dobija  $\tau_5 = 6,37 \text{ ms}$ . Usvojimo  $C = 6,4 \text{ mF}$ ,  $R = 1 \Omega$ . Sa ovako izabranim parametrima Bodeov dijagram je dat na slici 34. Sa dijagrama očitavamo da je propusni opseg od 0 do 156 rad/s što znači da je osnovni harmonik van propusnog opsega. Zaista, slabljenje osnovnog harmonika je oko -7 dB što na osnovu (145) znači da je oslabio na 44,7%.



Slika 34: Bode-ov dijagram u slučaju kada su parametri RC filtra proračunati za slabljenje 5-og harmonika na 10%

Fazno kašnjenje je  $-63,5^\circ$ . Sedmi harmonik u ovom slučaju je oslabio za -23 dB (pao na 7,1 %). Oblik ulaznog i izlaznog napona u ovom slučaju je dat na slici 35.



Slika 35: Valni oblik ulaznog napona (puna linija) i isfiltriranog izlaznog napona (isprekidana linija)

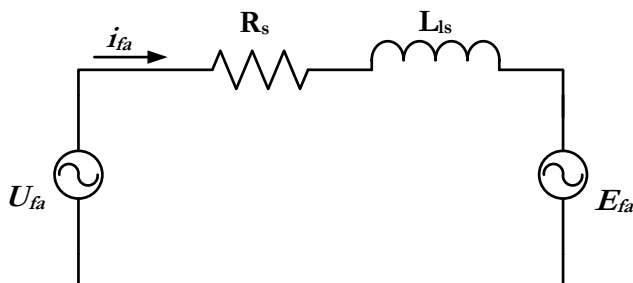
Uočljivo je da je izlazni napon u ovom slučaju "čistiji" nego na slici 33. Međutim, očigledno je da se efektivna vrednost nedopustivo smanjila. Na sličan način kao u (20) - (21), proračunavamo efektivnu vrednost i THD u ovom slučaju. Vrednosti su 31,6 V i 4,7 %.

**2. Polazeći od zaključaka iz prošlog zadatka, odgovorite na pitanja:****a) Kada je opravdano koristiti niskopropusni filter prvog reda?****b) Zašto su statrorske struje asinhronog (i sinhronog) motora gotovo sinusne iako se napajaju iz pretvarača upravljanog PWM-om?**

a) Rezultati dobijeni na slikama 33 i 35 pokazuju da niskopropusni filter prvog reda nije pogodan za izdvajanje osnovnog harmonika ako su viši harmonici srazmerno blizu osnovnom kao što su peti i sedmi. Naime, sa slika 32 i 34 je jasno da ako izaberemo parametre filtra tako da je presečna učestanost podalje od osnovnog harmonika (da ga ne bismo slabili), nagib krive pojačanja je preblag (svega 20 dB po dekadi pošto je filter prvog reda) da bi značajno oslabio bliske harmonike, u našem slučaju peti i sedmi. S druge strane, ako hoćemo značajno smanjiti peti i sedmi harmonik, parametri filtra moraju biti odabrani tako da presečna učestanost bude ispred samog osnovnog harmonika, a to je nedopustivo. Sve ovo upućuje da niskopropusne filtre prvog reda nije podesno koristiti kada su harmonik kojeg želimo propustiti i harmonici koje želimo oslabiti (odstraniti) srazmerno blizu.

b) Namotaj statora asinhronne mašine (slika 36) je po svojoj suštini zapravo RLE kolo. E je elektromotorna sila koja se menja po brzini mehaničke konstante, tj. sporo. Struju kroz namotaj računamo u Laplace-ovoj ("s"-oblasti) kao:

$$i_{fa} = \frac{U_{fa} - E_{fa}}{R_s + sL_{ls}} \quad (154)$$



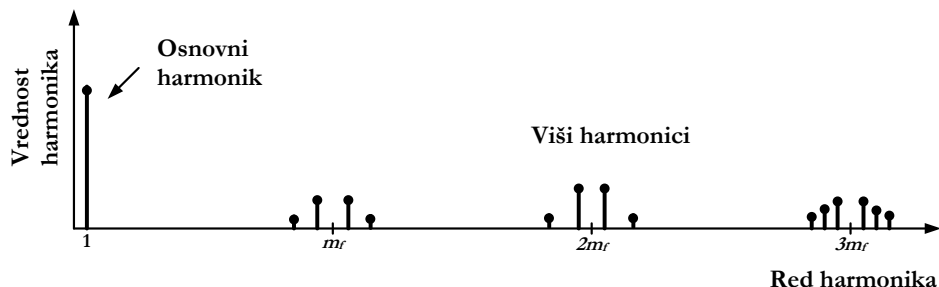
Slika 36: Statorski namotaj asinhronne (sinhronne) mašine možemo predstaviti kao RLE član

odnosno:

$$i_{fa} = \frac{U_{fa} - E_{fa}}{R_s} \cdot \frac{1}{1 + s\tau}, \quad \tau = \frac{L_{ls}}{R_s} \quad (155)$$

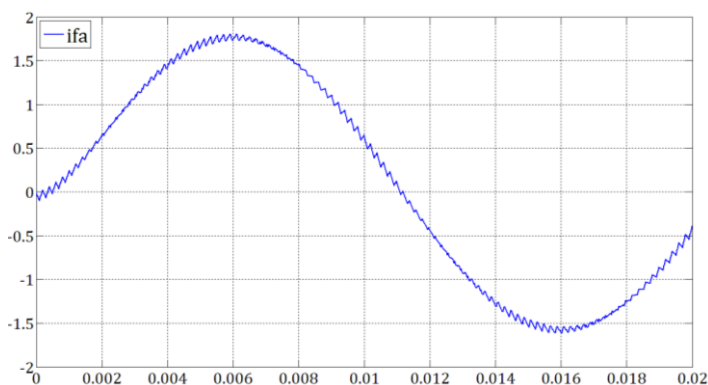
Sad se jasno vidi da se namotaj prema struji u odnosu na napon ponaša kao filter prvog reda. U gornjoj jednačini mogli smo izostaviti elektromotornu silu koja se sporo menja, što se često i čini u sličnim prilikama, no nema potrebe za tim, pošto ne utiče na dinamiku sistema. Kako činjenica da je namotaj motora filter prvog reda

utiče na harmonike? Da bismo odgovorili na to pitanje moramo se podsetiti kako izgleda harmonijski sastav napona upravljano PWM postupkom. Uzmimo pri tom najjednostavniju, sinusnu PWM tehniku koja je inače lošija u harmonijskom smislu od drugih PWM postupaka.



Slika 37: Harmonijski sastav sinusnog PWM-a

Na gornjoj slici  $m_f$  [23] označava odnos između učestanosti PWM-a (npr. 2 kHz) i osnovnog harmonika (50 Hz). Viši harmonici su dakle preslikani oko učestanosti PWM-a, dvostruke učestanosti PWM-a i tako redom.



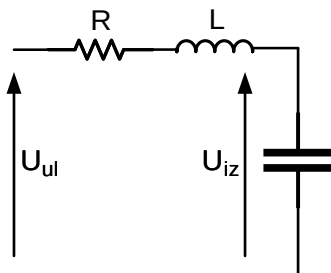
Slika 38: Struja statorskog namotaja asinhronog motora

To znači da se harmonici PWM-a ponašaju kao harmonici na visokoj učestanosti, odnosno daleko od osnovnog - onoliko daleko koliki je  $m_f$  (u našem slučaju to je  $2000/50 = 40$ ). Drugim rečima, viši harmonici su daleko od osnovnog što daje dovoljan prostor blagom nagibu filtra prvog reda od -20 dB/dekadi da ih značajno oslabi, dok je osnovni harmonik očuvan. Iz tog razloga statorska struja naizmeničnih motora (slika 38) je po obliku gotovo sinusna sa dodatkom malog šuma oko sinusoide koji je posledica jako oslabljenih viših harmonika.

**3. Proračunati parametre niskopropusnog RLC filtra tako da osnovni harmonik bude neoslabljen. Koliko je slabljenje petog i sedmog harmonika u tom slučaju? Koliko je slabljenje po dekadi? Pretpostavite da se prirodna**

**učestanost filtra poklapa sa učestanošću osnovnog harmonika. Uporedite dobijene zaključke sa rešenjima 1. zadatka ovog poglavlja.**

Traženi RLC filter dat je na slici 39.



Slika 39: Niskopropusni RLC filter

Prenosna funkcija RLC filtra je:

$$G(s) = \frac{U_{iz}(s)}{U_{ul}(s)} = \frac{\frac{1}{sC}}{sL + R + \frac{1}{sC}} = \frac{1}{s^2LC + sR + 1} = \frac{\frac{1}{LC}}{s^2 + s\frac{R}{L} + \frac{1}{LC}} \quad (156)$$

To je dobro poznata funkcija drugog red (dva pola) koja u opštem slučaju glasi:

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (157)$$

gde je  $\omega_n$  tzv. prirodna učestanost filtra, a  $\xi$  prigušenje filtra. Upoređujući poslednje dve jednačine uočimo da je prirodna učestanost u stvari rezonantna učestanost RLC kola ( $\omega_n^2 = \frac{1}{LC}$ ). Prigušenje možemo izraziti kao:

$$2 \cdot \xi \cdot \omega_n = \frac{R}{L} \Rightarrow \xi = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (158)$$

Iz jednačine (26) možemo saznati nekoliko pojedinosti. Ukoliko je ulazni napon jednosmerni, on neće uopšte biti oslabljen, ma kako izabrali parametre filtra, tj.

$$G(s = j\omega = j0) = \frac{\omega_n^2}{\omega_n^2} = 1$$

Ako odaberemo  $\xi = 1$ , prenosna funkcija se svodi na:  $G(s) = \frac{\omega_n^2}{(s + \omega_n)^2}$ . Za učestanosti ulaznog napona  $\omega$  mnogo veće od prirodne  $\omega_n$  pojačanje pada sa kvadratom tih učestanosti. Ukoliko je prigušenje manje od 1, prenosna funkcija ima dva konjugovano kompleksna pola, dok za prigušenje veće od jedan, polovi su realni.

Predimo sad na razradu samih uslova zadatka. Prenosnu funkciju u oblasti učestanosti dobijamo iz (157), smenom  $s = j\omega$ :

$$G(j\omega) = \frac{\omega_n^2}{-\omega^2 + j2\xi\omega_n\omega + \omega_n^2} \quad (159)$$

Ukoliko parametre filtra odaberemo tako da prirodna učestanost bude ravna učestanosti željenog harmonika, u našem slučaju osnovnog  $\omega = \omega_0$ , dalje je:

$$G(j\omega_n = j\omega_0) = \frac{\omega_0^2}{-\omega_0^2 + j2\xi\omega_0\omega_0 + \omega_0^2} = \frac{1}{j2\xi} \quad (160)$$

Moduo pojačanja je :

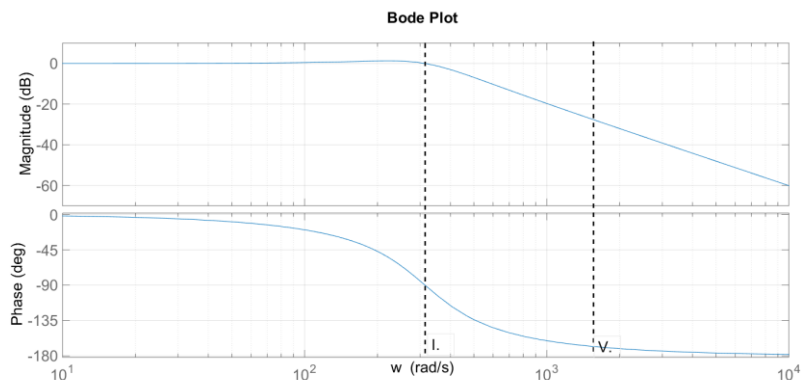
$$G(\omega_0) = \frac{1}{2\xi} \quad (161)$$

Ukoliko želimo da pojačanje bude ravno 1, tj. osnovni harmonik neoslabljen, prigušenje je:  $\xi = \frac{1}{2}$ . Uočimo da niskopropusni filter drugog reda proračunat na ovaj način unosi fazno kašnjenje od  $90^\circ$ .

Proračunajmo sada parametre R, L i C. Iz činjenice da je  $\omega_n = \omega_0$ , a pošto je  $\omega_n^2 = \frac{1}{LC}$ , onda dobijamo vezu između L i C:

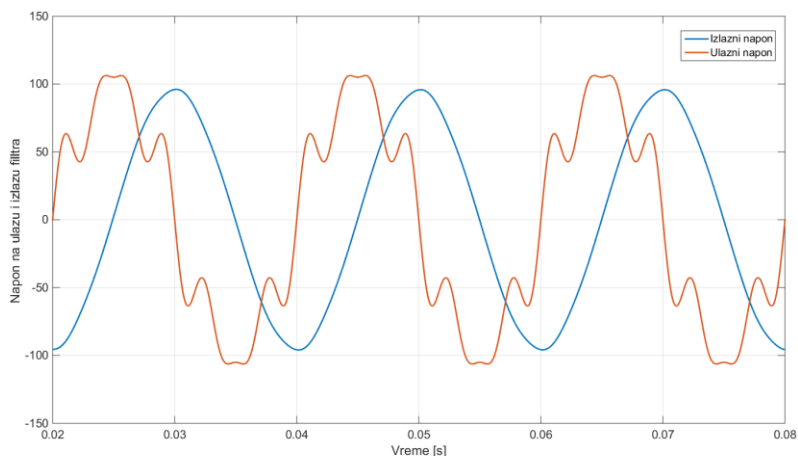
$$(100 \cdot \pi)^2 = \frac{1}{LC} \rightarrow LC = 1,013 \cdot 10^{-5} \quad (162)$$

Usvojicemo da je  $C=10$  mF, a  $L=1$  mH. Ostaje još da odredimo otpornost. Iz željene vrednosti  $\xi = \frac{1}{2}$  i izraza (27) dobijamo  $R=0,314 \Omega$ , pa ćemo usvojiti  $R=0,3 \Omega$ . Za ovako izabrane parametre, Bode-ov dijagram je dat na slici 40. Uočavamo da je pojačanje na osnovnoj učestanosti nešto veće od željene vrednosti 0 dB, pošto smo zaokružili vrednost proračunate otpornosti. Nakon presečne učestanosti (pojačanje 0 dB) pojačanje pada sa strmih -40 dB/dekadi, pa je pojačanje, odnosno bolje reći slabljenje na 5-om harmoniku ( $\omega=1570$  rad/s) ravna -27,6 dB, tj 0,042 izraženo u apsolutnim jedinicama, što je znatno povoljnije od filtra prvog reda (slabljenje oko 0,39). Međutim, fazno kašnjenje na osnovnom harmoniku u slučaju filtra drugog reda sa parametrima proračunatima kao  $\omega_n=\omega_0$  i  $\xi= \frac{1}{2}$  je  $90^\circ$ .



Slika 40: Bodeov dijagram za RLC filter pri  $\omega_n = \omega_0$  i  $\xi = \frac{1}{2}$

Da bismo uočili dejstvo filtra, na ulazu ćemo harmonijski izobličen napon (osnovni harmonik od 100 V, peti od 20 V i sedmi od 15 V). Merimo rezultate na izlazu. Odgovarajući rezultati simulacije su dati na slici 41. Ako to uporedimo sa slikama 33 i 35, jasna je prednost filtra drugog reda, ali i nedostatak u većem faznom kašnjenju.



Slika 41 Ulazni i izlazni napon RLC filtra

4. Ispitati zavisnost prigušenja  $\xi$ , prirodne učestanosti  $\omega_n$ , faznog kašnjenja  $\varphi(\omega)$  prosečne učestanosti  $\omega_c$  pojačanja filtra drugog reda datog prenosnom funkcijom  $G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$  čiji je cilj izdvojiti osnovni harmonik (pojačanje

1, tj. 0 dB, a oslabiti više harmonike).

U oblasti učestanosti, prenosna funkcija datog filtra je:  $G(j\omega) = \frac{\omega_n^2}{-\omega^2 + j2\xi\omega_n\omega + \omega_n^2}$ .

Pojačanje  $G(\omega)$  je ravno modulu gornje funkcije, tj:

$$G(\omega) = \frac{\omega_n^2}{\sqrt{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + (2\xi\omega_n\omega)^2}} \quad (163)$$

Za željenu presečnu učestanost  $\omega_c$ ,  $G(\omega_c) = 1$ , tj:  $\frac{\omega_n^2}{\sqrt{(\omega_n^2 - \omega_c^2)^2 + (2\xi\omega_n\omega_c)^2}} = 1$ , odakle:

$$\omega_n = \frac{\omega_c}{\sqrt{2(1 - 2\xi^2)}} \quad (164)$$

Fazno kašnjenje računamo u opštem slučaju kao:

$$\varphi(\omega) = -\arctg \frac{2\xi\omega_n\omega}{\omega_n^2 - \omega^2} \quad (165)$$

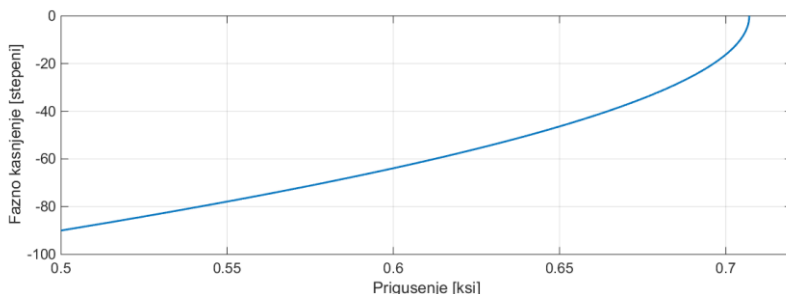
odnosno za presečnu učestanost  $\omega_c$ :

$$\varphi(\omega_c) = -\arctg \frac{2\xi\omega_n\omega_c}{\omega_n^2 - \omega_c^2} \quad (166)$$

Uvrštavajući (164) u poslednju jednačinu imamo:

$$\varphi(\omega_c) = -\arctg \frac{2\xi\sqrt{2 - 4\xi^2}}{4\xi^2 - 1} \quad (167)$$

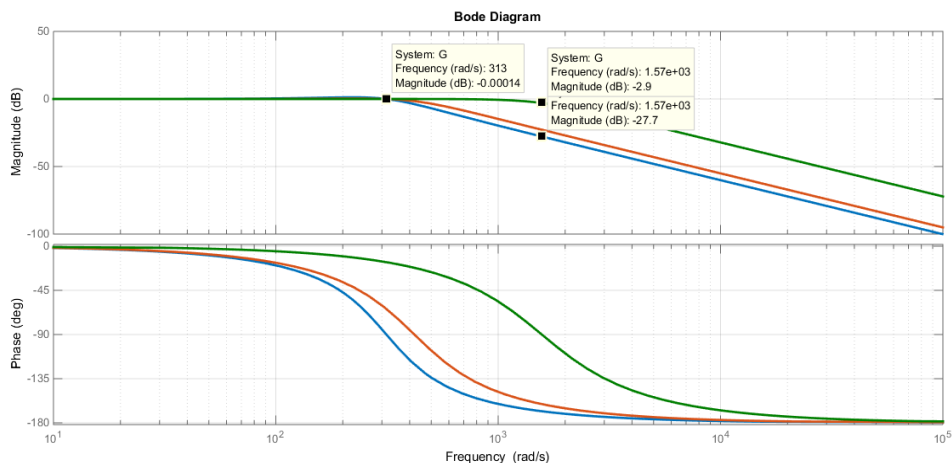
Ukoliko želimo jedinično pojačanje na osnovnoj učestanosti, biramo  $\omega_c = \omega_0$  u (164), ali ostaje pitanje izbora prigušenja  $\xi$  od kojeg zavisi fazno kašnjenje na presečnoj učestanosti  $\varphi(\omega_c)$ . Iz tog razloga ćemo prikazati grafički tu zavisnost na osnovu jednačine (167).



Slika 42: Zavisnost faznog kašnjenja od prigušenja za datu presečnu učestanost

Jasno je da će fazno kašnjenje biti to manje što povećavamo prigušenje. Šta su posledice toga? Da bismo odgovorili na to pitanje, ostaje još da razmotrimo kako izbor prigušenja utiče na slabljenje viših harmonika. Zato ćemo prikazati Bode-ove dijagrame za tri slučaja  $\xi = 0,5$ ;  $\xi = 0,6$  i  $\xi = 0,7$  (slika 43)

Ukoliko bismo izabrali  $\xi = 0,7$  (gornja linija na slici 43) gde bi fazno kašnjenje bilo malo, slabljenje na višim harmonicima bi bilo značajno manje od slabljenja za  $\xi = 0,5$  (donja linija),  $\xi = 0,6$  (srednja linija). Oдавde se vidi da je ovakav filter utoliko bolji (bolje izdvaja osnovni harmonik od viših) što mu je fazno kašnjenje veće. Zato je izbor prigušenja stvar kompromisa između preteka faze i željenog slabljenja viših harmonika.



Slika 43: Bode-ovi dijagrami za slučajeve:  $\xi = 0, 5$  (donja linija),  $\xi = 0, 6$  (srednja linija) i  $\xi = 0, 7$  (gornja linija)

## 1.7. Otočni pasivni filtri

**1. Redni RLC filtar otočno povezan u datu sabirnicu udešen je da filtrira 13. harmonik. Ako je impedansa kondenzatora  $X_C = 507 \Omega$ , proračunati elemente filtra i nacrtati zavisnost impedanse od rednog broja harmonika.**

Pre izrade samog zadatka, kratko ćemo se osvrnuti na nekoliko bitnih pojmova i izraza. U prošlim zadacima smo se bavili osnovnim postupcima koji nam pomažu pri analizi i projektovanju filtara (presečna učestanost, Bode-ov dijagram). U ovom i narednim zadacima ćemo se više posvetiti praktičnim postupcima projektovanja pasivnih filtara u cilju poboljšanja kvaliteta električne energije.

Otočno filtriranje se može shvatiti kao projektovanje sveukupne impedanse otočnog RLC člana tako da bi se "zarobio" neželjeni harmonik ili harmonici. Da bi se to postiglo, biraju se pasivni elementi tako da stvore nisku impedansu za harmonike koje treba odstraniti.

Za dati harmonik  $n$ , impedansa odgovarajuće induktivnosti i kapacitivnosti su:

$$X_{Ln} = n \cdot X_{L1}, \quad X_{Cn} = \frac{1}{n} X_{C1} \quad (168)$$

Ako se reaktanse projektuju po uslovu rezonanse:  $X_{Ln} = X_{Cn} = X_n$

onda je rezonantna svojstvena reaktansa  $X_n$ :

$$\begin{aligned} X_n = \sqrt{X_n \cdot X_n} &= \sqrt{X_{Ln} \cdot X_{Cn}} = \sqrt{n \cdot X_{L1} \cdot \frac{1}{n} X_{C1}} = \sqrt{\omega_0 L_1 \cdot \frac{1}{\omega_0 C_1}} \\ &= \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} \end{aligned} \quad (169)$$

Harmonik koji udešavamo na osnovu uslova rezonanse:

$$1 - \omega^2 LC = 0 \Leftrightarrow 1 - n\omega_0 L \cdot n\omega_0 C = 0 \Rightarrow n = \sqrt{\frac{X_{C1}}{X_{L1}}} \quad (170)$$

Iz (169) i (170) dobijamo vrednost reaktanse induktivnosti za datu reaktansu kapacitivnosti i (ne)željeni harmonik:

$$X_{L1} = \frac{X_{C1}}{n^2} \quad (171)$$

Sada ćemo navesti korake projektovanja:

1. Odrediti reaktansu kapacitivnosti osnovnog harmonika (tj. kapacitivnost) na osnovu zahteva za reaktivnom snagom  $Q_C$ :

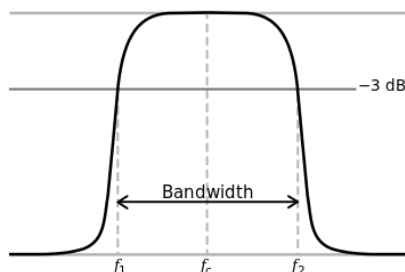
$$X_{C1} = \frac{U^2}{Q_C} \quad (172)$$

2. Odrediti reaktansu induktivnosti osnovnog harmonika (tj. induktivnost prigušnice) na osnovu (171)
3. Odrediti otpornost prigušnice na osnovu svojstvene reaktanse  $X_n$  i sačinioca dobrote  $Q$ :

$$R_L = \frac{X_n}{Q} \quad (173)$$

$Q$  se kreće u granicama od 30 do 100.

Osvrnućemo se na značenje sačinioca dobrote. On zapravo predstavlja odnos između rezonantne učestanosti  $f_c$  i propusnog opsega  $|f_2 - f_1|$  (slika 44). Što je  $Q$  veće, to je zvonolika kriva uža, odnosno izdvojivost (selektivnost) datog rezonantnog harmonika veća. Za manje  $Q$ , filter je "manje dobar", odnosno pogađa i harmonike okolo ciljanog.



Slika 44: Značenje sačinioca dobrote  $Q$

4. Veličina (reaktivna snaga) filtra:

$$Q_F = \frac{U^2}{X_C - X_L} = \frac{U^2}{X_C - \frac{X_C}{n^2}} = \frac{n^2}{n^2 - 1} \frac{U^2}{X_C} = \frac{n^2}{n^2 - 1} Q_C \quad (174)$$

5. Za redno udešeni filter, impedansa  $n$ -tog harmonika je:

$$Z_F = \sqrt{R_L^2 + \left( nX_{L1} - \frac{X_{C1}}{n} \right)^2} \quad (175)$$

6. Napon na kondenzatoru (kapacitivnosti) u odnosu na napon sabirnice određujemo uz pomoć naponskog razdelnika kao:

$$\frac{U_{C1}}{U} = \frac{-jX_{C1}}{j(X_{L1} - X_{C1})} = \frac{\frac{X_{C1}}{X_{L1}}}{\frac{X_{C1}}{X_{L1}} - 1} = \frac{n^2}{n^2 - 1} \quad (176)$$

odnosno:

$$\frac{U_{Cn}}{U_n} = \frac{-jX_{Cn}}{R + j(X_{Ln} - X_{Cn})} = -j \frac{X_n}{R} = -jQ \quad (177)$$

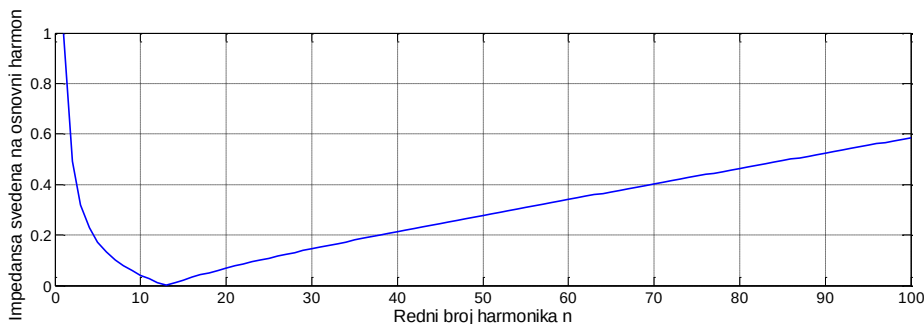
Nakon ovog uvodno-teorijskog dela, preći ćemo na izradu samog zadatka.

Na osnovu (171) računamo reaktansu prigušnice:  $X_{L1} = \frac{507}{13^2} = 3 \, \Omega$

Svojevredna rezonantna reaktansa sledi iz (169):  $X_n = \sqrt{3 \cdot 507} = 39 \, \Omega$

Usvojimo da je sačinilac dobrote  $Q=100$ . Onda je otpornost prigušnice na osnovu (173):  $R_L = \frac{39}{100} = 0,39 \, \Omega$

Zavisnost impedanse filtra od rednog broja harmonika je dobijena na osnovu (175) i prikazana na slici 45.



**Slika 45: Svedena zavisnost impedanse rednog RLC filtra u odnosu na redni broj harmonika**

Sa slike se vidi da je impedansa nulta za ciljani 13-ti harmonik, dok je za ostale harmonike manja nego za osnovni, što znači da će i njih slabiti u izvesnoj meri (veće slabljenje će imati viši od nižih harmonika).

**2. Koji je red udešavanog harmonika, za redni RLC filter napona 33 kV,  $X_C=544,5 \, \Omega$ ,  $X_L=4,5 \, \Omega$ ,  $R=0,825 \, \Omega$ ? Izračunati sačinilac dobrote i reaktivnu snagu filtra.**

Iz (171) sledi:  $n = \sqrt{\frac{544,5}{4,5}} = 11$

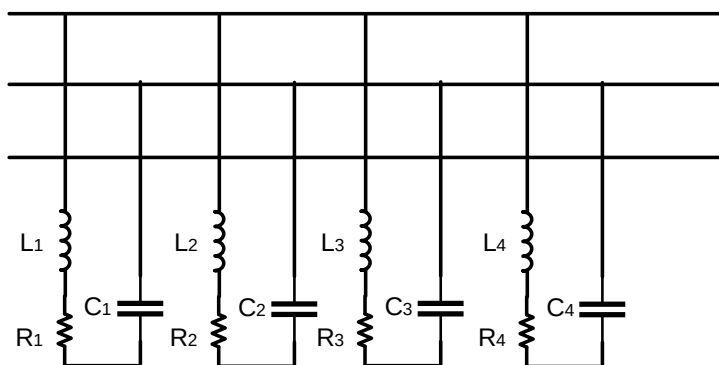
Sačinilac dobrote dobijamo na osnovu (173) i (169):

$$Q = \frac{X_n}{R} = \frac{\sqrt{X_L \cdot X_C}}{R} = 60.$$

Reaktivnu snagu filtra računamo iz (174) i (172):

$$Q_F = \frac{13^2}{13^2 - 1} \cdot \frac{33000^2}{544,5} = 2,017 \text{ MVar}$$

**3. Koji su harmonici zarobljeni filtrom koji ima četiri redno udešena kola otočno povezana na trofaznu mrežu 50 Hz, 400 V, Y, ako su snage priključenih kondenzatorskih baterija:  $Q_{C1}=30 \text{ kVar}$ ,  $Q_{C2}=Q_{C3}=Q_{C4}=20 \text{ kVar}$ , a odgovarajuće induktivnosti prigušnica po kolu:  $L_1=0,779 \text{ mH}$ ,  $L_2=0,583 \text{ mH}$ ,  $L_3=0,233 \text{ mH}$  i  $L_4=0,166 \text{ mH}$ ?**



Slika 46: Filtriranje četiri harmonika

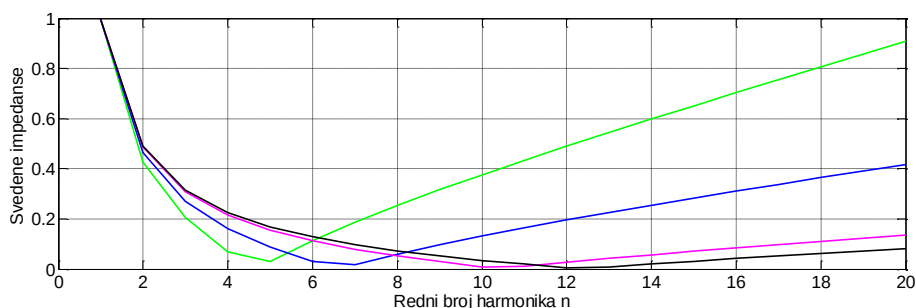
Na osnovu datog napona i reaktivnih snaga svake kondenzatorske baterije:

$$X_{Ci} = \frac{U^2}{Q_{Ci}}, \text{ gde je } i=1,2,3 \text{ i } 4, \text{ a } U=400 \text{ V.}$$

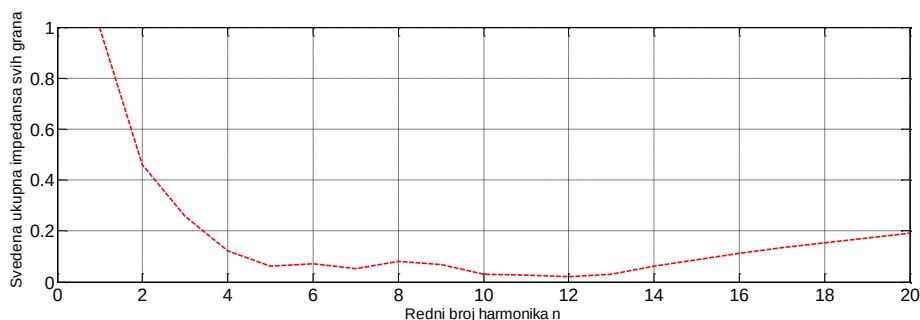
Dalje, na osnovu (171):  $n_i = \sqrt{\frac{X_{Ci}}{X_{Li}}}$ , tj.  $n_1 = 4,7$ ;  $n_2 = 6,6$ ;  $n_3 = 10,5$  a  $n_4 = 12,4$

Odatle zaključujemo da smo gađali zapravo 5-i, 7-i, 11-i i 13-i harmonik. Namerno su naime udešeni manji redni brojevi (4,7 a ne 5 ili 6,6 a ne 7) zato što usled starenja izolacije opada kapacitet, pa rezonantne učestanosti rastu.

Pogledajmo još i zavisnost impedanse u zavisnosti od rednog broja harmonika za ovaj složeniji pasivni filter.



Slika 47: Svedena zavisnost impedanse svake grane filtra ponaosob



Slika 48: Svedena ukupna impedansa čitavog filtra (sve 4 grane zajedno)

Sa gornje slike vidimo da impedansa ima lokalna ulegnuća (minimume) u traženim harmonicima. Budući da su ciljani harmonici blizu jedan drugome, ovaj filter će u značajnoj meri oslabiti i ostale harmonike u opsegu od oko 3-eg, pa do posle 20-og.

#### 4. Za datu rezonantnu učestanost nekog rednog RLC filtra pronaći zavisnost propusnog opsega od sačinioca dobrote.

Cilj ovog zadatka je da približi "fizičko" značenje sačinioca dobrote, odnosno da analitički odredi njegov uticaj na širinu propusnog opsega filtra.

Polazimo od činjenice da na granici propusnog opsega (gornjoj i donjoj učestanosti  $f_1$  i  $f_2$ , slika 44) važi:

$$\frac{1}{Z(n)} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{Z(n_r)} \quad (178)$$

gde je  $n$  harmonik bilo na početku ili kraju propusnog opsega, a  $n_r$  rezonantni harmonik, tj. u sredini propusnog opsega.

Zamenjujući (175) u gornju jednakost, imamo:

$$\frac{1}{\sqrt{R_L^2 + \left(nX_L - \frac{X_C}{n}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{R_L} \quad (179)$$

pri čemu je na rezonantnoj učestanosti impedansa ravna otpornosti  $R_L$ . Dalje imamo:

$$\left(nX_L - \frac{X_C}{n}\right)^2 = R_L^2 \quad (180)$$

Uvažavajući (169), zamjenjujemo  $R_L$ , pa rešavajući gornju kvadratnu jednačinu dobijamo dva rešenja:

$$n_1 = \frac{\sqrt{X_L \cdot X_C}}{2X_L} \left( \frac{1}{Q} + \sqrt{4 + \frac{1}{Q^2}} \right), n_2 = \frac{\sqrt{X_L \cdot X_C}}{2X_L} \left( -\frac{1}{Q} + \sqrt{4 + \frac{1}{Q^2}} \right) \quad (181)$$

Opseg učestanosti u okviru propusnog opsega za dato  $Q$  je  $\Delta n = n_1 - n_2$

$$\Delta n = \frac{1}{Q} \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} = \frac{n_r}{Q} \quad (182)$$

**5. Jednofazni pasivni filter sa četiri otočno vezane grane, primenjen da filtrira 3., 5., 7. 9. i više harmonike struje mreže  $i_s$  (slika 49) je postavljen na ulaz tiristorskog strujnog ispravljača koji napaja teret stalnom strujom od 15 A. Ugao uključenja tiristora je  $60^\circ$ , a reaktansa mreže  $0,75 \Omega$ . Proračunajte:**

**a) komponente filtra**

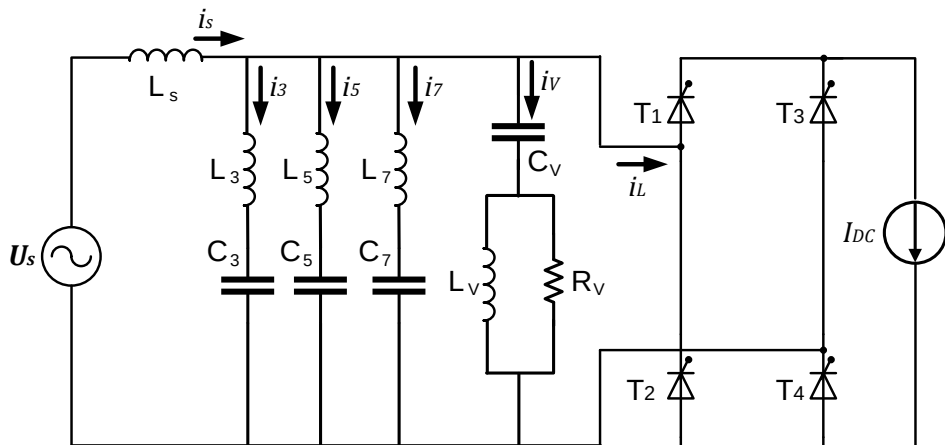
**b) THD struje mreže i napona tereta**

**c) Prividnu snagu filtra**

Uloga pasivnog filtra [25] je pored toga da poboljša harmonijsku sliku ulazne struje i da doprinese kompenzaciji jalove snage koju u načelu troši uređaj energetske elektronike nezavisno od prirode tereta. Pritom se usredsređujemo na snagu osnovnog harmonika:

$$Q_1 = U_{s1} \cdot I_{L1} \cdot \sin(\varphi_1) \quad (183)$$

Efektivna vrednost osnovnog harmonika napona je ravna njegovoj efektivnoj vrednosti pošto smo pretpostavili da je taj napon sinusni.



Slika 49: Filtar na ulazu jednofaznog strujnog tiristorskog ispravljača

Osnovni harmonik struje tereta  $I_{L1}$  računamo na osnovu slike 10 pošto je talasni oblik struje zapravo povorka četvrtki pomerena u odnosu na koordinatni početak (odnosno napon mreže) za ugao paljenja tiristora  $\alpha$ . Dakle:  $I_{L1} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_{DC} \approx 0,9 I_{DC} = 13,5 \text{ A}$ . Fazni stav osnovnog harmonika je jednak uglu paljenja tiristora pošto on određuje smaknutost struje u odnosu na napon. Ovo se može i strogo potvrditi računajući Fourier-ove koeficijente  $A_1$  i  $B_1$  pa računajući onda  $\varphi_1$  kao  $\varphi_1 = \arctg \frac{B_1}{A_1}$ . Ugao  $\varphi_1$  u našem slučaju je dakle  $\varphi_1 = \alpha = 60^\circ$ , odakle je:  $Q_1 = 230 \cdot 13,5 \cdot \sin(60^\circ) = 2689 \text{ VAR}$ . Ovu jalovu snagu treba nadomestiti dejstvom kondenzatora u filteru. Prvo ćemo odrediti napon na teretu, odnosno filteru na osnovu donjeg fazorskog dijagrama. Ovaj napon proračunavamo uz pretpostavku da je filter uspešno izvršio svoj zadatak, tako da struja mreže  $I_s$  ima samo radnu komponentu osnovnog harmonika izobličene i fazno smaknute struje tereta  $I_{L1}$

Osnovni harmonik napon na teretu je dakle:  $\hat{U}_{L1} = U_s - j \cdot X_s \cdot I_{L1} \cdot \cos(\alpha)$ , tj:  $U_{L1} = \sqrt{U_s^2 + (X_s \cdot I_{L1} \cdot \cos(\alpha))^2}$ , odakle je  $U_{L1} = 230,05 \text{ V} \approx 230 \text{ V}$ . Drugim rečima, pad napona na mrežnoj induktivnosti ovde možemo zanemariti.

