

AGH

Energoelektronika

Temat projektu:
Trójfazowy mostek tyrystorowy

Projekt wykonali:

Jakub Cios
Maciej Duda

AGH, Kraków 19.11.2023 r.

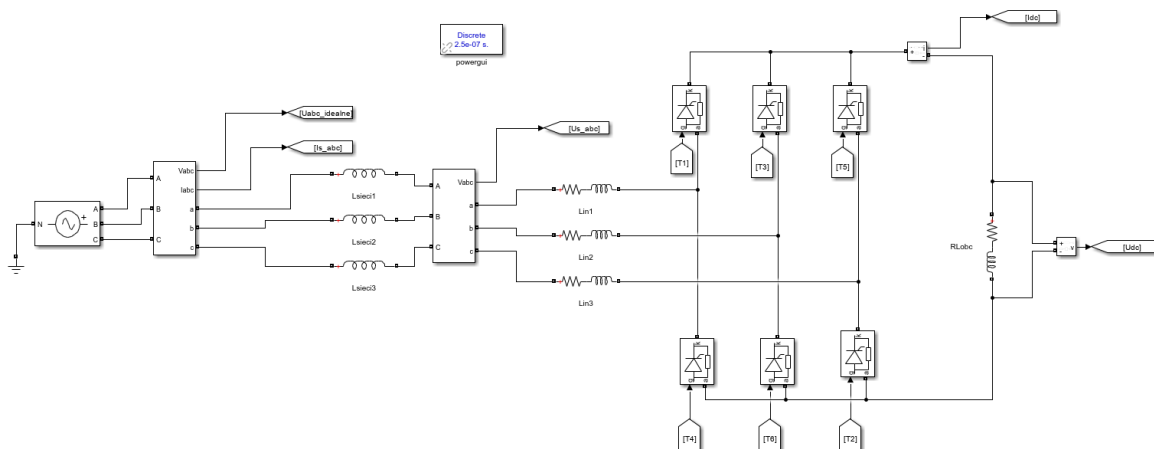
Spis treści:	Strona:
1. Cel projektu	2
2. Model	
a. Schemat układu.....	2
b. Parametry układu.....	3
c. Działanie układu.....	3
3. Wpływ kąta ALFA na wybrane przebiegi	
a. Przebiegi prądu fazowego.....	4
b. Moc czynna, bierna oraz pozorna.....	7
c. Parametry jakości elektrycznej zmierzone dla prądu fazowego.....	9
d. Wartość średnia i przebieg napięcia U_{dc}	15
4. Wpływ indukcyjności wejściowej mostka L_{in} na wybrane parametry	
a. Przebieg prądu wejściowego.....	25
b. Analiza FFT dla przebiegu prądu sieci.....	27
c. Wartość średnia napięcia U_{dc}	34
5. Wpływ reaktancji zastępczej sieci na kształt napięcia wejściowego.....	41
6. Wnioski i spostrzeżenia.....	44

1. Cel projektu

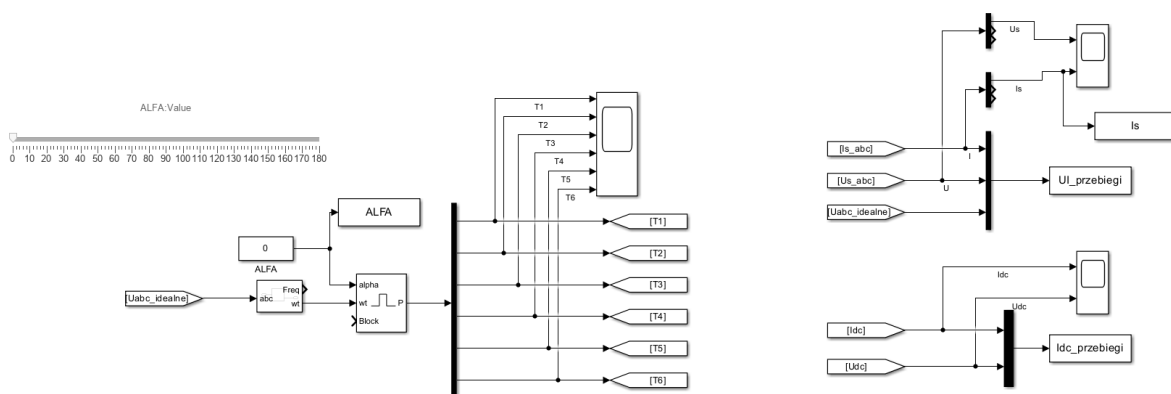
Głównym założeniem projektu jest zapoznanie studentów ze środowiskiem Matlab Simulink oraz z układem energoelektronicznym zawierającym trójfazowy mostek tyrystorowy. W dalszej części sprawozdania zostaną przedstawione wykonane analizy wybranych przebiegów.

2. Model

a. Schemat układu



Grafika 1 Model układu w programie simulink



Grafika 2 Część poiarowa modelu

b. Parametry układu

```
Ts=100e-6;  
alfa=0;  
f=50;  
fi=0;  
w=2*pi*f;  
Ls=50e-6;  
Lin=100e-6;  
Rin=1/30*w*Lin;  
R_obc=6;  
L_obc=100e-6;  
Rdiode=1e-3;  
Vdiode=1.5;
```

c. Działanie układu

Rozważany układ prostownika tyrystorowego obejmuje konwersję prądu przemiennego na prąd stały za pomocą mostka prostowniczego składającego się z sześciu tyrystorów. Kąt zapłonu (kąt alfa) określa czas wyzwalań poszczególnych tyrystorów, wpływając na okres przewodzenia i kształtując przebiegi napięcia i prądu wyjściowego. Przebiegi te są następnie dostarczane do obciążenia. Indukcyjny charakter obciążenia może wprowadzać przesunięcia fazowe i efekty przejściowe, wpływając na ogólny kształt przebiegu prądu. Dodatkowo, indukcyjność sieci może odgrywać rolę w określaniu szybkości zmian prądu i w konsekwencji średniej wartości napięcia.

3. Wpływ kąta ALFA na wybrane przebiegi

a. Przebiegi prądu fazowego

Kod do pobrania danych:

```
tic  
L_obc=100e-6;  
alfa=0;  
sim ('untitled1')  
save ('Wyniki_R0.mat')  
alfa=45;  
sim ('untitled1')  
save ('Wyniki_R45.mat')  
alfa=90;  
sim ('untitled1')  
save ('Wyniki_R90.mat')  
alfa=135;  
sim ('untitled1')  
save ('Wyniki_R135.mat')  
  
L_obc=200e-3;
```

Kod do wykresów:

```
clear all  
close all  
clc  
load ('Wyniki_R0.mat')  
figure()  
subplot(2,1,1)  
plot(Is.time,  
Is.signals.values(:,1))  
hold on  
grid on  
load ('Wyniki_R45.mat')  
subplot(2,1,1)  
plot(Is.time,  
Is.signals.values(:,1))  
hold on  
grid on
```

```

alfa=0;
sim ('untitled1')
save ('Wyniki_L0.mat')
alfa=45;
sim ('untitled1')
save ('Wyniki_L45.mat')
alfa=90;
sim ('untitled1')
save ('Wyniki_L90.mat')
alfa=135;
sim ('untitled1')
save ('Wyniki_L135.mat')
toc

```

```

load ('Wyniki_R90.mat')
subplot(2,1,1)
plot(Is.time,
Is.signals.values(:,1))
hold on
grid on
load ('Wyniki_R135.mat')
subplot(2,1,1)
plot(Is.time,
Is.signals.values(:,1))
legend('Wyniki Alfa_0',
'Wyniki Alfa_4_5', 'Wyniki
Alafa_9_0', 'Wyniki
Alfa_1_3_5');
% legend('Wyniki
Alafa_9_0', 'Wyniki
Alfa_1_3_5');
title('Przebiegi prądu
fazowego przy obciążeniu
rezystancyjnym');
ylabel('I [A]');
xlabel('t [s]');

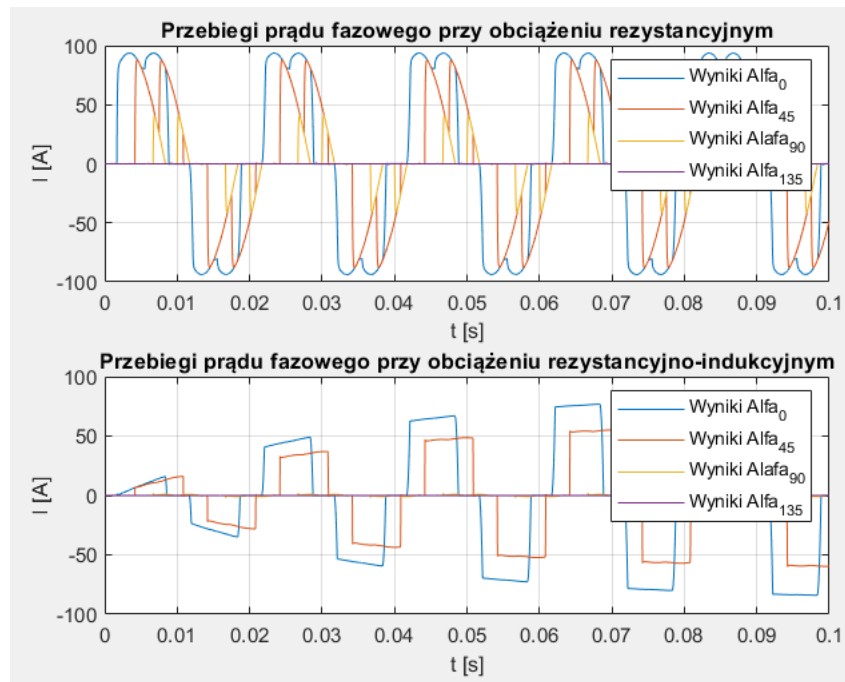
```

```

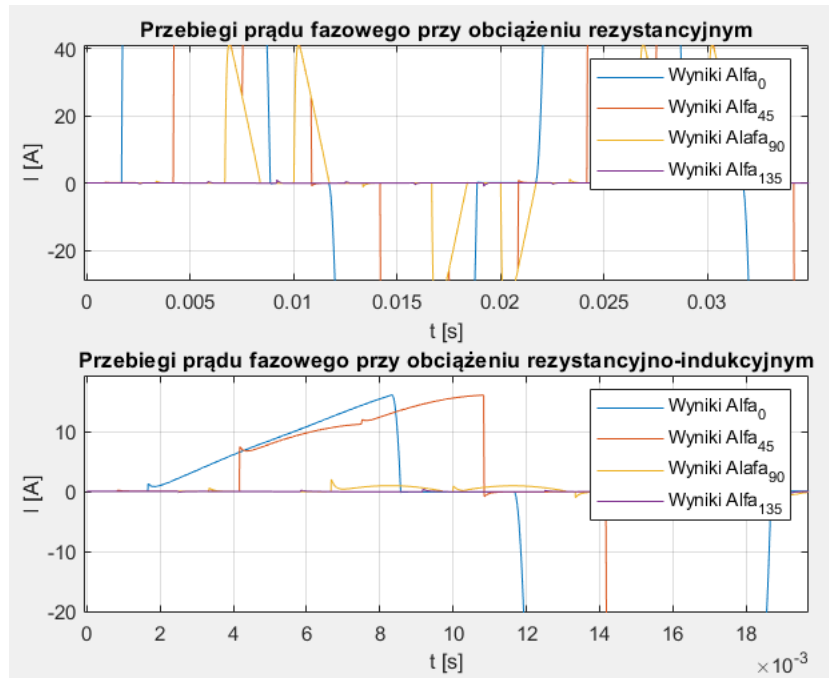
load ('Wyniki_L0.mat')
subplot(2,1,2)
plot(Is.time,
Is.signals.values(:,1))
hold on
grid on
load ('Wyniki_L45.mat')
subplot(2,1,2)
plot(Is.time,
Is.signals.values(:,1))
hold on
grid on
load ('Wyniki_L90.mat')
subplot(2,1,2)
plot(Is.time,
Is.signals.values(:,1))
hold on
grid on
load ('Wyniki_L135.mat')
subplot(2,1,2)
plot(Is.time,
Is.signals.values(:,1))
hold on
grid on
legend('Wyniki Alfa_0',
'Wyniki Alfa_4_5', 'Wyniki
Alafa_9_0', 'Wyniki
Alfa_1_3_5');
% legend('Wyniki
Alafa_9_0', 'Wyniki
Alfa_1_3_5');
title('Przebiegi prądu
fazowego przy obciążeniu
rezystancyjno-
indukcyjnym');

```

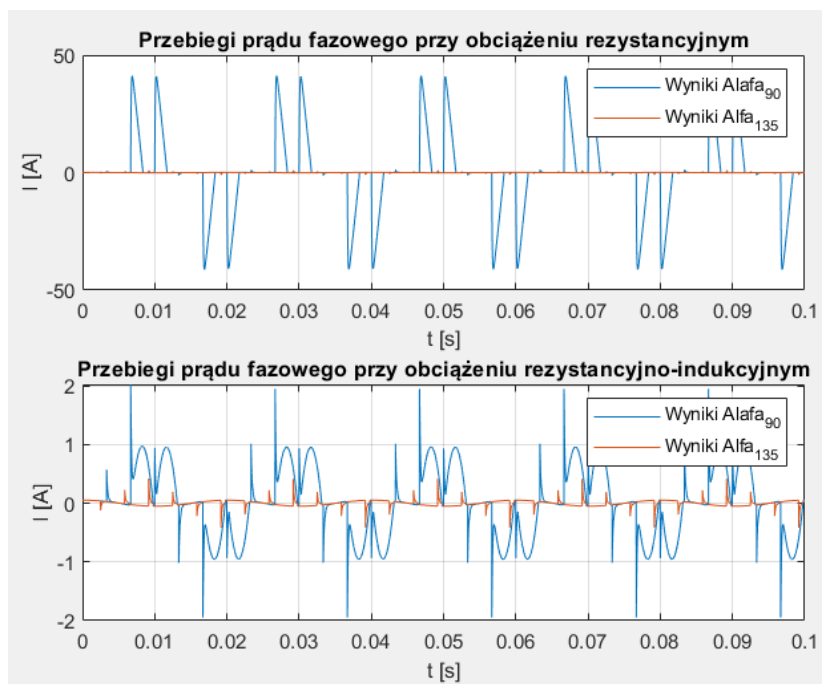
```
ylabel('I [A]');
xlabel('t [s]');
```



Grafika 3 Przebiegi prądu fazowego



Grafika 4 Przebiegi prądu fazowego (zbliżenie)



Grafika 5 Przebiegi prądu fazowego (kąt 90 i 135)

W obwodzie prostownika tyrystorowego kąt α reprezentuje kąt opóźnienia, przy którym tyrystory są wyzwalane w każdym półcyklu wejściowego napięcia przemiennego. Im większy kąt α , tym dłuższe opóźnienie przed włączeniem tyrystorów, a opóźnienie to wpływa na okres przewodzenia tyrystorów. W rezultacie okres przewodzenia tyrystorów zostaje skrócony, co prowadzi do mniejszej efektywnej wartości RMS przebiegu prądu. Dzieje się tak, ponieważ tyrystory przewodzą przez krótszy czas podczas każdego półcyklu, co skutkuje niższym średnim prądem. Zatem zgodnie z oczekiwaniami im większy kąt α tym przebiegi prądu fazowego mają mniejsze wartości. Dane zjawisko możemy szczególnie dobrze zaobserwować grafice 3. Pozostałe grafiki (4-5) zostały załączone w celu pokazania przebiegów dla dużych wartości kąta α . Przy obciążeniu rezystancyjno indukcyjnym dla kątów niedalekich od zera można zauważyć, że przebieg prądu początkowo jest niewielki i wzrasta z czasem.

b. Moc czynna, bierna oraz pozorna

Kod:

```
clear all; clc; close all;

Ts=100e-6;
alfa=0;
f=50;
fi=0;
w=2*pi*f;
Ls=50e-6;
Lin=11e-3;
Rin=1/30*w*Lin;
R_obc=6;
L_obc=10e-6;
% L_obc=200e-3;
Rdiode=1e-3;
Vdiode=1.5;

% sim('untitled10x2810x29.slx')
ALFA=0:15:180;
P_wyniki = zeros(size(ALFA));
Q_wyniki = zeros(size(ALFA));
S_wyniki = zeros(size(ALFA));

excludeRange = 1:150000;

for i = 1:length(ALFA)
    sim('untitled10x2810x29.slx')

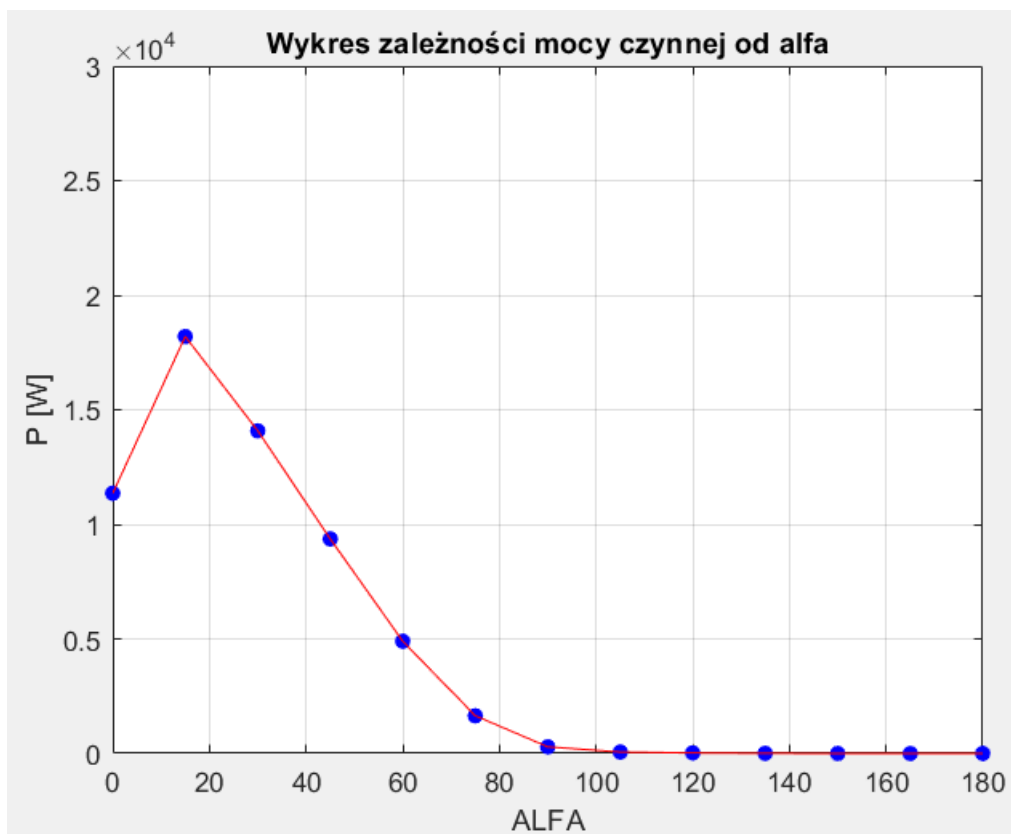
    P_wyniki(i) =
max(P.signals.values(excludeRange+1:end,2));
    Q_wyniki(i) =
max(Q.signals.values(excludeRange+1:end,2));
    S_wyniki(i) = sqrt(P_wyniki(i).^2 +
Q_wyniki(i).^2);

    alfa = alfa + 15;
end

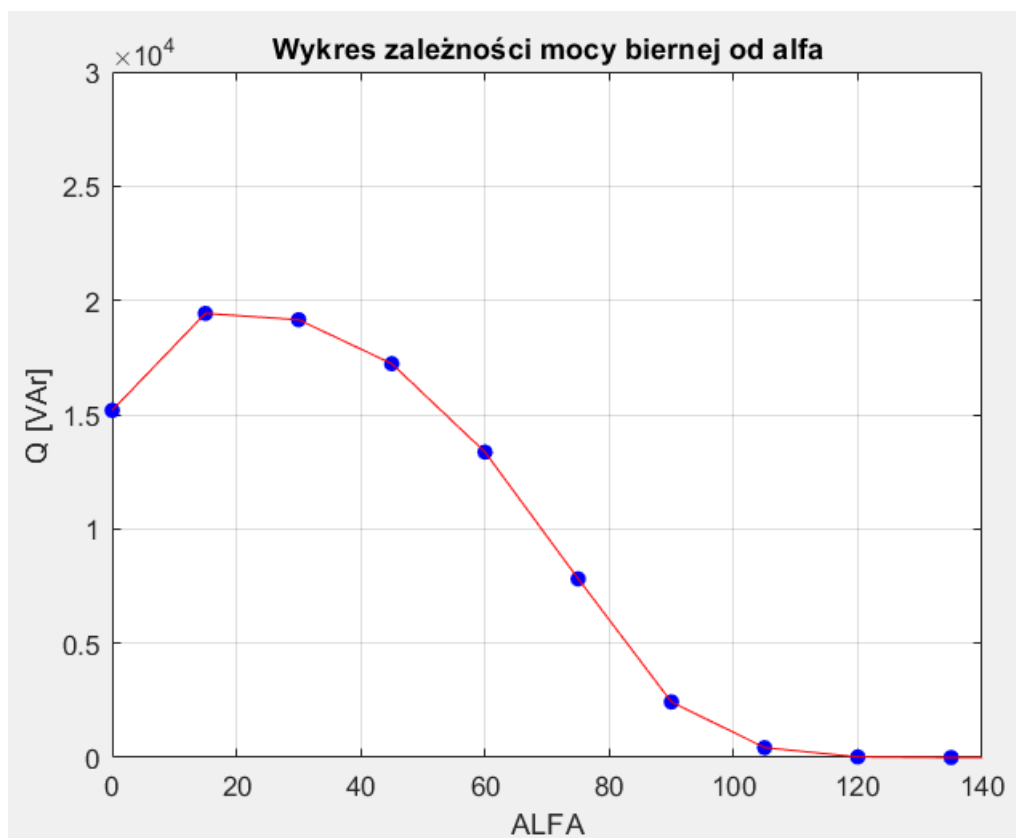
figure(1)
plot(ALFA, P_wyniki,'b.',
'MarkerSize', 20)
hold on; grid on;
plot(ALFA, P_wyniki,'r-');
title('Wykres zależności mocy
czynnej od alfa')
xlabel('ALFA'); ylabel('P [W]');
ylim([0 30000]);

figure(2)
plot(ALFA, Q_wyniki,'b.',
'MarkerSize', 20)
hold on; grid on;
plot(ALFA, Q_wyniki,'r-');
title('Wykres zależności mocy
biernej od alfa')
xlabel('ALFA'); ylabel('Q [VA]');
ylim([0 30000]);

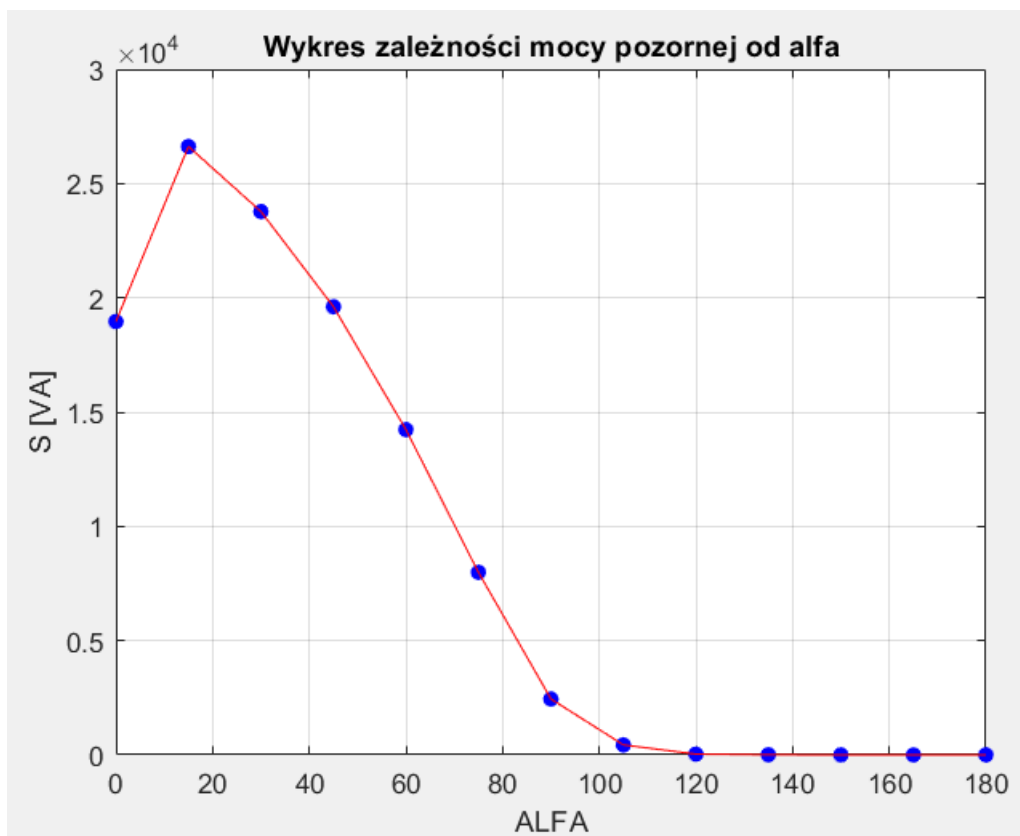
figure(3)
plot(ALFA, S_wyniki,'b.',
'MarkerSize', 20)
hold on; grid on;
plot(ALFA, S_wyniki,'r-');
title('Wykres zależności mocy
pozornej od alfa')
xlabel('ALFA'); ylabel('S [VA]');
ylim([0 30000]);
```

