

UNIVERZA V MARIBORU  
FAKULTETA ZA ELEKTROTEHNIKO,  
RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKO

Klemen Rebol

**Analiza harmonskega popačenja napetosti v  
industrijskem elektroenergetskem omrežju**

Diplomsko delo

Maribor, junij 2015





Univerza v Mariboru

Fakulteta za elektrotehniko,  
računalništvo in informatiko

Smetanova ulica 17  
2000 Maribor, Slovenija



# **Analiza harmonskega popačenja napetosti v industrijskem elektroenergetskem omrežju**

Diplomsko delo

Študent:	Klemen Rebol
Študijski program:	Visokošolski študijski program Elektrotehnika
Smer:	Močnostna elektrotehnika
Mentor:	red. prof. dr. Gorazd Štumberger
Somentor	doc. dr. Klemen Deželak





Univerza v Mariboru

Fakulteta za elektrotehniko,  
računalništvo in informatiko  
Smetanova ulica 17  
2000 Maribor, Slovenija



Številka: 93571338

Datum in kraj: 20. 03. 2015, Maribor

Na osnovi 330. člena Statuta Univerze v Mariboru (Ur. l. RS, št. 46/2012)  
izdajam

#### SKLEP O DIPLOMSKEM DELU

1. **Klemnu Rebolju**, študentu visokošolskega strokovnega študijskega programa ELEKTROTEHNIKA, smer Močnostna elektrotehnika, se dovoljuje izdelati diplomsko delo.
2. **MENTOR:** red. prof. dr. Gorazd Štumberger  
**SOMENTOR:** doc. dr. Klemen Deželak
3. **Naslov diplomskega dela:**  
**ANALIZA HARMONSKEGA POPAČENJA NAPETOSTI V INDUSTRIJSKEM ELEKTROENERGETSKEM OMREŽJU**
4. **Naslov diplomskega dela v angleškem jeziku:**  
**ANALYSIS OF VOLTAGE HARMONIC DISTORTION IN AN INDUSTRIAL ELECTRICITY NETWORK**
5. Diplomsko delo je potrebno izdelati skladno z "Navodili za izdelavo diplomskega dela" in ga oddati v treh izvodih (dva trdo vezana izvoda in en v spiralo vezan izvod) ter en izvod elektronske verzije do 20. 03. 2016 v referatu za študentske zadeve.

Pravni pouk: Zoper ta sklep je možna pritožba na senat članice v roku 3 delovnih dni.



Dekan:

red. prof. dr. Borut Žalik

Obvestiti:

- kandidata,
- mentorja,
- somentorja,
- odložiti v arhiv.



## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se mentorju red. prof. dr. Gorazdu Štumbergerju in somentorju doc. dr. Klemenu Deželaku za pomoč in vodenje pri opravljanju diplomskega dela.

Hvala tudi podjetju za finančno podporo pri študiju in sodelavcem za spodbudo.

Posebna zahvala velja staršem, mojim najdražjim, Matevžu, Zarji in Manji za razumevanje in potrpežljivost v času študija.





# Analiza harmonskega popačenja napetosti v industrijskem elektroenergetskem omrežju

**Ključne besede:** harmoniki, harmonska analiza, industrijsko omrežje, popačenje napetosti, THD

**UDK:** 621.3.018.3(043.2)

## Povzetek

*V industrijskih omrežjih vedno bolj narašča število naprav, ki predstavljajo vir harmonskega popačenja napajalne napetosti. Pri umeščanju takšnih naprav v zaključena industrijska omrežja je treba upoštevati vpliv naprav na ostalo omrežje, kot ga predpisuje standard SIST EN 61000-2-4[1].*

*V diplomskem delu sta opisana osnovni namen in izvedba harmonske analize v izbranem zaključenem industrijskem omrežju. Poleg osnovne naloge kompenziranja jalove moči je v nalogi prikazan vpliv dvojnega kompenzacijskega filtra na napajalno napetost v izbrani priključni točki. Podan je predlog za učinkovito kompenzacijo jalove moči osnovne harmonske komponente in kompenzacijo tokov harmonskih komponent višjega reda. V zaključku so podane ugotovitve različnih vplivov na napajalno napetost v izbrani priključni točki, ob izbrani filtrski kompenzacijski napravi.*



# Analysis of voltage harmonic distortion in an industrial electricity network

**Key words:** harmonics, harmonic analysis, industrial electricity network, voltage distortion, THD

**UDK:** 621.3.018.3(043.2)

## Abstract

*In industrial networks the number of devices that represent a source of harmonic voltage distortion is increasing. In the placement of such devices in closed industrial networks it is necessary to consider the impact of these devices on the rest of the network devices as prescribed by the standard SIST EN 61000-2-4 [1].*

*This thesis describes the basic purpose and implementation of harmonic analysis of the selected closed industrial network. In addition to the basic functions to compensate reactive power, this diploma thesis shows the influence of dual compensation filter on the supply voltage at the selected connection point. The thesis proposes an efficient fundamental harmonic component reactive power compensation, as well as compensation of higher order harmonic currents. In the conclusion, the findings related to the impacts caused by the chosen filter compensation device on supply voltage at the given connection point are discussed.*



# KAZALO VSEBINE

<b>1</b>	<b>UVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>OSNOVE ANALIZE HARMONSKIH KOMPONENT NAPETOSTI IN TOKA [3], [4], [15]</b> .....	<b>3</b>
2.1	Fouriereva vrsta in njeni koeficienti .....	3
2.2	Osnovne značilnosti harmonskih komponent v elektroenergetskem omrežju .....	6
2.2.1	Simetričnost .....	6
2.2.2	Fazno zaporedje .....	7
2.3	Karakteristične veličine v harmonsko popačenih elektroenergetskih omrežjih .....	9
2.3.1	Efektivna vrednost napetosti in toka .....	9
2.3.2	Faktor celostnega harmonskega popačenja napetosti in toka .....	10
2.3.3	Navidezna, delovna, jalova in moč popačenja .....	12
2.3.4	Faktor moči (PF) .....	13
2.4	Nihajni krogi in resonanca v omrežju [7] .....	14
2.4.1	Zaporedna resonančna vezava RLC .....	16
2.4.2	Vzporedna resonančna vezava RLC .....	19
2.5	Vrednotenje kakovosti napajalne napetosti na osnovi harmonskega popačenja [8] .....	21
2.5.1	Vrednotenje harmonske napetosti .....	21
2.5.2	Povzetek [5] .....	23
<b>3</b>	<b>VPLIV HARMONSKEGA POPAČENJA NAPETOSTI NA OMREŽJE [5], [15]</b> .....	<b>25</b>
3.1	Predstavitev .....	25
3.2	Termične izgube v omrežjih z harmonskimi komponentami višjega reda .....	25
3.3	Vpliv harmonskih komponent višjega reda na elemente električnega omrežja .....	26
3.3.1	Vpliv harmonskih komponent višjega reda na naprave za izboljšanje PF .....	26
3.3.2	Vpliv harmonskih komponent višjega reda na energetske transformatorje .....	27
3.3.3	Vpliv harmonskih komponent višjega reda na rotirajoče stroje .....	27
3.3.4	Vpliv harmonskih komponent višjega reda na zaščitno, komunikacijsko in ostalo elektronsko opremo .....	28
3.3.5	Povzetek .....	28
<b>4</b>	<b>MODELIRANJE NADOMESTNIH ELEMENTOV OMREŽJA [5]</b> .....	<b>29</b>
4.1	Modeliranje elementov omrežja .....	29
4.2	Impedanca ob prisotnosti harmonskih komponent višjega reda .....	30
4.3	Kožni pojav (ang. skin effect) .....	31
4.4	Model VN omrežja .....	32
4.5	Model generatorja .....	34
4.6	Modeli bremena .....	35
4.6.1	Samostojno breme .....	35

4.6.2	Povezano breme.....	36
4.6.3	Nadomestni enofazni model bremena.....	37
4.6.4	Breme priključeno v trikotno trifazno vezavo .....	37
4.6.5	Breme priključeno v zvezdno trifazno vezavo .....	39
4.7	Splošen model prenosnega voda .....	40
4.8	Splošen model energetskega transformatorja.....	50
<b>5</b>	<b>NADOMESTNI MODEL OMREŽJA.....</b>	<b>53</b>
5.1	Model tujega omrežja.....	53
5.2	Model energetskega transformatorja .....	55
5.3	Model energetskega prenosnega voda .....	55
5.4	Model pasivnega bremena .....	56
5.5	Model nelinearnega bremena .....	57
5.6	Model kompenzacijskega filtra za kompenziranje tokov harmonskih komponent višjega reda .....	58
<b>6</b>	<b>ANALIZA HARMONSKEGA POPAČENJA NAPETOSTI NADOMESTNEGA MODELA.....</b>	<b>63</b>
6.1	Prikaz nazivnih podatkov naprav, vključenih v analizo harmonskega popačenja napetosti--	64
6.2	Izračun impedance elementov omrežja .....	66
6.3	Rezultati opravljene analize harmonskega popačenja napetosti omrežja .....	70
6.3.1	Nadomestni model omrežja brez kompenzacijskega filtra .....	71
6.3.2	Nadomestni model omrežja z uporabo kompenzacijskega filtra $h_r$ , 3,78/4,7 [14] .....	74
6.3.3	Sprememba kratkostične moči omrežja .....	78
6.3.4	Sprememba moči transformacije .....	81
<b>7</b>	<b>SKLEP .....</b>	<b>83</b>
<b>8</b>	<b>LITERATURA .....</b>	<b>85</b>

## KAZALO SLIK

Slika 2.1 Tipične oblike popačenega sinusnega signala.....	6
Slika 2.2 Kazalci faznih napetosti simetričnega trifaznega sistema.....	8
Slika 2.3 Kazalčni diagram moči ob upoštevanju moči popačenja $D$ .....	13
Slika 2.4 Zaporedna vezava idealnih elementov RLC .....	16
Slika 2.5 Amplitudna in fazna karakteristika za zaporedno RLC vezje .....	18
Slika 2.6 Vzporedna vezava idealnih elementov RLC .....	19
Slika 2.7: Amplitudna in fazna karakteristika za vzporedno RLC vezje .....	20
Slika 4.1 Prikaz modela bremena v zaporedni vezavi (a) in v vzporedni vezavi (b) .....	35
Slika 4.2 Breme priključeno v trikot trifazno vezavo .....	39
Slika 4.3 Breme priključeno v zvezdno trifazno vezavo .....	40
Slika 4.4: Ekvivalentni $\pi$ model kabla .....	40
Slika 4.5: fizikalne lastnosti prenosnega voda .....	45
Slika 4.6: Vzdolžna in prečna reaktanca voda .....	46
Slika 4.7: Nadomestna impedanca izbranega $\pi$ modela voda .....	47
Slika 4.8: Vzdolžna impedanca nadomestnega $\pi$ modela voda.....	48
Slika 4.9: Prečna admitanca nadomestnega $\pi$ modela voda .....	49
Slika 5.1 Topološka shema za izvedbo harmonske analize .....	53
Slika 5.2: Oblika toka nelinearnega bremena $I_{nlb}$ , .....	58
Slika 5.3: Enopolna shema modela kompenzacijskega filtra .....	59
Slika 5.4: Amplitudna in fazna karakteristika kompenzacijskega filtra $Q_1$ .....	60
Slika 5.5: Amplitudna in fazna karakteristika kompenzacijskega filtra $Q_2$ .....	60
Slika 5.6: Amplitudna in fazna karakteristika kompenzacijskih filtrov $Q_1$ in $Q_2$ .....	61
Slika 6.1: Nadomestno vezje za izračun impedance v priključni točki $Z_{zb4}$ .....	67
Slika 6.2: Nadomestno vezje za izračun nadomestne impedance $Z_{eqh}$ .....	69
Slika 6.3: Amplitudna karakteristika $Z_{eq}$ in $Z_{zb4}$ , brez kompenzacijskega filtra .....	72
Slika 6.4: Oblika napetosti in toka na zbiralkah $Z_{zb4}$ brez kompenzacijskega filtra.....	72
Slika 6.5: Impedančna karakteristika $Z_{eq}$ in $Z_{zb4}$ , s kompenzacijskim filtrom $h_r$ 3,78/4,7 .....	75
Slika 6.6: Oblika napetosti in toka na zbiralkah $Z_{zb4}$ s kompenzacijskim filtrom $h_r$ 3,78/4,7 .....	76
Slika 6.7: Impedančna karakteristika $Z_{eq}$ in $Z_{zb4}$ ob manjši kratkostični moči $Sk''$ .....	78
Slika 6.8: Oblika napetosti in toka na zbiralkah $Z_{zb4}$ ob manjši kratkostični moči $Sk''$ .....	79
Slika 6.9: Impedančna karakteristika $Z_{eq}$ in $Z_{zb4}$ ob paralelnem delovanju transformatorjev .....	81

## KAZALO TABEL

Tabela 2.1 Fazno zaporedje harmonskih komponent v simetričnem trifaznem sistemu .....	8
Tabela 2.2 Nivoji združljivosti za harmonske napetosti industrijskih omrežij .....	23
Tabela 4.1: Vežja in fazni premiki izbranega trifaznega dvonavitnega transformatorja.....	50
Tabela 5.1: Parametri kratkostične moči na zbiralkah v RTP Črnomelj povzeti po EIMV .....	54
Tabela 5.2: Podane vrednosti parametrov transformatorja $Tr 1$ (vezava YNyn).....	55
Tabela 5.3: Podane vrednosti parametrov transformatorja $Tr 2$ (vezava Dyn5) .....	55
Tabela 5.4: Podane vrednosti parametrov prenosnega voda $KB 1$ .....	56
Tabela 5.5: Ocenjene vrednosti parametrov prenosnega voda $KB 1$ .....	56
Tabela 5.6: Podane vrednosti nazivnih parametrov pasivnega bremena $P$ .....	56
Tabela 5.7: Podane vrednosti nazivnih parametrov nelinearnega bremena $F$ .....	57
Tabela 5.8: Podane vrednosti osnovnih parametrov kompenzacijskih filtrov .....	59
Tabela 6.1: Parametri nadomestnega modela za analizo harmonskega popačenja napetosti .....	65
Tabela 6.2: Bazne vrednosti za posamezni napetostni nivo .....	66
Tabela 6.3: Rezultati harmonske analize brez kompenzacijskega filtra .....	73
Tabela 6.4: Rezultati analize harmonskega popačenja napetosti za kompenzacijski filter $h_r 3,78/4,7$ .....	77
Tabela 6.5: Rezultati harmonske analize za kompenzacijski filter $h_r 3,78/4,7$ ob polovični moči $S_k'' 80$	
Tabela 6.6: Rezultati analize harmonskega popačenja za kompenzacijski filter $h_r 3,78/4,7$ ob paralelnem delovanju transformatorjev .....	82



## SEZNAM UPORABLJENIH SIMBOLOV

$A_0$	temenska vrednost enosmerne komponente v Fourierjevi vrsti
$A_h$	temenska vrednost realne harmonske komponente reda $h$ v Fourierjevi vrsti
$B_h$	temenska vrednost imaginarne harmonske komponente reda $h$ v Fourierjevi vrsti
$B_v$	susceptanca prečne veje voda [ $S=1/\Omega$ ]
$b$	susceptanca prečne veje voda na enoto dolžine [ $S/km$ ]
$\beta_h$	fazna konstanta signala harmonske komponente reda $h$ [ $1/m$ ]
$C$	kapacitivnost kondenzatorja [ $F$ ]
$C_1$	temenska vrednost osnovne harmonske komponente v Fourierjevi vrsti
$C_h$	komponenta harmonika višjega reda $h$
$D$	efektivna vrednost popačene moči [ $VA$ ]
$d$	faktor znižanja obremenitve (ang. derating factor)
$F$	efektivna vrednost signala
$F_h$	temenska vrednost signala harmonske komponente reda $h$
$F_{hef}$	efektivna vrednost signala harmonske komponente reda $h$
$f$	frekvenca [ $Hz$ ]
$f_h$	frekvenca harmonske komponente reda $h$
$f_r$	resonančna frekvenca [ $Hz$ ]
$f_{nih}$	frekvenca nihanja signala harmonske komponente reda $h$ [ $Hz$ ]
$f_t$	trenutna vrednost signala
$f_1$	frekvenca osnovne harmonske komponente [ $Hz$ ]
$G$	električna prevodnost [ $S=1/\Omega$ ]
$G_v$	ohmska prevodnost prečne veje voda [ $S=1/\Omega$ ]
$g$	ohmska prevodnost prečne veje voda na enoto dolžine [ $S/km$ ]
$\gamma$	kompleksni kazalec konstante širjenja osnovne harmonske komponente [ $1/m$ ]
$h$	red harmonske komponente
$h_r$	relativna resonančna frekvenca
$I$	efektivna vrednost toka [ $A$ ]
$\underline{I}$	kompleksni kazalec efektivne vrednosti toka [ $A$ ]
$i$	trenutna vrednost toka [ $A$ ]
$i_h$	relativna vrednost toka harmonske komponente reda $h$
$\underline{I}_a$	kompleksni kazalec osnovne harmonske komponente linijskega toka faze a [ $A$ ]

$\underline{I}_b$	kompleksni kazalec osnovne harmonske komponente linijskega toka faze b [A]
$\underline{I}_{brh}$	kompleksni kazalec toka bremena harmonske komponente reda $h$ [A]
$I_{brmax}$	temenska vrednost osnovne harmonske komponente maksimalnega toka bremena [A]
$\underline{I}_c$	kompleksni kazalec osnovne harmonske komponente linijskega toka faze c [A]
$\underline{I}_{fh}$	kompleksni kazalec toka $Q_c$ harmonske komponente reda $h$ [A]
$I_h$	temenska vrednost toka harmonske komponente reda $h$ [A]
$I_{hef}$	efektivna vrednost toka harmonske komponente reda $h$ [A]
$\underline{I}_{nlbh}$	kompleksni kazalec toka nelinearnega bremena harmonske komponente reda $h$ [A]
$\underline{I}_{zb4h}$	kompleksni kazalec toka $Z_{zb4}$ harmonske komponente reda $h$ [A]
$I_1$	temenska vrednost toka osnovne harmonske komponente [A]
$I_{1ef}$	efektivna vrednost toka osnovne harmonske komponente [A]
$I_{1\phi}$	efektivna vrednost enofaznega kratkostičnega toka [A]
$\underline{I}_1$	kompleksni kazalec toka osnovne harmonske komponente na začetku voda [A]
$\underline{I}_{1\phi}$	kompleksni kazalec enofaznega kratkostičnega toka [A]
$\underline{I}_{1\phi}^*$	konjugirano kompleksna vrednost enofaznega kratkostičnega toka [A]
$\underline{I}_2$	kompleksni kazalec toka osnovne harmonske komponente na koncu voda [A]
$I_{3\phi}$	efektivna vrednost trifaznega kratkostičnega toka [A]
$\underline{I}_{3\phi}$	kompleksni kazalec trifaznega kratkostičnega toka [A]
$\underline{I}_{3\phi}^*$	konjugirano kompleksna vrednost trifaznega kratkostičnega toka [A]
$L$	induktivnost tuljave [H]
$l$	dolžina voda [km]
$\lambda$	valovna dolžina voda [m]
$\lambda_h$	valovna dolžina voda harmonske komponente reda $h$ [m]
$P$	efektivna vrednost delovne moči [W]
$PF$	faktor moči
$PF^{disp}$	premaknjeni faktor moči
$PF^{dist}$	pravi faktor moči popačenja
$Q$	efektivna vrednost jalove moči [VAr]
$Q_C$	jalova moč kompenzacije [VAr]
$Q_{Co}$	kapacitivna moč naprav v omrežju [VAr]
$Q_v$	faktor kvalitete RLC vezja

$R$	ohmska upornost [ $\Omega$ ]
$R_a$	upornost armature [ $\Omega$ /fazo]
$R_{ah}$	upornost armature harmonske komponente $h$ [ $\Omega$ /fazo]
$R_g$	upornost zvezdišča [ $\Omega$ ]
$R_p$	upornost povezanega bremena [ $\Omega$ ]
$R_S$	upornost samostojnega bremena [ $\Omega$ ]
$R_v$	upornost vzdolžne veje voda [ $\Omega$ ]
$r$	upornost vzdolžne veje voda na enoto dolžine [ $\Omega$ /km]
$S$	absolutna vrednost navidezne moči [VA]
$\underline{S}$	kompleksni kazalec navidezne moči [VA]
$S_b$	bazna vrednost navidezne moči [VA]
$\underline{S}_b^*$	kompleksni kazalec nazivne moči bremena [VA]
$S_{tr}$	nazivna moč transformatorja [VA]
$S''_k$	kratkostična moč omrežja [VA]
$\underline{S}''_k$	kompleksni kazalec kratkostične moči [VA]
$S_I$	osnovna harmonska komponenta navidezne moči [VA]
$\underline{S}''_{1\phi}$	kompleksni kazalec enofazne kratkostične moči [VA]
$\underline{S}''_{3\phi}$	kompleksni kazalec trifazne kratkostične moči [VA]
$sh$	hiperbolični sinus
$T$	čas ene periode [s]
$TDD$	Faktor celostnega popačenja pri maksimalnem toku bremena
$THD$	faktor celostnega harmonskega popačenja
$THD_I$	faktor celostnega harmonskega popačenja toka
$THD_U$	faktor celostnega harmonskega popačenja napetosti
$th$	hiperbolični tangens
$U_{bL-L}$	efektivna vrednost bazne napetosti zbiralk [V]
$U$	efektivna vrednost napetosti [V]
$\underline{U}$	kompleksni kazalec efektivne vrednosti napetosti [V]
$u$	trenutna vrednost napetosti [V]
$\underline{U}_a$	kompleksni kazalec osnovne harmonske komponente fazne napetosti faze a [V]
$\underline{U}_b$	kompleksni kazalec osnovne harmonske komponente fazne napetosti faze b [V]
$\underline{U}_C$	kompleksni kazalec efektivnega padca napetosti na kondenzatorju $C$ [V]

$\underline{U}_c$	kompleksni kazalec osnovne harmonske komponente fazne napetosti faze c [V]
$U_h$	temenska vrednost napetosti harmonske komponente reda $h$ [V]
$u_h$	relativna vrednost napetosti harmonske komponente reda $h$
$U_{hef}$	efektivna vrednost napetosti harmonske komponente reda $h$ [V]
$\underline{U}_L$	kompleksni kazalec efektivnega padca napetosti na tuljavi $L$ [V]
$\underline{U}_R$	kompleksni kazalec efektivnega padca napetosti na upor $R$ [V]
$\underline{U}_{zb4h}$	kompleksni kazalec vozliščne napetosti $Z_{zb4}$ harmonske komponente reda $h$ [V]
$U_1$	temenska vrednost napetosti osnovne harmonske komponente [V]
$\underline{U}_1$	kompleksni kazalec napetosti osnovne harmonske komponente na začetku voda [V]
$U_{1ef}$	efektivna vrednost napetosti osnovne harmonske komponente [V]
$\underline{U}_2$	kompleksni kazalec napetosti osnovne harmonske komponente na koncu voda [V]
$U_{40}$	efektivna vrednost napetosti do 40. harmonika [V]
$v_h$	hitrost širjenja signala harmonske komponente reda $h$ [m/s]
$\vartheta_h$	fazni kot harmonske komponente reda $h$ [°]
$\Phi_h$	fazni kot napetosti harmonske komponente reda $h$ [°]
$\Theta_h$	fazni kot toka harmonske komponente reda $h$ [°]
$\varphi_h$	fazni kot v resonančni točki [°]
$\Phi_1$	enofazni kot kratkostične impedance [°]
$\Phi_3$	trifazni kot kratkostične impedance [°]
$X_C$	kapacitivna upornost (reaktanca) [ $\Omega$ ]
$X_L$	induktivna upornost (reaktanca) [ $\Omega$ ]
$X_n$	nadomestna upornost (reaktanca) [ $\Omega$ ]
$X_p$	reaktanca povezanega bremena [ $\Omega$ ]
$X_S$	reaktanca samostojnega bremena [ $\Omega$ ]
$X_v$	reaktanca vzdolžne veje voda [ $\Omega$ ]
$X_0$	reaktanca ničnega zaporedja generatorja [ $\Omega$ /fazo]
$X_2$	reaktanca negativnega zaporedja generatorja [ $\Omega$ /fazo]
$X''_d$	začetna reaktanca generatorja generatorja [ $\Omega$ /fazo]
$x$	reaktanca vzdolžne veje voda na enoto dolžine [ $\Omega$ /km]
$\omega$	osnovna krožna frekvenca [Hz]
$\omega_r$	resonančna krožna frekvenca [Hz]

$\underline{Y}$	kompleksni kazalec admitance voda osnovne harmonske komponente [S=1/Ω]
$\underline{y}$	kompleksni kazalec prečne admitance voda na enoto dolžine [S/km]
$\underline{Y}_h$	kompleksni kazalec admitance voda harmonske komponente reda $h$ [S=1/Ω]
$\underline{y}_h$	kompleksni kazalec admitance voda harmonske komponente reda $h$ na enoto dolžine [S/km]
$\underline{Y}_p$	kompleksni kazalec admitance bremena [S=1/Ω]
$\underline{Y}_{ph}$	kompleksni kazalec admitance bremena harmonske komponente $h$ [S=1/Ω]
$\underline{Y}_l$	kompleksni kazalec prečne admitance osnovne harmonske komponente na začetku voda [S=1/Ω]
$\underline{Y}_{lh}$	kompleksni kazalec prečne admitance na začetku voda harmonske komponente reda $h$ [S=1/Ω]
$\underline{Y}_2$	kompleksni kazalec prečne admitance osnovne harmonske komponente na koncu voda [S=1/Ω]
$\underline{Y}_{2h}$	kompleksni kazalec prečne admitance na koncu voda harmonske komponente reda $h$ [S=1/Ω]
$\underline{Y}^0$	kompleksni kazalec admitance ničnega zaporedja [S=1/Ω]
$\underline{Y}^+$	kompleksni kazalec admitance pozitivnega zaporedja [S=1/Ω]
$\underline{Y}^-$	kompleksni kazalec admitance negativnega zaporedja [S=1/Ω]
$\underline{Z}$	kompleksni kazalec impedance osnovne harmonske komponente voda [Ω]
$\underline{z}$	kompleksni kazalec impedance voda na enoto dolžine [Ω/km]
$\underline{Z}_{bh}$	kompleksni kazalec impedance bremena harmonske komponente $h$ [Ω]
$\underline{Z}_{brh}$	kompleksni kazalec impedance bremena harmonske komponente reda $h$ [Ω]
$\underline{Z}_c$	kompleksni kazalec impedance valovne upornosti osnovne harmonske komponente voda [Ω]
$\underline{Z}_{ch}$	kompleksni kazalec valovne upornosti voda harmonske komponente reda $h$ [Ω]
$\underline{Z}_{dv}$	kompleksni kazalec impedance prenosnega voda [Ω]
$\underline{Z}_{eqh}$	kompleksni kazalec impedance nadomestnega vezja harmonske komponente reda $h$ [Ω]
$\underline{Z}_{fh}$	kompleksni kazalec impedance kompenzacijskega filtra harmonske komponente reda $h$ [Ω]
$\underline{Z}_g$	kompleksni kazalec impedance generatorja [Ω]
$\underline{Z}_h$	kompleksni kazalec impedance harmonske komponente reda $h$ [Ω]

$\underline{Z}_{kbh}$	kompleksni kazalec impedance kablovoda harmonske komponente reda $h$ [ $\Omega$ ]
$\underline{Z}_{vh}$	kompleksni kazalec impedance voda harmonske komponente reda $h$ [ $\Omega$ ]
$\underline{z}_h$	kompleksni kazalec impedance voda harmonske komponente reda $h$ na enoto dolžine [ $\Omega/\text{km}$ ]
$\underline{Z}_{gh}$	kompleksni kazalec impedance generatorja harmonske komponente $h$ [ $\Omega$ ]
$\underline{Z}_{dvh}$	kompleksni kazalec impedance prenosnega voda harmonske komponente $h$ [ $\Omega$ ]
$\underline{Z}_{nvh}$	kompleksni kazalec nadomestne impedance voda harmonske komponente reda $h$ [ $\Omega$ ]
$\underline{Z}_{omh}$	kompleksni kazalec impedance omrežja harmonske komponente reda $h$ [ $\Omega$ ]
$\underline{Z}_r$	kompleksni kazalec impedance vezja v resonančni točki [ $\Omega$ ]
$\underline{Z}_s$	kompleksni kazalec impedance bremena [ $\Omega$ ]
$\underline{Z}_{sh}$	kompleksni kazalec impedance bremena harmonske komponente reda $h$ [ $\Omega$ ]
$\underline{Z}_{tr}$	kompleksni kazalec impedance transformatorja [ $\Omega$ ]
$\underline{Z}_{trh}$	kompleksni kazalec impedance transformatorja harmonske komponente $h$ [ $\Omega$ ]
$\underline{Z}_{tr1h}$	kompleksni kazalec impedance $Tr 1$ harmonske komponente reda $h$ [ $\Omega$ ]
$\underline{Z}_{tr2h}$	kompleksni kazalec impedance $Tr 2$ harmonske komponente reda $h$ [ $\Omega$ ]
$\underline{z}_{tr}$	kompleksni kazalec relativne impedance transformatorja
$\underline{Z}_v$	kompleksni kazalec vzdolžne impedance voda osnovne harmonske komponente [ $\Omega$ ]
$\underline{Z}_{vh}$	kompleksni kazalec vzdolžne impedance voda harmonske komponente reda $h$ [ $\Omega$ ]
$\underline{Z}_Y$	kompleksni kazalec impedance bremena v zvezda vezavi [ $\Omega$ ]
$\underline{Z}_{Zb4}$	kompleksni kazalec impedance v $Z_{zb4}$ [ $\Omega$ ]
$\underline{Z}^+$	kompleksni kazalec impedance pozitivnega zaporedja [ $\Omega$ ]
$\underline{Z}_b^+$	kompleksni kazalec impedance pozitivnega zaporedja bremena [ $\Omega$ ]
$\underline{Z}_{gh}^+$	kompleksni kazalec impedance pozitivnega zaporedja generatorja harmonske komponente reda $h$ [ $\Omega$ ]
$\underline{Z}_{om}^+$	kompleksni kazalec impedance pozitivnega zaporedja omrežja [ $\Omega$ ]
$\underline{Z}_{tr}^+$	kompleksni kazalec impedance pozitivnega zaporedja transformatorja [ $\Omega$ ]
$\underline{Z}$	kompleksni kazalec impedance negativnega zaporedja [ $\Omega$ ]
$\underline{Z}_{gh}$	kompleksni kazalec impedance negativnega zaporedja generatorja harmonske komponente reda $h$ [ $\Omega$ ]
$\underline{Z}_{tr}$	kompleksni kazalec impedance negativnega zaporedja transformatorja [ $\Omega$ ]

$\underline{Z}^0$	kompleksni kazalec impedance ničnega zaporedja [ $\Omega$ ]
$\underline{Z}_{b}^0$	kompleksni kazalec impedance ničnega zaporedja bremena [ $\Omega$ ]
$\underline{Z}_{gh}^0$	kompleksni kazalec impedance ničnega zaporedja generatorja harmonske komponente reda $h$ [ $\Omega$ ]
$\underline{Z}_{om}^0$	kompleksni kazalec impedance ničnega zaporedja omrežja [ $\Omega$ ]
$\underline{Z}_{tr}^0$	kompleksni kazalec impedance ničnega zaporedja transformatorja [ $\Omega$ ]
$\underline{Z}_A$	kompleksni kazalec impedance bremena v vezavi trikot [ $\Omega$ ]

## SEZNAM KRATIC

AC	izmenični vir napetosti
EES	elektroenergetski sistem
EN	evropski standard
F	frekvenčno vodeno breme
KB	kablovod
LR	lastna raba
OO	ostali odjem
P	pasivno breme
pu	sistem enotinih vrednosti
RP	razdelilna postaja
RTP	razdelilna transformatorska postaja
SIST	slovenski standard
TO	tuje omrežje
TP	transformatorska postaja





## 1 UVOD

Z vse hitrejšim razvojem komponent na področju močnostne elektrotehnike, je v industrijskih omrežjih iz dneva v dan večje število naprav, ki so po svojem delovanju in vplivu na omrežje zelo raznolike. Zaradi tega je treba poleg klasične potrebe po kompenziranju osnovne harmonske komponente jalove moči, razmišljati še o kompenziranju jalove moči harmonskih komponent višjega reda. S pomočjo analize harmonskega popačenja napetosti omrežja se zagotovi optimalna umeščenost kompenzacijskih naprav v takšna omrežja. Kakor vemo, je naloga kompenzacijskih naprav kompenzirati jalovo moč, ki jo potrebujejo bremena za svoje delovanje. Vendar pa lahko ob nepravilnem dimenzioniranju in izbiri elementov povzročimo dodatno ojačanje tokov oziroma napetosti harmonskih komponent višjega reda v omrežju. Zaradi tega pred vgradnjo kompenzacijskih naprav v omrežje, preverimo tokovne in napetostne razmere s pomočjo merilnih instrumentov ter z natančno analizo harmonskega popačenja napetosti na izbranem mestu vgradnje kompenzacijske naprave v omrežje.

V diplomski nalogi je obravnavana predvsem teorija vpliva sestavljenega filtra kompenzacijske naprave v širšem frekvenčnem področju. S pomočjo ustreznega programskega orodja pa lahko služi tudi kot pomoč pri umeščanju kompenzacijskih naprav v industrijska omrežja.

V drugem poglavju so predstavljene osnove analize harmonskega popačenja napetosti in toka. Pri tem je uporabljen razvoj harmoničnih signalov v Fourierevo vrsto. Opisane so osnovne značilnosti obnašanja harmonskih komponent višjega reda v energetskih omrežjih, vrednotenje kakovosti električne energije na osnovi harmonskega popačenja po standardu SIST EN 61000-2-4 [1] in nihajni krogi z resonančnimi stanji v omrežju.

Tretje poglavje je namenjeno predstavitvi vpliva harmonskega popačenja napetosti na omrežje in na posamezne elemente, ki ga sestavljajo.

V četrtem poglavju so predstavljeni pristopi k modeliranju elementov omrežja, ki se uporabljajo pri izvedbi analize harmonskega popačenja napetosti omrežja. Pri tem so nakazane osnove modeliranja energetskih transformatorjev, srednjenapetostnih kablovodov, kompenzacijskih filtrov ter linearnih in nelinearnih bremen.

V sklopu petega poglavja je predstavljen model tipičnega industrijskega omrežja. Natančneje so opisani in podani parametri potrebni pri konfiguraciji elementov modela.

V šestem poglavju je za izbrani model omrežja izvedena analiza harmonskega popačenja napetosti. Podani so rezultati v obliki preglednic in grafov. V analizo je bilo vključenih več različnih obratovalnih stanj, ki predstavljajo pričakovane razmere v električnem omrežju.

V sklepu so podani zaključki izvedene analize harmonskega popačenja napetosti in priporočila glede izbire filtrske kompenzacijske naprave.

## 2 OSNOVE ANALIZE HARMONSKIH KOMPONENT NAPETOSTI IN TOKA [3], [4], [15]

Električni signal, tako napetostni kot tokovni, je mogoče predstaviti v časovnem ali frekvenčnem področju. V elektroenergetskih omrežjih, predvsem v zaključenih industrijskih delih omrežja, kakršno predstavlja tudi nadomestni model v naši nalogi pa imamo pogosto opravka tudi s toki in napetostmi, ki vsebujejo le nekaj dominantnih frekvenc in se periodično ponavljajo. Takšni toki in napetosti so poseben primer zveznih funkcij, ki so definirane na intervalu  $[t_1, t_2]$ . Zaradi prevladujočega vpliva le nekaj frekvenc, jih je smiselno predstaviti kot harmonične funkcije teh frekvenc in časa. V tem primeru govorimo o obravnavi tokov in napetosti v frekvenčnem področju [2].

Ob predpostavki, da je omrežje v trenutku opazovanja v ustaljenem obratovanju, in obravnavamo tok ali napetost kot periodični funkciji, lahko ti funkciji predstavimo s pomočjo Fourierove vrste. Pri tem lahko vsako periodično funkcijo predstavimo kot vsoto enosmerne komponente, in vsoto sinusnih in kosinusnih členov harmonskih komponent višjega reda. Pri tem je harmonska komponenta višjega reda definirana kot funkcija frekvence, ki je večkratnik osnovne harmonske frekvence [3].

Fourierova analiza tako predstavlja izračun amplitudnih vrednosti (2.3), (2.4), (2.5) in faznih kotov (2.7) za opazovan signal pri osnovni frekvenci in harmonskih komponentah višjega reda [5]. Matematične osnove Fourierove vrste in njenih koeficientov so podane v nadaljevanju.

### 2.1 Fourierova vrsta in njeni koeficienti

Na splošno lahko vsako periodično funkcijo  $f(t)$  na intervalu  $[t_1, t_2]$  predstavimo kot vsoto trigonometričnih funkcij v obliki (2.2) [5], kadar je zadoščeno Dirichletovemu pogoju:

- Interval na katerem je funkcija  $f(t)$  definirana, lahko razdelimo na končno mnogo intervalov, na katerih je funkcija  $f(t)$  monotona in zvezna ter
- v vseh točkah nezveznosti funkcije  $f(t)$  sta definirani vrednosti  $f(t+0)$  in  $f(t-0)$ .

Kadar funkcija  $f(t)$  zadošča Dirichletovemu pogoju, njena Fourierjeva vrsta konvergira. Vsota Fourierjeve vrste je za tiste vrednosti  $t$ , za katere je funkcija  $f(t)$  zvezna, enaka  $f(t)$ .

Za tiste vrednosti  $t$ , za katere je funkcija  $f(t)$  nezvezna, pa je vrednost vrste enaka zapisu v (2.1) [455], pri čemer sta z  $f(t+0)$  in  $f(t-0)$  označeni vrednosti desne in leve limite.

$$f(t) = \frac{f(t+0) + f(t-0)}{2} \quad (2.1)$$

Na splošno lahko vsako ponavljajočo se obliko signala, razširimo v obliko Fourierjeve vrste, ki jo zapišemo kot (2.2) [5]:

$$\begin{aligned} f(t) &= A_0 + \sum_{h=1}^{\infty} [A_h \cos(h\omega_0 t) + B_h \sin(h\omega_0 t)] \\ &= A_0 + \sum_{h=1}^{\infty} C_h \sin(h\omega_0 t + \phi_h) \end{aligned} \quad (2.2)$$

Pri tem je:

$\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$  krožna frekvenca, in  $T$  čas ene periode,

$h$  red harmonske komponente,

$A_0$  temenska vrednost enosmerne komponente v Fourierjevi vrsti,

$A_h$  temenska vrednost realne harmonske komponente reda  $h$  v Fourierjevi vrsti,

$B_h$  temenska vrednost imaginarne harmonske komponente reda  $h$  v Fourierjevi vrsti,

$C_1$  temenska vrednost osnovne harmonske komponente v Fourierjevi vrsti,

$C_h$  temenska vrednost harmonske komponente reda  $h$  v Fourierjevi vrsti,

$\phi_1$  fazni kot komponente osnovne harmonskega harmonika,

$\phi_h$  fazni kot harmonske komponente reda  $h$  v Fourierjevi vrsti.