Četiri kondenzatora  $C_3$ ,  $C_5$ ,  $C_7$  i  $C_v$  trebaju da pokriju reaktivnu snagu od 2689 VAR koju troši ispravljač. Pretpostavićemo da su svi kondenzatori isti (ova pretpostavka nije nužna, ali je praktična), odnosno da imaju iste kapacitivnosti  $C_3=C_5=C_7=C_v=C$ . Iz  $Q_1 = 4 \cdot U_{L1}^2 \cdot \omega_0 \cdot C$ , sledi da je  $C=43,7 \text{ }\mu\text{F}$ .

Prigušnice  $L_3$ ,  $L_5$  i  $L_7$  proračunavamo tako da stupe u rezonansu (jednačine (168)-(170)) sa odgovarajućim kapacitivnostima i "zarobe" odgovarajuće harmonike struje na svom putu prema mreži. Dakle:  $L_n = \frac{1}{(n \cdot \omega_0)^2 \cdot C}$ , pri čemu je  $n=3,5,7$ , a  $\omega_0 = 100 \cdot \pi$ , kružna učestanost osnovnog harmonika. Odatle je:  $L_3=27,8 \text{ mH}$ ,  $L_5=10 \text{ mH}$ ,

$L_7=5,1$  mH. Dalje proračunavamo otpornosti prigušnica spram sačinioca dobrote (173). Sačinilac dobrote se obično za očno vezani redni filter uzima u opsegu 10-100. Izaberimo u ovom zadatku  $Q_{3,5,7} = 70$ . Sad imamo:  $R_n = \frac{X_n}{Q}$ ,  $X_n = n \cdot \omega_0 \cdot L_n$ , odakle je:  $R_3=0,374 \Omega$ ,  $R_5=0,225 \Omega$ ,  $R_7=0,161 \Omega$ .

Da vidimo sada koji deo trećeg, petog i sedmog harmonika "čtvrtaste" struje tereta  $I_L$  ipak dopre do struje mreže nakon "zarobljavanja" u pojedinim granama filtra. Jasno je da zbog rezonanse u svakoj očnoj grani, odgovarajući harmonik će upravo ući samo u tu granu i njegova vrednost će biti ograničena jedino otpornošću prigušnice. Međutim, paralelno sa svakom granom je vezana mrežna induktivnost  $L_s$ , pa ćemo njenu struju, tj. harmonike struje mreže dobiti iz strujnog razdelnika:  $\hat{I}_{sn} = \frac{R_n}{R_n + j \cdot n \cdot X_s} I_{Ln}$ , gde su harmonici struje tereta  $I_{Ln}$  proračunati jednačinom (32), tj.  $I_{Ln} = \frac{1}{n} I_{L1}$ . Odatle je:

$$I_{sn} = \frac{R_n}{\sqrt{R_n^2 + (n \cdot X_s)^2}} \cdot \frac{1}{n} \cdot I_{L1} \quad (184)$$

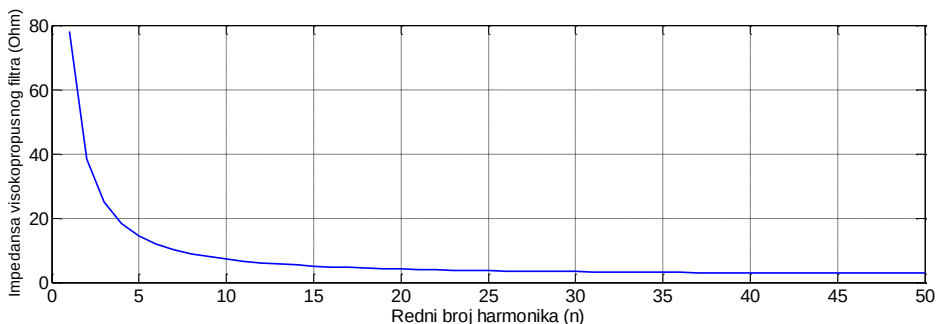
Uvrštavanjem dobijamo:  $I_{s3} = 0,74$  A,  $I_{s5} = 0,16$  A,  $I_{s7} = 0,06$  A

Ovi harmonici struje mreže proizvode harmonijski pad napona na induktivnosti mreže, odnosno prljaju napon na teretu. Harmonijske komponente napona dobijemo kao:

$$U_{Ln} = I_{sn} \cdot n \cdot X_s \quad (185)$$

odakle je učešće 3., 5. i 7. harmonika u naponu tereta:  $U_{L3}=1,66$  V,  $U_{L5}=0,61$  V,  $U_{L7}=0,31$  V.

Sada ćemo proračunati parametre poslednje, četvrte grane filtra. Njena uloga je malo drugačija i razumećemo je bolje sa slike 50.



**Slika 50: Zavisnost impedanse visokopropusne grane filtra od rednog broja harmonika**

Prvo, jasno je zašto je ovako proračunata impedansa visokopropusna - naime za niže harmonike, otprilike do oko 5-og ili 7-og impedansa je visoka, a za više harmonike

niska. To znači da je zadatak ove grane filtra da zarobi više harmonike struje, počevši od nekog prelomnog, dok niže harmonike „prepušta“ rezonansama ostalih otočnih grana. U našem slučaju to znači da će četvrta grana biti zadužena da "zarobi" 9-i harmonik i više harmonike. Induktivnost  $L_v$  se proračunava tako da rezonuje s 9-im harmonikom, tj:  $L_v = \frac{1}{(9 \cdot \omega_0)^2 \cdot C} = 3,1 \text{ mH}$

Otpornost otpornika  $R_v$  računamo slično kao i u slučaju otpornosti u prve tri grane s tim što se kod ovakvog filtra sačinilac dobrote bira u opsegu 0,5 - 5. Izabraćemo npr.  $Q_v=3$ . Onda je  $R_v = \frac{9 \cdot \omega_0 \cdot L_v}{Q_v} = 2,91 \Omega$

Struja koja ulazi u visokopropusnu granu filtra  $I_v$  je sastavljena od viših harmonika koji dolaze od struje tereta  $I_L$  osim 3., 5. i 7. harmonika koji su zarobljeni u prve tri otočne grane. Koristeći jednačinu (14) primenjenu na struju  $I_L$  imamo:  $I_L^2 = I_{L1}^2 + I_{L3}^2 + I_{L5}^2 + I_{L7}^2 + I_{Lv}^2$ , odakle je efektivna vrednost svih viših harmonika (odatle upisnik "v") jednaka:  $I_{Lv}=3,37 \text{ A}$ . Koliko od te harmonijske struje dopre do mreže?

Kao i ranije, upotrebićemo strujni razdelnik  $I_{sv} = \frac{R_v}{\sqrt{R_v^2 + (9 \cdot X_s)^2}} \cdot I_{Lv} = 1,33 \text{ A}$

Pad napona viših harmonika je približno:  $U_{L9} = I_{sv} \cdot 9 \cdot X_s = 9 \text{ V}$ , približno zato što uzimamo reaktansu mreže samo na 9-om harmoniku.

b) Ukupno harmonijsko izobličenje struje mreže  $\text{THD}(I_s)$  računamo kao:  $\text{THD}^2(I_s) = \frac{I_{s3}^2 + I_{s5}^2 + I_{s7}^2 + I_{sv}^2}{I_{s1}^2}$ , pri čemu je  $I_{s1} = I_{L1} \cdot \cos(\alpha)$ , pošto smo pretpostavili da je filter izvršio i nadopunu jalove snage. Odatle je:  $\text{THD}(I_s)=22,7\%$ .

Ukupno harmonijsko izobličenje napona  $\text{THD}(U_L)$  računamo:  $\text{THD}^2(U_L) = \frac{U_{L3}^2 + U_{L5}^2 + U_{L7}^2 + U_{Lv}^2}{U_{L1}^2} = 4\%$ .

c) Prividnu snagu filtra određujemo kao proizvod struje i napona filtra. Struja filtra je zapravo razlika između efektivne vrednosti struje tereta (bogate harmonicima) i struje mreže u kojoj su harmonici umanjani, dok je jalova snaga kompenzovana zahvaljujući filteru. Zato je:

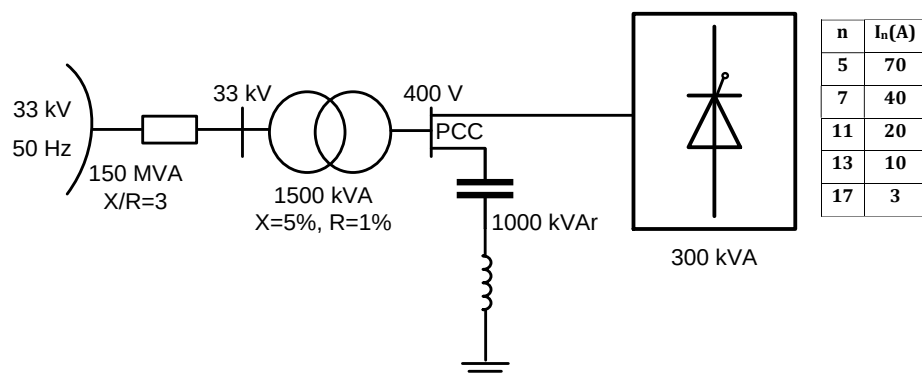
$$I_F = \sqrt{I_L^2 - (I_{L1} \cdot \cos(\alpha))^2 - I_{s3}^2 - I_{s5}^2 - I_{s7}^2 - I_{sv}^2} = 13,31 \text{ A} \quad (186)$$

dok je napon  $U_L \approx 230 \text{ V}$  do čega dolazimo na osnovu gornjeg izraza za  $\text{THD}(U_L)$

Prividna snaga je onda:  $S_F = U_L \cdot I_F = 3061 \text{ VAr}$

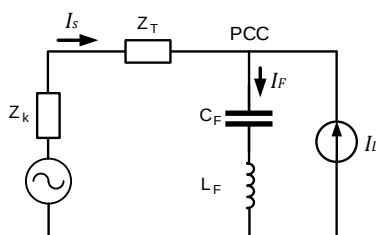
**6. Jednosmerni motor se napaja preko tiristorskog ispravljača (slika 51) i pri tom utiskuje struju harmonijskog sastava čiji su viši harmonici dati u tabeli. Ispravljač je povezan preko distributivnog transformatora na mrežu, a u cilju smanjenja viših harmonika, pasivni LC filter je postavljen u sabirnicu**

zajedničkog priključenja. Cilj filtra je da odstrani pre svega peti harmonik. Odredite rezonantnu učestanost ovakvog sistema



Slika 51: Tiristorski ispravljač sa filtrom

U izradi ovog zadatka se možemo koristiti postupcima i rezultatima zadataka iz poglavlja o rezonansi. Počinjemo sa proračunom zamenske šeme svedenu na niskonaponsku stranu transformatora (slika 52). Strujni izvor  $I_L$  predstavlja tiristorski ispravljač koji utiskuje osnovni harmonik i više harmonike date u tabeli sa slike 51. Impedansa kratkog spoja i impedansa transformatora su predstavljene oznakama  $Z_k$  i  $Z_T$  redom.



Slika 52: Zamenska šema

Impedansu mreže  $Z_k$  dobijemo iz snage kratkog spoja i napona:

$$Z_k = \frac{400^2}{150 \cdot 10^6} = 0,0011 \, \Omega, \text{ a pošto je: } Z_k^2 = R_k^2 + X_k^2 \text{ i } \frac{X_k}{R_k} = 3, \text{ onda dobijamo: } R_k = 0,348 \, m\Omega \text{ i } X_k = 1,044 \, m\Omega, \text{ odnosno } L_k = \frac{1,044 \cdot 10^{-3}}{100\pi} = 3,32 \, \mu F$$

Otpornost namotaja i reaktansa rasipanja transformatora su:

$$R_T = \frac{1}{100} \cdot \frac{400^2}{1500 \cdot 10^3} = 0,0011 \, \Omega \quad \text{i} \quad X_T = \frac{5}{100} \cdot \frac{400^2}{1500 \cdot 10^3} = 0,0055 \, \Omega, \quad \text{odnosno} \quad L_T = \frac{0,0055}{100\pi} = 17,51 \, \mu F$$

Reaktansa filtarskog kondenzatora je:

$$X_{CF} = \frac{400^2}{1000 \cdot 10^3} = 0,16 \, \Omega, \quad \text{odnosno kapacitivnost: } C_F = \frac{1}{0,16 \cdot 100 \cdot \pi} = 19,9 \, mF$$

Reaktansu filtarske induktivnosti dobijemo iz podatka da je filtrom ciljan 5-ti harmonik. Kako smo videli u ranijim zadacima, zbog starenja se za rezonantnu učestanost bira 5-10 % manja učestanost od teoretske. Dakle, ako za rezonantnu učestanost uzmemo  $\omega_r = 0,95 \cdot 5 \cdot 100\pi = 1492,3 \frac{rad}{s}$ , da bi ta učestanost bila zarobljena filtrom, induktivnost filtra  $L_F$  mora biti:  $L_F = \frac{1}{\omega_r^2 \cdot C_F} = \frac{1}{1492,3^2 \cdot 19,9 \cdot 10^{-3}} = 22,56 \, \mu H$ .

Ukupna impedansa čitavog sistema je:

$$\hat{Z}_e = \frac{(\hat{Z}_k + \hat{Z}_T) \cdot \hat{Z}_F}{\hat{Z}_k + \hat{Z}_T + \hat{Z}_F} = \frac{(R_k + j\omega_r L_k + R_T + j\omega_r L_T) \cdot \left( \frac{1}{j\omega_r C_F} + j\omega_r L_F \right)}{R_k + j\omega_r L_k + R_T + j\omega_r L_T + \frac{1}{j\omega_r C_F} + j\omega_r L_F}, \quad \text{odakle se dobija sistemka}$$

$$\text{rezonansa:} \quad \omega_r L_k + \omega_r L_T + \omega_r L_F - \frac{1}{j\omega_r C_F} = 0, \quad \text{tj:} \quad \omega_r = \frac{1}{\sqrt{C_F(L_k + L_T + L_F)}} = \frac{1}{\sqrt{0,509 \cdot 10^{-3}(25,48 \cdot 10^{-6} + 17,51 \cdot 10^{-6} + 0,882 \cdot 10^{-3})}} = 1076,2 \, \text{rad/s}, \quad \text{čemu odgovara } 3,43$$

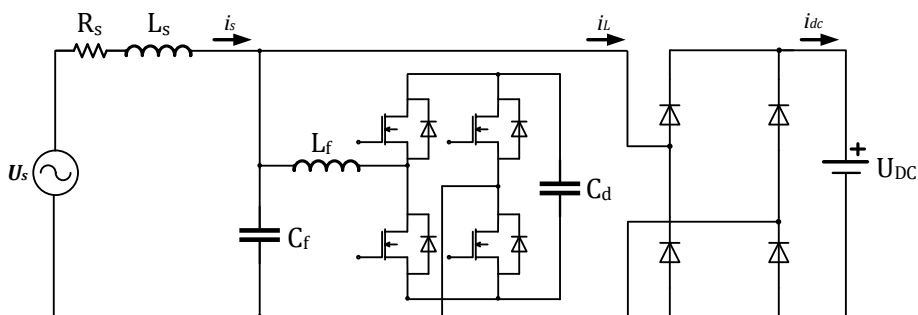
harmonik koji je podalje od prvog kritičnog utisnutog harmonika struje, a to je peti.

## 1.8. Aktivni filtri

1. Aktivni filter (slika 53) je otočno povezan sa teretom napajanog jednosmernom strujom srednje vrednosti  $i_{dc} = 20A$  i stalnog napona  $U_{dc} = 160V$  koji daje diodni jednofazni ispravljač. Izračunati:

- Vrednost otpornika  $R_s$  čiji je zadatak da ograniči struju mreže
- Efektivnu vrednost struje na ulazu u diodni ispravljač
- Naponski i strujni nivo aktivnog filtra, kao i nazivnu prividnu snagu
- Vrednost kondenzatora  $C_d$  aktivnog filtra
- Vrednost filtarske prigušnice  $L_f$  i kondenzatora  $C_f$

Učestanost PWM-a aktivnog filtra je 20 kHz, efektivna vrednost napona mreže je 230 V, učestanost 50 Hz. Valovitost struje kroz  $L_f$  treba ograničiti na najviše 3%, a valovitost napona na  $C_d$  na 5%.



Slika 53: Jednofazni aktivni filter

U izradi zadatka ćemo za analizu koristiti sliku 6 i jednačine ispod nje.

Odatle je:  $\alpha = \arcsin \frac{160}{230\sqrt{2}} = 0,514 \text{ rad}$ , odnosno:  $\beta = \pi - \alpha = 2,627 \text{ rad}$ .

a) Otpornost  $R_s$  ćemo dobiti iz srednje vrednosti struje  $i_{dc}$  koju ćemo prikladno označiti sa  $I_{dc}$ .

$$I_{dc} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\beta} \frac{U_m \cdot \sin(\omega t) - U_{dc}}{R_s} d(\omega t) \quad (187)$$

Odakle je:

$$\begin{aligned} R_s &= \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\beta} \frac{U_m \cdot \sin(\omega t) - U_{dc}}{I_{dc}} d(\omega t) = \frac{1}{\pi} \int_{0,514}^{2,627} \frac{230 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t) - 160}{20} d(\omega t) = \\ &= \frac{1}{20\pi} [325(\cos(0,514) - \cos(2,627)) + 160(0,514 - 2,627)] \\ &= 3,633 \, \Omega \end{aligned}$$

b) Efektivnu vrednost struje mreže računamo na osnovu (58) kao:

$$I_{seff}^2 = 2 \cdot \frac{1}{2\pi} \int_{0,514}^{2,627} \left( \frac{230 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t) - 160}{3,633} \right)^2 d(\omega t), \text{ t.j: } I_s = 26,871 \text{ A.}$$

c) Aktivna snaga koju sklop filter - teret uzima iz mreže je:  $P_s = R_s \cdot I_s^2 + U_{dc} \cdot I_{dc} = 3,633 \cdot 26,871^2 + 160 \cdot 20 = 5823,2 \text{ W}$ . Odatle je osnovni harmonik struje mreže:

$$I_{s1} = \frac{P_s}{U_s} = \frac{5823,2}{230} = 25,318 \text{ A}$$

Dalje, struja koja ide u filter je:  $I_f = \sqrt{I_{seff}^2 - I_{s1}^2} = 9,0021 \text{ A}$

Dakle, naponski nivo filtra je 230 V, strujni 9 A, a prividna snaga:  $S_f = 230 \cdot 9 = 2070 \text{ VAR}$

d) Ako usvojimo da je PWM modulacija sinusna i sačinilac (indeks) modulacije  $m_a = 0,8$ , napon jednosmernog kola je:  $U_{Cd} = \frac{230\sqrt{2}}{0,8} = 406,586 \text{ V}$ . Usvojicemo  $U_{Cd} = 410 \text{ V}$ .

e) Vrednost filtarske induktivnosti  $L_f$  dobijemo na osnovu izraza za valovitost (ripple) struje iz gradiva Energetske elektronike:

$$\Delta I_f = \frac{U_{Cd}}{4 \cdot f_{PWM} \cdot L_f} \Rightarrow L_f = \frac{U_{Cd}}{4 \cdot f_{PWM} \cdot \Delta I_f} = \frac{410}{4 \cdot 20000 \cdot 0,03 \cdot 9} \quad (188)$$

$$= 19 \text{ mH}.$$

Vrednost kapacitivnosti  $C_{dc}$  dobijemo iz valovitosti napona jednosmernog kola (slika 16). Ako primenimo zakon održanja energije u jednoj poluperiodi, onda je energija jednog "trougha" ravna:

$$\frac{1}{2} C_{dc} \cdot (U_{cdmax}^2 - U_{cdmin}^2) = U_f \cdot I_f \cdot \Delta t \quad (189)$$

tj. ta promena energetske sadržaja kondenzatora se uravnotežava dotokom struje pri datom naponu u toku 10 ms. Iz gornje jednačine je  $C_{dc} = \frac{2 \cdot 230\sqrt{2} \cdot 9 \cdot 0,01}{410^2 - (0,95 \cdot 410)^2} = 1,78 \text{ mF}$

**2. Strujni tiristorski ispravljač treba kompenzovati aktivnim filtrom koji mu je očno vezan kao na slici 54. Ugao paljenja tiristora je  $30^\circ$ . Teret povlači stalnu struju od 20 A pri efektivnoj vrednosti napona mreže od 230 V i 50 Hz. Izračunajte prividnu snagu za sledeće slučajeve kompenzacije:**

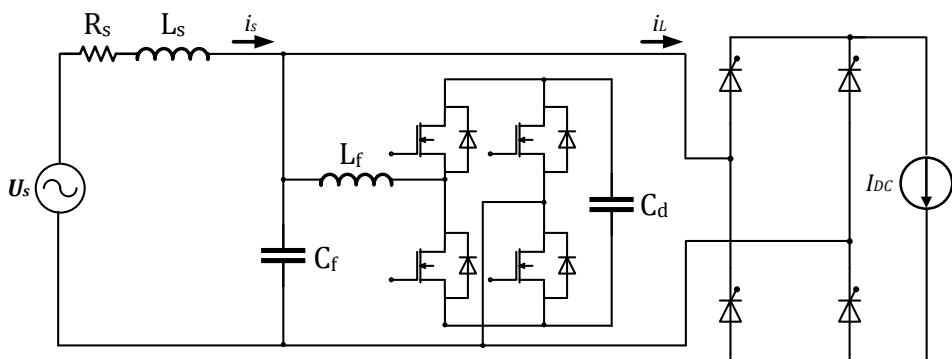
**a) Kompenzaciju samo viših harmonika**

**b) Kompenzaciju samo jalove snage tako da se postigne jedinični sačinilac snage**

**c) Kompenzaciju i harmonika i jalove snage na jedinični sačinilac snage.**

**Pretpostaviti da je mreža kruta, tj. teret ne može uticati na izobličenje napona u sabirnici priključenja.**

U izradi zadatka ćemo se oslanjati na sliku 10 i zaključke do kojih smo tamo došli. Struja na ulazu u ispravljača  $i_L$  ima oblik pravilnih četvrtki koje su smaknute u odnosu na koordinatni početak za ugao paljenja tiristora  $\alpha=30^\circ$ . Efektivna vrednost te struje je:  $I_L = I_{DC} = 20 \text{ A}$ .



Slika 54: Kompenzacija strujnog tiristorskog ispravljača

a) Ako aktivni filter kompenzuje samo harmonike, onda efektivna vrednost struje filtra treba biti ravna efektivnoj vrednosti struje svih viših harmonika, tj:

$$I_F = I_{\Sigma h} = \sqrt{(I_L)^2 - (I_{L1})^2} \quad (190)$$

gde je  $I_{L1}$  osnovni harmonik struje ispravljača. Tu smo vrednost već proračunali sa (32) i ona iznosi, odnosno njena efektivna vrednost:  $I_{L1} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_L = 18 \text{ A}$

Sada je  $I_F = \sqrt{(20)^2 - (18)^2} = 8,718 \text{ A}$

Prividna snaga je onda:

$$S_F = U_F \cdot I_F = 230 \cdot 8,718 = 2005,1 \text{ VA} \quad (191)$$

b) U ovom slučaju aktivni filter treba kompenzovati reaktivnu snagu osnovnog harmonika, pa je prividna snaga aktivnog filtra:

$$S_F = U_{F1} \cdot I_{F1} \cdot \sin(\varphi_1) \quad (192)$$

Efektivna vrednost osnovnog harmoni napona je ravan efektivnoj vrednosti napona ( $U_{F1} = U_F = 230 \text{ V}$ ) pošto je pretpostavljeno da je mreža kruta. Fazni stav osnovnog harmonika  $\varphi_1$  jednak je uglu paljenja tiristora, tj:  $\varphi_1 = \alpha = 30^\circ$ . Sada je:  $S_F = U_F \cdot I_{L1} \cdot \sin(\alpha) = 230 \cdot 18 \cdot \sin(30^\circ) = 2070 \text{ VAR}$

c) Nakon ove kompenzacije, mrežna struja  $I_s$  treba sadržavati samo osnovni harmonik u fazi s mrežnim naponom. To znači ostatak struje tereta  $I_L$  treba kompenzovati filter, odnosno:

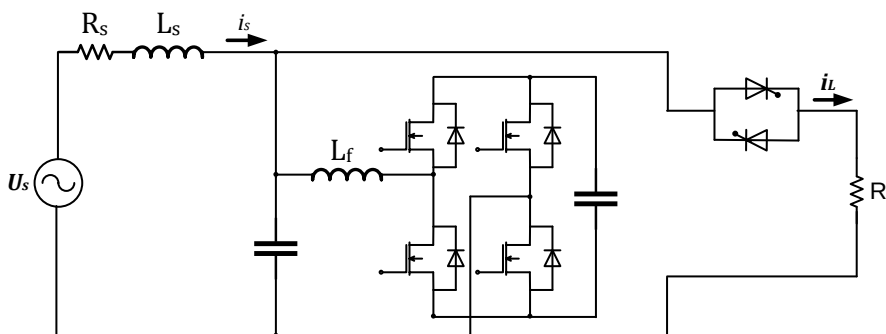
$$I_F = \sqrt{(I_L)^2 - (I_{L1} \cdot \cos(\varphi_1))^2} = \sqrt{20^2 - (18 \cdot \cos(30^\circ))^2} = 12,53 \text{ A} \quad (193)$$

Dalje je:  $S_F = 230 \cdot 12,53 = 2889,2 \text{ VA}$

3. Tiristorski regulator napona (slika 55) napaja grejač otpornosti  $20 \Omega$  pri uglu paljenja tiristora od  $90^\circ$ . Odredite:

- a) Radnu i jalovu snagu osnovnog harmonika koja se uzima iz mreže.
- b) Prividnu snagu aktivnog filtra u tri slučaja. Slučaj 1: Kompenzacija viših harmonika. Slučaj 2: kompenzacija reaktivne snage osnovnog harmonika na jedinični sačinilac snage. Slučaj 3: Istovremenu kompenzaciju jalove snage osnovnog harmonika na jedinični sačinilac snage i kompenzaciju viših harmonika.

Efektivna vrednost napona mreže je  $230 \text{ V}$ , učestanost  $50 \text{ Hz}$ .



Slika 55: Kompenzacija naponskog tiristorskog regulatora

a) Radnu snagu dobijemo iz:

$$P = U_{s1} \cdot I_{s1} \cdot \cos(\varphi_1) \quad (194)$$

Efektivna vrednost osnovnog harmonika je jednaka efektivnoj vrednosti napona pošto pretpostavljamo da je mreža kruta, tj:  $U_{s1} = U_s = 230 \text{ V}$

Efektivnu vrednost osnovnog harmonika struje mreže  $I_{s1}$  dobijemo na osnovu slike 12 i jednačine (86):

$$I_{s1} = \frac{230\sqrt{2}}{20} \sqrt{(\cos(2 \cdot 90^\circ) - 1)^2 + (2\pi - 2 \cdot 90^\circ + \sin(2 \cdot 90^\circ))^2} = 6,816 \text{ A}$$

Fazni stav  $\varphi_1$  dobijemo iz (89):

$$\varphi_1 = \arctg \frac{\cos(2 \cdot 90^\circ) - 1}{2\pi - 2 \cdot 90^\circ + \sin(2 \cdot 90^\circ)} = -32,48^\circ$$

Radna snaga je onda:  $P = 230 \cdot 6,816 \cdot \cos(0 - (-32,48^\circ)) = 1322,5 \text{ W}$ , dok je jalova snaga:  $Q = 230 \cdot 6,816 \cdot \sin(0 - (-32,48^\circ)) = 841,8 \text{ VAR}$

b) *Slučaj 1:* Kao i u prošlom zadatku, ovde računamo harmonijsku komponentu struje tereta na osnovu (190), gde ukupnu efektivnu vrednost struje dobijemo iz (80):

$$I_s = \frac{\sqrt{2}U_{seff}}{R} \sqrt{\frac{\pi - \alpha + \frac{1}{2}\sin(2\alpha)}{2\pi}} = \sqrt{2} \cdot \frac{230}{20} \cdot \sqrt{\frac{\pi - 90^\circ + \frac{1}{2}\sin(2 \cdot 90^\circ)}{2\pi}} \quad (195)$$

$$= 8,132 \text{ A}$$

Struja harmonika odnosno struja filtra je dalje:  $I_F = I_{\Sigma h} = \sqrt{8,132^2 - 6,816^2} = 4,435 \text{ A}$

Prividna snaga filtra je:  $S_F = 230 \cdot 4,435 = 1020,1 \text{ VA}$

*Slučaj 2:* Prividna snaga filtra je jednaka reaktivnoj snazi osnovnog harmonika, odnosno 841,8 VAR

*Slučaj 3:* Iz (193) imamo:  $I_F = \sqrt{8,132^2 - (6,816 \cdot \cos(32,48^\circ))^2} = 5,751 \text{ A}$

Prividna snaga je:  $S_F = 230 \cdot 5,751 = 1322,6 \text{ VA}$

**4. Trofazni diodni ispravljač (slika 56) uzima iz mreže struju pri sačinioću snage pomeraja od 0.95 i THD od 45%. Snaga koju povlači je 50 kW, a vršni sačinilac struje je 2. Proračunajte prividnu snagu filtra u tri slučaja:**

**a) kompenzacije viših harmonika mreže**

**b) kompenzacije samo jalove snage (osnovnog harmonika)**

**c) kompenzacije harmonika i dovođenja sačinioća snage na jediničnu vrednost**

**Pretpostaviti da je mreža kruta.**

a) Prividnu snagu, odnosno struju filtra dobijemo iz (200):  $I_F = I_{\Sigma h} = \sqrt{(I_L)^2 - (I_{L1})^2}$

Osnovni harmonik struje,  $I_{L1}$  dobijemo kao:  $I_{L1} = \frac{P}{3 \cdot U_s \cdot \text{DPF}}$  gde je DPF sačinilac pomeraja (*Displacement factor*). Dakle,  $I_{L1} = \frac{50000}{3 \cdot \frac{400}{\sqrt{3}} \cdot 0,95} = 75,97 \text{ A}$

Iz podatka za THD dobijamo sačinilac izobličenja DF na osnovu (72):  $DF = \frac{1}{\sqrt{1+0,45^2}} = 0,912$

Sada je sačinilac snage:  $PF = 0,95 \cdot 0,912 = 0,866$

Struju  $I_L$  sada možemo dobiti kao:  $I_L = \frac{P}{3 \cdot U_s \cdot PF} = \frac{50000}{3 \cdot \frac{400}{\sqrt{3}} \cdot 0,866} = 83,297 \text{ A}$

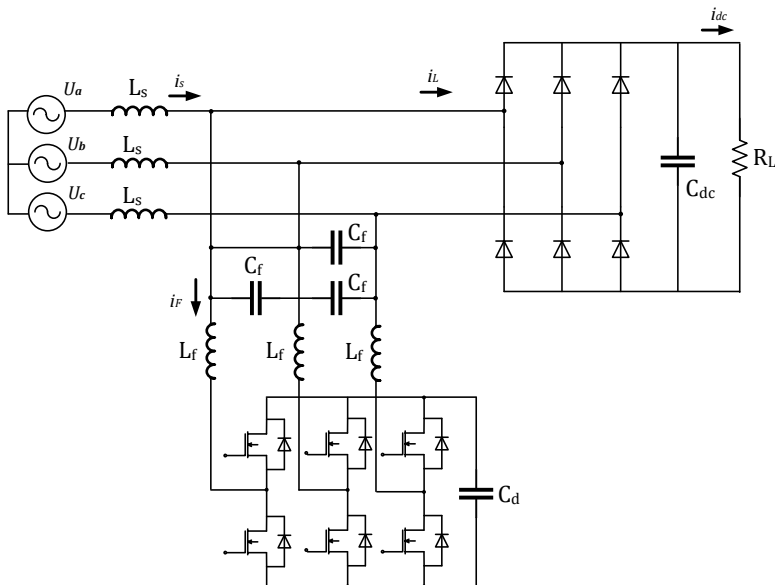
Dalje je  $I_F = \sqrt{83,297^2 - 75,97^2} = 34,16 \text{ A}$

Neophodna prividna snaga filtra je:  $S_F = 3 \cdot 230 \cdot 34,16 = 23571,4 \text{ VA}$

b) U ovom slučaju prividna snaga filtra je ravna jalovoj snazi koja se povlači iz mreže.

Dakle,  $S_F = 3 \cdot 230 \cdot 75,97 \cdot \sqrt{1 - 0,95^2} = 16367,92 \text{ VA}$

c)  $I_F = \sqrt{83,297^2 - (75,97 \cdot 0,95)^2} = 41,59 \text{ A}$   $S_F = 3 \cdot 230 \cdot 41,59 = 28696,57 \text{ VA}$



Slika 56: Trofazni otočni aktivni filter

**5. Jednofazni diodni ispravljač puni bateriju stalnim naponom od 200 V pri srednjoj vrednosti struje od 25 A. Aktivni filter je redno povezan tom ispravljaču s namerom da umanja prisustvo viših harmonika prema mreži, kao i da postigne jedinični sačinilac snage. Izračunajte:**

**a) Efektivnu vrednost napona na ulazu u ispravljač**

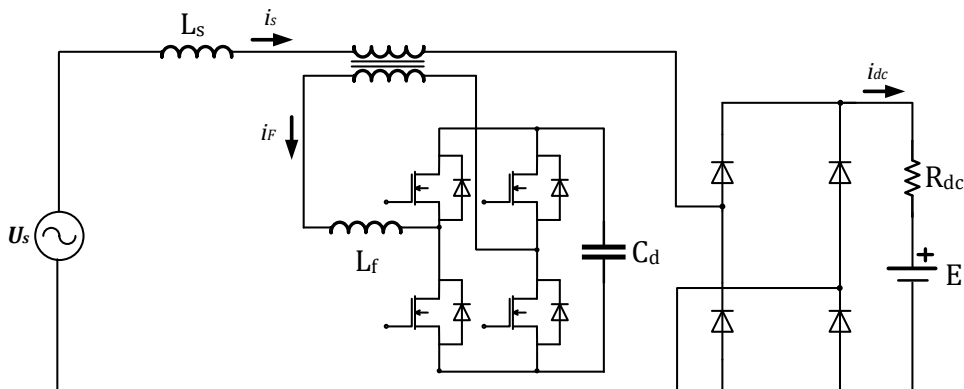
**b) Struju mreže nakon kompenzacije na jedinični sačinilac snage**

**c) Prividnu snagu filtra i napon njegovog jednosmernog kola**

Napon mreže je 230 V, učestanost 50 Hz, prekidačka učestanost filtra 4 kHz, valovitost napona jednosmernog kola nije veća od 5%, dok je valovitost struje filtra ograničena na 10%

a) Pošto se zahteva da filter izvrši kompenzaciju, to znači da struja na ulazu u ispravljač, odnosno struja mreže neće biti "iscepkana" kao na slici 6 (desni deo,

sredina), već će biti sinusna i u fazi s naponom. To dalje znači da dijagonale dioda moraju provoditi po pola periode (pozitivna - negativna). Pošto je napon baterije stalan od 225 V, to znači da će napon na ulazu u ispravljač biti povorka naizmeničnih "četvrtki" jer diodne dijagonale vode po pola periode. Efektivnu vrednost ovakvog napona možemo utvrditi koristeći (36) i ona u ovom slučaju iznosi 225 V.



Slika 57: Jednofazni redni aktivni filter

b) Aktivna snaga koju teret dobija je:  $P_L = E \cdot I_{dc} = 225 \cdot 25 = 5625 \text{ W}$

Nakon što aktivni redni ispravljač izvrši kompenzaciju, iz mreže će se uzimati samo aktivna snaga, koja je uz zanemarenje gubitaka jednaka snazi tereta. Odatle je:  $I_s = \frac{P}{U_s} = \frac{5625}{230} = 24,46 \text{ A}$

c) Za proračun prividne snage filtra nam trebaju struja i napon koji on utiskuje. Što se tiče struje, nju smo proračunali pod b) jer se radi o rednoj vezi i ona dakle iznosi 24,46 A. Napon koji filter utiskuje ćemo dobiti iz činjenice da je napon mreže (ispred trafo-a) sinusni, efektivne vrednosti 230 V, dok je napon iza trafoa pravougaoni što smo objasnili u delu pod a). Filter nadopunjuje te četvrtke do sinusa, pa je napon na sekundaru trafo-a filtra:

$$\begin{aligned} U_{F2}^2 &= 2 \cdot \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi (U_m \sin(\omega t) - E)^2 d(\omega t) \\ &= \frac{1}{\pi} \int_0^\pi (230 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t) - 225)^2 d(\omega t) \\ &= 105,76 \text{ V} \end{aligned} \quad (196)$$

Prividna snaga filtra je dakle:  $S_F = 105,75 \cdot 24,46 = 2538,2 \text{ VA}$

Više pojedinosti o aktivnim filterima i kompenzaciji čitalac može naći u [26].

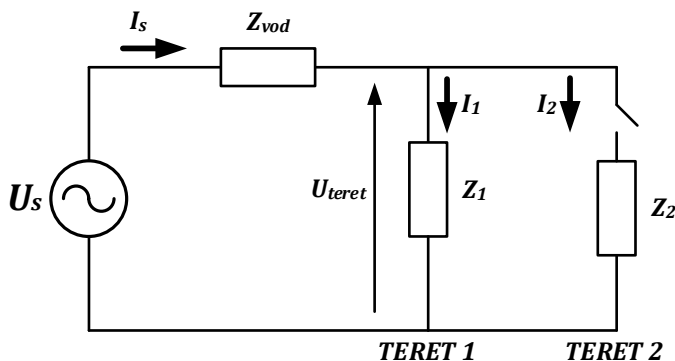
## 1.9. Nesimetrija i propadi napona

1. Za jednostavan sistem sa slike proračunajte:

a) Napon  $U_{teret}$  kada je Teret 2 isključen

b) Napon  $U_{teret}$  kada je Teret 2 uključen

c) Pad napona na Teretu 1 usled prisustva Tereta 2



Slika 58: Uticaj uključivanja/isključivanja tereta na pad napona

Podaci:  $U_s = 230 \text{ V}$ ,  $\hat{Z}_{vod} = 2 \angle 90^\circ \Omega$ ,  $Z_1 = 10 \Omega$ ,  $Z_2 = 5 \Omega$

Ovaj jednostavan primer ima zadatak da pokaže uticaj priključenja tereta na pad napona na vodu, odnosno kako odnos datih impedansi utiče na pad napona.

a) Kada je Teret 2 isključen, pad napona na vodu je:

$$\Delta \hat{U}_1 = \frac{\hat{Z}_{vod}}{\hat{Z}_{vod} + \hat{Z}_1} \hat{U}_s = \frac{2 \cdot e^{j\frac{\pi}{2}}}{2 \cdot e^{j\frac{\pi}{2}} + 10} \cdot 230 = (8,846 + j44,231)V, \text{ tj: } \Delta U_1 = 45,11 \text{ V}$$

b) Kada se uključi Teret 2, pad napona je:

$$\Delta \hat{U}_{12} = \frac{\hat{Z}_{vod}}{\hat{Z}_{vod} + \frac{\hat{Z}_1 \hat{Z}_2}{\hat{Z}_1 + \hat{Z}_2}} \hat{U}_s = (6,088 + j101,47), \text{ odnosno } \Delta U_{12} = 118,33 \text{ V}$$

c) Pad napona na Teretu 1 se povećao za  $118,33 - 45,11 = 73,22 \text{ V}$  kada je priključen Teret 2.

Dakle, priključenjem drugog tereta se smanjuje ukupna impedansa tereta, pa raste vrednost struje kroz vod, odnosno pad napona na tom vodu. Impedansa voda je obično mala, pa je pad napona mnogo manji nego u našem primeru. Pad napona dolazi ipak do izražaja kod slabijih ruralnih mreža što se obično ispoljava padom napona u jednom domaćinstvu kada se u susednom domaćinstvu uključi jači potrošač, npr. elektromotor.

2. Trofazni četveropolni kavezni asinhroni motor čiji su podaci 20 kW, 400 V, 50 Hz je spregnut u trougao i koristi se za pokretanje tereta stalnog mehaničkog momenta nazivne vrednosti. Klizanje mu je pri tom 3,5 % pri nazivnom naponu i učestanosti. Ako napon napajanja padne na 360 V (sve tri faze istovremeno), pri istom teretu, procenite kako će se promeniti gubici u bakru rotora, a kako gubici u gvožđu. Pri izradi zadatka koristite približenje da je klizanje obrnuto srazmerno kvadratu napona.