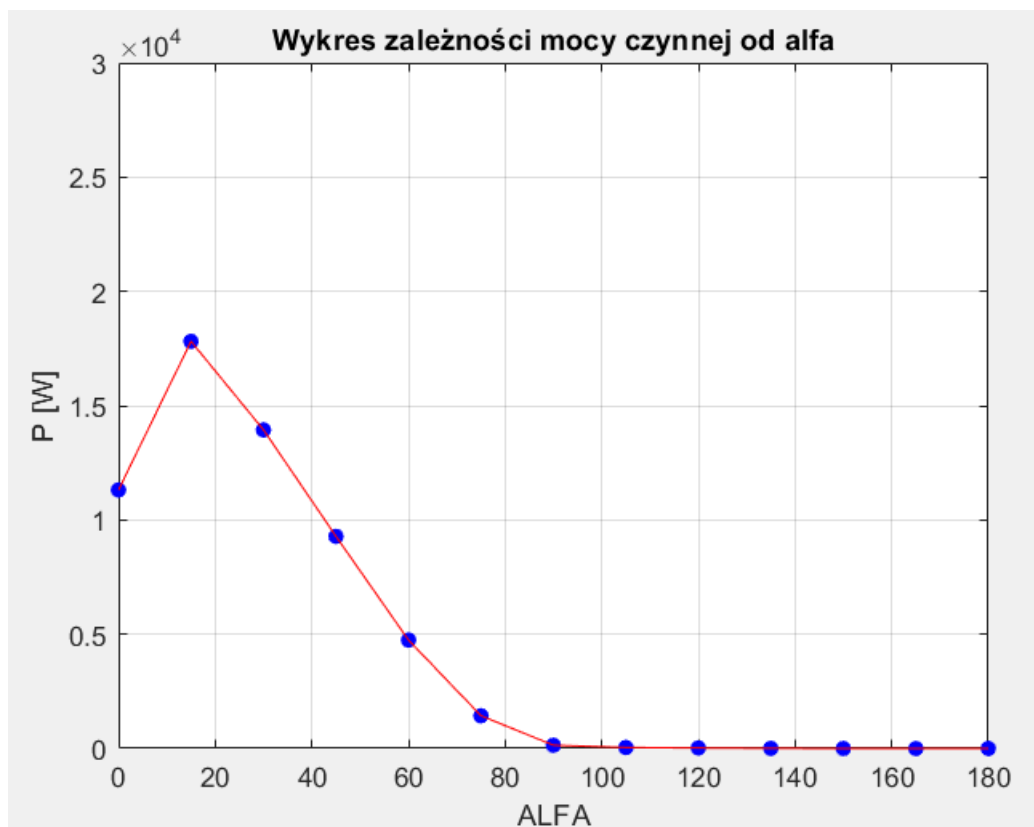
Grafika 6 Wykres mocy czynnej przy obciążeniu rezystancyjnym w zależności od kąta ALFA



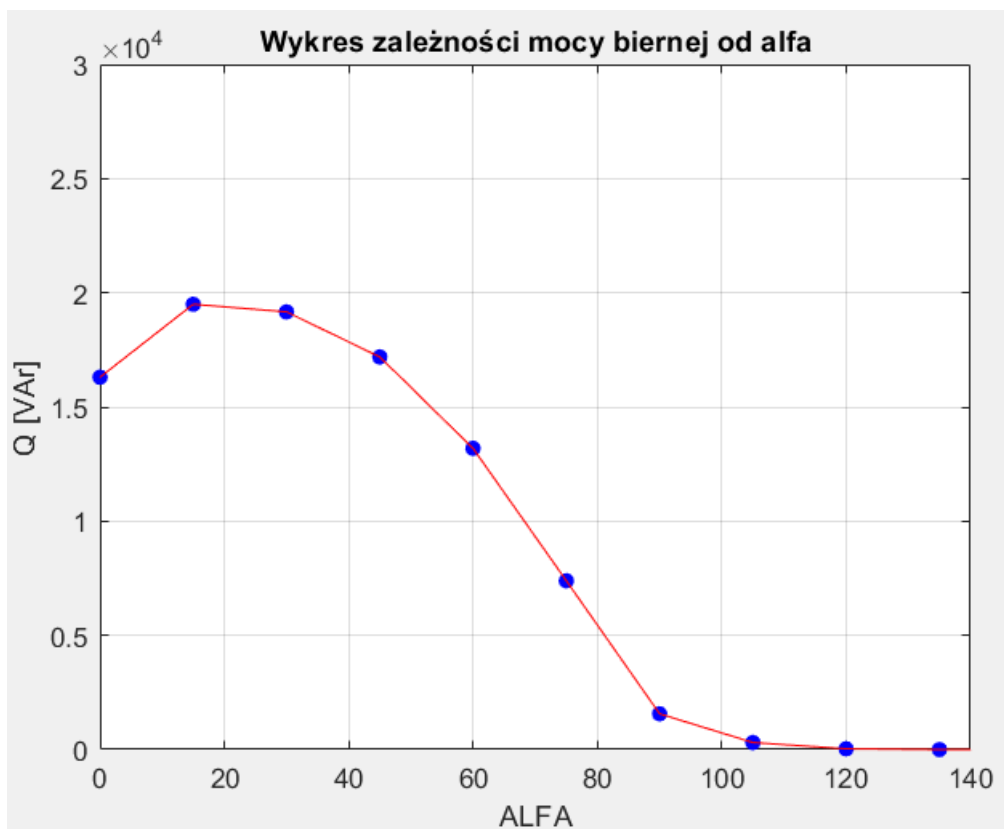
Grafika 7 Wykres mocy biernej przy obciążeniu rezystancyjnym w zależności od kąta ALFA



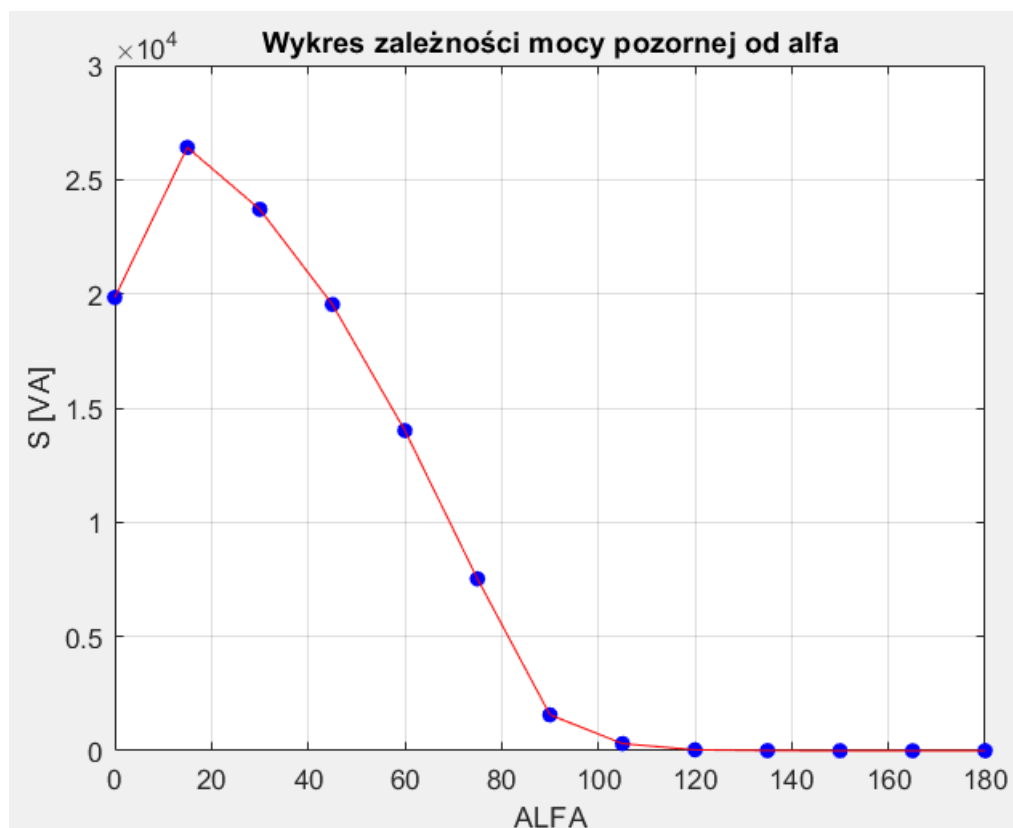
Grafika 8 Wykres mocy pozornej przy obciążeniu rezystancyjnym w zależności od kąta ALFA



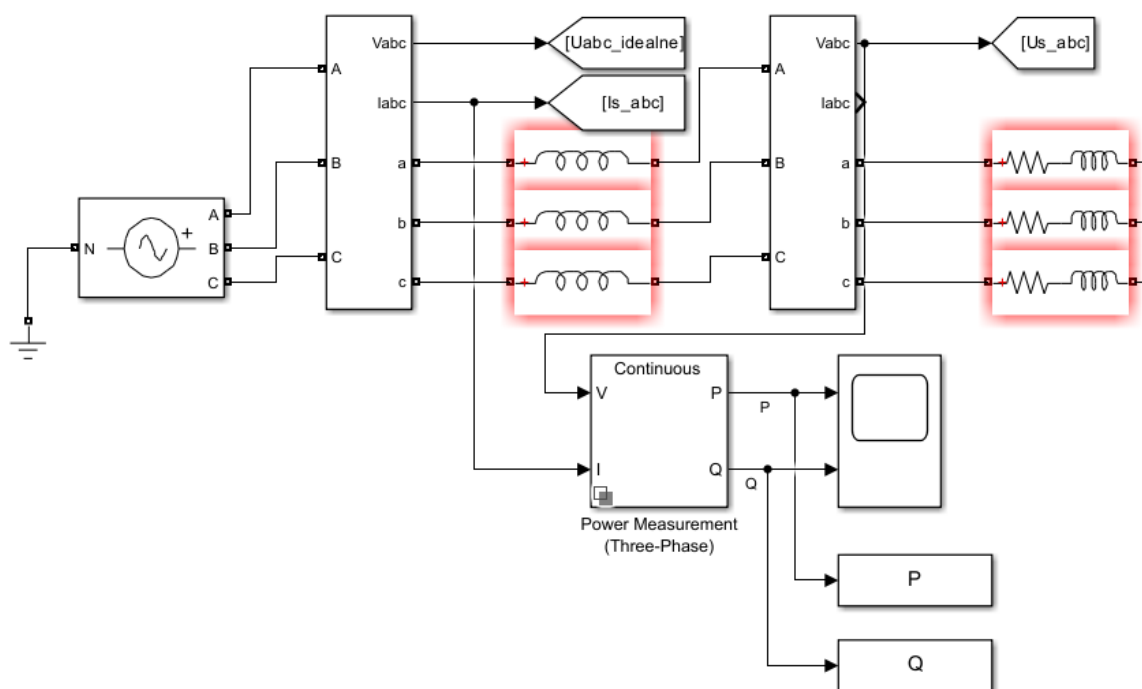
Grafika 9 Wykres mocy czynnej przy obciążeniu rezystancyjno-indukcyjnym w zależności od kąta ALFA



Grafika 10 Wykres mocy biernej przy obciążeniu rezystancyjno-indukcyjnym w zależności od kąta ALFA



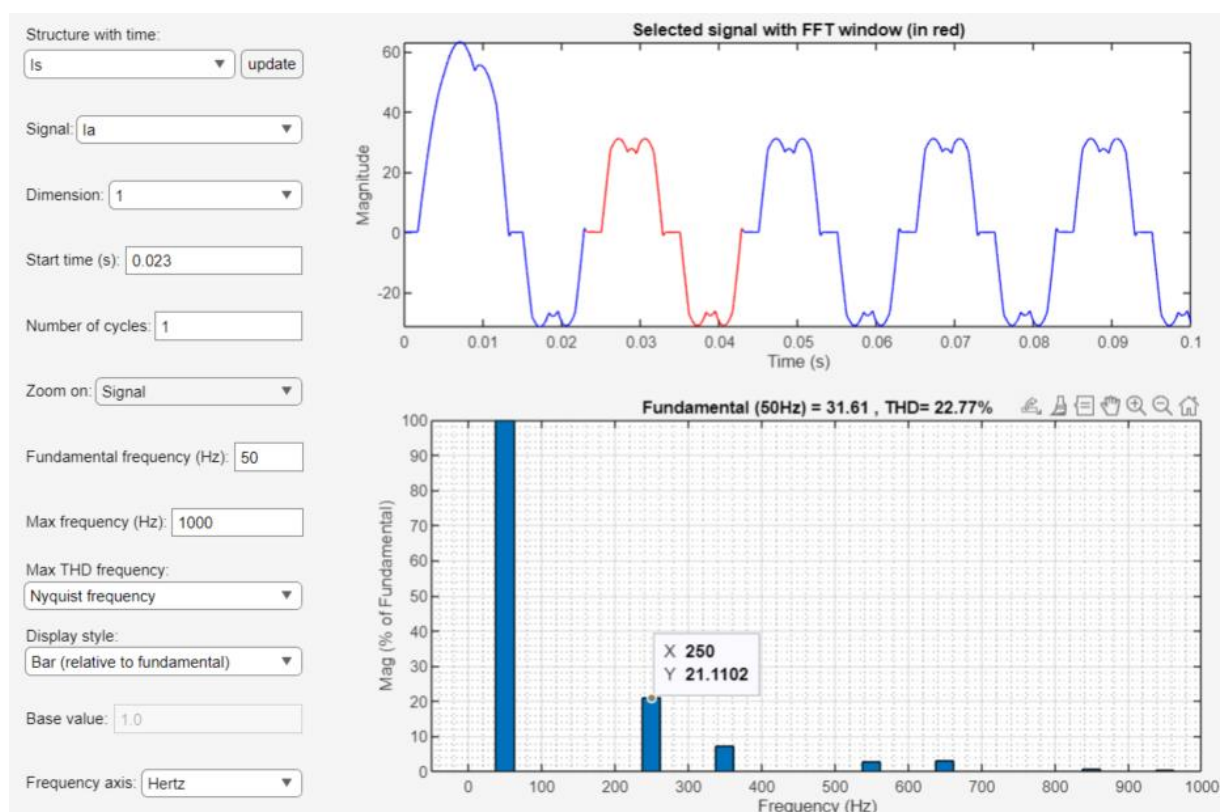
Grafika 11 Wykres mocy pozornej przy obciążeniu rezystancyjno-indukcyjnym w zależności od kąta ALFA



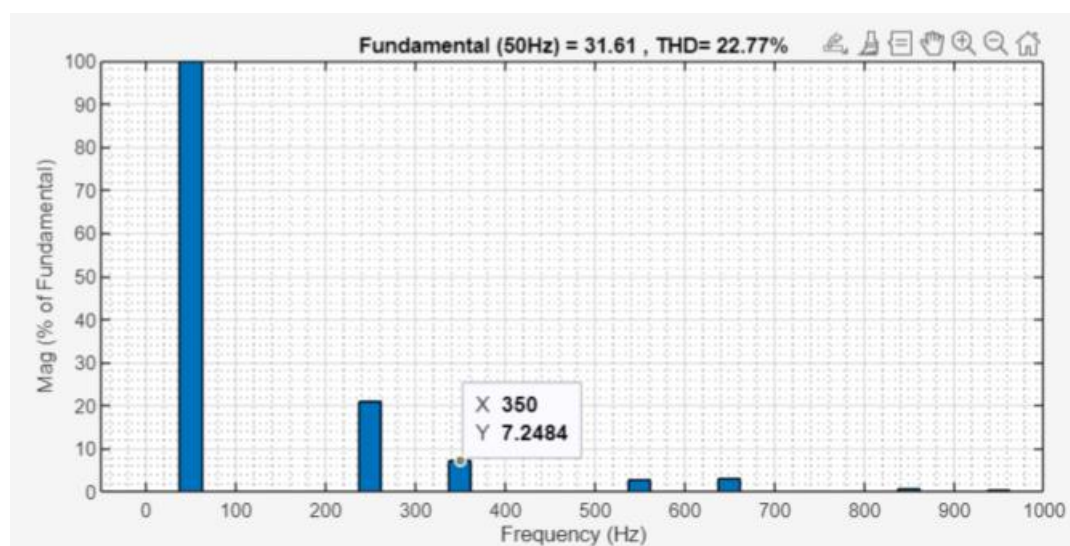
Modyfikacja modelu do pobrania danych

Na grafikach 6-11 zostały zestawione wykresy mocy w zależności od kąta ALFA kolejno dla obciążenia rezystancyjnego i rezystancyjno-indukcyjnego. W obu przypadkach wykresy wyglądają podobnie, na wszystkich zauważalny jest początkowy jednorazowy wzrost powyżej wartości zanotowanej dla kąta 0, a następnie spadek praktycznie do zera przy wartości $\alpha=90$. Zatem możemy już na podstawie danego podpunktu stwierdzić, że praca tyrystorów powyżej tej wartości nie ma sensu. Kolejne analizy będą to potwierdzać. Im większe opóźnienie w wyzwoleniu tyrystorów tym mniejsza wartość mocy w układzie. Powody mogą być podobne jak w poprzednim podpunkcie przy opisie przebiegów prądów fazowych ponieważ moc jest iloczynem wartości RMS prądu, napięcia oraz współczynnika mocy. Większy kąt może prowadzić do większego przesunięcia prądu względem napięcia i pogorszenia współczynnika mocy. Dla wysokich wartości kąta ALFA moc układu jest bardzo niska.

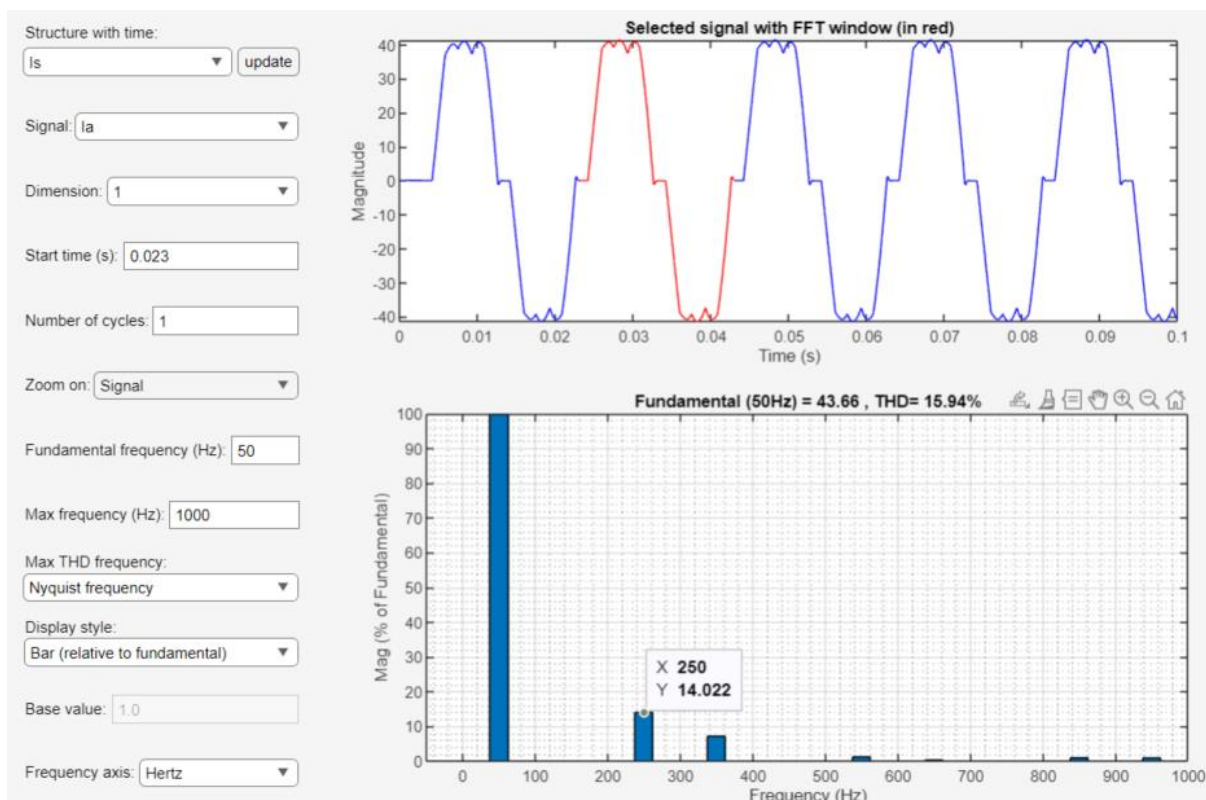
c. Parametry jakości elektrycznej zmierzone dla prądu fazowego



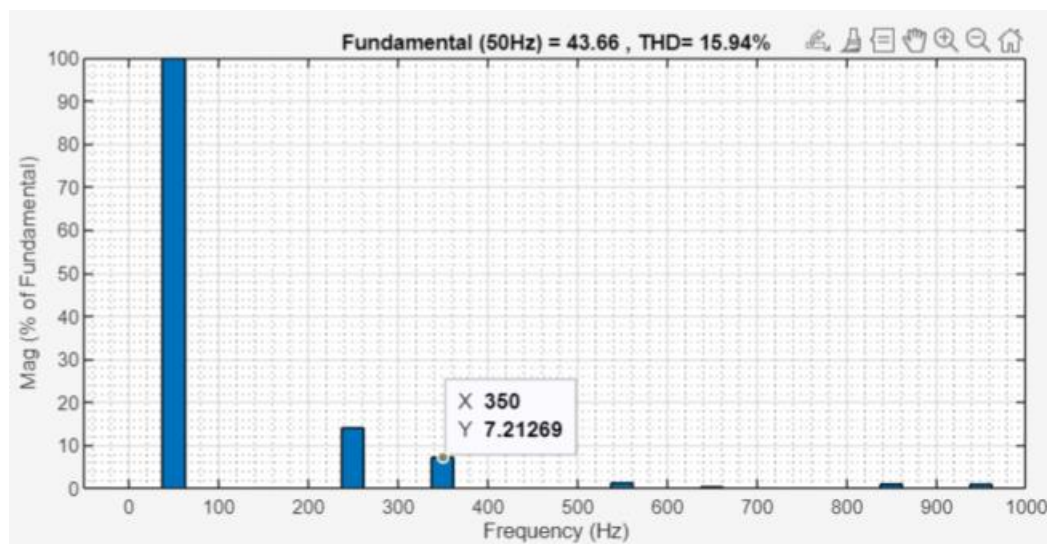
Grafika 12 Analiza FFT prądu fazowego dla $\alpha=0$ przy obciążeniu rezystancyjnym (z odczytem wartości 5-tej harmonicznej)