Fourierjeve koeficiente tako predstavimo z naslednjimi enačbami (2.3), (2.4), (2.5), (2.6) in (2.7) [5]:

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} f(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(t) dx; \quad x = \omega_0 t \quad (2.3)$$

$$A_h = \frac{2}{T} \int_{t_1}^{t_2} f(t) \cos(h\omega_0 t) dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cos(hx) dx \quad (2.4)$$

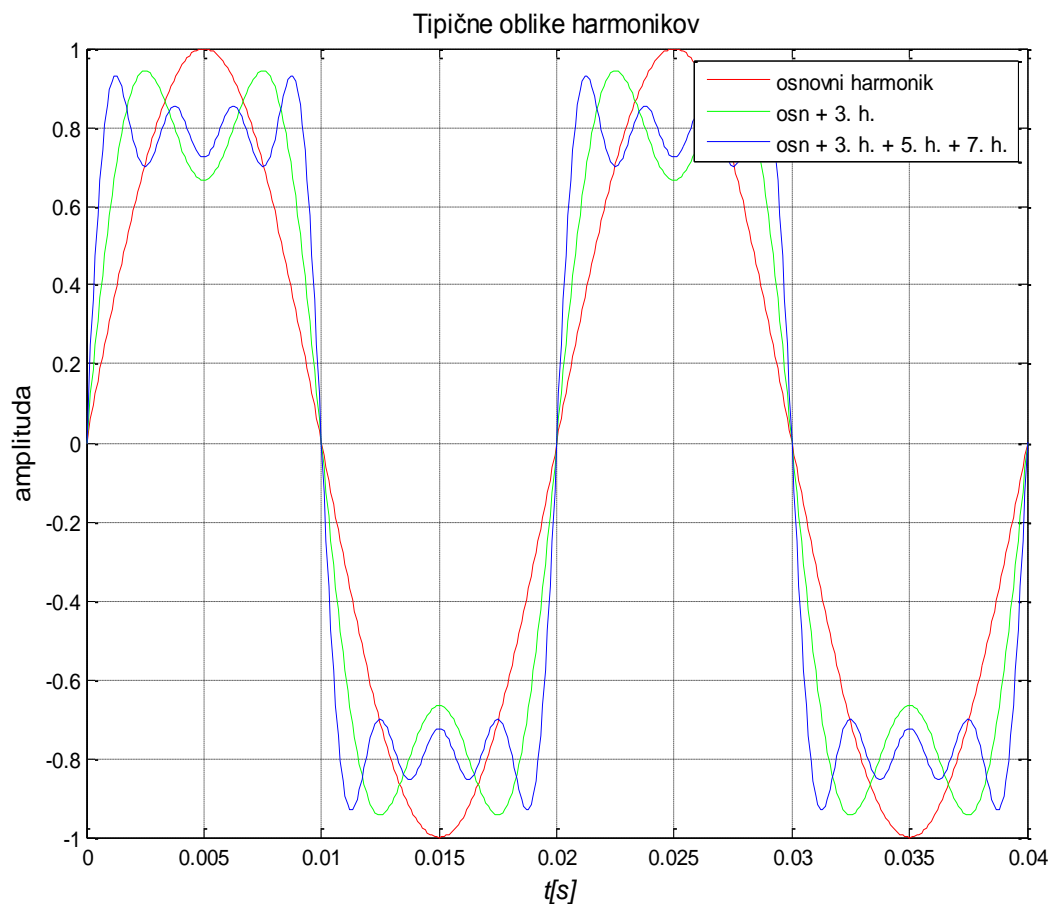
$$B_h = \frac{2}{T} \int_{t_1}^{t_2} f(t) \sin(h\omega_0 t) dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \sin(hx) dx \quad (2.5)$$

$$C_h = \sqrt{A_h^2 + B_h^2} \quad (2.6)$$

$$\phi_h = \tan^{-1} \left( \frac{A_h}{B_h} \right) \quad (2.7)$$

Na sliki 2.1 so prikazane oblika električnega signala osnovne harmonske komponente frekvence 50 Hz, oblika signala sestavljenega iz osnovne harmonske komponente in deležem tretje harmonske komponente ter oblika signala, ki vsebuje osnovno komponento in delež večjega števila harmonskih komponent. Signal brez dodatnih harmonskih komponent višjega reda je čiste sinusne oblike, medtem ko lahko opazimo, da je oblika signala z večanjem števila prisotnosti harmonskih komponent višjega reda in seveda tudi velikostjo njihove amplitude, vedno bolj popačena.

Izris slike 2.1 je izveden s pomočjo programske kode v programu Matlab, ki je podana kot priloga **B.1**.



Slika 2.1 Tipične oblike popačenega sinusnega signala

## 2.2 Osnovne značilnosti harmonskih komponent v elektroenergetskem omrežju

### 2.2.1 Simetričnost

- Funkcija  $f(t)$  je liha, kadar je  $f(-t) = -f(t)$ , za njene koeficiente velja naslednje (2.8) [4]:

$$A_h = 0, \quad B_h = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} f(t) \sin h \frac{2\pi t}{T} dt \quad (h = 1, 2, 3, \dots). \quad (2.8)$$

V Fourierovi vrsti nastopajo samo sinusni členi, ni kosinusnih členov in je  $a_h = 0$  [7].

- Funkcija  $f(t)$  je soda, kadar je  $f(t) = f(-t)$ , za njene koeficiente velja naslednje (2.9) [4]:

$$A_h = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} f(t) \cos h \frac{2\pi t}{T} dt, \quad B_h = 0 \quad (h = 0, 1, 2, 3, \dots). \quad (2.9)$$

V Fourierevi vrsti nastopajo samo kosinusni členi, brez sinusnih in je  $B_h=0$  [7].

- Kadar je  $f(t+T/2)=-f(t)$ , zadoščajo njeni koeficienti enakostim (2.10) [4]:

$$\begin{aligned} A_{2h+1} &= \frac{4}{T} \int_0^{T/2} f(t) \cos(2h+1) \frac{2\pi t}{T} dt, & A_{2h} &= 0, \\ B_{2h+1} &= \frac{4}{T} \int_0^{T/2} f(t) \sin(2h+1) \frac{2\pi t}{T} dt, & B_{2h} &= 0, \quad (h = 0, 1, 2, 3, \dots). \end{aligned} \quad (2.10)$$

Če členi zadoščajo pogoju polovične simetričnosti, potem je vrednost enosmerne komponente takšne funkcije enaka nič. Rezultat tega je, da odpadejo vsi sodi sinusni in kosinusni členi harmonskih komponent višjega reda [7].

### 2.2.2 Fazno zaporedje

Za simetričen elektroenergetski sistem velja, da je vsaka izmed harmonskih komponent toka ali napetosti v sistemu simetričnih komponent zapisana samo kot:

- tok ali napetost ničnega (homopolarnega) zaporedja,
- tok ali napetost pozitivnega (direktnega) zaporedja,
- tok ali napetost negativnega (inverznega) zaporedja.

Pri tem velja, da so toki v faznem (linijskem) vodniku vsota tokov treh zgoraj omenjenih sistemov (zaporedij). Metoda simetričnih komponent ima to lastnost, da s transformacijo faznih nesimetričnih veličin v simetrične komponente, prevedemo prej povezani nesimetrični trifazni sistem v tri medsebojno neodvisne simetrične sisteme [6].

Tako v obravnavamo tri med seboj nepovezane sisteme za vsak red harmonske komponente posebej [15].

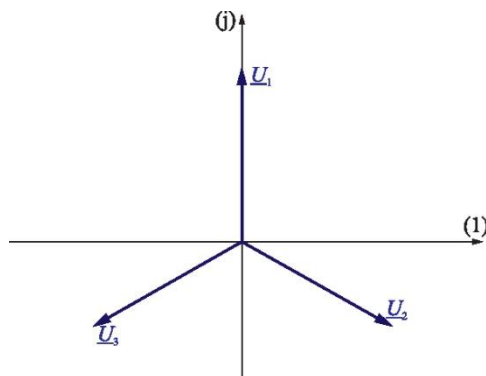
Osnovne harmonske komponente napetosti so v simetričnem trifaznem sistemu med seboj premaknjene za  $120^\circ$ , kot je prikazano na sliki 2.2. Fazni premik harmonskih komponent višjega reda je določen s produktom reda harmonske komponente  $h$  in kotom premika osnovne harmonske komponente [15].

V nadaljevanju podani opisi v tabeli 2.1 so smiselno povzeti po [15] in [6].

Tako so v tabeli 2.1 z negativnim predznakom označene harmonske komponente višjega reda, pri katerih je fazni premik med fazama  $-120^\circ$ . Te komponente predstavljajo negativni sistem trifaznega simetričnega zaporedja. V tem primeru se trifazni simetrični sistem za izbrano harmonsko komponento vrti v nasprotni smeri osnovnega sistema.

S pozitivnim predznakom so označene harmonske komponente višjega reda, pri katerih je fazni premik med fazama  $120^\circ$  in, tako tvorijo pozitivni simetrični sistem ter imajo enako smer vrtenja kot sistem osnovnih harmonskih komponent.

Nično zaporedje predstavljajo harmonske komponente, ki so v tabeli 2.1 označene z 0. Fazni premik med posamezni fazami je enak  $0^\circ$ . Te harmonske komponente so v fazi in tvorijo nični sistem simetričnih komponent.



Slika 2.2 Kazalci faznih napetosti simetričnega trifaznega sistema

Tabela 2.1 Fazno zaporedje harmonskih komponent v simetričnem trifaznem sistemu

$h$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
zap.	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0

Ugotovimo lahko, da imajo harmonske komponente 1., 7., 13., 19., ... reda isto smer vrtenja kot pozitivni simetrični sistem, harmonske komponente 5., 11., 17., ... reda isto smer kot negativni sistem in harmonske komponente 3., 9., 15., 21., ...reda isto kot nični sistem simetričnega zaporedja [15].

Vse zgoraj omenjeno velja le ob predpostavki, da obravnavamo popolnoma uravnotežen trifazni sistem. V splošnem to pomeni, da ima harmonska komponenta višjega reda v vseh treh fazah enak fazni premik glede na osnovno harmonsko komponento in enako amplitudo. V primeru neravnovesja med fazami pa te predpostavke ne veljajo več, saj za vsako harmonsko komponento obstajata tudi ostali dve simetrični komponenti zaporedja.

Pri tem velja, da kadar so v omrežju prisotni harmoniki, potem so v omrežju prisotni tudi toki negativnega in ničnega zaporedja simetričnih komponent višjega harmonskega reda, kljub dejstvu, da je sistem simetrično obremenjen [5].



Toki ničnega zaporedja v transformatorjih vezanih v trikot, tečejo le po navitjih in se v omrežje ne širijo. Podobno lahko rečemo, da je v primeru trižilnega trifaznega sistema brez nevtralnega vodnika, tok ničnega zaporedja vselej enak nič, če obravnavamo uravnotežen sistem [5].

### 2.3 Karakteristične veličine v harmonsko popačenih elektroenergetskih omrežjih

Obliko signala napetosti ali toka lahko v predpostavljenem ustaljenem načinu obratovanja z razvojem v Fourierevo vrsto izrazimo z (2.11) ali (2.12) [5].

$$u(t) = \sum_{h=1}^{\infty} U_h \sin(h\omega_0 t + \phi_h) \quad (2.11)$$

$$i(t) = \sum_{h=1}^{\infty} I_h \sin(h\omega_0 t + \Theta_h) \quad (2.12)$$

Kjer so:

- $U_h$  temenska vrednost napetosti harmonske komponente reda  $h$ ,
- $u$  trenutna vrednost napetosti,
- $I_h$  temenska vrednost toka harmonske komponente reda  $h$ ,
- $i$  trenutna vrednost toka,
- $\Phi_h$  fazni kot napetosti harmonske komponente reda  $h$ ,
- $\Theta_h$  fazni kot toka harmonske komponente reda  $h$ .

#### 2.3.1 Efektivna vrednost napetosti in toka

Efektivna vrednost periodičnega signala  $f(t)$  s periodo  $T$  je definirana kot (2.13) [5]:

$$F^2 = \frac{1}{T} \int_0^T f_t^2(t) dt = \frac{1}{2} \sum_{h=1} F_h^2 = \sum_{h=1} F_{hef}^2 \quad (2.13)$$

Kjer so:

- $F$  efektivna vrednost signala,
- $f_t$  trenutna vrednost signala,
- $F_h$  temenska vrednost signala harmonske komponente reda  $h$ ,

$F_{hef}$       efektivna vrednost signala harmonske komponente reda  $h$ .

Na podlagi česar lahko efektivno vrednost napetosti  $U$  in toka  $I$  ob prisotnosti harmonskih komponent višjega reda izrazimo z (2.14) in (2.15) [5].

$$U = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} U_{hef}^2} \quad (2.14)$$

$$I = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_{hef}^2} \quad (2.15)$$

Kjer so:

$U$       efektivna vrednost napetosti,

$U_{hef}$       efektivna vrednost napetosti harmonske komponente reda  $h$ ,

$I$       efektivna vrednost toka,

$I_{hef}$       efektivna vrednost toka harmonske komponente reda  $h$ .

Iz enačb je razvidno, da prisotnost harmonskih komponent v signalu poveča njegovo efektivno vrednost. Vendar pa se kljub povečani efektivni vrednosti signala toka ali napetosti, srednja vrednost moči ne spremeni. Takšni pogoji so v omrežjih nezaželeni, saj harmonske komponente višjega reda ne prispevajo k usmerjenemu pretoku energije, ampak sodelujejo le pri recipročni izmenjavi energije med izvorom in porabnikom.

### 2.3.2 Faktor celostnega harmonskega popačenja napetosti in toka

Faktor celostnega harmonskega popačenja napetosti  $THD_U$  (total harmonic distortion) predstavlja razmerje med efektivno vrednostjo napetosti harmonskih komponent višjega reda in efektivno vrednostjo osnovne harmonske komponente napetosti. Kadar ni prisotna enosmerna komponenta lahko  $THD_U$  izrazimo z (2.16) [5].

$$THD_U = \frac{1}{U_1} \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (U_h)^2} = \sqrt{\left(\frac{U}{U_{1ef}}\right)^2 - 1} \quad (2.16)$$

Kjer so:

$THD_U$       faktor celostnega harmonskega popačenja napetosti,

$U_1$       temenska vrednost napetosti osnovne harmonske komponente,

$U_h$	temenska vrednost napetosti harmonske komponente reda $h$ ,
$U$	efektivna vrednost napetosti,
$U_{1ef}$	efektivna vrednost napetosti osnovne harmonske komponente.

Podobno velja tudi za tok, kjer faktor celostnega harmonskega popačenja toka  $THD_I$ , brez upoštevanja enosmerne komponente izrazimo z (2.17) [5].

$$THD_I = \frac{1}{I_1} \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (I_h)^2} = \sqrt{\left(\frac{I}{I_{1ef}}\right)^2 - 1} \quad (2.17)$$

Kjer so:

$I_1$	temenska vrednost toka osnovne harmonske komponente,
$I_h$	temenska vrednost toka harmonske komponente reda $h$ ,
$I$	efektivna vrednost toka,
$I_{1ef}$	efektivna vrednost toka osnovne harmonske komponente,
$THD_I$	faktor celostnega harmonskega popačenja toka.

Zvezo med efektivno vrednostjo napetosti  $U$  in toka  $I$  ter  $THD_I$  tako predstavimo z (2.18) in (2.19) [5].

$$U = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} (U_{hef})^2} = U_{1ef} \sqrt{1 + THD_U^2} \quad (2.18)$$

$$I = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} (I_{hef})^2} = I_{1ef} \sqrt{1 + THD_I^2} \quad (2.19)$$

S pomočjo  $THD_U$  lahko okvirno ocenimo vrednost dodatnih izgub skozi ohmski del bremen, med tem ko s  $THD_I$  ocenimo vrednost dodatnih izgub skozi induktivni del bremen [15].

Ob razmeroma majhnih obremenitvah je vrednost  $THD_I$  včasih zelo zavajajoča, saj je po svoji vrednosti zelo velika, a v električnem sistemu zaradi tega ne predstavlja problema. V ta namen je pogosto v uporabi tudi  $TDD$  (total demand distortion), kateri poda faktor celostnega harmonskega popačenja toka glede na maksimalen bremenski tok v daljšem obdobju. Enačba za izračun  $TDD$  je podana s (2.20) [15].

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_{br\max}} \quad (2.20)$$

Kjer so:

$I_{br\max}$  temenska vrednost maksimalnega toka bremena osnovne harmonske komponente,

$I_h$  temenska vrednost toka harmonske komponente reda  $h$ .

$TDD$  Faktor celostnega popačenja pri maksimalnem toku bremena.

### 2.3.3 Navidezna, delovna, jalova in moč popačenja

Na podlagi enačb za efektivno vrednost napetosti in toka lahko za navidezno moč  $S$  zapišemo (2.21) [5]:

$$S = U \cdot I = U_{1ef} \cdot I_{1ef} \sqrt{1 + THD_U^2} \cdot \sqrt{1 + THD_I^2} \quad (2.21)$$

Kjer je:

$S$  absolutna vrednost navidezne moči.

Delovno moč  $P$ , ki je povprečna vrednost trenutne delovne moči  $p$ , je podana z (2.22) [5].

$$P = \sum_{h=1}^{\infty} U_{hef} I_{hef} \cos(\phi_h - \Theta_h) \quad (2.22)$$

Kjer je:

$P$  efektivna vrednost delovne moči.

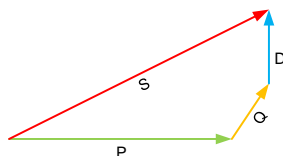
Jalova moč  $Q$ , ki je enaka temenski vrednosti trenutne jalove moči  $q$ , je podana z (2.23) [5].

$$Q = \sum_{h=1}^{\infty} U_{hef} I_{hef} \sin(\phi_h - \Theta_h) \quad (2.23)$$

Kjer je:

$Q$  efektivna vrednost jalove moči.

Kadar so v omrežju prisotne tudi harmonske komponente višjega reda, pa navidezna moč  $S$  ni več sestavljena iz delovne moči  $P$  in jalove moči  $Q$ , ampak je treba upoštevati še moč popačenja  $D$ , ki je izražena z (2.24) [5]. Na sliki 2.3 je prikazan kazalčni diagram moči ob upoštevanju moči popačenja  $D$ .



Slika 2.3 Kazalčni diagram moči ob upoštevanju moči popačenja  $D$

$$D = \sqrt{S^2 - (P^2 + Q^2)} \quad (2.24)$$

Kjer je:

$D$         efektivna vrednost popačene moči.

#### 2.3.4 Faktor moči (PF)

Faktor moči  $PF$  je definiran kot razmerje med delovno močjo  $P$  in absolutno navidezno močjo  $S$ . Ob prisotnosti harmonskih komponent višjega reda v omrežju je potrebno poleg faznega premika upoštevati tudi obliko toka in napetosti. Pri tem lahko zapišemo naslednje enačbe (2.25), (2.26), (2.27) [5]:

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{P_1}{S_1} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+THD_U^2} \cdot \sqrt{1+THD_I^2}} = PF_{disp} \cdot PF_{dist} \quad (2.25)$$

$$PF_{disp} = \frac{P}{S_1} \quad (2.26)$$

$$PF_{dist} = \frac{1}{\sqrt{1+THD_U^2} \cdot \sqrt{1+THD_I^2}} = \frac{U_{1ef}}{U} \cdot \frac{I_{1ef}}{I} = \frac{S_1}{S} \quad (2.27)$$

Kjer so:

$PF$         faktor moči,

$PF_{disp}$     premaknjeni faktor moči (pri osnovni frekvenci),

$PF_{dist}$     pravi faktor moči popačenja,

$S_1$         osnovna harmonska komponenta navidezne moči.

Premaknjeni faktor moči  $PF_{disp}$  je enak razmerju med delovno močjo  $P$  in absolutno vrednostjo navidezne moči  $S_I$ , osnovne harmonske komponente. Medtem, ko je faktor moči popačenja  $PF_{dist}$ , podan kot razmerje med tokom osnovne harmonske komponente in celotnim tokom. Ob prisotnosti harmonskih komponent višjega reda v omrežju je faktor moči  $PF$  zmnožek premaknjenega faktorja moči in faktorja moči popačenja.

Dostikrat je zavajajoče, ko na napisni ploščici naprave opazimo podatek  $PF$ . Dejansko je podan premaknjeni faktor moči  $PF_{disp}$ , ki upošteva le osnovno komponento (2.26) [5].

## 2.4 Nihajni krogi in resonanca v omrežju [7]

Nihajni krog v električnem vezju dobimo, kadar sta v vezju prisotna vsaj en kondenzator in ena tuljava. Tuljavo in kondenzator v električnih vezjih obravnavamo kot energijski posodi, ki sta zmožni magnetno ali električno energijo prejeti, hraniti ter jo potem tudi oddati.

Ob prisotnosti obeh elementov v električnem vezju obstaja zadostni pogoj, da pride v takšnem vezju do resonančnega pojava. Edini potrebni in zadostni pogoj za obstoj resonance v električnem vezju je, da je fazni kot takšne vezave nič ali drugače, da sta napetost in tok tega vezja v fazi [16].

V električnih vezjih posebej obravnavamo zaporedno resonančno vezavo in vzporedno resonančno vezavo, pri obeh pa veljajo osnovne zakonitosti, ki so podane v nadaljevanju.

Za vezja, pri katerih je izpolnjen pogoj resonance velja naslednje:

Induktivna  $X_L$  in kapacitivna  $X_C$  upornost (reaktanca) v nihajnem krogu sta frekvenčno odvisni in ju podamo z (2.28) in (2.29) [5]:

$$X_L = \omega L \quad (\omega = 2\pi f) \quad (2.28)$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \quad (\omega = 2\pi f) \quad (2.29)$$

Kjer so:

- $C$  kapacitivnost kondenzatorja,
- $f$  frekvenca,
- $L$  induktivnost tuljave,
- $X_C$  kapacitivna upornost (reaktanca),

$X_L$  induktivna upornost (reaktanca),

$\omega$  osnovna krožna frekvenca.

V primeru majhnih vrednosti ohmskih komponent elementov omrežja in porabnikov, prevladujejo induktivnosti in kapacitivnosti elementov omrežja in porabnikov. Omrežje se torej približuje stanju idealnega nihajnega kroga. Takt nihajnega kroga daje v tem primeru ena ali več harmonskih napetosti, če je pri tem izpolnjen pogoj(2.30) [5]:

$$\frac{1}{\omega C} = \omega L \quad (2.30)$$

Jalovi upornosti (reaktanci) sta med seboj enaki in govorimo o resonanci. V tem primeru se pri določeni frekvenci obe upornosti (reaktanci) med seboj »kompenzirata«, kar pomeni, da je nadomestna reaktanca enaka nič (2.31) [5].

$$\frac{1}{\omega C} = \omega L = X_n = 0 \quad (2.31)$$

Kjer je:

$X_n$  nadomestna upornost (reaktanca).

Ob dejstvu, da sta induktivnost  $L$  in kapacitivnost  $C$  snovno geometrijski konstanti, lahko zapišemo resonančno krožno frekvenco  $\omega_r$  z (2.32) [5].

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.32)$$

Kjer je:

$\omega_r$  resonančna krožna frekvenca.

Ter resonančno frekvenco  $f_r$  z (2.33) [5], pri kateri je izpolnjen pogoj resonance.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{f_1}{\omega_1\sqrt{LC}} = f_1\sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad (2.33)$$

Kjer sta:

$f_1$  frekvenca osnovne harmonske komponente,

$f_r$  resonančna frekvenca.

Relativno resonančno frekvenco  $h_r$  izrazimo s (2.34) [5] kot:

$$h_r = \frac{f_r}{f_1} = \frac{1}{\omega_1 \sqrt{LC}} = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad (2.34)$$

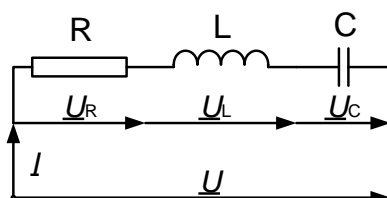
Kjer je:

$h_r$  relativna resonančna frekvenca.

Ker bomo analizo harmonskega popačenja napetosti obravnavali na nadomestnem električnem vezju, sta v nadaljevanju predstavljeni idealni vezavi elementov resonančnega vezja.

#### 2.4.1 Zaporedna resonančna vezava RLC

V primeru zaporedne vezave elementov RLC kot je prikazano na sliki 2.4, govorimo o zaporedni ali napetostni resonanci. Vezje je sestavljeno iz idealnega upora z ohmsko upornostjo  $R$ , idealne tuljave z induktivnostjo  $L$  in idealnega kondenzatorja s kapacitivnostjo  $C$ .



Slika 2.4 Zaporedna vezava idealnih elementov RLC

Kjer so:

- $\underline{U}_R$  kompleksni kazalec efektivnega padca napetosti na uporu  $R$ ,
- $\underline{U}_L$  kompleksni kazalec efektivnega padca napetosti na tuljavi  $L$ ,
- $\underline{U}_C$  kompleksni kazalec efektivnega padca napetosti na kondenzatorju  $C$ ,
- $\underline{U}$  kompleksni kazalec efektivne vrednosti napetosti,
- $\underline{I}$  kompleksni kazalec efektivne vrednosti toka,
- $R$  ohmska upornost.

Impedanca zaporedne RLC vezave  $\underline{Z}_h$  za red harmonske komponente  $h$ , je podana z (2.35) [5]:



$$\underline{Z}_h = R + j \left( h\omega L - \frac{1}{h\omega C} \right) \quad (2.35)$$

Kjer je:

$\underline{Z}_h$  kompleksni kazalec impedanca harmonske komponente reda  $h$ .

Pogoj resonance lahko tako zapišemo z (2.36) [7].

$$\varphi_h = \arctan \left( \frac{h\omega L - \frac{1}{h\omega C}}{R} \right) = 0 \quad (2.36)$$

Kjer je:

$\varphi_h$  fazni kot v resonančni točki.

V resonančni točki se zaradi medsebojne kompenzacije reaktanc impedanca takšne vezava  $Z_r$  navzven kaže kot ohmska upornost (2.37) [5].

$$Z_r = R \quad (2.37)$$

Kjer je:

$\underline{Z}_r$  kompleksni kazalec impedanca vezja v resonančni točki.

Pri tem velja, da ima vezje visoko kvaliteto  $Q_v$ , če je moč, ki se v vezju porablja zanemarljiva v primerjavi z jalovo močjo, ki se v resonanci preliva med izvorom in vezjem. Tako lahko zapišemo (2.38) [5].

$$Q_v = \frac{X_n}{R} \quad (2.38)$$

Kjer je:

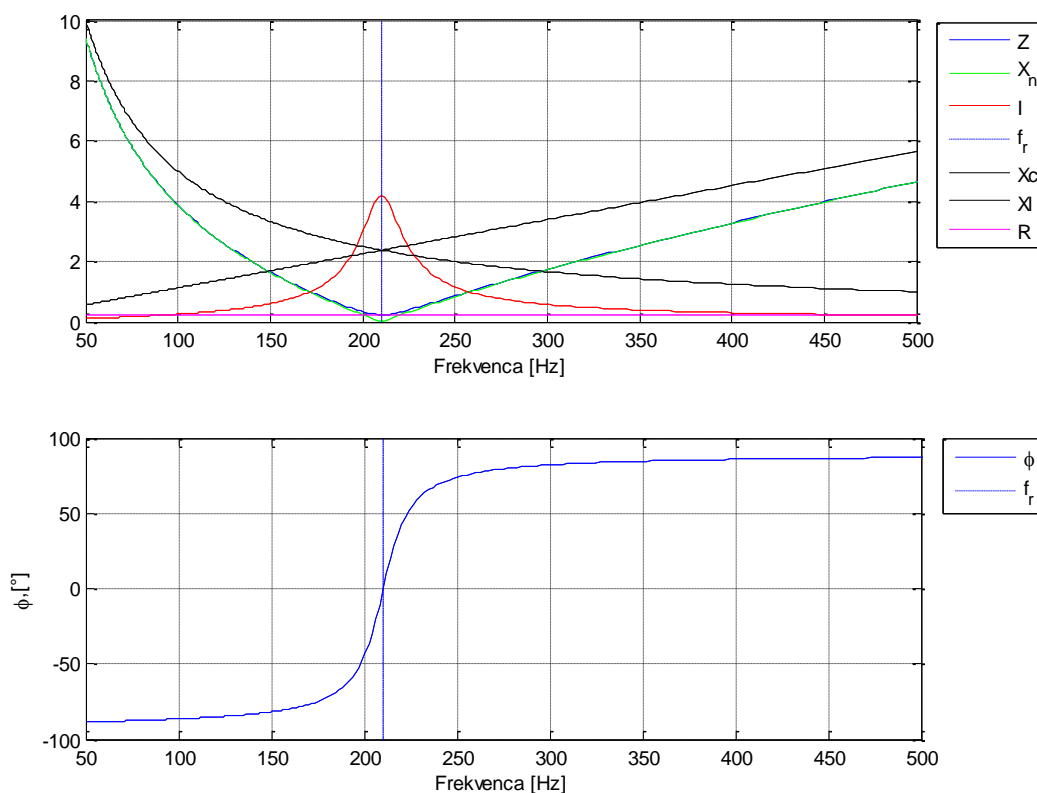
$Q_v$  faktor kvalitete RLC vezja.

Za vezja v zaporedni vezavi med drugim velja tudi:

- V resonanci sta oba jalova padca napetosti na elementih  $L$  in  $C$  enaka. Ker sta po vrednosti lahko dosti večja od priključene napetosti, je treba paziti, da pri načrtovanju izberemo elemente, katerih vzdržna napetost ustreza padcem napetosti na elementih v trenutku resonance [7].

- V resonanci se energija samo preliva med izvorom in vezjem in je moč vezja čisto ohmska [7].

Razmere v zaporedno vezanem RLC vezju se spreminjajo s spremembo krožne frekvence napetosti. Na sliki 2.5 so prikazane amplitudne in fazne karakteristike elementov v vezju.



Slika 2.5 Amplitudna in fazna karakteristika za zaporedno RLC vezje

Iz frekvenčni krivulj lahko ugotovimo, da je pri nizki frekvenci vezje predvsem kapacitivno ter ima veliko kapacitivno upornost. Takrat je fazni kot vezave  $-\pi/2$  in skozi vezje teče majhen tok. V resonančni točki je fazni kot enak nič, celotna impedanca vezja pa doseže najmanjšo vrednost, ko je enaka ohmski upornosti vezja. V tem trenutku je tok skozi vezje največji.

V frekvenčnem področju nad resonančno točko je vezje predvsem induktivno. Fazni kot vezja gre z naraščanjem frekvence proti vrednosti  $\pi/2$ , tok v vezju pa upada proti nič.

Izris slike 2.5 je izveden s pomočjo programske kode v programu Matlab, ki je podana kot priloga **B.2**.

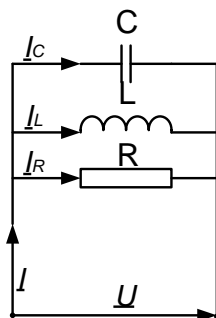
Pri vezjih z realnimi elementi se resonančne krivulje razlikujejo v ohmski upornosti vezja, ki se poveča. Posledično s tem je zaradi povečanja ohmske upornosti tok skozi vezje manjši.

#### 2.4.2 Vzoredna resonančna vezava RLC

Paralelna resonanca nastane v električnih vezjih, kjer sta paralelno vezana kondenzator s kapacitivnostjo  $C$  in tuljava z induktivnostjo  $L$ , kot kaže slika 2.6. Tuljava v vezju je izvedena s prevodnim navitjem, ki ima ohmsko upornost, zato je pri tuljavi poleg induktivnosti  $L$  treba upoštevati še upornost  $R$ .

Pri tem velja izpostaviti tudi:

- ob resonančnem stanju sta oba jalova toka enako velika, čeprav se navzven kompenzirata, ker imata nasproten predznak. Po vrednosti sta lahko dosti večja od toka v dovodu, zato lahko pride do pregrevanja katerega izmed jalovih elementov [7].
- Energija obeh energijskih posod se le preliva iz ene posode v drugo [7].



Slika 2.6 Vzoredna vezava idealnih elementov RLC

Za vezje na sliki 2.6 lahko njegovo nadomestno impedanco  $\underline{Z}_h$ , za harmonsko komponento reda  $h$  zapišemo z (2.39) [5].

$$\underline{Z}_h = \frac{-jR X_L X_C}{R \left( h X_L - \frac{X_C}{h} \right) - j X_L X_C} \quad (2.39)$$

V resonančni točki se zaradi medsebojnega kompenziranja jalovih upornosti (reaktanc) takšna vezava navzven kaže kot povsem ohmskega značaja, impedanca pa je podana z (2.40) [5].

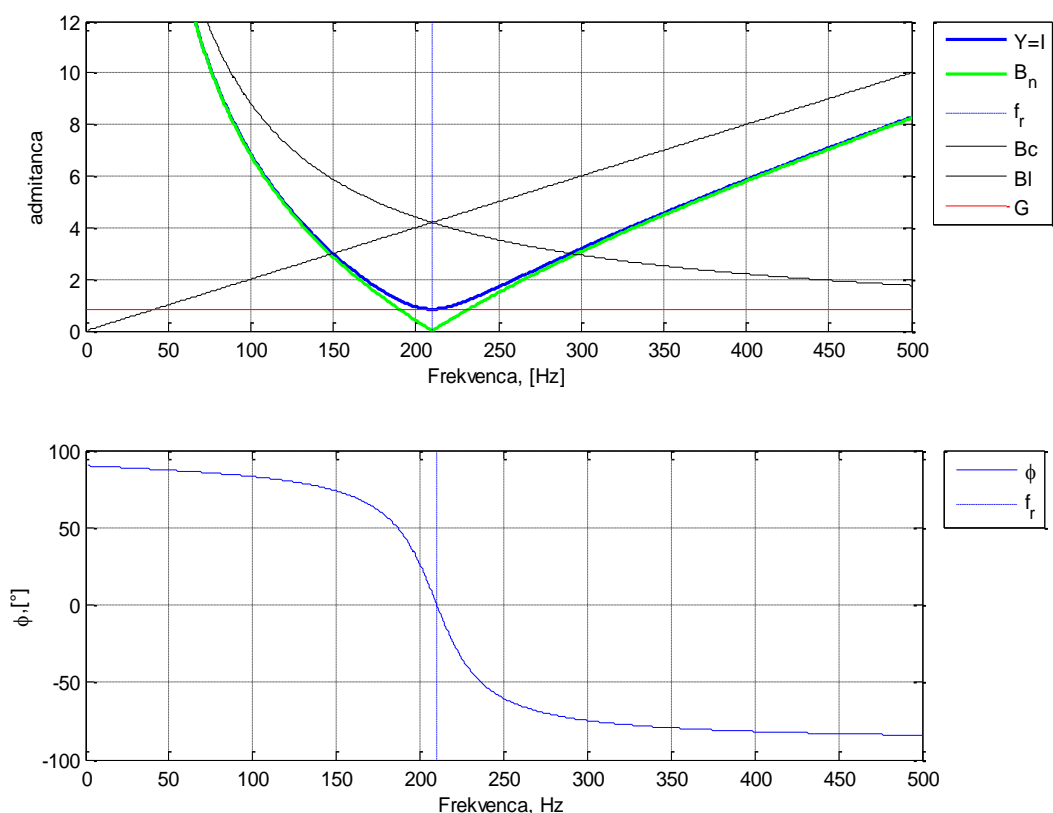
$$Z_r = R \quad (2.40)$$

Pri tem velja, da ima vezje visoko kvaliteto  $Q_v$ , če je moč, ki se v vezju porablja zanemarljiva, v primerjavi z močjo, ki se v resonanci preliva med izvorom in vezjem [7].

Tako lahko zapišemo (2.41) [5].

$$Q_v = \frac{R}{X_n} \quad (2.41)$$

V primeru paralelne resonance sta jalovi prevodnosti (susceptanci)  $B_C$  in  $B_L$  enaki, zato postane admitanca  $Y_n$  izredno majhna, njena vrednost pa je enaka prevodnosti  $G=I/R$ , kar kaže slika 2.7. Potrebni tok za vzbujanje paralelnega nihajnega kroga pa gre proti nič. Tako lahko ugotovimo, da ob prisotnosti že razmeroma majhnega toka harmonske komponente višjega reda dobimo veliko napetost harmonske komponente istega reda.



Slika 2.7: Amplitudna in fazna karakteristika za vzporedno RLC vezje

Na sliki 2.7 so prikazane krivulje odvisnosti od frekvence gonilne napetosti. Prevodnost vezja  $G$  je podana z vodoravno premico in je v celotnem frekvenčnem področju enaka.

Susceptanca tuljave (induktivna prevodnost)  $B_L$  je podana z enakoosno hiperbolo, ki upada s krožno frekvenco, s funkcijo  $1/\omega$ , njena vrednost pa je največja pri majhnih frekvencah.

Susceptanca kondenzatorja (kapacitivna prevodnost)  $B_C$  je podana kot linearna funkcija, ki narašča premo sorazmerno s krožno frekvenco  $\omega$ .

Izris slike 2.7 je izveden s pomočjo programske kode v programu Matlab, ki je podana kot priloga **B.3**.

Ob konstantni napetosti skozi vezje velja naslednje:

- Tok skozi vezje ali posamezno vejo je enak produktu prevodnosti vezja ali veje in napetosti na vezju ali veji [7].
- Ob resonanci skozi vezje teče tok le zaradi (ohmske) prevodnosti vezja [7].
- Vezje se pod resonančno frekvenco obnaša pretežno induktivno s faznim kotom, ki z naraščanjem krožne frekvence pada od  $\pi/2$  proti 0, nad resonančno frekvenco pa se obnaša pretežno kapacitivno s faznim kotom, ki z naraščanjem krožne frekvence pada od 0 proti  $-\pi/2$  [7].

Z zadostno natančnostjo lahko resonančno frekvenco  $f_r$  tega omrežja ocenimo s kratkostično močjo omrežja  $S''_k$  in močjo kompenzacije  $Q_{Co}$  po enačbi (2.42) [5]:

$$f_r = f_1 \sqrt{\frac{S''_k}{Q_{Co}}} \quad (2.42)$$

Kjer sta:

$S''_k$  kratkostična moč omrežja,

$Q_{Co}$  kapacitivna moč naprav v omrežju.

## 2.5 Vrednotenje kakovosti napajalne napetosti na osnovi harmonskega popačenja [8]

### 2.5.1 Vrednotenje harmonske napetosti

Harmonske napetosti lahko ovrednotimo:

- **posamično** z njihovo relativno vrednostjo ( $u_h$ ) glede na amplitudno vrednost napetosti osnovne harmonske komponente  $U_1$ , kjer je  $h$  red harmonika,
- **celostno**, kot na primer s faktorjem celostnega harmonskega popačenja ( $THD$ ), ki ga izračunamo po standardu SIST EN 50160 z (2.43) [8]:

$$THD_U = \frac{1}{U_1} \sqrt{\sum_{h=2}^{40} (U_h)^2} = \sqrt{\left(\frac{U_{40}}{U_{1ef}}\right)^2 - 1} \quad (2.43)$$

Kjer so:

- $U_1$  temenska vrednost napetosti osnovne harmonske komponente,
- $U_h$  temenska vrednost napetosti harmonske komponente reda  $h$ ,
- $U_{40}$  efektivna vrednost napetosti do 40. harmonika,
- $U_{1ef}$  efektivna vrednost napetosti osnovne harmonske komponente.

Efektivno vrednost napetosti  $U$  izrazimo s pomočjo  $THD_U$  zapišemo z (2.44):

$$U = \sqrt{\sum_{h=1}^{40} U_{h_{ef}}^2} = U_{1ef} \sqrt{1 + THD_U^2} \quad (2.44)$$

Kjer je:

- $U_{hef}$  efektivna vrednost napetosti do 40. harmonika.

Vrednosti motenj, ki so dovoljene za industrijska omrežja, opredelimo v skladu s standardom SIST EN 61000-2-4, za omrežja, ki niso namenjena javni uporabi. V njih je v veliki meri pričakovati napajalne razmere, ki se razlikujejo od razmer v javnih omrežjih in od tistih, kot so na primer na ladjah, letalih, železnici – vlakih in črpalnih naftnih ploščadih [8].

Standard določa glede prisotnosti motenj tri okolja [8]:

- Razred 1:  
Ta razred določa okolje z električnimi napravami, ki so občutljivejše od naprav v javni uporabi in javnih zgradbah. Sem spadajo električne naprave v okoljih, kot so računalniški sistemi, električni instrumenti laboratorijev in podobna električna oprema. Običajno dosegamo zadovoljivo nizek nivo motenj s posebno urejenim napajanjem in filtri. V nekaterih posebnih primerih je treba zagotoviti nivoje motenj, ki so še nižji od motenj razreda 1.
- Razred 2:  
Nivo združljivosti za to okolje se navezuje na točke skupnega priklopa in na točke mesta priklopa v inštalaciji. Običajno je identičen nivoju združljivosti v okoljih javnih omrežij.

- Razred 3:

Ta razred določa nivo združljivosti v industrijskih okoljih oziroma za točke znotraj takšnih inštalacij.

Omrežje lahko opredelimo kot industrijsko okolje, če je:

- Večina naprav, energetska napajana s pretvorniki.
- Večji delež bremen predstavljajo varilni aparati.
- Pogosti so zagoni velikih motorjev.
- Bremena se pogosto sunkovito spreminjajo.

Značilnosti napetosti za industrijska okolja niso določena tako, da bi podajala kriterije za oceno kakovosti napetosti, ampak so za to okolje podani samo nivoji združljivosti. Ti so za drugi razred identični nivojem združljivosti za javna omrežja. Nivo združljivosti za harmonske napetosti industrijskih omrežij je v obliki zgornjih dovoljenih vrednosti motenj, ki se kažejo v obliki emisije harmonskih komponent napetosti višjega reda podan v tabeli 2.2.

Tabela 2.2 Nivoji združljivosti za harmonske napetosti industrijskih omrežij

Lih harmoniki								Celostni faktor popačenja THD		
Niso večkratniki števila 3				Večkratniki števila 3						
Red harmonika $h$	Razred 1 $u_h$ (%)	Razred 2 $u_h$ (%)	Razred 3 $u_h$ (%)	Red harmonika $h$	Razred 1 $u_h$ (%)	Razred 2 $u_h$ (%)	Razred 3 $u_h$ (%)	Razred 1 $u_h$ (%)	Razred 2 $u_h$ (%)	Razred 3 $u_h$ (%)
5	3	6	8	3	3	5	6	5	8	10
7	3	5	7	9	1,5	1,5	2,5			
11	3	3,5	5	15	0,3	0,5	2			
13	3	3	4,5	21	0,2	0,4	1,75			
17	2	2	4	$21 < h \leq 45$	0,2	0,3	1			
$17 < h \leq 49$	$2,27 \cdot (17/h) - 0,27$		$4,5 \cdot (17/h) + 0,25$	Ti nivoji se nanašajo na ničelno komponento harmonikov						

### 2.5.2 Povzetek [5]

Harmoniki so komponente popačenega sinusnega signala, katerih frekvence so celoštevilčen večkratnik osnovne harmonske frekvence. Lahko rečemo, da je vsak periodični popačeni signal sestavljen iz signalov sinusne oblike, ki so večkratniki osnovne harmonske frekvence.