Na osnovu predloženog približnog izraza za klizanje, imamo:

$$\frac{s}{s_n} \approx \left(\frac{U}{U_n}\right)^2 \Rightarrow s \approx \left(\frac{U}{U_n}\right)^2 \cdot s_n = \left(\frac{400}{360}\right)^2 \cdot 0,035 = 4,57\% \quad (197)$$

Za to klizanje, brzina obrtanja rotora (meh. brzina) je:

$$n_r = (1 - s) \cdot \frac{60 \cdot f}{p} = (1 - 0,0457) \cdot \frac{60 \cdot 50}{2} = 1431 \text{ min}^{-1} \quad (198)$$

Pri nazivnom naponu i nazivnom teretu  $M_m$ , izlazna snaga je:

$$P_{izn} = M_m \cdot \omega_{mn} \quad (199)$$

dok je pri sniženom naponu, (povećanom klizanju), a nepromenjenom teretu  $M_m$ , izlazna snaga:

$$P_{iz} = M_m \cdot \omega_m \quad (200)$$

Iz poslednja dva izraza sledi:  $\frac{P_{iz}}{P_{izn}} = \frac{\omega_m}{\omega_{mn}} = \frac{1-s}{1-s_n} \Rightarrow P_{iz} = \frac{1-s}{1-s_n} \cdot P_{izn} = \frac{1-0,0457}{1-0,03} \cdot 20000 = 19778 \text{ W}$

Gubitke u bakru rotora možemo izračunati na osnovu snage obrtnog polja i klizanja (dobro poznat izraz iz gradiva električnih mašina):

$$P_{Curn} = P_{obn} \cdot s_n \quad (201)$$

Snagu obrtnog polja računamo kao proizvod izlaznog momenta i sinhrone brzine,  $P_{obn} = M_m \cdot \omega_s$ . Pošto se teret nije promenio pre i posle propada napona, to će i izlazni moment ostati isti, a samim tim i snaga obrtnog polja  $P_{ob} = P_{obn}$ . Ono što se menja su očigledno gubici, pošto se klizanje promenilo. Dakle:

$$P_{Cur} = P_{obn} \cdot s \quad (202)$$

Sad, iz poslednje dve jednačine je jasno da se gubici u bakru rotora povećaju srazmerno klizanju, tj:

$$P_{Cur} = P_{Curn} \cdot \frac{s}{s_n} = 1,306 \quad (203)$$

Dakle, gubici u bakru rotora su uvećani za oko 30%.

Što se tiče gubitaka u gvožđu, oni su srazmerni kvadratu elektromotorne sile. Zanimajući pad napona na impedansi statora (na otporu namotaja i rasipnoj induktivnosti), možemo reći da su približno srazmerni kvadratu napona napajanja.

To bi značilo da se gubici u gvožđu u našem slučaju smanje na  $\left(\frac{350}{440}\right)^2 = 76\%$  nazivne vrednosti. Ovi su gubici u načelu manji od gubitaka u bakru, pa zaključujemo da se pri propadu napona gubici uvećavaju.

**3. Motor iz prošlog zadatka je izložen prenaponu od 440V. Šta se dešava s njegovim gubicima u bakru rotora i u gvožđu pri nepromenjenom nazivnom teretu?**

Na osnovu (197) sledi da je klizanje sa nazivnih 3,5% palo na:  $\left(\frac{400}{440}\right)^2 \cdot 3,5\% = 2,9\%$

Gubici u bakru će se smanjiti na osnovu (203) na:  $P_{Cur} = P_{Curn} \cdot \frac{2,9}{3,5} = 83\%$  nazivnih gubitaka. Gubici u gvožđu će porasti  $\left(\frac{440}{400}\right)^2 = 121\%$  nazivne vrednosti. Možemo proceniti da će ukupni gubici nešto pasti ceneći odnos gubitaka u gvožđu i bakru. Odavde ne treba naravno nikako zaključiti da motor treba snabdeti višim naponom od nazivnog jer bi to pre svega dovelo do prenaprezanja i ubrzanog starenja izolacije.

**4. Trofazni asinhroni motor 3,7 kW, 1420 min<sup>-1</sup>, je spregnut u zvezdu i pogoni teret. Pofazni parametri svedeni na stator tog motora su: R<sub>s</sub>=1,405 Ω, R<sub>r</sub>=1,395 Ω, L<sub>ys</sub>= L<sub>yr</sub>=5,839 mH, R<sub>m</sub>=2000 Ω i L<sub>m</sub>=172,2 mH pri nazivnom naponu i učestanosti od 400 V i 50 Hz. Izračunajte:**

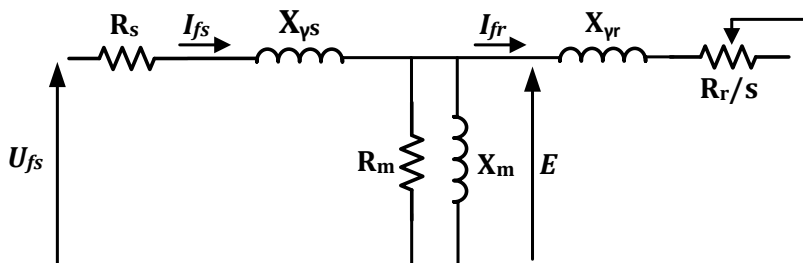
- a) Struju koju motor uzima iz mreže
- b) Gubitke
- c) Ulaznu snagu pri nazivnoj brzini i simetričnim naponima

Ako u jednom trenutku linijski naponi motora postanu nesimetrični: 330 V  $\angle 0^\circ$ , 350 V  $\angle -120^\circ$  i 420 V  $\angle 120^\circ$  Izračunajte:

- d) Simetričnu komponentu napona direktnog redosleda
- e) Simetričnu komponentu napona inverznog redosleda
- f) Direktnu komponentu struje koju motor uzima iz mreže
- g) Inverznu komponentu struje koju motor uzima iz mreže
- h) Gubitke
- i) Ulaznu snagu pri nazivnoj brzini
- j) Izlaznu snagu
- k) Sačinilac nesimetrije napona

## 1) Sačinilac nesimetrije struje

Da bismo rešili ovaj zadatak polazimo od poznate pofazne zamenske šeme asinhronog motora.



Slika 59: Zamenska šema asinhronog motora

**Napomena:** Veličine rotora su svedene na stator, ali zbog jednostavnijeg pisanja nismo ih označavali sa oznakom ' (kao npr.  $R_r'$ ). Do zabune ne može doći pošto ćemo u ovom i svim ostalim zadacima koristiti isključivo svedene veličine.

a) Da bismo proračunali struju mreže, polazimo od fazne struje statora  $I_{fs}$ . Pošto je sprega Y, ove struje su iste. Struju statora  $I_{fs}$  dobijemo kao:

$$\hat{I}_{fsn} = \frac{\hat{U}_{fsn}}{\hat{Z}_e} \quad (204)$$

oznaci struje i napona smo dodali jedno malo  $n$  u upisnik da bismo naglasili da je u pitanju nazivni rad motora (nazivni napon i klizanje). Osim toga možemo uočiti "kape" iznad oznaka veličina što naravno upućuje da je reč o kompleksnim brojevima. Pošto je motor spregnut u zvezdu, efektivna vrednost napona je:  $U_{fsn} = \frac{U_{ln}}{\sqrt{3}}$ , gde je  $U_{ln}$  linijski napon dat u zadatku,  $U_{ln}=400$  V. Imamo slobodu da usvojimo referentni fazni stav jedne veličine, pa ćemo usvojiti da je fazni stav faze  $a$   $0^\circ$ , odnosno:

$$\hat{U}_{fsn} = U_{fsn} \angle 0^\circ = U_{fsn} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 230 \text{ V}$$

U izrazu (204)  $Z_e$  označava ukupnu impedansu motora koja "se vidi" sa strane statora. Nju računamo:

$$\hat{Z}_e = \hat{Z}_s + \frac{\hat{Z}_r \cdot \hat{Z}_m}{\hat{Z}_r + \hat{Z}_m}, \text{ gde je:}$$

$$\hat{Z}_s = R_s + jX_{ys}, \quad \hat{Z}_r = \frac{R_r}{s_n} + jX_{yr}, \quad s_n = \frac{n_s - n_n}{n_s}, \quad n_s = \frac{60f}{p}, \quad \hat{Z}_m = \frac{R_m + jX_m}{R_m + jX_m} \quad (205)$$

Uvrštavajući brojne vrednosti:  $n_s = 1500 \text{ min}^{-1}$ ;  $s_n = 0,047$ ;  $\hat{Z}_s = (1,405 + j1,834)\Omega$ ;  $\hat{Z}_r = (29,893 + j1,834)\Omega$ ;  $\hat{Z}_m = (1,462 + j54,059)\Omega$  i konačno  $\hat{Z}_e = (23,009 + j14,946)\Omega$

Sada je struja statora na osnovu (204):  $\hat{I}_{fsn} = (7,058 - j4,585)A$ , tj. njen moduo:  $I_{fsn} = 8,417 A$ . Pošto je sprega Y, struja koju motor povlači iz mreže je:  $I_{ln} = 8,417 A$

b) Pošto nemamo nikakvu naznaku o mehaničkim gubicima, zanemarimo ih i računati gubitke u bakru (Joule-ove), kao i gubitke u gvožđu.

$$P_g = P_{gsJ} + P_{grJ} + P_{gFe} = 3 \left( R_s \cdot I_{fsn}^2 + R_r \cdot I_{frn}^2 + \frac{E^2}{R_m} \right) \quad (206)$$

U gornjem izrazu  $P_{gsJ}$  su Joule-ovi gubici u statorskim namotajima, dok su  $P_{grJ}$  u rotorskim namotajima, a  $P_{gFe}$  gubici u gvožđu. Gubitke u bakru statora možemo odmah izračunati pošto smo faznu statorsku struju izračunali pod a). Da bismo izračunali rotorske gubitke u bakru, moramo odrediti faznu struju rotora  $I_{frn}$ , dok je za proračun gubitaka u gvožđu potrebna indukovana elektromotorna sila  $E$ . Rotorsku struju računamo koristeći strujni razdelnik na osnovu slike 59:

$$\hat{I}_{frn} = \frac{\hat{Z}_m}{\hat{Z}_m + \hat{Z}_r} \hat{I}_{fsn} = (7,072 - j0,652)A, \text{ tj. } I_{frn} = 7,102 A \quad (207)$$

Elektromotorna sila  $E$  je:

$$\hat{E} = \hat{U}_{fsn} - \hat{Z}_s \cdot \hat{I}_{fsn} = (212,61 - j6,51)V, \text{ odnosno: } E=212,712 V \quad (208)$$

Sada iz (206) dobijamo:  $P_g = 577,593 W$ .

c) Ulaznu snagu dobijemo kao:

$$\hat{S}_{ul} = 3 \cdot \hat{U}_{fsn} \cdot \hat{I}_{fsn}^* = (4890,3 - j3176,6)VA \quad (209)$$

Odakle je ulazna aktivna snaga 4890,3 W.

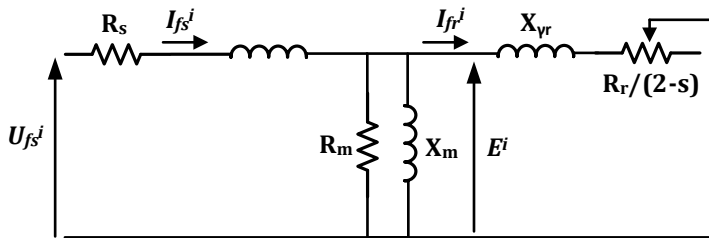
d) Nakon nametanja nesimetričnih napona, pojave u motoru postaju znatno drugačije i to pre svega zato što sada nesimetrični naponi pored direktne komponente imaju i inverznu komponentu koja stvara inverznu komponentu Teslinog obrtnog polja - komponentu koja se obrće suprotno od smera rotora. Klizanje rotora u odnosu na inverznu komponentu polja je onda:

$$s^i = \frac{n_s - (-n_n)}{n_s} = \frac{n_s + n_n}{n_s} \quad (210)$$

Ako uporedimo posljednju izraz za inverzno klizanje sa direktnim klizanjem  $s$  iz (205), dobijemo jednostavnu vezu između njih:

$$s^i = 2 - s \quad (211)$$

Sada šemu sa slike 59 prepravljamo tako da predstavlja motor pogodan za rad u prisustvu inverzne komponente (slika 60)



Slika 60: Pofazna šema za rad sa inverznom komponentom

Naravno, šema za analizu direktne komponente je istovetna sa šemom sa slike 59, osim što ćemo statordi napon, statordku i rotordku struju kao i indukovanu ems obogatiti natpisnikom  $d$ , kao što smo to učinili sa natpisnikom  $i$  u slučaju inverzne komponente.

Direktnu i inverznu komponentu napona dobijemo iz (2):  $\hat{U}^d = \frac{1}{3}(\hat{U}_{fa} + \hat{a}\hat{U}_{fb} + \hat{a}^2\hat{U}_{fc})$ ,  $\hat{U}^i = \frac{1}{3}(\hat{U}_{fa} + \hat{a}^2\hat{U}_{fb} + \hat{a}\hat{U}_{fc})$ . Fazne napone dobijemo iz međufaznih kao:

$$\hat{U}_{fa} = \frac{1}{3}(\hat{U}_{ab} - \hat{U}_{ca}), \quad \hat{U}_{fb} = -\frac{1}{3}(\hat{U}_{ab} - \hat{U}_{bc}), \quad \hat{U}_{fc} = -\frac{1}{3}(\hat{U}_{bc} - \hat{U}_{ca}) \quad (212)$$

odakle je:  $\hat{U}_{fa} = 217,025 \angle -33,96^\circ \text{ V}$ ,  $\hat{U}_{fb} = 196,33 \angle -149,03^\circ \text{ V}$ ,  $\hat{U}_{fc} = 222,58 \angle 93^\circ \text{ V}$

Pošto smo za referentni napon (sa faznim stavom  $0^\circ$ ) usvojili napon faze  $a$  to ćemo i ovde ispoštovati taj izbor, a to znači da napon faze  $b$  i  $c$  moramo pomeriti (povećati) za  $33,96^\circ$ . Tako su fazni naponi nakon ove male popravke:  $\hat{U}_{fa} = 217,025 \angle 0^\circ \text{ V}$ ,  $\hat{U}_{fb} = 196,33 \angle -115,06^\circ \text{ V}$ ,  $\hat{U}_{fc} = 222,58 \angle 126,97^\circ \text{ V}$

Direktna i inverzna komponenta napona su:  $\hat{U}^d = 211,695 \angle 3,96^\circ \text{ V}$  i

e)  $\hat{U}^i = 15,753 \angle -68,25^\circ \text{ V}$

f) Pošto je efektivna vrednost direktne komponente napona različita u odnosu na nazivnu (230 V), to se i klizanje promenilo. Ako primenimo približenje iz prošla dva zadatka (197), imamo:  $s^d = \left(\frac{230}{211,695}\right)^2 \cdot 0,047 = 0,055$

Ekvivalentna impedansa direktnog redosleda je sada na osnovu (205):  $\hat{Z}_e^d = (20,824 + j12,1863)\Omega$ . Dalje je direktna komponenta struje statora:

$$\hat{I}_s^d = \frac{\hat{U}^d}{\hat{Z}_e^d} \quad (213)$$

odnosno:  $\hat{I}_s^d = 8,774 \angle -26,37^\circ \text{ A}$

g) Inverzna komponenta struje statora je:

$$\hat{I}_s^i = \frac{\hat{U}^i}{\hat{Z}_e^i} \quad (214)$$

Ekvivalentna impedansa inverznog redosleda  $\hat{Z}_e^i$  nije ista kao ona direktnog redosleda, pre svega zbog impedanse rotora koja zavisi od klizanja. S druge strane impedanse statora i magnetnog kola inverznog redosleda su iste kao one direktnog redosleda. Dakle:

$$\begin{aligned} &= \hat{Z}_s = (1,405 + j1,834)\Omega_s, \quad \hat{Z}_m^i = \hat{Z}_m = (1,462 + j54,059)\Omega, \quad \hat{Z}_r^i = \\ &+ jX_{\gamma s} = (0,715 + j1,834)\Omega, \text{ i konačno } \hat{Z}_e^i = \hat{Z}_s^i + \frac{\hat{Z}_r^i \cdot \hat{Z}_m^i}{\hat{Z}_r^i + \hat{Z}_m^i} = (2,074 + \\ &j3,616)\Omega \end{aligned} \quad (215)$$

Sada je  $\hat{I}_s^i = 3,774 \angle -128,38^\circ \text{ A}$

Direktna i inverzna komponenta struje rotora se dobijaju na osnovu (207), uvažavajući odgovarajuće komponente struje statora:

$$\hat{I}_r^d = \frac{\hat{Z}_m}{\hat{Z}_m + \hat{Z}_r^d} \hat{I}_s^d = 7,667 \angle -2,49^\circ \text{ A}, \quad \hat{I}_r^i = \frac{\hat{Z}_m}{\hat{Z}_m + \hat{Z}_r^i} \hat{I}_s^i = 3,652 \angle -127,69^\circ \text{ A} \quad (216)$$

Dalje, direktna i inverzna komponenta elektromotorne sile se dobijaju slično kao u (208):

$$\begin{aligned} \hat{E}^d &= \hat{U}^d - \hat{Z}_s \cdot \hat{I}_s^d = 193,079 \angle 1,69^\circ \text{ V}, \quad \hat{E}^i = \hat{U}^i - \hat{Z}_s \cdot \hat{I}_s^i = 7,193 \\ &\angle -59,05^\circ \text{ V} \end{aligned} \quad (217)$$

h) Ukupni gubici su sada posledica i direktne i inverzne komponente, a to se odnosi kako na Joule-ove gubitke, tako i na gubitke u gvožđu. Polazeći od (206) imamo:

$$P_g = P_g^d + P_g^i = 3 \left( R_s \cdot ((I_s^d)^2 + (I_s^i)^2) + R_r \cdot ((I_r^d)^2 + (I_r^i)^2) + \frac{(E_r^d)^2 + (E_r^i)^2}{R_m} \right) = 754,3 \text{ W} \quad (218)$$

i) Ulaznu radnu snagu dobijemo iz:

$$\hat{S}_{ul} = 3 \cdot (\hat{U}^d \cdot \hat{I}_s^{d*} + \hat{U}^i \cdot \hat{I}_s^{i*}) = (4898,2 + j2969,2) \text{ VA} \quad (219)$$

Dakle,  $P_{ul} = 4898,2 \text{ W}$

j) Izlaznu snagu dobijemo kada ulaznu umanjimo za snagu gubitaka, pri čemu smo zanemarili mehaničke gubitke:  $P_{iz} = 4898,2 - 754,3 = 4143,9 \text{ W}$

k) Sačinilac nesimetrije napona računamo kao količnik inverzne i direktne komponente:

$$SN(U) = \frac{U^i}{U^d} = 7,44\% \quad (220)$$

l) Sačinilac nesimetrije struje je:

$$SN(I) = \frac{I^i}{I^d} = 43\% \quad (221)$$

Procenimo još učešće gubitaka u ulaznoj snazi u oba slučaja - simetričnih i nesimetričnih napona. U prvom slučaju na gubitke otpada:  $\frac{577,593}{4890,3} = 11,81\%$ , dok u drugom slučaju:  $\frac{754,3}{4898,2} = 15,4\%$ . Gubici su se dakle očekivano povećali zbog nesimetričnih napona.

Na kraju ovog zadatka ćemo još izvesti izraz zavisnosti momenta motora od klizanja u prisustvu nesimetričnih napona. Polazimo od snage koja se razvija na rotoru nakon što se odbiju rotorski gubici u bakru. Izraz je dat za direktnu komponentu i dobro nam je poznat iz gradiva el. mašina:

$$P^d = 3 \cdot \frac{R_r}{s} (I_r^d)^2 - 3 \cdot R_r (I_r^d)^2 = 3 \cdot \frac{1-s}{s} R_r (I_r^d)^2 \quad (222)$$

Negativnu komponentu dobijemo na osnovu gornjeg izraza kao:

$$P^i = 3 \cdot \frac{1-s^i}{s^i} R_r (I_r^i)^2 \quad (223)$$

Ako u (223) umesto  $s^i$  uvrstimo (211), imamo:

$$P^i = -3 \cdot \frac{1-s}{2-s} R_r (I_r^i)^2 \quad (224)$$

Dalje je ukupna snaga jednaka zbiru (222) i (224):

$$P = P^d + P^i = 3 \cdot R_r \cdot (1 - s) \left[ \frac{(I_r^d)^2}{s} - \frac{(I_r^i)^2}{2 - s} \right] \quad (225)$$

Mehanički moment motora dobijemo kada snagu iz gornjeg izraza podelimo sa mehaničkom brzinom  $\omega_m = (1 - s)\omega_s$ . Dakle:

$$M = \frac{3 \cdot R_r}{\omega_s} \cdot \left[ \frac{(I_r^d)^2}{s} - \frac{(I_r^i)^2}{2 - s} \right] \quad (226)$$

Drugi član u zagradi gornje jednačine kao posledica inverzne komponente napona je očigledno negativan i smanjuje ukupan razvijeni moment motora. Izrazićemo sad komponente struje rotora u službi napona statora kao upravljačke promenljive. Da bismo to učinili, zanemarimo struju magnećenja i gubitke u gvožđu. To ne moramo učiniti, no ako bismo uvažavali (204), (205) i (207) u proračunu direktne i indirektna struje rotora, dobili bismo složen izraz koji nam ne bi doneo ništa dodatno u opštoj slici rada motora. Zato zanemarujemo tu čitavu otočnu granu, pa na osnovu slike 59, odnosno slike 60 računamo komponente struje statora kao:

$$\hat{I}_s^d = \frac{\hat{U}_s^d}{R_s + \frac{R_r}{s} + j(X_{ys} + X_{yr})}, \quad \hat{I}_s^i = \frac{\hat{U}_s^i}{R_s + \frac{R_r}{2-s} + j(X_{ys} + X_{yr})} \quad (227)$$

Odatle su moduli odgovarajućih komponenti struje rotora:

$$I_r^d = \frac{U_s^d}{\sqrt{\left(R_s + \frac{R_r}{s}\right)^2 + (X_{ys} + X_{yr})^2}}, \quad I_r^i = \frac{U_s^i}{\sqrt{\left(R_s + \frac{R_r}{2-s}\right)^2 + (X_{ys} + X_{yr})^2}} \quad (228)$$

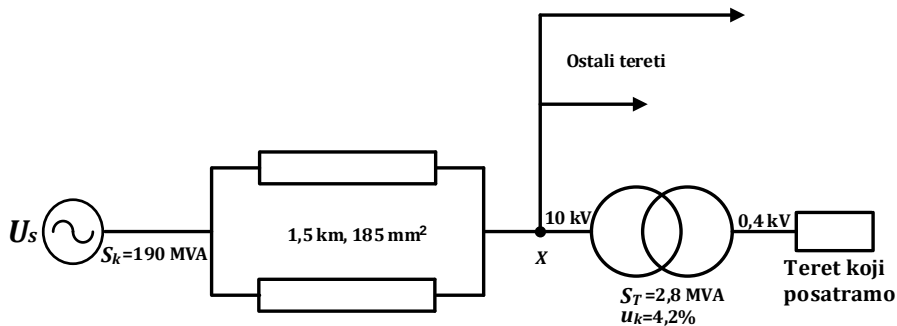
Ako sad uvrstimo (228) u (226), dobije se:

$$M = \frac{3 \cdot R_r}{\omega_s} \cdot \left[ \frac{1}{s} \cdot \frac{(U_s^d)^2}{\left(R_s + \frac{R_r}{s}\right)^2 + (X_{ys} + X_{yr})^2} - \frac{1}{2-s} \cdot \frac{(U_s^i)^2}{\left(R_s + \frac{R_r}{2-s}\right)^2 + (X_{ys} + X_{yr})^2} \right] \quad (229)$$

Konačno ako bismo hteli izraziti razvijeni momenat motora u zavisnosti od sačinioća nesimetrije  $SN(U)$  (jednačina (220)), dobijemo:

$$M = \frac{3 \cdot R_r \cdot (U_s^d)^2}{\omega_s} \cdot \left[ \frac{1}{s} \cdot \frac{1}{\left(R_s + \frac{R_r}{s}\right)^2 + (X_{ys} + X_{yr})^2} - \frac{1}{2-s} \right] \cdot \frac{SN^2(U)}{\left(R_s + \frac{R_r}{2-s}\right)^2 + (X_{ys} + X_{yr})^2} \quad (230)$$

5. Sabirница u koju je povezan transformator 10/0,4 kV/kV, 2,8 MVA,  $u_k = 4,2\%$  se napaja preko dva paralelna bakarna voda dužine 1,5 km, poprečnog preseka 185 mm<sup>2</sup>. Teret koji posmatramo je povezan na niskonaponsku stranu transformatora, a snaga tog tereta se periodično menja od 0,6 MW do 1,4 MW. Teret je povezan između dve faze (slika 61). Procenite koliki pad napona vide ostali tereti povezani u sabirnici X? Snaga kratkog spoja u tački povezivanja vodova prema ostatku sistema je 190 MVA, podužna otpornost bakarnog voda je 0,164 Ω/km, a podužna reaktansa 0,09 Ω/km.

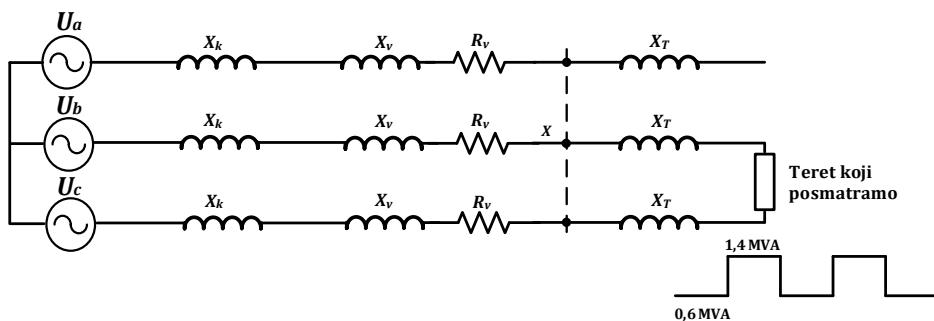


Slika 61: Sistem sa teretom promenljive snage

Zamenska šema posmatranog sistema je data na slici 62.

Ukupnu impedansu, odnosno otpornost i reaktansu dva paralelno vezana voda po fazi dobijemo kao:  $R_v = \frac{1}{2} \cdot 0,164 \cdot 1,5 = 0,123 \, \Omega$ ,  $X_v = \frac{1}{2} \cdot 0,090 \cdot 1,5 = 0,068 \, \Omega$

Impedansu, odnosno reaktansu koju vodovi vide prema ostatku sistema, dobijemo iz snage kratkog spoja u sabirnici gde su vodovi povezani.



Slika 62: Zamenska šema

Dakle,  $X_k = \frac{U_n^2}{S_k} = \frac{10000^2}{190000000} = 0,526 \, \Omega$

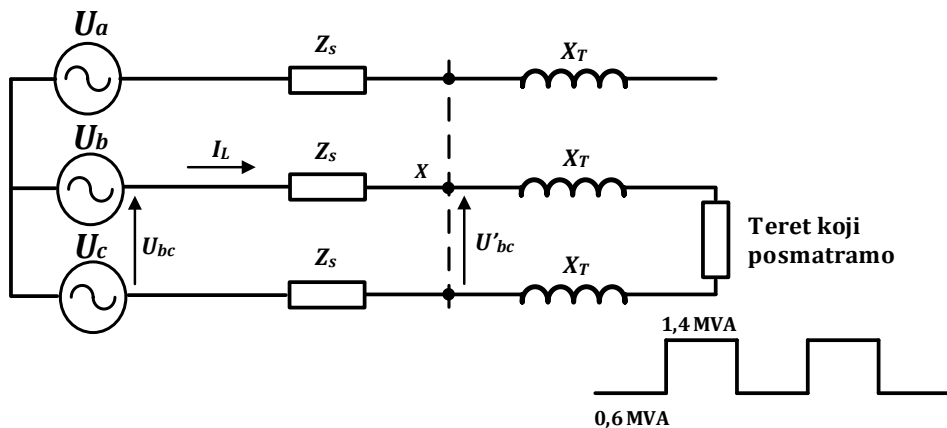
Reaktansu transformatora dobijemo kao:  $X_T = u_k \cdot \frac{U_n^2}{S_T} = \frac{4,2}{100} \cdot \frac{10000^2}{2800000} = 1,5 \, \Omega$

Sada je pojednostavljena zamenska šema data na slici 63. Pri tome naravno važi da je  $\hat{Z}_s = R_v + j(X_k + X_v) = 0,123 + j(0,526 + 0,068) = 0,123 + j0,594$ , tj.  $Z_s = 0,607 \, \Omega$

Napon u tački X,  $U'_{bc}$  je zapravo međufazni napon  $U_{bc}$  umanjen za pad napona na impedansi  $Z_s$  usled struje tereta  $I_L$ :

$$\hat{U}_{bc} - \hat{Z}_s \cdot \hat{I}_L - \hat{U}'_{bc} - \hat{Z}_s \cdot \hat{I}_L = 0. \quad (231)$$

Odatle je pad napona  $\Delta \hat{U} = \hat{U}_{bc} - \hat{U}'_{bc} = 2\hat{Z}_s \cdot \hat{I}_L$ , tj.  $\Delta U = 2 \cdot Z_s \cdot I_L$



Slika 63: Pojednostavljena zamenska šema

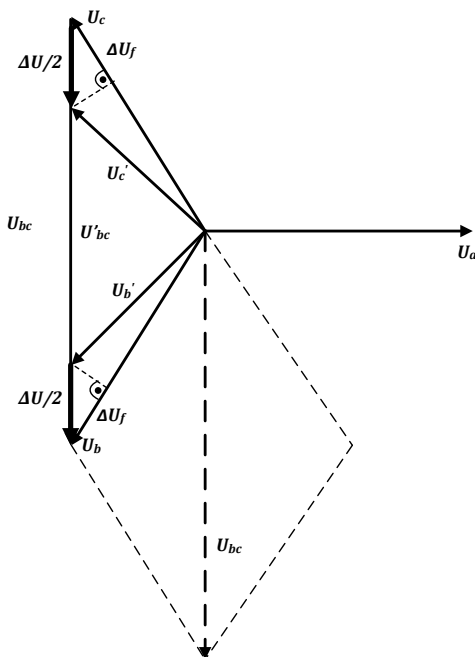
Struju tereta pri opterećenju od 0,6 MVA dobijemo kao:  $I_{L0} = \frac{0,6 \text{ MVA}}{10 \text{ kV}} = 60 \text{ A}$ , dok pri opterećenju od 1,4 MVA, struja tereta iznosi:  $I_{L1} = \frac{1,4 \text{ MVA}}{10 \text{ kV}} = 140 \text{ A}$ . Odatle su padovi napona u prvom, odnosno drugom slučaju:  $\Delta U_0 = 2 \cdot 0,607 \cdot 60 = 72,792 \text{ V}$ ,  $\Delta U_1 = 2 \cdot 0,607 \cdot 140 = 169,848 \text{ V}$

Razlika padova napona od  $\Delta U_X = \Delta U_1 - \Delta U_0 = 169,848 - 72,792 = 97,056 \text{ V}$  predstavlja zapravo propad napona usled promene opterećenja koji vide tereti povezani u sabirnicu X. Ukoliko je ta promena učestala, radi se o treperenju napona (flickeru).

Propad napona po fazi  $\Delta U_f$  dobijemo sa dijagrama (slika 64). Polazimo od činjenice da međufazni napon na samom teretu  $\hat{U}'_{bc}$  postaje nesimetričan pošto je teret neuravnotežen, tj. povezan samo između faza *b* i *c* potrošača. Zato ugao između faznih napona  $\hat{U}'_b$  i  $\hat{U}'_c$  nije više  $120^\circ$ , već je određen padovima napona opisanih jednačinom (231).

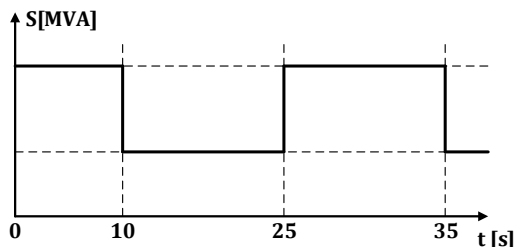
$$\text{Dakle, } \Delta U_{fx} = \frac{\Delta U_X}{2} \cdot \cos(30^\circ) = \frac{\sqrt{3}}{4} \cdot 97,056 = 42,027 \text{ V}$$

U postocima, ovaj propad iznosi:  $\frac{42,027}{\frac{10000}{\sqrt{3}}} = 0,73 \%$



Slika 64: Fazorski dijagram

Ovako mali propad napona nije zabrinjavajući i neće loše uticati na terete povezane u sabirnici X. Međutim, treba razmotriti šta se dešava ako se ovako mali propadi ispoljavaju kao učestalo treperenje (slika 65).

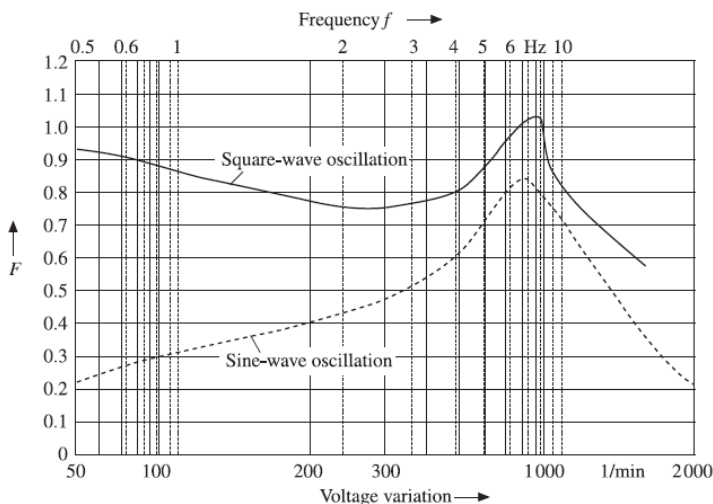


Slika 65: Učestanost promene snage tereta

Kvalitet napona je određen standardima EN 61000-2-2 (VDE 0839, deo 2-2) u javnim niskonaponskim sistemima. Odgovarajući standardi za industrijske sisteme su dati sa EN 61000-2-4 (VDE 0839 deo 2-4). Vrednovanje uticaja treperenja napona se vrši preko sačinioaca  $t_f$  (trajanje dejstva treperenja),  $A_{st}$  (10-minutnog dejstva treperenja) i  $A_{lt}$  (2-satnog dejstva treperenja). Ovi sačinioici se računaju kao:

$$t_f = 2,3s \cdot (d \cdot F)^3, A_{st} = \frac{\sum t_f}{10 \cdot 60s}, A_{lt} = \frac{\sum t_f}{120 \cdot 60s} \quad (232)$$

gde su  $d$  - propad napona dat u %, a  $F$  je sačinilac oblika koji se može proceniti iz dijagrama sa slike 66.



Slika 66: Sačinilac oblika u zavisnosti od oblika poremećaja i njegove učestalosti

Dopustive vrednosti činioca  $A_{lt}$ ,  $A_{st}$  i  $d$  su dati u tabeli:

|               | $A_{It}$ | $A_{St}$ | <b>Uslovi za <math>A_{It}</math> i <math>A_{St}</math></b> | <b>Posledice pri povezivanju</b> |
|---------------|----------|----------|------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| Niski napon   | 0,05     | 0,2      | $A_{St} < 0,2$ i $A_{It} < 0,05$                           | Dozvoljeno                       |
| Srednji napon | 0,05     | 0,2      | $0,2 < A_{St} < 0,5$ ili $0,05 < A_{It} < 0,2$             | Prihvatljivo                     |
| Visoki napon  | 0,05     | 0,2      | $A_{It} > 0,2$                                             | Neprihvatljivo                   |

U našem slučaju,  $F \approx 0,93$  (sa slike 66, za učestanost  $1/25 < 0,5$  i pravougaonu promenu), dok smo  $d$  već proračunali kao  $d = 0,73$ . Sada je  $t_f = 2,3s \cdot (0,73 \cdot 0,93)^3 = 0,72 s$

Sačinioci kratkotrajnog i dugotrajnog treperenja su:  $A_{St} = \frac{24 \cdot 0,72}{10 \cdot 60s} = 0,029$ ,  $A_{It} = \frac{288 \cdot 0,72}{120 \cdot 60s} = 0,029$

Sačinioci  $A_{St}$  i  $A_{It}$  su jednaki budući da se treperenje dešava jednoobrazno i na isti način u toku 10 min (24 puta) i 2 sata (288 puta). Na osnovu tabela je jasno da bi ovakvo treperenje bilo dozvoljeno.

Propadi napona i nesimetrija, kao i njihove posledice na svojstvenim praktičnim primerima su obrađeni u sledećoj naučnoj građi: [28]-[31].

## 1.10. Kompenzacija sačinioca snage i propada napona

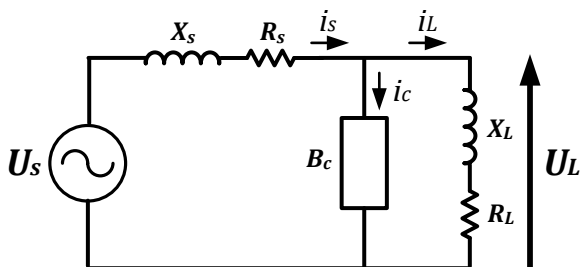
1. Impedansa tereta povezanog na jednofazni izvor (slika 67) iznosi  $(16+j12) \Omega$ , dok je impedansa napojnog voda izvora  $(1+j4) \Omega$ .

a) Izračunajte pad napona na napojnom vodu kao i napon na teretu

b) Ako se iskoristi kompenzator  $B_c$  koji sadrži idealne (bezotporne) L i C elemente da bi podigao napon tereta na napon mreže pri jediničnom sačiniocu snage, izračunajte neophodne vrednosti L i C.

c) Izračunajte snagu tako proračunatog kompenzatora

Efektivna vrednost napona izvora je 230 V pri učestanosti 50 Hz.



Slika 67: Otočni kompenzator

a) Pad napona na vodu je:  $\Delta \hat{U}_s = \frac{\hat{Z}_s}{\hat{Z}_s + \hat{Z}_L} U_s = \frac{1+j4}{1+j4+16+j12} \cdot 230 = (34,183 + j21,945) V$ , odnosno  $\Delta U_s = |\Delta \hat{U}_s| = 40,621 V$ , gde smo izabrali da je  $\hat{U}_s$  referentni fazor (sa faznim stavom  $0^\circ$ ),  $\hat{U}_s = U_s = 230 V$ . Na sličan način je napon na teretu:  $\hat{U}_L = \frac{\hat{Z}_L}{\hat{Z}_s + \hat{Z}_L} U_s = (195,82 - j21,94) V$ , odnosno  $U_L = 197,04 V$

b) Kompenzator  $B_c$  ima dva zadatka iz kojeg slede dve komponente - jedna koja vrši kompenzaciju sačinioća snage  $B_{CPF}$  i drugu koja kompenzuje pad napona  $B_{CV}$ . Zbog jednostavnijih proračuna, koristićemo admitanse, pa je:  $\hat{Y}_L = G_L + jB_L = \frac{1}{R_L + jX_L}$ , tj.  $G_L = \frac{R_L}{R_L^2 + X_L^2} = 0,04 S$  i  $B_L = -\frac{X_L}{R_L^2 + X_L^2} = -0,03 S$

Da bi se postigao jedinični sačinioć snage treba kompenzovati susceptansu  $B_L$ , a to postizemo sa  $B_{CPF}$  pri čemu je  $B_{CPF} = -B_L = 30 mS$ .