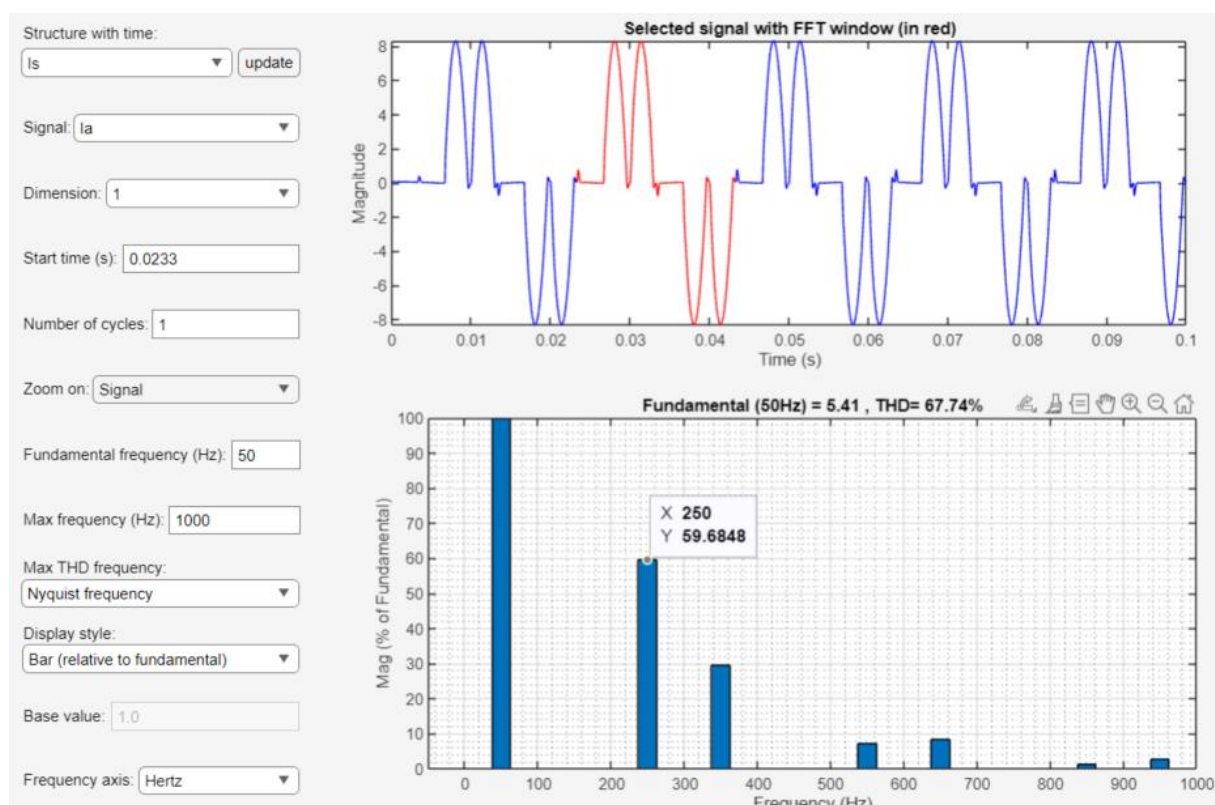
Grafika 13 Analiza FFT prądu fazowego dla $\alpha=0$ przy obciążeniu rezystancyjnym (z odczytem wartości 7-ej harmonicznej)



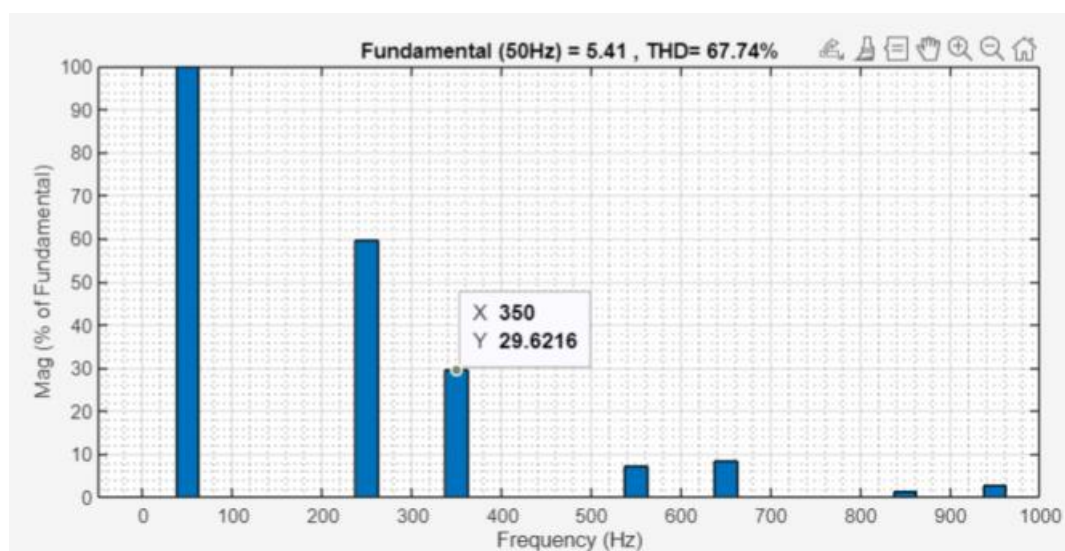
Grafika 14 Analiza FFT prądu fazowego dla $\alpha=45$ przy obciążeniu rezystancyjnym (z odczytem wartości 5-tej harmonicznej)



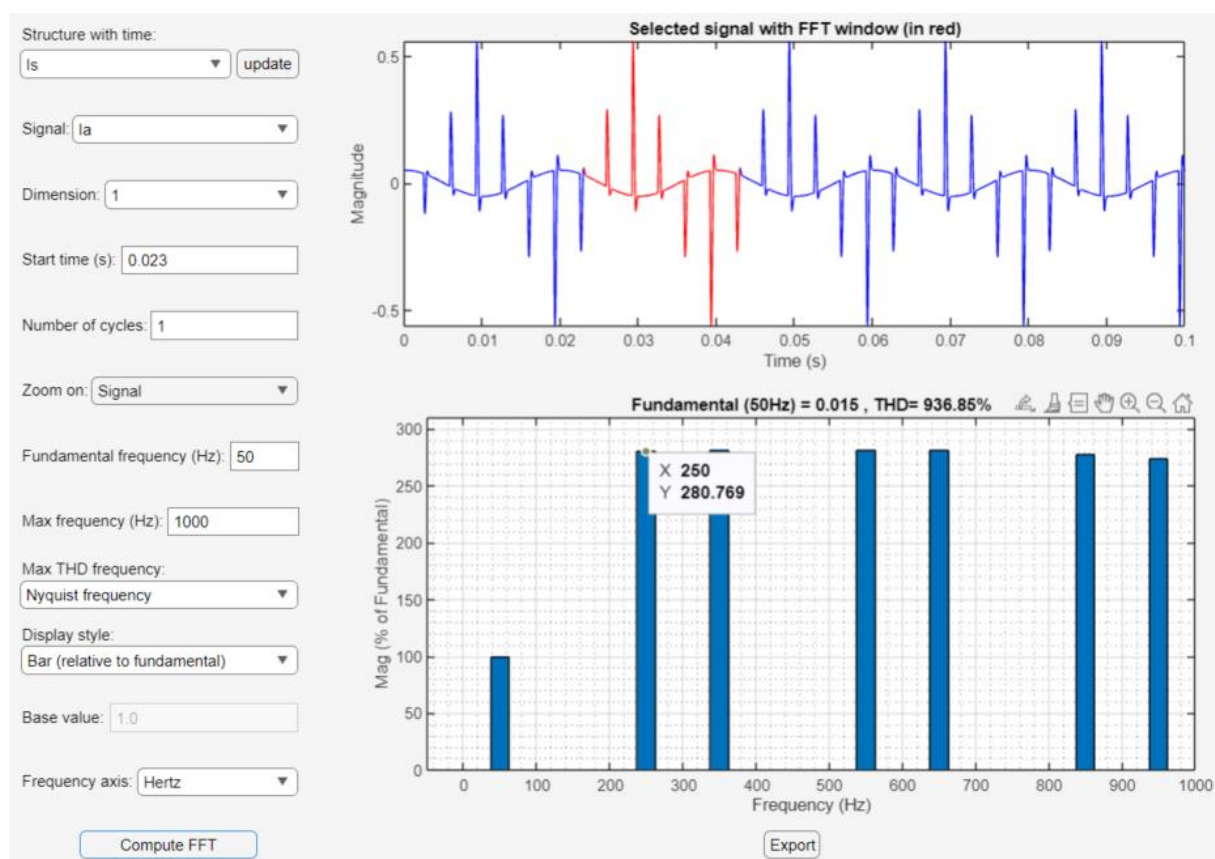
Grafika 15 Analiza FFT prądu fazowego dla $\alpha=45$ przy obciążeniu rezystancyjnym (z odczytem wartości 7-ej harmonicznej)



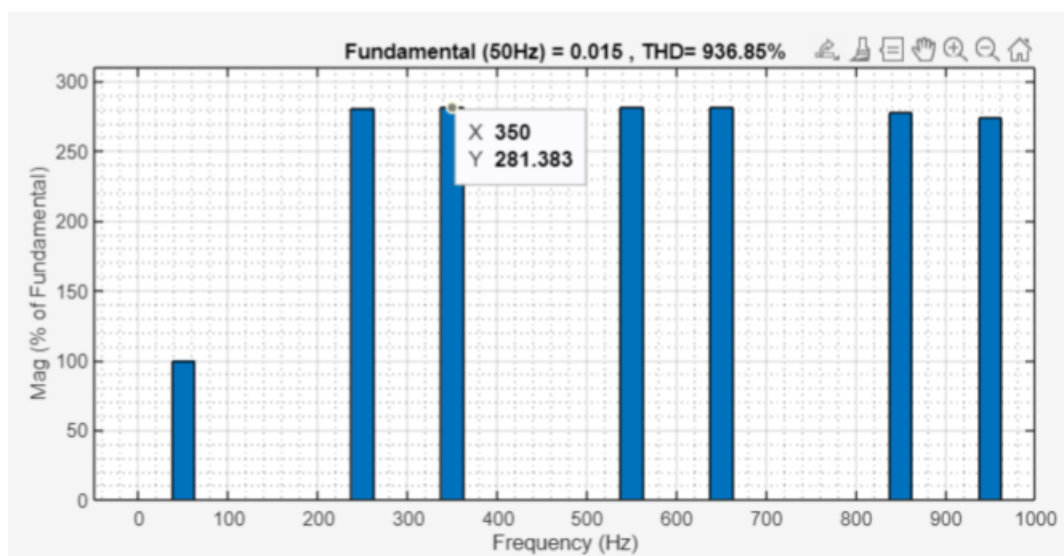
Grafika 16 Analiza FFT prądu fazowego dla $\alpha=90$ przy obciążeniu rezystancyjnym (z odczytem wartości 5-tej harmonicznej)



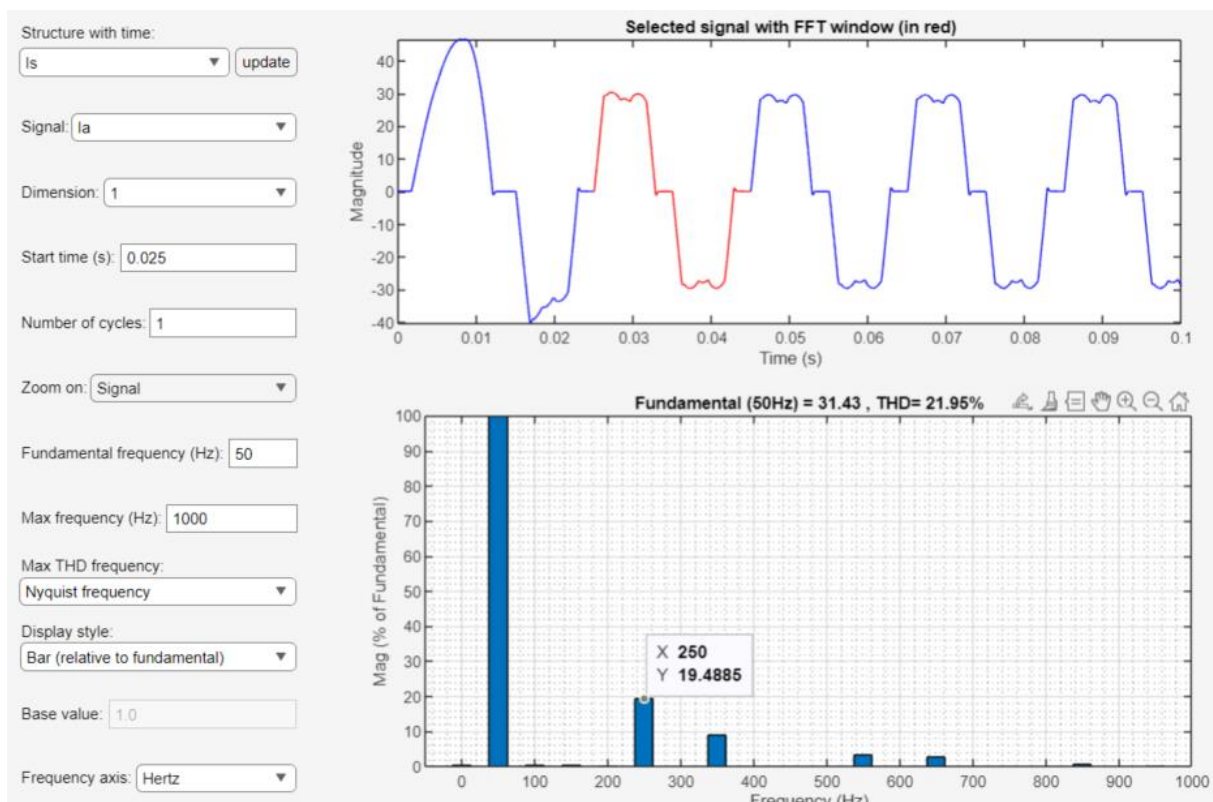
Grafika 17 Analiza FFT prądu fazowego dla $\alpha=90$ przy obciążeniu rezystancyjnym (z odczytem wartości 7-ej harmonicznej)



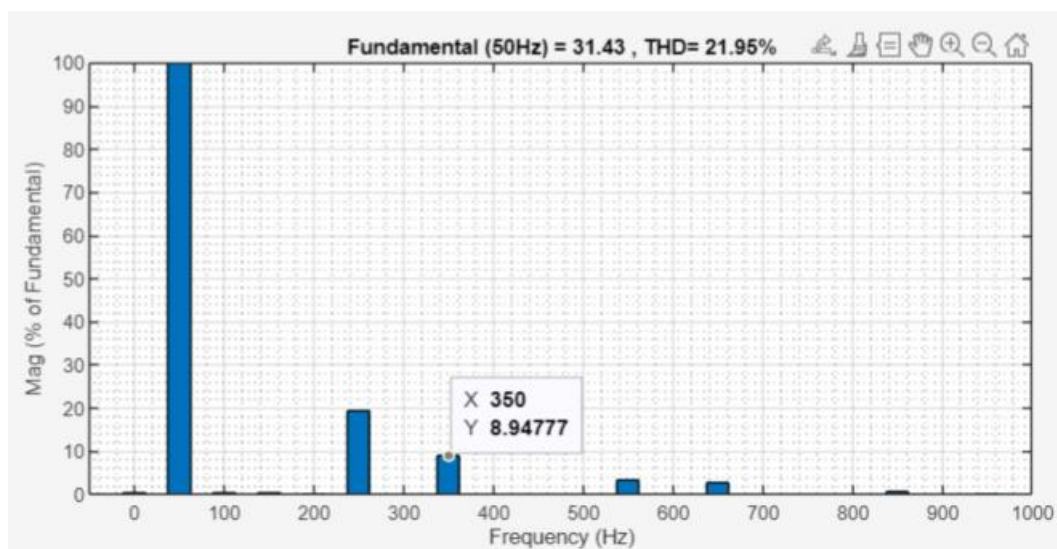
Grafika 18 Analiza FFT prądu fazowego dla $\alpha=135$ przy obciążeniu rezystancyjnym (z odczytem wartości 5-tej harmonicznej)



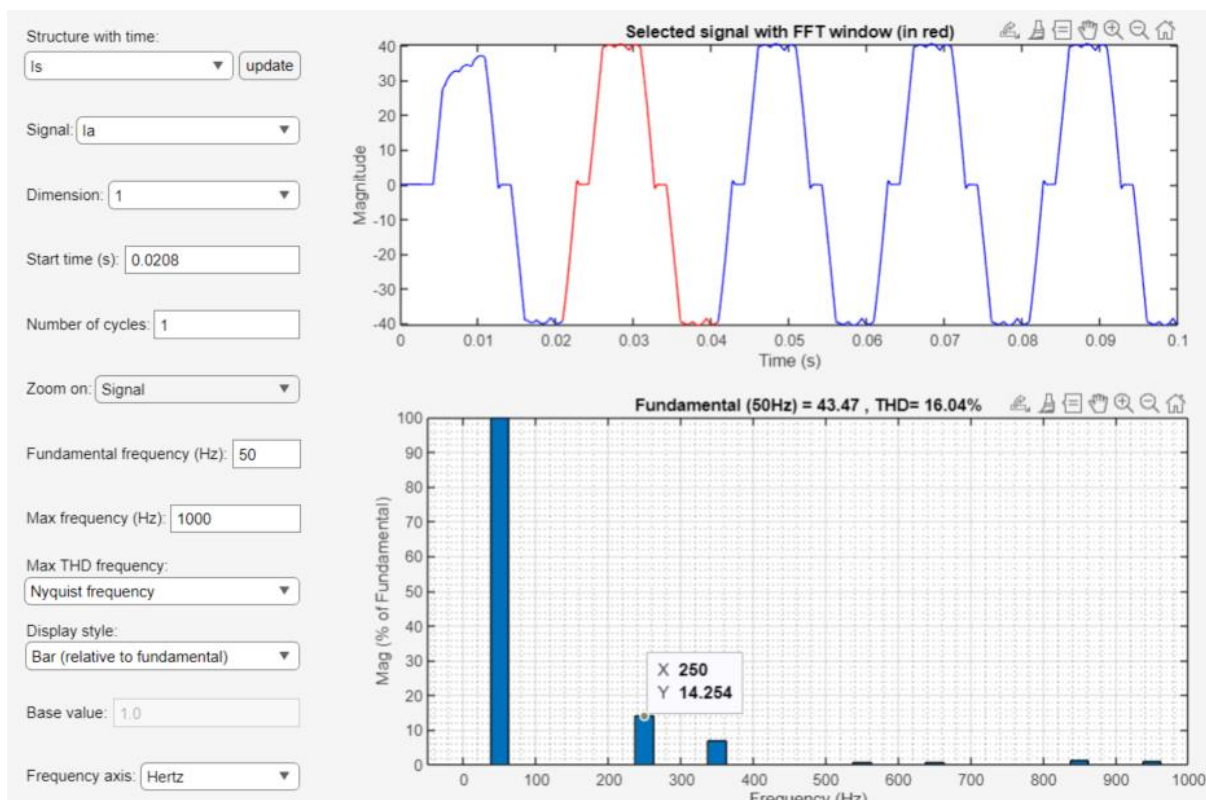
Grafika 19 Analiza FFT prądu fazowego dla $\alpha=135$ przy obciążeniu rezystancyjnym (z odczytem wartości 7-ej harmonicznej)



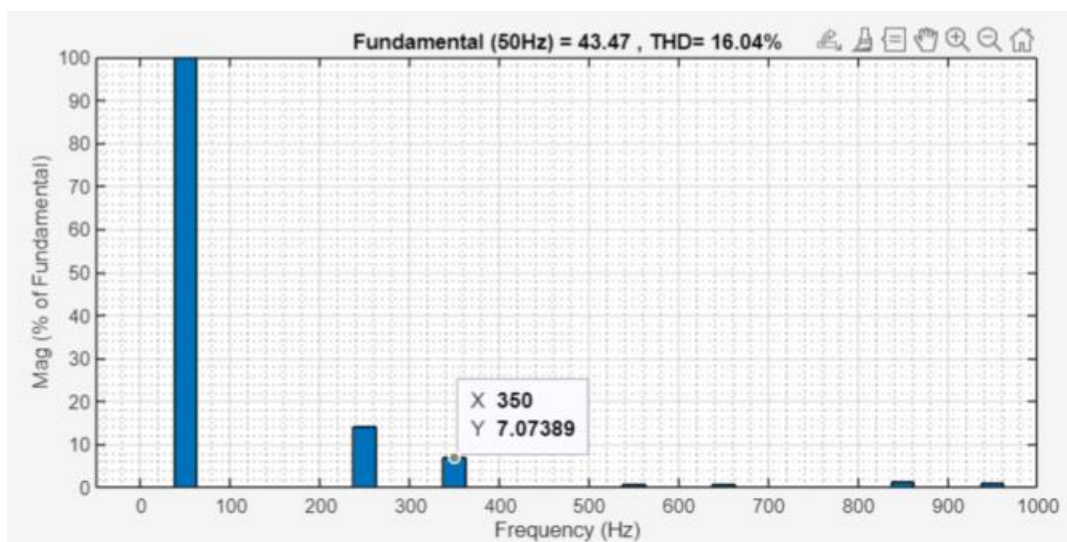
Grafika 20 Analiza FFT prądu fazowego dla $\alpha=0$ przy obciążeniu rezystancyjno-indukcyjnym (z odczytem wartości 5-tej harmonicznej)



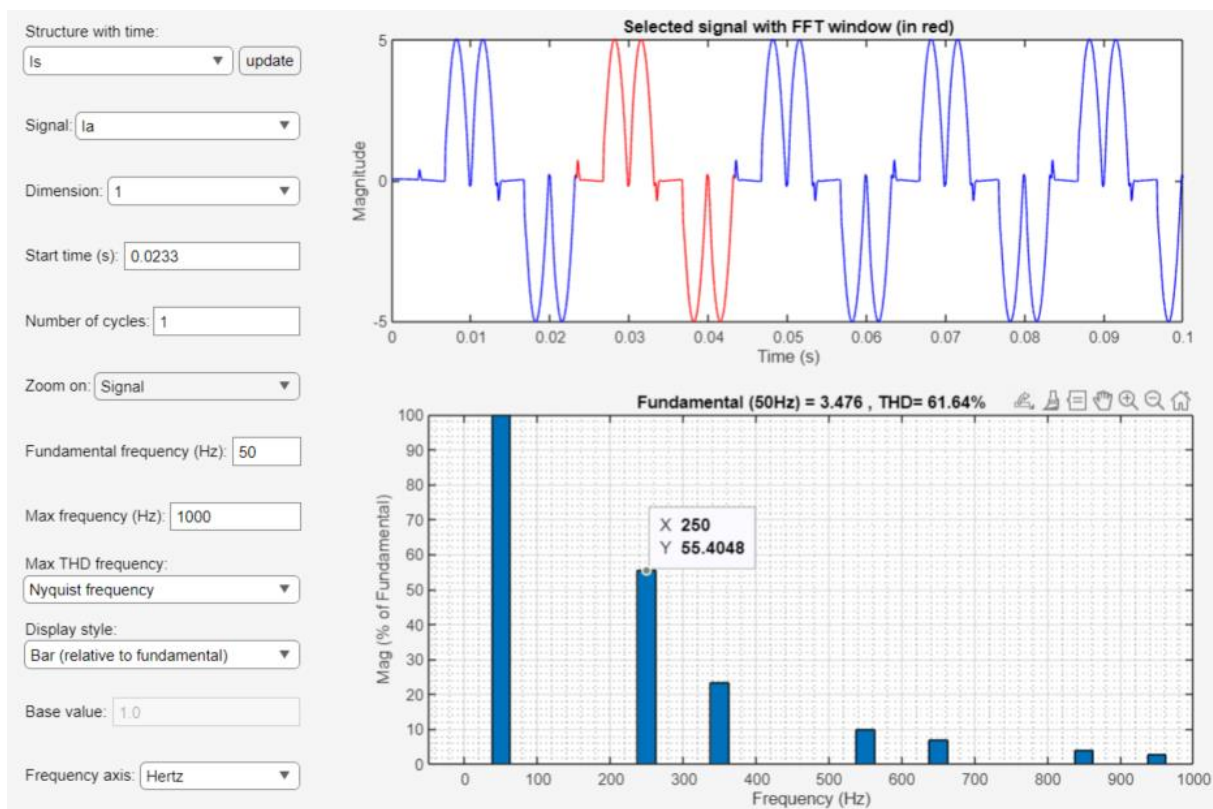
Grafika 21 Analiza FFT prądu fazowego dla $\alpha=0$ przy obciążeniu rezystancyjno-indukcyjnym (z odczytem wartości 7-ej harmonicznej)