Harmonske komponente v energetskih sistemih so bile zaznane že pred veliko leti, vendar šele z razvojem naprav, ki po svojem delovanju spadajo med nelinearna bremena, problem harmonskega popačenja prihaja vse bolj v ospredje.

Pri tem gre izpostaviti predvsem naslednja dejstva:

- Vgradnja kompenzacijskih naprav v omrežje lahko predstavlja težave, če obstaja možnost nastanka paralelne resonance.
- Regulacija naprav s pomočjo pretvornikov in ostali polprevodniški elementi lahko pri resonanci povzročajo dodatno ojačanje harmonskih komponent višjih redov.
- Napetosti harmonskih komponent višjega reda na vseh napetostnih nivojih povzročajo tista bremena, katerih napetostno tokovna karakteristika je nelinearna.
- Dodatni vir nelinearnosti v sistemu povzročajo elementi elektro sistema, ki za svoje delovanje potrebujejo magnetilne ali polnilne toke.
- Toki harmonskih komponent višjega reda tečejo skozi impedance sistema in na njih povzročajo padce napetosti harmonskih komponent višjega reda.
- Napetosti in toki harmonskih komponent v sistemu so časovno spremenljivi.



## 3 VPLIV HARMONSKEGA POPAČENJA NAPETOSTI NA OMREŽJE [5], [15]

### 3.1 Predstavitev

V industrijskih omrežjih se iz dneva v dan povečuje število nelinearnih naprav in bremen, kar povzroča težave zaradi popačenja oblike napajalne napetosti v omrežju. V tem poglavju je glavna pozornost namenjena predstavitvi vpliva harmonskega popačenja napetosti na elemente električnega omrežja. Vpliv kompenzacijskih naprav, energetskih transformatorjev in električnih rotacijskih strojev je pri tem izvzet, saj predpostavljamo, da je zanemarljivo majhen.

V literaturi [5] so vplivi popačenja napajalne napetosti razdeljeni v tri glavne kategorije:

- Vpliv popačenja napajalne napetosti na termične lastnosti materialov.
- Vpliv popačenja napajalne napetosti na izolacijske lastnosti materialov.
- Vpliv popačenja napajalne napetosti na nepravilno delovanje naprav in elementov.

Harmonske komponente višjega reda imajo velik vpliv na povečanje izgub pri delovanju naprav in s tem posledično tudi vpliv na termične lastnosti vgrajenih materialov. S povečanjem vsebnosti harmonskih komponent višjega reda se povečuje tudi temenska vrednost napajalne napetosti, s čimer so povezane izolacijske lastnosti vgrajenih materialov. Večinoma se takšni vplivi končajo z odpovedjo kabelskih končnikov ali prebojem kondenzatorjev. Nepravilno delovanje naprav v veliki večini še vedno opredelimo kot odpoved naprav oziroma njihovo nepravilno delovanje zaradi nepojasnjenih vzrokov.

### 3.2 Termične izgube v omrežjih z harmonskimi komponentami višjega reda

Harmonske komponente višjega reda napetosti imajo vpliv na dielektrične izgube, izgube v bakru in izgube v železu posameznih naprav in elementov, vgrajenih v omrežje. Kot preventivni ukrep v omrežjih z vsebnostjo harmonskih komponent višjega reda uporabimo

faktor za znižanje obremenitve naprav  $d$  in opreme. Faktor za znižanje obremenitve podamo s (3.1) [5].

$$d = \frac{1,15}{1+0,15K} \quad (3.1)$$

Kjer je:

$d$  faktor znižanja obremenitve (ang. derating factor).

Faktor  $K$ , je standardiziran faktor, s katerim proizvajalci določajo tip transformatorja glede na dopustno obremenitev s toki nesinusnih oblik podrobneje je opisan v [5].

Vendar pa je to le kot preventivni ukrep, saj se takšni ukrepi po daljšem časovnem obdobju počasi zanemarijo. Oprema pa se ponovno obremenjuje s toki, ki so dovoljeni z nazivno močjo naprave.

### 3.3 Vpliv harmonskih komponent višjega reda na elemente električnega omrežja

Prisotnost harmonskih komponent toka in napetosti višjega reda v omrežju se odraža kot že omenjene povečane izgube ter kot eden izmed dejavnikov za prekomerno staranje materialov, naprav in elementov, vgrajenih v omrežje. Harmonske komponente, ki so večkratniki števila tri, so pomemben faktor pri določanju prenosnih zmogljivosti nevtralnega vodnika v štirivodnih sistemih. Vrednost toka v nevtralnem vodniku lahko kljub uravnoteženemu sistemu porabe preseže vrednost faznega toka, tako da je potrebno pri načrtovanju in izračunu prenosnih zmogljivosti kablskih povezav upoštevati tudi harmonske deleže tokov tretjega, devetega in ostalih večkratnikov tretjega harmonika.

Harmonske komponente višjega reda prav tako delujejo in vplivajo na merilne in zaščitne naprave v omrežju, na krmilne in komunikacijske povezave, kakor tudi na ostale elektronske naprave porabnikov.

#### 3.3.1 Vpliv harmonskih komponent višjega reda na naprave za izboljšanje PF

Harmonske komponente toka in napetosti višjega reda vplivajo na naprave z vgrajenimi kondenzatorji na naslednji način:

- Kondenzatorji so preobremenjeni s toki harmonskih komponent višjega reda, kajti dejstvo, da njihova reaktanca z naraščanjem frekvence pada in delujejo kot ponori za toke višjih frekvenc. Harmonske komponente napetosti vodijo do velikih tokov, ki povzročijo odpoved varovalk vgrajenih znotraj kondenzatorjev.
- Harmonske komponente povzročajo povečane dielektrične izgube. Dodatno segrevanje in krajšanje življenjske dobe kondenzatorjev pa sta v neposredni medsebojni povezavi.
- Kondenzatorji v povezavi s tuljavami v omrežju tvorijo pogoje za nastanek vzporedne resonance. Rezultat tega je povečana napetost, ki preseže dovoljene nazivne napetosti opreme in povzroči odpoved kondenzatorja.

### 3.3.2 Vpliv harmonskih komponent višjega reda na energetske transformatorje

Energetski transformatorji, ki delujejo v omrežjih z večjimi deleži harmonskih komponent toka in napetosti višjih redov imajo posledično zaradi tega:

- Povečane izgube v bakru.
- Povečane histerezne izgube in izgube zaradi vrtilnih tokov (ang. eddy currents). Pri tem pa velja poudariti, da je s strani delovanja transformatorja dosti bolj kritično segrevanje navitja kot pa segrevanje samega jedra.
- Skupaj s kondenzatorji za izboljšanje PF in notranjo reaktanco transformatorja ustvarjajo pogoje za nastanek resonance za posamezne harmonike višjega reda.
- Povečane obremenitve izolacije zaradi povečanih koničnih napetosti.

Omenjene izgube povzročijo v transformatorju dodatno segrevanje in mu krajšajo njegovo življenjsko dobo. Pri tem pridemo do zaključka, da je treba pri obratovanju energetskih transformatorjev z harmonskimi toki višjega reda upoštevati določeni redukcijski faktor ter skladno z vrednostjo redukcijskega faktorja zmanjšati obremenitev transformatorja

### 3.3.3 Vpliv harmonskih komponent višjega reda na rotirajoče stroje

Vpliv harmonskih komponent toka in napetosti višjega reda na rotirajoče stroje lahko v glavnem opišemo kot:

- Povečane izgube v bakru, ki se odražajo v povišani temperaturi navitij.
- Pulzirajoči navor, ki je posledica medsebojnega vpliva magnetnega polja zaradi harmonske komponente višjega reda in magnetnega polja osnovne harmonske komponente. Medsebojni vpliv se odraža v glasnejšem delovanju naprav.

### 3.3.4 Vpliv harmonskih komponent višjega reda na zaščitno, komunikacijsko in ostalo elektronsko opremo

Harmonske komponente toka in napetosti višjega reda vplivajo na zaščitno in krmilno opremo, merilne naprave, komunikacijske zanke in elektronska bremena na več načinov:

- Harmonske komponente višjega reda vplivajo na zmožnost izklopa odklopnikov in stikal, zaradi stresanja se podaljša čas odklopa in prihaja do povratnih vžigov.
- Karakteristike delovanja elektromehanskih relejev se spreminjajo. Releji zemeljskostične zaščite ne ločijo med toki ničnega zaporedja in tretje harmonske komponente ter delujejo nepravilno, saj prihaja do premaknitve ničlišča in povečanja koničnih napetosti.
- Merilne naprave se različno odzivajo na popačene oblike signalov.
- Napačno delovanje digitalnih ur, televizijskih sprejemnikov, računalnikov in ostale računalniške opreme.

### 3.3.5 Povzetek

Harmonske komponente toka in napetosti višjega reda se odražajo kot motnje in popačenja v energetskih sistemih in vplivajo na pravilno delovanje opreme in porabnikov. V splošnem lahko strnemo vplive harmonskih komponent toka in napetosti višjega reda na:

- **Trenutne**  
Trenutni vplivi harmonskega popačenja se kažejo kot motnje delovanja in slabša učinkovitost naprav. V najslabšem primeru vodijo k okvari oziroma izpadu naprav iz obratovanja. Povzročajo nepravilno delovanje zaščitnih naprav, tresljaje in hrup v rotirajočih strojih.
- **Trajne**  
Trajni vplivi harmonskega popačenja so predvsem segrevanje in odpoved energetskih kondenzatorjev, transformatorjev in rotirajočih strojev. Povišane izgube v bakru in jedru generatorjev, pri katerih prihaja do supersinhronizacijske resonance. V primeru, da je le ta v bližini osnovne harmonske frekvence, se to odraža v pulzirajočem magnetnem polju.

## 4 MODELIRANJE NADOMESTNIH ELEMENTOV OMREŽJA [5]

### 4.1 Modeliranje elementov omrežja

Pri modeliranju elementov, potrebnih za analizo nelinearnosti bremen v elektroenergetskem omrežju uporabimo parametre, kakršne uporabljamo za izvedbo kratkostičnih razmer v ustaljenem stanju obratovanja. Vpliv porabnikov na popačenost oblike napajalne napetosti ocenjujemo z razmerjem med kratkostično močjo omrežja v priključni točki in nazivno močjo porabnika. Kratkostična moč je merilo za sposobnost omrežja, da ohrani sinusno obliko napajalne napetosti in konstantno amplitudo tudi pri nelinearnih tokih porabnika ali nenadnih spremembah moči porabnikov.

O stacionarnem stanju govorimo, kadar je elektroenergetski sistem v stanju, ko se spremenljivke omrežja več ne spreminjajo. Pri opravku z izmeničnimi veličinami, ki se periodično ponavljajo, ni možno govoriti o stacionarnem stanju, lahko pa govorimo o nekem vnihanem ponavljajočem se stanju, ki ga imenujemo kvazi stacionarno stanje [9].

Pri modeliranju izjemo predstavljajo izvori harmonskega toka, ki jih je treba predstaviti s pomočjo polprevodnih stikalnih elementov, s katerimi simuliramo delovanje pretvornikov in ostalih električnih naprav sestavljenih iz elementov močnostne elektronike. Pri napravah z magnetnim jedrom je treba upoštevati tudi lastnosti delovanja naprave v nasičenju [10].

Natančnost modeliranja posameznih elementov v omrežju je odvisna od zahtev uporabnika, kako natančno analizo harmonskega popačenja napetosti v omrežju si želi.

Na širjenje tokov harmonskih komponent višjega reda v omrežju, vpliva večje število dejavnikov, ki se nanašajo na naprave, katere so izvor tokov harmonskih komponent višjega reda, kakor tudi na naprave, na katere toki harmonskih komponent višjega reda pri njihovem delovanju bolj ali manj vplivajo. Lahko rečemo, da na širjenje tokov

harmonskih komponent višjega reda po omrežju vplivajo tako naprave, ki te toke proizvajajo, kakor tudi naprave na katere toki vplivajo. Popačenje oblike napetosti, ki ga povzroča močan vir tokov harmonskih komponent višjega reda, je v samem omrežju lahko še vedno znotraj predpisanih mej, če je dominantna frekvenca vira harmonskih komponent višjega reda daleč od resonančne frekvence omrežja. Lahko pa že majhen vir tokov harmonskih komponent višjega reda povzroči veliko popačenje oblike napetosti, če katerakoli izmed njegovih karakterističnih frekvenc sovpada z resonančno frekvenco.

Vse večje potrebe za nadzor harmonskih komponent višjega reda v omrežju, in s tem tudi analize vsebnosti tokov harmonskih komponent višjega reda v omrežju, nam nalagajo vedno boljše poznavanje lastnosti in medsebojnega vpliva elementov, ki elektroenergetski sistem sestavljajo. Treba je upoštevati omejitve in poenostavitve pri modeliranju posameznih elementov omrežja, določiti njegovo vlogo in delovanje v obravnavanem omrežju. V nadaljevanju so prikazane osnovne enačbe za izvedbo analize harmonskega popačenja napetosti v delu elektroenergetskega omrežja, katerega enopolna shema je podana na sliki 5.1.

#### 4.2 Impedanca ob prisotnosti harmonskih komponent višjega reda

Kadar poljuben realen element induktivnega značaja z ohmsko upornostjo  $R$  in njegovo reaktanco  $X_L$  predstavljamo s pomočjo njegove impedance  $\underline{Z}$ , potem lahko pri omrežni frekvenci  $f_1$  zapišemo impedanco z enačbo (4.1) [5].

$$\underline{Z} = R + j2\pi f_1 L \quad (4.1)$$

Kadar pa impedanco takšnega elementa predstavljamo pri celoštevilčnem razmerju  $h$  med poljubno frekvenco  $f_h$  in osnovno frekvenco  $f_1$ , velja enačba (4.2) [5].

$$\underline{Z}_h = R + jh2\pi f_1 L \quad (4.2)$$

Kjer je:

$f_h$  frekvenca harmonske komponente reda  $h$ .

Podobno velja tudi za vsak poljubni realni element kapacitivnega značaja, da je njegova reaktanca  $X_C$  pri osnovni frekvenci  $f_1$  enaka (4.3) [5], medtem ko pri celoštevilčnem razmerju  $h$  med poljubno frekvenco  $f_h$  in osnovno frekvenco  $f_1$ , velja enačba (4.4) [5].

$$X_c = -j \frac{1}{2\pi f_1 C} \quad (4.3)$$

$$\underline{Z}_h = -j \frac{1}{h 2\pi f_1 C} \quad (4.4)$$

### 4.3 Kožni pojav (ang. skin effect)

Pri obravnavi toka skozi vodnik v frekvenčnem področju je treba upoštevati, da se pri tem, ko skozi vodnik teče tok sinusne oblike, inducirajo vrtnični toki, ki niso enakomerno porazdeljeni po preseku vodnika, ampak tečejo predvsem po površini vodnika. Ob naraščanju toka, narašča tudi magnetno polje. Električno polje v notranjosti vodnika ima zaradi inducirane toka nasprotno smer od električnega toka, ki ga generira, med tem, ko ima električno polje na robu vodnika isto smer kot tok, ki ga generira. Posledica tega je, da je na površini vodnika gostota toka mnogo večja kot v sredini vodnika. Pri tem z naraščanjem frekvence lastno magnetno polje vse bolj izriva električni tok proti zunanosti vodnika, kar imenujemo kožni pojav, oziroma skin efekt [11]. Posledica tega pa je neenakomerna porazdelitev gostote po prerezu vodnika, pri čemer je gostota toka največja na površini vodnika, proti središču pa naglo upada.

Z upoštevanjem kožnega pojava, impedanco transformatorja  $\underline{Z}_{trh}$ , generatorja  $\underline{Z}_{gh}$  in prenosnega voda  $\underline{Z}_{dvh}$  predstavljamo pri celoštevilčnem razmerju  $h$  med poljubno frekvenco  $f_h$  in osnovno frekvenco  $f_1$ , z enačbami (4.5), (4.6) in (4.7) [5]:

$$\underline{Z}_{trh} = h \cdot (R + jX) \quad (4.5)$$

$$\underline{Z}_{gh} = \sqrt{h} \cdot R + jhX \quad (4.6)$$

$$\underline{Z}_{dvh} = \sqrt{h} \cdot (R + jX) \quad (4.7)$$

kjer so:

- $\underline{Z}_{trh}$  kompleksni kazalec impedance transformatorja harmonske komponente  $h$ ,
- $\underline{Z}_{gh}$  kompleksni kazalec impedance generatorja harmonske komponente  $h$ ,

$\underline{Z}_{dvh}$  kompleksni kazalec impedance prenosnega voda harmonske komponente  $h$ .

#### 4.4 Model VN omrežja

Pri modeliranju visoko napetostnega (VN) omrežja je z večine dovolj, če upoštevamo podatke, dobljene s pomočjo analize kratkostičnih razmer v obravnavanem delu elektroenergetskega omrežja. Ne smemo pa se s tem zadovoljiti v primeru, kadar je na tem napetostnem nivoju nameščeno večje število kompenzacijskih naprav, transformatorjev, daljših prenosnih vodov ali drugih naprav, ki vplivajo na pretok energije med posameznimi elementi omrežja.

Kadar so za modeliranje VN dela omrežja dovolj že parametri dobljeni z analizo kratkostičnih razmer, je treba podati naslednje parametre:

- Efektivno vrednost nazivne napetosti omrežja  $U_n$ .
- Efektivno vrednost trifaznega kratkostičnega toka  $I_{3\phi}$ .
- $X/R$  razmerje pri trifaznem kratkem stiku  $(X/R)_{3\phi}$ .
- Efektivno vrednost enofaznega kratkostičnega toka  $I_{1\phi}$ .
- $X/R$  razmerje pri enofaznem kratkem stiku  $(X/R)_{1\phi}$ .

Na podlagi podanega razmerja  $X/R$  lahko izračunamo vrednosti faznih kotov kratkostične impedance omrežja pri simetričnem kratkem stiku (4.8) [5], in pri nesimetričnem enofaznem kratkem stiku (4.9) [5].

$$\phi_3 = \tan^{-1}(X/R)_{3\phi} \quad (4.8)$$

$$\phi_1 = \tan^{-1}(X/R)_{1\phi} \quad (4.9)$$

Kjer sta:

$\Phi_3$  trifazni kot kratkostične impedance,

$\Phi_1$  enofazni kot kratkostične impedance.

Sedaj lahko izrazimo vrednosti kratkostičnega toka, zapisane v polarni obliki s (4.10) in (4.11) [5].



$$\underline{I}_{3\phi} = |I_{3\phi}| \angle -\phi_3 \quad (4.10)$$

$$\underline{I}_{1\phi} = |I_{1\phi}| \angle -\phi_1 \quad (4.11)$$

Kjer so:

- $I_{3\phi}$       efektivna vrednost trifaznega kratkostičnega toka,
- $\underline{I}_{3\phi}$       kompleksni kazalec trifaznega kratkostičnega toka,
- $I_{1\phi}$       efektivna vrednost enofaznega kratkostičnega toka,
- $\underline{I}_{1\phi}$       kompleksni kazalec enofaznega kratkostičnega toka.

S pomočjo enačb (4.10), (4.11) in podane nazivne napajalne napetosti  $U_n$  lahko izračunamo kratkostični moči  $\underline{S}_{3\phi}''$  in  $\underline{S}_{1\phi}''$  kot produkt napetosti  $U_n$  in konjugirane kompleksne vrednosti toka  $\underline{I}^*$  v (4.12) in (4.13) [5].

$$\underline{S}_{3\phi}'' = \sqrt{3} \cdot U_n \underline{I}_{3\phi}^* \quad (4.12)$$

$$\underline{S}_{1\phi}'' = \sqrt{3} \cdot U_n \underline{I}_{1\phi}^* \quad (4.13)$$

Kjer so:

- $\underline{I}_{3\phi}^*$       konjugirano kompleksna vrednost trifaznega kratkostičnega toka,
- $\underline{I}_{1\phi}^*$       konjugirano kompleksna vrednost enofaznega kratkostičnega toka,
- $\underline{S}_{3\phi}''$       kompleksni kazalec trifazne kratkostične moči,
- $\underline{S}_{1\phi}''$       kompleksni kazalec enofazne kratkostične moči.

Impedanco pozitivnega  $\underline{Z}_{om}^+$  in ničnega  $\underline{Z}_{om}^0$  zaporedja simetričnih komponent omrežja izračunamo s pomočjo (4.14) in (4.15) [5].

$$\underline{Z}_{om}^+ = U_n / \underline{I}_{3\phi} \quad (4.14)$$

$$\underline{Z}_{om}^0 = (3U_n / \underline{I}_{1\phi}) - 2\underline{Z}_{om}^+ \quad (4.15)$$

Kjer sta:

- $\underline{Z}_{om}^+$       kompleksni kazalec impedance pozitivnega zaporedja omrežja,
- $\underline{Z}_{om}^0$       kompleksni kazalec impedance ničnega zaporedja omrežja.

Impedanca omrežja  $\underline{Z}_{omh}$  je tako za harmonsko komponento reda  $h$  izražena s (4.16) [5].

$$\underline{Z}_{omh} = \left\{ \begin{array}{ll} \left( 3 U_n / \underline{I}_{1\phi} - 2 U_n / \underline{I}_{3\phi} \right) & h = 3n; \quad n = 0, 1, 2, 3, 4, 5, \dots \\ U_n / \underline{I}_{3\phi}, & h = 3n \pm 1; \quad n = 0, 1, 2, 3, 4, 5, \dots \end{array} \right\} \quad (4.16)$$

Kjer je:

$\underline{Z}_{omh}$  kompleksni kazalec impedance omrežja harmonske komponente reda  $h$ .

Kjer velja, da pri impedančnih izračunih 3. harmonske komponente in njenih celoštevilčnih večkratnikih upoštevamo (4.15), za vse ostale celoštevilčne večkratnike harmonskih komponent višjega reda uporabljene v izračunih pa (4.14).

#### 4.5 Model generatorja

Pri modelu generatorja, upoštevamo impedanco generatorja skupaj s kožnim pojavom, zaradi česar je impedanca generatorja podana z enačbami (4.17), (4.18) in (4.19) [5].

$$\underline{Z}_{gh}^0 = R_a + jhX_0, \quad h = 3, 6, 9, 12, 15, \dots \quad (4.17)$$

$$\underline{Z}_{gh}^+ = R_a + jhX_d'', \quad h = 1, 4, 7, 10, 13, \dots \quad (4.18)$$

$$\underline{Z}_{gh}^- = R_a + jhX_2, \quad h = 2, 5, 8, 11, 14, \dots \quad (4.19)$$

Kjer so:

$R_a$  upornost armature,

$X_d''$  reaktanca generatorja,

$X_2$  reaktanca negativnega zaporedja generatorja,

$X_0$  reaktanca pozitivnega zaporedja generatorja,

$\underline{Z}_{gh}^+$  kompleksni kazalec impedance pozitivnega zaporedja generatorja harmonske komponente reda  $h$ ,

$\underline{Z}_{gh}$  kompleksni kazalec impedance negativnega zaporedja generatorja harmonske komponente reda  $h$ ,

$\underline{Z}_{gh}^0$  kompleksni kazalec impedance ničnega zaporedja generatorja harmonske komponente reda  $h$ .

Ob upoštevanju kožnega pojava je upornost armature  $R_{ah}$  za harmonsko komponento reda  $h$  izražena s (4.20) [5].

$$R_{ah} = \sqrt{h} \cdot R_a \quad (4.20)$$

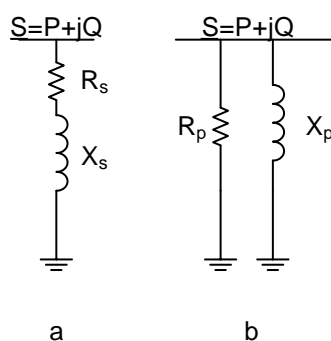
Kjer je:

$R_{ah}$  upornost armature harmonske komponente  $h$ .

## 4.6 Modeli bremena

### 4.6.1 Samostojno breme

Samostojno breme predstavimo s pomočjo zaporedne vezave upora  $R_s$  in dušilke  $L_s$  z njeno reaktanco  $X_s$ , kot je prikazano na sliki 4.1(a). Sklop večjega števila povezanih bremen pa predstavimo s pomočjo vzporedne vezave upora  $R_p$  in dušilke  $L_p$  njeno reaktanco  $X_p$ , kot je prikazano na sliki 4.1(b).



Slika 4.1 Prikaz modela bremena v zaporedni vezavi (a) in v vzporedni vezavi (b)

Kjer so:

- $R_s$  upornost samostojnega bremena,
- $X_s$  reaktanca samostojnega bremena,
- $R_p$  upornost povezanega bremena,
- $X_p$  reaktanca povezanega bremena,
- $\underline{S}$  kompleksni kazalec navidezne moči,
- $P$  efektivna vrednost delovne moči,
- $Q$  efektivna vrednost jalove moči.

Za zaporedno vezavo velja (4.21) [5]:

$$\underline{Z}_s = R_s + jX_s = \frac{U^2}{P - jQ} = \frac{U^2(P + jQ)}{P^2 + Q^2} = \frac{U^2(P + jQ)}{|S|^2} \quad (4.21)$$

Kjer je:

$\underline{Z}_s$  kompleksni kazalec impedance bremena.

Impedanca bremena harmonske komponente reda  $h$  označimo z  $\underline{Z}_{sh}$  in zapišemo s (4.22) [5].

$$\underline{Z}_{sh} = R_s + jhX_s \quad (4.22)$$

Kjer je:

$\underline{Z}_{sh}$  kompleksni kazalec impedance bremena harmonske komponente reda  $h$ .

#### 4.6.2 Povezano breme

Za večje število med seboj povezanih bremen, priključenih na isto vozlišče lahko admitanco bremena  $\underline{Y}_p$  izrazimo s (4.23) [5].

$$\underline{Y}_p = \frac{1}{R_p} - \frac{1}{jX_p} = \frac{P - jQ}{U^2} \quad (4.23)$$

Kjer je:

$\underline{Y}_p$  kompleksni kazalec admitance bremena.

Admitanco bremena harmonske komponente reda  $h$  označimo z  $\underline{Y}_{ph}$  in zapišemo s (4.24) [5].

$$\underline{Y}_{ph} = \frac{1}{R_p} - jh \frac{1}{X_p} \quad (4.24)$$

Kjer je:

$\underline{Y}_{ph}$  kompleksni kazalec admitance bremena harmonske komponente  $h$ .

#### 4.6.3 Nadomestni enofazni model bremena

Bremena, ki so po svoji karakteristiki delovanja linearna, lahko njihovo impedanco pozitivnega zaporedja  $\underline{Z}_b^+$  in impedanco ničnega zaporedja  $\underline{Z}_b^0$  predstavimo s (4.25) in (4.26) [5].

$$\underline{Z}_b^+ = \frac{1}{\underline{S}_b^*} \quad (4.25)$$

$$\underline{Z}_b^0 = \infty \quad (4.26)$$

Kjer so:

- $\underline{S}_b^*$  kompleksni kazalec nazivne moči bremena,
- $\underline{Z}_b^+$  kompleksni kazalec impedance pozitivnega zaporedja bremena,
- $\underline{Z}_b^0$  kompleksni kazalec impedance ničnega zaporedja bremena.

Tako je impedanca  $\underline{Z}_{bh}$  za harmonsko komponento reda  $h$  izražena s (4.27) [5]

$$\underline{Z}_{bh} = \begin{cases} \infty, & h = 3n; \quad n = 0, 1, 2, 3, 4, 5, \dots \\ \frac{1}{\underline{S}_b^*}, & h = 3n \pm 1; \quad n = 0, 1, 2, 3, 4, 5, \dots \end{cases} \quad (4.27)$$

Kjer je:

- $\underline{Z}_{bh}$  kompleksni kazalec impedance bremena harmonske komponente  $h$ .

#### 4.6.4 Breme priključeno v trikotno trifazno vezavo

Za bremena, priključena v trikotno vezavo, kot je prikazano na sliki 4.2, linijske tokove  $\underline{I}_a$ ,  $\underline{I}_b$  in  $\underline{I}_c$  izrazimo z (4.28), (4.29) in (4.30) [5].

$$\underline{I}_a = \frac{\underline{U}_a - \underline{U}_b}{\underline{Z}_\Delta} + \frac{\underline{U}_a - \underline{U}_c}{\underline{Z}_\Delta} \quad (4.28)$$

$$\underline{I}_b = \frac{\underline{U}_b - \underline{U}_a}{\underline{Z}_\Delta} + \frac{\underline{U}_b - \underline{U}_c}{\underline{Z}_\Delta} \quad (4.29)$$

$$\underline{I}_c = \frac{\underline{U}_c - \underline{U}_b}{\underline{Z}_\Delta} + \frac{\underline{U}_c - \underline{U}_a}{\underline{Z}_\Delta} \quad (4.30)$$

Kjer so:

- $\underline{I}_a$  kompleksni kazalec osnovne harmonske komponente linijskega toka faze a,  
 $\underline{I}_b$  kompleksni kazalec osnovne harmonske komponente linijskega toka faze b,  
 $\underline{I}_c$  kompleksni kazalec osnovne harmonske komponente linijskega toka faze c,  
 $\underline{U}_a$  kompleksni kazalec osnovne harmonske komponente fazne napetosti faze a,  
 $\underline{U}_b$  kompleksni kazalec osnovne harmonske komponente fazne napetosti faze b,  
 $\underline{U}_c$  kompleksni kazalec osnovne harmonske komponente fazne napetosti faze c,  
 $\underline{Z}_\Delta$  kompleksni kazalec impedance bremena v vezavi trikot.

Enačbe (4.28) do (4.30) lahko predstavimo v matrični obliki s (4.31) [5].

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_a \\ \underline{I}_b \\ \underline{I}_c \end{bmatrix} = \frac{1}{\underline{Z}_\Delta} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_a \\ \underline{U}_b \\ \underline{U}_c \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

Pri tem za admitančno matriko zapisano v sistemu simetričnih komponent velja (4.32) [5].

$$\begin{bmatrix} \underline{Y}^0 & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Y}^+ & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Y}^- \end{bmatrix} = \frac{1}{\underline{Z}_\Delta} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 3 \end{bmatrix} = \frac{3}{\underline{Z}_\Delta} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

Kjer so:

- $\underline{Y}^0$  kompleksni kazalec admitance ničnega zaporedja,  
 $\underline{Y}^+$  kompleksni kazalec admitance pozitivnega zaporedja,  
 $\underline{Y}^-$  kompleksni kazalec admitance negativnega zaporedja.

Tako je admitanca ničnega zaporedja  $\underline{Y}^0$  enaka 0, in  $\underline{Y}^+ = \underline{Y}^- = 3/\underline{Z}_\Delta$ , oziroma velja, da je impedanca ničnega zaporedja  $\underline{Z}^0$  neskončna, medtem ko sta impedanci pozitivnega in negativnega zaporedja enaki  $\underline{Z}_\Delta/3$ , kar kaže zapis (4.33) [5].

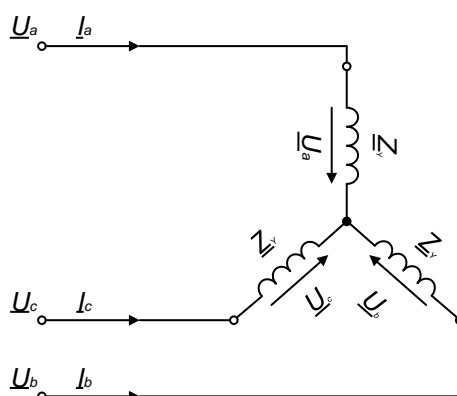
$$\begin{bmatrix} \underline{Z}^0 & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z}^+ & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z}^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Y}^0 & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Y}^+ & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Y}^- \end{bmatrix}^{-1} = \frac{\underline{Z}_\Delta}{3} \cdot \begin{bmatrix} \infty & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

Kjer so:

$\underline{Z}^0$  kompleksni kazalec impedance ničnega zaporedja,

$\underline{Z}^+$  kompleksni kazalec impedance pozitivnega zaporedja,

$\underline{Z}^-$  kompleksni kazalec impedance negativnega zaporedja.



Slika 4.2 Breme priključeno v trikot trifazno vezavo

#### 4.6.5 Breme priključeno v zvezdno trifazno vezavo

Za bremena, ki so priključena kot kaže slika 4.3, brez nevtralnega vodnika, je matrika impedanc zapisana v sistemu simetričnih komponent podana s (4.34) [5].

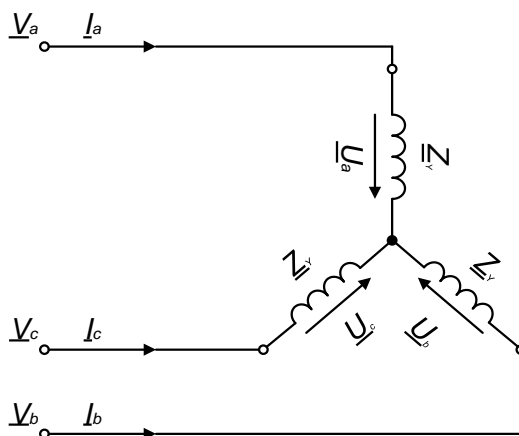
$$\begin{bmatrix} \underline{Z}^0 & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z}^+ & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z}^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \infty & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z}_Y & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z}_Y \end{bmatrix} = \underline{Z}_Y \cdot \begin{bmatrix} \infty & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

Kjer je:

$\underline{Z}_Y$  kompleksni kazalec impedance bremena v zvezda vezavi.

Njen inverz (4.35) [5], pa je kot matrika admittanc zapisana v sistemu simetričnih komponent.

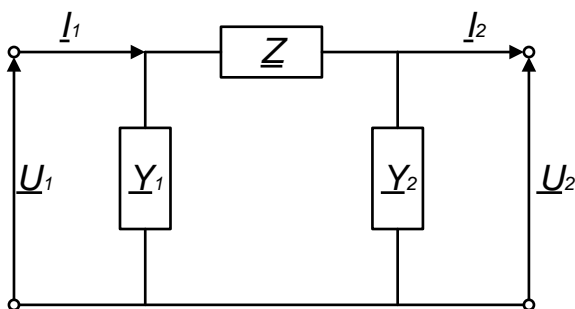
$$\begin{bmatrix} \underline{Y}^0 & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Y}^+ & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Y}^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}^0 & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z}^+ & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z}^- \end{bmatrix}^{-1} = \frac{1}{\underline{Z}_y} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.35)$$



Slika 4.3 Breme priključeno v zvezdno trifazno vezavo

#### 4.7 Splošen model prenosnega voda

Nadzemne prenosne vode in kable ponazorimo z nadomestnim  $\pi$  vezjem, kakor je prikazano na sliki 4.4 [5].



Slika 4.4: Ekvivalentni  $\pi$  model kabla

Kjer so:

- $\underline{I}_1$  kompleksni kazalec toka osnovne harmonske komponente na začetku voda,
- $\underline{I}_2$  kompleksni kazalec toka osnovne harmonske komponente na koncu voda,
- $\underline{U}_1$  kompleksni kazalec napetosti osnovne harmonske komponente na začetku voda,



$\underline{U}_2$	kompleksni kazalec napetosti osnovne harmonske komponente na koncu voda,
$\underline{Z}$	kompleksni kazalec impedance osnovne harmonske komponente voda,
$\underline{Y}_1$	kompleksni kazalec prečne admittance osnovne harmonske komponente na začetku voda,
$\underline{Y}_2$	kompleksni kazalec prečne admittance osnovne harmonske komponente na koncu voda.

Dommel v svoji knjigi EMTP [12] pravi, da se zaradi kožnega pojava (ang. skin effecta) v okroglem vodniku povečuje njegova ohmska upornost  $R$  in manjša njegova induktivnost  $L$ . Pri tem se upornost  $R$  in reaktanca  $X_L$  spreminjata z  $\sqrt{\omega}$ . Tako lahko impedanco krajšega prenosnega voda ob prisotnosti harmonskih komponent višjega reda predstavimo s (4.7) [5].

$$\underline{Z}_{dvh} = \begin{cases} \sqrt{h} \cdot (R_0 + jX_0) & h = 3n; \quad n = 0, 1, 2, 3, 4, 5, \dots \\ \sqrt{h} \cdot (R + jX), & h = 3n \pm 1; \quad n = 0, 1, 2, 3, 4, 5, \dots \end{cases} \quad (4.36)$$

Za bolj natančno obravnavo prenosnih vodov, ki so dolžin daljših od 200 km, pa je potrebno izvesti izračun parametrov na podlagi  $\pi$  modela prenosnega voda [6].

Predstavljen  $\pi$  model prenosnega voda dolžine  $l$  lahko predstavimo z njegovo vzdolžno impedanco  $z = r + jx$  in njegovo prečno admittance  $y = g + jb$ . Tako lahko zapišemo vzdolžno impedanco  $\underline{Z}$  celotnega voda s (4.37) [5].

$$\begin{aligned} \underline{Z} &= \underline{z} * l = (r + jx) * l = R_v + jX_v \\ \underline{Z}_{vh} &= R_v + jhX_v \end{aligned} \quad (4.37)$$

Kjer so:

$l$	dolžina voda,
$R_v$	upornost vzdolžne veje voda,
$r$	upornost vzdolžne veje voda na enoto dolžine,
$X_v$	reaktanca vzdolžne veje voda,
$x$	reaktanca vzdolžne veje voda na enoto dolžine,
$\underline{Z}$	kompleksni kazalec impedance voda osnovne harmonske komponente,
$\underline{Z}_{vh}$	kompleksni kazalec impedance voda harmonske komponente reda $h$ ,

$\underline{z}$  kompleksni kazalec impedance voda na enoto dolžine.

Njegovo prečno admitanco  $\underline{Y}$  pa s (4.38) [5].

$$\begin{aligned}\underline{Y} &= \underline{Y}_1 + \underline{Y}_2; & \underline{Y}_1 &= \underline{Y}_2 \\ \underline{Y} &= \underline{y} * l = (g + jb) * l = G_v + jB_v, & & (4.38) \\ \underline{Y}_h &= G_v + jhB_v\end{aligned}$$

Kjer so:

- $B_v$  susceptanca prečne veje voda,
- $b$  susceptanca prečne veje voda na enoto dolžine,
- $G_v$  ohmska prevodnost prečne veje voda,
- $g$  ohmska prevodnost prečne veje voda na enoto dolžine,
- $\underline{Y}$  kompleksni kazalec admitance voda osnovne harmonske komponente,
- $\underline{Y}_h$  kompleksni kazalec admitance voda harmonske komponente reda  $h$ ,
- $\underline{y}$  kompleksni kazalec prečne admitance voda na enoto dolžine.

Iz zgoraj predstavljenega nadomestnega vezja prenosnega voda lahko parametre vzdolžne impedance  $\underline{Z}_v$  in prečne admitance  $\underline{Y}_1$  ter  $\underline{Y}_2$  predstavimo s (4.39) in (4.40) [5].

$$\underline{Z}_v = \underline{Z}_c sh(\underline{\gamma}l) \quad (4.39)$$

$$\underline{Y}_1 = \underline{Y}_2 = \frac{\underline{Y}}{2} \frac{th(\underline{\gamma}l/2)}{\underline{\gamma}l/2} \quad (4.40)$$

Kjer so:

- $\underline{\gamma}$  kompleksni kazalec konstante širjenja osnovne harmonske komponente,
- $sh$  hiperbolični sinus,
- $th$  hiperbolični tangens,
- $\underline{Z}_c$  kompleksni kazalec impedance valovne upornosti osnovne harmonske komponente voda,
- $\underline{Z}_v$  kompleksni kazalec vzdolžne impedance voda osnovne harmonske komponente.

Konstanta širjenja voda je splošnem za sinusne oblike toka in napetosti kompleksna vrednost. Realno komponento  $\alpha$  imenujemo konstanta dušenja, imaginarno komponento  $\beta$  pa imenujemo fazna konstanta [17].

Ob prisotnosti harmonskih komponent višjega reda je treba za izračun parametrov upoštevati naslednje enačbe [5]:

$$\underline{\gamma}_h = \sqrt{\underline{z}_h \underline{y}_h} \quad (4.41)$$

$$\underline{\gamma}l_h = \sqrt{\underline{Z}_h \underline{Y}_h} \quad (4.42)$$

$$\underline{Z}_{ch} = \sqrt{\underline{Z}_h / \underline{Y}_h} \quad (4.43)$$

$$\underline{Z}_{vh} = \underline{Z}_{ch} \operatorname{sh}(\underline{\gamma}l_h) \quad (4.44)$$

$$\underline{Y}_{1h} = \underline{Y}_{2h} = \frac{\operatorname{th}(\underline{\gamma}l_h / 2)}{\underline{Z}_{ch}} \quad (4.45)$$

Kjer so:

- $\underline{Z}_{ch}$  kompleksni kazalec valovne upornosti voda harmonske komponente reda  $h$ ,
- $\underline{Z}_{vh}$  kompleksni kazalec vzdolžne impedance voda harmonske komponente reda  $h$ ,
- $\underline{z}_h$  kompleksni kazalec impedance voda harmonske komponente reda  $h$  na enoto dolžine,
- $\underline{Y}_{1h}$  kompleksni kazalec prečne admittance na začetku voda harmonske komponente reda  $h$ ,
- $\underline{Y}_{2h}$  kompleksni kazalec prečne admittance na koncu voda harmonske komponente reda  $h$ ,
- $\underline{y}_h$  kompleksni kazalec admittance voda harmonske komponente reda  $h$  na enoto dolžine.