Komponentu kompenzatora koja nadoknađuje pad napona ćemo dobiti iz proračuna napona nakon priključenja kompenzatora. Dakle:

$\hat{U}_L = \frac{U_s}{\hat{Z}_s + jB_c || \hat{Z}_L} \cdot jB_c || \hat{Z}_L$ , pri čemu oznaka  $||$  označava paralelnu vezu. Sada, da bi moduo napona na teretu bio ravan modulu napona izvora, mora biti ispunjen uslov:

$$|\hat{U}_L| = \left| \frac{U_s}{\hat{Z}_s + jB_c || \hat{Z}_L} \cdot jB_c || \hat{Z}_L \right| = U_s \Leftrightarrow \left| \frac{U_s}{\hat{Z}_s + jB_c || \hat{Z}_L} \cdot jB_c || \hat{Z}_L \right| = 1$$

Paralelna veza  $jB_c || \hat{Z}_L$  se svodi na:  $jB_c || \hat{Z}_L = \frac{1}{G_L + jB_{CV}}$ , pošto su komponenta kompenzatora  $B_{CPF}$  i admitansa tereta  $G_L$  već kompenzovane, pa ih poništimo međusobno u proračunu. Dalje onda imamo:

$$\left| \frac{1}{R_s + jX_s + \frac{1}{G_L + jB_{CV}}} \cdot \frac{1}{G_L + jB_{CV}} \right| = 1$$

odakle je:  $(G_L R_s - B_{CV} X_s + 1)^2 + (X_s G_L + R_s B_{CV})^2 = 1$ , odnosno:

$$B_{CV} = \frac{X_s \pm \sqrt{X_s^2 - Z_s^2 (G_L^2 Z_s^2 + 2G_L R_s)^2}}{Z_s^2}$$

pri čemu smo zbog lakšeg pisanja uvažili da je  $Z_s^2 = R_s^2 + X_s^2$ .

Uvrštavajući brojne vrednosti, dobijemo dva rešenja kvadratne jednačine, pri čemu usvajamo manju vrednost kompenzatora,  $B_{CV} = 25,3 mS$ . Ukupna vrednost susceptanse kompenzatora je dakle:  $B_c = 30 + 25,3 = 55,3 mS$ , odnosno kapacitivnost je:  $C_c = \frac{B_c}{\omega} = \frac{0,0553}{100 \cdot \pi} = 176 \mu F$

c) Reaktivna snaga kompenzatora je:  $Q_c = U_s^2 \cdot B_c = 230^2 \cdot 0,0553 = 2,925 kVar$

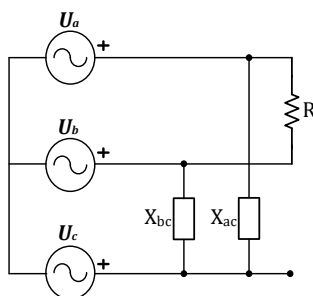
2. Otporni teret snage 50 KW je povezan između dva fazna provodnika (slika 68). Otočno njemu se povezuje idealni (bez gubitaka) kompenzator sa zadatkom popravka sačinioća snage i uravnotežavanja tereta prema ostatku mreže. Izračunajte:

a) linijske struje mreže

b) struje kompenzatora

c) parametre kompenzatora i snagu svakog elementa kompenzatora

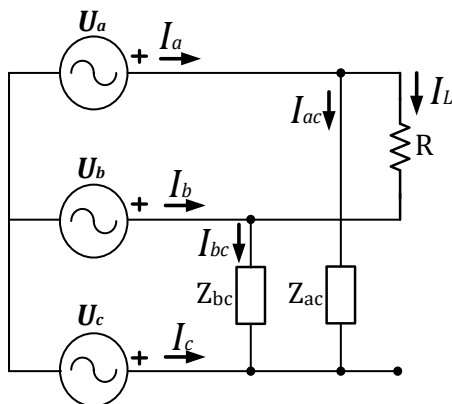
Fazni naponi izvora su simetrični, efektivne vrednosti 230 V i 50 Hz.



Slika 68: Kompenzator za uravnoteženje

a) Nakon izvršene kompenzacije, linijske struje su simetrične (imaju isti moduo) i u fazi su s naponima pošto je sačinilac snage jedinični. Dakle,  $\hat{I}_a = \frac{50000}{3 \cdot 230} = 72,464 \text{ A}$ , dok su ostale dve struje:  $\hat{I}_b = 72,464 \angle -120^\circ$ ,  $\hat{I}_c = 72,464 \angle 120^\circ$ .

b) Sa slike 69 struje kompenzatora računamo kao:  $\hat{I}_{ac} = \hat{I}_a - \hat{I}_L$ ,  $\hat{I}_{bc} = \hat{I}_b + \hat{I}_L$ , pri čemu je:  $\hat{I}_L = \frac{\hat{U}_a - \hat{U}_b}{R} = \frac{230 - 230 \cdot e^{j120^\circ}}{\frac{230}{72,464}} = 125,511 \angle -30^\circ$ . Odatle su:  $\hat{I}_{ac} = 72,464 - 125,511 \angle -30^\circ = 72,464 \angle 120^\circ$ ,  $\hat{I}_{bc} = 72,464 \angle -120^\circ + 125,511 \angle -30^\circ = 144,928 \angle -60^\circ$



Slika 69: Analiza kompenzatora

c) Parametri kompenzatora su:  $\hat{Z}_{ac} = \frac{\hat{U}_a - \hat{U}_c}{\hat{I}_{ac}}$ ,  $\hat{Z}_{bc} = \frac{\hat{U}_b - \hat{U}_c}{\hat{I}_{bc}}$ . Ove vrednosti bismo mogli lako dobiti na osnovu struja proračunatih pod a). Međutim, pokušaćemo dobiti malo opštiji rezultat:

$$\hat{Z}_{ac} = \frac{\hat{U}_a - \hat{U}_c}{\hat{I}_{ac}} = \frac{U - Ue^{j\frac{2\pi}{3}}}{\frac{U}{R} - \frac{U - Ue^{-j\frac{2\pi}{3}}}{R}} = j\sqrt{3}R \quad (233)$$

Gde je  $U$  efektivna vrednost faznih napona izvora. Na sličan način je  $\hat{Z}_{bc} = -j\sqrt{3}R$ . Dakle,  $\hat{Z}_{ac}$  je zapravo induktivna reaktansa, dok je  $\hat{Z}_{bc}$  kapacitivna reaktansa. To znači da je  $L_{ac} = \frac{\sqrt{3}R}{\omega}$ , a  $C_{bc} = \frac{1}{\sqrt{3}R\omega}$ . Ovo je zanimljiv rezultat koji kaže da reaktanse kompenzatora trebaju biti  $\sqrt{3}$  puta veće od otpornosti tereta da bi se taj teret uravnotežio prema mreži pri jediničnom sačiniocu snage. Uvrštavanjem brojnih podataka dobijemo:  $L_{ac} = \frac{\sqrt{3} \cdot \frac{230}{72,464}}{100 \cdot \pi} = 17,5 \text{ mH}$  i  $C_{bc} = \frac{1}{\sqrt{3} \cdot \frac{230}{72,464} \cdot 100 \cdot \pi} = 0,579 \text{ mF}$ .

c) Opteretivost po snazi oba elementa kompenzatora je ista pošto imaju iste reaktanse, samo se razlikuje smer snage. Dakle:  $Q = \frac{(\sqrt{3} \cdot U)^2}{X_{ac}} = 2,887 \text{ kVAr}$

3. Trofazni trožilni neuravnoteženi teret (slika 70)  $\hat{Z}_{ab} = (26, 25 + j10, 5)\Omega$ ,  $\hat{Z}_{bc} = (21 + j6, 3)\Omega$ ,  $\hat{Z}_{ca} = (36, 75 + j10, 5)\Omega$  treba kompenzovati tako da se prema mreži ponaša kao uravnotežen sa jediničnim sačinioem snage. Proračunajte parametre idealnog kompenzatora.

Poučeni rezultatima prvog zadatka ovog poglavlja, znamo da kompenzator ima dve komponente, jednu koja popravlja sačinilac snage tereta i druga koja ima zadatak uravnoteženja.

$$\text{Dakle, } \hat{Y}_{ab}^{comp} = \hat{Y}_{abPF}^{comp} + \hat{Y}_{abR}^{comp}, \quad \hat{Y}_{bc}^{comp} = \hat{Y}_{bcPF}^{comp} + \hat{Y}_{bcR}^{comp}, \quad \hat{Y}_{ca}^{comp} = \hat{Y}_{caPF}^{comp} + \hat{Y}_{caR}^{comp},$$

gde natpisnik *comp* označava kompenzator, a upisnici *PF* i *R* označavaju sačinilac snage i uravnoteženje. Komponentu koja kompenzuje sačinilac snage računamo kao:  $B_{abPF}^{comp} = -B_{ab}$ ,  $B_{bcPF}^{comp} = -B_{bc}$ ,  $B_{caPF}^{comp} = -B_{ca}$ , gde se admitanse kompenzatora svode zapravo na susceptanse (čiste kapacitivnosti ili induktivnosti pošto smo pretpostavili da je kompenzator idealan, tj. zanemarujemo otpornost).

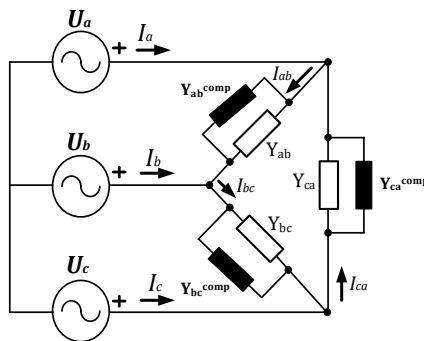
Računamo:  $\hat{Y}_{ab} = \frac{1}{\hat{Z}_{ab}} = (0,0328 - j0,0131)S$ ,  $\hat{Y}_{bc} = \frac{1}{\hat{Z}_{bc}} = (0,0437 - j0,0131)S$ ,  $\hat{Y}_{ca} = \frac{1}{\hat{Z}_{ca}} = (0,00252 - j0,0072)S$ . Odatle je:  $B_{abPF}^{comp} = 0,0131 S$ ,  $B_{bcPF}^{comp} = 0,0131 S$ ,  $B_{caPF}^{comp} = 0,0072 S$ .

Linijske struje  $\hat{I}_a$ ,  $\hat{I}_b$  i  $\hat{I}_c$  nakon kompenzacije trebaju biti simetrične i u fazi sa naponima:  $\hat{U}_a$ ,  $\hat{U}_b$  i  $\hat{U}_c$  redom. Te struje možemo izraziti kao:

$$\hat{I}_a = \hat{I}_{ab} - \hat{I}_{ca}, \quad \hat{I}_b = \hat{I}_{bc} - \hat{I}_{ab}, \quad \hat{I}_c = \hat{I}_{ca} - \hat{I}_{bc} \quad (234)$$

Dalje je:

$$\hat{I}_{ab} = G_{ab}(\hat{U}_a - \hat{U}_b), \quad \hat{I}_{bc} = G_{bc}(\hat{U}_b - \hat{U}_c), \quad \hat{I}_{ca} = G_{ca}(\hat{U}_c - \hat{U}_a) \quad (235)$$



Slika 70: Kompenzacija neuravnoteženog tereta

Pri tom smo za proračun ovih linijskih struja uvažavali samo otporni deo jer smo jalovi već kompenzovali sa  $B_{PF}^{comp}$  komponentama. Ako dalje usvojimo mrežni napon faze  $a$  kao referentni fazor, možemo napisati:

$$\hat{U}_a = U, \quad \hat{U}_b = \hat{a}^2 \cdot U, \quad \hat{U}_c = \hat{a} \cdot U \quad (236)$$

pri čemu je  $\hat{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}}$ , a  $U$  je efektivna vrednost faznog napona mreže.

Uvrštavajući (236) u (235), pa onda u (234), imamo:

$$\begin{aligned} \hat{I}_a &= U[G_{ab}(1 - \hat{a}^2) - G_{ca}(\hat{a} - 1)] \\ \hat{I}_b &= U[G_{bc}(\hat{a}^2 - \hat{a}) - G_{ab}(1 - \hat{a}^2)] \\ \hat{I}_c &= U[G_{ca}(\hat{a} - 1) - G_{bc}(\hat{a}^2 - \hat{a})] \end{aligned} \quad (237)$$

Pošto je cilj da ove struje budu simetrične, one moraju sadržavati samo direktnu komponentu, dok inverzna i nulta moraju biti ravne nuli. Proračunajmo sada simetrične komponente na osnovu (2), pa imamo:

$$\hat{I}^0 = \frac{1}{3}(\hat{I}_a + \hat{I}_b + \hat{I}_c), \quad \hat{I}^i = \frac{1}{3}(\hat{I}_a + \hat{a}^2\hat{I}_b + \hat{a}\hat{I}_c), \quad \hat{I}^d = \frac{1}{3}(\hat{I}_a + \hat{a}\hat{I}_b + \hat{a}^2\hat{I}_c) \quad (238)$$

a onda uvrštavajući (238) u (237) imamo:

$$\hat{I}^d = U(G_{ab} + G_{bc} + G_{ca}), \quad \hat{I}^i = -U(\hat{a}^2 G_{ab} + G_{bc} + \hat{a} G_{ca}), \quad \hat{I}^0 = 0 \quad (239)$$

Cilj nam je naravno da poništimo inverznu komponentu. One se trebaju poništiti sa inverznom komponentom linijskih struja kompenzatora, tj.  $\hat{I}^i + \hat{I}^{i,comp} = 0$ . Na sličan način na koji smo izveli izraz za simetrične komponente struja potrošača, dobijamo simetrične komponente struja kompenzatora.

$$\begin{aligned} \hat{I}^{d,comp} &= jU(B_{abR}^{comp} + B_{bcR}^{comp} + B_{caR}^{comp}) \\ \hat{I}^{i,comp} &= -jU(\hat{a}B_{abR}^{comp} + B_{bcR}^{comp} + \hat{a}B_{caR}^{comp}) \end{aligned} \quad (240)$$

Kompenzacijom inverznih komponenti dobijamo:

$$-U(\hat{a}^2 G_{ab} + G_{bc} + \hat{a} G_{ca}) - jU(\hat{a}^2 B_{abR}^{comp} + B_{bcR}^{comp} + \hat{a} B_{caR}^{comp}) = 0 \quad (241)$$

S druge strane, direktna komponenta struje kompenzatora mora biti ravna nuli kako bi bio ostvaren jedinični sačinilac snage. To znači:

$$\hat{I}^{d,comp} = jU(B_{abR}^{comp} + B_{bcR}^{comp} + B_{caR}^{comp}) = 0 \quad (242)$$

Koristeći sada (241) i (242), dobijamo:

$$B_{abR}^{comp} = -G_{bc} + G_{ca}, \quad B_{bcR}^{comp} = G_{ab} - G_{ca}, \quad B_{caR}^{comp} = -G_{ab} + G_{bc} \quad (243)$$

Uvrstimo brojne vrednosti, pa dobijemo:  $B_{abR}^{comp} = -0,0185 \text{ S}$ ,  $B_{bcR}^{comp} = 0,0077 \text{ S}$ ,  $B_{caR}^{comp} = 0,0108 \text{ S}$

Konačno, ukupne admitanse, odnosno susceptanse kompenzatora dobijemo kao:

$$B_{ab}^{comp} = B_{abPF}^{comp} + B_{abR}^{comp} = 0,0131 - 0,0185 = -0,0054 \text{ S}$$

$$B_{bc}^{comp} = B_{bcPF}^{comp} + B_{bcR}^{comp} = 0,0131 + 0,0077 = 0,0208 \text{ S}$$

$$B_{ca}^{comp} = B_{caPF}^{comp} + B_{caR}^{comp} = 0,0072 + 0,0108 = 0,018 \text{ S}$$

pa su parametri kompenzatora:  $L_{ab}^{comp} = 17,2 \mu\text{H}$ ,  $C_{bc}^{comp} = 66,2 \mu\text{F}$  i  $C_{ca}^{comp} = 57,4 \mu\text{F}$

**4. Za DVR (Dynamic Voltage Restorer) sa slike 71, proračunajte:**

a) Napon, struju i prividnu snagu DVR-a pod pretpostavkom da može nadomestiti naponske promene u opsegu -40% do +15% nazivnog napona tereta, pri čemu sačinilac snage tereta treba biti jedinični

b) Prenosni odnos i snagu sprežnog transformatora pod pretpostavkom da je s primarne strane (strane DVR-a) napon od 50 V.

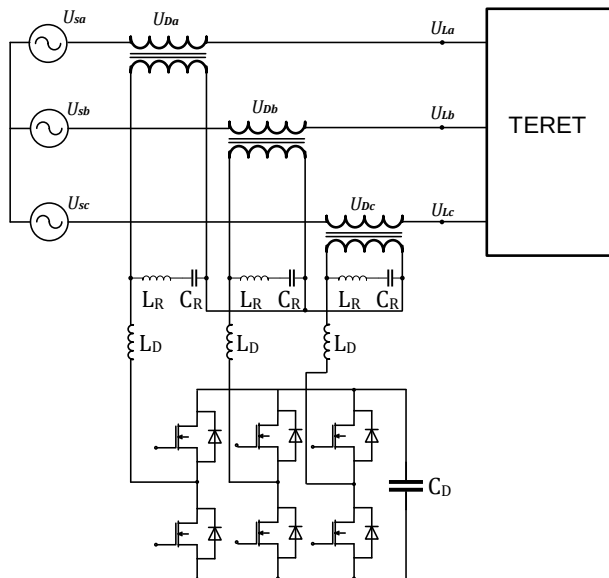
c) Napon i kondenzator jednosmernog kola DVR-a pod pretpostavkom da je dopušten pad napona jednosmernog kola u toku prelaznih pojava ne veći od 5% u trajanju dve periode PWM-a

d) Sprežnu induktivnost pod pretpostavkom da valovitost struje nije veća od 2%, a induktivnost se može trajno propreteriti 30% većom strujom od nazivne

e) Parametre filtra koji glača valovitost napona DVR-a.

Učestanost PWM-a je 4 kHz, a sačinilac modulacije 1, linijski napon 400 V. Snaga tereta je 20 kW.

DVR se ponaša kao redno povezan naponski izvor. Fazni naponi koje DVR utiskuje ( $U_{Da}$ ,  $U_{Db}$  i  $U_{Dc}$ ) su okomiti na odgovarajuće fazne struje tereta, odnosno izvora ( $I_{sa}$ ,  $I_{sb}$  i  $I_{sc}$ ). Rezultat takvog dejstva treba biti da napon tereta po modulu bude isti kao napon pre propada napona (slika 72).

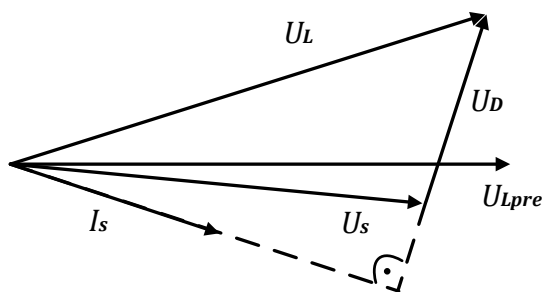


Slika 71: DVR sa sprežnim i filtarskim elementima

a) Napon koji utiskuje DVR možemo dobiti sa gornje slike uvažavajući da treba postići jedinični sačinilac snage, tj. da su  $U_s$  i  $I_s$  u fazi, pa je:

$$U_D = \sqrt{U_L^2 - U_s^2} = \sqrt{\left(\frac{400}{\sqrt{3}}\right)^2 - \left(0,6 \cdot \frac{400}{\sqrt{3}}\right)^2} = \frac{400}{\sqrt{3}} \sqrt{1 - 0,6^2} \quad (244)$$

$$= 184,75 \text{ V}$$



Slika 72: Dijagram DVR-a

Struja DVR-a je ista kao i struja tereta, odnosno izvora, pa struju dobijemo iz snage i napona tereta:  $I_D = I_s = \frac{20000}{\sqrt{3} \cdot 400} = 28,87 \text{ A}$

Snaga DVR-a je dalje:  $S_D = 3 \cdot U_D \cdot I_D = 3 \cdot 184,75 \cdot 28,87 = 16 \text{ kVA}$

b) Snaga spreznog transformatora treba biti ista ili nešto veća od snage DVR-a.

Neka je dakle,  $S_{TF} = S_D = 16 \text{ kVA}$ . Prenosni odnos je  $n_{TF} = \frac{184,75}{50} = 3,7$

c) Napon kondenzatora pretvarača DVR-a se bira da bude veća od temene vrednosti linijskog napona primara trafoa. Dakle:

$$U_{CD} > \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot 50 = 122,5 \text{ V} \quad (245)$$

Taj napon se uzima u zavisnosti od vrste modulacije i naponske rezerve. Uzmimo da je zato napon kondenzatora 20% veći, pa je  $U_{CD} = 150 \text{ V}$ .

d) Kapacitivnost kondenzatora jednosmernog kola se bira tako da on predstavlja energetska skladište dovoljno snažno da mu napon ne padne više od 5% u toku dve periode PWM-a (po uslovu zadatka). Dakle:

$$\frac{1}{2} C_D (U_{CD}^2 - (0,95 U_{CD})^2) = 3 \cdot U_D \cdot I_D \cdot 2 \cdot \frac{1}{f_{PWM}}, \text{ tj. } C_D = 7,3 \text{ mF, usvojicemo } C_D = 8 \text{ mF}$$

d) Vrednost sprežne induktivnosti dobijemo kao u (198), s tim što je ovde u pitanju trofazni sistem, pa:

$$L_R = \frac{\frac{1}{n_{TF}} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot m \cdot U_{CD}}{6 \cdot p \cdot f_{PWM} \cdot \Delta I_D} = \frac{\frac{1}{3,7} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 1 \cdot 150}{6 \cdot 1,2 \cdot 4000 \cdot 0,02 \cdot 28,87} = 2 \text{ mH} \quad (246)$$

e) Presečna učestanost ovog RC filtra se obično bira kao polovina učestanosti PWM-a, pa je:  $f_R = \frac{1}{2} f_{PWM} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_R \cdot C_R} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_R \cdot C_R}$ , odakle je  $R_R \cdot C_R = \frac{1}{\pi \cdot f_{PWM}} = 80 \mu s$ . Ako usvojimo da je vrednost otpornika  $R_R = 8 \Omega$ , onda je  $C_R = 8 \mu F$

## 1.11. Računarski zadaci

**1. Izraditi program u Matlabu koji daje prikaz zbira prvih n-harmonika:**

$$u(t) = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t) + \frac{1}{2} \cdot U_m \cdot \sin(2 \cdot \omega \cdot t) + \frac{1}{3} \cdot U_m \cdot \sin(3 \cdot \omega \cdot t) \dots + \frac{1}{n} \cdot U_m \cdot \sin(n \cdot \omega \cdot t)$$

```
Um=100; % Temena vrednost osnovnog harmonika
f=50; w=2*pi*f; T=1/f; % osnovna ucestanost, kruzna
ucestanost i perioda
n=50; % redni broj najviseg harmonika do kojeg prikazujemo
izobliceni napon
```

```
fn=n*f; Tn=1/fn; % ucestanost i perioda n-tog harmonika
```

```
DT=Tn/100; % odbirke vremenske ose odredjujemo prema
najvisem harmoniku
broj_odbiraka=T/DT; % ukupan broj odbiraka vremenske ose u
trajanju T
```

```
for i=1:broj_odbiraka+1
    t(i)=(i-1)*DT;
    u(i)=0;
    for j=1:n
        h(i)=(1/j)*Um*sin(2*pi*50*j*t(i));
        u(i)=u(i)+h(i);
    end
end
plot(t,u)
```

U slučaju da ne želimo prikaz parnih harmonika i trokratnika, tj hoćemo prikazati

$$\text{oblik: } u(t) = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t) + \frac{1}{5} \cdot U_m \cdot \sin(5 \cdot \omega \cdot t) + \frac{1}{7} \cdot U_m \cdot \sin(7 \cdot \omega \cdot t) \dots + \frac{1}{n} \cdot$$

$U_m \cdot \sin(n \cdot \omega \cdot t)$  onda se kod malo menja i postaje:

```
Um=100; % Temena vrednost osnovnog harmonika
f=50; w=2*pi*f; T=1/f; % osnovna ucestanost, kruyna
ucestanost i perioda
n=50; % redni broj najviseg harmonika do kojeg prikazujemo
izobliceni napon
```

```
fn=n*f; Tn=1/fn; % ucestanost i perioda n-tog harmonika
DT=Tn/100; % odbirke vremenske ose odredjujemo prema
najvisem harmoniku
broj_odbiraka=T/DT; % ukupan broj odbiraka vremenske ose u
trajanju T
for i=1:broj_odbiraka+1
    t(i)=(i-1)*DT;
    u(i)=0;
    for j=1:n
        if mod(j,6)==1 %uvazavamo redne brojeve s ostatkom
1 pri deljenju s 6
            h(i)=(1/j)*sin(2*pi*50*j*t(i));
        elseif mod(j,6)==5 %i one s ostatkom 5 pri deljenju
s 6
            h(i)=(1/j)*sin(2*pi*50*j*t(i));
        end
    end
    u(i)=u(i)+h(i);
end
```

```
end
plot(t,u)
```

### Izvori harmonijskog izobličenja, uz zadatak 1

Naredba u MuPAD-u za proračun integrala (u cilju proračuna efektivne vrednosti struje mreže):

```
INT=int((I1*sin(x)-I2)^2, x=a..PI-a)
```

Naredba u MuPAD-u za proračun integrala (u cilju proračuna efektivne vrednosti osnovnog harmonika struje mreže):

```
Imleff=(1/sqrt(2))*(1/PI)*(int((I1*sin(x)-I2)*sin(x),
x=a..PI-a)+int((I1*sin(x)+I2)*sin(x), x=PI+a..2*PI-a))
```

```
Um=230*sqrt(2); E=275; % napon mreže i napon baterije
```

```
a=asin(E/Um); % ugao pocetka provodjenja alfa
R=1+2*50e-3; % ukupan otpor (teret + otpor vodova)
```

```
I1=Um/R; I2=E/R; % pomocne promenljive
```

```
INT=(I1^2*sin(2*a))/2 + (pi*I1^2)/2 + pi*I2^2 - I1^2*a -
2*I2^2*a - 4*I1*I2*cos(a); % resenje INT iz MuPAD-a
```

```
Imeff=sqrt((1/pi)*INT);
```

```
Imleff = (2^(1/2)*(2*I1*(pi/2 - a + sin(2*a)/2) -
4*I2*cos(a)))/(2*pi); % na osnovu MuPAD-a
```

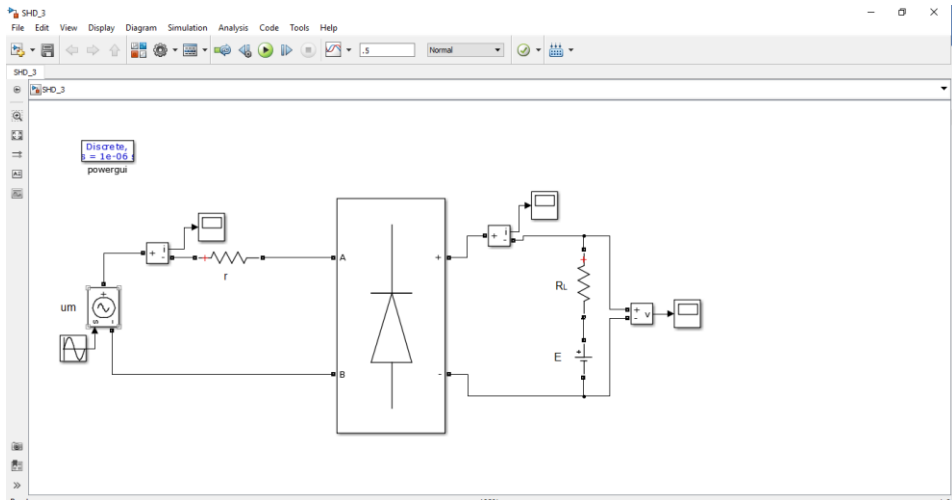
```
THD=sqrt((Imeff/Imleff)^2-1);
```

```
Impk=I1-I2; % temena vrednost struje
```

```
CF=Impk/Imeff; % vršni sačinilac
```

```
Pg_Pgkomp=(Imeff/Imleff)^2; % odnos gubitaka
```

Model u Simulinku



### Izvori harmonijskog izobličenja, uz zadatak 5

Naredba u MuPAD-u za proračun integrala (u cilju proračuna efektivne vrednosti napona tereta):

```
ULeff_kv=(1/PI)*int((Usmax*sin(x))^2, x=a..PI)
```

Proračun u Matlab-u:

```
clear all
```

```
Useff=220; Usmax=sqrt(2)*Useff;
```

```
R=5;
```

```
a=130/180*pi;
```

```
ULeff_kv = (Usmax^2*(2*pi - 2*a + sin(2*a)))/(4*pi);
```

```
%ULeff^2
```

```
ULeff=sqrt(ULeff_kv); % ULeff
```

```
I1=Usmax/R; % pomocna promenljiva
```

```
A1 = -(I1*sin(a)^2)/pi; %% tem.vrednost cosinusnog clana  
osnovnog harmonika
```

```

B1 = (I1*(2*pi - 2*a + sin(2*a)))/(2*pi); %% tem.vrednost
sinusnog clana osnovnog harmonika

Isleff=(1/sqrt(2))*sqrt(A1^2+B1^2); % eff. vrednost
osnovnog harmonika

Iseff=ULeff/R; % otporni potrosac

THD_Is=sqrt((Iseff/Isleff)^2-1); % THD struje

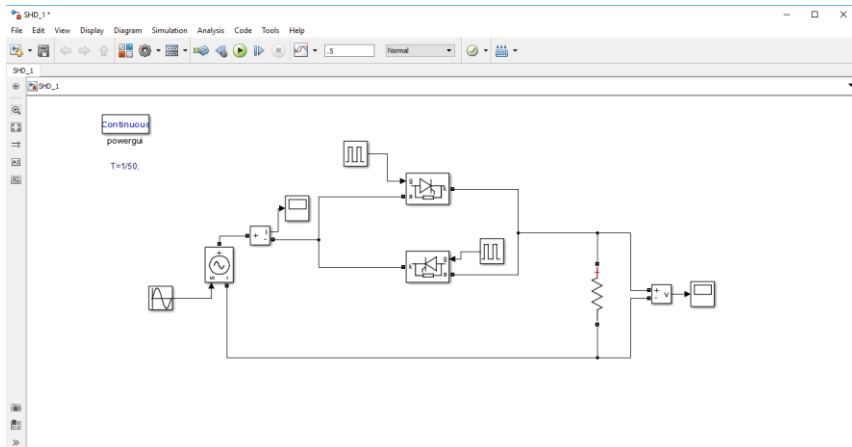
fil=atan(A1/B1); fil_step=fil*180/pi; % fazni stav osnovnog
harmonika
DPF=cos(fil);
DF=Isleff/Iseff;
PF=DPF*DF;
ILeff=Iseff; % ista struja
PL=ULeff*ILeff*PF;

Isvrh=I1*sin(a);
CF=Isvrh/Iseff;

%%% Zavisnost sacinioca snage pomeraja osnovnog harmonika
od ugla paljenja
brt=1000;
dal=pi/brt;

    for i=1:brt+1
        al(i)=(i-1)*dal;
        A11(i) = -(I1*sin(al(i))^2)/pi;
        B11(i) = (I1*(2*pi - 2*al(i) +
sin(2*al(i))))/(2*pi);
        fi11(i)=atan(A11(i)/B11(i));
        DPF1(i)=cos(fi11(i));
    end
    plot(al,DPF1)

```



### Osnovno o pasivnim filtrima, uz zadatak 4.

```

%%% zavisnost ugla kasnjenja fi od prigusenja filtra ksi
%%%pod pretpostavkom
%%% da je pojacanje na datoj ucestanosti wc ravno 1  $G(wc)=1$ 
wc=100*pi;
for i=1:100000
    ksi(i)=0.5+(1/sqrt(2)-0.5)/100000*i;
    A(i)=sqrt(2-4*(ksi(i))^2);
    B(i)=4*(ksi(i))^2-1;
    C(i)=2*ksi(i)*A(i)/B(i);
    fi(i)=-atan(C(i));
end
plot(ksi,fi*180/pi)
grid on
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% Bodeovi dijagrami za razna prigusenja ksi, tj. razna
%%% fazna kasnjenja uz pretpostavku da je na datoj
%%% ucestanosti wc ravno 1, tj. %%%  $G(wc)=1$ 
clear all
s=tf('s');
w0=100*pi; wc=w0;
for ksi=[0.5 0.6 0.7]
    wn=wc/sqrt(2*(1-2*ksi^2));
    G=wn^2/(s^2+2*ksi*wn*s+wn^2);
    hold on
    bode(G)
end

```

Primer simulacije u stvarnom vremenu (emulacije) povezivanje sinhronog generatora na električnu mrežu se može naći u [31].

## 2. Merenje kvaliteta električne energije

Ovaj deo predstavlja kombinaciju laboratorijskih vežbi, rada na terenu i samostalnog tematskog istraživačkog rada, a sve u sklopu istraživanja kvaliteta električne energije na Fakultetu tehničkih nauka.

Rezultat ovog dela je Semestralni rad u vidu izveštaja sa merenja kvaliteta električne energije na zadatoj sabirnici unutar električne mreže Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu.

Semestralni rad se radi u vidu pisanog izveštaja, koji se mora odbraniti na kraju semestra.

## **2.1. Bezbednost pri radu sa električnim naponom**

U objektima namenjenima za rad, radnim prostorijama i na radilištima postoji mogućnost od opasnog dejstva električne struje, pri rukovanju opremom i uređajima koji su pod naponom. Ova opasnost postoji i pri izvođenju laboratorijske vežbe u okviru predmeta "Kvalitet električne energije" [32]-[34], gde se mere parametri električnog napona.

Posebnim zakonom, uredbama i pravilnikom su definisana prava i obaveze, kako poslodavca tako i zaposlenog u cilju omogućavanja bezbednog rada i čuvanja zdravlja na radnom mestu.

"Zakon o bezbednosti i zdravlju na radu" ("Službeni glasnik Republike Srbije", br. 101/2005 i 91/2015) uređuje sprovođenje i unapređivanje bezbednosti i zdravlja na radu lica koja učestvuju u radnim procesima, kao i lica koja se zateknu u radnoj okolini, radi sprečavanja povreda na radu, profesionalnih oboljenja i oboljenja u vezi sa radom.

Član 5 "Zakona o bezbednosti i zdravlju na radu" definiše ko ima pravo na bezbednost i zdravlje na radu. Između ostalih to su:

- zaposleni;
- učenici i studenti kada se nalaze na obaveznom proizvodnom radu, profesionalnoj praksi ili praktičnoj nastavi (radionice, ekonomije, kabineti, laboratorije i dr.);
- lica koja se nalaze na stručnom osposobljavanju, prekvalifikaciji ili dokvalifikaciji;
- lica koja se zateknu u radnoj okolini radi obavljanja određenih poslova.

U narednih nekoliko odeljaka su sažeta prava i obaveze poslodavca i radnika što se tiče bezbednosti i zdravlja na radu, definisana navedenim zakonom.

### **2.1.1. Obaveze i prava poslodavca**

Poslodavac je dužan da obezbedi zaposlenom rad na radnom mestu i u radnoj okolini u kojima su sprovedene mere bezbednosti i zdravlja na radu. Poslodavac se ne oslobađa obaveza i odgovornosti u vezi sa primenom mera bezbednosti i zdravlja na radu određivanjem drugog lica ili prenošenjem svojih obaveza i odgovornosti na drugo lice.

Poslodavac je dužan da obezbedi preventivne mere pre početka rada zaposlenog, u toku rada, kao i kod svake izmene tehnološkog postupka, izborom radnih i proizvodnih metoda kojima se obezbeđuje najveća moguća bezbednost i zaštita zdravlja na radu, zasnovana na primeni propisa u oblasti bezbednosti i zdravlja na radu, radnog prava, tehničkih propisa i standarda, propisa u oblasti zdravstvene zaštite, higijene rada, zdravstvenog i penzijskog i invalidskog osiguranja, i dr.

Poslodavac je dužan da izvrši osposobljavanje zaposlenog za bezbedan i zdrav rad kod zasnivanja radnog odnosa, odnosno drugog radnog angažovanja. Poslodavac je dužan da zaposlenog u toku osposobljavanja za bezbedan i zdrav rad upozna sa svim vrstama rizika na poslovima na koje ga određuje i o konkretnim merama za bezbednost i zdravlje na radu u skladu sa aktom o proceni rizika.

### **2.1.2. Obaveze i prava radnika**

Zaposleni ima pravo i obavezu da se pre početka rada upozna sa merama bezbednosti i zdravlja na radu na poslovima ili na radnom mestu na koje je određen, kao i da se osposobljava za njihovo sprovođenje.

Zaposleni ima pravo da odbije da radi ako mu preti neposredna opasnost po život i zdravlje zbog toga što nisu sprovedene propisane mere za bezbednost i zdravlje na radnom mestu na koje je određen, sve dok se te mere ne obezbede.

Zaposleni je dužan da primenjuje propisane mere za bezbedan i zdrav rad, da namenski koristi sredstva za rad i opasne materije, da koristi propisana sredstva i opremu za ličnu zaštitu na radu i da sa njima pažljivo rukuje, da ne bi ugrozio svoju bezbednost i zdravlje kao i bezbednost i zdravlje drugih lica.

Posebnim pravilnikom se reguliše rad sa opremom, uređajima koji su pod naponom (izvod iz pravilnika, "Pravilnik o opštim merma zaštite na radu od opasnog dejstva električne struje u objektima namenjenim za rad, radnim prostorijama i na radilištima").

Opšte mere zaštite na radu od opasnog dejstva električne struje primenjuju se u objektima namenjenim za rad, radnim prostorijama, na radilištima i pri obavljanju radova na električnim postrojenjima, pri upotrebi električnih uređaja i pri korišćenju električnih instalacija nazivnih naizmjeničnih napona viših od 50 V i učestanosti 50 Hz, odnosno nazivnih jednosmernih napona viših od 120 V bez naizmjenične komponente.

U pravilniku su posebno definisana osnovna pravila bezbednog rada pri rukovanju električnim postrojenjima za napone do 1000V i iznad 1000V.

Što se tiče rada u postrojenjima sa naponom iznad 1000V postoje stroga pravila ponašanja, kojima se ova literatura ne bavi. Samo će biti spomenuto da prema stepenu opasnosti od električne struje, a u cilju regulisanja bezopasnog pristupa u električna postrojenja preko 1000 V definisane su tri zone:

**1. zona** - zona slobodnog kretanja, odnosno zona u kojoj nisu potrebna posebna upozorenja i uputstva o ponašanju ni mere zaštite;

**2. zona** - zona manipulacije i kontrole - u koju spadaju električne pogonske prostorije i zatvorene električne pogonske prostorije

**3. zona** - zona opasnosti je prostor oko delova pod naponom na udaljenosti manjoj od sigurnosnog razmaka.

Radove u niskonaponskim objektima može da izvodi pojedinac ako poznaje električno postrojenje i njegovu električnu šemu i koji je obučen za zahtevane manipulacije. U suprotnom, radove mora da izvode najmanje dva radnika.

Bez obzira o kom naponskom nivou se radi, radovi na električnim postrojenjima s obzirom na zaštitne mere se dele na tri kategorije:

- radovi u beznaponskom stanju,
- radovi u blizini napona i
- radovi pod naponom.

Dalje se navode postupci za rad pri navedenim situacijama sa naponima manjim od 1000V.

### **2.1.3. Radovi u beznaponskom stanju**

Postupak radova u beznaponskom stanju je sledeći:

1. izvršiti neophodna isključenja,
2. preduzeti mere koje bi sprečile pojavu napona usled slučajnog uključenja komutacionog uređaja,
3. proveriti odsustvo napona na delovima elektropostrojenja na kojima se obavljaju radovi,
4. izvesti uzemljivanje i kratko spajanje pomoću prenosnih uzemljivača svih provodnika koji su pod naponom u normalnom pogonu, uključujući i neutralni provodnik,
5. izvršiti ograđivanje mesta rada i delova pod naponom i istaći upozorenje da se izvode radovi.

### **2.1.4. Radovi u blizini napona**

Pri radovima koji se izvode u blizini napona susedni delovi pod naponom osiguravaju se od slučajnog neposrednog dodira radnika sa delovima pod naponom, pomoću dovoljno čvrstih i pouzdano postavljenih izolacionih zaštitnih pregrada, ploča, prekrivača i drugih zaštitnih sredstava.