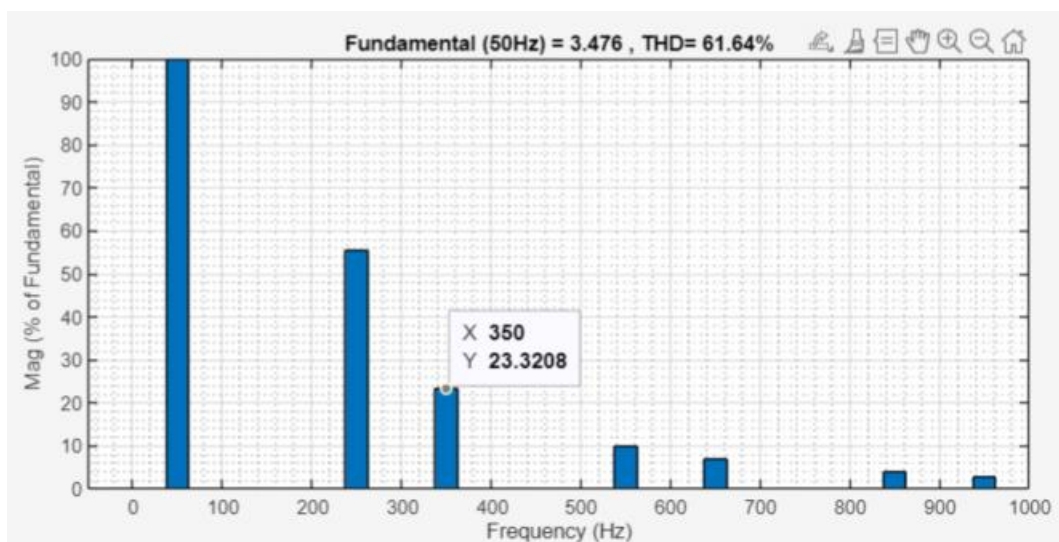
Grafika 22 Analiza FFT prądu fazowego dla $\alpha=45$ przy obciążeniu rezystancyjno-indukcyjnym (z odczytem wartości 5-ej harmonicznej)



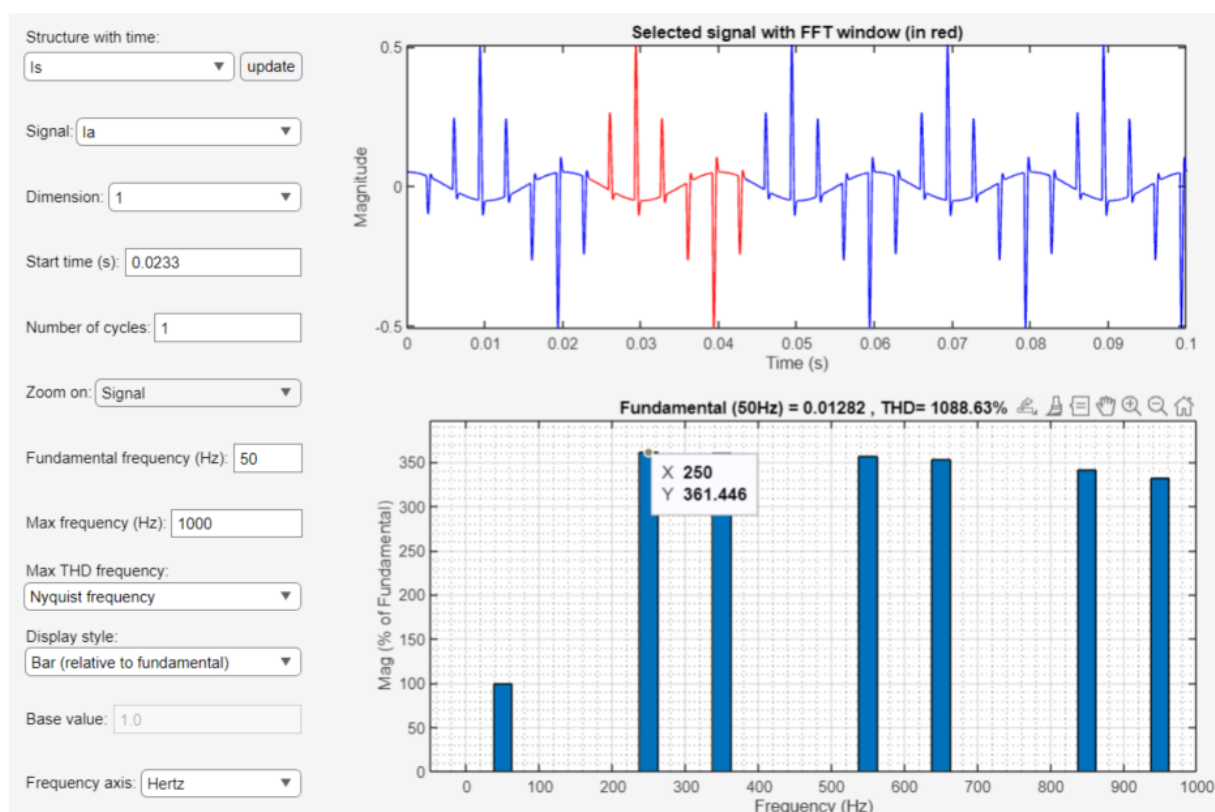
Grafika 23 Analiza FFT prądu fazowego dla $\alpha=45$ przy obciążeniu rezystancyjno-indukcyjnym (z odczytem wartości 7-ej harmonicznej)



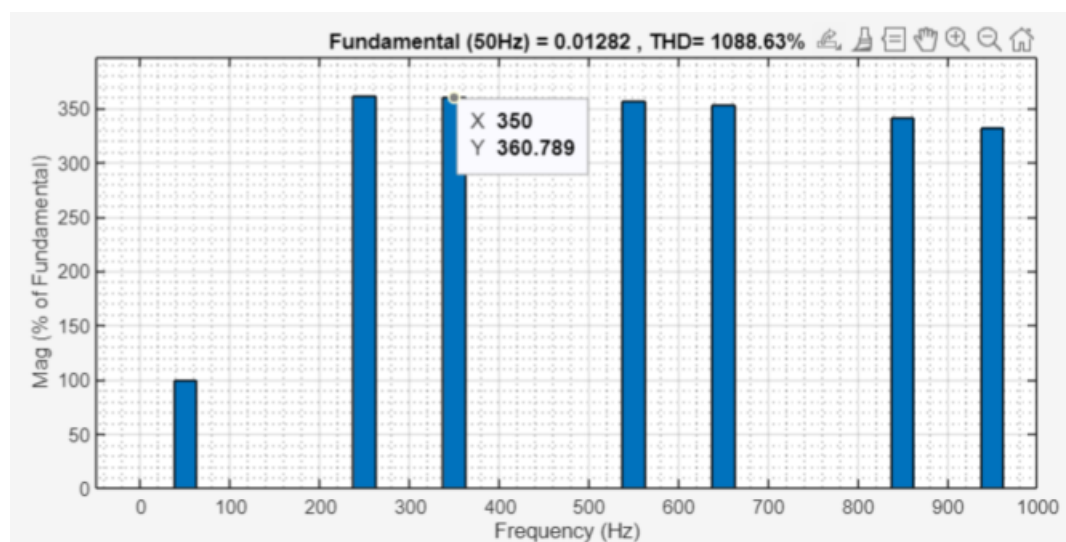
Grafika 24 Analiza FFT prądu fazowego dla $\alpha=90$ przy obciążeniu rezystancyjno-indukcyjnym (z odczytem wartości 5-ej harmonicznej)



Grafika 25 Analiza FFT prądu fazowego dla $\alpha=90$ przy obciążeniu rezystancyjno-indukcyjnym (z odczytem wartości 7-ej harmonicznej)



Grafika 26 Analiza FFT prądu fazowego dla $\alpha=135$ przy obciążeniu rezystancyjno-indukcyjnym (z odczytem wartości 5-ej harmonicznej)



Grafika 27 Analiza FFT prądu fazowego dla $\alpha=135$ przy obciążeniu rezystancyjno-indukcyjnym (z odczytem wartości 7-ej harmonicznej)

Kod dla obciążenia rezystancyjnego:

(analogiczny dla rezystancyjno-indukcyjnego)

clear all


```

close all
angle=[0
45
90
135
];
THD=[22.77
15.94
67.74
936.95
];
I5=[21.11
14.02
59.68
280.77
];
I7=[7.25
7.21
29.62
281.38
];

figure
plot(angle, THD, 'b.', 'MarkerSize',
20);
grid on;
hold on;
plot(angle, THD);
ylabel('THD [%]');
xlabel('Kąt [degree]');

title('Charakterystyka THD w zależności
od kąta alfa');
legend('Punkty pomiarowe','Location',
'best');
ylim([0, 1200]);
figure
plot(angle, I5, 'b.', 'MarkerSize', 20);
grid on;
hold on;
plot(angle, I5);
ylabel('I(5)/I(1) [%]');
xlabel('Kąt [degree]');
title('Charakterystyka I(5)/I(1) w
zależności od kąta alfa');
legend('Punkty pomiarowe','Location',
'best');
ylim([0, 370]);
figure
plot(angle, I7, 'b.', 'MarkerSize', 20);
grid on;
hold on;
plot(angle, I7);
ylabel('I(7)/I(1) [%]');
xlabel('Kąt [degree]');
title('Charakterystyka I(7)/I(1) w
zależności od kąta alfa');
legend('Punkty pomiarowe','Location',
'best');
ylim([0, 370]);

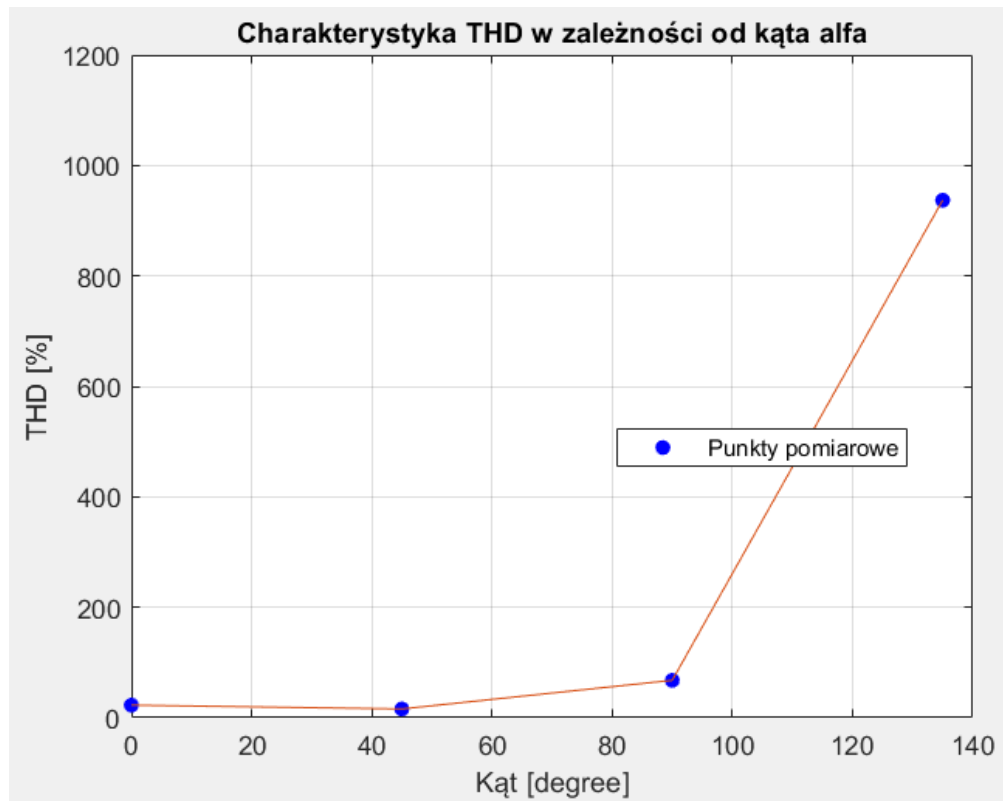
```

Tabela 1 Wartości THD, I(5)/I(1) oraz I(7)/I(1) w zależności od kąta alfa dla obciążenia rezystancyjnego

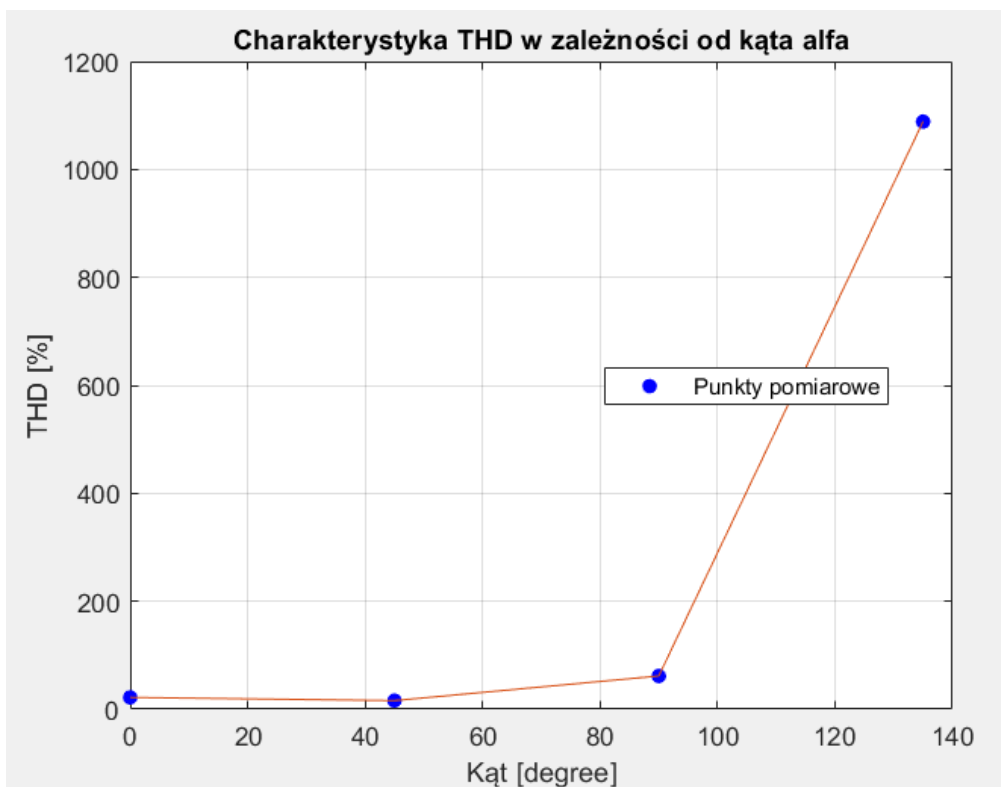
alfa [degree]	THD [%]	I(5)/I(1) [%]	I(7)/I(1) [%]
0	22.77	21.11	7.25
45	15.94	14.02	7.21
90	67.74	59.68	29.62
135	936.95	280.77	281.38

Tabela 2 Wartości THD, I(5)/I(1) oraz I(7)/I(1) w zależności od kąta alfa dla obciążenia rezystancyjno-indukcyjnego

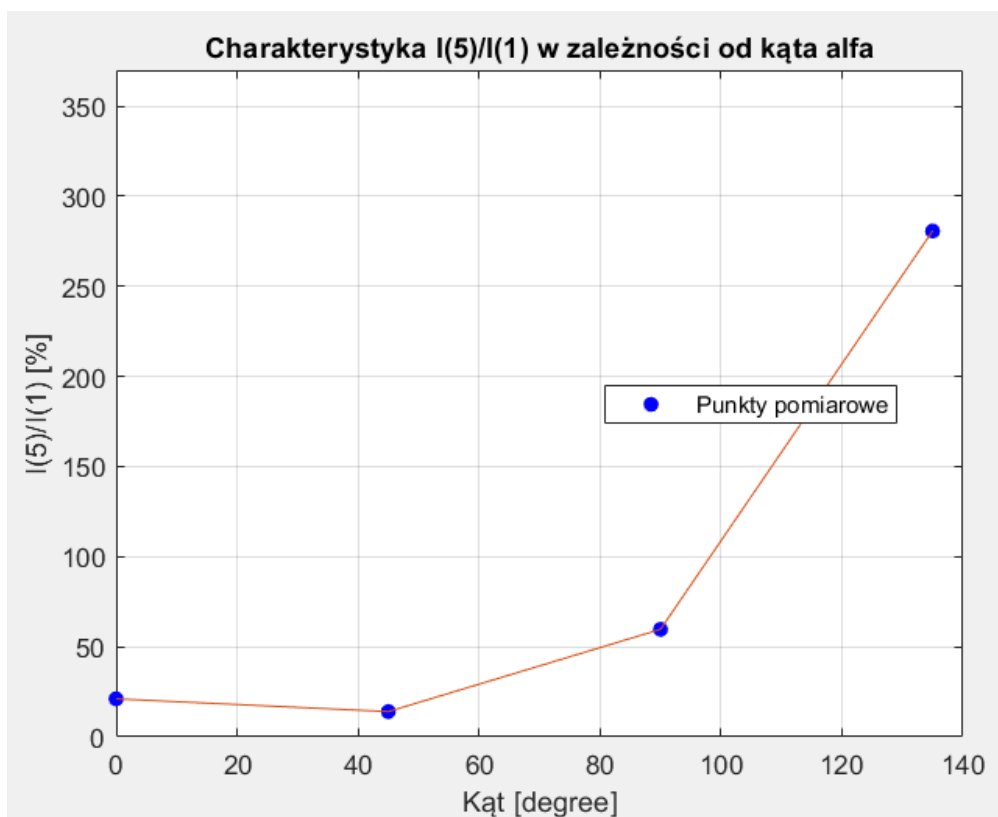
alfa [degree]	THD [%]	I(5)/I(1) [%]	I(7)/I(1) [%]
0	21.95	19.49	8.95
45	16.04	14.25	7.07
90	61.64	55.41	23.32
135	1088.63	361.45	360.79



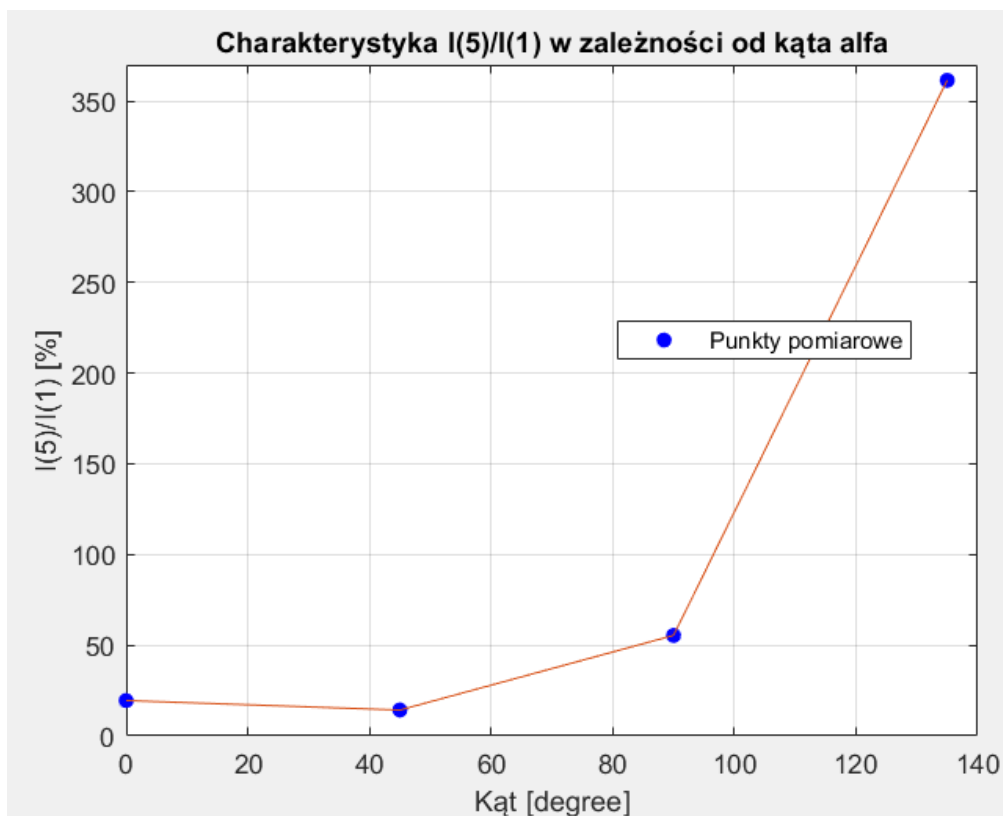
Grafika 28 Wykres zależności całkowitego zniekształcenia harmonicznego (THD) przy obciążeniu rezystancyjnym od kąta alfa



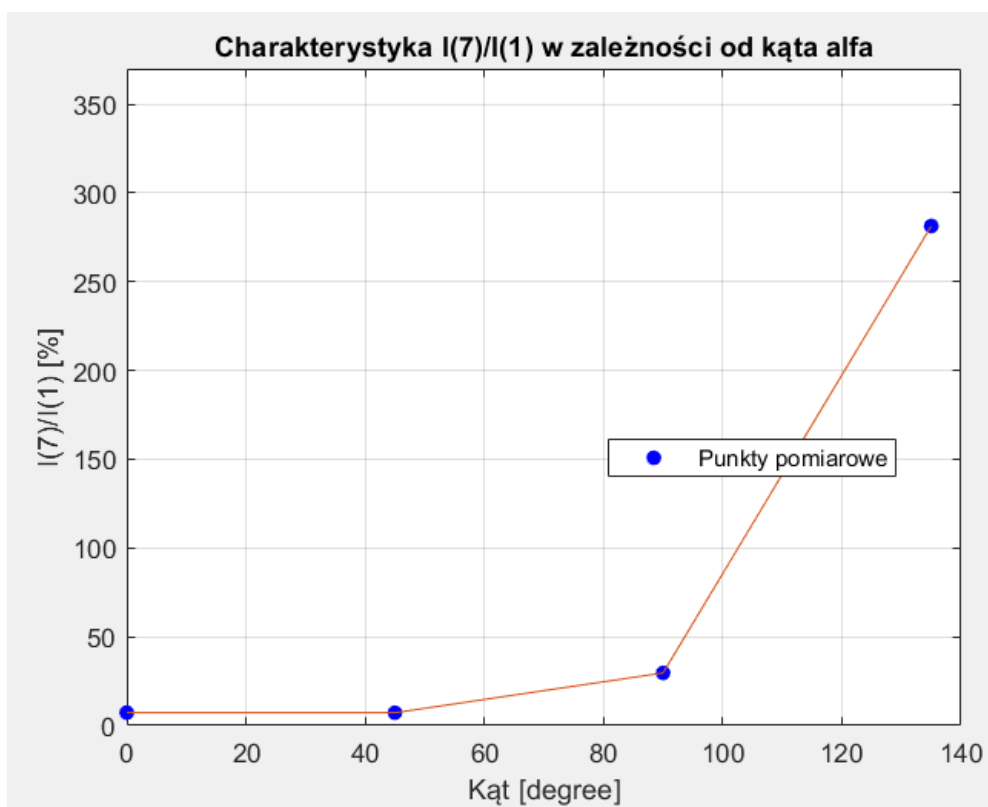
Grafika 29 Wykres zależności całkowitego zniekształcenia harmonicznego (THD) przy obciążeniu rezystancyjno-indukcyjnym od kąta alfa