Valovno dolžino sinusnega potujočega vala  $\lambda$ , hitrost širjenja  $c$  in frekvenco nihanja  $f_{nih}$  ob prisotnosti harmonskih komponent višjega reda določimo z enačbami (4.46) do (4.48) [5].

$$\lambda_h = \frac{2\pi}{\beta_h} \quad (4.46)$$

$$v_h = \frac{h\omega_1}{\beta_h} \quad (4.47)$$

$$f_{nih} = \frac{v_h}{l} \quad (4.48)$$

Kjer so:

- $\lambda_h$  valovna dolžina voda harmonske komponente reda  $h$ ,
- $\beta_h$  fazna konstanta signala harmonske komponente reda  $h$ ,
- $v_h$  hitrost širjenja signala harmonske komponente reda  $h$ ,
- $f_{nih}$  frekvenca nihanja signala harmonske komponente reda  $h$ .

Kot je omenjeno v [17] je hitrost širjenja vala za kable ocenjena na 2/3 svetlobne hitrosti, medtem, ko je hitrost širjenja vala za nadzemne vode enaka svetlobni hitrosti.

Nadomestno impedanco voda  $Z_{nvh}$  gledano s konca voda in s kratkosklenjenimi sponkami na začetku voda, predstavimo z enačbo (4.49) [5].

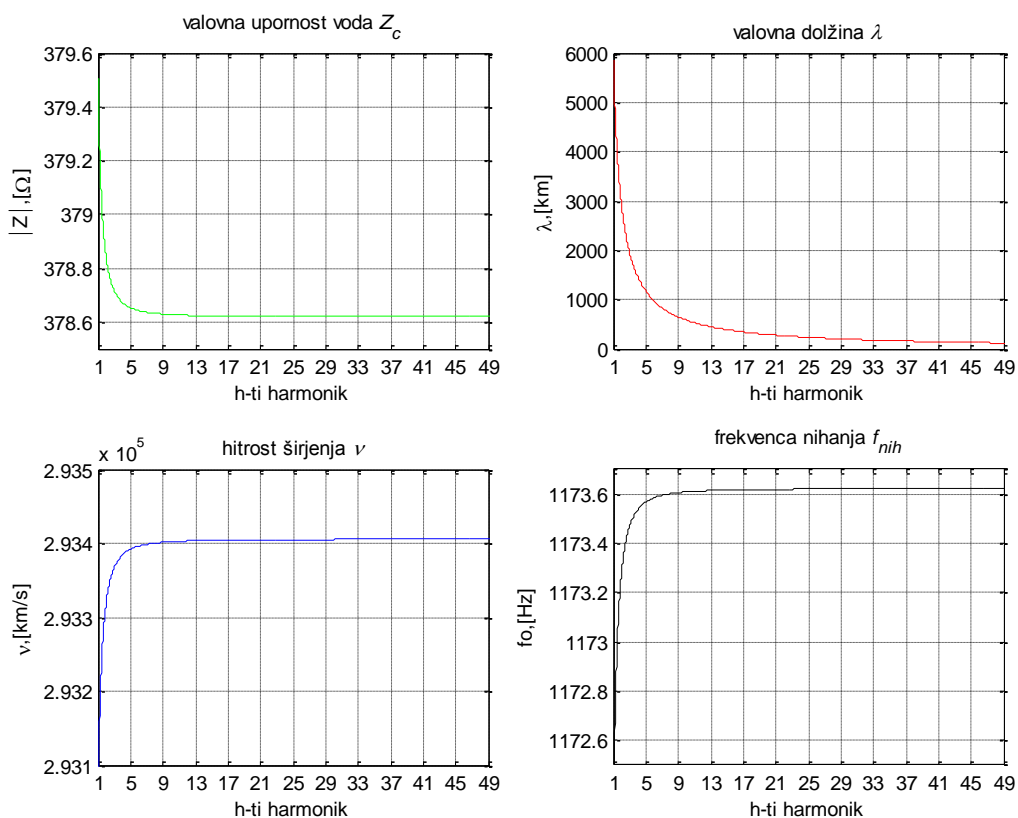
$$\underline{Z}_{nvh} = \frac{1}{\underline{Y}_{1h}} // \left[ \underline{Z}_{vh} + \frac{1}{\underline{Y}_{1h}} \right] \quad (4.49)$$

Kjer je:

- $\underline{Z}_{nvh}$  kompleksni kazalec nadomestne impedance voda harmonske komponente reda  $h$ .

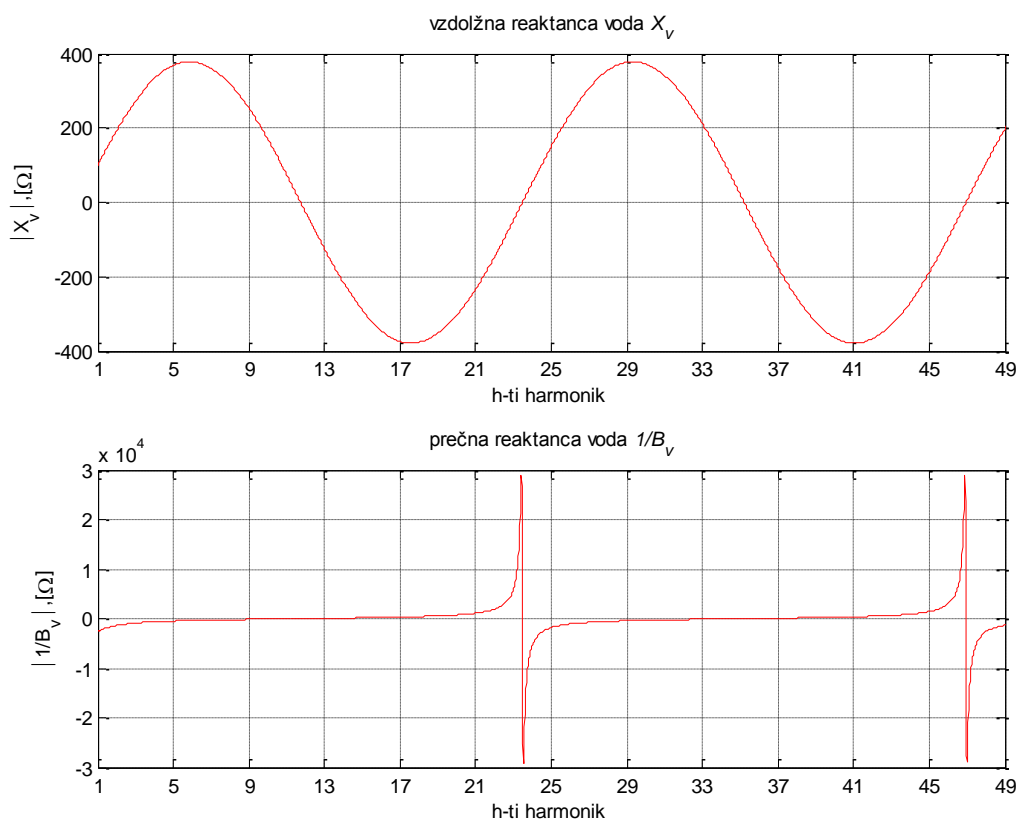
V nadaljevanju je predstavljen nadomestni enofazni  $\pi$  model kabla z osnovnimi parametri v odvisnosti od frekvence  $f$ , katera je predstavljena s pomočjo večkratnikov osnovne harmonske frekvence  $f_1$ . Za predstavitev je izbran model skupne dolžine 250 km, kajti pri krajših vodih, kakršni so tudi del našega omrežja, smemo prečne prevodnosti zanemariti in kratki vod predstaviti kar z enoelementnim četveropolom ter uporabimo približni model z upoštevanjem le vzdolžne veje voda.

Vsi izračuni in vhodni podatki, za v nadaljevanju grafično prikazane izračune na slikah od 4.5 do 4.9 so povzeti po [5]. Programska koda za izračun potrebnih parametrov v programskem paketu Matlab je v prilogi **B.4**.



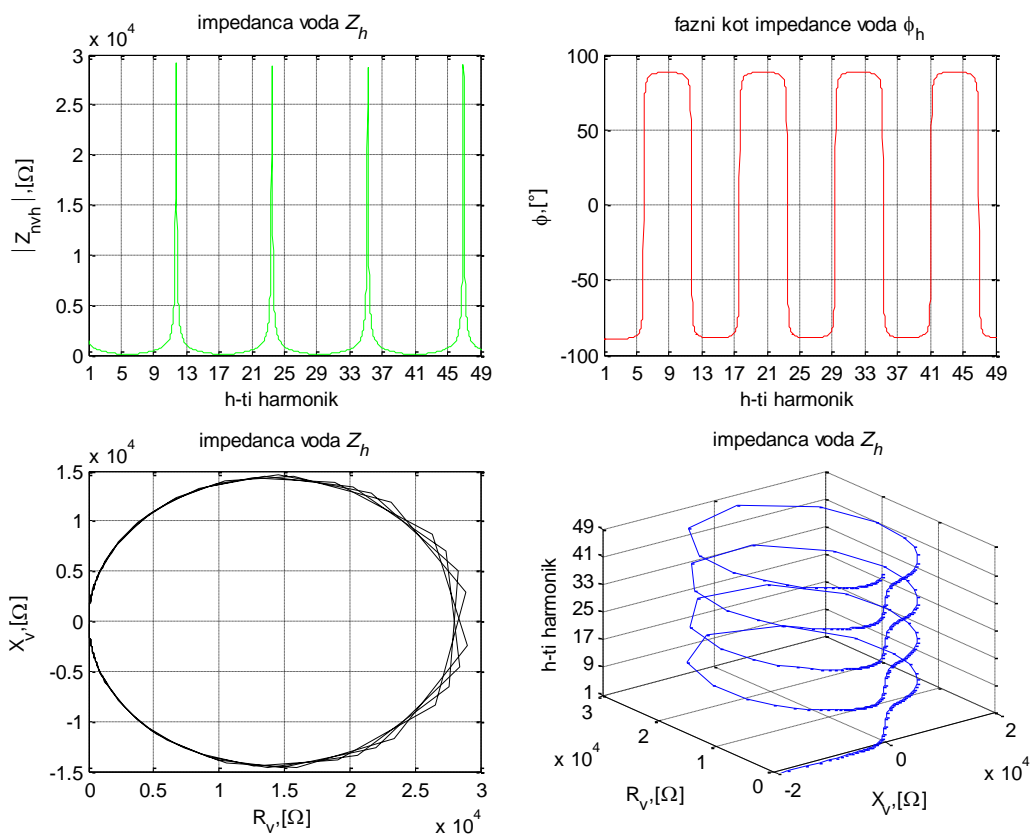
Slika 4.5: fizikalne lastnosti prenosnega voda

Kakor je moč opaziti iz grafov na sliki 4.5, so valovna upornost voda  $Z_c$  (4.43), hitrost širjenja  $v$  (4.47) in frekvenca nihanja  $f_{nih}$  (4.48) skoraj neodvisne od frekvence  $f$ , njegova valovna dolžina  $\lambda$  (4.46) pa je obratno sorazmerna s frekvenco  $f$ .



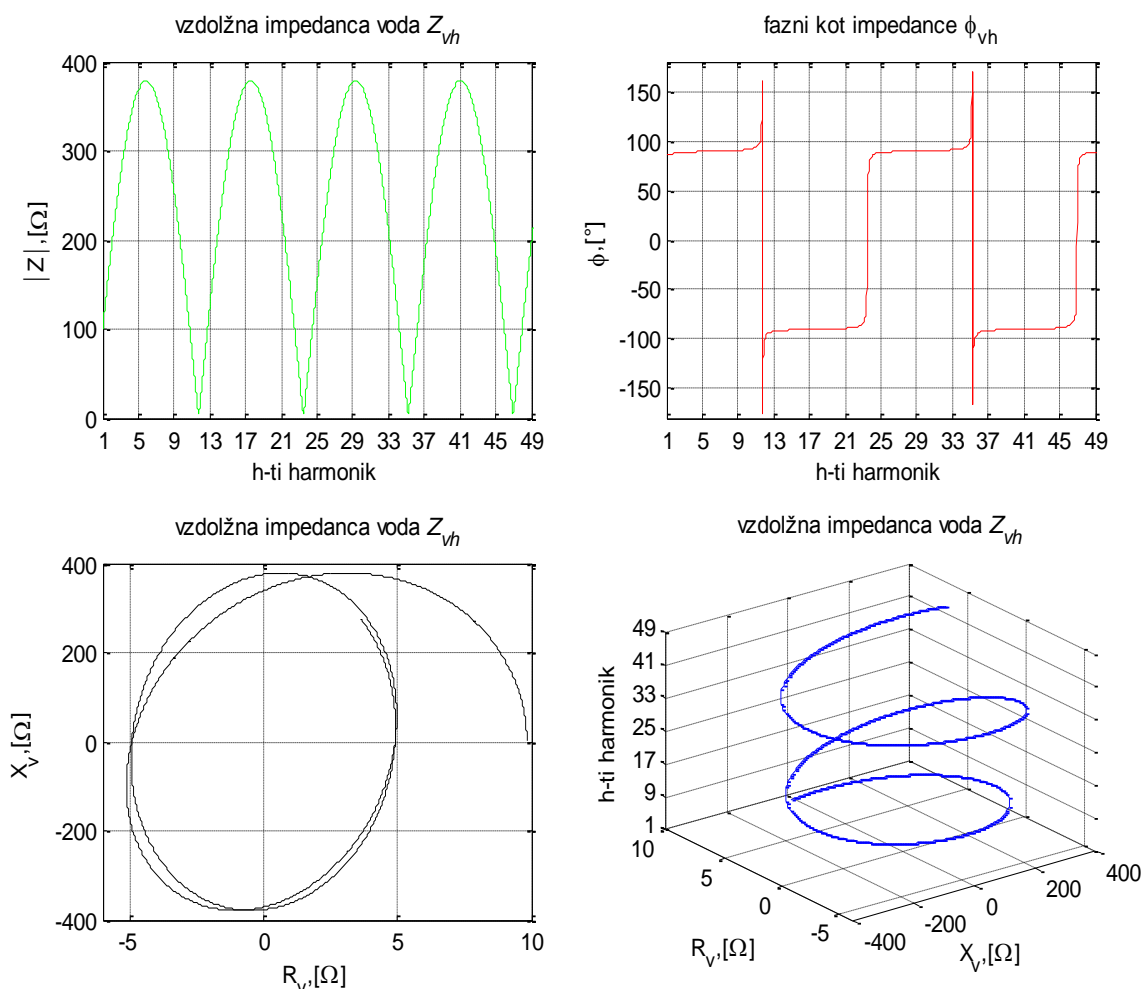
Slika 4.6: Vzdolžna in prečna reaktanca voda

Na sliki 4.6 lahko iz prikazanih grafov razberemo, da se reaktanca vzdolžne veje spreminja s sinusno obliko lastne frekvence nihanja ter je pri vsaki temenski vrednosti v pozitivni in negativni polperiodi vzpostavljen pogoj za zaporedno resonanco. Za izračun odvisnosti reaktance voda  $X_v$  od frekvence  $f$  je bila uporabljena (4.37), pri kateri smo upoštevali le imaginarni del enačbe. Pogoji za paralelno resonanco so zagotovljeni ob  $\frac{1}{2}$ ,  $1$ ,  $\frac{2}{3}$ , in dvokratniku lastne frekvence nihanja  $f_{nih}$ , kar je prikazano z reaktanco prečne veje  $X_v = 1/B_v$ , pri izračunu katere je bil uporabljen imaginarni del (4.38).



Slika 4.7: Nadomestna impedanca izbranega  $\pi$  modela voda

S pomočjo (4.44) in izračuna faznega kota impedance med njeno realno in imaginarno komponento lahko na sliki 4.7 vidimo, da je zadoščeno pogoju za paralelno resonanco, ko je absolutna vrednost impedance voda  $Z_h$  zelo velika, fazni kot  $\Phi_h$  pa je 0. Na spodnjih diagramih je prikazano, kako se s spreminjanjem frekvence  $f$  spreminjata upornost  $R_v$  in reaktanca  $X_v$  nadomestnega  $\pi$  modela voda, katerih izračun temelji na realni in imaginarni komponenti (4.49).

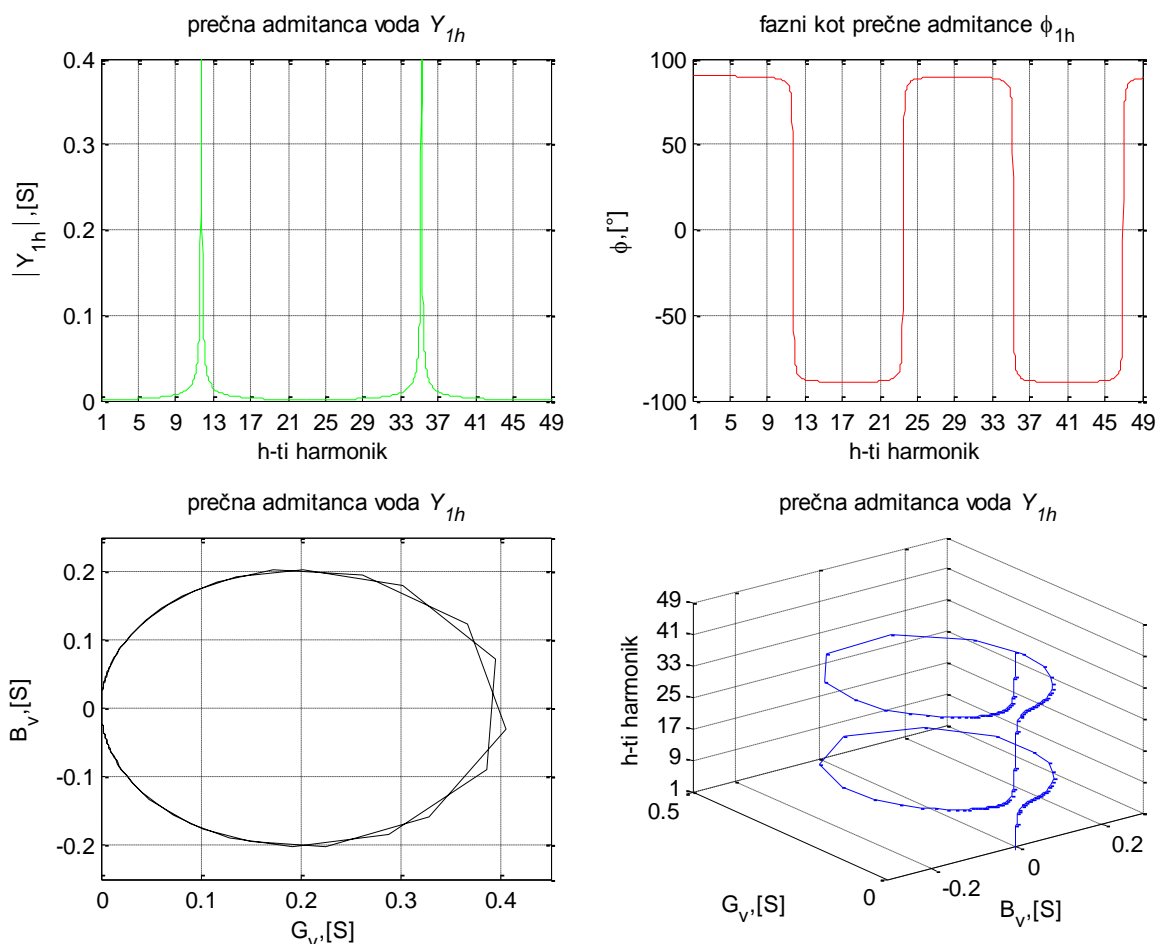


Slika 4.8: Vzdolžna impedanca nadomestnega  $\pi$  modela voda

Na grafih, ki jih prikazuje slika 4.8, vidimo, kako se s frekvenco  $f$  spreminjajo vzdolžna impedanca voda  $Z_{vh}$ , fazni kot  $\Phi_{vh}$ , reaktanca  $X_v$  in ohmska upornost  $R_v$  vzdolžne veje nadomestnega  $\pi$  modela voda.

S pomočjo (4.44) in izračuna faznega kota impedance med njeno realno in imaginarno komponento, lahko na sliki 4.8 vidimo, da je zadoščeno pogoju za zaporedno resonanco, ko je absolutna vrednost impedance voda  $Z_{vh}$  enaka 0, fazni kot  $\Phi_h$  pa sunkovito preide iz  $90^\circ$  proti  $-90^\circ$ . Na spodnjih diagramih je prikazano, kako se s spreminjanjem frekvence  $f$  spreminjata upornost  $R_v$  in reaktanca  $X_v$  vzdolžne veje nadomestnega  $\pi$  modela voda, katerih izračun temelji na realni in imaginarni komponenti (4.44).



Slika 4.9: Prečna admitanca nadomestnega  $\pi$  modela voda

Na grafih, ki jih prikazuje slika 4.9, lahko vidimo, kako se s frekvenco  $f$  spreminjajo prečna admitanca  $\underline{Y}_{1h}$  (4.45) in izračuna faznega kota admittance med njeno realno in imaginarno komponento fazni kot  $\Phi_{1h}$ . S pomočjo imaginarnega dela (4.45) je izveden izračun susceptance  $B_v$ , in s pomočjo realnega dela ohmska prevodnost  $G_v$ , prečne veje nadomestnega  $\pi$  modela voda.

Iz prikazanih grafov na zgornjih slikah je moč ugotoviti, da je za natančno analizo harmonskega popačenja napetosti v omrežju, za daljše dolžine prenosnih vodov treba upoštevati nadomestni  $\pi$  model. Za kratke dolžine prenosnih vodov smemo prečne admittance zanemariti in popolnoma zadošča upoštevanje impedance vzdolžne veje prenosnega voda [6].

## 4.8 Splošen model energetskega transformatorja

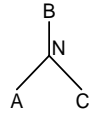
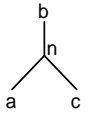
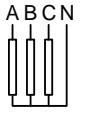
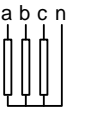
Dandanes v svetu prevladujejo trifazni elektroenergetski sistemi za prenos in distribucijo električne energije. Niskonapetostni sistemi za dobavo energije končnim porabnikom so zasnovani kot štirivodni sistem s tremi faznimi vodniki in nevtralnim vodnikom, da lahko v omrežje priključujemo tudi enofazne porabnike. Za SN in VN napetostne sisteme pa velja, da so praviloma trivodni brez nevtralnega vodnika. Za pretok energije med različnimi napetostnimi nivoji tako potrebujemo transformatorje, ki so glede na izvedbo lahko izvedeni, kot enofazni transformatorji ali pa so zgrajeni z enim železnim jedrom, ki nosi navitja vseh treh faz.

S strani modeliranja nadomestnega modela energetskega transformatorja za uporabo v analizi harmonskega popačenja napetosti omrežja je precej pomembno vedeti, v kakšni vezavi je transformator priključen v omrežje. Kajti v trivodnih sistemih toki ničnega zaporedja ne morejo teči, medtem ko v vezavi navitij v trikot, toki ničnega zaporedja tečejo le med faznimi navitji.

Pri izvedbi izračunov je treba upoštevati fazni zamik vezave primarnega in sekundarnega navitja.

V tabeli 4.1 so podane osnovne grafične predstavitve primarnega in sekundarnega navitja energetskega transformatorja.

Tabela 4.1: Vezja in fazni premiki izbranega trifaznega dvonavitnega transformatorja

oznaka vezave	Kazalčna slika		Vezna shema	
	navitje VN	navitje SN	navitje VN	navitje SN
YNyn				

Za izbrani model tako izberemo za navitje VN vezavo YN in za navitje SN vezavo yn. V veznem modelu lahko dvonavitne energetske transformatorje predstavimo z ustrezno vezavo impedanc pozitivnega in negativnega zaporedja, ki jih predstavimo z njihovo kratkostično impedanco  $Z_{tr}$ , medtem, ko je treba za nično zaporedje upoštevati, kako je transformator povezan v sistem. Podatke za nično zaporedje je najbolje pridobiti od proizvajalca, za naš primer pa bodo podatki povzeti po [6].

Pri izračunu impedance transformatorja za harmonsko komponento reda  $h$ ,  $\underline{Z}_{trh}$  je treba upoštevati (4.50) [5].

$$\underline{Z}_{trh} = h \cdot (R + jX) \quad (4.50)$$

Ob vnosu osnovnih parametrov transformatorja, naletimo na težavo pri preračunu impedanc elementov elektroenergetskega omrežja zaradi prehoda iz enega na drugi napetostni nivo. Rešitev težave je uporaba metode enotinih vrednosti (ang. *per unit*).

$$\underline{Z}_{tr}^+ = \underline{Z}_{tr}^- = \frac{\% \underline{Z}_{tr} S_b}{100 S_{tr}} \quad (4.51)$$

$$\underline{Z}_{tr}^0 = \underline{Z}_{tr}^+ + \frac{3R_g}{Z_b} \quad (4.52)$$

Kjer so:

- $R_g$  upornost zvezdišča,
- $S_b$  bazna vrednost navidezne moči,
- $S_{tr}$  nazivna moč transformatorja,
- $\underline{z}_{tr}$  kompleksni kazalec relativne impedance transformatorja,
- $\underline{Z}_{tr}^+$  kompleksni kazalec impedance pozitivnega zaporedja transformatorja,
- $\underline{Z}_{tr}^-$  kompleksni kazalec impedance negativnega zaporedja transformatorja,
- $\underline{Z}_{tr}^0$  kompleksni kazalec impedance ničnega zaporedja transformatorja.

Za harmonsko komponento višjega reda  $h$  tako velja (4.53) [5]:

$$\underline{Z}_{trh} = \begin{cases} \underline{Z}_{trh}^0, & h = 3n; \quad n = 1, 2, 3, 4, 5... \\ \underline{Z}_{trh}^+, & h = 3n \pm 1; \quad n = 1, 2, 3, 4, 5... \end{cases} \quad (4.53)$$

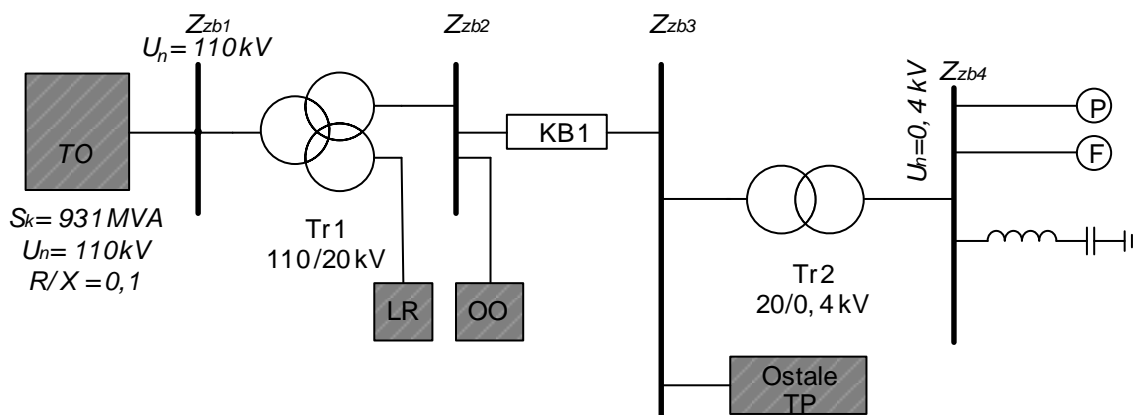
Kjer je:

- $\underline{Z}_{trh}$  kompleksni kazalec impedance transformatorja harmonske komponente  $h$ .



## 5 NADOMESTNI MODEL OMREŽJA

Za izračun parametrov simulacijskega nadomestnega modela omrežja, ki je zajet v analizi harmonskega popačenja napetosti, je bil izbran programski paket Matlab. Omenjeni programski paket omogoča ustrezen izračun in prikaz obravnavanih obratovalnih stanj v dostopni študentski verziji programske opreme. Sestavljeni model, katerega topološka shema je podana na sliki 5.1, vsebuje vse za analizo potrebne elemente znotraj omrežja, kakor tudi povezovalni vod in energetski transformator do priključne točke na 110 kV distribucijske zbiralke v RTP Bršljin.



Slika 5.1 Topološka shema za izvedbo harmonske analize

V nadaljevanju je predstavljeno določanje parametrov tujega omrežja, energetskega transformatorja, srednjenapetostnega kablovoda in različnih vrst bremen.

Vsi postopki izračunov impedanc, v nadaljevanju predstavljenih elementov omrežja v Matlabu, ki so potrebni za analizo harmonskega popačenja napetosti omrežja in izris amplitudnih karakteristik, so za osnovno harmonsko komponento podani v prilogi A.2.

### 5.1 Model tujega omrežja

Uporabljeni model omrežja je v elektroenergetski sistem Slovenije priključen na  $Z_{zb1}$  v RTP Bršljin. Prenosno elektroenergetsko omrežje nadomestimo z ekvivalentnim napetostnim izvorom, katerega parametre izračunamo na podlagi podatkov, pridobljenih s

strani lastnika prenosnega omrežja. Podatki kratkostičnih razmer na zbiralkah  $Z_{zbl}$  v RTP Bršljin so povzeti na podlagi [13], kjer je simulacijski izračun narejen za zbiralke v RTP Črnomelj. Omenjeni RTP je v omrežje povezan preko RP Hudo, ki je praktično v isti točki kot RTP Bršljin. Za izračun potrebnih parametrov uporabimo naslednje vrednosti, ki so podane v spodnji tabeli 5.1.

Tabela 5.1: Parametri kratkostične moči na zbiralkah v RTP Črnomelj povzeti po EIMV

Opis parametra	Oznaka	Vrednost	Enota
Nazivna napetost	$U_n$	$110 \cdot 10^3$	[V]
Kratkostična moč	$S_k''$	$931 \cdot 10^6$	[VA]
Frekvenca	$f$	50	[Hz]
Razmerje X/R	$X/R$	10	

Pri izračunu kratkostične moči na zbiralkah v RTP Bršljin je potrebno upoštevati poleg podanih podatkov iz študije EIMV [13] še impedanco povezovalnih vodov med RTP Črnomelj in RP Hudo. Okvirne podatke za povezovalne nadzemne vode smo povzeli po [6], kjer so podani podatki za impedanco pozitivnega in ničnega zaporedja sistema simetričnih komponent.

Napetostni izvor lahko kot ekvivalent EES uporabimo ob predpostavki, da je za našo obravnavo dovolj natančno, če v normalnem obratovalnem stanju obravnavamo svoj model kot del celotnega distribucijskega omrežja in stično mesto predstavimo kot napetostni izvor s serijsko vezano impedanco, ki v stičnem mestu  $Z_{zbl}$  ustreza kratkostični moči in razmerju med ohmskim in induktivnim delom pripadajoče impedance.

Izračun parametrov potrebnih za izračun impedance v stičnem mestu  $Z_{zbl}$  je izveden po enačbah od (4.8) do (4.16) v poglavju 4.4. in je za osnovno harmonsko komponento podan v prilogi A.1 .

## 5.2 Model energetskega transformatorja

Za transformacijo električne energije iz prenosnega omrežja na distribucijsko je v RTP Bršljin instaliran energetski transformator  $Tr 1$  s podatki, podanimi v tabeli 5.2.

Tabela 5.2: Podane vrednosti parametrov transformatorja  $Tr 1$  (vezava YNyn)

Opis parametra	Oznaka	Enota	Vrednost
Moč na VN strani transformatorja	$S_{tr1}$	MVA	31,5
Moč na SN strani transformatorja	$S_{tr1}$	MVA	31,5
Nazivna napetost na VN strani transformatorja	$U_{vn1}$	kV	110
Nazivna napetost na SN strani transformatorja	$U_{nn1}$	kV	21
Kratkostična napetost med VN in SN navitjem	$u_{k12}$	%	13,10
Relativna impedanca transformatorja	$Z_{tr1}$	%	$0,45+j13,1$
Moč kratkega stika med VN in SN navitjem	$P_{k12}$	kW	156,085
Moč prostega teka	$P_0$	kW	14,058

Izračun impedance transformatorja  $Z_{tr1}$  je izveden po enačbah od (4.50) do (4.53) v poglavju 4.8 in je za osnovno harmonsko komponento podan v prilogi **A.2**.

Za transformacijo električne energije znotraj zaključenega industrijskega omrežja, so v večji meri instalirani transformatorji z nazivnimi podatki, ki so podani v tabeli 5.3.

Tabela 5.3: Podane vrednosti parametrov transformatorja  $Tr 2$  (vezava Dyn5)

Opis parametra	Oznaka	Enota	Vrednost
Moč na SN strani transformatorja	$S_{tr2}$	MVA	2,5
Moč na NN strani transformatorja	$S_{tr2}$	MVA	2,5
Nazivna napetost na SN strani transformatorja	$U_{sn2}$	kV	20
Nazivna napetost na NN strani transformatorja	$U_{nn2}$	kV	0,4
Kratkostična napetost med SN in NN navitjem	$u_{k12}$	%	6,1
Relativna impedanca transformatorja	$Z_{tr2}$	%	$0,85+j6,1$
Moč kratkega stika med SN in NN navitjem	$P_{k12}$	kW	21,215
Moč prostega teka	$P_0$	kW	4,359

Izračun impedance transformatorja  $Z_{tr2}$  je izveden po enačbah od (4.50) do (4.53) v poglavju 4.8 in je za osnovno komponento podan v prilogi **A.3**.

## 5.3 Model energetskega prenosnega voda

Nadomestni model industrijskega omrežja je v model distribucijskega omrežja povezan s podzemno kabelsko povezavo, s srednjenapetostnim kablovodom.

Parametre, potrebne za izračun impedance pozitivnega in negativnega zaporedja je moč pridobiti na straneh proizvajalca in so podani v tabeli 5.4 [18].

Tabela 5.4: Podane vrednosti parametrov prenosnega voda *KB 1*

Opis parametra	Oznaka	Enota	Vrednost
Nazivna napetost	$U_n$	kV	24
Presek glavnega vodnika	$A_n$	mm <sup>2</sup>	150
Presek ekrana	$A_n$	mm <sup>2</sup>	25
Upornost vodnika	$R_1$	Ω/km	0,206
Induktivnost vodnika	$L_1$	mH/km	0,39
Kapacitivnost vodnika	$C_1$	μF/km	0,251
Dolžina vodnika	$l$	km	3

Natančne podatke za nično zaporedje lahko pridobimo le na podlagi izvedenih meritev. Dovolj natančno jih lahko ocenimo s pomočjo [6] in so podani v tabeli 5.5.

Tabela 5.5: Ocenjene vrednosti parametrov prenosnega voda *KB 1*

Opis parametra	Oznaka	Enota	Vrednost
Upornost vodnika	$R_0$	Ω/km	1,347
Induktivnost vodnika	$L_0$	mH/km	2,12
Kapacitivnost vodnika	$C_0$	μF/km	0,251
Dolžina vodnika	$l$	km	3

Izračun impedance prenosnega voda  $Z_{kbl}$  je izveden po (4.36) v poglavju 4.7 in je za osnovno harmonsko komponento podan v prilogi **A.4**.

## 5.4 Model pasivnega bremena

Nazivne parametre izbranega pasivnega bremena, podane v tabeli 5.6, smo določili na podlagi spremljanja letnega diagrama porabe v izbrani transformatorski postaji [14].

Tabela 5.6: Podane vrednosti nazivnih parametrov pasivnega bremena *P*

Opis parametra	Oznaka	Enota	Vrednost
Nazivna moč bremena	$P_{br}$	kW	1425
Cos φ	$\cos\varphi$		0,95
Nazivna napetost	$U_n$	kV	0,4

Izračun impedance pasivnega bremena  $Z_{br}$  je izveden po (4.25) do (4.27) v poglavju 4.6.3 in je za osnovno harmonsko komponento podan v prilogi **A.5**.



## 5.5 Model nelinearnega bremena

Nazivne parametre izbranega nadomestnega modela nelinearnega bremena smo določili na podlagi predhodno opravljenih meritev toka in napetosti harmonskih komponent višjega reda, ki so podane v tabeli 5.7.

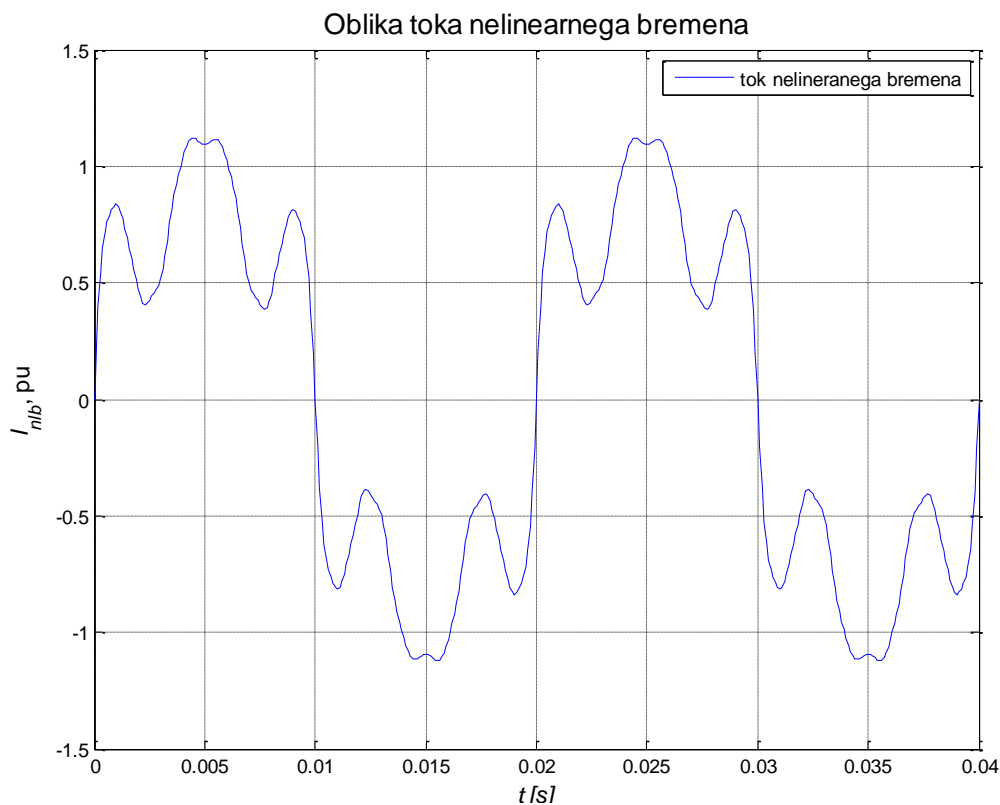
Pri tem je potrebno upoštevati, da so toki za vsako liho harmonsko komponento višjega reda podani posamično, z njihovo relativno vrednostjo  $i(h)$  glede na amplitudno vrednost osnovne komponente toka.

Izračun impedance nelinearnega bremena  $Z_{nlb}$  je izveden po (4.25) do (4.27) v poglavju 4.6.3 in je za osnovno harmonsko komponento podan v prilogi **A.6**.

Tabela 5.7: Podane vrednosti nazivnih prametrov nelinearnega bremena  $F$

Opis parametra					Oznaka	Enota	Vrednost
Nazivna moč bremena					$P_{nlb}$	kW	1282,5
Cos $\varphi$					$\cos\varphi$		0,95
izkoristek					$\eta$		0,9
Nazivna napetost					$U_n$	kV	0,4
$i(h)$	$i(1)$	$i(2)$	$i(3)$	$i(4)$	$i(5)$	$i(6)$	$i(7)$
%	100	1,167	5,419	0,3929	20,27	0,3209	9,269
$i(h)$	$i(8)$	$i(9)$	$i(10)$	$i(11)$	$i(12)$	$i(13)$	$i(14)$
%	0,176	3,093	0,1312	4,599	0,086	1,68	0,1077
$i(h)$	$i(15)$	$i(16)$	$i(17)$	$i(18)$	$i(19)$	$i(23)$	$i(25)$
%	1,668	0,0559	1,97	0,060	1,637	1,065	1,00

Na sliki 5.2 je prikazana oblika toka nelinearnega bremena  $I_{nlb}$ , ki je popačene sinusne oblike, zaradi vpliva tokov harmonskih komponent višjega reda. Tok je podan v sistemu enotinih vrednosti ( $pu$ ), v času dveh period osnovne harmonske frekvence omrežja 50 Hz,  $T=1/f_j$ .

Slika 5.2: Oblika toka nelinearnega bremena  $I_{nlb}$ ,

Programska koda za izris slike 5.2 časovnega poteka toka nelinearnega bremena  $I_{nlb}$  v je podana kot priloga **B.5**.