### **2.1.5. Radovi pod naponom**

Na delovima elektroenergetskih objekata, kod kojih nazivni naponi između provodnika pod naponom ili napon između provodnika pod naponom i zemlje ne prelazi 50 V naizmeničnog napona, odnosno 120 V jednosmernog napona (mali napon), dozvoljen je rad pod naponom uz primenu kožnih zaštitnih rukavica i izolovanog električnog alata.

Radovi na delovima objekata koji su pod niskim naponom (napon manji od 1000V) mogu se izvoditi u sledećim slučajevima:

- kada je radni postupak sa opremom pod naponom utvrđen i proveren,
- postoje pisana uputstva za svaki postupak,
- postoji odgovarajući izolacioni alat, pomoćna sredstva, zaštitna oprema, odnosno lična zaštitna sredstva za svaku vrstu rada u skladu sa izabranim sistemom rada pod naponom,

- radnik ispunjava posebne psihofizičke sposobnosti za ovaj rad, ako je obučen i ako je izvršena provera njegovog znanja za određene vrste radova pod naponom,
- ako je radnik na periodičnim proverama pokazao zadovoljavajuće rezultate u pogledu obučenosti za određenu vrstu rada i psihofizičke sposobnosti.

### **2.1.6. Zaštitna sredstva za rad u električnim postrojenjima**

Za zaštitu od električnog udara, delovanja električnog luka, produkata gorenja i pada sa visine, pri izvođenju radova na elektroenergetskim objektima koriste se (slika 73):

- izolacione motke, izolaciona klešta za osigurače i za električna merenja i induktori napona,
- izolaciona sredstva za radove pod naponom i elektro-monterski alat sa izolacionim ručicama – držačima,
- elektro-izolacione rukavice, elektro-izolaciona obuća, izolacione prostirke i prekrivači i izolaciona postolja,
- prenosne naprave za uzemljivanje i kratko spajanje,
- sredstva za ograđivanje i izolovanje od delova pod naponom i oznake upozorenja,
- zaštitne naočare, kožne rukavice, gas maske, sigurnosni pojas, osiguravajuća užad i zaštitni šlem i druga odgovarajuća zaštitna sredstva.

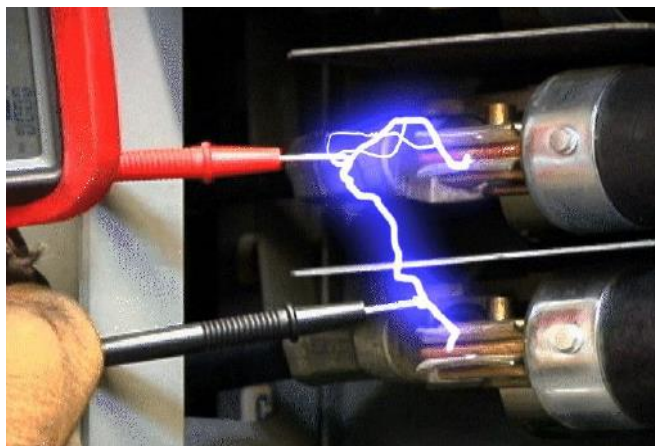


**Slika 73: Zaštitna sredstva za rad u električnim postrojenjima**

### **2.1.7. Bezbednost električnog merenja**

Pravilno dimenzionisanje elemenata električnog postrojenja, njihova zaštita i uvođenje mera za zaštitu čoveka od električnog udara (zaštita od direktnog dodira, zaštita od indirektnog dodira i istovremena zaštita od direktnog i indirektnog dodira) obezbeđuje da se sačuva imovina i ne ugrozi ljudski život, pri korišćenju električnih uređaja. Da bi se zaštitio ljudski život pri radu u električnom postrojenju, treba se pridržavati određenih pravila i koristiti zaštitna sredstva prilagođena konkretnim situacijama. Često se pri radu sa uređajima pod naponom koriste najrazličitiji merni uređaji. Ako merni uređaj nije izabran pravilno, može doći do njegovog uništenja, pri čemu se ugrožava život korisnika mernog uređaja.

U slučaju nepravilnog korišćenja ili izbora neodgovarajućeg tipa mernog uređaja može doći do iznenadne pojave električnog luka, (slika 74). Električni luk traje kratko vreme, pri čemu se razvijaju visoke temperature, koje mogu ozlediti rukovaoca. Električni luk se može pojaviti usled pojave kratkog spoja u instalaciji, izazvanog kratkog spoja od strane čoveka sa mernim uređajem ili nekim alatom i usled pojave prenapona u instalaciji, koja može biti posledica isključivanja induktivnih potrošača, uključivanja raznih potrošača, lošeg rada uređaja i udara groma.

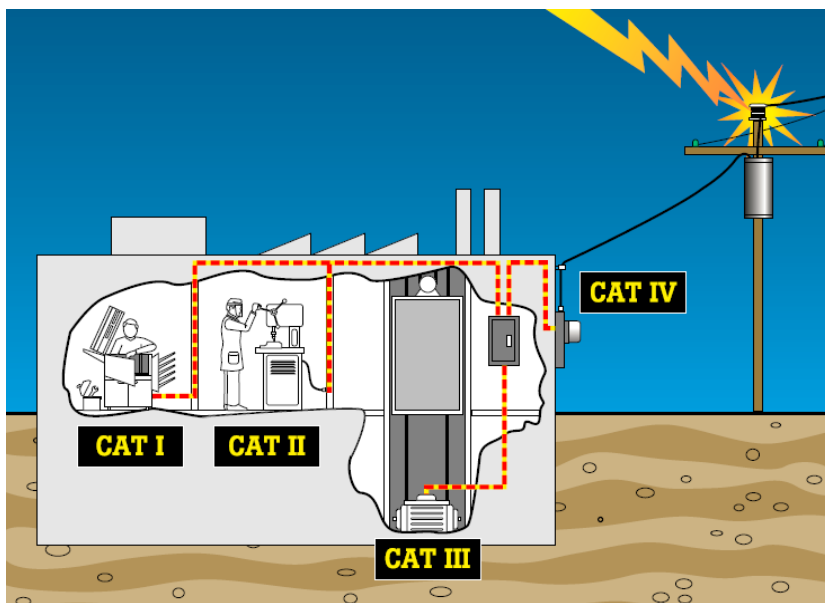


**Slika 74: Pojava električnog luka pri merenju sa multimetrom**

Da bi se pojava električnog luka i oštećenja mernog uređaja svela na minimum, definisane su električne zone merenja, odnosno izvršena je kategorizacija mernih uređaja. Po standardu IEC 61010 postoje četiri električne zone merenja, odnosno kategorije: CAT I, CAT II, CAT III i CAT IV. Kategorizacija je izvršena na osnovu nivoa energije naponskog impulsa. Što je lokacija merenja bliža izvoru napajanja (generatoru), to je ova energija veća, pa je i kategorizacija veća.

Kategorizacija po električnim zonama je prikazana na slici 75. U prvu kategoriju (CAT I) spadaju uređaji koji se u električnom smislu spajaju na priključke koji su najudaljeniji od centralnog razvoda. To su razni elektronski uređaji malih snaga

(računarska, audio, video i slična oprema). U drugu kategoriju (CAT II) spadaju najrazličitiji prenosni električni uređaji manjih snaga, koji se najčešće priključuju na monofazni napon, putem utičnica. Treća kategorija (CAT III) je mesto koje obično čini centralno čvorište napajanja. Tu spadaju i svi podrazvodi, pa se u suštini radi o samoj električnoj trofaznoj instalaciji u domaćinstvima i industriji. U najvišu kategoriju (CAT IV) spadaju mesta gde se objekti priključuju na električnu distributivnu mrežu, razvodna postrojenja i elektrane.



Slika 75: Podela kategorija po električnim zonama

Tabela 2: Kategorizacija po električnim zonama daje pregled kategorizacije mernih uređaja po električnim zonama koji su namenjeni za merenja u električnim instalacijama niskog napona ( $U < 1000V$ ).

Prilikom izbora mernog uređaja pored zadovoljavajućeg maksimalnog merenog naponskog nivoa (600V ili 1000V), potrebno je obratiti pažnju i na mesto primene. Na primer instrument sa oznakom CAT II napona 1000V (oznaka CAT II-1000V) može izdržati isti impulsni napon kao instrument sa oznakom CAT III napona 600V (oznaka CAT III-600V), što se vidi iz Tabela. Ovo sa stanovišta bezbednog rada sa mernim uređajem znači isti nivo bezbednosti (oba instrumenta izdržavaju impulsni napon do 6kV), s tim da su različite mogućnosti merenja naponskih nivoa.

Instrument sa oznakom CAT II-1000V može da meri veći napon od instrumenta sa oznakom CAT III-600V.

**Tabela 2: Kategorizacija po električnim zonama**

| Merni uređaji za naponski nivo manji od 1000V |                               |                                                             |
|-----------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Kategorija                                    | Mesto merenja                 | Primer                                                      |
| <b>CAT I</b>                                  | Elektronski uređaji           | Elektronika malog i niskog napona                           |
| <b>CAT II</b>                                 | Monofazni uređaji u kućištu   | Prenosni i kućni uređaji                                    |
| <b>CAT III</b>                                | Trofazni sistem i osvetljenje | Električna instalacija u domaćinstvima, industriji          |
| <b>CAT IV</b>                                 | Trofazna distributivna mreža  | Tačke spajanja na distributivnu mrežu, razvodna postrojenja |

**Tabela 3: Maksimalni nivoi radnog i impulsnog napona po kategorijama**

| Kategorija     | Maksimalni radni napon | Amplituda impulsnog napona |
|----------------|------------------------|----------------------------|
| <b>CAT I</b>   | 600V                   | 2500V                      |
| <b>CAT I</b>   | 1000V                  | 4000V                      |
| <b>CAT II</b>  | 600V                   | 4000V                      |
| <b>CAT II</b>  | 1000V                  | 6000V                      |
| <b>CAT III</b> | 600V                   | 6000V                      |
| <b>CAT III</b> | 1000V                  | 8000V                      |
| <b>CAT IV</b>  | 600V                   | 8000V                      |
| <b>CAT IV</b>  | 1000V                  | 12000V                     |

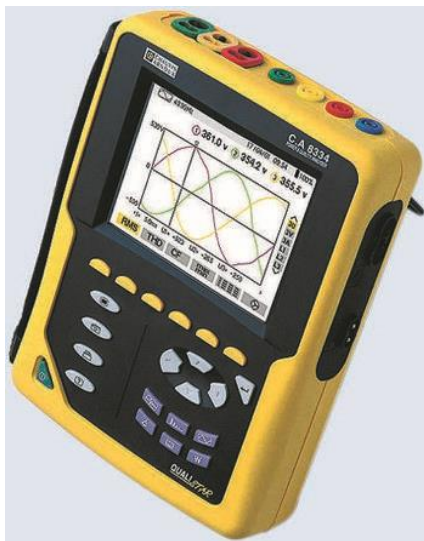
Usled neusaglašenosti izbora kategorije mernog uređaja i merenja u električnoj zoni može doći do uništenja mernog uređaja (slika 76) i/ili povrede rukovaoca.



Slika 76: Pojava električnog luka na mernom uređaju

## 2.2. Uređaj za analizu kvaliteta električne energije CA 8332

Trofazni merni uređaji za analizu kvaliteta električne energije (AKVEE) koji se koriste na praktičnom delu predmeta “Kvalitet električne energije” nose oznaku C.A 8332 i C.A 8334, proizvođača Chauvin Arnoux. Na slici 77 je prikazan izgled AKVEE.



Slika 77: Izgled analizatora kvaliteta električne energije

Ovi merni uređaji su kompaktni, otporni na udar, ergonomski dizajnirani i imaju lako razumljiv korisnički pristup. Po standardu IEC 61010 spadaju u kategoriju CAT III/1000V i CAT IV/600V. Osnovne veličine koje se mere i prikazuju su:

- efektivna vrednost naizmeničnog napona do 480 V (faza–neutralni vod) i 960 V (faza–faza) za dvožično, trožično i četvorožično merenje,
- efektivna vrednost naizmenične struje do 6500A,
- učestanost mreže 50Hz i 60 Hz,
- aktivna, reaktivna i prividna snaga po fazama i zbirno,
- ukupno harmonijsko izobličenje napona i struje do 50. reda,
- sračunata vrednost struje kroz neutralni provodnik,
- sračunata vrednost vršnog sačinilaca (engleski: crest factor),
- sračunata vrednost K –sačinioaca (engleski: K factor),
- kratkotrajni fliker (engleski: short term flicker),
- sračunata vrednost nesimetrije napona i struje,
- vrednost sačinioaca pomeraja (faktor snage), sačinioac izobličenja i sačinioac snage.

### **2.2.1. Sadržaj mernog kompleta AKVEE C.A 8332 i C.A 8334**

Komplet za merenje kvaliteta električne energije sadrži sledeće elemente:

- ▶ merni uređaj,
- ▶ kabel za napajanje mernog uređaja 230V/50Hz,
- ▶ set kablova u boji za merenje napona (4 komada),
- ▶ set štipaljki u boji, za neposredno spajanje kablova na merne tačke radi merenja napona (4 komada),
- ▶ strujna klešta oznake MN93A, bojom kodirana, za merenja struje do 5A ili do 100A (3 komada),
- ▶ strujne sonde AmpFLEX, bojom kodirana, za merenja struje do 6500A (3 komada),
- ▶ komunikacioni kabel sa galvanskim odvajanjem za prenos podataka na računar.

Pored fabričkog kompleta pri merenju se koristi još i sledeća oprema:

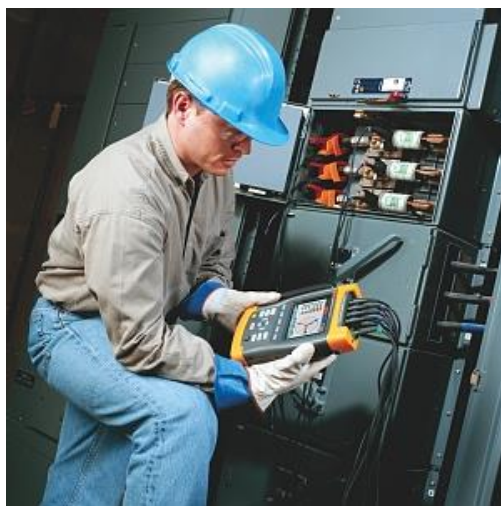
- ▶ digitalni multimetar za merenje napona,
- ▶ višefunkcionalna strujna klešta za merenje struje,
- ▶ produžni kabel za napajanje AKVEE,
- ▶ razni alati,
- ▶ zaštitna oprema.

Za ispravno i bezbedno rukovanje analizatorom kvaliteta električne energije (AKVEE) neophodno je pažljivo pročitati uputstvo za rukovanje AKVEE i uputstvo za laboratorijske vežbe! Tokom izvođenja vežbi u svakom trenutku postupati u skladu sa zahtevima i smernicama uputstva!

Ispravno i bezbedno korišćenje AKVEE podrazumeva da samo ovlašćeno i osposobljeno lice rukuje sa njim, da se postupa prema uputstvu i da se poštuju pravila korišćenja, radi prevencije neželjenih događaja na mestima merenja.

Pri rukovanju sa AKVEE postoji opasnosti od neželjenog dejstva električne energije na čoveka!

Pri radu na terenu, obavezno koristiti odgovarajuću zaštitnu opremu, kao što je prikazano na slici 78.



**Slika 78: Pravilno korišćenje merne opreme sa zaštitnom opremom**

### **UPOZORENJE!**

**Tokom izvođenja vežbu raditi po uputstvu i ponašati se u skladu sa pravilima ponašanja u laboratoriji i na terenu!**



**Zabranjeno je priključenje merne opreme bez nadzora nadležne osobe! Postoji opasnost od neželjenog dejstva električne energije na čoveka (električni udar) i oštećenja opreme!**

**U slučaju bilo kakvih nejasnoća obratiti se nadležnoj osobi!**

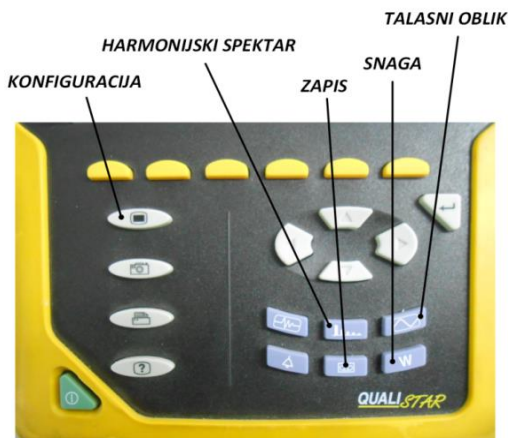
### 2.2.2. Kratko uputstvo za rukovanje sa AKVEE C.A 8332 i C.A 8334

Utvrđivanje kvaliteta električne energije, odnosno merenje parametara električne energije se obavlja sa mernim uređajem koji se naziva AKVEE, oznake C.A 8332B ili C.A 8334B, čiji je izgled prikazan na slici 79, levo. Priključci za merenje napona i struje na instrumentu su prikazani na slici 79, desno. Detaljno objašnjenje za podešavanje AKVEE se može naći u korisničkom uputstvu: Three phase power quality analyser C.A 8332/C.A 8334 – User's manual. Sledi skraćeno uputstvo za podešavanje mernog instrumenta, koje je dovoljno da se sprovedu merenja.



Slika 79: Izgled AKVEE C.A 8332B / C.A 8334B sa strujnim i naponskim priključcima

Pre priključenja sonde i kablova na merne tačke, merni uređaj mora biti ispravno podešen. Mod za podešavanje uređaja se bira tipkom KONFIGURACIJA. Slika 80 prikazuje spomenutu i ostale tipke koje se koriste tokom vežbe i služe za biranje pojedinih modova rada uređaja.

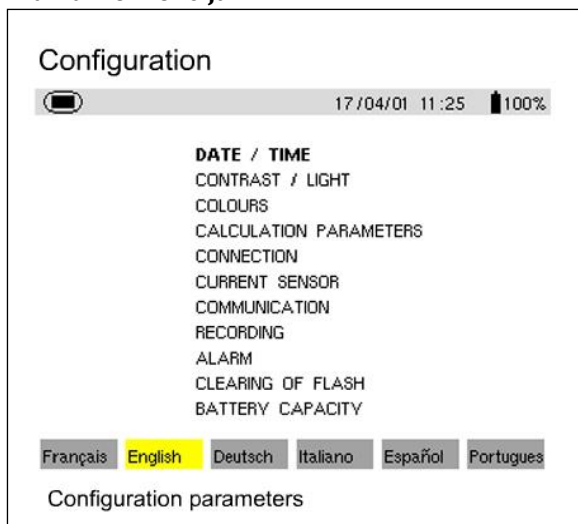


Slika 80: Tipke za biranje moda instrumenta

Posle pritiska tipke KONFIGURACIJA na ekranu uređaja se pojavljuju parametri za podešavanje uređaja, kao što je prikazano na Slika 81: **Parametri za konfigurisanje AKVEE**

Najbitniji parametri koji se moraju proveriti i podesiti u modu podešavanja su:

- **datum i vreme** (date/time),
- **način proračuna** (calculation parameters),
- **način priključenja** (connection),
- **tip strujnog senzora** (current sensor),
- **odabir merenih vrednosti za zapis** (recording) i
- **nominalna frekvencija**.



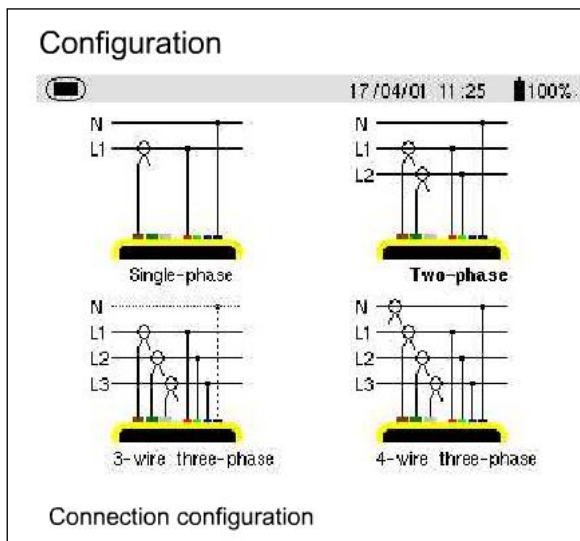
Slika 81: Parametri za konfigurisanje AKVEE

**Datum i vreme** je bitno podesiti kada se vrši dugotrajno merenje, pri čemu se izabrani parametri električne energije zapisuju u memoriju mernog uređaja.

**Način proračuna** se podešava tako da se tokom analize uzimaju u obzir harmonici, koji se javljaju na mernom mestu.

Moguća su četiri načina priključenja mernog uređaja na merno mesto. Na slici 82 se vidi izgled ekrana posle izbora parametra **način priključenja**, koji služi za izbor načina priključenja naponskih kablova i strujnih sondi mernog uređaja. Način priključenja zavisi od tipa razvodnog sistema (TN, TT ili IT) i od mogućnosti priključenja na merno mesto. Kao što se vidi, merenje može biti monofazno, dvofazno, trofazno trožično ili trofazno četvorožično merenje. Bez obzira na način priključenja mrežni napon mora biti doveden na naponski priključak V1, radi sinhronizacije uređaja sa mrežnom učestanošću. Kod trofaznog četvorožičnog

merenja prikazuje se proračunata struja nultog voda, koja se dobija na osnovu izmerenih faznih struja.



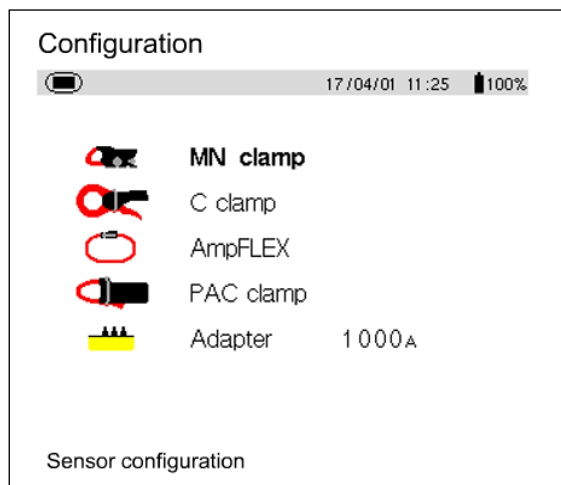
Slika 82: Odabir načina priključenja

Na osnovu očekivanih vrednosti struja u instalaciji biraju se odgovarajuće strujne sonde. U mernom setu su na raspolaganju dve vrste strujnih sondi; strujna klešta oznake MN93A za merenje struje do 100A (slika 83, levo) i strujna sonda oznake AmpFLEX za merenje struje do 6500A (slika 83, desno).



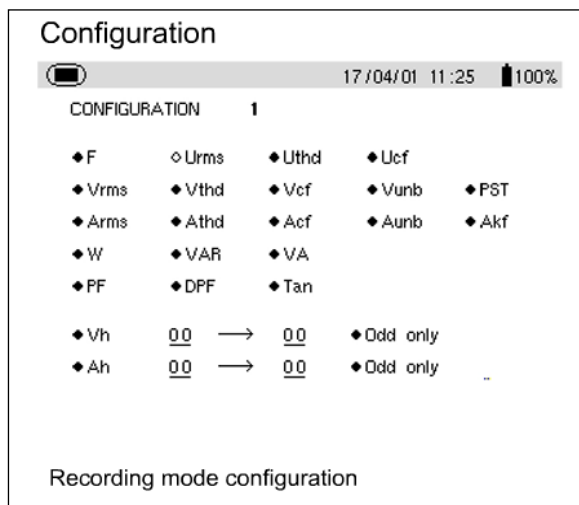
Slika 83: Strujna klešta MN93A i strujna sonda AmpFLEX

Pored fizičkog izbora sondi treba izvršiti i softversko podešavanje prilikom konfigurisanja uređaja. Slika 84 prikazuje izgled ekrana posle izbora parametra **podešavanje sonde**, sa kojim se vrši izbor odgovarajuće strujne sonde.



Slika 84: Izbor strujnih sondi

Ako se želi zapis merenih vrednosti u internu memoriju, mora se izabrati opcija **odabir merenih vrednosti za zapis**, prikazan na slici 85. U ovom modu se biraju parametri električne energije koji će se zapisivati u memoriju mernog uređaja.

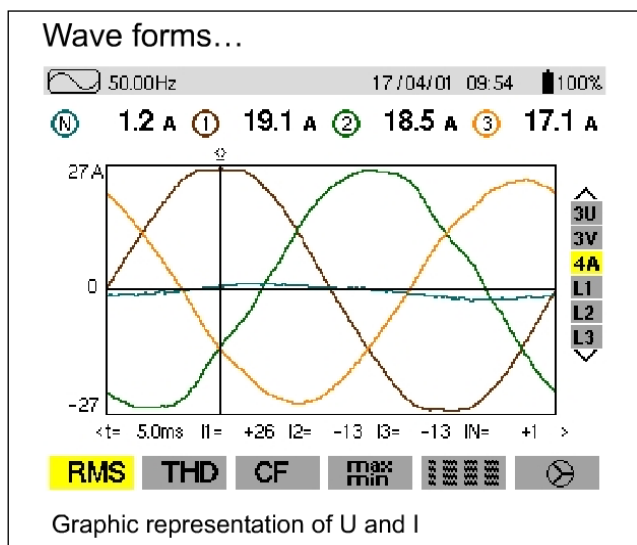


Slika 85: Mod PODEŠAVANJE, parametra zapis

Opcija **nominalna frekvencija** u modu KONFIGURACIJA služi za izbor frekvencije napona. Bira se između vrednosti 50Hz ili 60Hz.

Nakon osnovnog podešavanja AKVEE, pristupa se priključenju prvo naponskih provodnika, a zatim strujnih mernih sondi na unapred odabrane merne tačke. Pre

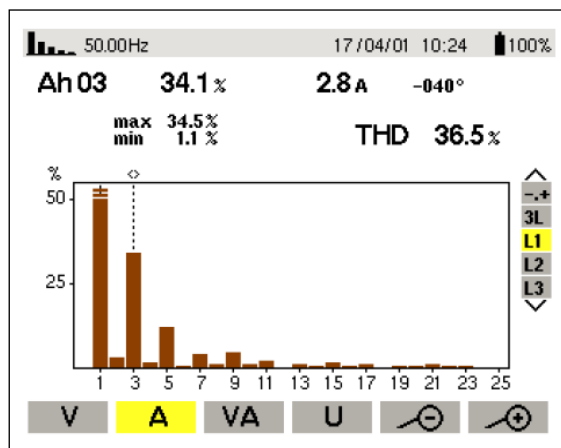
priključenja uređaja na merne tačke podesiti AKVEE da se mogu posmatrati talasni oblici merenih napona i struje. Talasni oblici napona i struje se mogu posmatrati na ekranu mernog uređaja, nakon stiskanja tipke TALASNI OBLIK (videti sliku 80). Izgled ekrana u ovom modu je prikazan na slici 86.



Slika 86: Mod TALASNI OBLIK

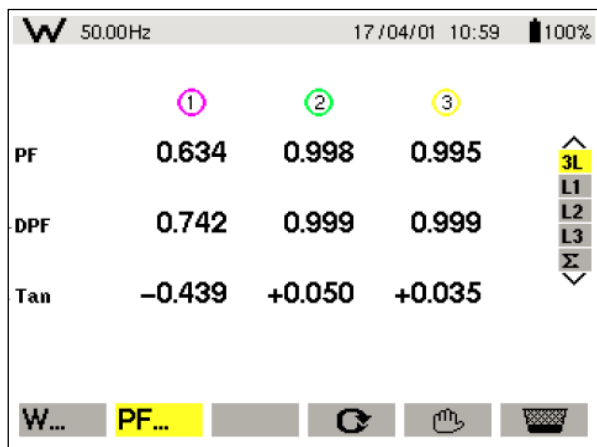
Nakon priključenja naponskih provodnika i strujnih sonde sa ekrana se mogu očitati efektivne vrednosti napona i struja po fazama, šetajući se po desnoj strani ekrana pomoću tipki sa strelicama (3U, 3V, 4A, L1, L2, L3). Pored efektivne vrednosti, pomoću žutih tipki koji se nalaze ispod displeja, mogu se očitati vrednosti ukupnog harmonijskog izobličenja (THD), krest faktor (CF), dostignute apsolutne maksimalne i minimalne efektivne vrednosti tokom merenja (max/min), ostali parametri kao što su K faktor, jednosmerna komponenta, faktor distorzije. Stiskanjem krajnje desne žute tipke može se pogledati fazorski dijagram napona i struja.

U modu HARMONIJSKI SPEKTAR (slika 87), koji se bira pritiskanjem odgovarajuće tipke sa prikazom harmonijskog spektra (videti sliku 80) mogu se očitati trenutne vrednosti pojedinačnih harmonika napona, struje i snage (V, A, VA, U).



Slika 87: Izgled ekrana u modu HARMONIJSKI SPEKTAR

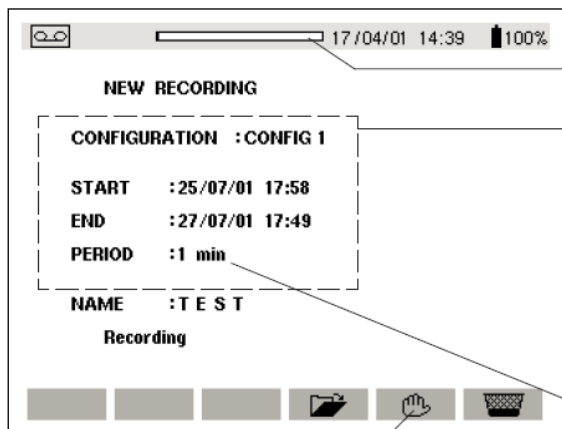
U modu SNAGA (slika 88), koji se bira stiskanjem odgovarajuće tipke sa oznakom W (slika 80) mogu se očitati trenutne vrednosti snage po fazama, ukupna snaga, i faktori snage ( $W...$ ,  $PF...$ ,).



Slika 88: Izgled ekrana u modu SNAGA

U modu ZAPIS (slika 89), koji se bira pritiskanjem odgovarajuće tipke sa prikazom kasete za snimanje (videti sliku 80), vriši se priprema za merenje čiji se rezultati zapisuju u internu memoriju AKVEE. Prvo se proverava da li je odabrana odgovarajuća konfiguracija (bira se jedna od četiri), koja je definisana u modu PODEŠAVANJA pod opcijom **odabir merenih vrednosti za zapis**. Nakon toga se unosi početni datum i vreme merenja, kao i datum i vreme završetka merenja. Pre

startovanja merenja potrebno je izabrati vreme usrednjavanja koje se kreće u granicama o 1s do 15 minuta. Mogućnost izbora željenog vremena usrednjavanja zavisi od dužine intervala merenja i od broja izabranih parametara koji se žele memorisati. Nakon izbora vremena usrednjavanja zadaje se ime fajla u kom se zapisuju parametri merenja i pokreće se merenje stiskanjem tastera za potvrdu (ENTER).



Slika 89: Izgled ekrana za mod ZAPIS

Po završetku merenja memorisani fajl se specijalnim softverom koji se dobija uz AKVEE prebacuje na računar u formatu imefajla.xls.

### 2.3. Uređaj za analizu kvaliteta električne energije FLUKE 43 B

Na praktičnom delu kursa iz predmeta “Kvalitet električne energije” koristi se i monofazni merni uređaji za analizu kvaliteta električne energije, proizvođača FLUKE sa oznakom Fluke 43B. Na slici 90 je prikazan izgled AKVEE.

Ovi merni uređaji su kompaktni, otporni na udar, ergonomski dizajnirani i imaju lako razumljiv korisnički pristup. Po standardu IEC 61010 spadaju u kategoriju CAT III/600V. Osnovne veličine koje se mere i prikazuju su:



**Slika 90: Izgled Fluke 43B**

- efektivna vrednost naizmeničnog napona do 500 V,
- efektivna vrednost naizmenične struje do 1250kA,
- frekvencija mrežne učestanosti 40Hz do 70 Hz,
- aktivna, reaktivna i prividna snaga,
- ukupno harmonijsko izobličenje napona i struje do 50. reda,
- sračunata vrednost K –sačinilaca (engleski: K factor),
- vrednost sačinilaca pomeraja (faktor snage), sačinilac izobličenja i sačinilac snage.
- polazne struje do 1000A,
- merenje otpora, kapaciteta, temperature, provodnosti.

### **2.3.1. Sadržaj mernog kompleta AKVEE Fluke 43B**

Komplet za merenje kvaliteta električne energije sadrži sledeće elemente:

- ▶ merni uređaj,
- ▶ adapter za napajanje mernog uređaja 230V/50Hz,
- ▶ set kablova za merenje napona (2 komada),
- ▶ set štipaljki, za neposredno spajanje kablova na merne tačke radi merenja napona (2 komada),
- ▶ strujna klešta oznake i400S (1 komad),
- ▶ komunikacioni kabel sa galvanskim odvajanjem za prenos podataka na računar.

Za ispravno i bezbedno rukovanje analizatorom kvaliteta električne energije (AKVEE) neophodno je pažljivo pročitati uputstvo za rukovanje AKVEE i uputstvo za laboratorijske vežbe! Tokom izvođenja vežbi u svakom trenutku postupati u skladu sa zahtevima i smernicama uputstva!

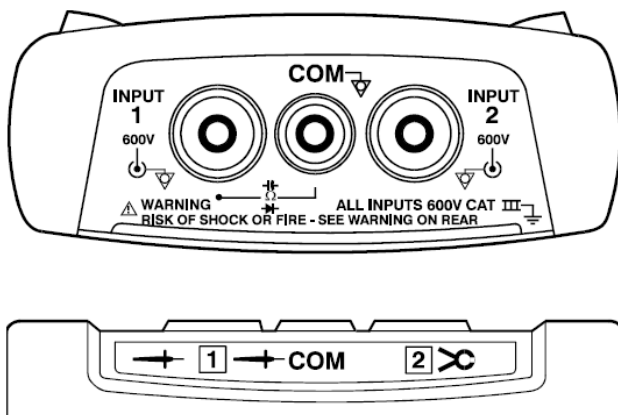
Ispravno i bezbedno korišćenje AKVEE podrazumeva da samo ovlašćeno i osposobljeno lice rukuje sa njim, da se postupa prema uputstvu i da se poštuju pravila korišćenja, radi prevencije neželjenih događaja na mestima merenja.

Pri rukovanju sa AKVEE postoji opasnosti od neželjenog dejstva električne energije na čoveka!

### 2.3.2. Kratko uputstvo za rukovanje sa AKVEE Fluke 43B

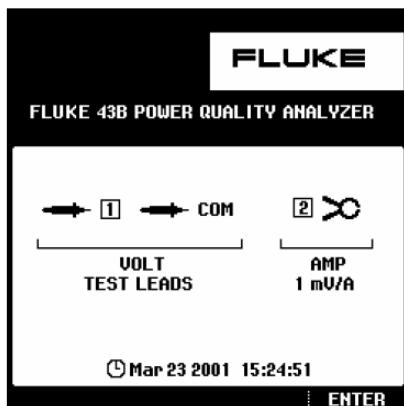
Detaljno objašnjenje za podešavanje AKVEE se može naći u korisničkom uputstvu: Fluke 43B Power Quality Analyzer – Users manual. Sledi skraćeno uputstvo za podešavanje mernog instrumenta, koje je dovoljno da se sprovedu merenja.

Priključci za merenje napona i struje na instrumentu su prikazani na slici 91. Pažljivo spojiti na odgovarajuće ulazne priključke kablove za merenje napona i strujnu sondu i400S. Pomoću preklopke na strujnoj sondi izabrati željeni merni opseg struje.



**Slika 91: Izgled naponskih i strujnih priključaka Fluke 43B**

Po uključenju AKVEE izgled displeja je kao na slici 92. Proveriti da li se osetljivost (mV/A) strujnih klešta sa ekrana poklapa sa izborom putem preklopke na strujnim kleštima. Ako se osetljivost ne poklapa potrebno je izabrati osetljivost koja je izabrana sa preklopkom na strujnim kleštima.



Slika 92: Izgled ekrana nakon uključanja AKVEE

Po stiskanju tipke ENTER ulazi se u osnovni meni čiji se izgled vidi na slici 93. Bira se opcija INSTRUMENT SETUP. Potom se ulazi u mod PROBES i bira se odgovarajuća osetljivost strujnih klešta.



Slika 93: Izgled osnovnog menija mernog uređaja

Posle osnovnog podešavanja bira se u osnovnom meniju opcija VOLT/AMPS/HERTZ.

Povezati naponske sonde i strujna klešta na merno mesto. Na displeju se pojavljuju talasni oblici napona i struje i njihove efektivne vrednosti. U opciji POWER se prikazuje aktivna, reaktivna i prividna snaga, PF i DPF. Izborom opcije HARMONICS očitavaju se ukupna harmonijska izobličenja, prikazuje se harmonijski spektar merenih veličina.

## **2.4. Uvodna merenja sa AKVEE CA 8332B u laboratorijskim uslovima**

Na uvodnim merenjima u laboratoriji sa AKVEE se meri napon i struja na trofaznom asinhronom motoru. Zbog postojanja opasnosti od ozlede prouzrokovane mehaničkim dejstvom rotirajućih delova motora i dejstvom električne struje, slede opšta pravila ponašanja u laboratoriji, koje su studenti obavezni da poštuju i primenjuju. U suprotnom, dežurno lice ima obavezu da zabrani dalji boravak studenta na laboratorijskim vežbama!

### **UPOZORENJE!**

**Tokom izvođenja vežbu raditi po uputstvu i ponašati se u skladu sa pravilima ponašanja u laboratoriji i na terenu!**



**Zabranjeno je priključenje merne opreme bez nadzora nadležne osobe! Postoji opasnost od neželjenog dejstva električne energije na čoveka (električni udar) i oštećenja opreme!**

**U slučaju bilo kakvih nejasnoća obratiti se nadležnoj osobi!**

Opšta pravila ponašanja u laboratoriji:

- ▶ Laboratorijskoj vežbi pristupiti sa najvećom mogućom ozbiljnošću. Neprimereno ponašanje tokom izvođenja laboratorijskih vežbi se ne toleriše!
- ▶ U slučaju bilo kakvih nejasnoća, nedoumica u vezi izvođenja laboratorijskih vežbi, obratiti se dežurnoj osobi u laboratoriji.
- ▶ Zabranjeno je dodirivanje delova uređaja, koji su pod naponom! Postoji opasnost od neželjenog dejstva električne struje (strujni udar), opasnog po život! Svaki deo instalacije i uređaja čiji je električni potencijal različit od potencijala stajališta za više od 50V naizmenično, opasan je po život!
- ▶ U laboratoriji je zabranjeno obavljati bilo kakva povezivanja i razvezivanja električnih uređaja, sklopova i delova instalacije pod naponom!
- ▶ Tokom izvođenja vežbi studenti smeju priključiti uređaj, instrument ili strujno kolo na izvor napona, tek nakon dobijene dozvole od dežurne osobe u laboratoriji!
- ▶ U slučaju nepoznavanja približne vrednosti merenih veličina, korišćene merne uređaje podesiti na najveće merne opsege!
- ▶ Električnu opremu opterećivati u predviđenim granicama, u skladu sa uputstvom.

- ▶ Prilikom rada sa neizolovanim autotransformatorom postoji opasnost od strujnog udara čak i u slučaju kada je izlazni napon podešen na nultu vrednost.
- ▶ Po završetku vežbi sve izvore napajanja isključiti, a pre isključenja regulacionih autotransformatora smanjiti napon postavljanjem klizača u nulti položaj!
- ▶ Pre puštanja motora u rad proveriti da li postoje prepreke za nesmetano okretanje rotora. Svi koji se nalaze u blizini rotirajućih delova motora moraju se udaljiti!

### **2.4.1. Postupak merenja sa CA 8332B/ CA 8334B**

Merni uređaj spojiti na mrežni napon i izvršiti njegovo uključanje. U skladu sa uputstvom za AKVEE izvršiti podešavanja mernog uređaja (mod podešavanje) tako da se može izvršiti merenje na trofaznom asinhronom motoru.