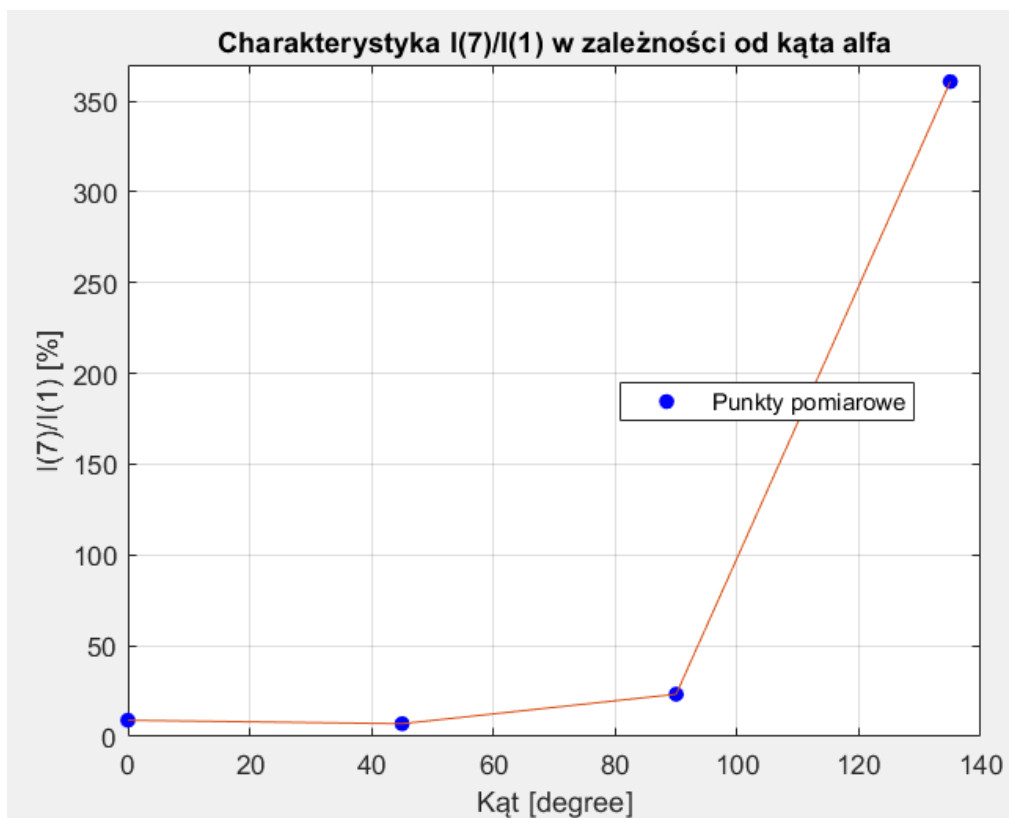
Grafika 30 Wykres stosunku piątej do pierwszej harmonicznej przy obciążeniu rezystancyjnym j w zależności od kąta alfa



Grafika 31 Wykres stosunku piątej do pierwszej harmonicznej przy obciążeniu rezystancyjno-indukcyjnym w zależności od kąta alfa



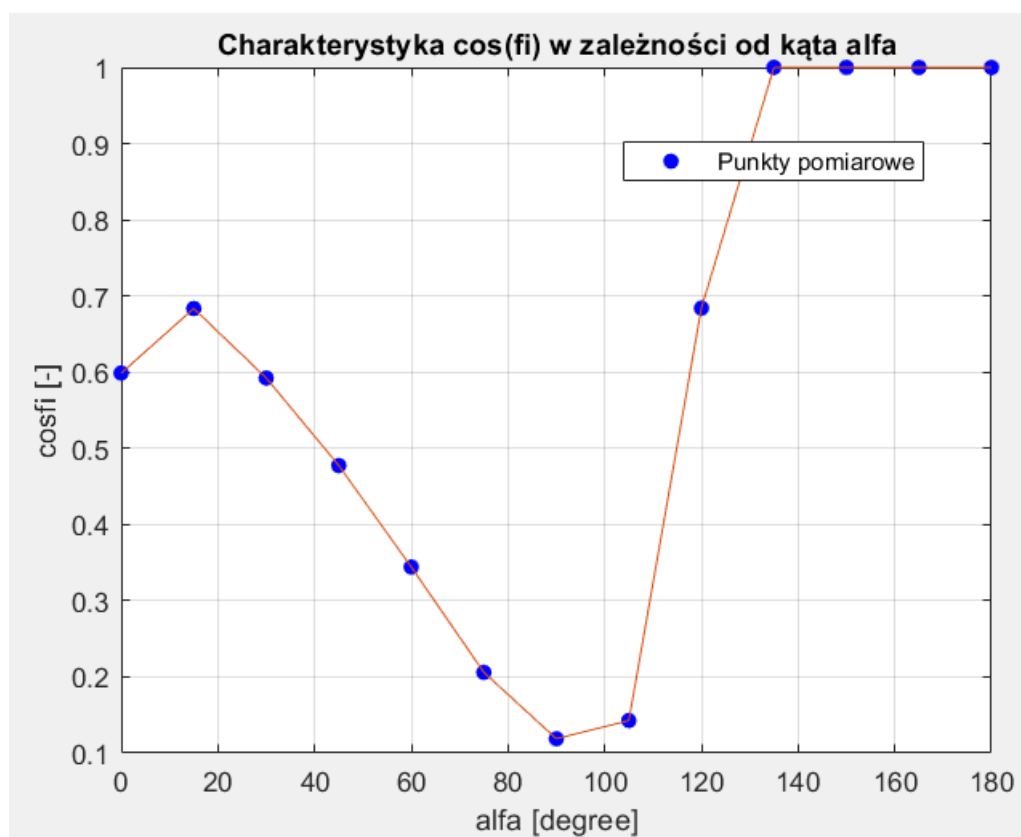
Grafika 32 Wykres stosunku siódmej do pierwszej harmonicznej przy obciążeniu rezystancyjnym j w zależności od kąta alfa



Grafika 33 Wykres stosunku siódmej do pierwszej harmonicznej przy obciążeniu rezystancyjno-indukcyjnym w zależności od kąta alfa

Tabela 3 Wartości mocy dla obciążenia rezystancyjnego obliczone w poprzednim podpunkcie na podstawie, których obliczony został $\cos(\varphi)$

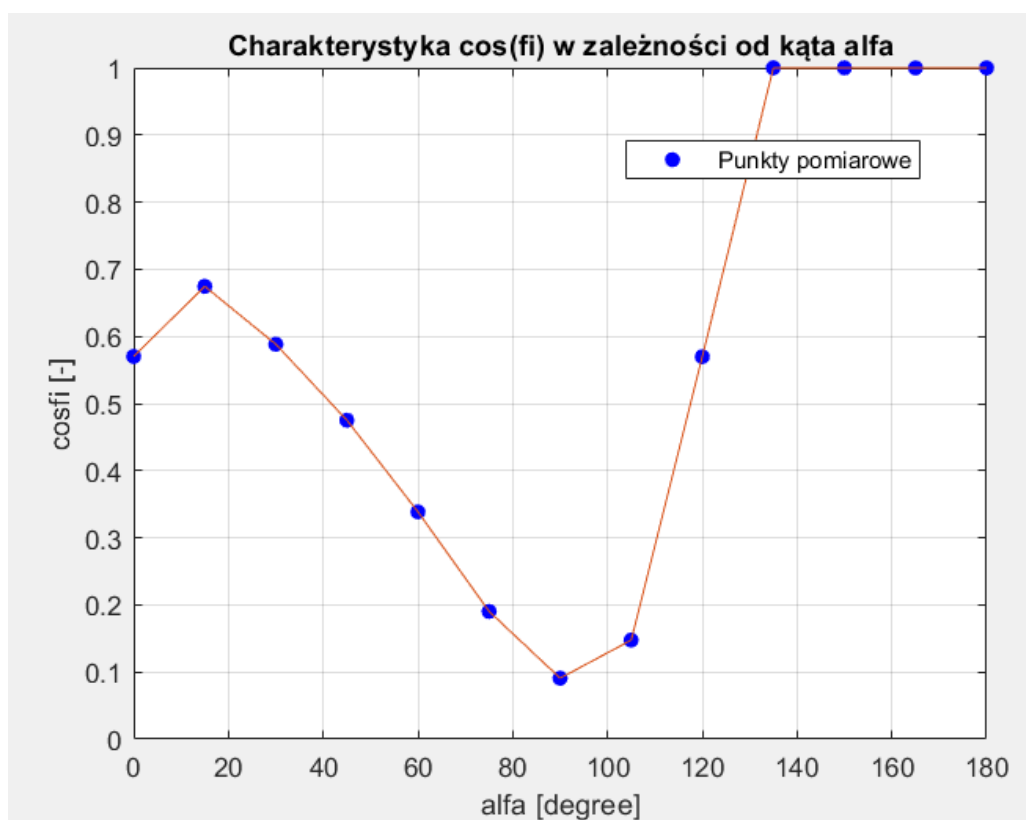
Alfa [degrees]	P [W]	Q [Var]	S [VA]	$\cos\varphi$ [-]
0	11355.04778	15187.37546	18962.95028	0.598801748
15	18196.47487	19430.5893	26620.65924	0.683547117
30	14082.21988	19153.78736	23773.44079	0.592350935
45	9363.231035	17230.68988	19610.37402	0.477463154
60	4898.122096	13362.2824	14231.73183	0.344169083
75	1645.397232	7815.83052	7987.14835	0.206005593
90	290.8189822	2429.593891	2446.937301	0.118850198
105	62.15679446	431.0515023	435.5098905	0.142721889
120	23.81778153	25.39144489	34.81396546	0.684144458
135	6.647753086	-5.64924E-09	6.647753086	1
150	0.900006759	-4.51534E-32	0.900006759	1
165	0.900006759	-5.64924E-09	0.900006759	1
180	0.900006759	-5.64924E-09	0.900006759	1



Grafika 34 Wykres $\cos(\varphi)$ przy obciążeniu rezystancyjnym w zależności od kąta alfa

Tabela 4 Wartości mocy dla obciążenia rezystancyjno-indukcyjnego obliczone w poprzednim podpunkcie na podstawie, których obliczony został $\cos(\phi)$

Alfa [degrees]	P [W]	Q [Var]	S [VA]	$\cos\phi$ [-]
0	11310.98885	16302.67405	19842.26928	0.570045124
15	17815.24231	19497.61791	26410.98186	0.67453919
30	13940.2858	19164.25879	23698.10928	0.588244642
45	9281.524275	17190.50699	19536.12611	0.475095432
60	4745.544877	13186.92781	14014.82291	0.338608979
75	1432.561109	7389.445784	7527.027324	0.190322294
90	142.7551492	1564.901034	1571.398829	0.090845905
105	45.81164558	307.1340729	310.5318754	0.147526387
120	22.79651876	32.88151811	40.01094227	0.569757108
135	6.986267415	-5.65E-09	6.986267415	1
150	0.900006759	-4.52E-32	0.900006759	1
165	0.900006759	-5.65E-09	0.900006759	1
180	0.900006759	-5.65E-09	0.900006759	1



Grafika 34 Wykres $\cos(\phi)$ przy obciążeniu rezystancyjno-indukcyjnym w zależności od kąta α

Na grafikach 12-27 zostały przedstawione charakterystyki FFT (Fast Fourier Transform), które są reprezentacją sygnału w postaci transformaty fouriera. Poszczególne kolumny odpowiadają kolejnym harmonicznym. Na podstawie tej charakterystyki jesteśmy w stanie wyznaczyć całkowite zniekształcenia harmoniczne (THD). Jest to miara zawartości harmonicznych

w przebiegu w porównaniu do jego częstotliwości podstawowej. W badanym przez nas przebiegu prądu w każdym przypadku zauważalne są oprócz pierwszej harmonicznej 5, 7, 11, 13 oraz 17 i 19. Jest ich więcej jednak w miarę oddalania się od sygnału są coraz mniejsze, zatem mają mniejsze znaczenie. Zatem to wymienione wcześniej składają się na nasz wygląd sygnału. Im większe są kolejne harmoniczne w porównaniu do pierwszej tym większe zniekształcenie sygnału - całkowite zniekształcenia harmoniczne (THD).

W tabelach 1 i 2 zostały zebrane wartości odczytane z wyżej wymienionych grafik, a następnie przedstawione w postaci wykresów na grafikach 28-33. Analizując wykresy można zauważyć korelację z poprzednim podpunktem. Wartość THD odwrotnie do mocy początkowo chwilowo spada, aby następnie stale wzrastać, a gwałtownie wzrosnąć po przekroczeniu wartości $\alpha=90$. Na wartość THD składają się wspomniane wcześniej harmoniczne poza pierwszą zatem ich zależność od kąta α przedstawia się podobnie. Wyzwalanie tyrystorów przy niezerowych kątach α (opóźnione), może wprowadzać harmoniczne do przebiegu prądu fazowego, w konsekwencji również zmniejszać wartość prądu, który jest składnikiem mocy. Zależność przedstawia się podobnie zarówno dla obciążenia rezystancyjnego jak i rezystancyjno-indukcyjnego, jednak większą wartość THD po przekroczeniu 90 stopni dla drugiego przypadku.

W tabelach 3 i 4 zostały zebrane wartości odczytane w poprzednim podpunkcie dotyczącym analizy mocy. Dzieląc wartość mocy czynnej przez moc pozorną otrzymaliśmy $\cos(\varphi)$. Kąt φ jest sumą kąta komutacji oraz kąta α . W obu jego zależność przedstawiała się podobnie tzn. początkowo chwilowo wzrastała, by później stopniowo opadać do kąta $\alpha=90$ po przekroczeniu, którego znowu gwałtownie rosła.

d. Wartość średnia i przebieg napięcia U_{dc}

Kod:

```
clear all
close all
clc
load ('Wyniki_R0.mat')
figure()
plot(Udc.time, Udc.signals.values(:,1))
hold on
grid on
ylabel('Udc [V]');
xlabel('t [s]');
excludeRange = 1:80202;
averageValueR0 =
mean(Udc.signals.values(excludeRange+1:
end, 1))

load ('Wyniki_R45.mat')
figure()
plot(Udc.time, Udc.signals.values(:,1))
hold on
grid on
ylabel('Udc [V]');
xlabel('t [s]');
excludeRange = 1:56668;
averageValueR45 =
mean(Udc.signals.values(excludeRange+1:
end, 1))

load ('Wyniki_R90.mat')
figure()
plot(Udc.time, Udc.signals.values(:,1))
hold on
grid on
ylabel('Udc [V]');
xlabel('t [s]');
excludeRange = 1:26668;
averageValueR90 =
mean(Udc.signals.values(excludeRange+1:
end, 1))

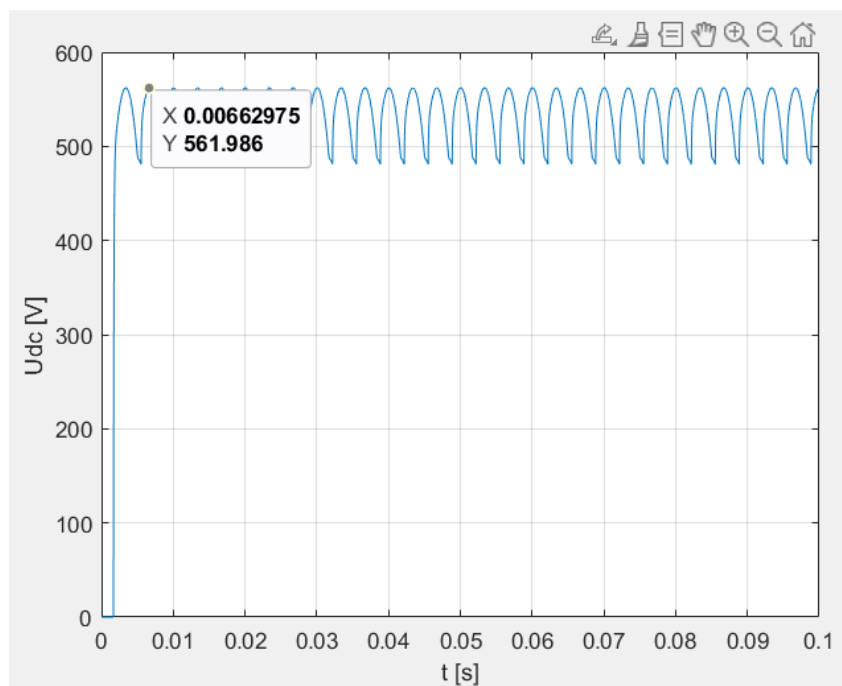
load ('Wyniki_R135.mat')
figure()
plot(Udc.time, Udc.signals.values(:,1))
hold on
grid on
ylabel('Udc [V]');
xlabel('t [s]');
excludeRange = 1:63335;
averageValueR135 =
mean(Udc.signals.values(excludeRange+1:
end, 1))

load ('Wyniki_L0.mat')
figure()
plot(Udc.time, Udc.signals.values(:,1))
hold on
grid on
ylabel('Udc [V]');
xlabel('t [s]');
excludeRange = 1:80002;
averageValueL0 =
mean(Udc.signals.values(excludeRange+1:
end, 1))

load ('Wyniki_L45.mat')
figure()
plot(Udc.time, Udc.signals.values(:,1))
hold on
grid on
ylabel('Udc [V]');
xlabel('t [s]');
excludeRange = 1:43335;
averageValueL45 =
mean(Udc.signals.values(excludeRange+1:
end, 1))

load ('Wyniki_L90.mat')
figure()
plot(Udc.time, Udc.signals.values(:,1))
hold on
grid on
ylabel('Udc [V]');
xlabel('t [s]');
excludeRange = 1:52525;
averageValueL90 =
mean(Udc.signals.values(excludeRange+1:
end, 1))

load ('Wyniki_L135.mat')
figure()
plot(Udc.time, Udc.signals.values(:,1))
hold on
grid on
ylabel('Udc [V]');
xlabel('t [s]');
excludeRange = 1:53423;
averageValueL135 =
mean(Udc.signals.values(excludeRange+1:
end, 1))
```

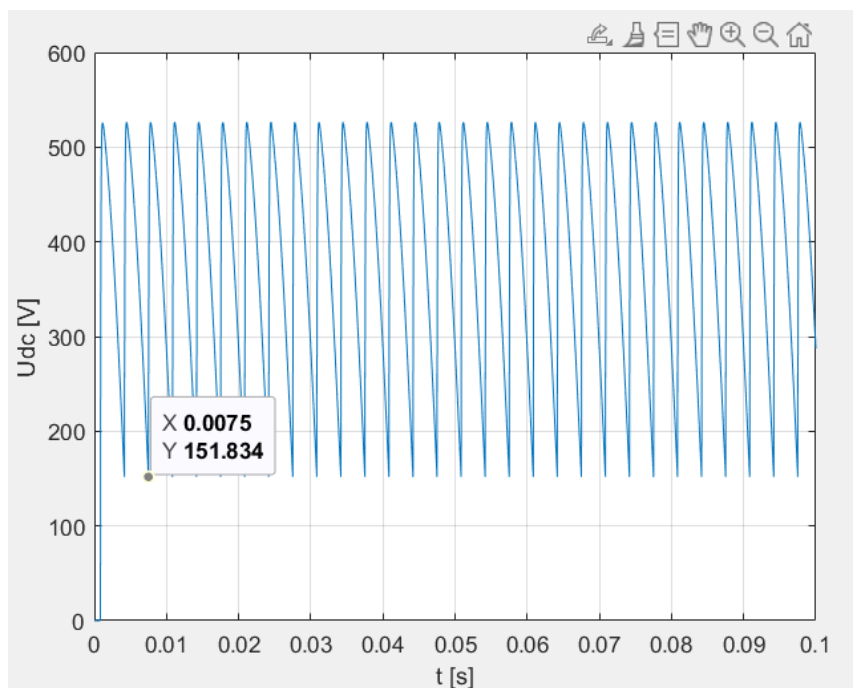


Grafika 35 Przebieg U_{dc} dla $\alpha=0$ oraz obciążenia rezystancyjnego

80200	562.1962	
80201	562.1962	
80202	562.1962	
80203	562.1962	
80204	562.1962	
80205	562.1962	
80206	562.1961	

averageValue =

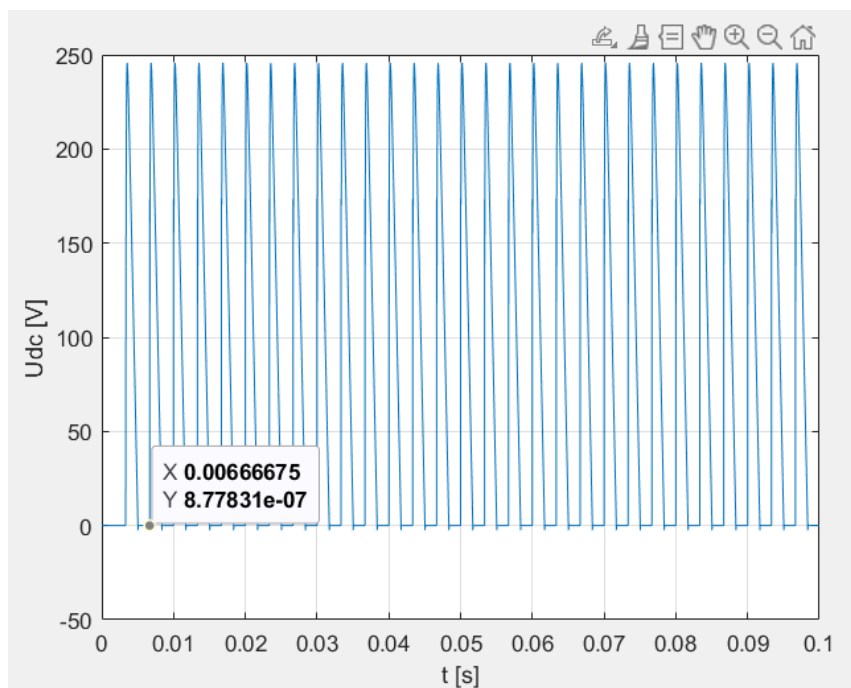
524.0554



Grafika 36 Przebieg U_{dc} dla $\alpha=45$ oraz obciążenia rezystancyjnego

56664	151.9902	
56665	151.9475	
56666	151.9048	
56667	151.8621	
56668	151.8194	
56669	261.2004	
56670	245.5074	
56671	231.1274	

averageValue =
375.6400

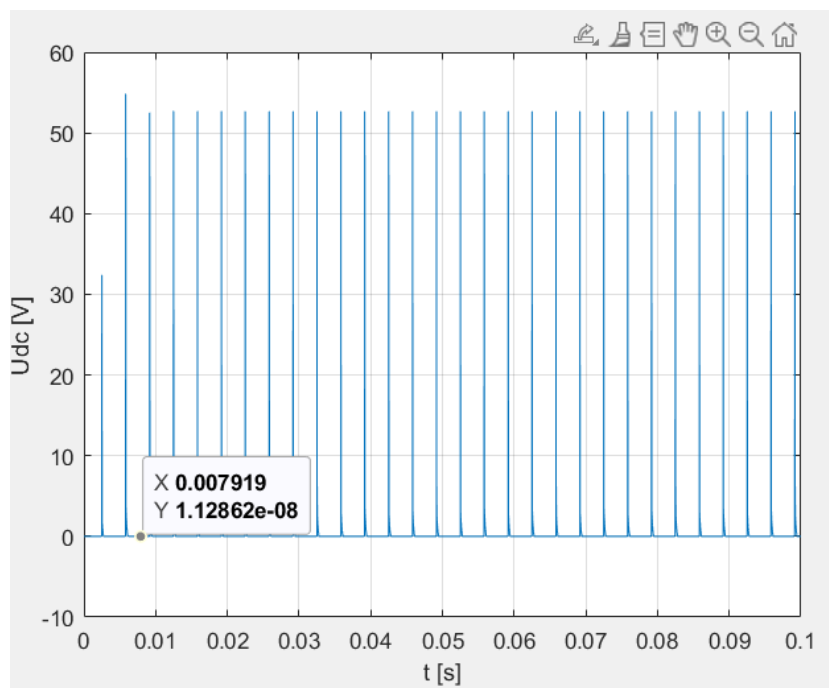


Grafika 37 Przebieg U_{dc} dla $\alpha=90$ oraz obciążenia rezystancyjnego

26667	8.7955e-07	
26668	8.7783e-07	
26669	173.4560	
26670	138.9570	

averageValue =

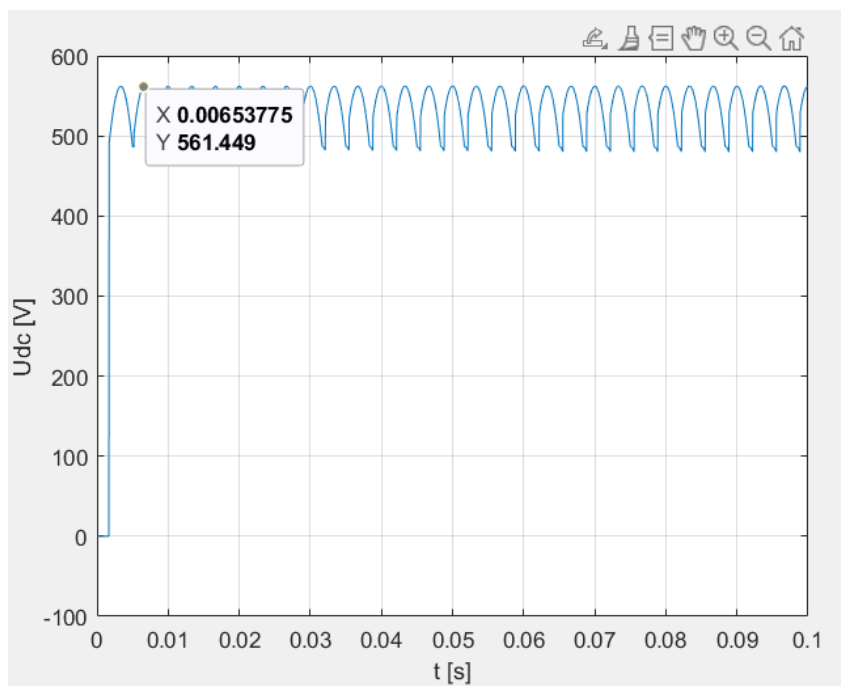
68.3863



Grafika 38 Przebieg U_{dc} dla $\alpha=135$ oraz obciążenia rezystancyjnego

63334	2.0708e-09
63335	2.0706e-09
63336	52.6955
63337	42.2072

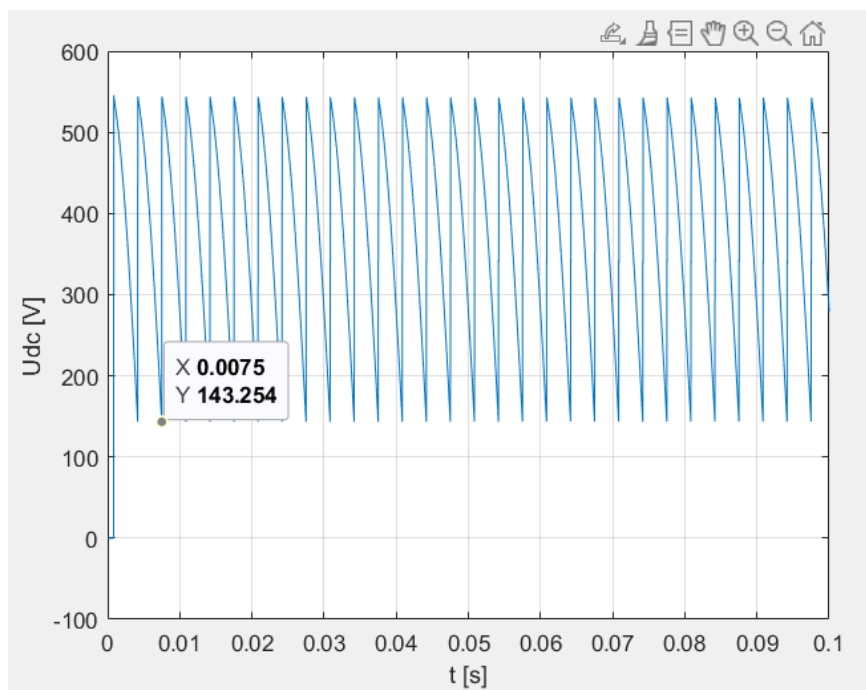
averageValue =
0.1386



Grafika 39 Przebieg U_{dc} dla $\alpha=0$ oraz obciążenia rezystancyjno-indukcyjnego