## 5.6 Model kompenzacijskega filtra za kompenziranje tokov harmonskih komponent višjega reda

Nazivne parametre izbranega nadomestnega modela kompenzacijskega filtra smo določili na podlagi predhodno opravljenih meritev toka in napetosti v širšem frekvenčnem področju. Relativno resonančno frekvenco v analizi uporabljenih kompenzacijskih filtrov smo povzeli po [14], kjer so podane standardne vrednosti relativnih resonančnih frekvenc, za katere se kompenzacijski filtri izdelujejo. Nazivno moč  $Q_c$  smo določili glede na velikost osnovne harmonske komponente jalove moči. Parametre posamezne veje kompenzacijskih filtrov  $Q_1$  in  $Q_2$  smo določili na podlagi enačb od (2.28) do (2.38) [5] v poglavju 2.4 in 2.4.1 in so za osnovno harmonsko komponento podani v prilogi **A.7**.

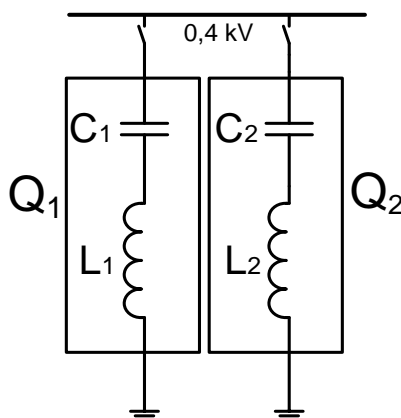
Osnovne parametre kompenzacijskih filtrov  $Q_1$  in  $Q_2$  uporabljenih v analizi harmonskega popačenja napetosti podaja tabela 5.8.

Tabela 5.8: Podane vrednosti osnovnih parametrov kompenzacijskih filtrov

Vhodni podatki kompenzacijskega filtra				Izračunani podatki kompenzacijskega filtra			
Veja	$h_{rq}$	$Q_{vq}$	$Q_{Cq}$ (MVar)	$R_q(m\Omega)$	$X_{nq}(m\Omega)$	$X_{Lq}(m\Omega)$	$X_{Cq}(m\Omega)$
$Q_1$	3,78	100	0,55	0,7696	77	20,4	290,9
$Q_2$	4,7	100	0,55	0,6189	61,9	13,2	290,9

Za izračun vrednosti elementov  $R$ ,  $X_n$ ,  $X_L$  in  $X_C$ , ki sestavljajo posamezen kompenzacijski filter so bile uporabljene enačbe od (2.28) do (2.34).

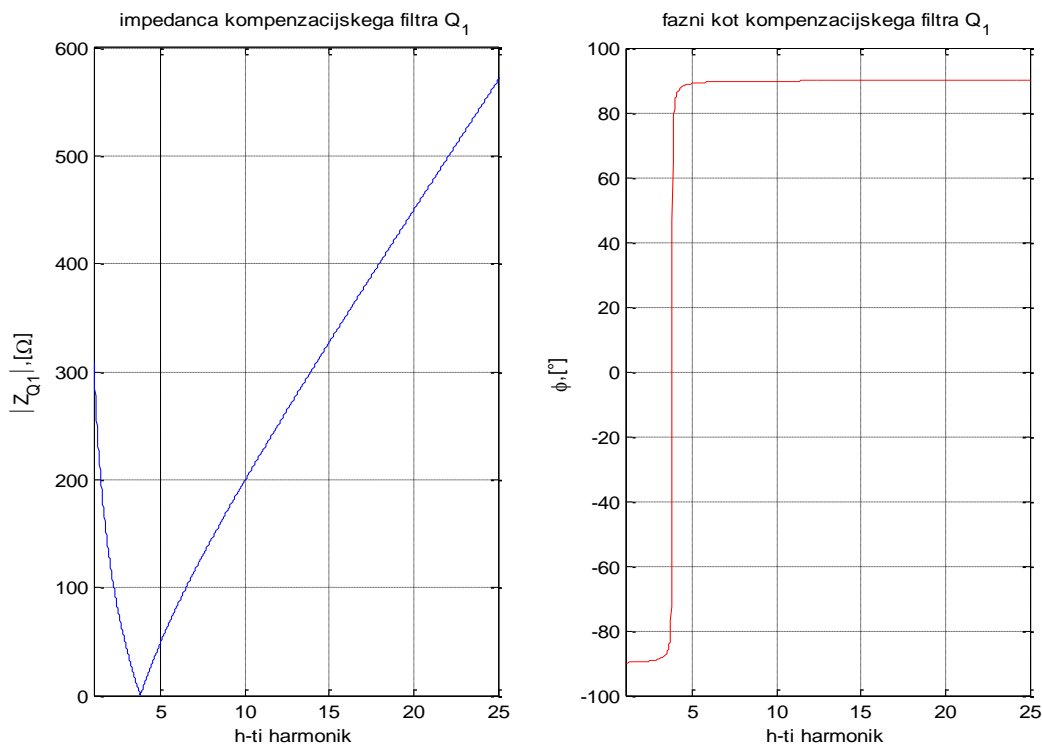
Na sliki 5.3 je prikazan nadomestni model kompenzacijskega filtra, uporabljenega v analizi harmonskega popačenja napetosti. Oba kompenzacijska filtra  $Q_1$  in  $Q_2$  sta predstavljena s kondenzatorjema  $C_1$  in  $C_2$  in dušilkama  $L_1$  in  $L_2$ , katerih navitji imata svoji notranji upornosti  $R_1$  in  $R_2$ .



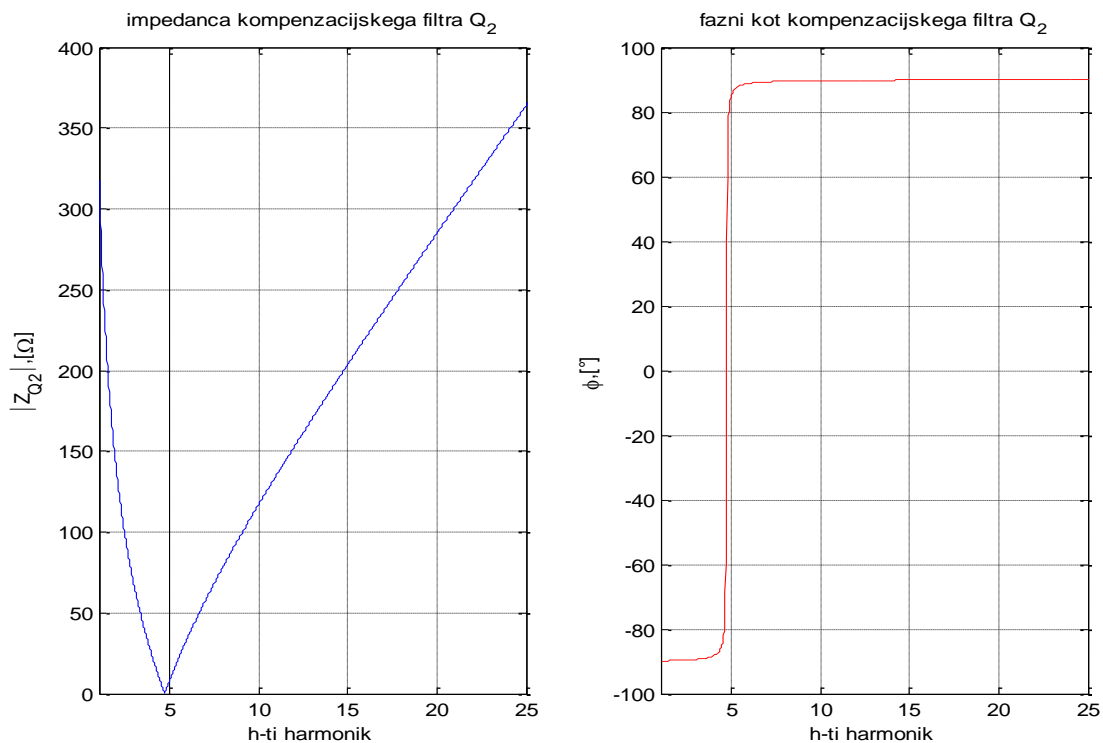
Slika 5.3: Enopolna shema modela kompenzacijskega filtra

V nadaljevanju so s pomočjo programske kode v Matlabu izvedeni simulacijski izračuni ter izris amplitudnih in faznih karakteristik kompenzacijskih filtrov  $Q_1$  in  $Q_2$ . Rezultati so podani na slikah od 5.4 do 5.6, programska koda pa v prilogi **B.6**.

Na slikah 5.4 in 5.5 sta prikazani amplitudni in fazni karakteristiki kompenzacijskih filtrov  $Q_1$  in  $Q_2$  v odvisnosti od frekvence  $f$ , ki je podana v obliki celoštevilčnih večkratnikov osnovne harmonske frekvence  $f_1$ . Iz karakteristik je možno ugotoviti, pri katerem večkratniku osnovne harmonske frekvence  $f_1$  je relativna resonančna frekvenca  $h_r$ , na levi strani te točke je izbrani filter za porabnike v omrežju kapacitivnega značaja, medtem ko je na desni strani filter popolnoma induktivnega značaja. To si lahko potrdimo tudi s karakteristiko faznega kota filtra, katera je za frekvence  $f$  pred resonančno točko na  $-90^\circ$ , nato v resonančni točki doseže  $0^\circ$  in nato narašča v pozitivni smeri, dokler ne doseže  $90^\circ$ .



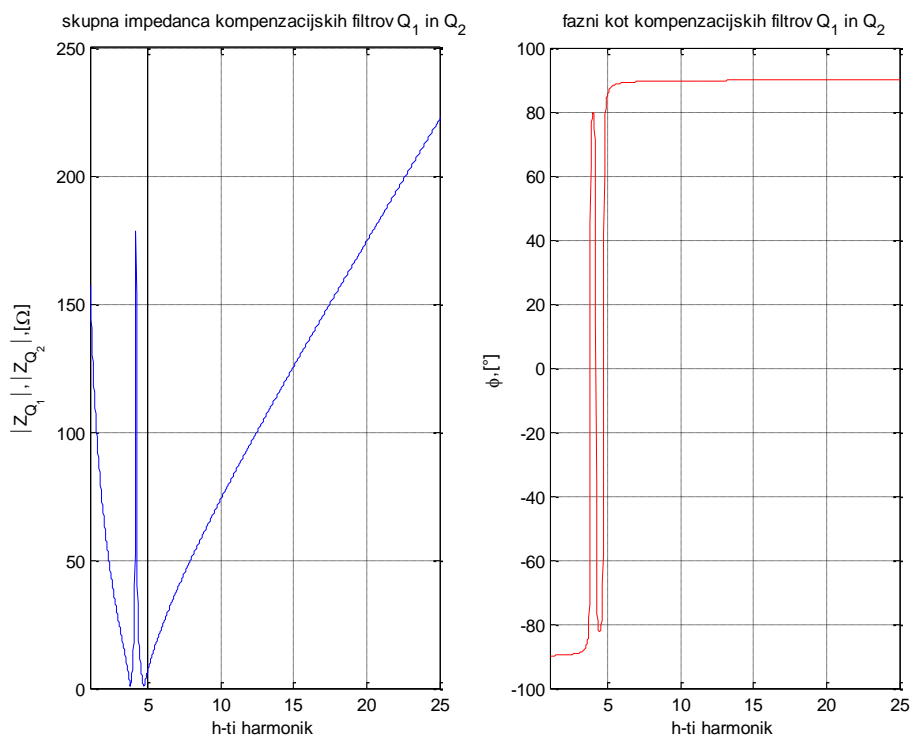
Slika 5.4: Amplitudna in fazna karakteristika kompenzacijskega filtra  $Q_1$



Slika 5.5: Amplitudna in fazna karakteristika kompenzacijskega filtra  $Q_2$

Na sliki 5.6 je prikazana amplitudna in fazna karakteristika obeh filtrov  $Q_1$  in  $Q_2$  skupaj. Pri tem lahko opazimo, da pride do paralelne resonance zaradi medsebojnega vpliva filtrov.

Paralelna resonanca nastopi med zaporedno resonanco filtra  $Q_1$  in zaporedno resonanco filtra  $Q_2$ .



Slika 5.6: Amplitudna in fazna karakteristika kompenzacijskih filtrov  $Q_1$  in  $Q_2$



## 6 ANALIZA HARMONSKEGA POPAČENJA NAPETOSTI NADOMESTNEGA MODELA

Za lažjo obravnavo modela, predvsem zaradi različnih napetostnih nivojev, vse predstavljene parametre izbranih elementov energetskega omrežja, pretvorimo v sistem enotinih vrednosti (ang. per unit). Princip metode enotinih vrednosti izhaja iz dejstva, da je možno poljubno veličino podati tudi kot relativno vrednost neke veličine, ki smo jo definirali kot bazno vrednost. V tabeli 6.1 so podani vsi parametri izbranega nadomestnega modela omrežja v sistemu enotinih vrednostih.

Za prikaz in izvedbo analize harmonskega popačenja napetosti omrežja smo upoštevali nekaj osnovnih pravil načrtovanja [5].

- Za izris amplitudnih karakteristik so harmonske komponente ničnega zaporedja obravnavane kot harmonske komponente pozitivnega zaporedja.
- V izračunih  $THD_U$  in  $THD_I$  so harmonske komponente ničnega zaporedja obravnavane kot harmonske komponente, ki tečejo po nevtralnem vodniku.
- Parametre, v analizi harmonskega popačenja napetosti, izbranih uglašanih filtrov je treba uskladiti z vrednostmi, ki jih standardi še dopuščajo kot maksimalne vrednosti tokovnih in napetostnih preobremenitev.
- Velikost kratkostične moči v točki priklopa modela v ostalo omrežje je precej odvisna od razpoložljivih proizvodnih enot. Povečanje kratkostične moči močno vpliva na izboljšanje oblike sinusne napetosti, vendar pa po drugi strani povzroči premik resonančne točke. Zaradi tega je treba izvesti analizo za različne vrednosti kratkostične moči omrežja.
- Ob vrednotenju skupnega harmonskega popačenja ni upoštevan prispevek popačenja napetosti zaradi drugih porabnikov priključenih na distribucijsko omrežje.

## 6.1 Prikaz nazivnih podatkov naprav, vključenih v analizo harmonskega popačenja napetosti

Zaradi večje preglednosti in lažjega izračuna potrebnih impedančnih stanj smo podatke naprav ter nazivnih napetosti zbiralk zbrali v tabeli 6.1. Podatke smo za lažje delo pretvorili v sistem enotinih vrednosti. Nazivne podatke elementov omrežja smo podali v prejšnjem poglavju, ki natančneje opisuje vse gradnike nadomestnega modela, uporabljenega v analizi. Izračuni za pretvorbo nazivnih vrednosti parametrov v sistem enotinih vrednosti so za osnovno komponento podani v prilogi **A.8**. Vsi izračuni temeljijo na podlagi v četrtem poglavju prikazanih enačb in pretvorbi v sistem enotinih vrednosti (*pu*) po korakih prikazanih v [6].



Tabela 6.1: Parametri nadomestnega modela za analizo harmonskega popačenja napetosti

<b>Parametri prenosnega omrežja</b>								
$S_{B110}$ (MVA)	100	$S_{B20}$ (MVA)	100	$S_{B0,4}$ (MVA)	100			
<b>VN omrežje</b>		<b>Distribucijsko omrežje</b>		<b>Industrijsko omrežje</b>				
Bazna napetost $U_{B110}$ (kV)	110	Bazna napetost $U_{B20}$ (kV)	21	Bazna napetost $U_{B0,4}$ (kV)	0,4			
Bazni tok $I_{B110}$ (A)	524,8	Bazni tok $I_{B20}$ (kA)	2,749	Bazni tok $I_{B0,4}$ (kA)	144,34			
Bazna impedanca $Z_{B110}$ ( $\Omega$ )	121	Bazna impedanca $Z_{B20}$ ( $\Omega$ )	4,41	Bazna impedanca $Z_{B0,4}$ ( $\Omega$ )	0,0016			
Tuje omrežje								
		A	pu	zaporedje	X/R	$S_k''$ (MVA)	pu	
	$I_{k3f}$	4887	9,311	Pozitivno	10	931,1	9,311	
	$I_{k1f}$	2814	5,361	Nično	10	536,14	5,3614	
<b>Vrste bremen priključenih na stikalni blok =NE01</b>							$S_{in}$	
	$P_n$ (kW)	$U_n$ (kV)	PF	Izkoristek $\eta$	$S_n$ (kVA)	pu		
Ekvivalentno pasivno breme	1000	0,4	0,95	1	1052	0,00700 -j0,0061		
Ekvivalentno nelinearno breme	1282,5	0,4	0,9	0,95	1500	0,0135+ j0,0065		
<b>Impedance posameznih elementov obravnavanega modela</b>								
Tuje omrežje	zaporedje	$S_k''$ , pu		$ Z $ , pu	R, pu	X, pu		
	$Z^+$	9,31		0,107	0,0107	0,1069		
	$Z^0$	5,36		0,348	0,0343	0,3430		
110/20 kV Tr 1	zaporedje	$S_n$ (MVA)	R, %	X, %	R, pu	X, pu		
	$Z^+$	31,5	0,45	13,1	0,0143	0,4159		
	$Z^0$	$R_{upor}$ ( $\Omega$ ) 80			54,4361	0,4159		
KB 1	zaporedje				R, pu	X, pu		
	$Z^+$				0,1401	0,0833		
	$Z^0$				0,2361	1,3079		
20/0,4 kV Tr 2	zaporedje	$S_n$ (MVA)	R, %	X, %	R, pu	X, pu		
	$Z^+$	2,5	0,84	6,04	0,336	2,4160		
	$Z^0$				0,336	2,4160		
Nadomestno pasivno breme				$ Z $ , pu	R, pu	X, pu		
	$Z^+$	1,5		100	79,3241	60,8908		
	$Z^0$			1e20	1e20	1e20		
<b>Harmonski filter</b>								
<b>Veja</b>	<b>Vrsta</b>	$h_{rg}$	$Q_{vg}$	$Q_C$ (MVar)	$R_g$ (pu)	$X_{ng}$ (pu)	$X_{Lg}$ (pu)	$X_{Cg}$ (pu)
$Q_1$	selektiven	3,78	100	0,55	0,8818	88,1834	23,3289	333,33
$Q_1$	selektiven	4,7	100	0,55	0,7092	70,9220	15,0898	333,33

## 6.2 Izračun impedance elementov omrežja

Kakor smo omenili na začetku poglavja, vsi izračuni temeljijo na izbranih baznih vrednostih, od katerih po pravilu izberemo kot eno bazno vrednost moč  $S_b$  enotno za vse napetostne nivoje, kot drugo pa na vsakem napetostnem nivoju nazivno napetost nivoja. Ostale bazne veličine nekega napetostnega nivoja določimo iz izbranih  $S_b$  in  $U_b$  [6]. Enačbe in izračuni baznih tokov ter baznih impedanc so podani v prilogi **A.8**. V tabeli 6.2 so podane bazne vrednosti za posamezne napetostne nivoje.

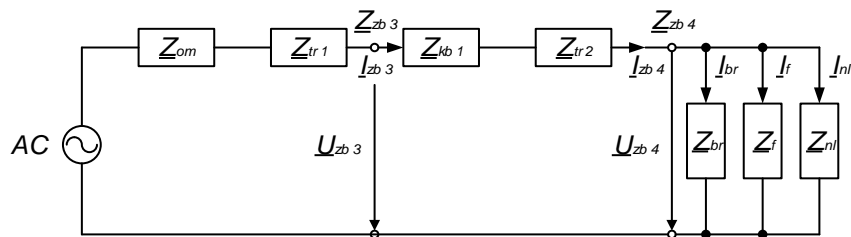
Tabela 6.2: Bazne vrednosti za posamezni napetostni nivo

napetostni nivo		110	20	0,4
$S_b$	MVA	100	100	100
$U_{bL-L}$	kV	110	21	0,4
$U_{bL-N}$	kV	63,509	12,124	0,2367
$I_{baz}$	A	524	2749,3	144337
$Z_b$	$\Omega$	121	4,41	0,0016

Kjer so:

- $S_b$  bazna vrednost navidezne moči,
- $U_{bL-L}$  efektivna vrednost bazne medfazne napetosti zbiralk,
- $U_{bL-L}$  efektivna vrednost bazne fazne napetosti zbiralk,
- $I_{baz}$  efektivna vrednost baznega toka,
- $Z_b$  absolutna vrednost bazne impedance.

Pri analizi harmonskega popačenja napetosti je treba določiti skupno priključno mesto, v katerem bomo opravili izračun vozliščne napetosti, tokov priključenih porabnikov in kratkostične impedance. Za naš izbran model smo to točko izbrali kot 0,4 kV zbiralke  $Z_{zb4}$ . Na sliki 6.1 je prikazano enopolno nadomestno vezje za izračun parametrov pri osnovni frekvenci.

Slika 6.1: Nadomestno vezje za izračun impedance v priključni točki  $Z_{zb4}$ 

Kjer so:

- $AC$  izmenični vir napajalne napetosti,
- $I_{br}$  kompleksni kazalec toka bremena osnovne harmonske komponente,
- $I_f$  kompleksni kazalec toka kompenzacijskega filtra osnovne harmonske komponente,
- $I_{nlb}$  kompleksni kazalec toka nelinearnega bremena osnovne harmonske komponente,
- $I_{zb3}$  kompleksni kazalec toka  $Z_{zb3}$  osnovne harmonske komponente,
- $I_{zb4}$  kompleksni kazalec toka  $Z_{zb4}$  osnovne harmonske komponente,
- $U_{zb3}$  kompleksni kazalec napetosti  $Z_{zb3}$  osnovne harmonske komponente,
- $U_{zb4}$  kompleksni kazalec napetosti  $Z_{zb4}$  osnovne harmonske komponente,
- $Z_{br}$  kompleksni kazalec impedance bremena osnovne harmonske komponente,
- $Z_f$  kompleksni kazalec impedance kompenzacijskega filtra osnovne harmonske komponente,
- $Z_{kb1}$  kompleksni kazalec impedance kablovoda osnovne harmonske komponente,
- $Z_{om}$  kompleksni kazalec impedance omrežja osnovne harmonske komponente,
- $Z_{nlb}$  kompleksni kazalec impedance nelinearnega bremena osnovne harmonske komponente,
- $Z_{tr1}$  kompleksni kazalec impedance osnovne harmonske komponente  $Tr 1$ ,
- $Z_{tr2}$  kompleksni kazalec impedance osnovne harmonske komponente  $Tr 2$ ,
- $Z_{zb3}$  kompleksni kazalec impedance osnovne harmonske komponente na zbiralkah  $Z_{zb3}$ ,
- $Z_{zb4}$  kompleksni kazalec impedance osnovne harmonske komponente na zbiralkah  $Z_{zb4}$ .

Impedanco in kratkostično moč v omrežju izračunamo tako, da pri izračunu upoštevamo vse impedance prenosnih vodov in transformatorjev od podane impedance omrežja na 110 kV napetostnem nivoju do mesta priklopa porabnikov v omrežje. Impedanco v točki opazovanja  $\underline{Z}_{zb4h}$  za harmonske komponente reda  $h$  predstavimo s (6.1).

$$\underline{Z}_{zb4h} = \underline{Z}_{omh} + \underline{Z}_{tr1h} + \underline{Z}_{kbh} + \underline{Z}_{tr2h} \quad (6.1)$$

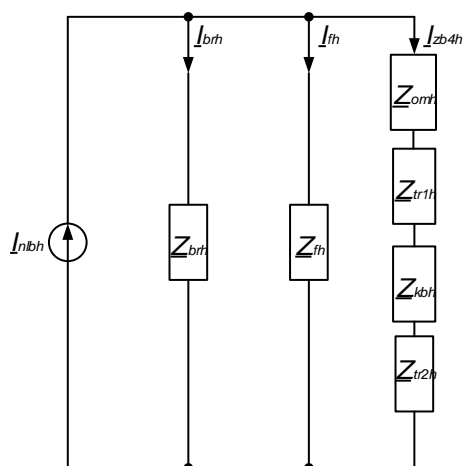
Kjer so:

- $\underline{Z}_{kbh}$  kompleksni kazalec impedance kablovoda harmonske komponente reda  $h$ ,
- $\underline{Z}_{omh}$  kompleksni kazalec impedance omrežja harmonske komponente reda  $h$ ,
- $\underline{Z}_{tr1h}$  kompleksni kazalec impedance  $Tr 1$  harmonske komponente reda  $h$ ,
- $\underline{Z}_{tr2h}$  kompleksni kazalec impedance  $Tr 2$  harmonske komponente reda  $h$ ,
- $\underline{Z}_{zb4h}$  kompleksni kazalec impedance  $Z_{zb4}$  harmonske komponente reda  $h$ .

Admitanco  $\underline{Y}_{zb4h}$  za harmonske komponente reda  $h$  določimo s (6.2).

$$\underline{Y}_{zb4h} = \frac{1}{\underline{Z}_{zb4h}} \quad (6.2)$$

Pri obravnavi vpliva tokov harmonskih komponent višjega reda, smo že v poglavju 2 omenili, da le ti tečejo skozi impedance sistema in na njih povzročajo padce napetosti harmonskih komponent višjega reda. Kot vir tokov harmonskih komponent višjega reda je v nadomestnem modelu uporabljeno nelinearno breme. Tako lahko s pomočjo slike 6.2 predstavimo nadomestno vezje za obravnavo impedančnih razmer harmonskih komponent višjega reda.

Slika 6.2: Nadomestno vezje za izračun nadomestne impedance  $Z_{eqh}$ 

Kjer so:

- $I_{brh}$  kompleksni kazalec toka bremena harmonske komponente reda  $h$ ,
- $I_{fh}$  kompleksni kazalec toka kompenzacijskega filtra harmonske komponente reda  $h$ ,
- $I_{nlbh}$  kompleksni kazalec toka nelinearnega bremena harmonske komponente reda  $h$ ,
- $I_{zb4h}$  kompleksni kazalec toka harmonske komponente reda  $h$  preko  $Z_{zb4h} = Z_{omh} + Z_{tr1h} + Z_{kbh} + Z_{tr2h}$ , oziroma na zbiralkah  $Z_{zb4}$ .
- $Z_{brh}$  kompleksni kazalec impedance bremena harmonske komponente reda  $h$ ,
- $Z_{fh}$  kompleksni kazalec impedance kompenzacijskega filtra harmonske komponente reda  $h$ ,
- $Z_{kbh}$  kompleksni kazalec impedance kablovoda harmonske komponente reda  $h$ ,
- $Z_{tr1h}$  kompleksni kazalec impedance  $Tr 1$  harmonske komponente reda  $h$ ,
- $Z_{tr2h}$  kompleksni kazalec impedance  $Tr 2$  harmonske komponente reda  $h$ .
- $Z_{omh}$  kompleksni kazalec impedance impedance omrežja harmonske komponente reda  $h$ .

Nadomestno impedanco  $Z_{eqh}$  takšnega modela za harmonske komponente reda  $h$  predstavimo s (6.3).

$$\underline{Z}_{eqh} = \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}_{brh}} + \frac{1}{\underline{Z}_{fh}} + \frac{1}{\underline{Z}_{zb4h}}} \quad (6.3)$$

Kjer je:

$\underline{Z}_{eqh}$  kompleksni kazalec impedance nadomestnega vezja harmonske komponente reda  $h$ .

Ob izračunani impedanci  $\underline{Z}_{eqh}$  za harmonske komponente reda  $h$  in ob tem za vsako harmonsko komponente reda  $h$  poznanem vsiljenem toku, lahko izračunamo vozliščno napetost  $\underline{U}_{zb4h}$  za harmonske komponente reda  $h$  s (6.4) [5].

$$\underline{U}_{zb4h} = \underline{Z}_{eqh} \underline{I}_{nlbh} \quad (6.4)$$

Kjer je:

$\underline{U}_{zb4h}$  kompleksni kazalec vozliščne napetosti harmonske komponente reda  $h$  (napetost čez impedanco  $\underline{Z}_{zb4h}$  na zbiralkah  $Z_{zb4}$ ).

Ob poznani vozliščni napetosti  $\underline{U}_{zb4h}$  za harmonske komponente reda  $h$  in poznanih admitancah elementov ( $\underline{Y}=1/\underline{Z}$ ) vezja za harmonske komponente reda  $h$ , izračunamo še zančne toke  $\underline{I}_{zb4h}$ ,  $\underline{I}_{fh}$  in  $\underline{I}_{brh}$  s pomočjo (6.5) [5].

$$\begin{aligned} \underline{I}_{zb4h} &= \underline{Y}_{zb4h} \underline{U}_{zb4h} \\ \underline{I}_{fh} &= \underline{Y}_{fh} \underline{U}_{zb4h} \\ \underline{I}_{brh} &= \underline{Y}_{brh} \underline{U}_{zb4h} \end{aligned} \quad (6.5)$$

Ko imamo poznane vse zančne toke in impedance elementov za harmonske komponente reda  $h$ , lahko s pomočjo enačb (2.11) do (2.44) izračunamo še faktor celostnega harmonskega popačenja napetosti  $THD_U$  ter faktor celostnega harmonskega popačenja toka  $THD_I$ .

### 6.3 Rezultati opravljene analize harmonskega popačenja napetosti omrežja

Izračun potrebnih podatkov za izris amplitudnih karakteristik na slikah od 6.3 do 6.9 in rezultatov podanih v tabelah od 6.3 do 6.6, je izveden s pomočjo programske kode

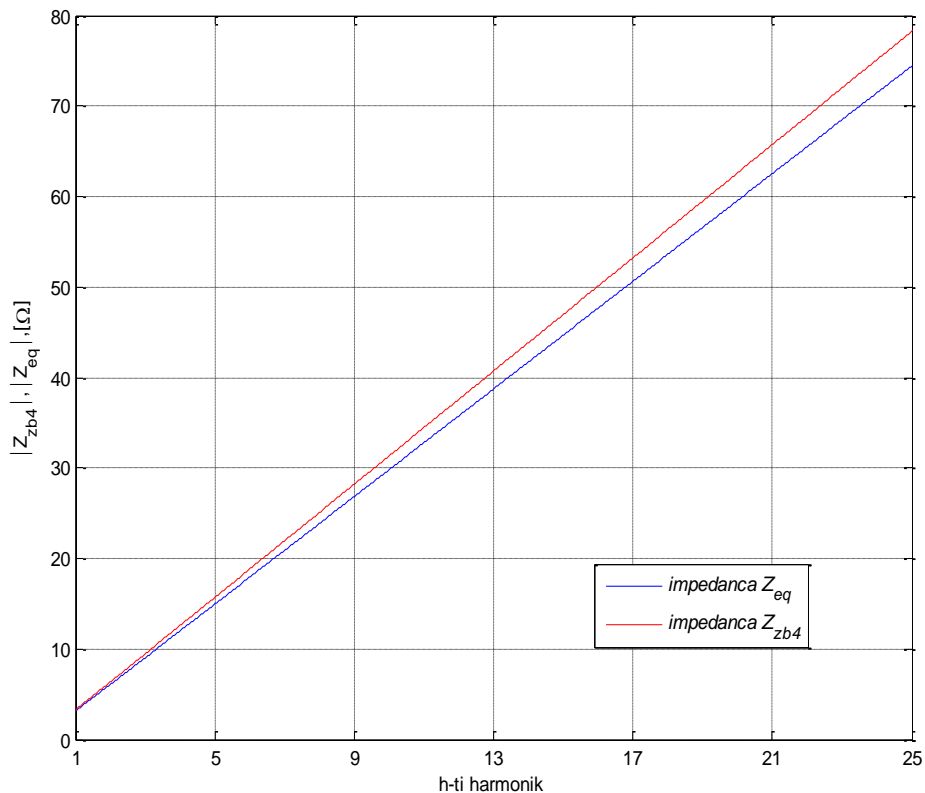
napisane v programu Matlab. Ta je podana kot priloga **B.7** za rezultate podane v tabelah in kot priloga **B.8** za podane izrise amplitudnih karakteristik. V nadaljevanju so predstavljeni rezultati opravljenih simulacij ob različnih obratovalnih stanjih.

### 6.3.1 Nadomestni model omrežja brez kompenzacijskega filtra

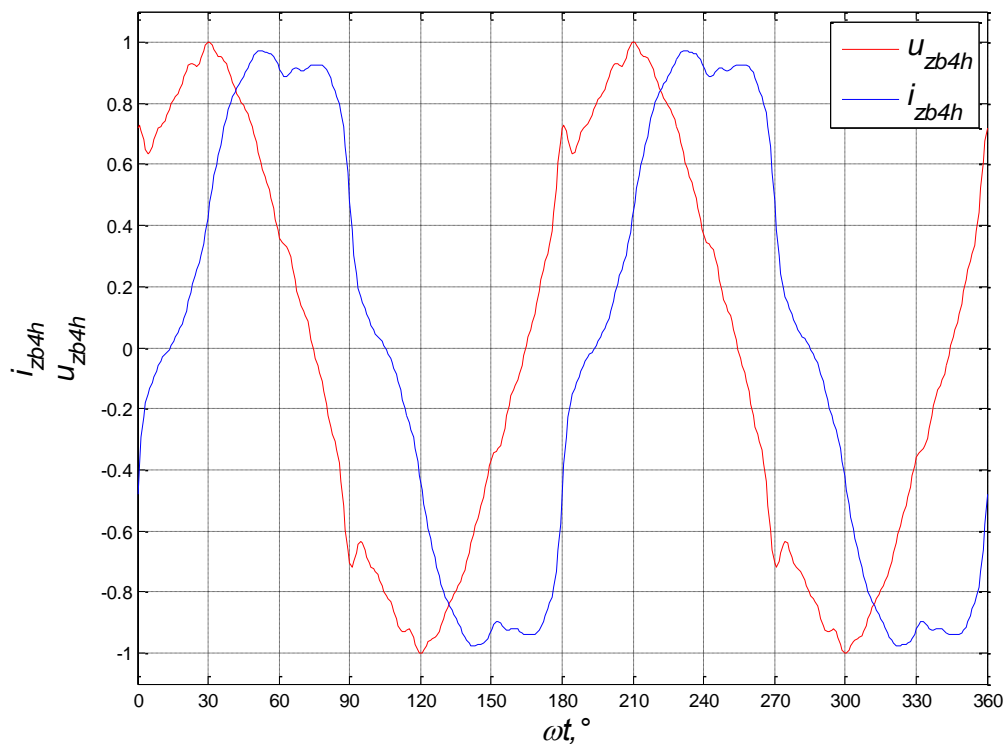
Za izhodišče analize harmonskega popačenja smo izbrali nadomestni model omrežja brez kompenzacijskega filtra  $Z_f$ , na podlagi katerega smo ugotovili potrebo po kompenzaciji jalove moči osnovne harmonske komponente. Na sliki 6.3 je prikazana amplitudna karakteristika v točki priklopa  $Z_{zb4}$  zaradi zaporedno priključenih impedanc  $Z_{om}$ ,  $Z_{kb}$ ,  $Z_{tr1}$  in  $Z_{tr2}$  in nadomestna impedanca  $Z_{eq}$  zaradi tokovnega vira tokov harmonskih komponent višjega reda. Impedančna karakteristika je s strani omrežja, kakor tudi s strani nelinearnega bremena, ki za impedance harmonskih komponent reda  $h$  predstavlja tokovni vir, popolnoma induktivne narave, brez resonančnih točk za vse harmonske komponente višjega reda.

Podani rezultati, ki so v tabeli 6.3, predstavljajo vozliščno napetost in zančne toke v vezju nadomestnega modela. To velja ob predpostavki, da je napajanje izvedeno z idealnim napetostnim virom, ki ima čisto sinusno obliko. V realnosti bi bilo potrebno k skupnemu napetostnemu popačenju po grobi oceni dodati še nekje okoli 2 do 3 odstotke zaradi popačenja napajalne napetosti s strani ostalih porabnikov v omrežju. Ob upoštevanju le tega, bi bilo skupno popačenje napajalne napetosti nad predpisano zgornjo dopustno mejo  $THD_U$ . Takšno popačenje napajalne napetosti pa ni več dopustno za večino naprav, priključenih v industrijsko omrežje.

Na sliki 6.4 sta prikazana napetost in tok v skupni točki na zbiralkah  $Z_{zb4}$ . Tok na porabnike zaostaja za napetostjo na zbiralkah. Na podlagi kota med napetostjo in tokom lahko določimo potrebno moč kompenzacijskega filtra za kompenziranje osnovne harmonske komponente jalove moči. Na obliko napetosti v točki opazovanja vplivajo le porabniki, ki so na zbiralko priključeni, saj smo že prej omenili, da popačenja zaradi ostalih porabnikov, priključenih na distribucijsko omrežje nismo upoštevali. Kot lahko opazimo iz grafa na sliki 6.4, je popačenje toka in napetosti popolnoma simetrično v pozitivni in negativni polperiodi.