Trofazni asinhroni motor se napaja putem trofaznog regulacionog autotransformatora. Nakon uključanja motor radi u praznom hodu. Sva povezivanja i razvezivanja se rade u beznaponskom stanju!

Nakon izvršenog podešavanja AKVEE, izvršiti spajanje naponskih kablova i strujnih sonde na ulaze AKVEE i odgovarajuće tačke na motoru, u skladu sa pisanim i usmenim uputstvom. Neposredno pre puštanja motora u rad, odnosno uključanja trofaznog regulacionog autotransformatora (TRAT), proveriti da li se rotor motora slobodno okreće. Svi treba da se udalje od motora.

#### **POSTUPAK UKLJUČENJA TRAT:**

- proveriti da li je klizač za podešavanje napona na TRAT u nultom položaju. Ako nije postaviti ga u nulti položaj,
- priključiti TRAT na mrežni napon,
- uključiti grebensku sklopku koja se nalazi na TRAT,
- u slučaju ispada automatskih osigurača, sva tri uključiti, kako na samom TRAT, tako i na laboratorijskom stolu,
- stisnuti dugme za uključanje na zaštitnoj sklopki,
- postepeno podizati napon na izlaznim priključcima TRAT pomoću obrtnog klizača,
- proveriti da li se rotor okreće,
- ako se rotor okreće podizati napon do 230V,
- ako se rotor ne okreće isključiti TRAT i ustanoviti grešku.

#### **POSTUPAK ZA ISKLJUČENJE TRAT:**

- spustiti napon na izlaznim priključcima TRAT na nulu pomoću rotacionog klizača,
- stisnuti dugme za isključenje na zaštitnoj sklopki,
- isključiti grebensku sklopku,

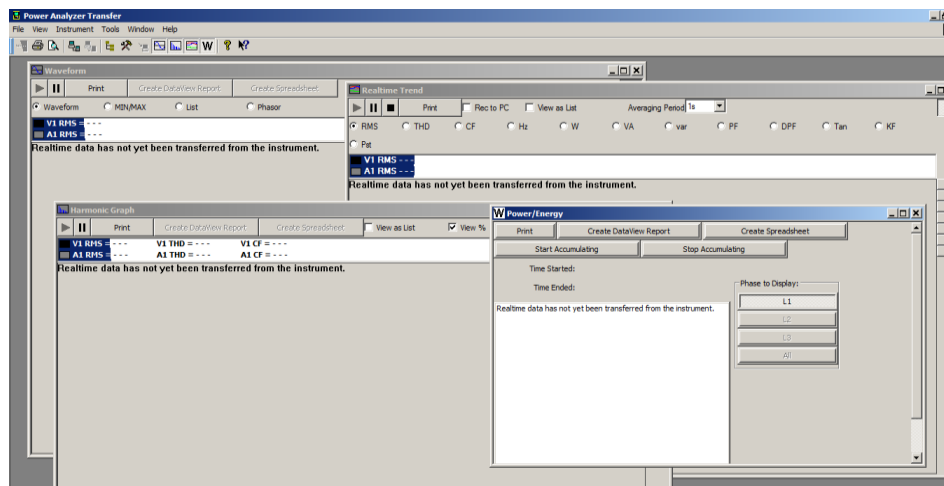
→ odspojiti TRAT od mrežnog napona.

Pošto je motor uključen, AKVEE je u modu TALASNI OBLIK, na displeju mernog uređaja se može videti talasni oblik napona i struje motora. Proći sve modove koji su objašnjeni u uputstvu za korišćenje AKVEE i postupati u skladu sa uputstvima koje izda dežurno lice u laboratoriji.

Nakon odrađene laboratorijske vežbe isključiti TRAT i odspojiti merne sonde od motora.

### Opis načina očitavanja rezultata

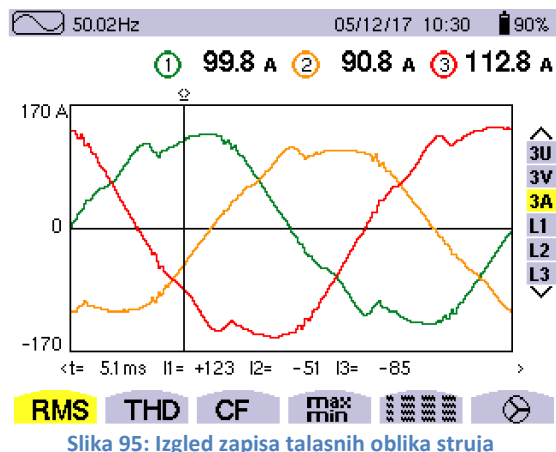
Spojiti trofazni AKVEE sa računarom putem komunikacionog kabloa sa optičkim prenosom (izvršeno galvansko razdvajanje računara od predmeta merenja, u ovom slučaju motora). Pokrenuti softver Power Analyser i uspostaviti komunikaciju sa AKVEE. Izgled ekrana sa otvorenim opcijama za prikaz trenutnih vrednosti parametara mreže, harmonika i snage je prikazan na slici 94 . Snimiti na hard disk računara najbitnije parametre koje prikazuje, meri i računa AKVEE.



Slika 94: Izgled osnovnih prozora softvera Power Analyser

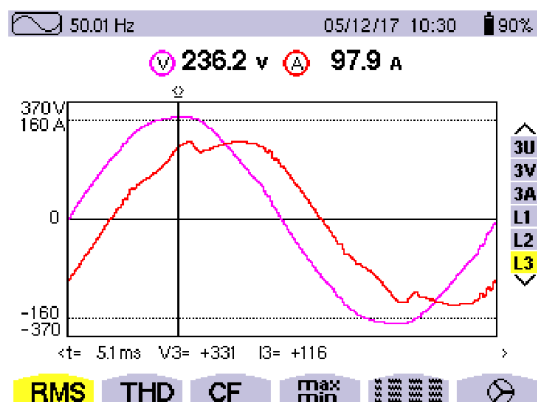
### Primer prikaza rezultata

Na slici 95 je prikazan izgled trenutne vrednosti sve tri fazne struje, sa prikazom efektivnih vrednosti za sve tri fazne struje.



Slika 95: Izgled zapisa talasnih oblika struja

Na slici 96 se vide trenutne vrednosti napona i struje jedne faze (L3). Mogu se očitati i efektivne vrednosti napona i struje. Izborom opcije za prikaz signala po fazama može se utvrditi međusoban fazni stav između merenog napona i struje.



Slika 96: Izgled zapisa talasnih oblika napona i struje jedne faze

#### 2.4.2. Postupak merenja sa FLUKE 43B

Merni uređaj spojiti na mrežni napon i izvršiti njegovo uključenje. U skladu sa uputstvom za AKVEE izvršiti podešavanja mernog uređaja.

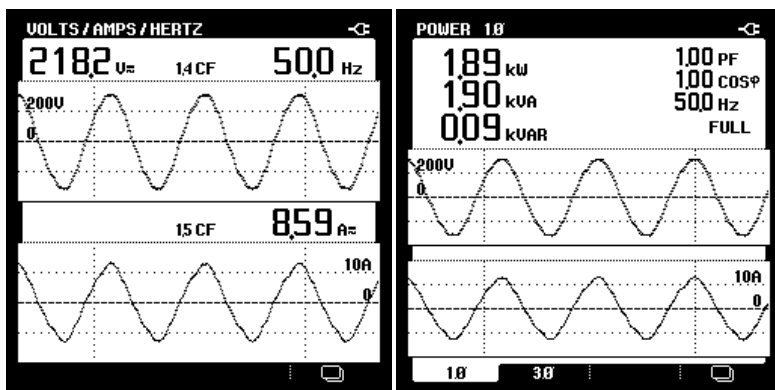
Nakon izvršenog podešavanja AKVEE, izvršiti spajanje naponskih kablova i strujne sonde na ulaze AKVEE i odgovarajuće tačke potrošaču, u skladu sa pisanim i usmenim uputstvom.

Spojiti Fluke 43B sa računarom putem optički izolovanog komunikacionog kablo. Na računaru pokrenuti softver FlukeView. Pomoću ovog softvera se merne vrednosti i talasni oblici memorišu kao slike i datoteke formata xls.

### Primer prikaza rezultata

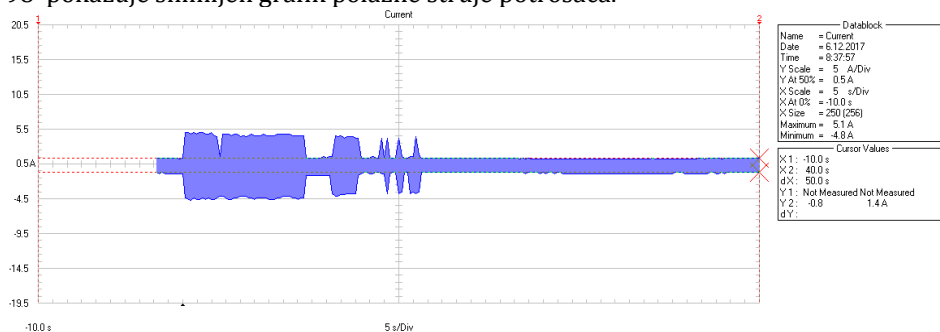
Rezultati merenja se mogu memorisati u više oblika. Na uvodnim vežbama rezultati merenja se memorišu kao slike. Sledi prikaz nekih memorisanih rezultata merenja u vidu slika.

Slika 97 sa desne strane prikazuje talasne oblike napona i struje, njihovu efektivnu vrednost, vrednost vršnog sačinilaca (CF) i frekvenciju napona. Na istoj slici desno pored talasnog oblika može se očitati (izborom opcije POWER) aktivna, prividna, reaktivna snaga, kao i vrednost sačinilaca pomeraja (PF) i snage (DPF,  $\cos\phi$ ).



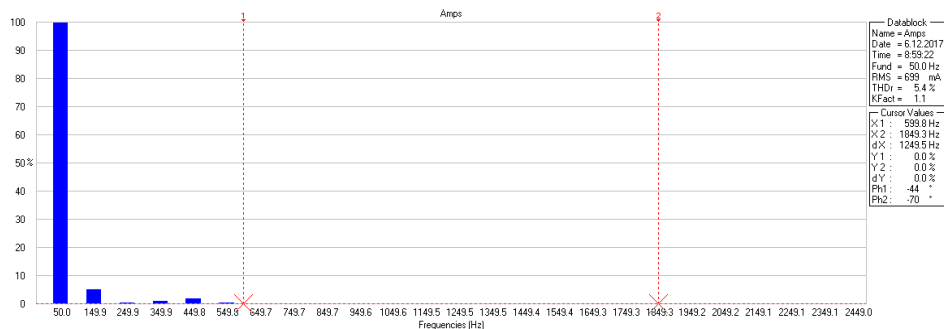
Slika 97: Slika talasnih oblika napona i struje sa vrednostima osnovnih parametara

Izborom opcije INRUSH CURRENT može se snimiti polazna struja potrošača. Slika 98 pokazuje snimljen grafik polazne struje potrošača.



Slika 1: Snimljena polazna struja potrošača

Na slici 99 je predstavljen zapis trenutne vrednosti harmonijskog spektra struje potrošača.



Slika 99: Harmonijski spektar struje

## 2.5. Merenja na terenu

Za razliku od merenja u laboratoriji, na terenu se priključenje mernog uređaja AKVEE izvodi pod naponom koji je opasan po život (niski napon, čija je efektivna vrednost 400V). Zbog toga je prilikom spajanja naponskih priključaka i strujnih sondi obavezno koršćenje zaštitne opreme; gumene rukavice i zaštitne naočare.

Pre priključenja samog mernog uređaja potrebno je razmotriti mogućnosti fizičkog priključenja naponskih priključaka i strujnih sondi. Ako se ne raspolaže sa podatkom o maksimalnim strujama koji se javljaju u pojedinim fazama, potrebno je izvršiti merenje struje sa multifunkcionalnim strujnim kleštima. U slučaju bilo kakvih nedoumica u vezi faznih, nultog i zaštitnog provodnika (na primer: nestandardne boje izolatora) potrebno je izvršiti proveru naponskih nivoa na pojedinim provodnicima sa digitalnim multimetrom.

AKVEE za napajanje koristi monofazni napon vrednosti 230V. Ako u razvodnom ormaru (RO) ne postoji monofazna utičnica napajanje treba obezbediti putem produžnog kabla, koji se spaja u najbližu utičnicu van RO ili na odgovarajuće tačke u RO koje obezbeđuju napon od 230V. U slučaju kratkotrajnih nestanka napajanja nesmetano merenje je obezbeđeno integrisanim akumulatorom u AKVEE.

Naponski provodnici se na izabrane merne tačke spajaju na različite načine; najrazličitijim štikaljkama, spajanjem na klemne zavrtanjem pod vijak ili specijalnim zašiljenim spojnicama.

U mernom setu AKVEE postoje strujna klešta i AmpFLEX sonda za merenje struje. Strujnim kleštima treba obuhvatiti kabel u kome se želi meriti struja, na način da se strujna klešta stisnu i obuhvate kabel. Posle puštanja strujnih klešta treba proveriti da li su se krajevi koji obuhvataju provodnik spojili. U suprotnom će doći do pogrešnog merenja struje. Pri merenju struja većih od 100A koristi se AmpFLEX sonda. Ovu sondu prvo treba razdvojiti stiskanjem plastičnog dela koji sondu drži spojeno. Razdvajanje treba izvršiti pažljivo, bez primene preterane sile, da ne dođe do oštećenja sonde. Nakon razdvajanja krajeva sonde, potrebno je obuhvatiti kabel i

ponovo spojiti sondu. Spajanje se vrši na način da se krajevi gurnu jedan u drugi. Kod odspajanja sondi sa provodnika opet je potrebno izvršiti stiskanje i pažljivo razdvajanje krajeva sondi.

Prilikom obuhvatanja kabla strujnim kleštima ili AmpFLEX sondom treba voditi računa o usaglašenosti strelica koji se nalaze njima i smeru toka aktivne snage. Kod potrošača tok aktivne snage je od mesta napajanja ka potrošaču, a kod elektrana od elektrane ka distributivnoj mreži.

### **2.5.1. Izbor parametara koji se čuvaju**

Parametri koji se memorišu biraju se u modu KONFIGURACIJA, u opciji **odabir merenih vrednosti za zapis**. Videti uputstvo za rukovanje sa AKVEE. Potrebno je izabrati sledeće parametre.

Frekvencija, efektivna vrednost napona, THD napona, (fazni ili međufazni napon), nesimetrija napona, efektivna vrednost struje, THD struje, K-sačinilac, aktivna snaga, reaktivna snaga, prividna snaga, faktor snage (PF),  $\cos \varphi$  (DPF), tangens ugla, sve pojedinačne harmonike napona i struja do 25 reda.

Nakon priključenja naponskih kablova i strujnih sondi na merne tačke, u modu TALASNI OBLIK memorisati sliku koja se nalazi na displeju pomoću tipke na kojoj je nacrtan fotoapararat, stiskanjem tipke minimalno 3s. Memorisanje je završeno kada se pojavi slika fotoaparata u gornjem levom uglu displeja. Potrebno je memorisati sledeće slike:

- sva fazna ili međufazna napona istovremeno,
- sve stuje istovremeno,
- stuju i napon po fazama (L1, L2, L3)
- trenutne snage po fazama i
- trenutni harmonijski spektar napona.

Zapisati trenutne vrednosti K-sačinilaca, vršnog sačinilaca (crest factor - CF), PF, DPF, DF.

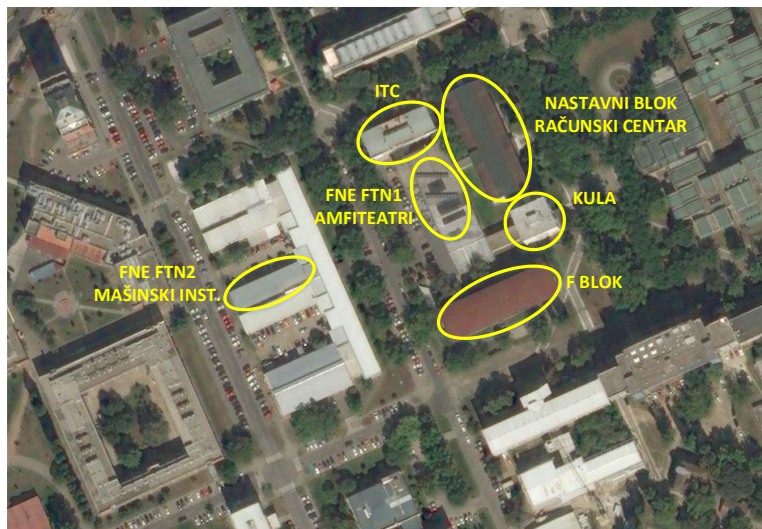
### **2.5.2. Kratak opis mernih mesta**

Merna mesta na kojima se izvode merenja kvaliteta električne energije se nalaze na dve lokacije. Jednu lokaciju čini kompleks zgrada Fakulteta tehničkih nauka, koje se vide na Slika 100: **Kompleks zgrada FTN**. Tu se nalaze sledeća merna mesta:

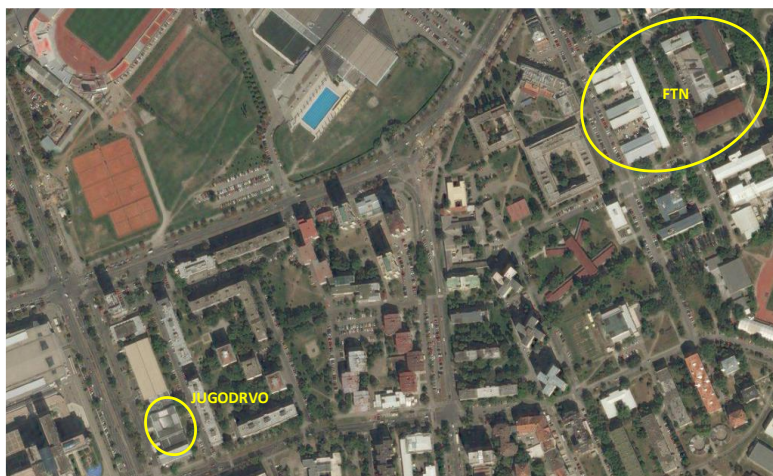
- ▶ razvodni ormar fotonaponske elektrane FTN1,
- ▶ razvodni ormar fotonaponske elektrane FTN2,
- ▶ transformatorska stanica na Mašinskom institutu,
- ▶ glavni razvodni ormar zgrade ITC,
- ▶ glavni razvodni ormar nastavnog bloka,
- ▶ razvodni ormar računarskog centra u nastavnom bloku,
- ▶ razvodni ormar amfiteatra,
- ▶ glavni razvodni ormar zgrade Kula,

- ▶ glavni razvodni ormar Bloka F,
- ▶ laboratorija Katedre za energetska elektroniku i pretvarače.

Druga lokacija gde se izvode merenja je bivša zgrada firme Jugodrvno, čija je pozicija prikazana na slici 101.



Slika 100: Kompleks zgrada FTN



Slika 101: Lokacija zgrade bivšeg Jugodrvno

### 2.5.3. Fotonaponska elektrana FTN1

Fotonaponska elektrana [35] FTN1 je puštena u rad oktobra 2011. godine. Prva je zvanično priključena fotonaponska (FN) elektrana na distributivi sistem električne energije u Vojvodini. U elektrani se nalazi inverter oznake STP8000-TL, proizvođača SMA, nominalne izlazne snage 8kW. S toga je nominalna snaga elektrane 8kW. Na inverter su spojena dva FN niza sa po 20 FN panela. Pojedinačna snaga FN panela je 240Wp. Ukupna nominalna snaga FN panela je 9600kWp.

Merenje se izvodi u razvodnom ormaru (RO) FN elektrane, slika 102. Merni uređaj se podešava za trofazno trožično merenje i priključuje se na tačku spajanja napojnog kabla elektrane sa RO elektrane. Struja se meri strujnim kleštima, na mernom opsegu 100A. Napajanje AKVEE se obezbeđuje putem monofazne utičnice koja je smeštena u RO.



Slika 102: Izgled RO FN elektrane FTN1

### 2.5.4. Fotonaponska elektrana FTN2 (string inverter)

Fotonaponska elektrana FTN2 je puštena u rad krajem 2015. godine. Sastoji se od dva string invertora i osam mikroinvertora. String invertori imaju nominalnu izlaznu snagu 5,8kW (oznaka TRIO-5.8-TL-OUTD) i 8,5kW (oznaka TRIO-8.5-TL-OUTD), oba proizvođača ABB. Mikroinvertori su nominalne snage 250W, nose oznaku MICRO-0.25-I-OUTD. Ukupna nominalna snaga FN elektrane je 16,3kW. Na

string inverter snage 5,8kW su spojena paralelno dva FN niza sa po 12 monokristalna FN panela pojedinačne nominalne snage 270Wp. Ukupna snaga FN panela iznosi 6,48kWp. Na inverter snage 8,5kW su spojena dva nezavisna FN niza sa 18, odnosno 19 polikristalna FN panela, pojedinačne snage 255Wp. Ukupna snaga FN panela je 9,435kWp. Mikroinvertori su podeljeni u dve grupe sa po četiri invertora. Svaka grupa je spojena na po jednu fazu. Na pojedinačni mikroinverter je spojen po jedan FN panel različite snage 240Wp, 255Wp (polokristalni), 270Wp (monokristalni) i 240Wp (CIS tankoslojni).

Merenja se izvode u razvodnom ormaru (RO) FN elektrane, slika 103. AKVEE se spaja na zajednički izlaz oba string invertora, pri čemu je nominalna izlazna snaga oba invertora 14,3kW. Merenje je trofazno, četvorožično. Struja se meri strujnim kleštima - merni opseg je 100A. Napajanje AKVEE se obezbeđuje putem monofazne utičnice koja je smeštena u RO.



**Slika 103: Razvodni ormar FN elektrane FTN2 i string inverter**

### **2.5.5. Fotonaponska elektrana FTN2 (mikroinverter)**

Merenja se izvode u razvodnom ormaru (RO) FN elektrane, slika 104. AKVEE se spaja na izlaze mikroinvertora, čija je ukupna snaga 2kW. Način priključenja mernog uređaja je dvofazno. Struja se meri strujnim kleštima, s tim da je merni opseg 5A. Napajanje AKVEE se obezbeđuje putem monofazne utičnice koja je smeštena u RO.



**Slika 2: Razvodni ormar FN elektrane FTN2 i mikroinverter**

### **2.5.6. Računarski centar nastavnog bloka FTN**

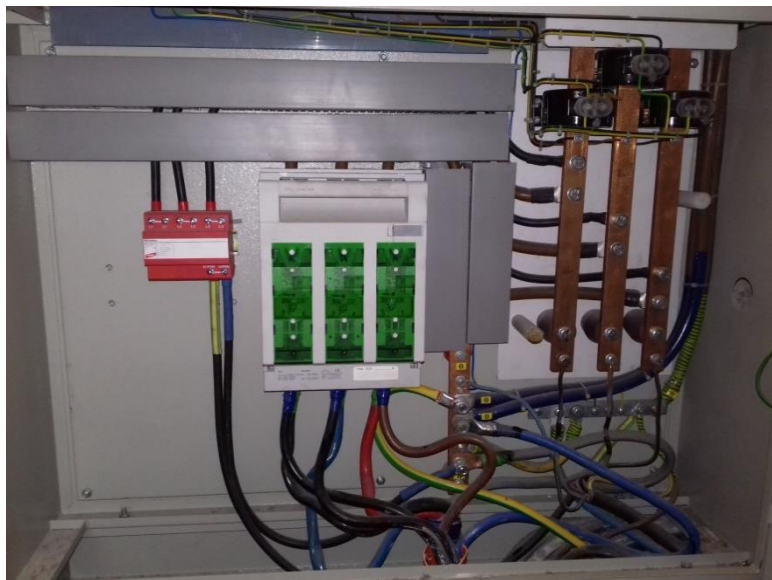
Računarski centar koji se nalazi u nastavnom bloku FTN se napaja iz GRO nastavnog bloka. U prostoriji računarskog centra je smešten RO (slika 105) odakle se napajaju računari, osvetljenje i ostali električni uređaji koji se nalaze u računarskom centru. AKVEE je potrebno podesiti za trofazno četvorožično merenje. Za merenje struje se koriste strujni klešta na opsegu 100A. GRO nema sopstvenu monofaznu utičnicu, pa je potrebno obezbediti napajanje AKVEE putem produžnog kabla.



Slika 105: Razvodni ormar u računarskom centru sa priključenim AKVEE

### 2.5.7. Nastavni bloka FTN-a

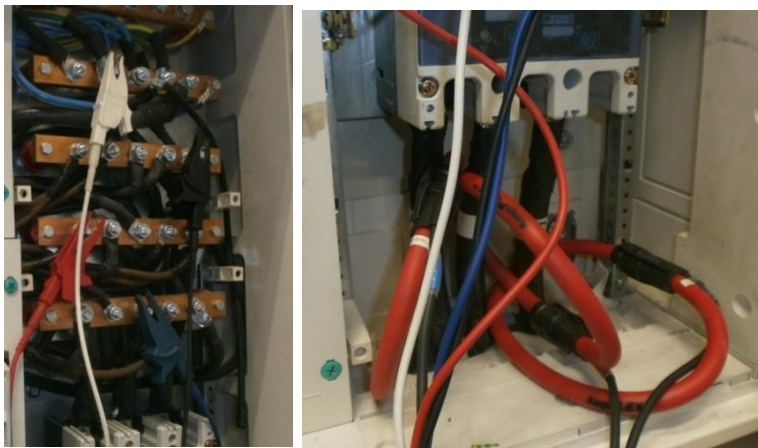
Merenje parametara kvaliteta električne energije nastavnog bloka se vrši u prostoriji gde je smešten glavni razvodni ormar (GRO). Slika 106 prikazuje izgled dela GRO gde se priključuje AKVEE. Merenje je trofazno, trožično. Na glavne osigurače GRO su paralelno spojena dva kabla. Obuhvatiti oba kabla sa AmpFLEKS sondama. U GRO se ne nalazi monofazna utičnica, pa je potrebno obezbediti napajanje AKVEE.



Slika 106: Detalj glavnog razvodnog ormara nastavnog bloka

### 2.5.8. Zgrada Jugodrava

U zgradi bivšeg Jugodrava se merenja vrše na GRO. Sa ovog mesta se pored nastavnog bloka napaja i supermarket koji se nalazi pored Jugodrava. Kao što se sa leve strane slike 107 može zaključiti, merenje sa uređajem je trofazno, četvorožično. Za merenje struje se koriste AmpFLEKS strujne sonde (slika 97, desno). GRO nema sopstvenu monofaznu utičnicu, pa se napajanje obezbeđuje putem utičnice iz prostorije gde je smešten GRO.



Slika 107: Detalji glavnog razvodnog ormara zgarde Jugodrvno, način spajanja naponskih kablova uređaja (levo) i merenje struje sa AmpFLEX strujnim sondama (desno)

### 2.5.9. Kula FTN-a

GRO odakle se napaja Kula FTN se nalazi u prizemlju zgrade. Izgled GRO (levo) i dela gde se vrši priključenje AKVEE (desno) je prikazano na slici 108. Kao što se sa desne slike da zaključiti, merenje sa uređajem je trofazno, trožično. Za merenje struje se koriste AmpFLEKS strujne sonde. GRO nema sopstvenu monofaznu utičnicu, pa je potrebno obezbediti napajanje AKVEE. Poteškoću prilikom priključenja stvara providni pleksiglas koji je snabdeven plombom, tako da se ne sme skinuti.



**Slika 108: Razvodni ormar Kule (levo) i mesto priključenja AKVEE (desno)**

### **2.5.10. Amfiteatar FTN-a**

Razvodni ormar u kome se vrši merenje kvaliteta električne energije amfiteatra napaja dva fakultetska amfiteatra, A1 i A2. Izgled celog unutrašnjeg dela, kao i dela gde se vrši priključenje AKVEE se vidi na slici 109. Merenje sa uređajem je trofazno, trožično. Za merenje struje se koriste strujna klešta podešena na strujni opseg 100A. RO nema sopstvenu monofaznu utičnicu, pa je potrebno obezbediti napajanje za AKVEE.



Slika 109: Razvodni ormar amfiteatara A1 i A2 (levo) i mesto priključenja AKVEE (desno)

### 2.5.11. Krilo "F"

GRO zgrade pod nazivom Blok F se nalazi sa spoljne strane zgrade. Oprema GRO se vidi na slici 110. Merni uređaj se podešava za trofazno, trožično merenje. Za merenje struje se koriste AmpFLEKS strujne sonde. GRO nema sopstvenu monofaznu utičnicu, pa je potrebno obezbediti napajanje AKVEE. Poteškoću prilikom priključenja stvara providni pleksiglas koji treba ukloniti da bi se merenja mogla izvesti.



Slika 110: Izgled glavnog razvodnog ormara bloka F

### 2.5.12. Mašinski institut

Unutar zgrade Mašinskog instituta postoji transformatorska stanica 10/0,4 kV/kV. Deo razvodnog postrojenja je prikazan na Slika 111: **Niskonaponski razvod u TS Mašinskog instituta (levo) i izgled bloka gde se priključuje AKVEE (desno)**

levo. Na istoj slici desno se vidi deo razvodnog postrojenja gde se vrše merenja. Merenje sa uređajem je trofazno, trožično. Za merenje struje se koriste AmpFLEKS strujne sonde. Napajanje za AKVEE se obezbeđuje putem produžnog kabla iz utičnice koja se nalazi u prostoriji gde je smeštena transformatorska stanica.



Slika 111: Niskonaponski razvod u TS Mašinskog instituta (levo) i izgled bloka gde se priključuje AKVEE (desno)

### 2.5.13. Zgrada ITC-a

U zgradi ITC merenja se vrše na GRO. Merni uređaj se priključuje na glavni napojni kabel zgrade. Slika 112 prikazuje deo GRO gde se vrši priključenje AKVEE. Merni uređaj je potrebno podesiti na trofazno, trožično merenje. Za merenje struje se koriste AmpFLEKS strujne sonde. GRO nema sopstvenu monofaznu utičnicu, pa je potrebno obezbediti napajanje AKVEE.



Slika 112: Detalj glavnog razvodnog ormara ITC sa priključenim AKVEE

### **2.5.14. Mali potrošači – razne sijalice**

U laboratoriji Katedre za energetska elektroniku i pretvarače se vrši merenje parametara kvaliteta električne energije različitih sijalica. Tipovi sijalica koje su na raspolaganju u laboratoriji su prikazane na slici 113. To su redom sijalica sa užarenim vlaknom, živina sijalica niskog pritiska (fluorescentna i štedljiva sijalica), LED reflektor, reflekt sa hlogenom sijalicom i reflektor sa natrijumovom sijalicom. S obzirom da su sve navedene sijalice monofazni potrošači, izbor načina merenja sa mernim uređajem je monofazno. Za merenje struje se koriste strujna klešta sa mernim opsegom 5A. Merni uređaj koji se koristi na ovim vežbama je monofazni AKVEE, oznake FLUKE43B, proizvođača firme Fluke.



**Slika 113: Razni tipovi sijalica i svetiljki koji se ispituju**

### **2.5.15. Mali potrošači – elektronski uređaji i računari**

U laboratoriji Katedre za energetska elektroniku i pretvarače se vrši merenje parametara kvaliteta električne energije najrazličitijih malih potrošača koji se koriste u kancelarijama, domaćinstvima. Neki lako prepoznatljivi mali potrošači su prikazani na slici 114. Svi potrošači se napajaju monofazno, naponom 230V. Način merenja sa AKVEE monofazno. Za merenje struje se koriste strujna klešta sa mernim opsegom 5A. Merni uređaj koji se koristi na ovim vežbama je monofazni AKVEE, oznake FLUKE43B, proizvođača firme Fluke.



**Slika 114: Potrošači malih snaga**

### **2.5.16. Punjač akumulatora**

Merenje parametara kvaliteta električne energije punjača akumulatora se vrši u laboratoriji Katedre za energetska elektroniku i pretvarače. Na punjač akumulatora (Slika 115) u skladu sa uputstvom potrebno je spojiti akumulator. AKVEE se podešava na monofazno merenje. Za merenje struje se koriste strujna klešta. Merni opseg (5A/100A) podesiti na 100A i u skladu sa dobijenom strujom koja zavisi od režima rada punjača (napunjenosti baterije), po potrebi smanjiti merni opseg na 5A. Napajanje AKVEE obezbediti iz utičnice laboratorijskog stola.



Slika 115: Izgled punjača akumulatora

## 2.6. Tematski istraživački rad

U sklopu tematskog (samostalnog) istraživačkog rada na predmetu studenti rade semestralni projekat „Merenje kvaliteta električne enrgije na FTN“

Cilj ovog dela nastavnog procesa je da se steknu znanja i praktična iskustva čitavog procesa određivanja nivoa kvaliteta električne energije na nekom mestu u elektroenergetskom sistemu, odnosno na nekoj zajedničkoj sabirnici (engl. *Point of Common Coupling – PCC*). Studenti se obučavaju o stručnom pristupu, organizaciji i provođenju merenja indikatora kvaliteta električne energije i to kroz sprovođenje merenja i analize rezultata u realnim uslovima rada na mreži. U toku realizacije ovog projekta primenjuju se sva do sada stečena znanja iz predmeta. Posebno je važno naglasiti da se procedura merenja, kao i kasnija analiza rezultata sprovode u potpunosti u skladu sa domaćim (srpskim) i evropskim standardom SRPS EN 50160.

Tematski istraživački rad sprovodi se kroz:

- Pripremu za istraživanje (proces obuke za merenje).
- Postupak pripreme mernog mesta i priključenje mernog uređaja.
- Postupak merenja parametara kvaliteta električne enrgije u trajanju od najmanje 7 dana.
- Postupak skidanja mernog uređaja sa mernog mesta.
- Postupak očitavanja i analize rezultata merenja.
- Izradu semestralnog rada, tj. kompletnog izveštaja sa merenja u poređenje rezultata merenja sa graničnim vrednostima iz postojećih domaćih i stranih standarda i preporuka.

- Predstavljanje rezultata istraživanja u vidu slajdova (engl. *Power Point – ppt*) u sklopu završnog seminara.

### **2.6.1. Projektni zadatak**

1. Sa mernim uređajem za merenje parametara kvaliteta električne energije izvršiti merenje na definisanoj lokaciji (sabirnici) u sklopu elektro-energetske mreže Fakulteta tehničkih nauka.

2. Merenje uraditi sa profesionalnim mernim uređajem C.A. 8332 B (za trofazna merenja), odnosno sa mernim uređajem FLUKE 43 B.

3. Uređaj priključiti na jednoj od sledećih lokacija za merenje (na bazi rasporeda merenja u grupama):

A) Izvori električne energije:

1. Mrežni priključak foto-naponske elektrane FTN 1 (8 kW).
2. Mrežni priključak foto-naponske elektrane FTN 2 (16,3 kW) – string invertori.
3. Mrežni priključak foto-naponske elektrane FTN 2 (16,3 kW) – mikroinvertori.

B) Zajedničke sabirnice u mreži FTN-a (Razvodni ormani )

4. Razvodni orman računarskog centra FTN-a (Nastavni blok, III sprat)
5. Razvodni orman Nastavnog bloka (Nastavni blok, prizemlje)
6. Razvodni orman Amfiteatri
7. Razvodni orman zgrade Kula FTN
8. Razvodni orman zgrade ITC-a
9. Razvodni orman zgrade Blok F
10. Transformatorska stanica na Mašinski instituti
11. Razvodni orman zgrade Jugodrvo
12. Razvodni orman zgrade laboratorije za građevinu

C) Karakteristični potrošači

13. Mali potrošači – računari i računarska oprema
14. Mali potrošači – razne vrste sijalica (inkandescentne, halogene, fluorescentne, kompaktne fluorescentne, LED i dr.)
15. Mali potrošači – spori (monofazni) punjači za električne automobile i bicikle.

4. Uređaj za merenje CA 8332 B priključiti trofazno, trožično ili četvorožično u trajanju od 7 dana i u intervalu 5 min.



Slika 116: Merni uređaj C.A. 8332 B: kompletna oprema (levo) i uređaj (desno)

5. Uređaj za merenje FLUKE 43 B priključiti monofazno, a merenje vršiti u trajanju potrebnom da merni objekat uđe u ustaljeni režim rada. Merenje ponoviti nekoliko puta za različite režime rada (tamo gde je primenljivo)



Slika 117: Merni uređaj FLUKE 43 B sa dodatnom opremom i dokumentacijom

6. Meriti i zapamtiti (napraviti bazu izmerenih podataka) za sledeće veličine:

- ▣ **Frekvencija,**
- ▣ **Napon sve tri faze (fazni ili međufazni, u zavisnosti od mogućnosti priključenja),**
- ▣ **Struju sve tri faze,**
- ▣ **Ukupno harmonijsko izobličenje napona THDU,**
- ▣ **Ukupno harmonijsko izobličenje struje THDI,**
- ▣ **Krest faktor napona i struje,**
- ▣ **Fliker (PST),**
- ▣ **K faktor,**
- ▣ **Snage (P, Q, S),**
- ▣ **Faktor snage (PF, DPF),**
- ▣ **Pojedinačne harmonike napona i struje (neparni harmonici do 25.)**

7. Po priključenju uređaja, u toku merenja i pri isključenju uređaja za merenje kvaliteta električne energije memorisati trenutne vrednosti napona i struja: sva tri napona istovremeno, sve tri struje istovremeno, struju i napon po fazama.

8. Po završetku merenja izvršiti analizu rezultata (harmonijsku, statističku i sl.)

9. Rezultate uporediti sa standardom SRP EN 50160 i odgovarajućim tehničkim preporukama, koje su primenljive za to merno mesto

10. Na kraju sačiniti odgovarajući izveštaj i uvrstiti ga u semestralni rad

### **2.6.2. Pripreme za merenje**

Studenti se dele u grupe od po 3 studenta, koji dalje rade zajednički, timski i ravnopravno učestvuju u svim fazama realizacije zadate teme na projektu. Merenja se rade po projektnom zadatku i da zadatu temu merenja.

Pre pristupanju merenju studenti su dužni da prođu kroz kratku obuku o bezbednosti na radu, načinu priključenja uređaja, programiranju rada uređaja za mrerenje na terenu u periodu od 7 dana i obuku za isčitavanje rezultata merenja iz uređaja. Za tu priliku obavezno pročitati uputstvo za upotrebu primenjenog mernog uređaja.

**2.6.3. Teme projekta „Merenja kvaliteta električne energije na FTN“**

| Grupa    | Naziv teme                                      |
|----------|-------------------------------------------------|
| 1.grupa  | Uticaj računarskog centra na KVEE-Informatika   |
| 2.grupa  | Stanje KVEE na sabirnicama ITC                  |
| 3.grupa  | Uticaj FN elektrane na KVEE: FTN1               |
| 4.grupa  | Uticaj FN elektrane na KVEE: FTN2-1.deo         |
| 5.grupa  | Uticaj FN elektrane na KVEE: FTN2-2.deo (μInv.) |
| 6.grupa  | Uticaj malih potrošača na KVEE-I deo            |
| 7.grupa  | Uticaj malih potrošača na KVEE-II deo           |
| 8.grupa  | Uticaj punjača električnih vozila               |
| 9.grupa  | Stanje KVEE na sabirnicama Nastavnog bloka      |
| 10.grupa | Uticaj računarskog centra na KVEE-FTN           |
| 11.grupa | Stanje KVEE na sabirnicama Bloka Amfiteatri     |
| 12.grupa | Stanje KVEE na sabirnicama Kula FTN             |
| 13.grupa | Stanje KVEE na sabirnicama Bloka F              |
| 14.grupa | Stanje KVEE na sabirnicama MI                   |
| 15.grupa | Stanje KVEE na sabirnicama Jugodrvo             |

**2.6.4. Merenje i izveštavanje**

Postavljanje mernog sistema rade studenti uz pomoć i kontrolu asistenta. Tu naročito obratiti pažnju na pravila o bezbednosti na radu i poštovati upozorenja asistenta ili tehničkog saradnika. Na kraju postavljanja uređaja proveriti da li su sve merne veličine prikazane na pravilan (očekivan) način. Tom prilikom zabeležiti vremenske dijagrame svih napona i struja, zajedno (trofazno) i pojedinačno struju i napon jedne faze.