80000	562.0380
80001	562.0380
80002	562.0380
80003	562.0380
80004	562.0380

```
averageValue =  
  
525.0844  
  
>>
```

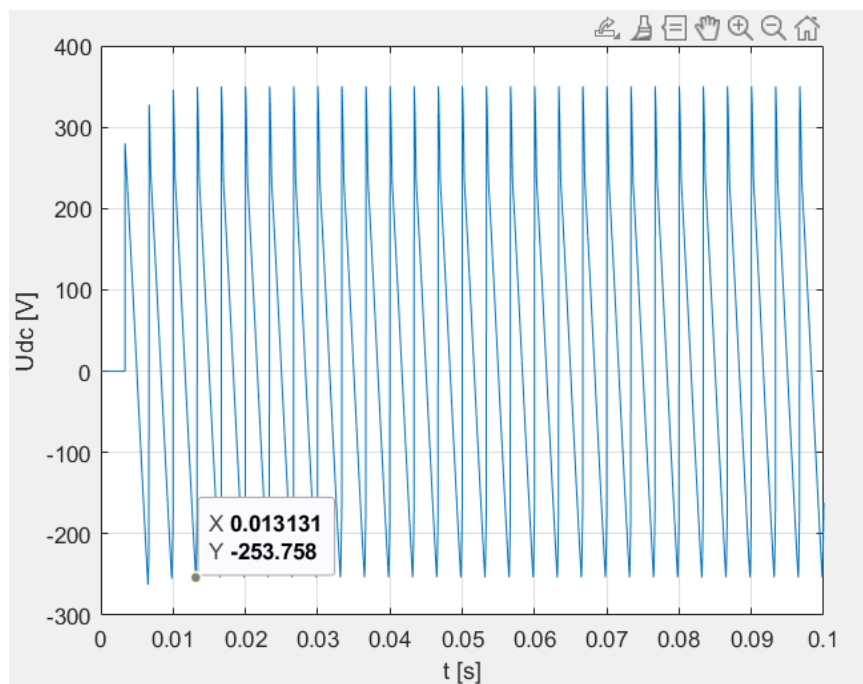


Grafika 40 Przebieg U_{dc} dla $\alpha=45$ oraz obciążenia rezystancyjno-indukcyjnego

43333	143.3352	
43334	143.2924	
43335	143.2495	
43336	284.8089	
43337	292.0980	
43338	300.7414	
43339	307.9281	

averageValue =

374.9394

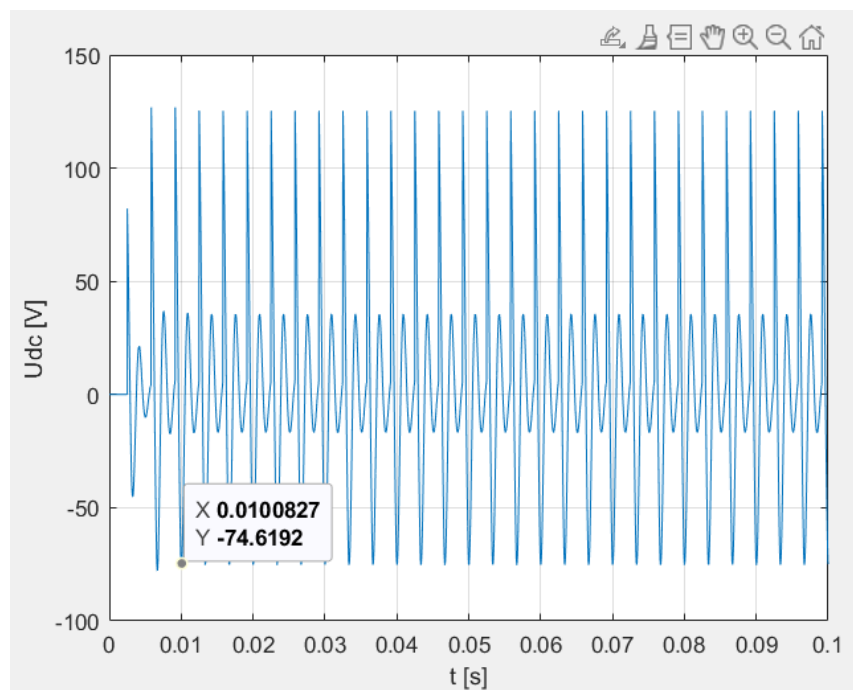


Grafika 41 Przebieg U_{dc} dla $\alpha=90$ oraz obciążenia rezystancyjno-indukcyjnego

52522	-253.7550	
52523	-253.6955	
52524	-253.7353	
52525	-253.7576	
52526	-253.7543	
52527	-253.7500	
52528	-253.7439	

averageValue =

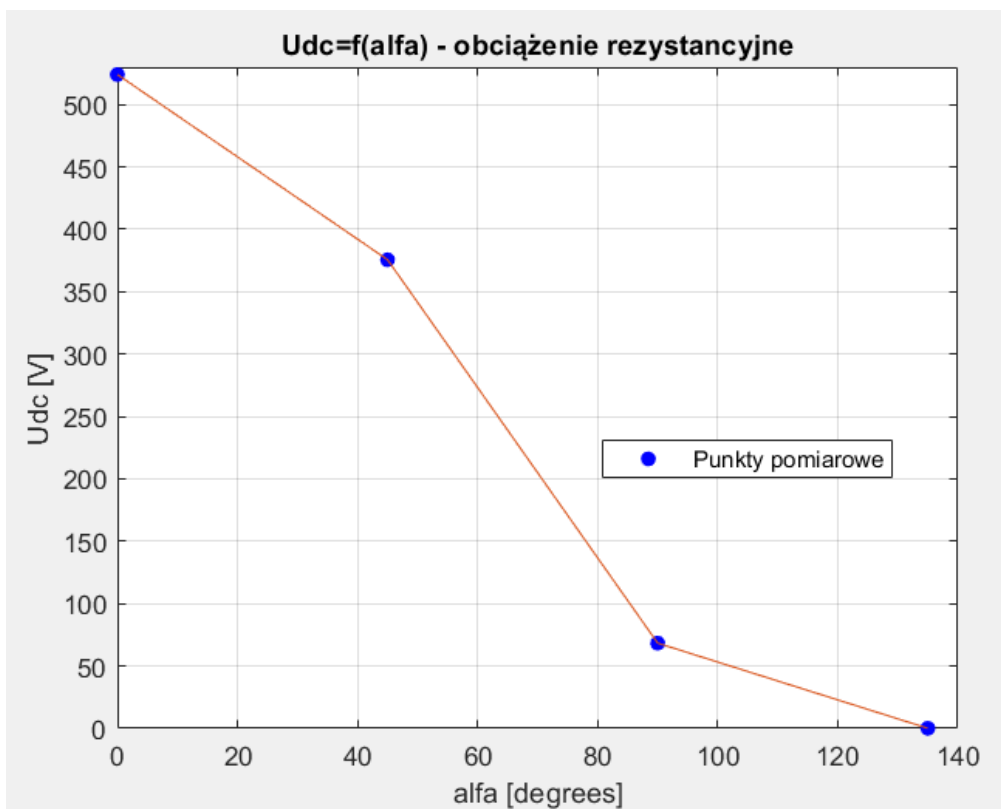
3.5426



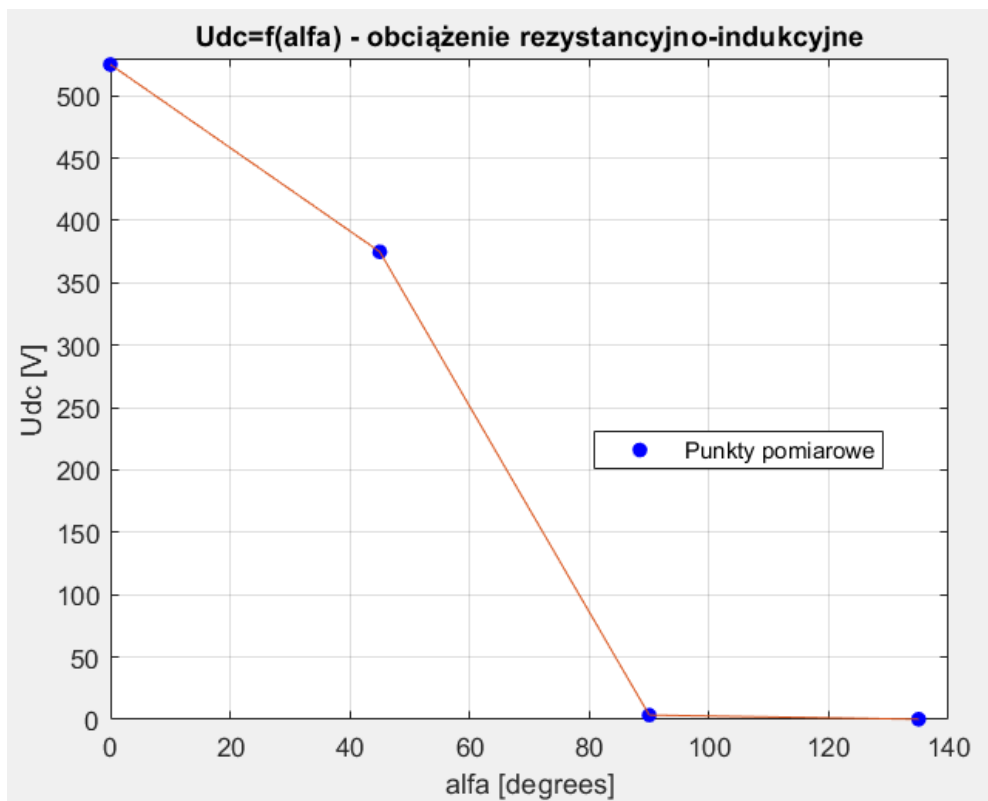
Grafika 42 Przebieg U_{dc} dla $\alpha=135$ oraz obciążenia rezystancyjno-indukcyjnego

53419	-75.2672
53420	-75.2673
53421	-75.2674
53422	-75.2675
53423	-75.2675
53424	-75.2674
53425	-75.2672

averageValue =
0.2189



Grafika 43 Wykres zależności wartości średniej U_{dc} od kąta α dla obciążenia rezystancyjnego



Grafika 44 Wykres zależności wartości średniej U_{dc} od kąta α dla obciążenia rezystancyjno-indukcyjnego

Grafiki 35-42 przedstawiają przebiegi napięcia z zanotowanym przejściem do stanu ustalonego, natomiast mniejsze grafiki pod nimi są wyłącznie dla pokazania w jaki sposób zostały wyznaczone wartości przyjęte później w kodzie. Kąt alfa reprezentuje opóźnienie włączenia tyrystorów w każdym półcyklu napięcia wejściowego AC. Zatem wraz ze zwiększaniem kąta alfa, opóźniony zostaje moment, w którym tyrystory zaczynają przewodzić. Opóźnienie to skraca efektywny czas przewodzenia tyrystorów, prowadząc do krótszego czasu trwania dodatnich półcykli oprócz tego również wprowadza harmoniczne, o których wspomniane było w poprzednim podpunkcie. W konsekwencji prowadzi do zmniejszenia średniego napięcia na odbiorniku, co widać na grafikach 43 i 44. Przedstawiona na nich zależność w obu przypadkach przedstawia się podobnie. Jednak wartość przy obciążeniu rezystancyjnym przy osiągnięciu $\alpha=90$ stopni nie spada tak gwałtownie do zera.

4. Wpływ indukcyjności wejściowej mostka L_{in} na wybrane parametry

a. Przebieg prądu wejściowego

```
Kod:
clc; close all;

%parametry wejściowe
Us_ab=400;
f=50;
fi=0;
w=2*pi*f;
Ls=50e-6;
Lin=20e-3;
Rin=1/30*w*Lin;
R_obc=6;
L_obc=10e-6;
Rdiode=1e-3;
Vdiode=1.5;
fs=2.5e-07;

%PRZEBIEGI

figure() %ALFA=0 L=100e-6
fip=0;
Lin=100e-6;
Rin=1/30*w*Lin;
sim('spr_sim')
czas=UI_przebiegi.time;
U=UI_przebiegi.signals.values(:,4);
I=UI_przebiegi.signals.values(:,1);
subplot(2,1,1)
plot(czas,U,czas,I)
grid on
hold on

fip=60; %ALFA=60 L=100e-6

fip=0; %ALFA=0 L=5e-3
Lin=5e-3;
Rin=1/30*w*Lin;
sim('spr_sim')
czas=UI_przebiegi.time;
U=UI_przebiegi.signals.values(:,4);
I=UI_przebiegi.signals.values(:,1);
subplot(2,1,1)
plot(czas,I)
grid on; hold on

fip=60; %ALFA=60 L=5e-3
Lin=5e-3;
Rin=1/30*w*Lin;
sim('spr_sim')
czas=UI_przebiegi.time;
U=UI_przebiegi.signals.values(:,4);
I=UI_przebiegi.signals.values(:,1);
subplot(2,1,2)
plot(czas,I)
grid on; hold on

fip=0; %ALFA=0 L=1e-3
Lin=1e-3;
Rin=1/30*w*Lin;
sim('spr_sim')
czas=UI_przebiegi.time;
U=UI_przebiegi.signals.values(:,4);
I=UI_przebiegi.signals.values(:,1);
subplot(2,1,1)
plot(czas,I); title('ALFA = 0');
legend('Napięcie sieci U', 'Prąd I_L=1_0_0_e_-6', 'Prąd I_L=5_e_-3', 'Prąd I_L=1_e_-3');
```

```

Lin=100e-6;
Rin=1/30*w*Lin;
sim('spr_sim')
czas=UI_przebiegi.time;
U=UI_przebiegi.signals.values(:,4);
I=UI_przebiegi.signals.values(:,1);
subplot(2,1,2)
plot(czas,U,czas,I)
grid on
hold on

```

```

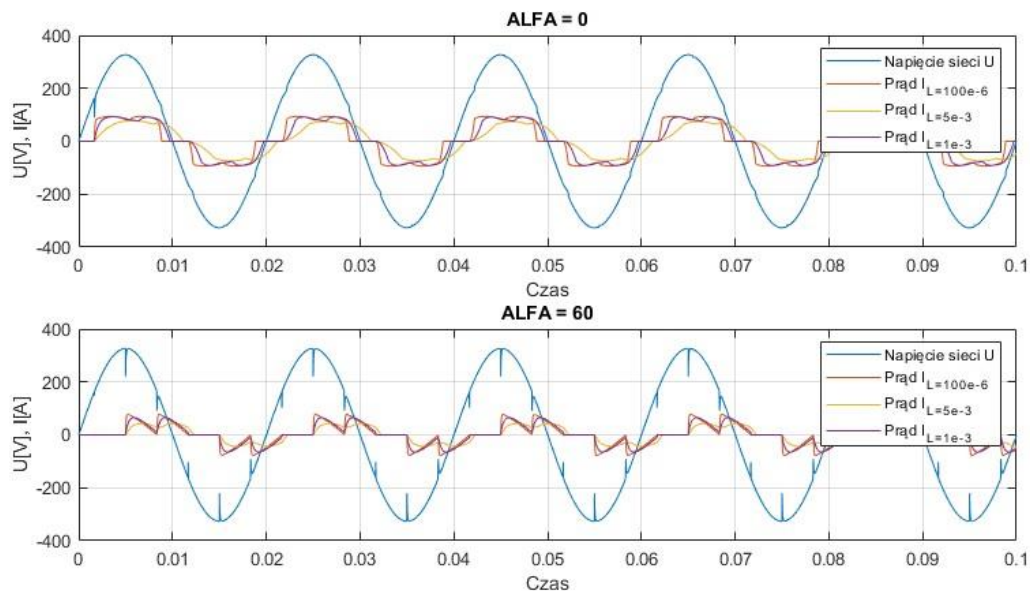
xlabel('Czas'); ylabel('U[V], I[A]')
grid on; hold on

```

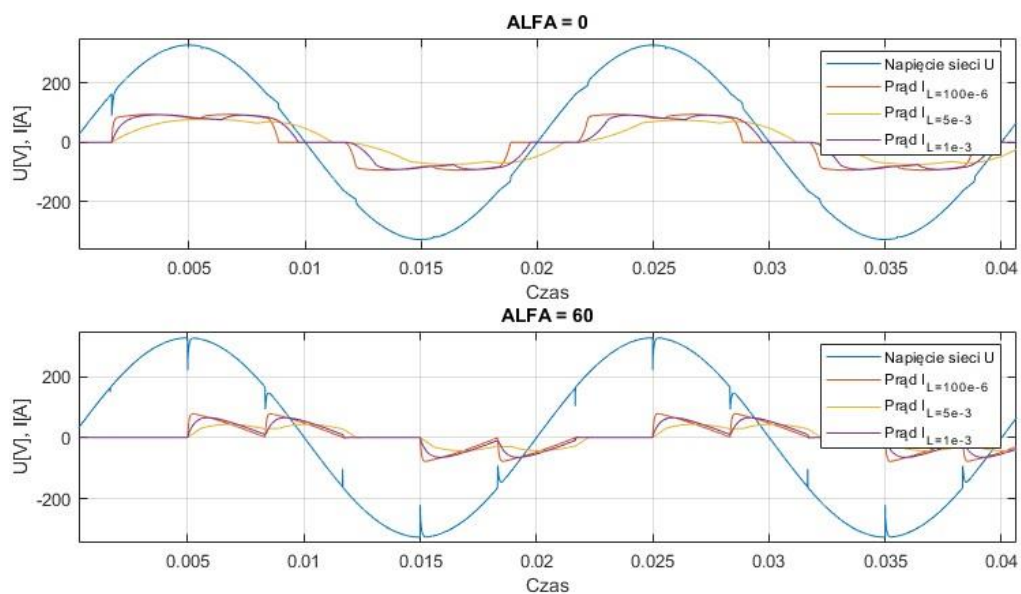
```

fip=60; %ALFA=60 L=5e-3
Lin=1e-3;
Rin=1/30*w*Lin;
sim('spr_sim')
czas=UI_przebiegi.time;
U=UI_przebiegi.signals.values(:,4);
I=UI_przebiegi.signals.values(:,1);
subplot(2,1,2)
plot(czas,I); title('ALFA = 60');
legend('Napięcie sieci U', 'Prąd I_L=100e-6', 'Prąd I_L=5e-3', 'Prąd I_L=1e-3');
xlabel('Czas'); ylabel('U[V], I[A]')
grid on; hold on

```



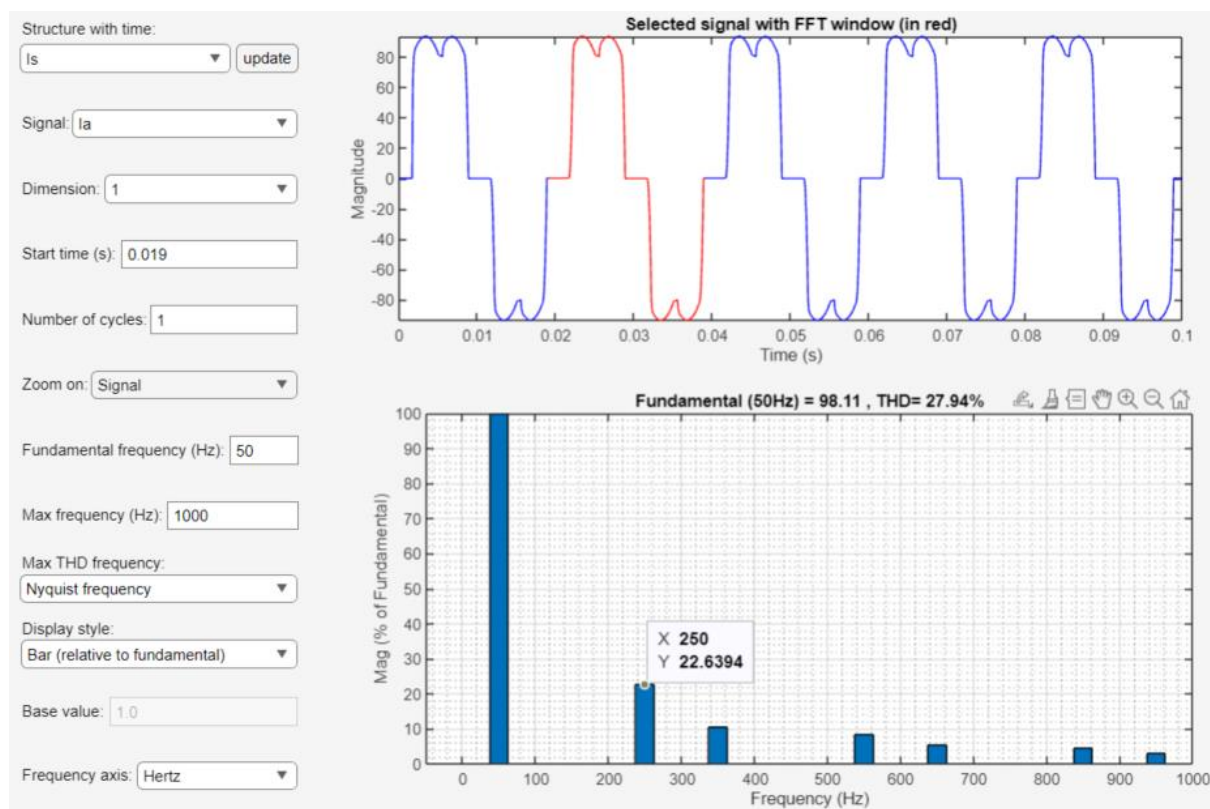
Grafika 45 Przebiegi prądu wejściowego na tle napięcia sieci



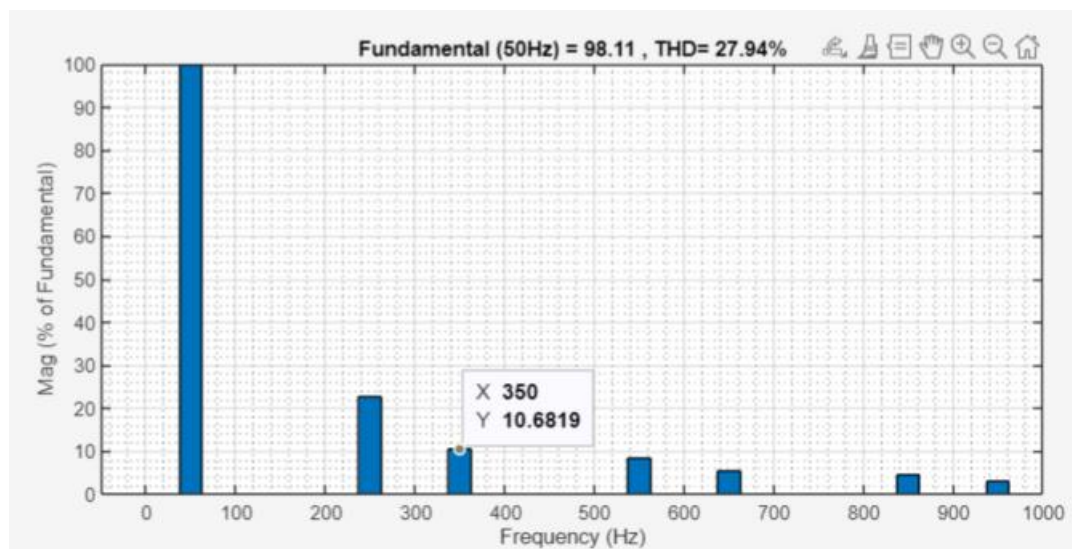
Grafika 46 Powiększone przebiegi prądu wejściowego na tle napięcia sieci

Indukcyjność wejściowa mostka wpływa na przebieg prądu, który dociera do tyrystorów. Im wyższa jest jej wartość tym mocniej wygładza przebieg prądu. Potwierdzają to grafiki 45 oraz 46. Dzieje się tak ponieważ wzrostem indukcyjności na wejściu, tempo zmian prądu staje się wolniejsze z powodu wstecznej siły elektromotorycznej indukowanej w cewkach indukcyjnych.