Slika 6.3: Amplitudna karakteristika  $Z_{eq}$  in  $Z_{zb4}$ , brez kompenzacijskega filtra



Slika 6.4: Oblika napetosti in toka na zbiralkah  $Z_{zb4}$  brez kompenzacijskega filtra



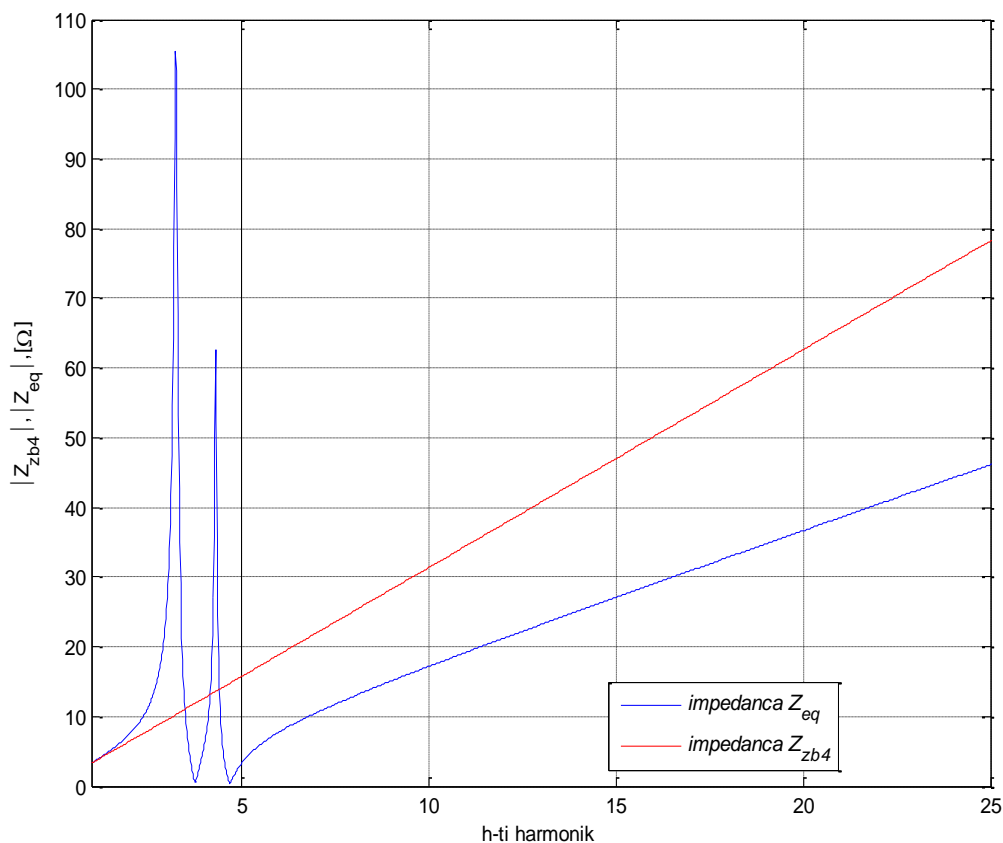
Tabela 6.3: Rezultati harmonske analize brez kompenzacijskega filtra

	$I_{nlbh}$	$I_{zb4}$	$I_{ft}$	$I_{brh}$		$U_{zb4h}$
$THD_I$	23,8541	12,7968	0	2,6874	$THD_U$	6,5588
$THD_b$ ( $h=3n\pm 1$ )	23,0442	12,3558	0	2,6004	$THD_U$ ( $h=3n\pm 1$ )	6,3168
$I$	2225,8	3785,29	0	1505,63	$U$	384,4
$I_1$	2165,1	3754,67	0	1505,08	$U_1$	383,6
$I_1/I_{baz04}$	0,0150	0,0260	0	0,0104	$U_1/U_{baz04}$	0,959
$h$	$I_h/I_1$				$h$	$U_h/U_1$
2	1,167	0,6510	0	0,0866	2	0,1071
3	5,149	2,8132	0	0,5149	3	0,747
4	0,3929	0,2129	0	0,0409	4	0,0699
5	20,27	10,8949	0	2,2484	5	4,468
6	0,3209	0,1706	0	0,0396	6	0,0905
7	9,269	4,9363	0	1,0934	7	2,8333
8	0,176	0,0935	0	0,0211	8	0,0613
9	3,093	1,6293	0	0,4019	9	1,2962
10	0,1312	0,0695	0	0,016	10	0,0569
11	4,599	2,4318	0	0,566	11	2,193
12	0,086	0,0451	0	0,0114	12	0,0479
13	1,68	0,8869	0	0,2085	13	0,9453
14	0,1077	0,0568	0	0,0134	14	0,0652
15	1,338	0,7010	0	0,1788	15	0,9294
16	0,0559	0,0295	0	0,007	16	0,0387
17	1,97	1,0383	0	0,2468	17	1,447
18	0,06	0,0314	0	0,0081	18	0,05
19	1,637	0,8624	0	0,2056	19	1,3432
23	1,065	0,5607	0	0,1342	23	1,0572
25	1	0,5264	0	0,1262	25	1,0787
$d$		0,646				

Iz tabele rezultatov analize harmonskega popačenja napetosti omrežja, brez uporabe naprav za kompenziranje jalove energije in uporabe razglašanih kompenzacijskih filtrov, lahko opazimo, da je skupno harmonsko popačenje napetosti  $THD_v$  nad vrednostjo, ki je predpisana za razred 1 v industrijskem okolju. Prav tako je skupna tokovna obremenitev transformatorja  $Tr\ 2$ , ob upoštevanju redukcijskega faktorja  $d$  (3.1) in nanj priključenih bremen, nad njegovo priporočeno obremenitvijo, ki je pri takšni vrsti bremen le 65 odstotkov nazivne vrednosti. Težavo je možno rešiti na več načinov, in sicer z uporabo transformatorja, izdelanega za napajanje nelinearnih bremen, z uporabo dodatnega transformatorja, katerega vpliv bomo v nadaljevanju tudi prikazali ter z uporabo kompenzacijske naprave za znižanje tokovne obremenitve transformatorja. Ob pregledu harmonskih komponent višjega reda v toku lahko opazimo, da je najbolj prisotna peta harmonska komponenta, sledi ji še sedma, vse druge harmonske komponente toka pa so v omrežju precej manj prisotne

### 6.3.2 Nadomestni model omrežja z uporabo kompenzacijskega filtra $h_r\ 3,78/4,7$ [14]

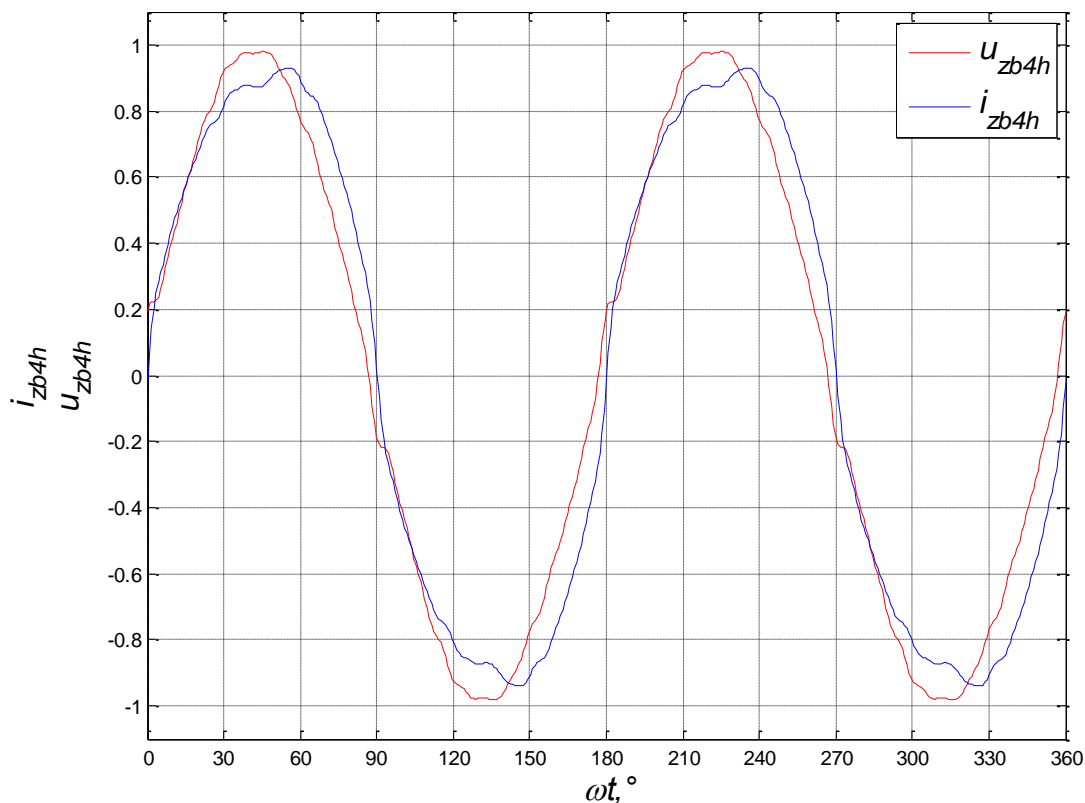
V simulaciji smo uporabili kompenzacijski filter, ki je podrobneje predstavljen v prejšnjem poglavju 5.6. Na sliki 6.5 sta prikazani impedančni karakteristiki s strani nelinearnega bremena  $Z_{eq}$ , kot tokovnega vira za harmonske komponente reda  $h$  in s strani omrežja  $Z_{zb4}$  kot napetostnega vira za osnovno komponento.

Slika 6.5: Impedančna karakteristika  $Z_{eq}$  in  $Z_{zb4}$ , s kompenzacijskim filtrom  $h_r$  3,78/4,7

Kakor lahko opazimo na sliki 6.5, dosežemo paralelno resonanco zaradi vpliva prvega filtra pri relativni resonančni frekvenci  $h_r = 3,52$ . V tej točki lahko majhen tok harmonske komponente nelinearnega bremena povzroči velik padec napetosti harmonske komponente višjega reda. Nevarnost predstavljajo predvsem točke, ki dosežejo paralelno frekvenco v bližini značilnih harmonikov, ki so v opazovanem omrežju prisotni. Prvi filter ima resonančno točko pri  $h_r = 3,78$ , kar na sliki opazimo v točki, kjer se impedanca s strani nelinearnega bremena približa vrednosti nič in ostane le ohmska komponenta impedance. Pri tem je treba poudariti, da mora biti izbrana frekvenca resonančne točke dovolj oddaljena od tipičnih frekvenc harmonskih komponent višjega reda, kajti v primeru iste frekvence, kot je frekvenca toka, ki ga proizvaja nelinearno breme, bi filter predstavljal kratek stik za to harmonsko komponento bremena. Pri relativni resonančni frekvenci  $h_r = 4,2$  je impedanca s strani omrežja in nelinearnega bremena enaka in omrežje MTK signala ne ojača in tudi ne slabi. Pri relativni resonančni frekvenci  $h_r = 4,44$  je naslednja točka paralelne resonance, ki prav tako ne predstavlja večjih težav, saj je ravno dovolj odmaknjena od pete harmonske komponente kakor tudi od frekvence MTK signala. Drugi filter ima svojo resonančno točko določeno pri relativni resonančni frekvenci  $h_r = 4,7$ , kjer

je impedanca zopet omejena le na ohmski del. Po tej frekvenci je vpliv sestavljenega filtra na omrežje razmeroma majhen.

Z uporabo izbranega filtra lahko na sliki 6.6 opazimo, da se je kot med napetostjo in tokom zaradi kompenzacije osnovne harmonske komponente jalove moči spremenil ter je  $PF_{disp}$  (2.26) v tem trenutku skoraj 1. Oblika napetosti se nekoliko izboljša, medtem ko se oblika toka  $I_{zb4}$  ob uporabi kompenzacijskega filtra bistveno popravi.



Slika 6.6: Oblika napetosti in toka na zbiralkah  $Z_{zb4}$  s kompenzacijskim filtrom  $h_r$  3,78/4,7

Ob uporabi izbranega filtra lahko iz tabele 6.4 razberemo, da se tokovna obremenitev Tr 2 zmanjša za 11 odstotkov in je pod njegovo nazivno vrednostjo, vendar je dovoljena obremenitev transformatorja zaradi nelinearnih tokov še vedno prekoračena za 20 odstotkov. Skupno harmonsko popačenje napetosti  $THD_u$  je sedaj manjše za 46 odstotkov in je pod predpisano mejo 5 odstotkov, napetost na zbiralkah  $Z_{zb4}$  je sedaj blizu nazivne napetosti 400 V, medtem ko lahko opazimo, da se z uporabo takšnega kompenzacijskega filtra močno zmanjša prisotnost 5. in 7. harmonske komponente napetosti, poveča pa se prisotnost 3. harmonske komponente. Ob prisotnosti tokov harmonskih komponent višjega reda lahko transformator obremenimo le do meje 86 odstotkov nazivne vrednosti moči.

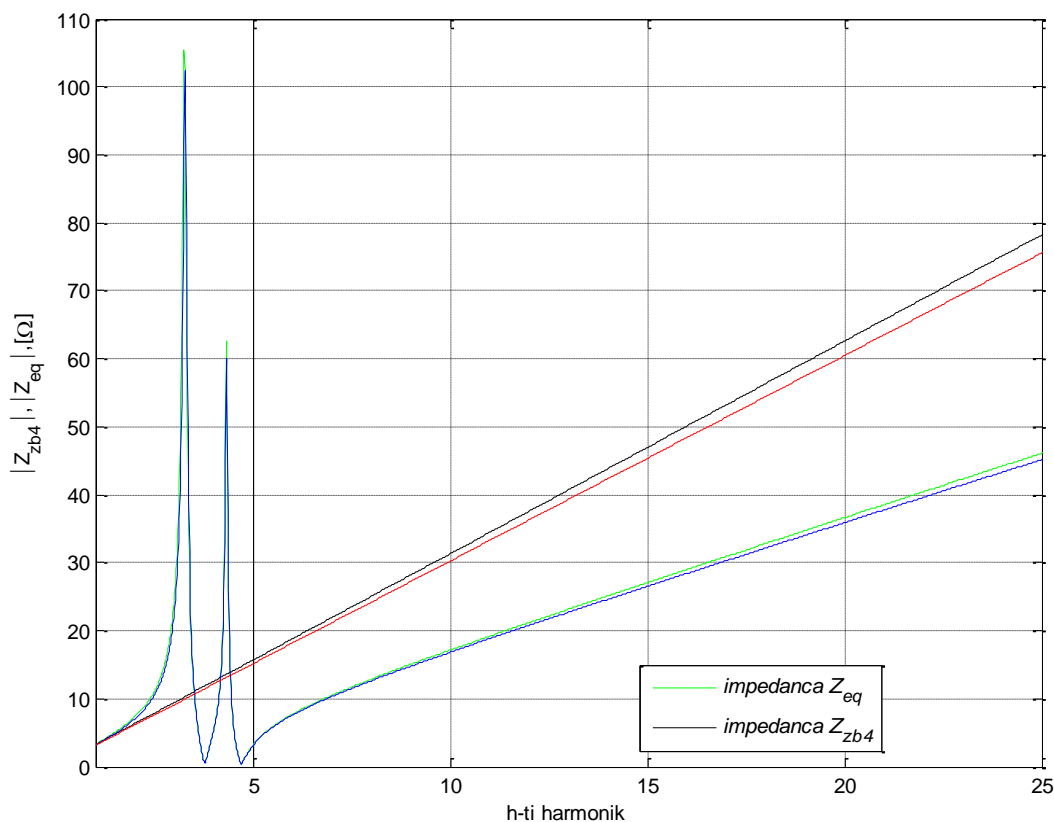
Tabela 6.4: Rezultati analize harmonskega popačenja napetosti za kompenzacijski filter  $h_r$  3,78/4,7

	$I_{nlbh}$	$I_{zb4}$	$I_{fn}$	$I_{brh}$		$U_{zb4h}$
$THD_I$	23,8541	10,3025	25,118	1,8222	$THD_U$	3,5343
$THD_b$ ( $h=3n\pm 1$ )	23,0442	4,5475	21,355	0,9115	$THD_U$ ( $h=3n\pm 1$ )	2,6914
$I$	2225,8	3381,44	1723,5	1455,26	$U$	397,0
$I_1$	2165,1	3363,64	1671,6	1455,02	$U_1$	396,8
$I_1/I_{baz04}$	0,0150	0,0233	0,0115	0,0101	$U_1/U_{baz04}$	0,992
$h$	$I_h/I_1$				$h$	$U_h/U_1$
2	1,167	0,8720	0,3055	0,1075	2	0,1242
3	5,149	9,1752	13,086	1,5563	3	2,1099
4	0,3929	0,1089	0,2762	0,0194	4	0,031
5	20,27	2,7339	20,351	0,5228	5	0,971
6	0,3209	0,0815	0,2378	0,0175	6	0,0375
7	9,269	2,8597	5,7776	0,587	7	1,4215
8	0,176	0,0580	0,1012	0,0121	8	0,033
9	3,093	1,0212	1,7575	0,2334	9	0,7036
10	0,1312	0,0460	0,0692	0,0098	10	0,0326
11	4,599	1,6365	2,3662	0,3529	11	1,2782
12	0,086	0,0299	0,0453	0,007	12	0,0275
13	1,68	0,6096	0,8364	0,1328	13	0,5627
14	0,1077	0,0393	0,0530	0,0086	14	0,0391
15	1,338	0,4751	0,6810	0,1123	15	0,5455
16	0,0559	0,0206	0,0271	0,0045	16	0,0234
17	1,97	0,7282	0,9486	0,1604	17	0,8789
18	0,06	0,0215	0,0300	0,0051	18	0,0297
19	1,637	0,6080	0,7811	0,1343	19	0,8202
23	1,065	0,3980	0,5023	0,0883	23	0,6499
25	1	0,3744	0,4699	0,0832	25	0,6645
$d$		0,86				

### 6.3.3 Sprememba kratkostične moči omrežja

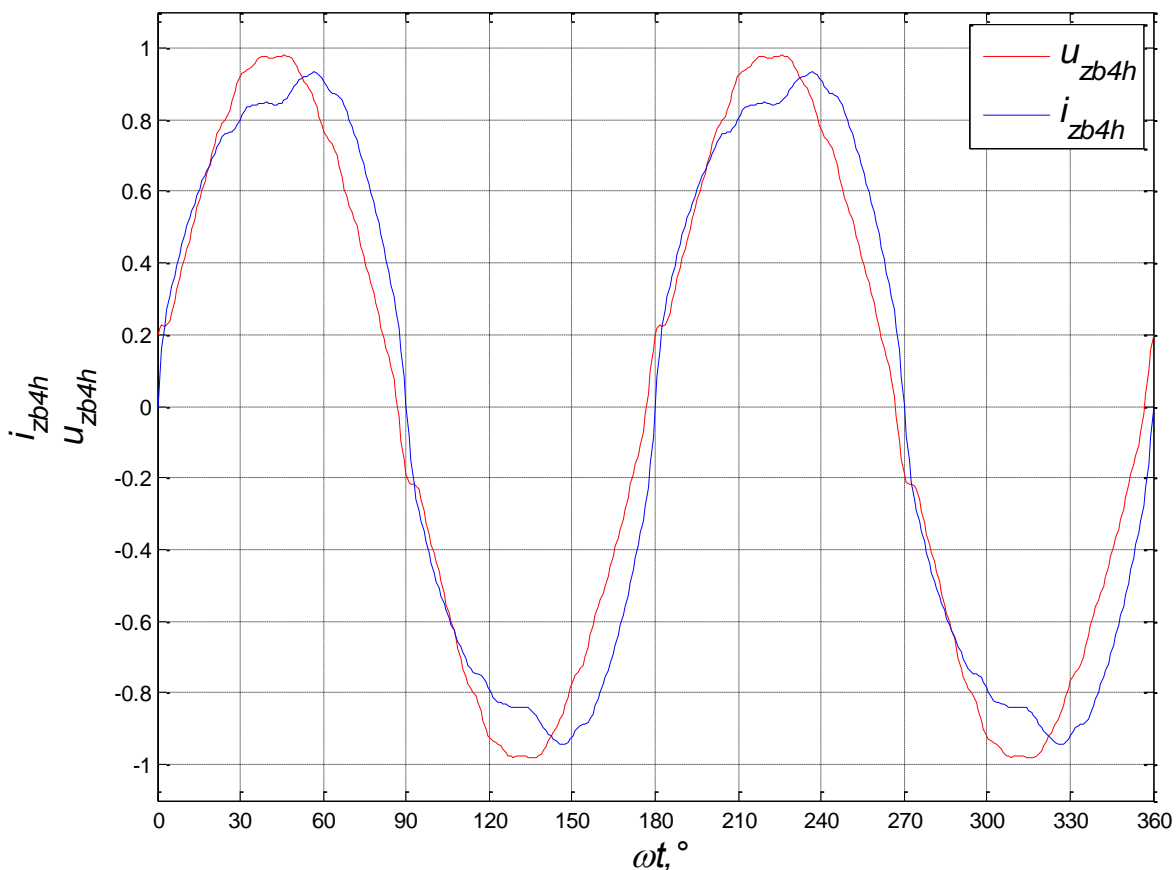
Elektroenergetsko omrežje po svoji strukturi ni povsem toga, saj se njegovi proizvodni viri, kakor tudi porabniki večji del časa spreminjajo in s tem se spreminja tudi kratkostična moč omrežja v izbrani točki. Delovanje izbranega filtra moramo tako preveriti pri različnih kratkostičnih močeh v omrežju. Kot največjo vrednost kratkostične moči smo vzeli vrednost iz tabele 5.1. Za prikaz vpliva znižane kratkostične moči v izbrani točki pa bomo sedaj vzeli kot primer polovično kratkostično moč.

Na sliki 6.7 je prikazana kratkostična impedanca omrežja, za katero lahko ugotovimo, da naklon krivulje z znižanjem kratkostične moči narašča. Ker se resonančna točka, paralelne resonance premika bolj proti osnovni harmonski komponenti, je manjše tudi ojačanje 3. harmonske komponente med tem, ko je manjše tudi dušenje 5. in 7. harmonske komponente. Rdeča in modra krivulja predstavljata impedančno karakteristiko pri polni kratkostični moči, medtem ko zelena in črna krivulja prikazujeta impedanco ob polovični kratkostični moči.



Slika 6.7: Impedančna karakteristika  $Z_{eq}$  in  $Z_{zb4}$  ob manjši kratkostični moči  $Sk''$

Z zmanjšanjem kratkostične moči lahko na sliki 6.6 razberemo, da se zanemarljivo spremeni oblika napetosti, za opazen vpliv spremembe je treba zmanjšati kratkostično moč omrežja za 90 odstotkov.



Slika 6.8: Oblika napetosti in toka na zbiralkah  $Z_{zb4}$  ob manjši kratkostični moči  $Sk''$

Z uporabo izbranega filtra, lahko iz tabele 6.5 razberemo, da se z znižanjem kratkostične moči omrežja poveča skupno harmonsko popačenje napetosti in toka čez transformator.

Tabela 6.5: Rezultati harmonske analize za kompenzacijski filter  $h_r$  3,78/4,7 ob polovični moči  $S_k''$ 

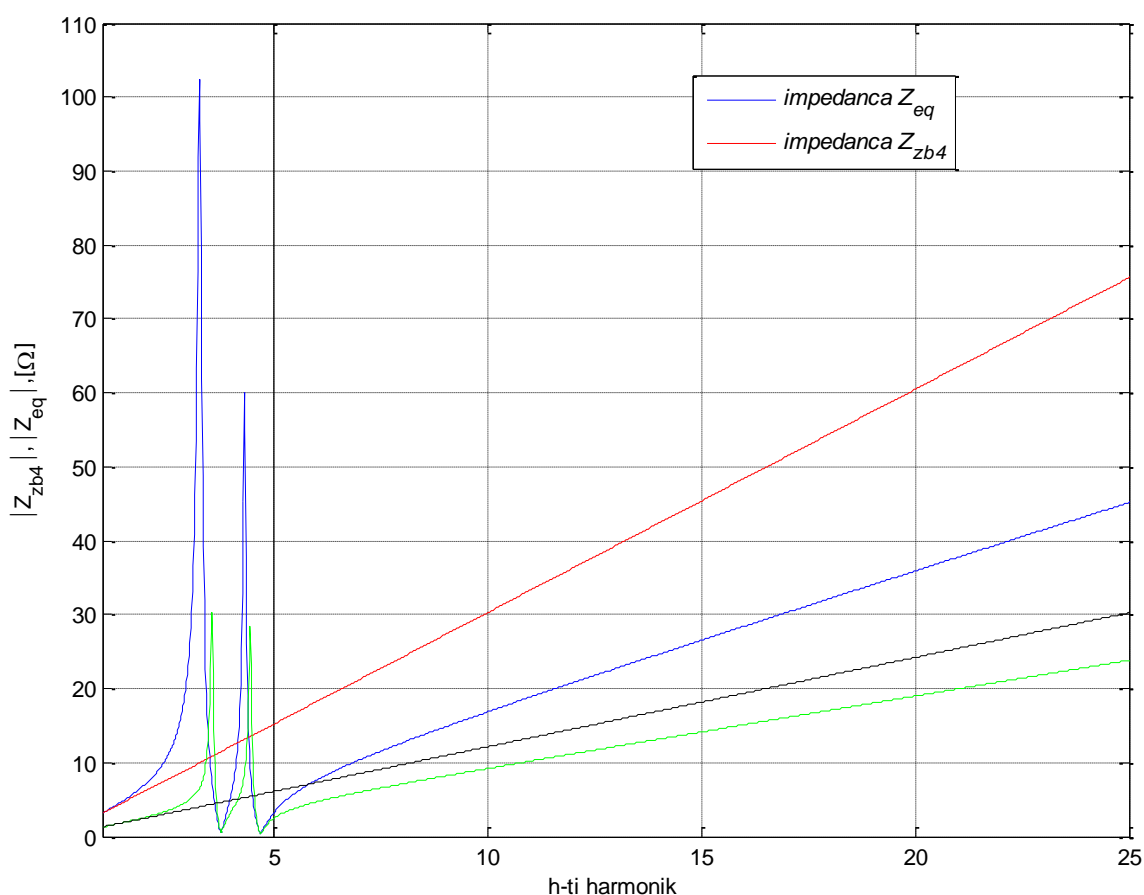
	$I_{nlbh}$	$I_{zb4}$	$I_{fh}$	$I_{brh}$		$U_{zb4h}$
$THD_I$	23,8541	12,0014	27,805	2,2918	$THD_U$	4,0403
$THD_{I_s}$ ( $h=3n\pm 1$ )	23,0442	4,4571	21,528	0,9248	$THD_{U_s}$ ( $h=3n\pm 1$ )	2,7380
$I$	2225,8	3387,78	1735,03	1455,40	$U$	397,1
$I_1$	2165,1	3363,64	1671,61	1455,02	$U_1$	396,8
$I_1/I_{baz04}$	0,0150	0,0233	0,01158	0,0101	$U_1/U_{baz04}$	0,992
$h$	$I_h/I_1$				$h$	$U_h/U_1$
2	1,167	0,8770	0,3181	0,112	2	0,1294
3	5,149	11,0911	17,4833	2,0791	3	2,8187
4	0,3929	0,1068	0,2803	0,0197	4	0,0314
5	20,27	2,6596	20,4983	0,5266	5	0,978
6	0,3209	0,0766	0,2471	0,0182	6	0,0389
7	9,269	2,8080	5,8737	0,5967	7	1,4452
8	0,176	0,0571	0,1030	0,0124	8	0,0336
9	3,093	0,9714	1,8478	0,2454	9	0,7397
10	0,1312	0,0452	0,0705	0,01	10	0,0333
11	4,599	1,6110	2,4117	0,3597	11	1,3028
12	0,086	0,0285	0,0477	0,0074	12	0,029
13	1,68	0,6003	0,8528	0,1354	13	0,5737
14	0,1077	0,0387	0,0541	0,0088	14	0,0399
15	1,338	0,4536	0,7188	0,1185	15	0,5757
16	0,0559	0,0203	0,0276	0,0046	16	0,0239
17	1,97	0,7174	0,9676	0,1636	17	0,8965
18	0,06	0,0206	0,0317	0,0054	18	0,0313
19	1,637	0,5991	0,7968	0,137	19	0,8367
23	1,065	0,3922	0,5125	0,0901	23	0,663
25	1	0,3690	0,4794	0,0848	25	0,678
$d$		0,846				



### 6.3.4 Sprememba moči transformacije

Za stabilno delovanje omrežja je treba upoštevati, da se transformatorji pri delovanju preko nazivne moči prekomerno segrevajo in posledično tudi hitreje pride do okvar zaradi staranja materialov. Zato je treba preveriti delovanje še ob vklopu dodatnega energetskega transformatorja v obratovanje, saj s tem zmanjšamo tokovno obremenitev posameznega transformatorja v območje, kjer je njegov izkoristek najboljši.

Na sliki 6.9 sta prikazani frekvenčni karakteristiki omrežja s strani nelinearnega bremena pred vklopom dodatnega transformatorja, kar prikazujeta rdeča in modra krivulja. Zelena in črna krivulja prikazujeta impedanco ob vklopu dodatnega transformatorja.



Slika 6.9: Impedančna karakteristika  $Z_{eq}$  in  $Z_{zb4}$  ob paralelnem delovanju transformatorjev

Ob vklopu dodatnega transformatorja v obratovanje se je znižala impedanca s strani omrežja, kakor tudi s strani nelinearnega bremena. Posledično se je s tem zmanjšalo skupno napetostno popačenje, resonančna točka se je pomaknila bližje k osnovni harmonski komponenti in zmanjšala se je vrednost omrežne impedance v resonančni točki.

Iz tabele 6.6 je razvidno, da se je skupno napetostno popačenje znižalo za 30 odstotkov, predvsem pa se je zmanjšala prisotnost 3. harmonske komponente in njenih večkratnikov.

Tabela 6.6: Rezultati analize harmonskega popačenja za kompenzacijski filter  $h_r$  3,78/4,7 ob paralelnem delovanju transformatorjev

	$I_{nlbh}$	$I_{zb4}$	$I_{fh}$	$I_{brh}$		$U_{zb4h}$
$THD_I$	23,8541	8,3380	19,17709	0,9593	$THD_U$	2,2861
$THD_{I, (h=3n\pm 1)}$	23,0442	6,0155	18,45587	0,7226	$THD_{U, (h=3n\pm 1)}$	2,0285
$I$	2225,8	1682,57	1707,22	1450,70	$U$	398,1
$I_1$	2165,1	1676,75	1676,66	1450,63	$U_1$	398
$I_1/I_{baz04}$	0,0150	0,0116	0,011616	0,0101	$U_1/U_{baz04}$	0,995
$h$	$I_h/I_1$				$h$	$U_h/U_1$
2	1,167	0,8220	0,1720	0,0609	2	0,0699
3	5,149	5,6066	5,0030	0,5985	3	0,8066
4	0,3929	0,1415	0,2142	0,0151	4	0,024
5	20,27	4,0087	17,8072	0,4602	5	0,8496
6	0,3209	0,1054	0,1923	0,0143	6	0,0303
7	9,269	3,6221	4,3666	0,4463	7	1,0744
8	0,176	0,0723	0,0752	0,0091	8	0,0245
9	3,093	1,2500	1,3456	0,1798	9	0,5387
10	0,1312	0,0564	0,0507	0,0072	10	0,0239
11	4,599	1,9987	1,7243	0,2588	11	0,9314
12	0,086	0,0362	0,0342	0,0053	12	0,0208
13	1,68	0,7406	0,6063	0,0969	13	0,4079
14	0,1077	0,0477	0,0384	0,0063	14	0,0283
15	1,338	0,5715	0,5124	0,085	15	0,4104
16	0,0559	0,0249	0,0195	0,0033	16	0,0169
17	1,97	0,8802	0,6842	0,1164	17	0,6338
18	0,06	0,0258	0,0225	0,0039	18	0,0223
19	1,637	0,7340	0,5626	0,0973	19	0,5907
23	1,065	0,4796	0,3612	0,0639	23	0,4673
25	1	0,4509	0,3377	0,0601	25	0,4776
$d$		0,954				

## 7 SKLEP

V začetnem poglavju je bil namen nekoliko poglobljeno predstaviti matematične osnove za predstavitve ponavljajočih se popačenih sinusnih signalov, ki jih srečujemo pri analizi energetskih omrežij zaradi vse večjega obsega nelinearnih bremen.

V nadaljevanju so bili predstavljeni osnovni principi izračuna zaporedne in paralelne resonančne vezave. Za vrednotenje kakovosti električne napetosti zaradi harmonske popačenosti so bile predstavljene mejne vrednosti na podlagi predpisanega standarda SIST EN 61000-2-4, ki predpisuje osnovne značilnosti napajalne napetosti v industrijskih okoljih.

Za potrebe izvedbe analize harmonskega popačenja napetosti je potrebno poznavanje modeliranja različnih gradnikov energetskega omrežja, ki so bili v teoriji predstavljeni za izvajanje izračunov v širšem frekvenčnem področju. Pri tem je treba poudariti, da predstavljajo energetski transformatorji z možnostjo različnih vezalnih skupin in prestavnih razmerij zelo obširno področje, ki pa je bilo predstavljeno le z izračunom impedance, med tem, ko napetostnih razmer nismo posebej obravnavali.

V nadaljevanju je predstavljen tipični primer zaključenega industrijskega omrežja. Podani so njegovi osnovni parametri, ki so potrebni za izračun impedanc posameznih elementov energetskega omrežja.

V zadnjem poglavju smo zaradi različnih napetostnih nivojev uporabili metodo enotinih vrednosti. Z izbiro različnih kombinacij razglašanih kompenzacijskih filtrov smo prišli do optimalne rešitve za obravnavani model omrežja, ki smo jo za različna stanja omrežja tudi predstavili.

Ugotovili smo, da je v omrežjih, kjer je prisoten večji delež nelinearnih bremen in je faktor celostnega harmonskega popačenja toka  $THD_I$  okoli 20 do 25 odstotkov, smiselna uporaba razglašanih kompenzacijskih filtrov.

Z uporabo predstavljenega filtra se je celotno napetostno popačenje v priključni točki zmanjšalo za 60 odstotkov. Izbran resonančni filter ima ob predpostavljene kratkostične moči omrežja resonančni točki pri 176 Hz in 222 Hz. Obe točki sta dovolj odmaknjeni od značilnih tokov harmonskih komponent višjega reda porabnikov.

S spremembo kratkostične moči omrežja se linearno spreminja tudi impedanca omrežja. Impedančna karakteristika nelinearnega bremena se z nižanjem kratkostične moči premika bolj proti osnovni harmonski komponenti. Zmanjša se ojačanje harmonskih komponent višjega reda na levi strani resonančne točke in dušenje na desni strani resonančne točke.

Z nižanjem impedance transformatorja, oziroma ob paralelnem obratovanju dveh transformatorjev, se močno zniža tudi vrednost napetostnega popačenja.

Izbrana kombinacija kompenzacijskih filtrov razmeroma dobro kompenzira vpliv harmonskih komponent 5. in 7. reda v omrežju, vendar pa, kar močno ojača 3. harmonsko komponento toka in napetosti v omrežju.

## 8 LITERATURA

- [1] SIST EN 61000-2-4:2003; *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2: Environment – Section 4: Compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances*
- [2] G. Štumberger, D. Dolinar, *Definicije moči in ortogonalne razstavitve tokov*, interno gradivo, FERl, Maribor, 2006
- [3] J. Arillaga, N.R. Watson, *Power System Harmonics, Second edition*, John Wiley & Sons, 2003
- [4] Bronštejn, Semendjajev, Musiol, Mühlig, *Matematični priročnik*, tehniška založba Slovenije, 1997
- [5] J. Wakileh, *Power Systems Harmonics: Fundamentals, Analysis and Filter design*, Springer, 2001
- [6] J. Voršič, T. Zorič, M. Horvat, *Izračun obratovalnih stanj v elektroenergetskih omrežjih*, FERl, Maribor, 2008
- [7] I. Tičar, T. Zorič, *Osnove elektrotehnike, III zvezek, izmenični tokokrogi in prehodni pojavi*, Založniška dejavnost FERl, Maribor, 2001
- [8] F. Žlahtič, D. Matvoz, M. Zorman, *Motnje in motenja v elektroenergetskih omrežjih*, Elektrotehniška zveza Slovenije, 2003
- [9] G. Štumberger, K. Deželak, *Prehodni pojavi v EES, študijsko gradivo*, FERl, Maribor, 2007
- [10] Francisco C. De La Rosa, *Harmonics and power systems*, CRC Press, 2006
- [11] Internetni vir: [http://sl.wikipedia.org/wiki/Ko%C5%BEni\\_pojav](http://sl.wikipedia.org/wiki/Ko%C5%BEni_pojav), Kožni pojav (dostop 25.9.2014)
- [12] Dommel HW, *Electromagnetic transients program (EMTP)*, Bonneville Power Administration, Portland, 1986
- [13] J. Kragelj, A. Majcen, F. Prepeluh, G. Zlatarev, P. Hrobat, *Optimiranje zaščite zbiralk v 110 kV stikališčih distribucije Slovenije*, EIMV, ref. Št. 1830, Ljubljana, 2006
- [14] T. Pfajfar, *Analiza kompenzacijskih ukrepov v TP 1*, Ljubljana, 2013

- [15] T. Pfajfar, *Določanje odgovornosti za harmonsko popačenje z referenčnimi impedancami*, Doktorska disertacija, Ljubljana, 2009
- [16] Internetni vir: <http://eele.tsckr.si/wiki/index.php/Resonanca> ,(dostop 25.9.2014)
- [17] J. Voršič, J. Pihler, *Tehnika visokih napetosti in velikih tokov*, FERI, Maribor, 2008
- [18] Internetni vir: <http://www.nexans.com/>, SN kabli, (dostop 25.9.2014)

## 9 Priloge:

### A.1

Izračun parametrov tujega omrežja (110 kV napetostni nivo)

$$\phi_3 = \tan^{-1}(X / R)_{3\phi} = \tan^{-1}(10)_{3\phi} = 84,29^\circ \quad (9.1)$$

$$\phi_1 = \tan^{-1}(X / R)_{1\phi} = \tan^{-1}(10)_{1\phi} = 84,29^\circ \quad (9.2)$$

$$\underline{I}_{3\phi} = |I_{3\phi}| \angle -\phi_3 = 4,88 \angle -84,29^\circ \text{ kA} \quad (9.3)$$

$$\underline{I}_{1\phi} = |I_{1\phi}| \angle -\phi_1 = 2,81 \angle -84,29^\circ \text{ kA} \quad (9.4)$$

$$\underline{S}_{3\phi}^* = \sqrt{3} \cdot \underline{U}_n \underline{I}_{3\phi}^* = 931 \angle 84,29^\circ \text{ MVA} \quad (9.5)$$

$$\underline{S}_{1\phi}^* = \sqrt{3} \cdot \underline{U}_n \underline{I}_{1\phi}^* = 536 \angle 84,29^\circ \text{ MVA} \quad (9.6)$$

$$\underline{Z}_{zb1}^+ = \underline{U}_n / \underline{I}_{3\phi}^* = 1.2931 - j12.9309 \ \Omega \quad (9.7)$$

$$\underline{Z}_{zb1}^0 = (3\underline{U}_n / \underline{I}_{1\phi}^*) - 2\underline{Z}^+ = 2.2457 - j22.4568 \ \Omega \quad (9.8)$$

### A.2

Izračun parametrov transformatorja Tr 1 (energetski transformator 110/21 kV, 31,5 MVA)

$$\underline{Z}_{tr} = (R + jX)$$

$$\underline{Z}_{tr1}^+ = \underline{Z}_{tr1}^- = \frac{\% \underline{z}_{tr1}}{100} = \frac{0,45 + j13,1}{100} = 0,0045 + j0,131 \ \Omega \quad (9.9)$$

$$\underline{Z}_{tr1}^0 = \underline{Z}_{tr1}^+ + 3R_g = 0,0045 + j0,131 + 3 \cdot 80 = 0,0045 + j240,131 \ \Omega$$

### A.3

Izračun parametrov transformatorja Tr 2 (energetski transformator 21/0,41 kV, 2,5 MVA)

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{tr} &= (R + jX) \\ \underline{Z}_{tr2}^+ &= \underline{Z}_{tr2}^- = \frac{\% \underline{z}_{tr2}}{100} = \frac{0,85 + j6,04}{100} = 0,0085 + j0,0604 \quad \Omega \\ \underline{Z}_{tr2}^0 &= \underline{Z}_{tr2}^+ + 3R_g = 0,0085 + j0,0604 + 3 \cdot 0 = 0,0085 + j0,0604 \quad \Omega\end{aligned}\quad (9.10)$$

**A.4**Izračun parametrov prenosnega voda *KB 1*

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{kb1} &= (R_1 + j2\pi f_1 L_1) * l \\ \underline{Z}_{kb1}^+ &= (0,206 + j2\pi \cdot 50 \cdot 0,00039) * 3 = 0,6180 + j0,3676 \quad \Omega \\ \underline{Z}_{kb1}^0 &= (R_0 + j2\pi f_1 L_0) * l \\ \underline{Z}_{kb1}^0 &= (1,347 + j2\pi \cdot 50 \cdot 0,00212) * 3 = 4,0410 + j1,9981 \quad \Omega\end{aligned}\quad (9.11)$$

**A.5**Izračun parametrov pasivnega bremena *P*

$$\begin{aligned}\underline{S}_{br} &= \frac{P_{br}}{\cos \varphi} = \frac{1 \cdot 10^6}{0,95} = 1,0526 \cdot 10^6 \angle \cos^{-1}(0,95) = 0,79324 + j0,60891 \text{ MVA} \\ \underline{Z}_{br}^+ &= \frac{1}{\underline{S}_{br}^*} = 0,1269 + j0,0974 \quad \Omega \\ \underline{Z}_{br}^0 &= \infty\end{aligned}\quad (9.12)$$

**A.6**Izračun parametrov nelinearnega bremena *F*

$$\begin{aligned}\underline{S}_{nlbr} &= \frac{P_{nlb}}{\eta \cos \varphi} = \frac{1,282 \cdot 10^6}{0,90 \cdot 0,95} = 1,5 \cdot 10^6 \angle \cos^{-1}(0,95) = 1,35 + j0,6538 \text{ MVA} \\ \underline{Z}_{nlb}^+ &= \frac{1}{\underline{S}_{nlb}^*} = 0,0960 + j0,0465 \quad \Omega \\ \underline{Z}_{br}^0 &= \infty\end{aligned}\quad (9.13)$$



**A.7**Izračun parametrov kompenzacijskega filtra  $Q_1$ 

$$\begin{aligned}
h_{rq1} &= \frac{f_{q1}}{f_1} = \frac{189}{50} = 3,78 \\
X_{Cq1} &= \frac{(U_{b0,4})^2}{Q_{Cq1}} = \frac{(400)^2}{0,55 \cdot 10^6} = 290,9 \text{ m}\Omega \\
X_{Lq1} &= \frac{X_{Cq1}}{(h_{rq1})^2} = \frac{0,2909}{3,78^2} = 20,4 \text{ m}\Omega \\
X_{nq1} &= \sqrt{X_{Lq1} X_{Cq1}} = \sqrt{0,0204 \cdot 0,2909} = 77,0 \text{ m}\Omega \\
R_{q1} &= \frac{X_{nq1}}{Q_{vq1}} = \frac{0,077}{100} = 0,7696 \text{ m}\Omega \\
\underline{Z}_{q1} &= R_{q1} + j(X_{Lq1} - X_{Cq1}) = 0,7696 - j270,5 \text{ m}\Omega
\end{aligned} \tag{9.14}$$

Izračun parametrov kompenzacijskega filtra  $Q_2$ 

$$\begin{aligned}
h_{rq2} &= \frac{f_{q2}}{f_1} = \frac{235}{50} = 4,7 \\
X_{Cq2} &= \frac{(U_{b0,4})^2}{Q_{Cq2}} \frac{1}{Z_{b0,4}} = \frac{(400)^2}{0,55 \cdot 10^6} = 290,9 \text{ m}\Omega \\
X_{Lq2} &= \frac{X_{Cq2}}{(h_{rq2})^2} = \frac{0,2909}{4,7^2} = 13,2 \text{ m}\Omega \\
X_{nq2} &= \sqrt{X_{Lq2} X_{Cq2}} = \sqrt{0,0132 \cdot 0,2909} = 61,9 \text{ m}\Omega \\
R_{q2} &= \frac{X_{nq2}}{Q_{vq2}} = \frac{61,9}{100} = 0,61896 \text{ m}\Omega \\
\underline{Z}_{q2} &= R_{q2} + j(X_{Lq2} - X_{Cq2}) = 0,61896 - j277,7 \text{ m}\Omega
\end{aligned} \tag{9.15}$$