Tokom merenja obilaziti merno mesto i kontrolisati da li uređaj ispravno radi. U tim prilikama zabeležiti vremenske dijagrame svih napona i struja, zajedno (trofazno) i pojedinačno struju i napon jedne faze.

Na kraju merenja vrši se skidanje uređaja uz obavezno prisustvo asistenta. Takođe, tom prilikom zabeležiti vremenske dijagrame svih napona i struja, zajedno (trofazno) i pojedinačno struju i napon jedne faze.

Rezultati merenja isčitati iz uređaja u obliku *Xcel* ili druge slične baze podataka. Potrebno je srediti bazu i obraditi one parametre, koji su definisani projektnim zahtom. Izvršiti i odgovarajuću analizu rezultata i uporediti ih sa graničnim vrednostima definisanim u SRPS EN 50160 ili drugim relevantnim standardima ili reporukama.

Na kraju, svaka grupa je obavezna da o rezultatima merenja i analize sačini izveštaj u pisanom obliku (semestralni rad) u definisanoj formi i obliku.

Primer sadržaja za semestralni rad na temu „Uticaj FN elektrane FTN 2 na kvalitet električne energije:

### SADRŽAJ

|                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. ZADATAK.....                                                                                     | 2  |
| 2. PRINCIP RADA FOTONAPONSKE ELEKTRANE.....                                                         | 3  |
| 2.1 Princip rada solame ćelije.....                                                                 | 3  |
| 2.2 Radne karakteristike solarnog panela i problem eksploatacije.....                               | 4  |
| 3. KVALITET ELEKTRIČNE ENERGIJE.....                                                                | 6  |
| 3.1 Uopšteno o kvalitetu električne energije.....                                                   | 6  |
| 3.2 Klasifikacija izobličenja napona.....                                                           | 7  |
| 3.3 Indikatori (kvantifikatori) kvaliteta električne energije.....                                  | 8  |
| 3.4 Uopšteno o harmonicima.....                                                                     | 9  |
| 4. OPIS MERNOG MESTA I MERNOG INSTRUMENTA.....                                                      | 11 |
| 4.1 Opis mernog instrumenta.....                                                                    | 11 |
| 4.2 Prikaz mernog mesta i način povezivanja mernog instrumenta.....                                 | 12 |
| 5. ANALIZA REZULTATA.....                                                                           | 14 |
| 5.1 Trenutne vrednosti napona i struja u trenutku priključenja instrumenta.....                     | 14 |
| 5.2 Promena efektivne vrednosti napona i struje tokom 7 dana.....                                   | 15 |
| 5.3 Ukupno harmonijsko izobličenje napona i struje.....                                             | 16 |
| 5.4 Krest faktor.....                                                                               | 18 |
| 5.5 Flikeri napona.....                                                                             | 19 |
| 5.6 K faktor.....                                                                                   | 20 |
| 5.7 Dijagrami snage.....                                                                            | 21 |
| 5.8 Osnovni indikatori kvaliteta električne energije u karakterističnim trenucima.....              | 24 |
| 5.8.1 Dan sa najmanjom prividnom snagom (utorak).....                                               | 24 |
| 5.8.2 Dan sa najvećom prividnom snagom (petak).....                                                 | 27 |
| 5.9 Uslov priključenja FNE na mrežu s obzirom na kriterijum dozvoljenih struja viših harmonika..... | 30 |
| 6. Zaključak.....                                                                                   | 31 |
| 7. LITERATURA.....                                                                                  | 32 |

### **2.6.5. Presentacija rezultata istraživanja**

Na kraju merenja, u januaru, svi rezultati istraživanja biće prezentovani studentima u sklopu dvodnevno seminaru.

Svaka grupa treba da pripremi ppt prezentaciju sa najvažnijim rezultatima istraživanja (max. 12 slajdova).

Prezentacija treba da traje 10 min.

Svaki student iz grupe treba da prisustvuje i učestvuje u prezentaciji, odnosno da predstavi sadržaj istraživanja dat na 3 ili 4 slajda. Na kraju prezentacije, potrebno je dati kratak zaključak o rezultatima i izmerenom nivou kvaliteta električne energije. Posebno treba istaći, ako su uočene neke vrednosti, koje su iznad dozvoljenih nivoa i ukazuju na mogućnost pojave negativnih efekata na potrošače ili opremu priključene na toj sabirnici.

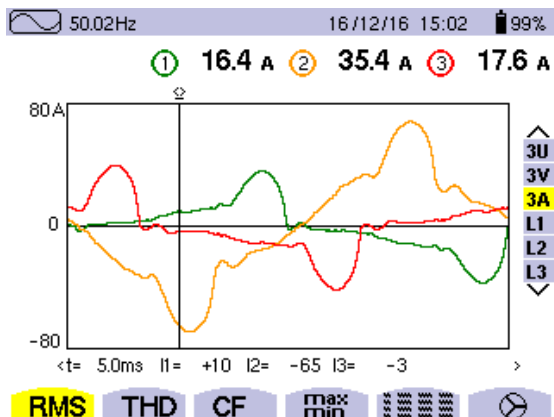
Na kraju prezentacije postaviti tri karakteristična pitanja iz teme istraživanja. Za postavljena pitanja treba dostaviti pisane odgovore u dužini od pola strane A4 formata po pitanju. Sva pitanja i odgovori se unose u elektronsku publikaciju "Ispitna pitanja i odgovori" koja se izdaje na kraju semestra. Primeri pitanja i odgovora iz ove publikacije dati su u sledećem poglavlju ove knjige

### 3. Primer ispitnih pitanja s odgovorima.

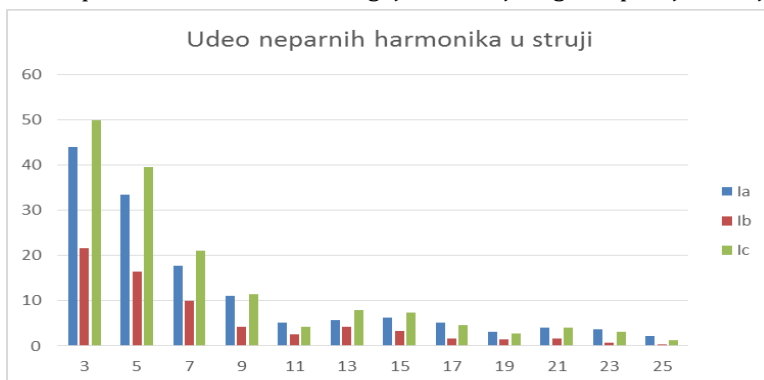
U ovom delu dajemo primer ispitnih pitanja koja su nastala u višegodišnjem radu studentskim laboratorijskim i terenskim merenjima

## 3.1. Ispitna pitanja

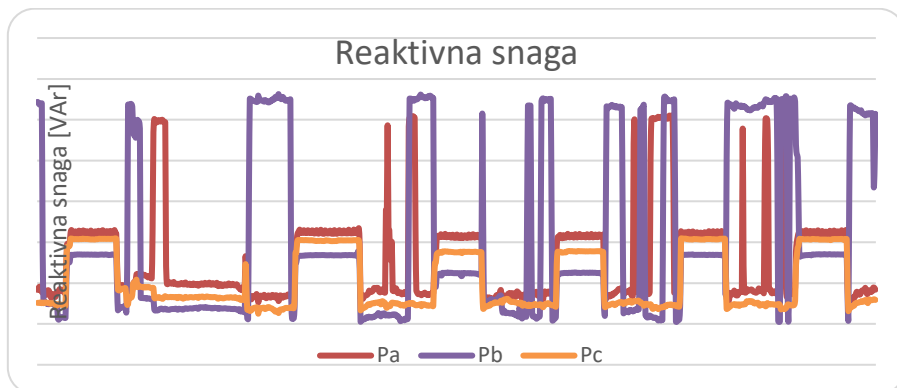
1. Analizirati datu sliku, zasto je izobličenje struje druge faze manje u odnosu na prvu i treću fazu ?



2. Analizirati udeo neparnih harmonika u struji. Ponudite objašnjenje zašto je udeo neparnih harmonika na drugoj fazi manji nego na prvoj i trećoj ?

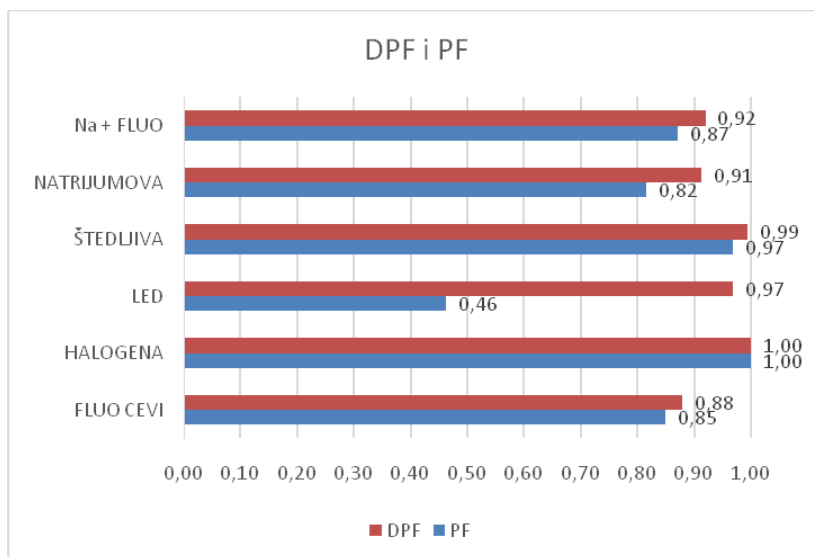
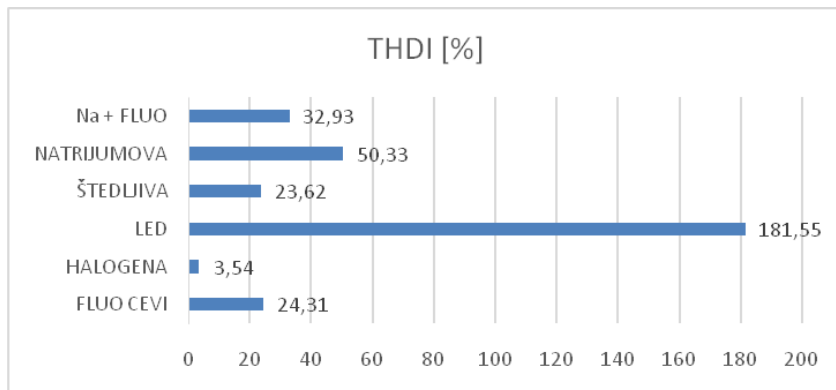


3. Analizirati dijagram reaktivne snage, zašto je reaktivna snaga u nekim periodima pozitivna na drugoj fazi ?



4. Koje su negativne posledice propada napona? Definirati varijaciju napona, odnosno varijaciju frekvencije.
5. Objasniti zašto su ispravljači izvori viših harmonika.
6. Koje su metode smanjenja ili eliminacije harmonika?
7. Do kojih problema može doći usled lošeg kvaliteta električne energije?
8. Koji su preporučeni nivoi kompatibilnosti za izobličenje napona po IEC?
9. Kako se pravilno priključuju strujni priključci (strujna klešta) uređaja CA8334? Na koji način se može proveriti da li je uređaj pravilno priključen?
10. Reaktivna energija u fotonaponskim elektranama?
11. Zašto imamo i kako smanjiti veliki THDI FN elektrane pri maloj sunčevoj radijaciji?
12. Zašto THD napona ne zavisi od osvetljenosti FN elektrane?
13. Kako se razlikuju parametri kvaliteta električne energije solarne elektrane u zavisnosti od toga da li je dan sunčan ili oblačan?
14. Koja je razlika između parametara kvaliteta električne energije PF (power factor) i DPF (displacement power factor)?
15. Koji su uzroci pojave deformacije napona?
16. Nacrtati zavisnost radnih karakteristika solarnog panela od intenziteta zračenja i temperature i komentarisati?
17. Koji procesi u elektroenergetskom sistemu utiču na stvaranje harmonika napona i struje? Navesti određene pretvarače energetske elektronike i objasniti kako oni utiču na kvalitet el. energije.
18. Šta je solarna ćelija? Objasniti princip fotoelektričnog efekta.
19. Šta su to viši harmonici?
20. Koje probleme mogu prouzrokovati viši harmonici?
21. Šta su propadi napona i zašto nastaju?

22. Šta je to treperenje napona (flicker)?
23. Koje su karakteristike i mogućnosti mernog instrumenta C.A 8332B?
24. Uticaj LED svetiljke na pokazatelje kvaliteta električne energije?
25. Uloga balasta u osvetljenju i uticaj na pokazatelje kvaliteta? Elektromagnetni i elektronski balast.
26. Na osnovu prikazanih slika razmotriti uticaj THDI (ukupnog harmonijskog izobličenja struje) na PF (sačinilac snage) i uticaj priključivanja fluorescentnih cevi u paraleli sa postavkom natrijumove sijalice ?

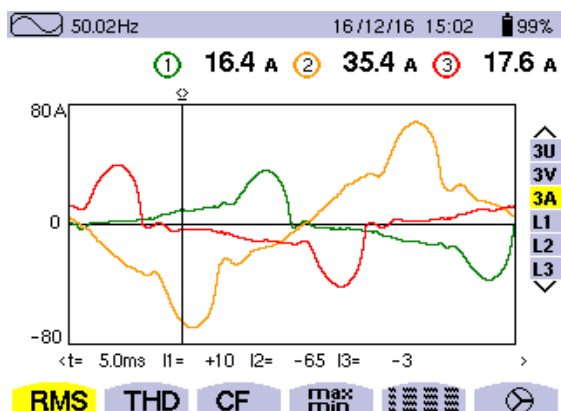


27. Koliko vrsta kvaliteta električne energije poznajete?
28. Indikatori (pokazatelji) kvaliteta električne energije?
29. Šta je nadzor kvaliteta električne energije?

30. Izbor mesta nadzora kvaliteta električne energije
31. Reakcija sijalice sa užarenim vlaknom na pojave nekvalitetnog napona
32. Prelazni režimi sistema
33. Uklanjanje viših harmonika primenom filtera
34. Navesti probleme koje stvaraju viši harmonici

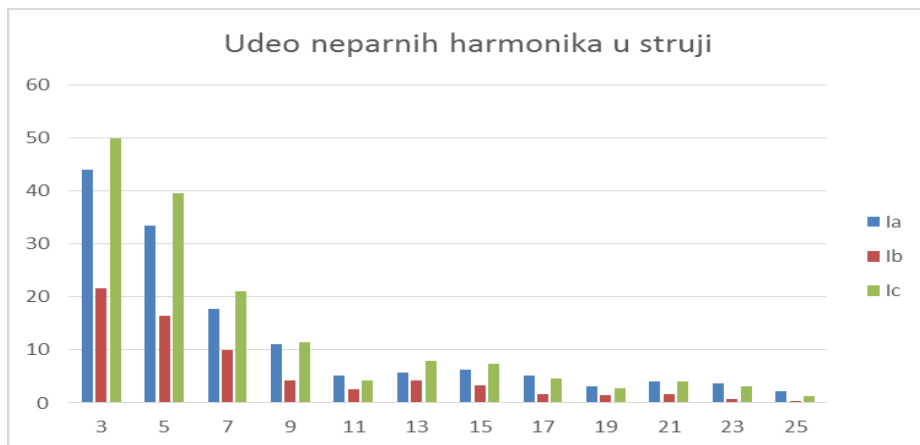
## 3.2. Odgovori

1. Analizirati datu sliku, zasto je izobličenje struje druge faze manje u odnosu na prvu i treću fazu ?



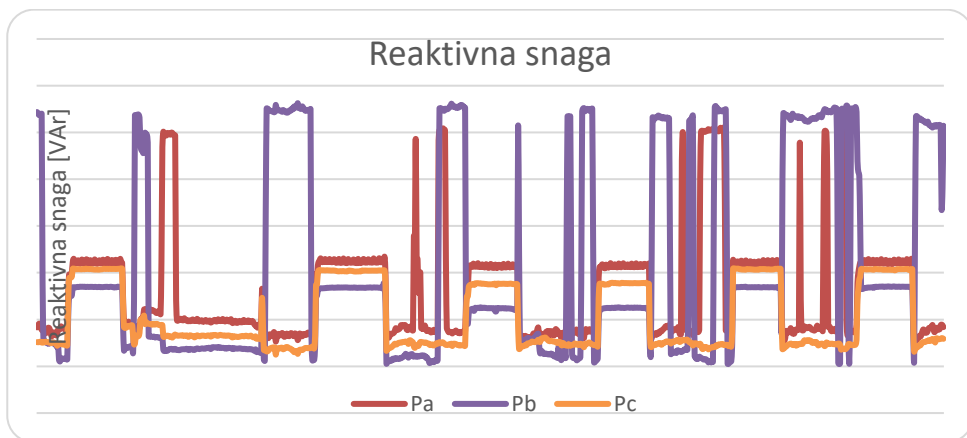
**Odgovor:** Prva i treća faza imaju pikove struje (veliko izobličenje) jer su na njima priključeni samo računari koji u sebi sadrže kondenzatore. Druga faza ima manje izobličenje jer je na nju pored računara priključeno i osvetljenje, koja u sebi sadrži prigušnicu koja vrši popravak izobličenja struje. Dokaz da je osvetljenje priključeno na drugu fazu je i taj da je njena amplituda dvostruko veća.

2. Analizirati udeo neparnih harmonika u struji, zašto je udeo neparnih harmonika na drugoj fazi manji nego na prvoj i trećoj ?



**Odgovor:** Druga faza sa svojim harmonijskim sastavom manje utiče na izobličenje struje nego ostale dve faze. Na drugoj fazi je pored računara priključeno osvetljenje čije prigušnice vrše popravak izobličenja. Dominantni harmonici su 3,5,7 i 9. Na ostale dve faze su priključeni samo računari čiji kondezatori prave veliko izobličenje.

**3. Analizirati dijagram reaktivne snage, zašto je reaktivna snaga u nekim periodima pozitivna na drugoj fazi ?**



**Odgovor:** Reaktivna snaga na sve tri faze je tokom celog perioda od 7 dana negativna. Reaktivna snaga prve i treće faze tokom perioda od 7 dana je negativna sa manjim oscilacijama, u zavisnosti od dana i noći, tj. kada se računarski centar koristi, a kada ne. Reaktivna snaga na drugoj fazi u određenim periodima je pozitivna, a to je period kada se u računarskom centru koristilo osvetljenje.

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

Savremeni elektromotorni pogoni se sastoje iz:

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

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

### **5. Objasniti zašto su ispravljači izvori viših harmonika.**

Ispravljači, kao najčešće korišćeni energetski elektronski pretvarači, su jedan od glavnih izvora viših harmonika. Prekidački način rada ima za posledicu stalne promene konfiguracije aktivnog dela ispravljača. To dovodi do toga da je talasni oblik mrežne struje ispravljača sastavljen od segmenata i da je nesinusoidalnog oblika. Proticanje nesinusoidalne struje izaziva pad napona na impedansi mreže, što dovodi do izobličenja osnovnog sinusnog napona. Istovremeno, sa strane potrošača,

talasni oblik napona se sastoji od delova sinusoide, odnosno pored jednosmerne komponente, postoje i naizmenične komponente - viši (parni) harmonici.

Monofazni ispravljači se upotrebljavaju u napojnom delu elektronskih uređaja i od njih se zahteva da generišu stabilne jednosmerne napone, da budu što jednostavnije konstrukcije i visoke pouzdanosti. Iz tih razloga, najčešće se radi o diodnim ispravljačima sa filterskim kondenzatorom na jednosmernoj strani ili u novije vreme o jednosmernim prekidačkim napajačima, koji takođe na izlazu imaju kondenzator. U slučaju potrebe za drugim naponskim nivoom ili stabilnijim naponom, iza kondenzatora se povezuje linearni ili prekidački napajač. 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.

### **6. Koje su metode smanjenja ili eliminacije harmonika?**

Harmonici su u mreži stalno prisutni. Međutim, ukoliko dolazi do pojave rezonanse zbog koje se vrednost nekog harmonika znatno povećava, ako je putanja nekog harmonika duga ili postoji veliki izvor harmonica, neophodno je preduzeti određene mere. To su:

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

Metode smanjenja intenziteta harmonijskih struja obično podrazumevaju menjanje načina rada pogona, koji generišu harmonike. Takav pristup je teško praktično izvesti, jer to može da utiče na kompletan proizvodni proces, odnosno mogće je jedino u fazi projektovanja. Međutim, odgovarajućim sprežanjem transformatora može se nešto uraditi. Sprega namota u trougao dovodi do blokiranja daljeg toka svih harmonika, koji su umnožak od 3. Unošenjem faznog pomeraja od 30 stepeni, sprežanjem sekundara transformatora u zvezdu i u trougao, dobija se efekat 12-pulsnog ispravljača, odnosno eliminišu se 5. i 7. 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. Filteri se 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, a i da se izbegne da se antirezonantna učestanost približi učestanosti harmonika. Primena serijskih filtera je ređa, a cilj im je da predstavljaju visoku impedansu za harmonike struje i na taj način blokiraju njihovo širenje u mrežu. Ovakve vrste filtera nazivaju se pasivnim, za razliku od novijih vrsta – aktivnih. Aktivni filteri su u stvari energetski

elektronski pretvarači, koji su tako programirani da vrše kompenzaciju viših harmonika. Sa takvim filterom obezbeđuje se sinusoidalna struja mreže, a često i faktor snage 1. Složenije konfiguracije omogućuju potpuno otklanjanje svih poremećaja, koji utiču na kvalitet električne energije.

Promena rezonantne frekvencije sistema je potrebna kad u sistemu ili kod potrošača postoje kondenzatorske baterije za kompenzaciju reaktivne energije. Njihova rezonantna učestanost je često blizu učestanosti karakterističnih harmonika, pa dolazi do neželjenih negativnih pojava. Menjanje veličine kondenzatora, dodavanje serijske impedanse, pomeranje kondezatora na drugu sabirnicu (lokaciju) ili jednostavno potpuno izbacivanje kondenzatora (uz plaćanje cene rada bez kompenzacije) su mere kojima se problem može otkloniti.

### 7. Do kojih problema može doći usled lošeg kvaliteta električne energije ?

Ukoliko kvalitet električne energije nije zadovoljavajući može se javiti dosta problema. Među najznačajnijim problemima do kojih može dovesti loš kvalitet električne energije, a pre svega harmonijska izobličenja, su:

1. Pregrevanje nultog provodnika
2. Pregrevanje transformatora
3. Pregrevanje i nepravilan rad električnih motora
4. Uticaj harmonika na prekidače i zaštitne releje
5. Uticaj na elektronsku opremu
6. Uticaj na rad statičkih energetske pretvarača
7. Uticaj na telekomunikacione veze
8. Naprezanje kondenzatorskih baterija za kompenzaciju reaktivne energije
9. Izobličenje mrežnog napona usled toka harmonijskih struja
10. Efekti toka harmonika struja kroz provodnike i sabirnice

### 8. Koji su preporučeni nivoi kompatibilnosti za izobličenje napona po IEC ?

| 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 $U_{eff}/U_{nom} 100 [\%]$<br>$\Delta t$ (polu-perioda) | 10% do 100%<br>1 | 10% do 100%<br>1 - 300 | 10% do 100%<br>1 - 300 |
| Kratkotrajni prekidi [s]                                              | Ni jedan         | Ne primenjuje se       | $\leq 60$              |
| Nesimetrija napona $U_{neg}/U_{pos}$                                  | 2%               | 2%                     | 3%                     |
| Harmonici - THDU [%]                                                  | 5%               | 8%                     | 10%                    |
| Odstupanje frekvencije - $\Delta f/f_{nom}$                           | $\pm 1\%$        | $\pm 1\%$              | $\pm 2\%$              |

**9. Kako se pravilno priključuju strujni priključci (strujna klešta) uređaja CA8334? Na koji način se može proveriti da li je uređaj pravilno priključen?**

Prilikom priključivanja strujnih priključaka, potrebno je voditi računa kojim redosledom su priključeni naponski priključci. Dakle, moraju biti ispoštovane boje priključaka s obzirom na redosled faza. Na primer, ako je prva faza naponskog priključka crvene boje, to isto mora da važi i za prvu fazu strujnog priključka, i tako redom. Strujna klešta moraju biti priključena tako da bude ispoštovan smer proticanja energije. Ona na sebi imaju nacrtanu strelicu koja mora biti uskladjena sa tokom snage.

Da li je merni uređaj pravilno povezan možemo proveriti sa grafika snimljenih u trenutku priključenja. Na tim graficima su prikazani napon i struja svake od faza na njima se vidi da li su ispoštovane boje priključaka ili ne, i da li su odgovarajući naponi i struje u fazi ili sa odgovarajućim faznim pomerajima (u zavisnosti od toka reaktivne

**10. Reaktivna energija u fotonaponskim elektranama?**

Solarni paneli su izvori jednosmerne struje, pa samim tim imamo čistu aktivnu snagu koju oni proizvode i koja ulazi u inverter. Međutim mrežni inverter kao sastavni deo svoje topologije sadrži reaktivne komponente tj. kondenzatore u DC kolu koje služe da održavaju napon stabilnim i konstantnim. Upravo je ovo izvor reaktivne energije kada su u pitanju fotonaponske elektrane. Može se grubo reći da invertori imaju oko 1000uF/1KW, što je nekoliko hiljada uF za prosečan inverter srednje snage. Cilj da se u mrežu injektuje čista aktivna snaga iz foto panela, ali kako je za to neophodan MPPT algoritam, odnosno vektorsko upravljanje (po d i q osi), dolazi do greške, odnosno pri promeni reference za novu tačku maksimalne snage, dolazi do "smicanja" struje i napona, odnosno malog pomeranja struje u toku periode, što se manifestuje injektiranjem reaktivne energije u mrežu, pošto se reaktivna energija jedino može injektirati u mrežu menjanjem faznog stava napona u odnosu na struju.

Važno je napomenuti, da postoje fotonaponske elektrane, koje imaju na sebi priključene baterije kondenzatora upravo za injektiranje kako aktivne tako i reaktivne energije (obično do 5% ukupne snage invertora).

**11. Zašto imamo i kako smanjiti veliki THDI FN elektrane pri maloj sunčevoj radijaciji ?**

Za fotonaponsku elektranu, ključno je da solarna radijacija bude što veća, a temperatura što manja, tada imamo najveće iskorišćenje solarnih panela, a proizvedena struja sa strane invertora je gotovo čisto sinusna. Merenjem je utvrđeno da sa slabom radijacijom (velika oblačnost, zalazak/izlazak sunca ), THD struje raste čak i do 200%, a talasni oblik struje biva značajno degradiran.

Ovaj problem nastaje uglavnom kod jednostepene topologije mrežnih invertora, gde se niz solarnih panela vezuje direktno na DC kolo. Ova topologija je jeftinija, ali problem upravo nastaje kada imamo mali intenzitet radijacije i samim tim napon koji proizvode paneli biva na granici rada invertora 325V za jednofazne i 565V za trofazne, zbog čega kasnije nastaje degradiran oblik struje.

Postoje više rešenja ovog problema, prvi je da koristimo pasivni LCL filter na izlazu invertora, a drugi je da se koristi dvostepeni inverter, kod kojeg je prvi stepen buck/boost konvertor kako bi održavao napon DC kola konstantnim, dok je drugi stepen je mrežni inverter, i kao treće rešenje (ekonomičnije) jeste korišćenje posebnog algoritma u invertoru tj adaptivne harmonijske kompenzacije.

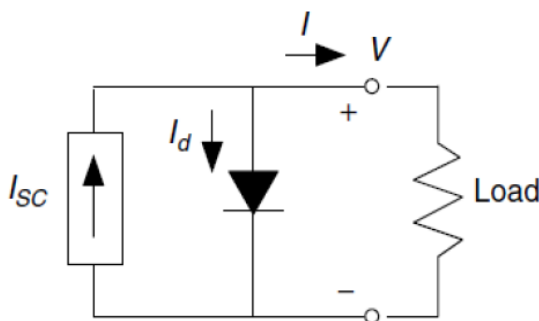
### **12. Zašto THD napona ne zavisi od osvetljenosti FN elektrane?**

Merenjem je utvrđeno da se THD napona ne menja (zanemarljivo se menja) sa intenzitetom radijacije kod FN elektrana koje rade na mreži. Razlog tome je što je mreža kruta, odnosno distributivna mreža na koju je priključena FN elektrana se može posmatrati kao izvor konstantnog napona i konstantne frekvencije. Tako da će uticaj FN elektrane biti zanemarljiv. Ovo važi zato što je FN elektrana za nekoliko redova veličine slabija od mreže (distributivnog transformatora) kojem se predaje energija, tj impedansa elektrane je veća od impedanse mreže koju "vidi", pa ne može da utiče na nju. Ovo važi samo ako elektrana i mreža (transformator) nisu istog reda veličine, odnosno da nisu uporedivi elementi električnog kola.

Problem postaje veći ako na istom transformatoru imamo više FN elektrana, tada pored povećanja THD napona može doći do problema kao što su fliker (zbog adaptacije u toku rada invertora), ferorezonancije koje mogu negativno uticati na rad sklopne i zaštitne opreme.

### **13. Kako se razlikuju parametri kvaliteta električne energije solarne elektrane u zavisnosti od toga da li je dan sunčan ili oblačan?**

Napon koji se proizvodi, kao i njegovo ukupno harmonijsko izobličenje (THDU) prilično su nezavisni su od uticaja osunčanosti. Međutim, na ostale parametre osvetljaj značajno utiče.



gde strujni izvor  $I_{sc}$  predstavlja uticaj sunčevog zračenja na ćeliju, dok je  $I_d$  struja diode. Tokom oblačnog dana, struja  $I_{sc}$  je značajno manja, što se dalje prenosi i na struju solarne ćelije. Zato je efektivna vrednost struje solarne elektrane neuporedivo manja, pa je manja i proizvedena snaga elektrane. Takođe, ukupno harmonijsko izobličenje struje (THDI) je za oblačan dan mnogo veće nego za sunčan dan (za FNE FTN2 eksperimentalno dobijeno 112% za najoblačniji, a 46% za najsunčaniji dan). Veći udeo harmonika struje implicira i veći udeo reaktivne snage u proizvedenoj, pa je zbog toga i ukupni faktor snage elektrane (PF) značajno manji nego tokom sunčanog dana, kada je približno jednak 1.

#### 14. Koja je razlika između parametara kvaliteta električne energije PF (power factor) i DPF (displacement power factor)?

PF (power factor) predstavlja ukupni faktor snage. Njime se izražava sveukupna pojava odstupanja aktivne snage od prividne:

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{\sum_{h=1}^{\infty} U_h * I_h * \cos \varphi_h}{U_{eff} * I_{eff}} .$$

DPF (displacement power factor) predstavlja faktor pomeraja. Njime se izražava pojava odstupanja osnovnih harmonika aktivne i prividne snage, koje postoji usled faznog pomeraja struje i napona, tj. prisustva elemenata sa akumulisanom energijom (kalemovi, kondenzatori):

$$DPF = \frac{P_1}{S_1} = \frac{U_{1eff} * I_{1eff} * \cos \varphi}{U_{1eff} * I_{1eff}} = \cos \varphi .$$

U električnim sistemima u kojima nema viših harmonika struje i napona ova 2 faktora su jednaka. Međutim, ukoliko su prisutni viši harmonici, dolazi do njihovog odstupanja. Zato se, ukoliko se zanemari izobličenje napona, može definisati sledeći odnos:

$$DF = \frac{PF}{DPF} = \frac{\frac{U_1 * I_1 * \cos \varphi}{U_1 * I_{eff}}}{\cos \varphi} = \frac{I_1}{I_{eff}}.$$

Ovaj faktor izražava onaj deo odstupanja aktivne snage u odnosu na prividnu koji se odnosi na prisustvo viših harmonika. U skladu sa tim se i naziva faktor snage izobličenja (distortion power factor).

### 15. Koji su uzroci pojave deformacije napona?

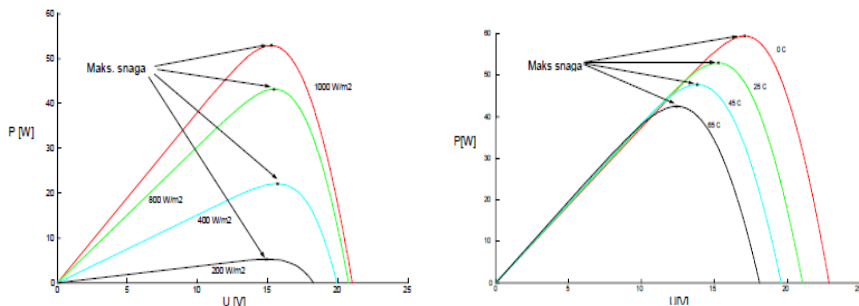
Uzroci pojave deformacija napona mogu biti različiti i vezani su za razne aspekte rada elektroenergetskog sistema i uticaja okoline na njega. Mogu se razlikovati sledeći uzroci:

- Rad nelinearnih potrošača (energetski-elektronski pretvarači, indukciono i elektrolučne peći, zasićene električne mašine i dr.). Usled prekidačke prirode rada ili nelinearne karakteristike oni povlače nesinusoidalnu struju i dovode do pojave deformacije mrežnog napona (stvaranja viših harmonika, flikera, rupa i ureza u naponu i šuma).
- Normalne operacije u mreži (neophodne prekidačke manipulacije, priključenja i remont opreme), koje mogu izazvati deformacije tranzijentne prirode i deformacije u prelaznim režimima.
- Dejstvo prirodnih faktora (atmosferske nepogode, udari munje u vazdušne vodove, grane drveća, sitneživotinje, ptice i drugo), koji izazivaju zemljospojeve i međufazne kratke spojeve, prenapone, podnapone, propade napona i sl.
- 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.

### 16. Nacrtati zavisnost radnih karakteristika solarnog panela od intenziteta zračenja i temperature i komentarisati?

Na slici 1 (levo), vidi se nekoliko različitih karakteristika u zavisnosti od nivoa osvetljenosti fotonaponskog panela. Jasno se uočava da se opadanjem osvetljaja radna karakteristika spušta na dole, te solarni panel daje manje struje (snage) za iste vrednosti napona na njemu. Tačke maksimalnih snaga se nalaze na kolenima karakteristika i one takođe opadaju sa osvetljenošću.

Što se tiče zavisnosti  $P(U)$  karakteristike u zavisnosti od temperature panela, ona je obrnuto proporcionalna sa porastom temperature. To znači da dolazi do spuštanja krive na dole, odnosno vrednost snage opada porastom temperature i može si videti na slici 1(desno).

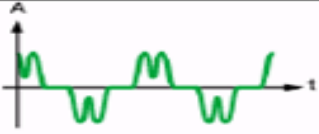
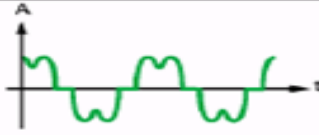
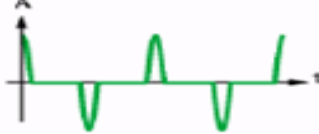
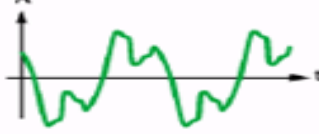


**17. Koji procesi u elektroenergetskom sistemu utiču na stvaranje harmonika napona i struje? Navesti određene pretvarače energetske elektronike i objasniti kako oni utiču na kvalitet el. energije.**

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 pretvarači energetske elektronike. Razlikuju se:

1. pretvarači naizmjenične struje u jednosmernu – ispravljači,
2. pretvarači jednosmerne struje u naizmjeničnu – invertori,
3. pretvarači jednosmerne struje u jednosmernu – čoperi i
4. pretvarači naizmjenične struje u naizmjeničnu – naizmjenični pretvarači.

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 viših harmonika. Oni se karakterišu prekidačkim načinom rada snažnih elektronskih komponenti. U tabeli ispod su dati karakteristični talasni oblici struje određenih nelinearnih pretvarača.

| Nelinearni potrošači                 | Talasni oblik struje                                                              |
|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| Regulisani pogoni                    |  |
| Ispravljači/punjači                  |  |
| Uređaj za obradu podataka (PC i sl.) |  |
| Fluorescentno osvetljenje            |  |

### 18. Šta je solarna ćelija? Objasniti princip fotoelektričnog efekta.

Solarna ćelija se bazira na elementu silicijumu (Si), koji je slab poluprovodnik na sobnoj temperaturi. Da bi postao bolji provodnik dopira se primesama. Ukoliko se dopira primesama pete grupe elemenata (fosfor P i arsen As) dobija se silicijum N – tipa, kod koga su šupljine glavni nosioci. Ukoliko se dopira primesama treće grupe elemenata (aluminijum Al i galijum Ga) dobija se silicijum P – tipa, kod koga su elektroni glavni nosioci. Spajanjem dveju primesa dobija se PN spoj gde dolazi do rekombinacije slobodnih nosilaca iz P i iz N zone. Na dodirnoj površini stvara se barijera koja ne dozvoljava dalje kretanje slobodnih nosilaca iz N oblasti u P oblast jer naleću na naelektrisanja istog znaka. Ta dodirna površina se naziva oblast prosotrnog tovara. Sam PN spoj predstavlja diodu, kao i solarnu ćeliju.

Fotoelektrični efekat nastaje ukoliko foton svetlosti udari u silicijum i absorbira se u kristalnu rešetku, tada dolazi do izbijanja elektrona iz rešetke. Na njegovo mesto dolazi elektron iz susednog čvora rešetke. Cikličnim pomeranjem elektrona stvara se mobilni par elektron – šupljina, sa slobodom provođenja. Ovaj efekat je moguć samo u oblasti prostornog tovara, zato što prilikom udara u P ili N deo, van barijerne oblasti, dolazi do rekombinacije od strane slobodnih nosilaca iz te oblasti. Nastali par se nalazi pod uticajem polja oblasti prostornog tovara, koje teži da slobodan

elektron odvuče ka katodi, a šupljinu ka anodi. Ovaj tok predstavlja struju PN spoja (svetla)  $I_l$ . Struja solarne ćelije  $I$  je razlika struje pri svetlu i struje mraka (diode)  $I_d$ .

$$I = I_l - I_d$$

### 19. Šta su to viši harmonici?

Viši harmonici su komponente u signalu čija je frekvencija celobrojni umnožak osnovne

frekvencije signala. Dakle za 50 Hz-ni sistem harmonici su komponente frekvencije 100 Hz, 150 Hz, 200Hz, 250Hz itd. Na harmonijska izobličenja mogu uticati i međuharmonici (interharmonici) i podharmonici (subharmonici). Međuharmonicima nazivamo komponente čija frekvencija nije celobrojni umnožak osnovne frekvencije. Tako bi npr. za 50 Hz-nu mrežu komponenta od 70 Hz bila međuharmonik. U posebnu klasu međuharmonika spadaju podharmonici ili subharmonici, čija je frekvencija deo osnovne frekvencije signala – na primer 30 Hz, 25 Hz, 16 2/3 Hz.

U svojoj suštini harmonici su matematički model, koji opisuje periodični signal u odnosu na

referentni sinusni signal. Svaki harmonik je opisan svojom frekvencijom, početnim uglom i

amplitudom (Furijeova transformacija).

Visok sadržaj harmonika potpuno deformiše signal tako da se sasvim gubi sinusni oblik. Pod signalom se podrazumeva ili napon ili struja. Ako postoji problem sa harmonicima moramo poznavati harmonijski spektar, to jest sadržaj svakog pojedinačnog harmonika posebno.