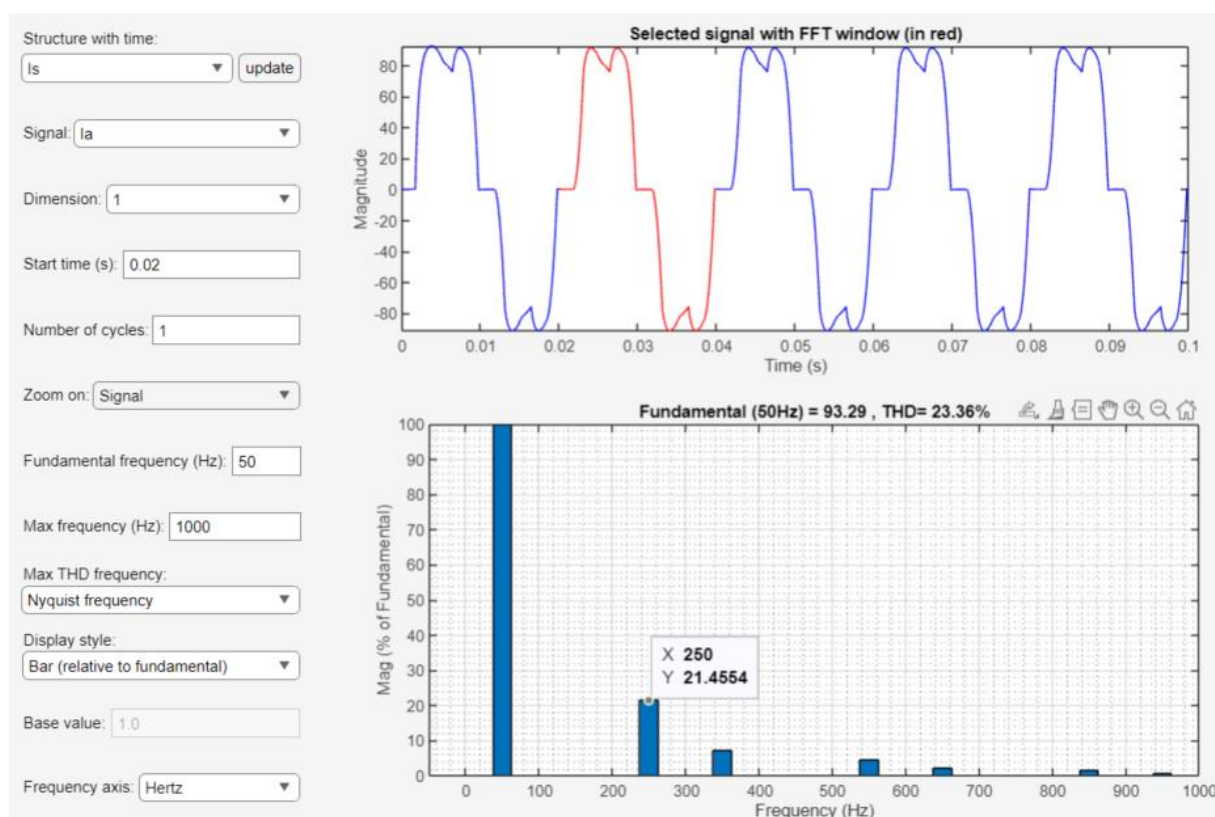
b. Analiza FFT dla przebiegu prądu sieci



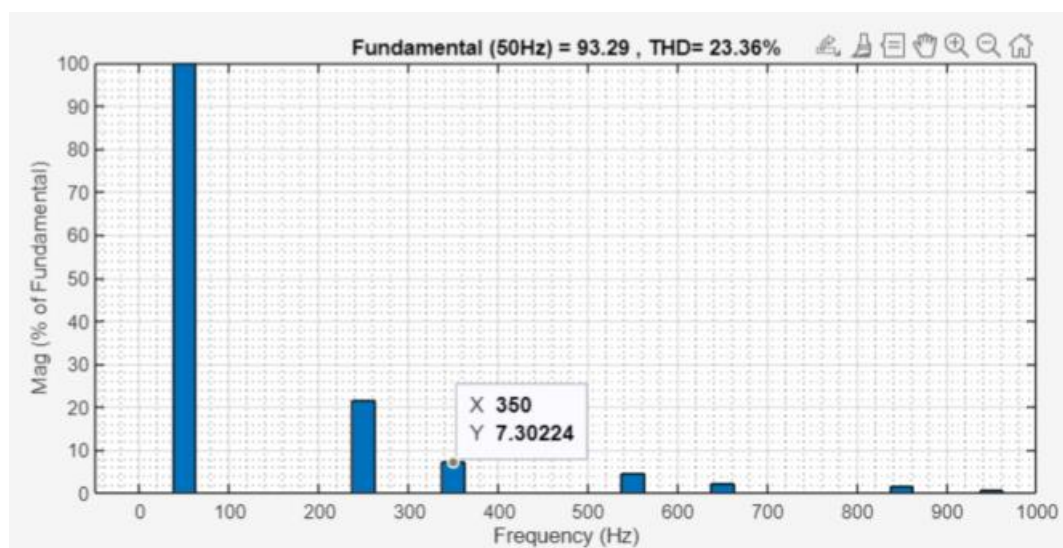
Grafika 47 Analiza FFT prądu fazowego dla $Lin=100e-6$ oraz $\alpha=0$ (z odczytem wartości 5-ej harmonicznej)



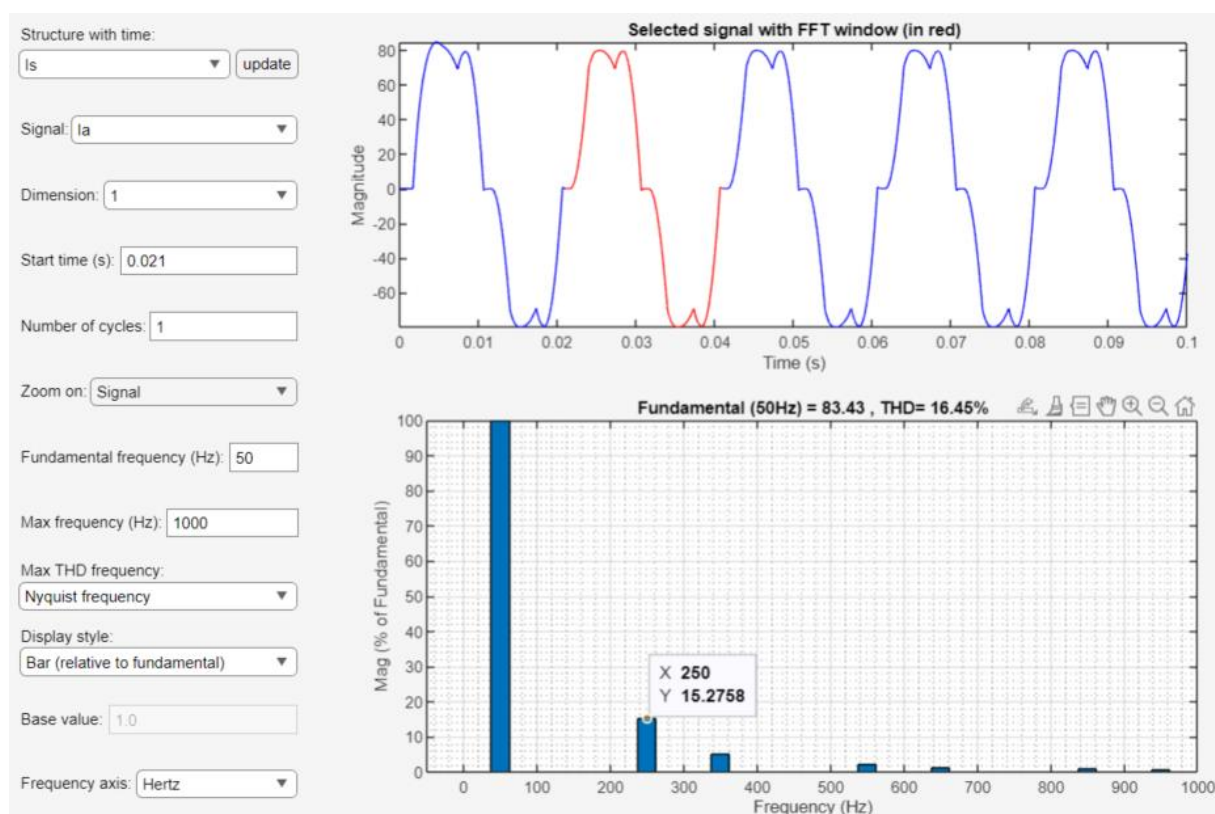
Grafika 48 Analiza FFT prądu fazowego dla $Lin=100e-6$ oraz $\alpha=0$ (z odczytem wartości 7-ej harmonicznej)



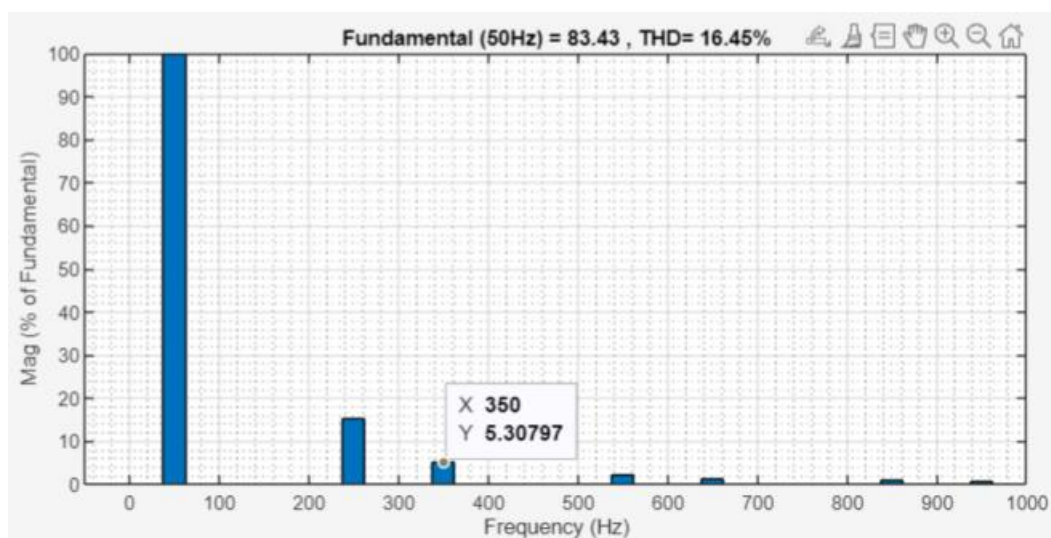
Grafika 49 Analiza FFT prądu fazowego dla $\text{Lin}=1e-3$ oraz $\alpha=0$ (z odczytem wartości 5-ej harmonicznej)



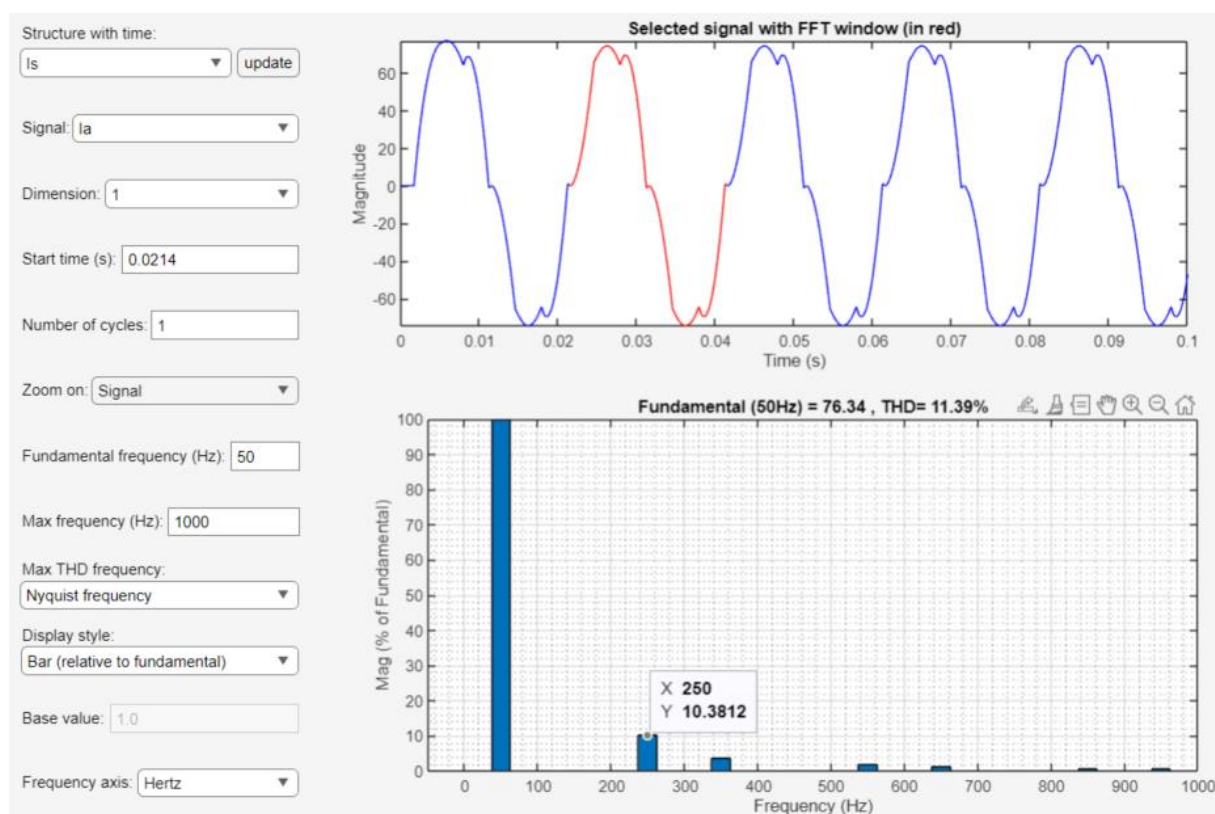
Grafika 50 Analiza FFT prądu fazowego dla $\text{Lin}=1e-3$ oraz $\alpha=0$ (z odczytem wartości 7-ej harmonicznej)



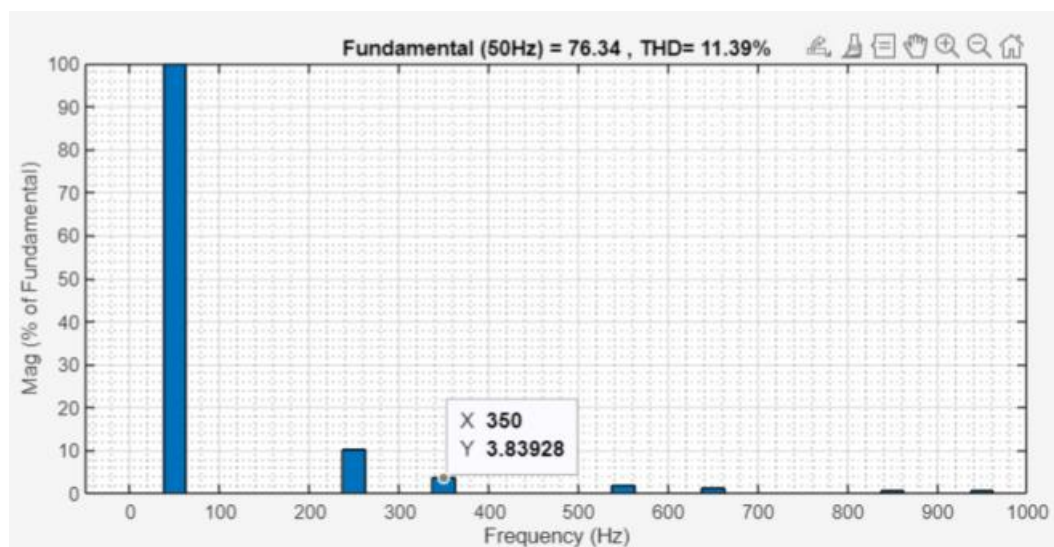
Grafika 51 Analiza FFT prądu fazowego dla $\text{Lin} = 3e-3$ oraz $\alpha = 0$ (z odczytem wartości 5-ej harmonicznej)



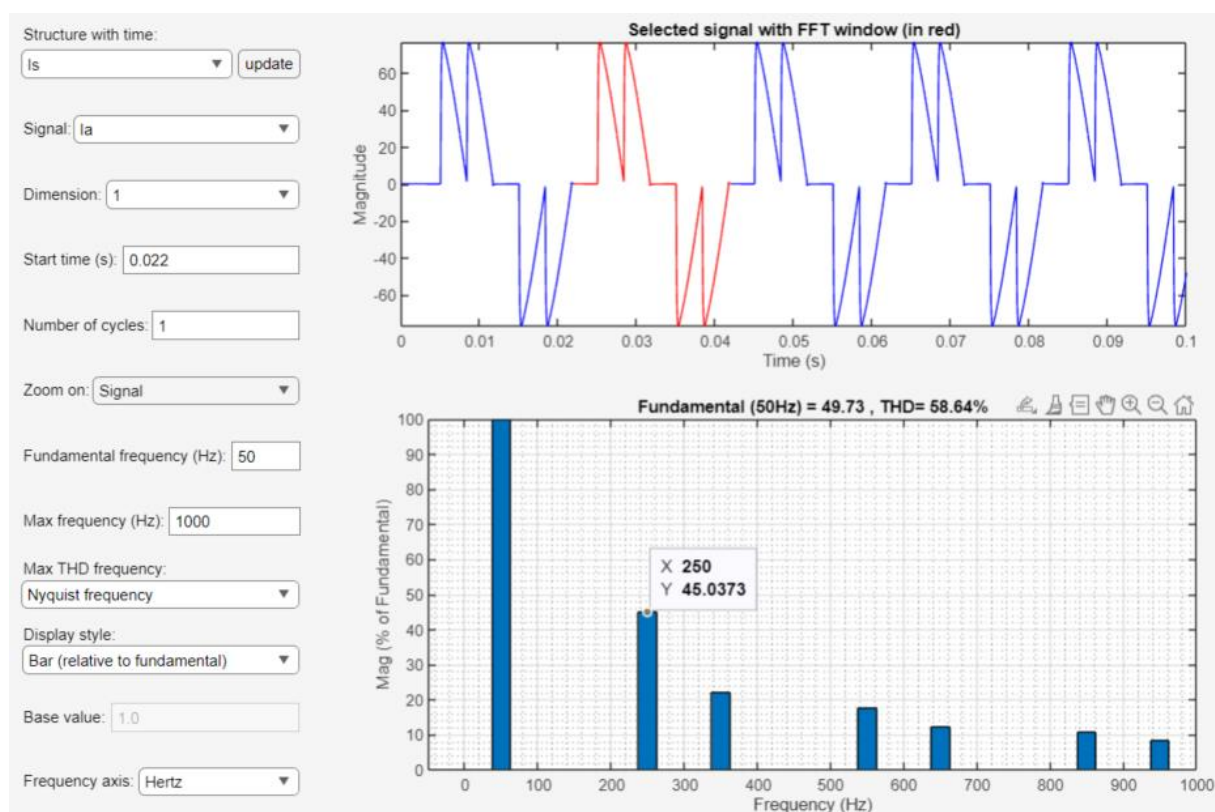
Grafika 52 Analiza FFT prądu fazowego dla $\text{Lin} = 3e-3$ oraz $\alpha = 0$ (z odczytem wartości 7-ej harmonicznej)



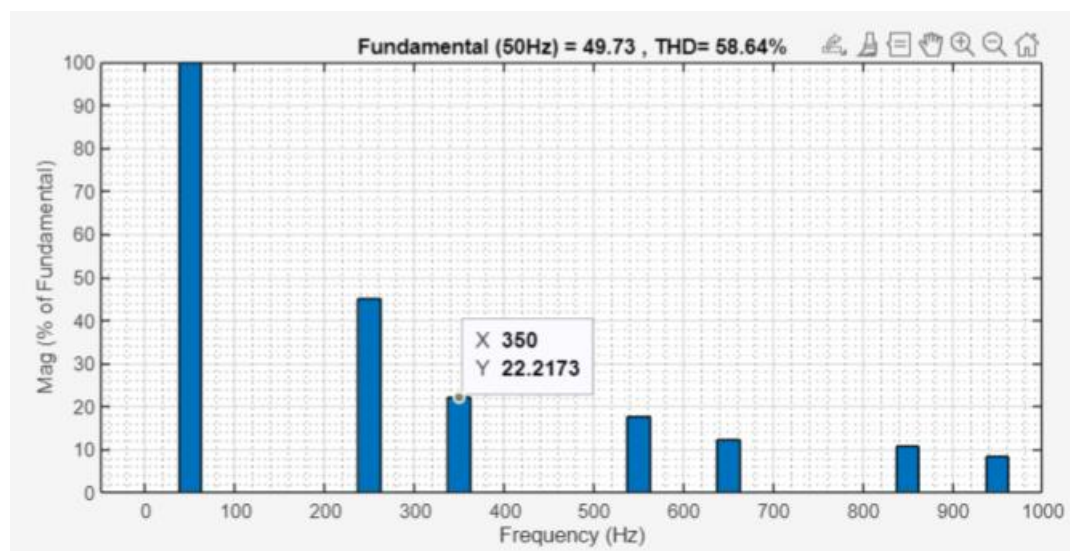
Grafika 53 Analiza FFT prądu fazowego dla $Lin= 5e-3$ oraz $\alpha=0$ (z odczytem wartości 5-ej harmonicznej)