## A.8

Izračun baznih vrednosti toka in impedance za pretvorbo parametrov v sistem enotinih vrednosti

$$\begin{aligned}
 I_{baz110} &= \frac{S_b}{\sqrt{3} U_{bL-L110}} = \frac{100 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 110 \cdot 10^3} = 524,8 \text{ A} \\
 I_{baz20} &= \frac{S_b}{\sqrt{3} U_{bL-L20}} = \frac{100 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 21 \cdot 10^3} = 2,749 \text{ kA} \\
 I_{baz0,4} &= \frac{S_b}{\sqrt{3} U_{bL-L0,4}} = \frac{100 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 0,4 \cdot 10^3} = 144,34 \text{ kA}
 \end{aligned} \tag{9.16}$$

$$\begin{aligned}
 Z_{baz110} &= \frac{U_{bL-L110}}{\sqrt{3} I_{baz110}} = \frac{100 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 524,8} = 121 \Omega \\
 Z_{baz20} &= \frac{U_{bL-L20}}{\sqrt{3} I_{baz20}} = \frac{21 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 2,749 \cdot 10^3} = 4,41 \Omega \\
 Z_{baz0,4} &= \frac{U_{bL-L0,4}}{\sqrt{3} I_{baz0,4}} = \frac{100 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 144,34 \cdot 10^3} = 0,0016 \Omega
 \end{aligned} \tag{9.17}$$

Izračun parametrov tujega omrežja (110 kV napetostni nivo)

$$\begin{aligned}
 \underline{I}_{3\phi} &= \frac{|I_{3\phi}| \angle -\phi_3}{I_{baz}} = \frac{4,88 \angle -84,29^\circ}{524} = 9,311 \angle -84,29^\circ \text{ pu} \\
 \underline{I}_{1\phi} &= \frac{|I_{1\phi}| \angle -\phi_1}{I_{baz}} = \frac{2,81 \angle -84,29^\circ}{524} = 5,3614 \angle -84,29^\circ \text{ pu} \\
 \underline{S}_{3\phi}'' &= \frac{\sqrt{3} \cdot \underline{U}_n \underline{I}_{3\phi}^*}{S_b} = \frac{93110^6 \angle 84,29^\circ}{100 \cdot 10^6} = 9,31 \angle 84,29^\circ \text{ pu} \\
 \underline{S}_{1\phi}'' &= \frac{\sqrt{3} \cdot \underline{U}_n \underline{I}_{1\phi}^*}{S_b} = \frac{53610^6 \angle 84,29^\circ}{100 \cdot 10^6} = 5,36 \angle 84,29^\circ \text{ pu}
 \end{aligned} \tag{9.18}$$

$$\begin{aligned}
 Z^+ &= \sqrt{1,2931^2 + 12,9309^2} = 0,107 \text{ pu} \\
 \underline{Z}^+ &= 1 / \underline{I}_{3\phi}^* = \frac{1}{9,311 \angle -84,29^\circ} = 0,0107 + j0,1069 \text{ pu}
 \end{aligned} \tag{9.19}$$

$$\begin{aligned} Z^0 &= \sqrt{2.2457^2 + 22.4568^2} = 0,3438 \text{ pu} \\ \underline{Z}^0 &= \frac{3}{I_{3\phi}^*} - 2\underline{Z}^+ = \frac{3}{(9,311 \angle -84,29^\circ)^*} - 0,0107 + j0,1069 = 0,0343 + j0,3430 \text{ pu} \end{aligned} \quad (9.20)$$

Izračun parametrov transformatorja Tr 1 (energetski transformator 110/21 kV, 31,5 MVA)

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{tr} &= (R + jX) \\ \underline{Z}_{r1}^+ &= \underline{Z}_{r1}^- = \frac{\% \underline{Z}_{r1}}{100} \frac{S_{b110}}{S_{r1}} = \frac{0,45 + j13,1}{100} \frac{100}{2,5} = 0,0143 + j0,4159 \text{ pu} \\ \underline{Z}_{r1}^0 &= \underline{Z}_{r1}^+ + \frac{3R}{Z_b} = 0,0143 + j0,4159 + \frac{3 \cdot 80}{4} = 54,4361 + j0,4159 \text{ pu} \end{aligned} \quad (9.21)$$

Izračun parametrov transformatorja Tr 2 (energetski transformator 21/0,41 kV, 2,5 MVA)

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{tr} &= (R + jX) \\ \underline{Z}_{r2}^+ &= \underline{Z}_{r2}^- = \frac{\% \underline{Z}_{r2}}{100} \frac{S_{b20}}{S_{r2}} = \frac{0,84 + j6,04}{100} \frac{100}{2,5} = 0,336 + j2,416 \text{ pu} \\ \underline{Z}_{r2}^0 &= \underline{Z}_{r2}^+ + \frac{3R}{Z_b} = 0,336 + j2,416 + \frac{3 \cdot 0}{4} = 0,336 + j2,416 \text{ pu} \end{aligned} \quad (9.22)$$

Izračun parametrov prenosnega voda KB 1

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{kb1} &= (R + jX) * l / Z_{b20} \\ \underline{Z}_{kb1}^+ &= (0,206 + j0,1225) * 3 / 4,41 = 0,1401 + j0,0833 \text{ pu} \\ \underline{Z}_{kb1}^0 &= (1,347 + j0,6660) * 3 / 4,41 = 0,9163 + j0,4531 \text{ pu} \end{aligned} \quad (9.23)$$

Izračun parametrov pasivnega bremena P

$$\begin{aligned} \underline{S}_{br} &= \frac{S_{br}}{S_{b04}} \angle \cos^{-1}(pf) = \frac{1,0}{100} \angle \cos^{-1}(0,95) = 0,0079 + j0,0061 \text{ pu} \\ \underline{Z}_{br}^+ &= \frac{1}{\underline{S}_{br}^*} = 79,3241 + j60,8908 \text{ pu} \\ \underline{Z}_{br}^0 &= \infty \end{aligned} \quad (9.24)$$

Izračun parametrov nelinearnega bremena  $F$ 

$$\begin{aligned}\underline{S}_{nlb} &= \frac{S_{nlb}}{S_b} \eta \angle \cos^{-1}(pf) = \frac{1,50 \cdot 0,95}{100} \angle \cos^{-1}(0,9) = 0,0135 + j0,0065 \text{ pu} \\ \underline{Z}_{nlb}^+ &= \frac{1}{\underline{S}_{nlb}^*} = 60,000 + j29,0593 \text{ pu} \\ \underline{Z}_{nlb}^0 &= \infty\end{aligned}\quad (9.25)$$

Izračun parametrov kompenzacijskega filtra  $Q_1$ 

$$\begin{aligned}h_{rq1} &= \frac{f_{q1}}{f_1} = \frac{189}{50} = 3,78 \\ X_{Cq1} &= \frac{(U_{b0,4})^2}{Q_{Cq1}} \frac{1}{Z_{b0,4}} = \frac{(400)^2}{0,55 \cdot 10^6} \frac{1}{0,0016} = 181,8182 \text{ pu} \\ X_{Lq1} &= \frac{X_{Cq1}}{(h_{rq1})^2} = \frac{181,8182}{3,78^2} = 12,7249 \text{ pu} \\ X_{nq1} &= \sqrt{X_{Lq1} X_{Cq1}} = \sqrt{12,7249 \cdot 181,8182} = 48,1 \text{ pu} \\ R_{q1} &= \frac{X_{nq1}}{Q_{vq1}} = \frac{48,1}{100} = 0,481 \text{ pu} \\ \underline{Z}_{q1} &= R_{q1} + j(X_{Lq1} - X_{Cq1}) = 0,481 - j169,09 \text{ pu}\end{aligned}\quad (9.26)$$

Izračun parametrov kompenzacijskega filtra  $Q_2$ 

$$\begin{aligned}h_{rq2} &= \frac{f_{q2}}{f_1} = \frac{235}{50} = 4,7 \\ X_{Cq2} &= \frac{(U_{b0,4})^2}{Q_{Cq2}} \frac{1}{Z_{b0,4}} = \frac{(400)^2}{0,55 \cdot 10^6} \frac{1}{0,0016} = 181,8182 \text{ pu} \\ X_{Lq2} &= \frac{X_{Cq2}}{(h_{rq2})^2} = \frac{181,8182}{4,7^2} = 8,2308 \text{ pu} \\ X_{nq2} &= \sqrt{X_{Lq2} X_{Cq2}} = \sqrt{8,2308 \cdot 181,8182} = 36,6847 \text{ pu} \\ R_{q2} &= \frac{X_{nq2}}{Q_{vq2}} = \frac{48,1}{100} = 0,3868 \text{ pu} \\ \underline{Z}_{q2} &= R_{q2} + j(X_{Lq2} - X_{Cq2}) = 0,38685 - j173,59 \text{ pu}\end{aligned}\quad (9.27)$$

## B.1

Programska koda v programu Matlab za sliko 2.1 "Tipične oblike popačenega signala"

```
diary e2_diary;
f=50;
dur=(1/f)*2;
omega=2*pi*f;
t=0:0.0001:dur;
y=sin(omega*t);
a=sin(omega*t) + sin(3*omega*t)/3;
b=sin(omega*t) + sin(3*omega*t)/3 + sin(5*omega*t)/5 + sin(7*omega*t)/7;
plot(t,y,'r'),hold on,grid on;
plot(t,a,'g'),hold on;
plot(t,b,'b');
xlabel({'\it t[s]'},'FontSize',12);
ylabel('amplituda','FontSize',12);
title('Tipične oblike harmonikov','FontSize',12);
legend1=legend('osnovni harmonik','osn + 3. h.','osn + 3. h. + 5. h. + 7. h. ');
set(legend1,'Location','BestOutside');
legend({'osnovni harmonik','osn + 3. h.','osn + 3. h. + 5. h. + 7. h. '})
diary off;
```

## B.2

Programska koda v programu Matlab za sliko 2.5 "Amplitudna in fazna karakteristika zaporedne vezave RLC"

```
[A,B,C,D] = power_analyze('SERRLC');
freq = logspace(1,3,500);
w = 2*pi*freq;
Xc=1./(w*0.31831e-3);
Xl=w*0.0018;
R=0.23779;
mar=0:1:5;
[Ymag,Yphase] = bode(A,B,C,D,1,w);
Zmag = 1./Ymag;
Zphase = -Yphase;
subplot(2,1,1)
plot(freq,Zmag,'b'),axis([50 500 0 10]), hold on;
plot(freq,abs(Xl-Xc),'g');
plot(freq,Ymag, 'r');
plot([210,210],[10,0], '-.b');
plot(freq,Xc,'k');
plot(freq,Xl,'k');
plot([0,500],[0.238,0.238], 'm');
grid on;
xlabel('Frekvenca [Hz]')
legend('Z','X_n','I','f_r','Xc','Xl','R');
subplot(2,1,2)
plot(freq,Zphase),grid on,hold on;
plot([210,210],[100,-100], '-.b');
xlabel('Frekvenca [Hz]')
ylabel({'\phi','[°]'},axis([50 500 -100 100])
legend({'\phi','f_r');
grid on
```

### B.3

Programska koda v programu Matlab za sliko 2.7 "Amplitudna in fazna karakteristika vzporedne vezave RLC"

```

freq = linspace(1,500,1000);
w = 2*pi*freq;
Xc1=1;
f=50;
f1=210;
p1=f1/f;
Xl1=Xc1/power(p1,2);
Xn1=sqrt(Xl1*Xc1);
Q1=5;
R1=Xn1*Q1;
Bc=-1i*(w*Cn);
Ln=Xl1/( 2*pi*f);
Xl=w*Ln;
Xc=1./(w*Cn);
Bl=-1i*1./(w*Ln);
Bn=abs(Bl-Bc);
B=(1./Xl-1./Xc);
G=(1./R1);
Y=sqrt(power(G,2)+power(Bn,2));
fin=atand(B/G);
figure(01);
subplot(2,1,1)
p=plot(freq,Y,'b');axis([0 500 0 12]), hold on;
set(p,'Color','b','LineWidth',2);
plot(freq,abs(Bl-Bc),'g','LineWidth',2),hold on;
plot([210,210],[12,0],'-b'),hold on;
plot(freq,abs(Bc),'k'),hold on;
plot(freq,abs(Bl),'k'), hold on;
plot([0,1000],[G,G],'-r','LineWidth',1);
grid on;
xlabel('Frekvenca, [Hz]')
ylabel('admitanca')
legend('Y=l','B_n','f_r','Bc','Bl','G');
subplot(2,1,2)
plot(freq,fin),grid on,hold on;
plot([210,210],[100,-100],'-b');
xlabel('Frekvenca, Hz')
ylabel('{\phi},{[^\circ]}',,axis([0 500 -100 100])
legend('{\phi}','f_r');
grid on

```

### B.4

Programska koda v programu Matlab za slike od 4.5 do 4.9, s katerimi so predstavljeni parametri daljšega prenosnega kablovoda.

```

clear all
clc
%osnovni podatki kablovoda iz kataloga
f=50;           %Hz
r=0.0393;      %ohm/km
dolz=250;      %km
xl=0.4054;     %ohm/km
bc=2.828e-6;   %siem/km
XL=xl*dolz;    %ohm

```

```

R=r*dolz; %ohm
Bc=bc*dolz; %siem
Xc=inv(Bc) %ohm
Zsys=4.243+1i*29.698; %ohm
%izračun induktivnosti in kapacitivnosti kablovoda
L=dolz*xl/(2*pi*f); %H
C=dolz*bc/(2*pi*f); %F
%izračun parametrov serijske impedance in
%paralelne admittance/km
z=r+1i*xl; %ohm/km
y=1i*bc; %mho/km
Z=z*dolz;
Ya=abs(Z);
Y=y*dolz;
IY=inv(Y);
gama=sqrt(z*y); %konstanta širjenja
beta=imag(gama); %konstanta vrtenja
beta100=0.001*(180/pi)*100;
gama1=sqrt(Z*Y);
gamala=abs(gama1);
Zc=sqrt(Z/Y);
Zca=abs(Zc);
Zs=Zc*sinh(gamala)
Yp=1i*(imag(tanh(gamala/2)/Zc));
lambda=2*pi/beta
v=f*lambda
fo=v/dolz;
%izračun karakteristične impedance kablov
for h=1:1:2500
%izračun karakteristične impedance kablov
f1(h)=h/50;
Z_1(h)=(R+1i*XL*f1(h));
Y_1(h)=1i*Bc*f1(h);
IY(h)=1i*Xc/f1(h);
% izračun valovne dolžine
z_1(h)=(r+1i*xl*f1(h));
y_1(h)=(1i*bc*f1(h));
Zc_1(h)=sqrt(z_1(h)/y_1(h));
Zc_a(h)=abs(Zc_1(h));
gama_1(h)=sqrt(z_1(h)*y_1(h));
% izračun hitrosti širjenja
beta_1(h)=imag(gama_1(h));
lambda_1(h)=(2*pi/beta_1(h));
v_1(h)=lambda_1(h)*f1(h);
% izračun frekvence osciliranja
fo_1(h)=v_1(h)/dolz;
% izračun propagacijske konstante širjenja
gamala_1(h)=sqrt(Z_1(h)*Y_1(h));
% izračun serijske impedance voda
Zs_1(h)=Zc_1(h)*sinh(gamala_1(h));
Zsa_1(h)=abs(Zs_1(h));
fiZs_1(h)=imag((log(Zs_1(h))));
Xs(h)=imag(Zs_1(h));
% izračun paralelne admittance voda
Yp_1(h)=(tanh((gamala_1(h)/2))/(gamala_1(h)/2))*Y_1(h)/2;
Ypa_1(h)=abs(Yp_1(h));
fiYp_1(h)=atan2(imag(Yp_1(h)),real(Yp_1(h)));

```

```

Xc_1(h)=imag(1/Yp_1(h));
%izračun nadomestne impedance kabla
Zkb(h)=(Zs_1(h)*Yp_1(h)+1)/(Yp_1(h)*[Zs_1(h)*Yp_1(h)+2]);
Zkba(h)=abs(Zkb(h));
fiZkb(h)=atan2(imag(Zkb(h)),real(Zkb(h)));
% izračun nadomestne impedance sistema
Zsys_1(h)=real(Zsys)+imag(Zsys)*f1(h);
%izračun nadomestne impedance na koncu kabla
Z3(h)=(Zsys_1(h)*Yp_1(h))/(Yp_1(h)+Zsys_1(h));
Z2(h)=Zs_1(h)+Z3(h);
Z1(h)=(Yp_1(h)*Z2(h))/(Yp_1(h)+Z2(h));
Zna(h)=abs(Z1(h));
h_1(h)=f1(h);

end
figure(01)
subplot(221),
plot(f1,Zc_a,'g'),grid on,axis([1 50 378.5 379.6]) ;
xlabel('h-ti harmonik');
ylabel('Zc_a, [\Omega]');
title('valovna upornost voda \itZ_c');
subplot(222),
plot(f1,lambda_1,'r'),grid on,axis([1 50 0 6e3]);
xlabel('h-ti harmonik');
ylabel('lambda_1, [km]');
title('valovna dolžina \itlambda');
subplot(223),
plot(f1,v_1,'b'),grid on,axis([1 50 2.931e5 2.935e5]);
xlabel('h-ti harmonik');
ylabel('nu, [km/s]');
title('hitrost širjenja \itnu');
subplot(224),
plot(f1,fo_1,'k'),grid on,axis([1 50 1172.5 1173.7]);
xlabel('h-ti harmonik');
ylabel('fo, [Hz]');
title('frekvenca nihanja \itf_n_i_h');
figure(02)
subplot(211),
plot(f1,Xs,'r'),grid on, hold on, axis([1 50 -400 400]);
xlabel('h-ti harmonik');
ylabel('Xs, [\Omega]');
title('vzdolžna reaktanca voda \itX_v');
subplot(212),
plot(f1,Xc_1,'r'),grid on, axis([1 50 -30000 30000]);
xlabel('h-ti harmonik');
ylabel('Xc_1, [\Omega]');
title('prečna reaktanca voda \it1/B_v');
figure(03)
subplot(221),
plot(f1,Zkba,'g'),grid on,axis([1 50 0 30e3]);
xlabel('h-ti harmonik');
ylabel('Zkba, [\Omega]');
title('impedanca voda \itZ_n_v_h');
subplot(222),
plot(f1,fiZkb*180/pi,'r'),grid on,axis([1 50 -100 100]);
xlabel('h-ti harmonik');
ylabel('phi, [^\circ]');

```



```

title('fazni kot impedance voda \phi_n_v_h');
subplot(223),
plot(real(Zkb),imag(Zkb),'k'),grid on,axis([0 30e3 -15e3 15e3]);
xlabel('R_v, {\Omega}');
ylabel('X_v, {\Omega}');
title('impedanca voda \itZ_n_v_h');
subplot(224),
plot3(imag(Zkb),real(Zkb),h_1,'b'),grid on,axis([-20e3 20e3 0 30e3 1 50]);
xlabel('X_v, {\Omega}')
zlabel('h-ti harmonik');
ylabel('R_v, {\Omega}');
title('impedanca voda \itZ_n_v_h');
figure(04)
subplot(221),
plot(f1,Zsa_1,'g'),grid on,axis([1 50 0 400]);
xlabel('h-ti harmonik');
ylabel('{\midZ\mid}, {\Omega}');
title('vzdolžna impedanca voda \itZ_v_h');
subplot(222),
plot(f1,fiZs_1*180/pi,'r'),grid on,axis([1 50 -180 180]);
xlabel('h-ti harmonik');
ylabel('{\phi, [^\circ]}');
title('fazni kot impedance {\phi}_v_h');
subplot(223),
plot(real(Zs_1),imag(Zs_1),'k'),grid on,axis([-6 10 -400 400]);
xlabel('R_v, {\Omega}');
ylabel('X_v, {\Omega}');
title('vzdolžna impedanca voda \itZ_v_h');
subplot(224),
plot3(imag(Zs_1),real(Zs_1),h_1,'b'),grid on,axis([-400 400 -6 10 1 50]);
zlabel('h-ti harmonik');
xlabel('X_v, {\Omega}')
ylabel('R_v, {\Omega}');
title('vzdolžna impedanca voda \itZ_v_h');
figure(05)
subplot(221),
plot(f1,Ypa_1,'g'),grid on,axis([1 50 0 0.4]);
xlabel('h-ti harmonik');
ylabel('{\midY_1_h\mid}, [S]');
title('prečna admitanca voda \itY_1_h');
subplot(222),
plot(f1, fiYp_1*180/pi,'r'),grid on;
xlabel('h-ti harmonik');
ylabel('{\phi, [^\circ]}');
title('fazni kot prečne admittance {\phi}_1_h');
subplot(223),
plot(real(Yp_1),imag(Yp_1),'k'),grid on,axis([0 0.45 -0.25 0.25]);
xlabel('G_v, [S]');
ylabel('B_v, [S]');
title('prečna admitanca voda \itY_1_h');
subplot(224),
plot3(imag(Yp_1),real(Yp_1),h_1,'b'),grid on,axis([-0.3 0.3 0 0.5 1 50]);
zlabel('h-ti harmonik');
xlabel('B_v, [S]')
ylabel('G_v, [S]');
title('prečna admitanca voda \itY_1_h');

```

## B.5

Programska koda v programu Matlab za sliko 5.2 "Oblika toka nelinearnega bremena"

```
clear all
clc
diary e2_diary;
f=50;
dur=(1/f)*2;
omega=2*pi*f;
lh(1*f)=100/100;
lh(2*f)=1.167/100;
lh(3*f)=5.419/100;
lh(4*f)=0.3929/100;
lh(5*f)=35.27/100;
lh(6*f)=0.3209/100;
lh(7*f)=19.269/100;
lh(8*f)=0.176/100;
lh(9*f)=3.093/100;
lh(10*f)=0.1312/100;
lh(11*f)=4.599/100;
lh(12*f)=0.086/100;
lh(13*f)=1.68/100;
lh(14*f)=0.1077/100;
lh(15*f)=1.668/100;
lh(16*f)=0.0559/100;
lh(17*f)=1.97/100;
lh(18*f)=0.060/100;
lh(19*f)=1.637/100;
lh(23*f)=1.065/100;
lh(25*f)=1.00/100;
t=0:0.0001:dur;
x =(0:0.0001:dur);
y=sin(omega*t)*lh(1*f)+sin(2*omega*t)*lh(2*f)+sin(3*omega*t)*lh(3*f)+sin(4*omega*t)*lh(4*f)+sin(5*omega*t)*lh(5*f)+...
sin(6*omega*t)*lh(6*f)+sin(7*omega*t)*lh(7*f)+sin(8*omega*t)*lh(8*f)+sin(9*omega*t)*lh(9*f)+sin(10*omega*t)*lh(10*f)+...
sin(11*omega*t)*lh(11*f)+sin(12*omega*t)*lh(12*f)+sin(13*omega*t)*lh(13*f)+sin(14*omega*t)*lh(14*f)+sin(15*omega*t)*lh(15*f)+...
sin(16*omega*t)*lh(16*f)+sin(17*omega*t)*lh(17*f)+sin(18*omega*t)*lh(18*f)+sin(19*omega*t)*lh(19*f)+sin(23*omega*t)*lh(23*f)+...
sin(25*omega*t)*lh(25*f);
plot(x,y,'b'),hold on,grid on;
xlabel({'\itt [s]'},'FontSize',12);
ylabel({'\itt_n_l_b\rm, pu'},'FontSize',12);
title('Oblika toka nelinearnega bremena','FontSize',12);
set (legend,'Location','BestOutside');
legend1=legend('tok nelinearnega bremena');
set(legend1,'Location','BestOutside');
legend({'tok nelinearnega bremena'})
diary off;
```

## B.6

Programska koda v programu Matlab za slike od 5.4 do 5.6, ki podajajo fazne in amplitudne karakteristike kompenzacijskih filtrov  $Q_1$  in  $Q_2$ .

```

clc
clear all
%podatki za izračun kompenzacijskega filtra
f1=189;      %frekvenca uglasitve filtra
f2=235;      %frekvenca uglasitve filtra
Q1=100;      %faktor kvalitete filtra
Q2=100;      %faktor kvalitete filtra
Qc1=0.3e6;   %nazivna moč filtra kVAr
Qc2=0.3e6;   %nazivna moč filtra kVAr
f=50;        %nazivna frekvenca omrežja
%Izračun impedance NN omrežja
Sb04=100e6;  %bazna vrednost NN omrežja (VA)
Ub04=0.4e3;  %bazna vrednost napetosti NN omrežja (V)
Ib04=Sb04/(sqrt(3)*Ub04); %bazna vrednost toka NN omrežja (A)
Zb04=Ub04/(sqrt(3)*Ib04); %bazna impedanca NN omrežja (OHM)
%% podatki za izračun kompenzacijskega filtra
%izračun impedance filtra
p1=f1/f;     % faktor izbrane frekvence 1
p2=f2/f;     % faktor izbrane frekvence 2
%izračun parametrov filtra 1
Xc1=(power(Ub04,2)/Qc1)/Zb04;
Xl1=Xc1/power(p1,2);
Xn1=sqrt(Xl1*Xc1);
R1=Xn1/Q1;
Qf1=(power(p1,2)/(power(p1,2)-1)*Qc1)/Sb04;
Zf_1=R1+1i*(Xl1-Xc1);
Yf_1=inv(Zf_1);
%izračun parametrov filtra 2
Xc2=(power(Ub04,2)/Qc2)/Zb04;
Xl2=Xc2/power(p2,2);
Xn2=sqrt(Xl2*Xc2);
R2=Xn2/Q2;
Qf2=(power(p2,2)/(power(p2,2)-1)*Qc2)/Sb04;
Zf_2=R2+1i*(Xl2-Xc2);
Yf_2=inv(Zf_2);
% %izračun impedance v celotnem frekvenem področju
for h=1:1:2500
    b(h)=h/50;
    if rem(h,3)==0
        %% Impedanca filtra 1
        Zq1(h)=R1+1i*(b(h)*Xl1-Xc1/b(h));
        Zq1a(h)=abs(Zq1(h));
        Yq1(h)=inv(Zq1(h));
        Yq1a(h)=abs(Yq1(h));
        fiq1(h)=imag(log(Zq1(h)))*180/pi;
        %% Impedanca filtra 2
        Zq2(h)=R2+1i*(b(h)*Xl2-Xc2/b(h));
        Zq2a(h)=abs(Zq2(h));
        Yq2(h)=inv(Zq2(h));
        Yq2a(h)=abs(Yq2(h));
        fiq2(h)=imag(log(Zq2(h)))*180/pi;
    elseif rem(h,3)==1
        %% FILTER
        %% Impedanca filtra 1
        Zq1(h)=R1+1i*(b(h)*Xl1-Xc1/b(h));
        Zq1a(h)=abs(Zq1(h));
        Yq1(h)=inv(Zq1(h));
        Yq1a(h)=abs(Yq1(h));

```

```

fiq1(h)=imag(log(Zq1(h)))*180/pi;
%% Impedanca filtra 2
Zq2(h)=R2+1i*(b(h)*Xl2-Xc2/b(h));
Zq2a(h)=abs(Zq2(h));
Yq2(h)=inv(Zq2(h));
Yq2a(h)=abs(Yq2(h));
fiq2(h)=imag(log(Zq2(h)))*180/pi;
elseif rem(h,3)==2
%FILTER
%% Impedanca filtra 1
Zq1(h)=R1+1i*(b(h)*Xl1-Xc1/b(h));
Zq1a(h)=abs(Zq1(h));
Yq1(h)=inv(Zq1(h));
Yq1a(h)=abs(Yq1(h));
fiq1(h)=imag(log(Zq1(h)))*180/pi;
%% Impedanca filtra 2
Zq2(h)=R2+1i*(b(h)*Xl2-Xc2/b(h));
Zq2a(h)=abs(Zq2(h));
Yq2(h)=inv(Zq2(h));
Yq2a(h)=abs(Yq2(h));
fiq2(h)=imag(log(Zq2(h)))*180/pi;
end
Yf(h)=(Yq1(h)+Yq2(h));
Yfa(h)=abs(Yf(h));
Zf(h)=inv(Yf(h));
Zfa(h)=abs(Zf(h));
fif(h)=imag(log(Zf(h)))*180/pi;
end
figure(01)
subplot(121),
plot(b,Zq1a,'b'),grid on,axis([1 25 0 600]);
xlabel('h-ti harmonik');
ylabel('|\mid Z_{Q1}\mid',{\[\Omega]});
title('impedanca kompenzacijskega filtra Q_1');
subplot(122),
plot(b,fiq1,'r'),grid on,axis([1 25 -100 100]);
xlabel('h-ti harmonik');
ylabel('|\phi|, {\[^\circ]}');
title('fazni kot kompenzacijskega filtra Q_1');
figure(02)
subplot(121),
plot(b,Zq2a,'b'),grid on,axis([1 25 0 400]);
xlabel('h-ti harmonik');
ylabel('|\mid Z_{Q2}\mid',{\[\Omega]});
title('impedanca kompenzacijskega filtra Q_2');
subplot(122),
plot(b,fiq2,'r'),grid on,axis([1 25 -100 100]);
xlabel('h-ti harmonik');
ylabel('|\phi|, {\[^\circ]}');
title('fazni kot kompenzacijskega filtra Q_2');
figure(03)
subplot(121),
plot(b,Zfa,'b'),grid on,axis([1 25 0 250]);
xlabel('h-ti harmonik');
ylabel('|\mid Z_{Q_1}\mid, {\mid Z_{Q_2}\mid}, {\[\Omega]}');

```

```

title('skupna impedanca kompenzacijskih filtrov Q_1 in Q_2');
subplot(122),
plot(b,fif,'r'),grid on,axis([1 25 -100 100]);
xlabel('h-ti harmonik');
ylabel('{\phi},{[^\circ]}');
title('fazni kot kompenzacijskih filtrov Q_1 in Q_2');

```

## B.7

### Programska koda v programu Matlab za izračun parametrov v tabelah 6.3 do 6.6 in izris slik 6.4 do 6.8.

```

clc
clear all
%% primer izvedbe harmonske analize po WAKILEHu (podatki Krka)
%% podatki potrebni za izračun parametrov VN omrežja
%% Nazivni parametri VN omrežja
f=50; %nazivna frekvenca omrežja
Uvn=110e3; %Nazivna napetost VN omrežja
Ik3fvn=4887; %podana efektivna vrednost tripolnega kratkostičnega toka
Ik1fvn=2814; %podana efektivna vrednost enofaznega zemeljskega kratkega stika
XRvn=10; %podano razmerje med upornostjo in induktivnostjo omrežja
%% Izračun impedance VN omrežja
Sb110=100e6; %bazna vrednost VN omrežja (VA)
Ub110=110e3; %bazna vrednost napetosti VN omrežja (V)
Ib110=Sb110/(sqrt(3)*Ub110); %bazna vrednost toka VN omrežja (A)
Zb110=Ub110/(sqrt(3)*Ib110); %bazna impedanca VN omrežja (OHM)
%% Izračun parametrov na VN zbiralki
fi3f=-atan(XRvn)*180/pi; % izračunan kot trifaznega kratkega stika v (°)
fi1f=-atan(XRvn)*180/pi; % izračunan kot enofaznega kratkega stika v (°)
Ik3=Ik3fvn*(cosd(fi3f)+1*i*sind(fi3f)); %3f kratkostični tok podan v trigonometrični obliki
Ik1=Ik1fvn*(cosd(fi1f)+1*i*sind(fi1f)); %1f kratkostični tok podan v trigonometrični obliki
Ik3pu=Ik3fvn*(cosd(fi3f)+1*i*sind(fi3f))/Ib110; %3f kratkostični tok podan v sistemu enotinih vrednosti
(z=x+iy)
Ik1pu=Ik1fvn*(cosd(fi1f)+1*i*sind(fi1f))/Ib110; %1f kratkostični tok podan v sistemu enotinih vrednosti
Ika3=abs(Ik3pu); %3f absolutna vrednost kratkostičnega toka, podan v sistemu
enotinih vrednosti
Ika1=abs(Ik1pu); %1f absolutna vrednost kratkostičnega toka, podan v sistemu
enotinih vrednosti
fi3kf=imag(log(Ik3))*180/pi; % izračunan kot trifaznega kratkega stika v (°)
fi1kf=imag(log(Ik1))*180/pi; % izračunan kot enofaznega kratkega stika v (°)
%% Izračun kratkostične moči na VN zbiralki
Sk3fpu=sqrt(3)*Ub110*Ika3/Sb110; %3f kratkostična moč podana v trigonometrični obliki PU
Ska3=abs(Sk3fpu); %3f kratkostična moč podana v absolutni vrednosti PU
Sk1fpu=sqrt(3)*Ub110*Ika1/Sb110; %1f kratkostična moč podana v trigonometrični obliki PU
Ska1=abs(Sk1fpu); %1f kratkostična moč podana v absolutni vrednosti PU
%% izračun impedance pozitivnega in ničnega zaporedja VN omrežja
Zomp=1/(Ik3pu); %izračun impedance pozitivnega zaporedja omrežja (z=x+iy)
Znic110=(3/Ik1pu)-2*Zomp; %izračun impedance ničnega zaporedja omrežja (z=x+iy)
%% Izračun impedance SN omrežja
Sb20=100e6; %bazna vrednost SN omrežja (VA)
Ub20=21e3; %bazna vrednost napetosti SN omrežja (V)
Ib20=Sb20/(sqrt(3)*Ub20); %bazna vrednost toka SN omrežja (A)
Zb20=Ub20/(sqrt(3)*Ib20); %bazna impedanca SN omrežja (OHM)
%% podatki za izračun parametrov nadomestnega modela transformatorja 110/21 kV
Usn=21e3; %Nazivna napetost sekundarne strani transformatorja (V)
Str1=31.5e6; %Nazivna moč sekundarne strani transformatorja (VA)
Ztr1=0.45+1*i*13.1; %Nazivna impedanca transformatorja (%)
Rg=80; %Upornost ozemljitve zvezdišča (OHM)
% Izračun impedance pozitivnega in ničnega zaporedja za Tr 110/21

```

```

Zt1p=((real(Ztr1)+1i*imag(Ztr1))*Sb20)/(100*Str1); %izračun impedance pozitivnega zaporedja transf (z=x+iy)
PU
Zt10=Zt1p+(3*Rg/Zb20); %izračun impedance ničnega zaporedja transf (z=x+iy)
PU
%% podatki z izračn parametrov nadomestnega modela kablovoda KB1
Rkb1=0.206; %upornost na km
Lkb1=0.39e-3; %induktivnost na km
l=3; %dolžina v km
Rkb0=1.347;
Lkb0=2.12e-3;
Zkbp=(Rkb1+1i*2*pi*f*Lkb1)*l/Zb20;
Zkb0=(Rkb0+1i*2*pi*f*Lkb0)*l/Zb20;
%% Izračun impedance NN omrežja
Sb04=100e6; %bazna vrednost NN omrežja (VA)
Ub04=0.4e3; %bazna vrednost napetosti NN omrežja (V)
Ib04=Sb04/(sqrt(3)*Ub04); %bazna vrednost toka NN omrežja (A)
Zb04=Ub04/(sqrt(3)*Ib04); %bazna impedanca NN omrežja (OHM)
%% podatki za izračun parametrov nadomestnega modela transformatorja 21/04 kV
Unn=0.4e3; %Nazivna napetost sekundarne strani transformatorja (V)
Str2=2.5e6; %Nazivna moč sekundarne strani transformatorja (VA)
Ztr2=(0.84+1i*6.04); %Nazivna impedanca transformatorja (%)
Rg=0; %Upornost ozemljitve zvezdišča (OHM)
% Izračun impedance pozitivnega in ničnega zaporedja za Tr 21/04
Zt2p=((real(Ztr2)+1i*imag(Ztr2))*Sb04)/(100*Str2); %izračun impedance pozitivnega zaporedja transf (z=x+iy)
PU
Zt20=Zt2p+(3*Rg/Zb04); %izračun impedance ničnega zaporedja transf (z=x+iy)
PU
Z4p=Zomp+Zt1p+Zkbp+Zt2p;
fi4p=imag(log(Z4p))*180/pi;
%% podatki za izračun pasivnega bremena
Ul=0.4e3; %nazivna napetost pasivnega bremena (V)
Sl=1.0e6; %nazivna moč izbranega pasivnega bremena (VA)
pfl=0.95; % cos fi izbranega pasivnega bremena
%izračun parametrov pasivnega bremena
fil=-acosd(pfl); % izračun faznega kota pasivnega bremena (°)
Slpu=(Sl/Sb04)*(cos(fil)+1i*sin(fil)); % izračun nazivne moči pasivnega bremena v PU
% Izračun impedance pozitivnega in ničnega zaporedja za pasivno breme
Zlp=inv(conj(Slpu)); %izračun impedance pozitivnega zaporedja pas. bremena (z=x+iy)
PU
Ylp=inv(Zlp);
Zl0=1e20; %izračun impedance ničnega zaporedja pas. bremena (z=x+iy) PU
%% podatki za izračun kompenzacijskega filtra
% Ub04=0.41e3;
f1=189; % resončna frekvenca filtra 1 (Hz)
f2=235; % resončna frekvenca filtra 2 (Hz)
Q1=100; % faktor kvalitete filtra 1 (PU)
Q2=100; % faktor kvalitete filtra 2 (PU)
Qc1=0.55e-6; % nazivna moč filtra 1 (VAr)
Qc2=0.55e-6; % nazivna moč filtra 2 (VAr)
%izračun impedance filtra
p1=f1/f; % faktor izbrane frekvence 1
p2=f2/f; % faktor izbrane frekvence 2
% vse vrednosti impedanc filtrov so v PU
%izračun parametrov filtra 1
Xc1=(power(Ub04,2)/Qc1)/Zb04;
Xl1=Xc1/power(p1,2);
Xn1=sqrt(Xl1*Xc1);
R1=Xn1/Q1;
Qf1=(power(p1,2)/(power(p1,2)-1)*Qc1)/Sb04;
Zf_1=R1+1i*(Xl1-Xc1);
Yf_1=inv(Zf_1);
%izračun parametrov filtra 2
Xc2=(power(Ub04,2)/Qc2)/Zb04;
Xl2=Xc2/power(p2,2);

```

```

Xn2=sqrt(Xl2*Xc2);
R2=Xn2/Q2;
Qf2=(power(p2,2)/(power(p2,2)-1)*Qc2)/Sb04;
Zf_2=R2+1i*(Xl2-Xc2);
Yf_2=inv(Zf_2);
Yfp=(Yf_1+Yf_2);
Zfp=inv(Yfp);
fifp=imag(log(Zfp))*180/pi;
%% Parametri nelinearnega bremena
Pshnl=1e6;
Unl=0.4e3;
pfnl=0.9;
effnl=0.95;
Sinnl=1500e3;
lh(1)=100;
lh(2)=1.167;
lh(3)=5.149;
lh(4)=0.3929;
lh(5)=20.27;
lh(6)=0.3209;
lh(7)=9.269;
lh(8)=0.176;
lh(9)=3.093;
lh(10)=0.1312;
lh(11)=4.599;
lh(12)=0.086;
lh(13)=1.68;
lh(14)=0.1077;
lh(15)=1.338;
lh(16)=0.0559;
lh(17)=1.97;
lh(18)=0.060;
lh(19)=1.637;
lh(23)=1.065;
lh(25)=1.00;
lh(29)=0;
lh(31)=0;
lh(35)=0;
lh(37)=0;
lh(41)=0;
lh(43)=0;
lh(47)=0;
lh(49)=0;
lh(50)=0.00;
%%izračun parametrov nelinearnega bremena
Inl_1=Sinnl/(sqrt(3)*Ub04);
finl=acosd(pfnl);
Inel=Inl_1*(cosd(finl)+1i*sind(finl));
Inlb=Inl_1/lb04;
Snlp=Sinnl/Sb04*(cosd(finl)+1i*sind(finl));
Znlp=inv(conj(Snlp));
Ynlp=inv(Znlp);
%% Izračun padca napetosti na 0,4kV zbiralki ob priključenem bremenu
Ysk=(Ylp+Yfp+Ynlp);
fiysk=imag(log(Ysk))*180/pi;
% fiysk=atand(imag(Ysk)/real(Ysk));
Zsk=inv(Ysk)+(Zt2p+Zt1p+Zkbp);
fisk=imag(log(Zsk))*180/pi;
Usk=Ysk*Zsk;
Ubreman=1-abs(Usk);
Uzbp=roundn(Ubreman,-3);
Uzbo=1+Uzbp;
Uzb=Uzbo*Ub04;
%% Izračun tokov porabnikov zaradi padca napetosti na zbiralki