Najčešće se amplitude harmonika izražavaju procentualno u odnosu na amplitudu osnovnog

harmonika – individualna harmonijska distorzija (HD). Takođe se često koristi THD (ukupno

harmonijsko izobličenje) za opisivanje nivoa harmonika. Ova dva faktora za struju (isto je za napon, samo umesto  $I$  treba staviti  $U$ ) se definišu sa:

$$HDI_n = \frac{I_n}{I_1} \cdot 100[\%] ; THDI = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}{I_1^2}} \cdot 100 [\%]$$

### 20. Koje probleme mogu stvarati viši harmonici?

Viši harmonici mogu stvarati probleme i u napojnoj mreži, kao i u instalacijama potrošača koji

ih uzrokuje. Među najznačajnijim problemima do kojih može dovesti postojanje harmonika su sledeći:

1. Pregrevanje nultog provodnika
2. Pregrevanje transformatora

3. Pregrevanje i nepravilan rad električnih mašina
4. Uticaj harmonika na prekidače i zaštitne releje
5. Uticaj na elektronsku opremu
6. Uticaj na rad statičkih energetskih pretvarača
7. Uticaj na telekomunikacione veze
8. Naprezanje kondenzatorskih baterija za kompenzaciju reaktivne energije
9. Efekti toka harmonika struja kroz provodnike i sabirnice
10. Izobličenje mrežnog napona usled toka harmonijskih struja
11. Uticaj na tačnost pokazivanja standardnih mernih instrumenata

### **21. Šta su propadi napona i zašto nastaju?**

Propad napona se definiše kao kratkotrajno smanjenje efektivne vrednosti napona između 0,1 i

0,9 nominalne vrednosti i to u trajanju od 0,5 periode do 1 minuta. Tipična vrednost je oko 0,7 r.j.

Propadi napona se mere tako što se posmatra vremenski dijagram promene efektivne vrednosti

napona tokom poremećaja.

Propadi napona nastaju uglavnom zbog kvarova u električnoj mreži, bilo distributivnoj ili

prenosnoj. Kvarovi se mogu pojaviti i unutar fabrike ili u industrijskoj prenosnoj mreži. Kvarovi u prenosnoj mreži pogađaju mnogo više potrošača i na većoj udaljenosti. Veliki broj ovih propada potiče od zemljospojeva, koji nastaju zbog vremenskih nepogoda. Uzroci takođe mogu biti i zaprljanost i vlaga, potom aktivnost divljih životinja kao i nesreće izazavane konsruktivnim ili transportnim radovima. Najčešće se javljaju jednofazni kvarovi-zemljospojevi. Trofazni kvarovi su dosta ozbiljniji, sa većim intezitetom struje kvara, ali su i ređi.

Propadi napona posebno pogađaju računare, računarske sisteme, mikroprocesorski upravljane

uređaje i pogone, te korisnike u procesnoj industriji. Kratkotrajno smanjenje efektivne vrednosti

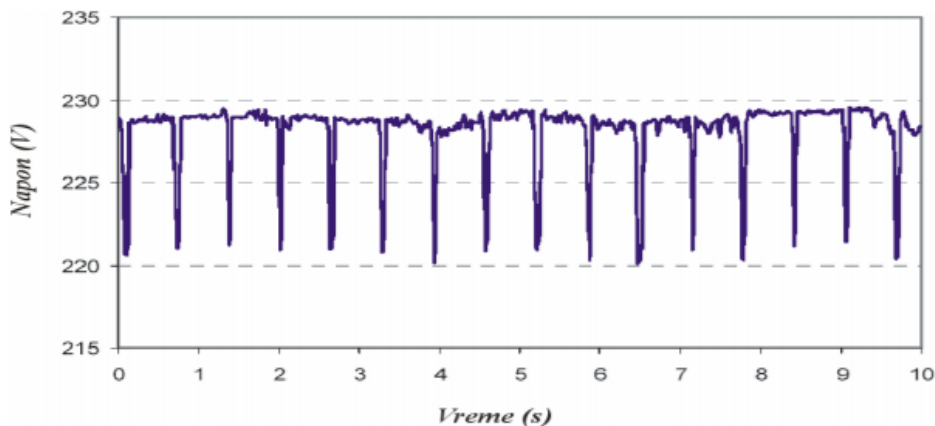
napona izaziva gubitak informacija, prekid tekućeg programa ili resetovanje računara. Oprema koja se koristi u modernim fabrikama, kao što su kontroleri procesa, programabilni logički kontroleri i regulatori brzine, je tim osetljivija na propade napona što se složenost opreme povećava i što je oprema uključena u osetljive procese. Čak su i releji i kontaktori za startovanje motora osetljiviji na propade napona, te svojim ispadom mogu izazvati prekid procesa.

### **22. Šta je to treperenje napona (flicker)?**

Naponsko treperenje (flicker) predstavlja pojavu varijacija vrednosti napona napajanja koje se ponavljaju, izazivajući učestalu promenu intenziteta svetlosti, odnosno svetlosno treperenje, koje je primetno golim okom posmatrača. Iznad određene granice subjektivne prirode ova pojava počinje oybiljno da smeta eventualnim posmatračima. Smetnje su sve izraženije što su amplitude naponskih

varijacija veće. Pri određenom karakterističnom broju ponavljanja u jedinici vremena, pojava takvih smetnji moguća je već pri vrlo malim promenama amplitude mrežnog napona.

Potreba za definisanjem i merenjem treperenja napona posledica je činjenice da promena intenziteta svetlosti u radnoj ili životnoj okolini vrlo negativno utiče na zdravlje ljudi. Na sledećoj slici prikazane su varijacije izmerenih efektivnih vrednosti pri pojavi treperenja napona.

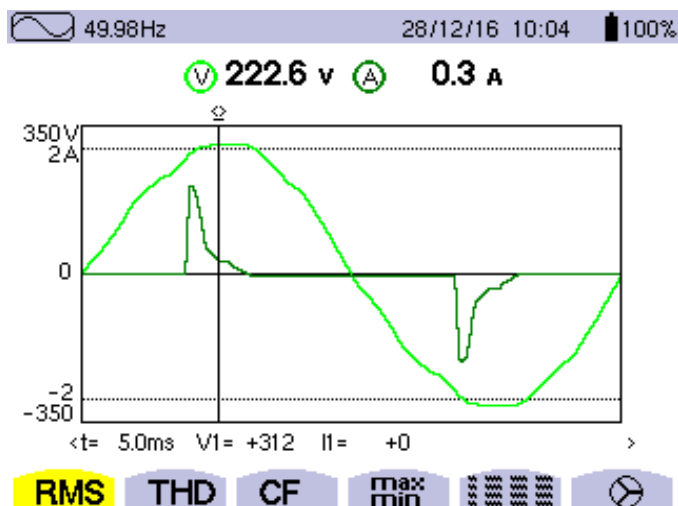


### 23. Koje su karakteristike i mogućnosti mernog instrumenta C.A 8332B?

- merenje naizmenične struje do 6500A
- merenje naizmeničnog napona do 480V (faznog) ili do 960V (linijskog)
- merenje frekvencije od 10Hz do 70Hz
- računanje struja neutralnog provodnika sumiranjem vektora faznih struja u spoju Y
- proračun kratkoročnog treptanja (Flicker efekat)
- računanje  $\cos\varphi$  za napone i struje
- računanje faznog debalansa napona i struja u trofaznom sistemu
- "optical link" RS232 komunikacija sa računarom
- merenje harmonika za napone i struje (do 50-og harmonika)
- napajanje mu je 220V
- ugrađenu bateriju koja mu obezbeđuje samostalan rad u trajanju od maksimalno 10 časova
- proračun ukupnih harmonijskih izobličenja
- snimanje grafika

- računanje k-faktora
- merenje aktivne, reaktivne i prividne snage
- monitoring neke veličine u određenom vremenu
- detekcija poremećaja u talasnim oblicima napona i struja

#### 24. Uticaj LED svetiljke na pokazatelje kvaliteta električne energije?



Sami LED čipovi (skupovi LED-ovki) sa aspekta potrošača se ponašaju kao termogeni potrošač odnosno otpornik, sa druge strane LED čipovi nisu u stanju da rade na naizmeničnom naponu te im je u slučaju priključenja na naizmeničnu mrežu potrebno obezbediti napajanje u vidu AC/DC pretvarača (ispravljač) odgovarajućeg izlaznog napona i izlazne struje. Bitno je skrenuti pažnju da uticaj na kvalitet električne energije ne zavisi od LED-ovki već isključivo od vrste i kvaliteta napajanja istih.

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. Ovaj ispravljač izobličuje struju mreže, a delimično i napon. Izobličenje je posledica dopunjavanja kondezatora u periodima kad je mrežni napon veći od jednosmernog, odnosno napona na kondenzatoru. Trenutak dopunjavanja kondenzatora strujnim impulsom je praćen i blagim izobličenjem (zaravnjenjem) napona. U spektru je dominantan treći harmonik, a izraženi su i ostali neparni harmonici 5-ti, 7-mi, 9-ti, itd.

**25. Uloga balasta u osvetljenju i uticaj na pokazatelje kvaliteta? Elektromagnetni i elektronski balast.**

Elektromagnetni balast (prigušnica) je predspojna naprava koja ograničava pogonsku struju na nominalnu vrednost, te osigurava potreban startni napon. Tradicionalne sijalice sa električnim pražnjenjem koriste elektromagnetne prigušnice i imaju loš faktor snage. Sistem sa elektromagnetnom prigušnicom ponaša se kao potrošač induktivnog karaktera, te se uvek koristi kompenzacioni kondenzator u cilju popravka faktora snage. Zbog relativno velikih gubitaka u elektromagnetnim prigušnicama sve se više koriste elektronske prigušnice. Princip rada elektronske prigušnice je da se ulazni naizmenični napon 50 Hz ispravi u jednosmerni pa se onda pomoću određenih elemenata konvertuje u naizmenični napon vrlo visoke frekvencije 20-50 kHz. Ako se ne preduzimaju nikakve zaštitne mere, struja koju apsorbuju ispravljačko i konvertovsko kolo poprima vrlo velika izobličenja, iako su nominalno, osnovni oblik struje i napon u fazi. Zbog velikih izobličenja postavljaju se pasivni ili aktivni filtri čime se popravljaju faktor snage i smanjuje THD.

**26. Na osnovu prikazanih slika razmotriti uticaj THDI (ukupnog harmonijskog izobličenja struje) na PF (sačinilac snage) I uticaj dodavanja fluorescentnih cevi u paraleli sa postavkom natrijumove sijalice ?**

Sa priloženih slika može se zaključiti da harmonijsko izobličenje struje kod svih sijalica utiče na smanjenje sačinioca snage, osim kod halogene sijalice koja se ponaša kao aktivni potrošač. Uticaj harmonijskog izobličenja struje najviše dolazi do izražaja kod LED sijalice, koja pri  $THDI=181.55\%$  ima najmanji sačinilac snage 0.46. Takođe, sa navedenih slika može se zaključiti da se dodavanjem fluorescentnih cevi u paraleli sa natrijumovom sijalicom popravljaju sačinilac snage i sačinilac pomeraja, dok istovremeno dolazi do smanjenja ukupnog harmonijskog izobličenja struje.

**27. Koliko vrsta kvaliteta električne energije poznajete?**

- **Upotrebnii kvalitet:** električna energija se smatra „čistom“ energijom, pri njenom korišćenju ne dolazi do emisije štetnih gasova ( $CO_2$  i dr.), karakteriše se velikom raspoloživošću, jednostavnošću primene, primenjivošću za razne aplikacije, postojanjem ogromnog broja uređaja koji se napajaju ovim vidom energije, kao i primenom bez negativnih nus efekata.

- **Ekološki kvalitet:** uzima u obzir uticaj na okolinu, živa bića i ljude kod proizvodnje, prenosa i potrošnje električne energije. U tom kontekstu problematično je generisanje električne energije u termoelektranama, zbog velike emisije  $CO_2$  i problema odlaganja pepela, kao i u nuklearnim elektranama, zbog nerešenog problema odlaganja radioaktivnog otpada.

- **Komercijalni kvalitet:** razmatra pitanja odnosa sa potrošačima, odnosa sa javnošću i pitanja kvaliteta odnosa u lancu proizvodnja-prenos-distribucija električne energije, pitanja reklamacija na tehnički kvalitet.

- **Tehnički kvalitet:** podrazumeva kvalitet parametara električne energije, odnosno danas se pod pojmom „kvalitet električne energije“ misli upravo na ovu vrstu kvaliteta. Tehnički kvalitet električne energije može da se posmatra sa strane elektroenergetskog sistema i sa strane potrošnje električne energije. Razlikuje se:

- *kvalitet isporuke;*

- *kvalitet isporučene električne energije.*

Kvalitet isporuke definiše razne ekonomske parametre koji govore o pouzdanosti, sigurnosti i efikasnosti napajanja električnom energijom. Kvalitet isporučene električne energije u okviru tehničkog kvaliteta, se bavi parametrima koji opisuju osnovne veličine i talasni oblik napona kod potrošača i na ostalim elementima sistema. On je puno poznatiji pod imenom kvalitet napona.

## 28. Indikatori (pokazatelji) kvaliteta elektricne energije

Postoje razliciti indikatori, koji opisuju ili kvantifikuju nivo 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 racunanja i merenja standardizovani, tako da se rezultati mogu porediti sa velikom tačnošću. To takode omogućava i donošenje standarda, preporuka i drugih tehničkih propisa vezanih za limitiranje njihovih nivoa, dužine trajanja i ucestanosti pojavljivanja. U tabeli dati su neki opšte prihvaceni indikatori, njihova matematička definicija i najčešća oblast primene.

| Indikator                                             | Definicija                                                                                            | Glavna primena                                                                         |
|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| Ukupna harmonijska distorzija (THDU, THDI)            | $\sqrt{\frac{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2}{U_1^2}} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}{I_1^2}}$ | Opisivanje nivoa viših harmonika, standardi                                            |
| Individualna harmonijska distorzije (HD Uh, HD Ih)    | $\frac{U_h}{U_1} \cdot \frac{I_h}{I_1}$                                                               | Opisivanje nivoa viših harmonika, standardi                                            |
| Faktor snage (PF, $\lambda$ )                         | $P_{\text{act}} /  U_{\text{eff}}  \cdot  I_{\text{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) | $U_{\text{eff}} / U_{\text{nom}} 100 [\%]$<br>$\Delta t$                                              | Varijacije napona, propadi ili poskoci napona, podnaponi, prenaponi, beznaponske pauze |
| Faktor nesimetrije                                    | $ U_-  /  U_+ $                                                                                       | Nesimetrija trofaznih mreža                                                            |
| Krest faktor                                          | $U_{\text{peak}} / U_{\text{eff}}$                                                                    | Vek trajanja dielektrika                                                               |

**29. Šta je nadzor kvaliteta električne energije?**

Monitoring kvaliteta električne energije predstavlja proces prikupljanja, analize i interpretacije mjerenih podataka u svrhu izvlačenja korisnih informacija. Proces prikupljanja podataka obično se vrši kontinuiranim mjerenjem struje u određenom vremenskom periodu.

Prije nego što se započne sa bilo kakvim aktivnostima vezanim za monitoring potrebno je da se definišu ciljevi monitoringa. Ciljevi monitoringa često utiču na odabir opreme, pragove okidanja, metode za akvizaciju i pohranjivanje podataka, te na zahtjeve vezane za analizu i interpretaciju mjerenja.

Pri izboru lokacije za monitoring veoma je bitno da lokacija opreme za monitoring bude što je moguće bliže uređaju na koji djeluju varijacije kvaliteta električne energije. Važno je da oprema za monitoring vidi iste promjene koje vidi i osjetljiva oprema. Visokofrekventni tranzijenti mogu se prilično razlikovati na osjetljivoj opremi i monitorskoj opremi ako između njih postoji znatna udaljenost. Dobar izbor lokacije za monitoring je postavljanje monitorske opreme na odgovarajućoj transformatorskoj stanici i na ulazu posmatranog korisnika.

Dužina trajanja monitoringa zavisi od postavljenih ciljeva. Ukoliko je rješavanje problema uzrokovano naponskim propadima na udaljenim kvarovima u sistemu, potrebno je da vrijeme monitoringa bude što duže jer je pojava takvog kvara u sistemu rijetka. Za opis problema sa harmonicima i flikerima potrebno je da monitoring traje najmanje 7 dana.

**30. Izbor mesta nadzora kvaliteta električne energije**

S obzirom na što bolje razumjevanje prilika u sistemu teži se nadgledanju uslova rada na svim lokacijama u sistemu svo vreme, ali takav monitoring bi bio neekonomičan. Na sreću, vršenje merenja na svim mogućim lokacijama obično nije neophodno, jer merenja izvršena na nekoliko strateških lokacija mogu biti dovoljna da opišu karakteristike celokupnog sistema. 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 osjetljiva oprema. Visokofrekventni tranzijenti mogu se prilično razlikovati na osjetljivoj 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.

**31. Reakcija sijalice sa užarenim vlaknom na pojave nekvalitetnog napona**

Iako je sijalica sa užarenim vlaknom veoma neefikasna (iskorišćenje oko 10 %), na njoj se mogu uočiti sve negativne posledice nekvalitetnog napona. Ako je napon mreže manji od nominalnog sijalica će se manje grejati (kroz nju teče manja struja od nominalne), ali će zračiti manje svetlosne energije, što predstavlja veliki problem na mestima gde je potrebno kvalitetno osvetljenje (čitaonica i kuhinja). Ako je napon mreže veći od nominalnog, sijalica će se više grejati i zbog toga će joj se smanjiti

životni vek (često menjanje sijalice). Na pojavu flikera (treperenje napona) sijalica reaguje tako što joj svetlost treperi različitom jačinom, što je jako neugodno za ljudsko oko.

### **32. 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 takode mogu biti trenutni, prolazni ili privremeni, a u skladu sa svojom dužinom trajanja.

- 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.

- 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. Amplituda premašenja napona tokom kvara u sistemu je funkcija mesta kvara, impedanse sistema i uzemljenja.

- Podnapon

Podnapon je pojava napona koji ima vrednost manju od nazivne u vremenskom intervalu dužem od 1min. Tipične vrednosti su 0,8-0,9 r.j. Prenaponi mogu biti rezultat uključivanja velikih potrošača ili isključivanja kondenzatorskih baterija dok oprema za regulaciju napona ne vrati napon unutar dozvoljenih limita.

- Prenapon

Prenaponi koriste se da opišu specifičan prelazni proces dugog 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.

- Beznaponska pauza

Beznaponska pauza je smanjenje napojnog napona do 0V ( $<0,1r.j.$ ) u vremenskom 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.

- 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.

### **33. Uklanjanje viših harmonika primenom filtera**

Cilj postavljanja filtera je da se obezbedi visoka impedansa za harmonike struje i na taj način spreči njihovo širenje u mrežu. Zbog toga se filteri najčešće postavljaju paralelno potrošaču i sastoje od kondenzatora sa pridodatim prigušnicom. Rezonantna frekvencija filtera se proračunava uvek da bude nešto ispod frekvencije najnižeg dominantnog harmonika. Time se 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 je ređa, a cilj im je da predstavljaju visoku impedansu za harmonike struje i na taj način blokiraju njihovo širenje u mrežu. Ovakve vrste filtera nazivaju se pasivnim, za razliku od novijih vrsta – aktivnih. Aktivni filteri su u stvari energetske elektronske pretvarače, koji su tako programirani da vrše kompenzaciju viših harmonika. Sa takvim filterom obezbeđuje se "čista" sinusoidalna struja mreže, a često i faktor snage 1.

### **34. Navesti probleme koje stvaraju viši harmonici**

Harmonici struja stvaraju probleme i u napojnoj mreži kao i u instalacijama potrošača koji ih uzrokuju. Među najznačajnijim problemima do kojih može dovesti postojanje harmonika ulaze sledeći:

1. Pregrevanje nultog provodnika
2. Pregrevanje transformatora
3. Pregrevanje i nepravilan rad električnih motora
4. Uticaj harmonika na prekidače i zaštitne releje
5. Uticaj na elektronsku opremu
6. Uticaj na rad statičkih energetskih pretvarača
7. Uticaj na telekomunikacione veze
8. Naprezanje kondenzatorskih baterija za kompenzaciju reaktivne energije
9. Efekti toka harmonika struja kroz provodnike i sabirnice
10. Izobličenje mrežnog napona usled toka harmonijskih struja

## 4. IZVORI

1. V.C. Strezoski, D.S. Popović, "Proračuni stacionarnih režima elektroenergetskih sistema", Univerzitet u Novom Sadu i Fakultet tehničkih nauka, 1994
2. J. Arrillaga, N. Watson, "Power System Harmonics", 2nd Edition, John Wiley & Sons, Chichester, 2003.
3. 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
4. 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
5. R. Dugan, M. McGranaghan, S. Santoso, H. Beaty, "Electric Power Systems Quality", 2nd Edition, McGraw-Hill, New York, 2003
6. EN 50160, "Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems", 1999.
7. IEC Standard 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
8. 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.
9. IEEE Standard 519-1992: "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems", IEEE, New York, 1993.
10. R. Ramirez: "The FFT-Fundamentals and Concepts", Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, NJ, USA, 1985.
11. J. Knežević, V. Katić, "Hybrid Method for On-line Harmonic Analysis", Advances in Electrical and Computer Engineering, Vol. 11, No.3, 2011, pp.29-34.
12. S.V. Mujović, V.A. Katić, J.S. Radović, "Improved Analytical Expression for Calculating Total Harmonic Distortion of PC Clusters", Electric Power Systems Research, Vol. 81, No.7, July 2011, pp.1317-1324. 12
13. S.V. Mujović, V.A. Katić, J.S. Radović, "Improved Analytical Expression for Calculating Total Harmonic Distortion of PC Clusters", Electric Power Systems Research, Vol. 81, No.7, July 2011, pp.1317-1324. 13
14. V. Katić: "Kvalitet električne energije – viši harmonici", Monografija, Univerzitet u Novom Sadu - Fakultet tehničkih nauka, Edicija Tehničke nauke - Monografije, Br. 6, Novi Sad, 2002.
15. IEEE Standard 1159-1995: "IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality", IEEE, New York, 1995.
16. G. J. Wakileh, "Power System Harmonics, Fundamentals, Analysis and Filter Design" Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 2001.
17. V.Katić, "Energetska elektronika - zbirka rešenih zadataka", Edicija: Univerzitetski udžbenik, Broj 66, Univerzitet u Novom Sadu – Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 1998.
18. B.Dokić, "Energetska elektronika – pretvarači i regulatori", Elektrotehnički fakultet i Banjaluka Company, Banja Luka, 2000.
19. N.Mohan, T.Undeland, W.Robbins, "Power Electronics: Converters, Applications and Design", Media Enhanced Third Edition, John Wiley & Sons Inc., 2003

20. R. Ramirez: "*The FFT-Fundamentals and Concepts*", Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, NJ, USA, 1985.
21. V.A. Katić, S.V. Mujović, V.M. Radulović, J.S. Radović: „The Impact of the Load Side Parameters on PC Cluster's Harmonics Emission”, *Advances in Electronics and Computer Engineering*, Vol. 11, No.1, 2011, pp.103-110.
22. 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.
23. V. Katić: "Istraživanje viših harmonika u mreži Elektrovojvodine", I Savetovanje JUKO CIRED, Zlatibor, Okt. 1998, R-2.03.
24. R. Redl, P. Tenti, J.D. vanWyk, "Power Electronics' polluting effects", *IEEE Spectrum*, Vol.34, No.5, May 1997, pp.32-39.
25. B. Singh, A. Chandra, K. Al-Haddad, "*Power Quality, Problems and Mitigation Techniques*", John Wiley and Sons, 2015
26. D. Graovac, V. Katić, A. Rufer: "Power Quality Compensation Using Universal Power Quality Conditioning System", *IEEE Power Engineering Review*, Vol.20, No.12, Dec.2000, pp.58-60.
27. N. Čelanović, I. Čelanović, Z. Ivanović, M. Vekić, S. Grabić, D.Majstorović, V. Katić, „*Modelovanje pretvarača energetske elektronike u realnom vremenu*“, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Edicija: Tehničke nauke - Udžbenici, Broj 292, Novi Sad, Maj 2011, tiraž 120 primeraka, str.92, *Pomoćni udžbenik*, ISBN 978-86-7892-327-2
28. Z.R. Ivanovic, E.M. Adzic, M.S. Vekic, S.U. Grabic, N.L. Celanovic, V.A. Katic, "HIL Evaluation of Power Flow Control Strategies for Energy Storage Connected to Smart Grid Under Unbalanced Conditions", *IEEE Transaction on Power Electronics*, Vol. 27, No.11, Nov.2012, pp.4699-4710.
29. J. Schlabbach, D. Blume, T. Stephanblome, "Voltage Quality in Electric Power Systems", *Power and Energy Series 36*, The Institution of Electrical Engineers, London, 2001.
30. 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. 30
31. M. Vekić, S. Grabić, D. Majstorović, I. Čelanović, N. Čelanović, V.A. Katić, "Ultralow Latency HIL Platform for Rapid Development of Complex Power Electronics Systems", *IEEE Transaction on Power Electronics*, Vol. 27, No.11, Nov.2012, pp.4436-4444.
32. V. Katić, S. Grabić, Z. Čorba, B. Dumnić, D. Milićević, „*Teaching Engineering Courses at the University of Novi Sad – Case of Power Electronics Course*“, The 5<sup>th</sup> PSU-UNS International Conference on Engineering and Technology - ICET-2011, Phuket (Thailand), May 2-3, 2011, CD ROM, pp.392-396.
33. V.Katić, D.Marčetić, T.Ratić, "*Nastava u Laboratoriji za energetske elektroniku na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu*", VIII Simpozijum Energetska elektronika – Ee'95, Novi Sad, Sep. 1995, pp.229-236.
34. V. Katić, S. Grabić, Z. Čorba, B. Dumnić, D. Milićević, „*Teaching Engineering Courses at the University of Novi Sad – Case of Power Electronics Course*“, The 5<sup>th</sup> PSU-UNS International Conference on Engineering and Technology - ICET-2011, Phuket (Thailand), May 2-3, 2011, CD ROM, pp.392-396.
35. Čorba Zoltan: "*Fotonaponsko pretvaranje solarne energije – Fotonaponske elektrane*", skripta, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2013.

## 5. PRILOZI:

Prilog 1: **UPUTSTVO ZA PISANJE SEMESTRALNOG RADA**

Prilog 2: **UPUTSTVO ZA PISANJE PITANJA I ODGOVORA**

Prilog 3: **UPUTSTVO ZA PRIPREMU PREZENTACIJE**

## 5.1. Prilog 1

### UPUTSTVO ZA PISANJE SEMESTRALNOG RADA

U nastavku su date ključne informacije za pripremanje i tehničku obradu semestralnog rada, koje treba da obezbede jednostavniju pripremu i ujednačenu prezentaciju rezultata semestralnog rada u okviru vežbi a predmetu Kvalitet električne energije.

|                                                                                   |                                                                                                                                                                                                      |                                                                                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
|  | UNIVERZITET U NOVOM SADU<br>FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA<br>U NOVOM SADU                                                                                                                                 |  |
|  | Departman za energetiku, elektroniku i telekomunikacije<br><b>KATEDRA ZA ENERGETSKU ELEKTRONIKU I<br/>PRETVARAČE</b><br>Novi Sad, <a href="http://www.keep.ftn.uns.ac.rs">www.keep.ftn.uns.ac.rs</a> |  |

**Projekat: Kvalitet električne energije na FTN**

Grupa:

**(NASLOV RADA)**  
- SEMESTRALNI RAD -

Studenti:

(Ime i prezime - br.indeksa)

(Ime i prezime - br.indeksa)

(Ime i prezime - br.indeksa)

Mentor:

prof. dr Vladimir Katić

Novi Sad, 2017

|                                                                                   |                                                                                                               |        |
|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
|  | UNIVERZITET U NOVOM SADU • FAKULTET<br><b>TEHNIČKIH NAUKA</b><br>21000 NOVI SAD, Trg Dositeja<br>Obradovića 6 | Broj:  |
|                                                                                   |                                                                                                               |        |
|                                                                                   | <b>ZADATAK ZA SEMESTRALNI RAD</b>                                                                             | Datum: |
|                                                                                   |                                                                                                               |        |

*(Podatke unosi predmetni nastavnik - mentor)*

|                       |                                                                                                                                                  |
|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| STUDIJSKI<br>PROGRAM: | Master akademske studije:<br><b>Energetika, elektronika i telekomunikacije</b><br>Studijski modul: Energetska elektronika i električne<br>mašine |
|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

|                 |                                     |               |  |
|-----------------|-------------------------------------|---------------|--|
| Student:        |                                     | Broj indeksa: |  |
| Student:        |                                     | Broj indeksa: |  |
| Student:        |                                     | Broj indeksa: |  |
| Oblast/Predmet: | Kvalitet električne energije        |               |  |
| Projekat:       | Kvalitet električne energije na FTN |               |  |
| Mentor:         | prof. dr Vladimir Katić             |               |  |

#### NASLOV SEMESTRALNOG RADA

|                        |
|------------------------|
| Grupa:<br>Naslov rada: |
|------------------------|

#### TEKST ZADATKA:

|  |
|--|
|  |
|--|

## **Sadržaj**

- 1. Uvod**
- 2. Formatiranje Dokumenta**
  - 2.1. Pisanje matematičkih izraza**
  - 2.2. Postavljanje slika**
  - 2.3. Formatiranje tabela i označavanje**
- 3. Preuzimanje i citiranje**
- 4. Zaključak**
- 5. Literatura**

## **1.Uvod**

Ovo uputstvo treba da posluži za lakše sastavljanje i ujednačavanje u formi kod pisanja završnih i semestralnih radova na Katedri za energetske elektroniku i pretvarače Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu. Specificirani su osnovni zahtevi, način pisanja i formatiranja teksta, uputstvo za prikaz slika, tabela i matematičkih izraza, te način citiranja literature.

Svaki rad se sastoji od uvoda, središnjeg dela (razrade), zaključka i literature. Po potrebi, mogu se dodati i odgovarajući prilozi. U uvodu se daje opšti pristup temi i specificira motivacija, cilj i struktura rada. U središnjem delu detaljno se razrađuje zadata tema u skladu sa dobijenim zadatkom. Na kraju se daje zaključak u kom se daju završni stavovi nakon završenih istraživanja, merenja ili pregleda stanja u nekoj oblasti. U literaturi se navode izvori korišćenog materijala, stavova, brojčanih i drugih podataka, dijagrama, slika, tabela, crteža i sl., koji su preuzeti iz knjiga, časopisa, naučnih i stručnih radova, sa pojedinih sajtova ili iz drugih završnih radova. Prilozi mogu biti kataloški podaci, programske linije, tehnička dokumentacija i sl.

## 2.Formatiranje dokumenta

Završni ili semestralni rad može se pisati ćirilčnim ili latiničnim pismom. Formatiranje rada je u skladu sa ovim uputstvom:

Vrsta slova (Font) je Times New Roman, a veličina 14 za naslove poglavlja, a 12 naslove podpoglavlja i tekst u celini.

Podešavanje veličine strana (Page Setup) je sledeće:

- Veličina papira A4
- Orijentacija papira vertikalna (Portrait).
- Margine papira: leva 2,5 cm, a gornja, donja i desna 2 cm.

### 2.1 Pisanje matematičkih izraza

Matematički izrazi i druge jednačine se pišu u sredini sa numeracijom uz desnu ivicu upisanu u zagradama. Numeracija treba da prati broj poglavlja i redosled izraza u tom poglavlju.

**Primer:**

$$Ax + By = C \quad (2.1)$$

### 2.2 Postavljanje slika

Sve slike treba postaviti centrirano na sredinu stranice, a potpis ispod slike numerisati sa dva broja, tako da prvi broj odgovara broju poglavlja, a drugi rednom broju slike u tom poglavlju. Potpisi ispod slike treba uraditi u sledećem obliku: Slika 2.1.

**Primer:**



Slika 2.1. FN elektrana snage 16,3 kW na krovu mašinskih instituta FTNa.

### 2.3 Formatiranje tabela i označavanje

Tabele se ubacuju u tekst tako da se postavljaju uz levu ivicu i da se nalaze na jednoj

strani. Prelamanje tabela na više strana treba izbegavati. Veličina slova/brojeva je 10. Može se koristiti i manja veličina, 8 ili 9, ako je potrebno da tabela ostane na jednoj strani.

Tabele treba numerisati na sličan način, kao i slike, a natpisi se stavljaju iznad tabele u sledećem obliku: Tabela 2.1.

**Primer:**

Tabela 2.1. *FN elektrane u Srbiji [7]*

| <b>Vrsta</b>               | <b>Broj</b> | <b>Status</b> | <b>Snaga<br/>[MW]</b> | <b>Podsticaj<br/>[€/kWh]</b> |
|----------------------------|-------------|---------------|-----------------------|------------------------------|
| Na zemlji                  | 8           | U radu        | 5,34                  | 16,25                        |
| Na zemlji                  | 9           | U izgradnji   | 0,66                  | /                            |
| Na objektu <30kW           | 75          | U radu        | 1,656                 | 20,66                        |
| Na objektu <30kW           | 78          | U izgradnji   | 0,293                 | /                            |
| Na objektu od 30 do 500 kW | 10          | U radu        | 1,086                 | 16,25 – 20,66                |
| Na objektu od 30 do 500 kW | 10          | U izgradnji   | 0,915                 | /                            |
| UKUPNO:                    | 190         |               | 9,95                  |                              |

### **3. PREUZIMANJE I CRTANJE**

Nije dozvoljeno prepisivanje, kopiranje i drugo neautorizovano preuzimanje teksta, delova teksta, rezultata, slika, tabela i sl.

Ako se deo teksta, neki crtež, slika, tabela ili podatak želi citirati ili preuzeti iz neke publikacije, sa Internet stranice ili iz nekog drugog izvora potrebno je obavezno navesti, odnosno naznačiti izvor. To se radi tako što se deo teksta piše između navodnika, a iza citiranog teksta ili iza naziva slike ili tabele, odnosno navedenog podatka ili tvrdnje upiše broj u uglastim zagrada, pod kojim je citirana publikacija navedena u literaturi (na primer [1]).

#### 4. ZAKLJUČAK

U zaključku se navode glavni rezultati semestralnog rada dobijeni rešavanjem matematičkog modela, kroz računarske simulacije ili merenjem u laboratoriji ili na terenu, ključne izmerene vrednosti i rezultati analize mernih rezultata. Daju se ocene postignutih rezultata, kroz poređenje sa drugim prethodno poznatim metodama, rezultatima rečunanja, simulacija ili merenja, odnosno poređenjem sa domaćim ili stranim standardima, preporukama ili pravilima rada.

Završni ili semestralni rad urađen u skladu sa ovim uputstvom treba poslati mentoru putem e-mejla (na adresu [katav@uns.ac.rs](mailto:katav@uns.ac.rs)) na pregled i davanje uputstava i dodatnih komentara, sugestija i sl. za poboljšanje teksta. Poslati kompletan fajl, zajedno sa slikama, tabelama i sl. Fajl treba da je urađen u programu Word 2007. Fajl označiti sa: **Semestralni rad – Gr.xx-Prezime 1, Prezime 2, Prezime 3-v.1.0.doc**

U slučaju da mentor ima primedbe ili sugestije za poboljšanje poslate verzije, izvršiti zadate izmene ili dati odgovarajuća objašnjenja, pa ispravljenu verziju poslati u fajlu Word 2007 označenim sa: **Semestralni rad – Gr.xx-Prezime 1, Prezime 2, Prezime 3-v.2.0.doc**.

Konačnu verziju semestralnog rada, koju je odobrio mentor, poslati u obliku dva fajla Word 2007 i PDF označenih sa:

**Semestralni rad – Gr.xx-Prezime 1, Prezime 2, Prezime 3-FINAL.doc**, odnosno  
**Semestralni rad – Gr.xx-Prezime 1, Prezime 2, Prezime 3-FINAL.pdf**.

## 5. LITERATURA

- [1] A.E. Bryson and Y.C. Ho, *Applied Optimal Control*, New York: Wiley, 1975.
- [2] D. Sabin, A. Sandaram, “*Quality Enhances Reliability*,” *IEEE Spectrum*, vol.33, no.2, Feb.1996, pp.34-41.
- [3] Sachin K. Jain, S.N. Singh, “*Harmonics estimation in emerging power system: Key issues and challenges*,” *Electric Power Systems Research*, vol.81, Jun.2011, pp.1754-1766.
- [4] V. Katić, B. Dumnić, D. Milićević, S. Grabić, Z. Čorba, N. Katić, „*Moderne tehnologije vetrogeneratora*“, *VIII Savetovanje o elektrodistributivnim mrežama CIRED Srbija*, Vrnjačka Banja, 2012, CD ROM.
- [5] P. Mints, “*The Solar PV Ecosystem, A Brief History and a Look Ahead*“, *Renewable Energy World*, 2012, <http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2012/11/the-solar-pv-ecosystem-a-brief-history-and-a-look-ahead>
- [6] PVSyst, <http://www.pvsyst.com>
- [7] \*\*\*, Ministarstvo rudarstva i energetike Republike Srbije, „Registar povlašćenih proizvođača električne energije 04.08.2015.“, Beograd, 2015, Available On-line: <http://www.mre.gov.rs/doc/registar04.08.html>

## 5.2. Prilog 2

### UPUTSTVO ZA PISANJE PITANJA I ODGOVORA

Na osnovu rezultata istraživanja na projektu „Kvalitet električne energije na FTN“ svaka radna grupa studenata uz izveštaj treba da dostavi tri pitanja sa odgovorima iz teme svog semestralnog rada. U nastavku su date ključne informacije o načinu tehničke pripreme ovih pitanja i odgovarajućih odgovora.

**FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA**  
**MASTER akademske studije**  
**Departman za energetiku, elektroniku i telekomunikacije**  
**Katedra za energetske elektroniku i pretvarače**  
**Školska 20xx/xx**

**Predmet: Kvalitet električne energije**

**PITANJA I ODGOVORI**

1. Pitanje 1
2. Pitanje 2
3. Pitanje 3

**Pitanje 1 ...**

**Odgovor 1:** Odgovor treba tako sastaviti da sve najvažnije informacije stanu na polovinu strane A4 formata. U odgovoru se mogu uvrstiti matematičke jednačine, formula, slike, karakteristične vrednosti, tabele i sl.

Slika 1.1 ...

**Pitanje 2 ...**

**Odgovor 2: ...**

**Pitanje 3:**

**Odgovor 3:**

## 5.3. Prilog 3

### UPUTSTVO ZA PRIPREMU PREZENTACIJE

Na osnovu rezultata istraživanja na projektu „Kvalitet električne energije na FTN“ svaka radna grupa studenata treba da pripremi prezentaciju u vidu slajdova koristeći Power Point ili sličan program. U nastavku su date ključne informacije o načinu tehničke pripreme ovih pitanja i odgovarajućih odgovora.

Rezultate istraživanja, odnosno merenja i analize parametara kvaliteta električne energije na Fakultetu tehničkih nauka treba prikazati na posebnom kratkom nastavnom seminaru, koji se organizuje u poslednjoj nedelji ili ako ima više od 8 grupa u poslednje dve nedelje nastavnog ciklusa predavanja predmeta „Kvalitet električne energije“. Seminar pretpostavlja definisanu strukturu, tako da svaka grupa ima ukupno 15 minuta na raspolaganju, od kojih 10 minuta je sama prezentacija, a 5 minuta za tehničku pripremu i eventualne odgovore na pitanja iz publike ili od strane profesora. Seminar traje 2 sata.

Za seminar je potrebno pripremiti računarske slajdove za prezentaciju pomoću video bima, koristeći sledeća uputstva:

- Slajdovi za prezentaciju pripremaju se u programu Power Point ili sličnom.
- Pripremljeni fajl doneti na USB memorije i instalirati ga na računar neposredno pre ili odmah na početku seminara.
- Fajl označiti sa **KVEE-Grupa XX.ppt**
- Prezentaciju treba pripremiti na takav način da se izlaganje uradi u 10 min.
- Obično je potrebno pripremiti 10 – 12 slajdova.
- Slajdove organizovati na sledeći način:
  1. slajd: Naslovna strana – kao prva strana semestralnog rada
  2. slajd: Sadržaj prezentacije
  - 3.–10. slajd: Projektni zadatak; Opis mernog mesta; Primenjena instrumentacija i način vezivanja (fotografija mernog mesta); Ključni rezultati merenja i analize parametara kvaliteta električne energije – dijagrami, slike; Poređenje sa standardima/preporukama
  11. slajd: Zaključak
  12. slajd: „Hvala na pažnji!“