```

```

I1=(Usk)/Zlp;
I1a=abs(I1);
If1=(Uzbo)/Zfp;
If1a=abs(If1);
Inl1=(1)/Znlp;
Inl1a=abs(Inl1);
Isk=I1+If1+Inl1;
%% Izračun impedance v celotnem frekvenem področju
for h=2:1:50
    b(h)=h;
    if rem(h,3)==0
        %% izračun členov ki so večkratnik trejega harmonika
        %% (3,6,9,12,15,18,21,24,27,30,33,36,39,42,45,48)
        %% impedance omrežja
        Zom(h)=real(Znic110)+1i*imag(Znic110)* b(h);
        %% Uporabimo v primeru, kadar je potrebno izrisati impedančno
        %% karakteristiko kjer so 3n upoštevani kot pozitivno zaporedje.
        Yom(h)=inv(Zom(h));
        %% impedance transformatorja 110/21kV (Tr 1)
        Zt1(h)=real(Zt1p)+1i*imag(Zt1p)*b(h);
        Yt1(h)=inv(Zt1(h));
        %% impedance prenosnega voda
        Zkb(h)=real(Zkb0)+1i*imag(Zkb0)*b(h);
        Ykb(h)=inv(Zkb(h));
        %% impedance transformatorja 21/0,4 kV (Tr 2)
        Zt2(h)=real(Zt2p)+1i*imag(Zt2p)*b(h);
        Yt2(h)=inv(Zt2(h));
        %% Impedanca pasivnega bremena na 0,4 kV
        Zl(h)=real(Zlp)+1i*imag(Zlp)*b(h);
        Yl(h)=inv(Zl(h));
        %% Impedanca filtra 1
        Zq1(h)=R1+1i*(b(h)*Xl1-Xc1/b(h));
        Yq1(h)=inv(Zq1(h));
        %% Impedanca filtra 2
        Zq2(h)=R2+1i*(b(h)*Xl2-Xc2/b(h));
        Yq2(h)=inv(Zq2(h));
        Yq(h)=Yq1(h)+Yq2(h);
        %% harmoniki
        Inl(h)=Ih(h)/100*Inlb;
        Inla(h)=abs(Inl(h));
        Znl(h)=(real(Znlp)+1i*imag(Znlp)* b(h));
        Ynl(h)=inv(Znl(h));
        Ynl3(h)=inv(Znl(h));
    elseif rem(h,3)==1
        %% Izračun členov 3n-1 (2,5,8,11,14,17,20,23,26,29,32,35,38,41,44,47,50)
        %% impedance omrežja
        Zom(h)=real(Zomp)+1i*imag(Zomp)* b(h);
        Yom(h)=inv(Zom(h));
        %% impedance transformatorja 110/21kV (Tr 1)
        Zt1(h)=real(Zt1p)+1i*imag(Zt1p)*b(h);
        Yt1(h)=inv(Zt1(h));
        %% impedance prenosnega voda
        Zkb(h)=real(Zkbp)+1i*imag(Zkbp)*b(h);
        Ykb(h)=inv(Zkb(h));

```



```

%% impedanca transformatorja 21/0,4 kV (Tr 2)
Zt2(h)=real(Zt2p)+1i*imag(Zt2p)*b(h);
Yt2(h)=inv(Zt2(h));
%% Impedanca pasivnega bremena na 0,4 kV
Zl(h)=real(Zlp)+1i*imag(Zlp)*b(h);
Yl(h)=inv(Zl(h));
%% Impedanca filtra 1
Zq1(h)=R1+1i*(b(h)*Xl1-Xc1/b(h));
Yq1(h)=inv(Zq1(h));
%% Impedanca filtra 2
Zq2(h)=R2+1i*(b(h)*Xl2-Xc2/b(h));
Yq2(h)=inv(Zq2(h));
Yq(h)=0;
%% harmoniki
Inl(h)=lh(h)/100*Inlb;
Inla(h)=abs(Inl(h));
Znl(h)=(real(Znlp)+1i*imag(Znlp)* b(h));
Ynl(h)=inv(Znl(h));
Ynl3(h)=0;
elseif rem(h,3)==2
%% Izračun členov 3n+1 (1,4,7,10,13,16,19,22,25,28,33,34,37,40,43,46,49)
%% impedanca omrežja
Zom(h)=real(Zomp)+1i*imag(Zomp)* b(h);
Yom(h)=inv(Zom(h));
%% impedanca transformatorja 110/21kV (Tr 1)
Zt1(h)=real(Zt1p)+1i*imag(Zt1p)*b(h);
Yt1(h)=inv(Zt1(h));
%% impedanca prenosnega voda
Zkb(h)=real(Zkbp)+1i*imag(Zkbp)*b(h);
Ykb(h)=inv(Zkb(h));
%% impedanca transformatorja 21/0,4 kV (Tr 2)
Zt2(h)=real(Zt2p)+1i*imag(Zt2p)*b(h);
Yt2(h)=inv(Zt2(h));
%% Impedanca pasivnega bremena na 0,4 kV
Zl(h)=real(Zlp)+1i*imag(Zlp)*b(h);
Yl(h)=inv(Zl(h));
%% Impedanca filtra 1
Zq1(h)=R1+1i*(b(h)*Xl1-Xc1/b(h));
Yq1(h)=inv(Zq1(h));
%% Impedanca filtra 2
Zq2(h)=R2+1i*(b(h)*Xl2-Xc2/b(h));
Yq2(h)=inv(Zq2(h));
Yq(h)=0;
%% harmoniki
Inl(h)=lh(h)/100*Inlb;
Inla(h)=abs(Inl(h));
Znl(h)=(real(Znlp)+1i*imag(Znlp)* b(h));
Ynl(h)=inv(Znl(h));
Ynl3(h)=0;
end
%% Impedanca omrežja in transformatorja s strani 0,4 kV zbiralke
%% Impedanca omrežja, transformatorja 1, kablovoda in transformatorja 2
% s strani 0,4 kV zbiralke

```



```

% xlswrite('Analiza.xlsx',Vzbrms,'D5:D5');
% xlswrite('Analiza.xlsx',Uzb,'D6:D6');
% xlswrite('Analiza.xlsx',Uzbo,'D7:D7');
% xlswrite('Analiza.xlsx',V400,'D8:D57');
% transformator
Ito=abs(Ysk/Uzbo);
Itthd=roundn(abs(It2)/Ito,-4); % tok višjiharmonskih komponent transformatorja
Itthdi=sqrt(sum(power(Itthd,2))); %THDi pasivnega transformatorja
Itthd3=[0 0 Itthd(3) 0 0 Itthd(6) 0 0 Itthd(9) 0 0 Itthd(12) 0 0 Itthd(15) 0 0 Itthd(18) 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0];
Itthdi3=(sqrt(sum(power(Itthd,2)-power(Itthd3,2)))); %THDi transformatorja brez 3n harmonikov
Itrms=Ib04*Ito*sqrt(sum(power(Itthd,2))+100^2)/100; % Irms transformatorja
Itpu=Ito; % PU vrednost toka transformatorja
Ifu=Itpu*Ib04; %Efektivna vrednost toka osnovne harmonskega harmonika
transformatorja
Kt2a=(sum(Kt2,2)+1)/(1+(Itthdi/100)^2);
D=1.15/(1+0.15*Kt2a);
% xlswrite('Analiza.xlsx',Itthdi,'E3:E3');
% xlswrite('Analiza.xlsx',Itthdi3,'E4:E4');
% xlswrite('Analiza.xlsx',Itrms,'E5:E5');
% xlswrite('Analiza.xlsx',Ifu,'E6:E6');
% xlswrite('Analiza.xlsx',Itpu,'E7:E7');
% xlswrite('Analiza.xlsx',Itthd,'E8:E57');
% xlswrite('Analiza.xlsx',D,'E58:E58');
% %filter
Ifo=abs(Yfp*Uzbo);
Ifthd=roundn(abs(If)/Ifo,-4); % tok višjiharmonskih komponent transformatorja
Ifthdi=sqrt(sum(power(Ifthd,2))); %THDi pasivnega transformatorja
Ifthd3=[0 0 Ifthd(3) 0 0 Ifthd(6) 0 0 Ifthd(9) 0 0 Ifthd(12) 0 0 Ifthd(15) 0 0 Ifthd(18) 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0];
Ifthdi3=(sqrt(sum(power(Ifthd,2)-power(Ifthd3,2)))); %THDi transformatorja brez 3n harmonikov %THDi
transformatorja brez 3n harmonikov
Ifrms=Ib04*(Ifo)*sqrt(sum(power(Ifthd,2))+100^2)/100; % Irms transformatorja
Ifpu=Ifo; % PU vrednost toka transformatorja
Ifu=Ifpu*Ib04;
% xlswrite('Analiza.xlsx',Ifthdi,'F3:F3');
% xlswrite('Analiza.xlsx',Ifthdi3,'F4:F4');
% xlswrite('Analiza.xlsx',Ifrms,'F5:F5');
% xlswrite('Analiza.xlsx',Ifu,'F6:F6');
% xlswrite('Analiza.xlsx',Ifpu,'F7:F7');
% xlswrite('Analiza.xlsx',Ifthd,'F8:F57');
%pasivno breme
Ilo=abs(Ylp/Uzbo);
Ilthd=roundn(abs(Il)/Ilo,-4); % tok višjiharmonskih komponent pasivnega bremena
Ilthdi=sqrt(sum(power(Ilthd,2))); %THDi pasivnega bremena
Ilthd3=[0 0 Ilthd(3) 0 0 Ilthd(6) 0 0 Ilthd(9) 0 0 Ilthd(12) 0 0 Ilthd(15) 0 0 Ilthd(18) 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0];
Ilthdi3=(sqrt(sum(power(Ilthd,2)-power(Ilthd3,2))));
% Ilthdi3=(sqrt(sum(power(Ilthd,2)-(Ilthd(3))^2-(Ilthd(6))^2-(Ilthd(9))^2-(Ilthd(12))^2-(Ilthd(15))^2-
(Ilthd(18))^2))); %THDi pasivnega bremena brez 3n harmonikov
Ilrms=Ib04*(Ilo)*sqrt(sum(power(Ilthd,2))+100^2)/100; % Irms pasivnega bremena
Ilpu=Ilo; % PU vrednost toka pasivnega bremena
Ifu=Ilpu*Ib04; %Efektivna vrednost toka osnovne harmonskega harmonika
pasivnega bremena
% xlswrite('Analiza.xlsx',Ilthdi,'H3:H3');
% xlswrite('Analiza.xlsx',Ilthdi3,'H4:H4');
% xlswrite('Analiza.xlsx',Ilrms,'H5:H5');
% xlswrite('Analiza.xlsx',Ifu,'H6:H6');
% xlswrite('Analiza.xlsx',Ilpu,'H7:H7');
% xlswrite('Analiza.xlsx',Ilthd,'H8:H57');
% izračun zbiralčnih napetosti
V20=roundn((U20),-4); % napetost višjiharmonskih komponent zbiralk 33kV
THDv20=sqrt(sum(power(V20,2)));

```

```
V203=[0 0 V20(3) 0 0 V20(6) 0 0 V20(9) 0 0 V20(12) 0 0 V20(15) 0 0 V20(18) 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0];
THDv203=sqrt(sum(power(V20,2)-power(V203,2)));
Vzbrms20=Ub20*sqrt(1+(THDv20/100)^2);
% xlsxwrite('Analiza.xlsx',THDv20,'I3:I3');
% xlsxwrite('Analiza.xlsx',THDv20,'I4:I4');
% xlsxwrite('Analiza.xlsx',Vzbrms20,'I5:I5');
% xlsxwrite('Analiza.xlsx',Ub20,'I6:I6');
% xlsxwrite('Analiza.xlsx',Ub20/Ub20,'I7:I7');
% xlsxwrite('Analiza.xlsx',V20,'I8:I8');
%% Obilka signalov
%napetost Trafo 2
dur=(1/f)*2;
omega=2*pi*f;
lh1(1*f)=Uzbo;
lh1(2*f)=V400(2)/100;
lh1(13*f)=V400(3)/100;
lh1(4*f)=V400(4)/100;
lh1(5*f)=V400(5)/100;
lh1(6*f)=V400(6)/100;
lh1(7*f)=V400(7)/100;
lh1(8*f)=V400(8)/100;
lh1(9*f)=V400(9)/100;
lh1(10*f)=V400(10)/100;
lh1(11*f)=V400(11)/100;
lh1(12*f)=V400(12)/100;
lh1(13*f)=V400(13)/100;
lh1(14*f)=V400(14)/100;
lh1(15*f)=V400(15)/100;
lh1(16*f)=V400(16)/100;
lh1(17*f)=V400(17)/100;
lh1(18*f)=V400(18)/100;
lh1(19*f)=V400(19)/100;
lh1(23*f)=V400(23)/100;
lh1(25*f)=V400(25)/100;
t=0:0.0001:dur;
x=(0:0.0001:dur)*omega*90/pi;
y=sin(1*omega*t+deg2rad(fisk))*lh1(1*f)+sin(2*omega*t+deg2rad(fi04(2)))*lh1(2*f)+sin(3*omega*t+deg2rad(fi04(3)))*lh1(3*f)+sin(4*omega*t+deg2rad(fi04(4)))*lh1(4*f)+sin(5*omega*t+deg2rad(fi04(5)))*lh1(5*f)+...
sin(6*omega*t+deg2rad(fi04(6)))*lh1(6*f)+sin(7*omega*t+deg2rad(fi04(7)))*lh1(7*f)+sin(8*omega*t+deg2rad(fi04(8)))*lh1(8*f)+sin(9*omega*t+deg2rad(fi04(9)))*lh1(9*f)+sin(10*omega*t+deg2rad(fi04(10)))*lh1(10*f)+...
sin(11*omega*t+deg2rad(fi04(11)))*lh1(11*f)+sin(12*omega*t+deg2rad(fi04(12)))*lh1(12*f)+sin(13*omega*t+deg2rad(fi04(13)))*lh1(13*f)+sin(14*omega*t+deg2rad(fi04(14)))*lh1(14*f)+sin(15*omega*t+deg2rad(fi04(15)))*lh1(15*f)+...
sin(16*omega*t+deg2rad(fi04(16)))*lh1(16*f)+sin(17*omega*t+deg2rad(fi04(17)))*lh1(17*f)+sin(18*omega*t+deg2rad(fi04(18)))*lh1(18*f)+sin(19*omega*t+deg2rad(fi04(19)))*lh1(19*f)+sin(23*omega*t+deg2rad(fi04(23)))*lh1(23*f)+...
sin(25*omega*t+deg2rad(fi04(25)))*lh1(25*f);
plot(x,y,'r'),hold on,grid on,axis([0 360 -1.1 1.1]),set(gca,'XTick',0:30:360);
diary off;
%tok Trafo 2
dur=(1/f)*2;
omega=2*pi*f;
lh(1*f)=1;
lh(2*f)=ltthd(2)/100;
lh(3*f)=ltthd(3)/100;
lh(4*f)=ltthd(4)/100;
lh(5*f)=ltthd(5)/100;
lh(6*f)=ltthd(6)/100;
lh(7*f)=ltthd(7)/100;
lh(8*f)=ltthd(8)/100;
```

```

lh(9*f)=ltthd(9)/100;
lh(10*f)=ltthd(10)/100;
lh(11*f)=ltthd(11)/100;
lh(12*f)=ltthd(12)/100;
lh(13*f)=ltthd(13)/100;
lh(14*f)=ltthd(14)/100;
lh(15*f)=ltthd(15)/100;
lh(16*f)=ltthd(16)/100;
lh(17*f)=ltthd(17)/100;
lh(18*f)=ltthd(18)/100;
lh(19*f)=ltthd(19)/100;
lh(23*f)=ltthd(23)/100;
lh(25*f)=ltthd(25)/100;
t=0:0.0001:dur;
x=(0:0.0001:dur)*omega*90/pi;
y=sin(1*omega*t+deg2rad(fiysk))*lh(1*f)+sin(2*omega*t+deg2rad(ltthd(2)))*lh(2*f)+sin(3*omega*t+deg2rad(ltthd(3)))*lh(3*f)+sin(4*omega*t+deg2rad(ltthd(4)))*lh(4*f)+sin(5*omega*t+deg2rad(ltthd(5)))*lh(5*f)+...
sin(6*omega*t+deg2rad(ltthd(6)))*lh(6*f)+sin(7*omega*t+deg2rad(ltthd(7)))*lh(7*f)+sin(8*omega*t+deg2rad(ltthd(8)))*lh(8*f)+sin(9*omega*t+deg2rad(ltthd(9)))*lh(9*f)+sin(10*omega*t+deg2rad(ltthd(10)))*lh(10*f)+...
sin(11*omega*t+deg2rad(ltthd(11)))*lh(11*f)+sin(12*omega*t+deg2rad(ltthd(12)))*lh(12*f)+sin(13*omega*t+deg2rad(ltthd(13)))*lh(13*f)+sin(14*omega*t+deg2rad(ltthd(14)))*lh(14*f)+sin(15*omega*t+deg2rad(ltthd(15)))*lh(15*f)+...
sin(16*omega*t+deg2rad(ltthd(16)))*lh(16*f)+sin(17*omega*t+deg2rad(ltthd(17)))*lh(17*f)+sin(18*omega*t+deg2rad(ltthd(18)))*lh(18*f)+sin(19*omega*t+deg2rad(ltthd(19)))*lh(19*f)+sin(23*omega*t+deg2rad(ltthd(23)))*lh(23*f)+...
sin(25*omega*t+deg2rad(ltthd(25)))*lh(25*f);
plot(x,y,'b'),hold on,grid on,axis([0 360 -1.1 1.1]),set(gca,'XTick',0:30:360);
xlabel({'\iti \omegat,°'},'FontSize',16);
ylabel({'\itu_z_b_4_h'},'\itu_z_b_4_h'},'FontSize',16);
% title('Oblika napetosti in toka v priključni točki','FontSize',20);
set (legend,'Location','BestOutside');
legend1=legend('tok Tr 2');
set(legend1,'Location','BestOutside');
legend({'\itu_z_b_4_h'},'\itu_z_b_4_h'},'FontSize',16)
diary off;

```

## B.8

### Programska koda v programu Matlab za izris amplitudnih karakteristik 6.3 do 6.7.

```

clc
clear all
%podatki potrebni za izračun parametrov VN omrežja
%% Nazivni parametri VN omrežja
f=50; %nazivna frekvenca omrežja
Uvn=110e3; %Nazivna napetost VN omrežja
lk3fvn=4887/2; %podana efektivna vrednost tripolnega kratkostičnega toka
lk1fvn=2814/2; %podana efektivna vrednost enofaznega zemeljskega kratkega stika
XRvn=10; %podano razmerje med upornostjo in induktivnostjo omrežja
%% Izračun impedance VN omrežja
Sb110=100e6; %bazna vrednost VN omrežja (VA)
Ub110=110e3; %bazna vrednost napetosti VN omrežja (V)
lb110=Sb110/(sqrt(3)*Ub110); %bazna vrednost toka VN omrežja (A)
Zb110=Ub110/(sqrt(3)*lb110); %bazna impedanca VN omrežja (OHM)
%% Izračun parametrov na VN zbiralki
fi3f=-atan(XRvn)*180/pi; % izračunan kot trifaznega kratkega stika v (°)
fi1f=-atan(XRvn)*180/pi; % izračunan kot enofaznega kratkega stika v (°)
lk3=lk3fvn*(cosd(fi3f)+1*1i*sind(fi3f)); %3f kratkostični tok podan v trigonometrični obliki
lk1=lk1fvn*(cosd(fi1f)+1*1i*sind(fi1f)); %1f kratkostični tok podan v trigonometrični obliki

```

```

Ik3pu=Ik3fvn*(cosd(fi3f)+1*1i*sind(fi3f))/lb110; %3f kratkostični tok podan v sistemu enotinih vrednosti
(z=x+iy)
Ik1pu=Ik1fvn*(cosd(fi1f)+1*1i*sind(fi1f))/lb110; %1f kratkostični tok podan v sistemu enotinih vrednosti
Ika3=abs(Ik3pu); %3f absolutna vrednost kratkostičnega toka, podan v sistemu
enotinih vrednosti
Ika1=abs(Ik1pu); %1f absolutna vrednost kratkostičnega toka, podan v sistemu
enotinih vrednosti
fi3kf=imag(log(Ik3))*180/pi; % izračunan kot trifaznega kratkega stika v (°)
fi1kf=imag(log(Ik1))*180/pi; % izračunan kot enofaznega kratkega stika v (°)
%% Izračun kratkostične moči na VN zbiralki
Sk3fpu=sqrt(3)*Ub110*Ik3/Sb110; %3f kratkostična moč podana v trigonometrični obliki PU
Ska3=abs(Sk3fpu); %3f kratkostična moč podana v absolutni vrednosti PU
Sk1fpu=sqrt(3)*Ub110*Ik1/Sb110; %1f kratkostična moč podana v trigonometrični obliki PU
Ska1=abs(Sk1fpu); %1f kratkostična moč podana v absolutni vrednosti PU
%% izračun impedance pozitivnega in ničnega zaporedja VN omrežja
Zomp=1/(Ik3pu); %izračun impedance pozitivnega zaporedja omrežja (z=x+iy)
Znic110=(3/Ik1pu)-2*Zomp; %izračun impedance ničnega zaporedja omrežja (z=x+iy)
%% Izračun impedance SN omrežja
Sb20=100e6; %bazna vrednost SN omrežja (VA)
Ub20=21e3; %bazna vrednost napetosti SN omrežja (V)
Ib20=Sb20/(sqrt(3)*Ub20); %bazna vrednost toka SN omrežja (A)
Zb20=Ub20/(sqrt(3)*Ib20); %bazna impedanca SN omrežja (OHM)
%% podatki za izračun parametrov nadomestnega modela transformatorja 110/21 kV
Usn=21e3; %Nazivna napetost sekundarne strani transformatorja (V)
Str1=31.5e6; %Nazivna moč sekundarne strani transformatorja (VA)
Ztr1=0.45+1i*13.1; %Nazivna impedanca transformatorja (%)
Rg=80; %Upornost ozemljitve zvezdišča (OHM)
% Izračun impedance pozitivnega in ničnega zaporedja za Tr 110/21
Zt1p=((real(Ztr1)+1i*imag(Ztr1))*Sb20)/(100*Str1); %izračun impedance pozitivnega zaporedja transf (z=x+iy)
PU
Zt10=Zt1p+(3*Rg/Zb20); %izračun impedance ničnega zaporedja transf (z=x+iy)
PU
%% podatki z izračun parametrov nadomestnega modela kablovoda KB1
Rkb1=0.206; %upornost na km
Lkb1=0.39e-3; %induktivnost na km
l=3; %dolžina v km
Rkb0=1.347;
Lkb0=2.12e-3;
Zkbp=(Rkb1+1i*2*pi*f*Lkb1)*l/Zb20;
Zkb0=(Rkb0+1i*2*pi*f*Lkb0)*l/Zb20;
%% Izračun impedance NN omrežja
Sb04=100e6; %bazna vrednost NN omrežja (VA)
Ub04=0.4e3; %bazna vrednost napetosti NN omrežja (V)
Ib04=Sb04/(sqrt(3)*Ub04); %bazna vrednost toka NN omrežja (A)
Zb04=Ub04/(sqrt(3)*Ib04); %bazna impedanca NN omrežja (OHM)
%% podatki za izračun parametrov nadomestnega modela transformatorja 21/04 kV
Unn=0.4e3; %Nazivna napetost sekundarne strani transformatorja (V)
Str2=2.5e6; %Nazivna moč sekundarne strani transformatorja (VA)
Ztr2=(0.84+1i*6.04); %Nazivna impedanca transformatorja (%)
Rg=0; %Upornost ozemljitve zvezdišča (OHM)
% Izračun impedance pozitivnega in ničnega zaporedja za Tr 21/04
Zt2p=((real(Ztr2)+1i*imag(Ztr2))*Sb04)/(100*Str2); %izračun impedance pozitivnega zaporedja transf (z=x+iy)
PU
Zt20=Zt2p+(3*Rg/Zb04); %izračun impedance ničnega zaporedja transf (z=x+iy)
PU
Z4p=Zomp+Zt1p+Zkbp+Zt2p;
fi4p=imag(log(Z4p))*180/pi;
%% podatki za izračun pasivnega bremena
Ul=0.4e3; %nazivna napetost pasivnega bremena (V)
Sl=1.0e6; %nazivna moč izbranega pasivnega bremena (VA)
pfl=0.95; % cos fi izbranega pasivnega bremena
%izračun parametrov pasivnega bremena
fil=acosd(pfl); % izračun faznega kota pasivnega bremena (°)
Slpu=(Sl/Sb04)*(cos(fil)+1i*sin(fil)); % izračun nazivne moči pasivnega bremena v PU

```

```

llp=(Sl*(cos(fil)+1i*sin(fil)))/(sqrt(3)*Ub04);
% Izračun impedance pozitivnega in ničnega zaporedja za pasivno breme
Zlp=inv(Slpu); %izračun impedance pozitivnega zaporedja pas. bremena (z=x+iy) PU
Zl0=1e20; %izračun impedance ničnega zaporedja pas. bremena (z=x+iy) PU
%% podatki za izračun kompenzacijskega filtra
% Ub04=0.41e3;
f1=189; % resončna frekvenca filtra 1 (Hz)
f2=235; % resončna frekvenca filtra 2 (Hz)
Q1=100; % faktor kvalitete filtra 1 (PU)
Q2=100; % faktor kvalitete filtra 2 (PU)
Qc1=0.55e6; % nazivna moč filtra 1 (VAr)
Qc2=0.55e6; % nazivna moč filtra 2 (VAr)
%izračun impedance filtra
p1=f1/f; % faktor izbrane frekvence 1
p2=f2/f; % faktor izbrane frekvence 2
% vse vrednosti impedanc filtrov so v PU
%izračun parametrov filtra 1
Xc1=(power(Ub04,2)/Qc1)/Zb04;
Xl1=Xc1/power(p1,2);
Xn1=sqrt(Xl1*Xc1);
R1=Xn1/Q1;
Qf1=(power(p1,2)/(power(p1,2)-1)*Qc1)/Sb04;
Zf_1=R1+1i*(Xl1-Xc1);
Yf_1=inv(Zf_1);
%izračun parametrov filtra 2
Xc2=(power(Ub04,2)/Qc2)/Zb04;
Xl2=Xc2/power(p2,2);
Xn2=sqrt(Xl2*Xc2);
R2=Xn2/Q2;
Qf2=(power(p2,2)/(power(p2,2)-1)*Qc2)/Sb04;
Zf_2=R2+1i*(Xl2-Xc2);
Yf_2=inv(Zf_2);
Yfp=(Yf_1+Yf_2);
fifp=imag(log(Yfp))*180/pi;
%% Parametri nelinearnega bremena
Pshnl=1282.5e3;
Unl=0.4e3;
pfnl=0.9;
effnl=0.95;
Sinnl=1500e3;
lh(50)=100;
lh(100)=1.167;
lh(150)=5.149;
lh(200)=0.3929;
lh(250)=25.27;
lh(300)=0.3209;
lh(350)=19.269;
lh(400)=0.176;
lh(450)=13.093;
lh(500)=0.1312;
lh(550)=14.599;
lh(600)=0.086;
lh(650)=1.68;
lh(700)=0.1077;
lh(750)=1.338;
lh(800)=0.0559;
lh(850)=1.97;
lh(900)=0.060;
lh(950)=1.637;
lh(1150)=1.065;
lh(1250)=1.00;
lh(1450)=0;
lh(1550)=0;
lh(1750)=0;

```

```

lh(1850)=0;
lh(2050)=0;
lh(2150)=0;
lh(2350)=0;
lh(2450)=0;
lh(2500)=0.00;
%izračun parametrov nelinearnega bremena
Inl_1=Sinnl/(sqrt(3)*Ub04);
finl=-acosd(pfnl);
Inel=Inl_1*(cosd(finl)+1i*sind(finl));
Inlb=Inl_1/lb04;
Snlp=Sinnl/Sb04*(cosd(finl)+1i*sind(finl));
Znlp=inv(Snlp);
Ynlp=Snlp;
ltp=llp+Yfp+Ynlp;
fitp=imag(log(ltp))*180/pi;
%% Izračun impedance v celotnem frekvenčnem področju
for h=1:1:2500
    b(h)=h/50;
    if rem(h,3)==0
        %% izračun členov ki so večkratnik trejega harmonika
        %% (3,6,9,12,15,18,21,24,27,30,33,36,39,42,45,48)
        %% impedanca omrežja
        Zom(h)=real(Zomp)+1i*imag(Zomp)*b(h);
        Zoma(h)=abs(Zom(h));
        Yom(h)=inv(Zom(h));
        Yoma(h)=abs(Yom(h));
        %% impedanca transformatorja 110/21kV (Tr 1)
        Zt1(h)=real(Zt1p)+1i*imag(Zt1p)*b(h);
        Zt1a(h)=abs(Zt1(h));
        Yt1(h)=inv(Zt1(h));
        Yt1a(h)=abs(Yt1(h));
        %% impedanca prenosnega voda
        Zkb(h)=real(Zkbp)+1i*imag(Zkbp)*b(h);
        Zkba(h)=abs(Zkb(h));
        Ykb(h)=inv(Zkb(h));
        Ykba(h)=abs(Ykb(h));
        %% impedanca transformatorja 21/0,4 kV (Tr 2)
        Zt2(h)=real(Zt2p)+1i*imag(Zt2p)*b(h);
        Zt2a(h)=abs(Zt2(h));
        Yt2(h)=inv(Zt2(h));
        Yt2a(h)=abs(Yt2(h));
        %% Impedanca pasivnega bremena na 0,4 kV
        Zl(h)=real(Zlp)+1i*imag(Zlp)*b(h);
        Zla(h)=abs(Zl(h));
        Yl(h)=inv(Zl(h));
        Yla(h)=abs(Yl(h));
        %% Impedanca filtra 1
        Zq1(h)=R1+1i*(b(h)*Xl1-Xc1/b(h));
        Zq1a(h)=abs(Zq1(h));
        Yq1(h)=inv(Zq1(h));
        Yq1a(h)=abs(Yq1(h));
        fiq1(h)=imag(log(Zq1(h)))*180/pi;
        %% Impedanca filtra 2
        Zq2(h)=R2+1i*(b(h)*Xl2-Xc2/b(h));

```



```

Zq2a(h)=abs(Zq2(h));
Yq2(h)=inv(Zq2(h));
Yq2a(h)=abs(Yq2(h));
fiq2(h)=imag(log(Zq2(h)))*180/pi;
%% harmoniki
Inl(h)=lh(h)/100*lnlb;
Inla(h)=abs(Inl(h));
Znl(h)=(real(Znlp)+1i*imag(Znlp)* b(h));
Ynl(h)=inv(Znl(h));
elseif rem(h,3)==1
    %% Izračun členov 3n-1 (2,5,8,11,14,17,20,23,26,29,32,35,38,41,44,47,50)
    %% impedanca omrežja
Zom(h)=real(Zomp)+1i*imag(Zomp)* b(h);
Zoma(h)=abs(Zom(h));
Yom(h)=inv(Zom(h));
Yoma(h)=abs(Yom(h));
%% impedanca transformatorja 110/21kV (Tr 1)
Zt1(h)=real(Zt1p)+1i*imag(Zt1p)*b(h);
Zt1a(h)=abs(Zt1(h));
Yt1(h)=inv(Zt1(h));
Yt1a(h)=abs(Yt1(h));
%% impedanca prenosnega voda
Zkb(h)=real(Zkbp)+1i*imag(Zkbp)*b(h);
Zkba(h)=abs(Zkb(h));
Ykb(h)=inv(Zkb(h));
Ykba(h)=abs(Ykb(h));
%% impedanca transformatorja 21/0,4 kV (Tr 2)
Zt2(h)=real(Zt2p)+1i*imag(Zt2p)*b(h);
Zt2a(h)=abs(Zt2(h));
Yt2(h)=inv(Zt2(h));
Yt2a(h)=abs(Yt2(h));
%% Impedanca pasivnega bremena na 0,4 kV
Zl(h)=real(Zlp)+1i*imag(Zlp)*b(h);
Zla(h)=abs(Zl(h));
Yl(h)=inv(Zl(h));
Yla(h)=abs(Yl(h));
%% Impedanca filtra 1
Zq1(h)=R1+1i*(b(h)*Xl1-Xc1/b(h));
Zq1a(h)=abs(Zq1(h));
Yq1(h)=inv(Zq1(h));
Yq1a(h)=abs(Yq1(h));
fiq1(h)=imag(log(Zq1(h)))*180/pi;
%% Impedanca filtra 2
Zq2(h)=R2+1i*(b(h)*Xl2-Xc2/b(h));
Zq2a(h)=abs(Zq2(h));
Yq2(h)=inv(Zq2(h));
Yq2a(h)=abs(Yq2(h));
fiq2(h)=imag(log(Zq2(h)))*180/pi;
%% harmoniki
Inl(h)=lh(h)/100*lnlb;
Inla(h)=abs(Inl(h));

```

```

Znl(h)=(real(Znlp)+1i*imag(Znlp)* b(h));
Ynl(h)=inv(Znl(h));
elseif rem(h,3)==2
    %% Izračun členov 3n+1 (1,4,7,10,13,16,19,22,25,28,33,34,37,40,43,46,49)
    %% impedanca omrežja
Zom(h)=real(Zomp)+1i*imag(Zomp)* b(h);
%   Uporabimo v primeru, kadar je potrebno izrisati impedančno
%   karakteristiko kjer so 3n upoštevani kot pozitivno zaporedje.
Zoma(h)=abs(Zom(h));
Yom(h)=inv(Zom(h));
Yoma(h)=abs(Yom(h));
%% impedanca transformatorja 110/21kV (Tr 1)
Zt1(h)=real(Zt1p)+1i*imag(Zt1p)*b(h);
Zt1a(h)=abs(Zt1(h));
Yt1(h)=inv(Zt1(h));
Yt1a(h)=abs(Yt1(h));
%% impedanca prenosnega voda
Zkb(h)=real(Zkbp)+1i*imag(Zkbp)*b(h);
Zkba(h)=abs(Zkb(h));
Ykb(h)=inv(Zkb(h));
Ykba(h)=abs(Ykb(h));
%% impedanca transformatorja 21/0,4 kV (Tr 2)
Zt2(h)=real(Zt2p)+1i*imag(Zt2p)*b(h);
Zt2a(h)=abs(Zt2(h));
Yt2(h)=inv(Zt2(h));
Yt2a(h)=abs(Yt2(h));
%% Impedanca pasivnega bremena na 0,4 kV
Zl(h)=real(Zlp)+1i*imag(Zlp)*b(h);
Zla(h)=abs(Zl(h));
Yl(h)=inv(Zl(h));
Yla(h)=abs(Yl(h));
%% Impedanca filtra 1
Zq1(h)=R1+1i*(b(h)*Xl1-Xc1/b(h));
Zq1a(h)=abs(Zq1(h));
Yq1(h)=inv(Zq1(h));
Yq1a(h)=abs(Yq1(h));
fiq1(h)=imag(log(Zq1(h)))*180/pi;
%% Impedanca filtra 2
Zq2(h)=R2+1i*(b(h)*Xl2-Xc2/b(h));
Zq2a(h)=abs(Zq2(h));
Yq2(h)=inv(Zq2(h));
Yq2a(h)=abs(Yq2(h));
fiq2(h)=imag(log(Zq2(h)))*180/pi;
    %% harmoniki
Inl(h)=Ih(h)/100*Inlb;
Inla(h)=abs(Inl(h));
Znl(h)=(real(Znlp)+1i*imag(Znlp)* b(h));
Ynl(h)=inv(Znl(h));
end
%% Impedanca omrežja, transformatorja 1, kablovoda in transformatorja 2
%   s strani 0,4 kV zbiralke
%% Izračun impedance na 0,4 kV zbiralki

```

```

Z400(h)=Zom(h)+Zt1(h)+Zkb(h)+Zt2(h);
Z400a(h)=Zoma(h)+Zt1a(h)+Zkba(h)+Zt2a(h);
Y400(h)=inv(Z400(h));
Y400a(h)=inv(Z400a(h));
fi400(h)=imag(log(Z400(h)))*180/pi;
%% Skupna impedanca filtra
%skupna impedanca filtra
Yf(h)=(Yq1(h)+Yq2(h));
Yfa(h)=abs(Yf(h));
Zf(h)=inv(Yf(h));
Zfa(h)=abs(Zf(h));
fif(h)=imag(log(Zf(h)))*180/pi;
%% Impedanca s strani nelinearnega bremena
Yeq(h)=Yl(h)+Yf(h)+Y400(h);
Zeq(h)=inv(Yeq(h));
Zeqa(h)=abs(Zeq(h));
fiq(h)=imag(log(Zeq(h)))*180/pi;
end
%% Izris karakteristik izbranega modela
FontName='Times';
FontSize=12;
LineWidth=12;
FontSizeCase=12;
FontAngle='Italic';
Location='Best';
%figure(01) %% Izris impedance in admittance VN omrežja
plot(b,Zeqa,'b'),grid on,axis([1 25 0 110]);
hold on;
plot(b,Z400a,'r'),grid on,axis([1 25 0 110]);
xlabel('h-ti harmonik');
ylabel({'\midZ_z_b_4\mid','\midZ_e_q\mid','[\Omega]'});
legend({'impedanca Z_e_q','impedanca Z_z_b_4','Location',Location,'FontAngle',FontAngle});
hold on;

```





Fakulteta za elektrotehniko,  
računalništvo in informatiko  
Smetanova ulica 17  
2000 Maribor, Slovenija



## IZJAVA O AVTORSTVU

Spodaj podpisani/-a Klemen Rebol  
z vpisno številko 93571338  
sem avtor/-ica diplomskega dela z naslovom: \_\_\_\_\_  
Analiza harmonskega popačenja napetosti v industrijskem elektroenergetskem  
omrežju  
*(naslov diplomskega dela)*

S svojim podpisom zagotavljam, da:

- sem diplomsko delo izdelal/-a samostojno pod mentorstvom (naziv, ime in priimek)

red. prof. dr. GORAZD ŠTUMBERGER  
in somentorstvom (naziv, ime in priimek)

doc. dr. KLEMEN DEŽELAK

- so elektronska oblika diplomskega dela, naslov (slov., angl.), povzetek (slov., angl.) ter ključne besede (slov., angl.) identični s tiskano obliko diplomskega dela.
- soglašam z javno objavo elektronske oblike diplomskega dela v DKUM.

V Mariboru, dne 11. 6. 2015

Podpis avtorja/-ice:





Univerza v Mariboru

Fakulteta za elektrotehniko,  
računalništvo in informatiko

Smetanova ulica 17  
2000 Maribor, Slovenija



## IZJAVA O USTREZNOSTI ZAKLJUČNEGA DELA

Podpisani mentor :

red. prof. dr. GORAZD ŠTUMBERGER

(ime in priimek mentorja)

in somentor (eden ali več, če obstajata):

doc. dr. KLEMEN DEŽELAK

(ime in priimek somentorja)

Izjavljam (-va), da je študent

Ime in priimek: KLEMEN REBOL

Vpisna številka: 93571338

Na programu: VS ELEKTROTEHNIKA

izdelal zaključno delo z naslovom:

Analiza harmonskega popačenja napetosti v industrijskem elektroenergetskem omrežju

(naslov zaključnega dela v slovenskem in angleškem jeziku)

Analysis of voltage harmonic distortion in an industrial electricity network

v skladu z odobreno temo zaključnega dela, Navodilih o pripravi zaključnih del in mojimi (najinimi oziroma našimi) navodili.

Preveril (-a, -i) in pregledal (-a, -i) sem (sva, smo) poročilo o plagiatorstvu.

Datum in kraj:

9.6.2015, Maribor

Podpis mentorja: \_\_\_\_\_

Gorazd Štumberger

Datum in kraj:

9.6.2015, Maribor

Podpis somentorja (če obstaja):

M. M.

Priloga:

- Poročilo o preverjanju podobnosti z drugimi deli.«







Univerza v Mariboru

Fakulteta za elektrotehniko,  
računalništvo in informatiko

Smetanova ulica 17  
2000 Maribor, Slovenija



## IZJAVA O ISTOVETNOSTI TISKANE IN ELEKTRONSKE VERZIJE ZAKLJUČNEGA DELA IN OBJAVI OSEBNIH PODATKOV DIPLOMANTOV

Ime in priimek avtorja-ice: KLEMEN REBOL

Vpisna številka: 93571338

Študijski program: VS ELEKTROTEHNIKA

Naslov zaključnega dela: Analiza harmonskega popačenja napetosti v industrijskem  
elektroenergetskem omrežju

Mentor: red. prof. dr. GORAZD ŠTUMBERGER

Somentor: doc. dr. KLEMEN DEŽELAK

Podpisani-a KLEMEN REBOL izjavljam, da sem za potrebe arhiviranja oddal elektronsko verzijo zaključnega dela v Digitalno knjižnico Univerze v Mariboru. Zaključno delo sem izdelal-a sam-a ob pomoči mentorja. V skladu s 1. odstavkom 21. člena Zakona o avtorskih in sorodnih pravicah dovoljujem, da se zgoraj navedeno zaključno delo objavi na portalu Digitalne knjižnice Univerze v Mariboru.

Tiskana verzija zaključnega dela je istovetna z elektronsko verzijo elektronski verziji, ki sem jo oddal za objavo v Digitalno knjižnico Univerze v Mariboru.

Zaključno delo zaradi zagotavljanja konkurenčne prednosti, varstva industrijske lastnine ali tajnosti podatkov naročnika: \_\_\_\_\_ ne sme biti javno dostopno do \_\_\_\_\_ (datum odloga javne objave ne sme biti daljši kot 3 leta od zagovora dela).

Podpisani izjavljam, da dovoljujem objavo osebnih podatkov, vezanih na zaključek študija (ime, priimek, leto in kraj rojstva, datum zaključka študija, naslov zaključnega dela), na spletnih straneh in v publikacijah UM.

Datum in kraj: 11.6.2015, Maribor Podpis avtorja-ice: Rebol Kl

Podpis mentorja: \_\_\_\_\_  
(samo v primeru, če delo ne sme biti javno dostopno)

Podpis odgovorne osebe naročnika in žig: \_\_\_\_\_  
(samo v primeru, če delo ne sme biti javno dostopno)