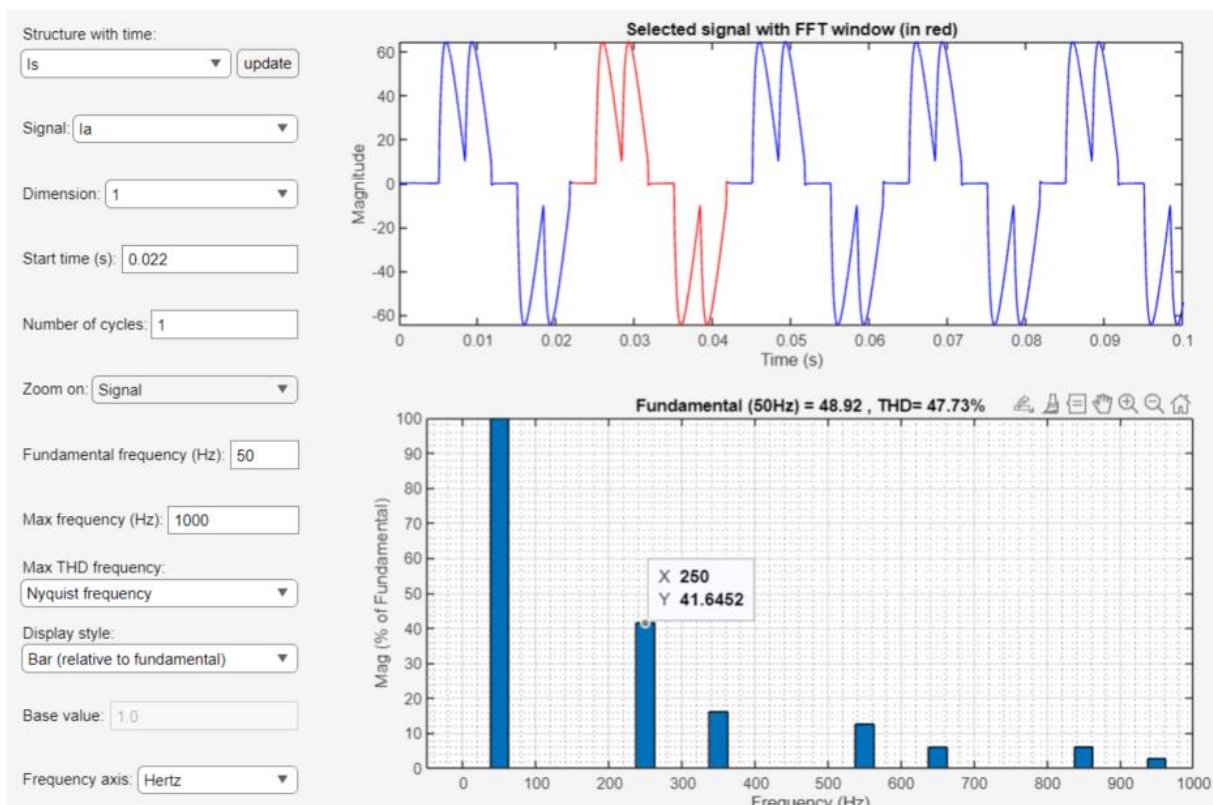
Grafika 54 Analiza FFT prądu fazowego dla $Lin= 5e-3$ oraz $\alpha=0$ (z odczytem wartości 7-ej harmonicznej)



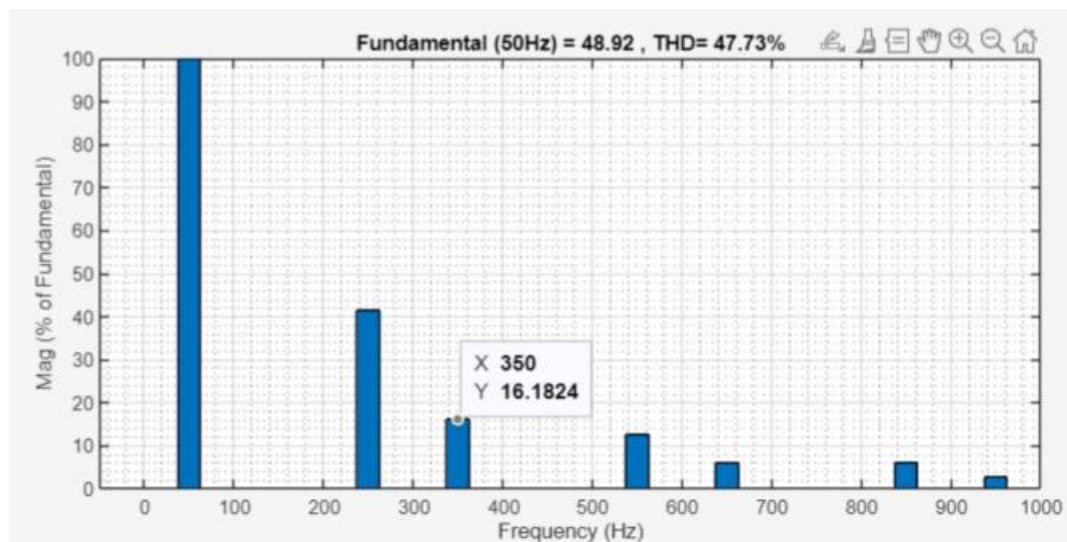
Grafika 55 Analiza FFT prądu fazowego dla $\text{Lin}=100\text{e-}6$ oraz $\alpha=60$ (z odczytem wartości 5-ej harmonicznej)



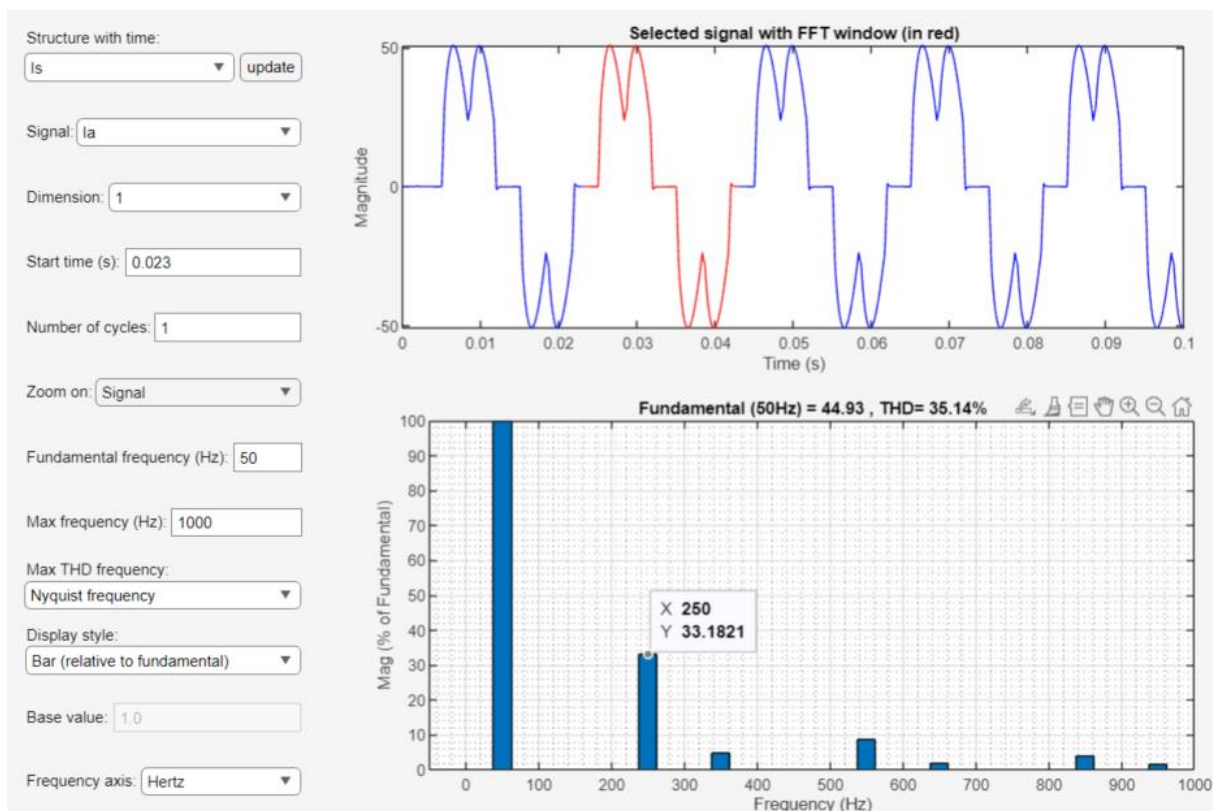
Grafika 56 Analiza FFT prądu fazowego dla $\text{Lin}=100\text{e-}6$ oraz $\alpha=60$ (z odczytem wartości 7-ej harmonicznej)



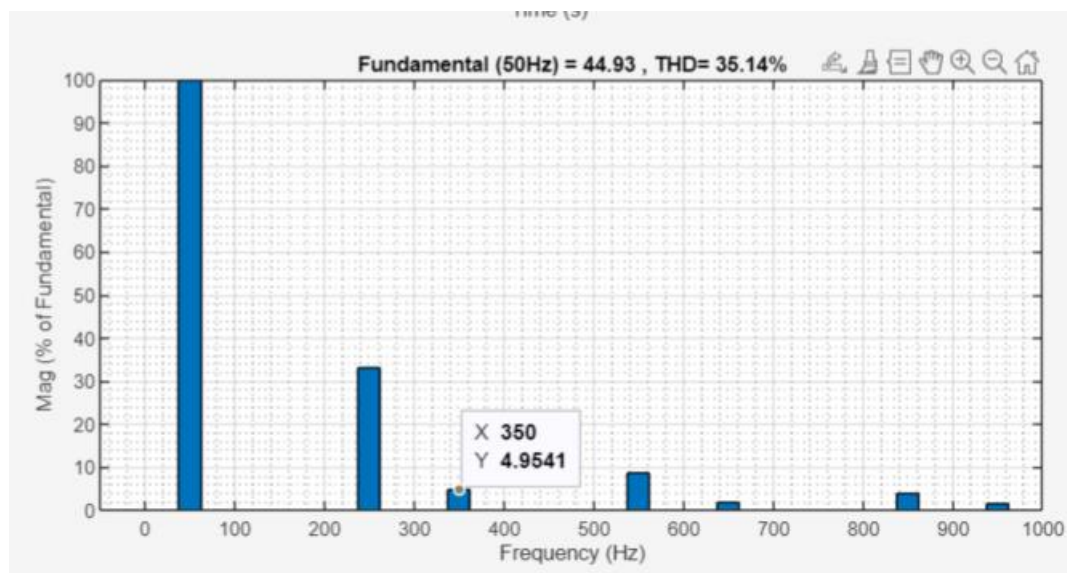
Grafika 57 Analiza FFT prądu fazowego dla $Lin= 1e-3$ oraz $\alpha=60$ (z odczytem wartości 5-ej harmonicznej)



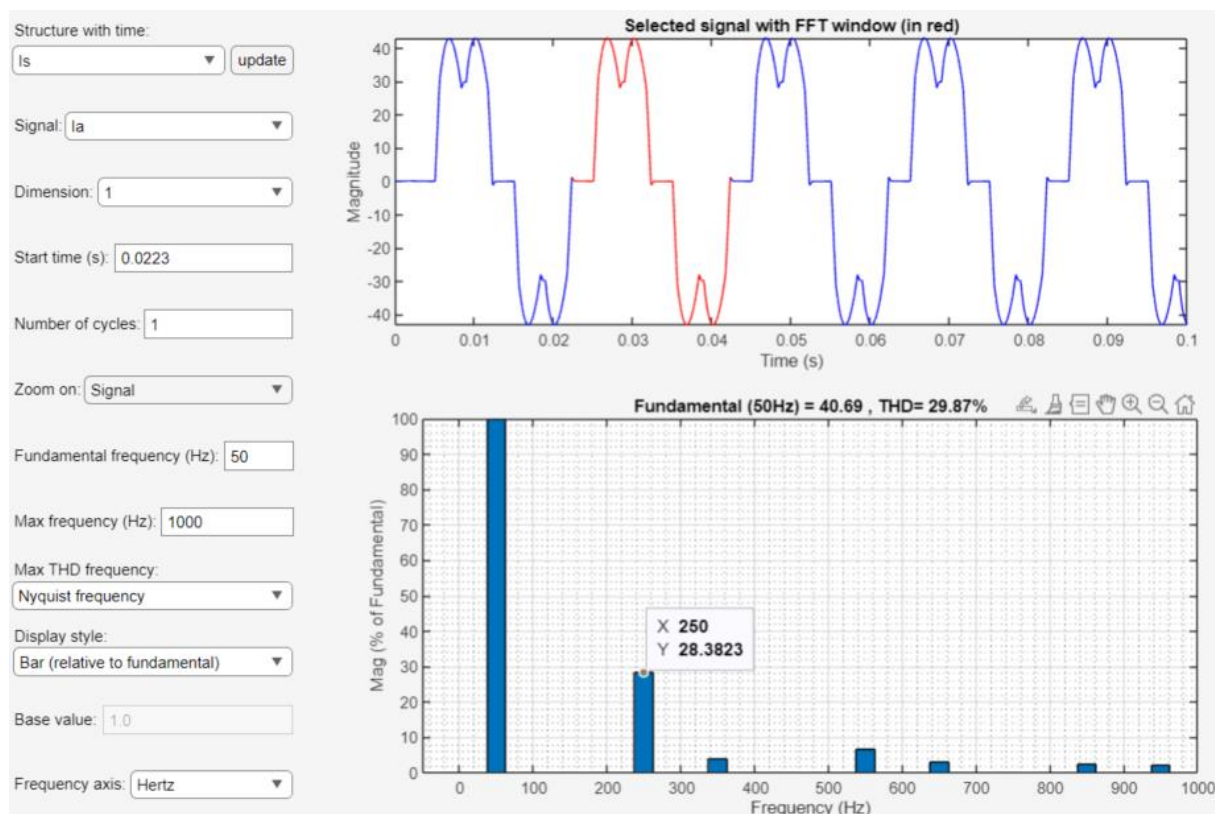
Grafika 58 Analiza FFT prądu fazowego dla $Lin= 1e-3$ oraz $\alpha=60$ (z odczytem wartości 7-ej harmonicznej)



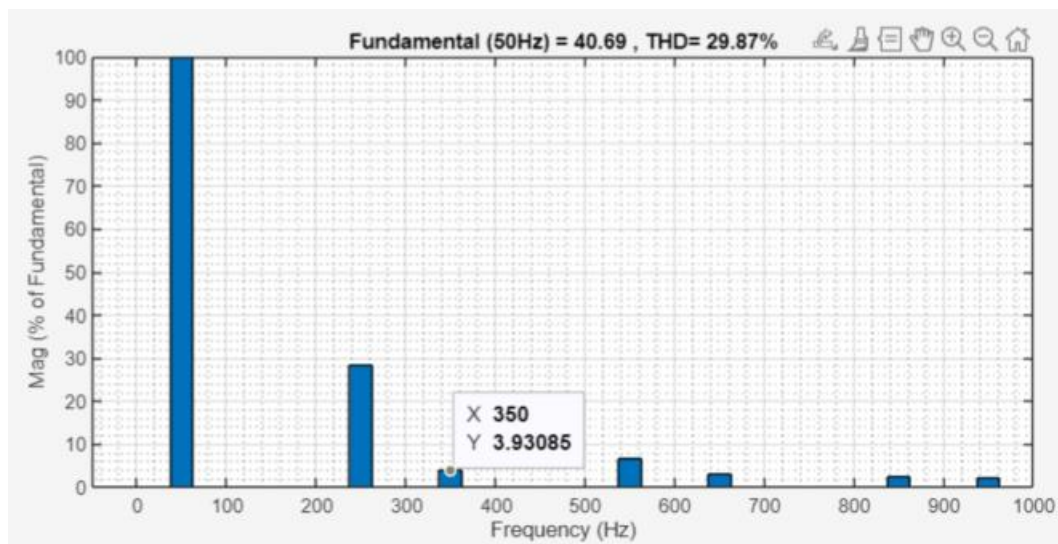
Grafika 59 Analiza FFT prądu fazowego dla $L_{in} = 3e-3$ oraz $\alpha = 60$ (z odczytem wartości 5-ej harmonicznej)



Grafika 60 Analiza FFT prądu fazowego dla $L_{in} = 3e-3$ oraz $\alpha = 60$ (z odczytem wartości 7-ej harmonicznej)



Grafika 61 Analiza FFT prądu fazowego dla Lin= 5e-3 oraz $\alpha=60$ (z odczytem wartości 5-ej harmonicznej)



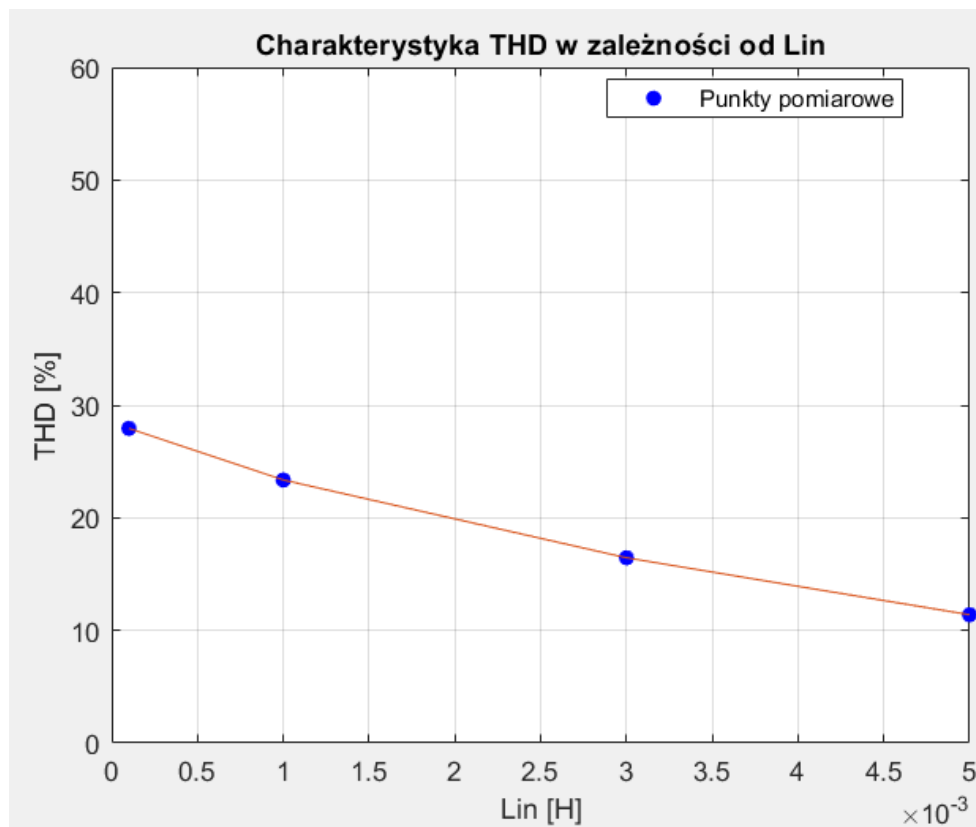
Grafika 62 Analiza FFT prądu fazowego dla Lin= 5e-3 oraz $\alpha=60$ (z odczytem wartości 7-ej harmonicznej)

Tabela 5 Wartości THD, $I(5)/I(1)$ oraz $I(7)/I(1)$ w zależności od Lin dla $\alpha=0$

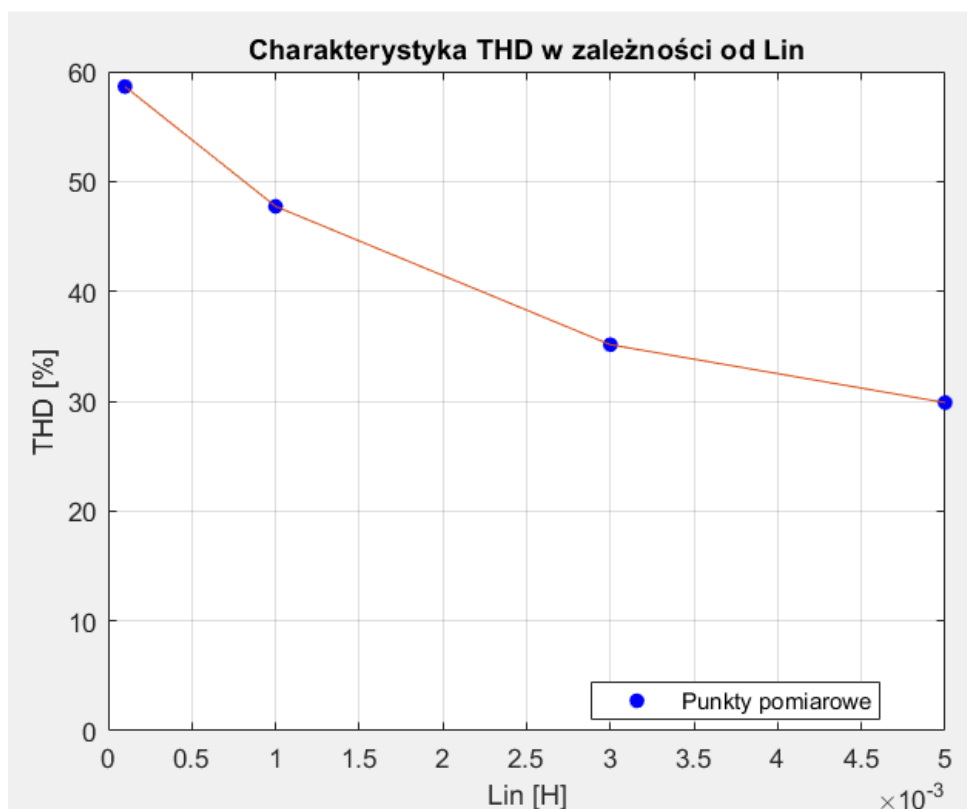
Lin [H]	THD [%]	$I(5)/I(1)$ [%]	$I(7)/I(1)$ [%]
1.00E-04	27.94	22.64	10.68
1.00E-03	23.36	21.46	7.3
3.00E-03	16.45	15.28	5.31
5.00E-03	11.39	10.38	3.84

Tabela 6 Wartości THD, $I(5)/I(1)$ oraz $I(7)/I(1)$ w zależności od Lin dla $\alpha=60$

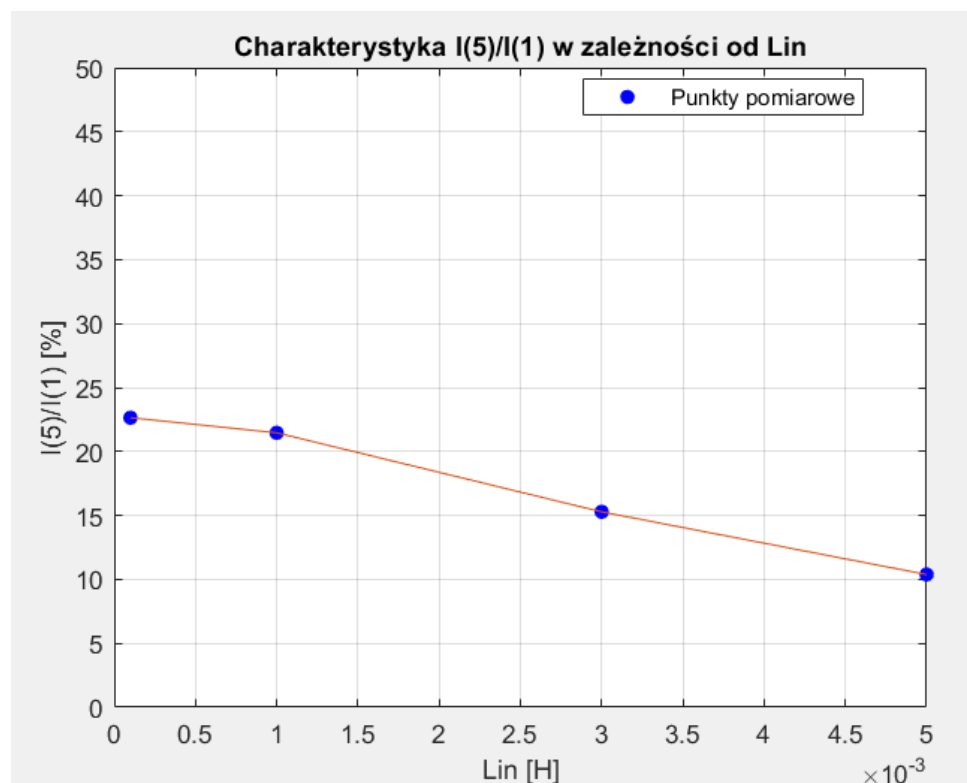
Lin [H]	THD [%]	$I(5)/I(1)$ [%]	$I(7)/I(1)$ [%]
1.00E-04	58.64	45.04	22.22
1.00E-03	47.73	41.65	16.18
3.00E-03	35.14	33.18	4.95
5.00E-03	29.87	28.38	3.93



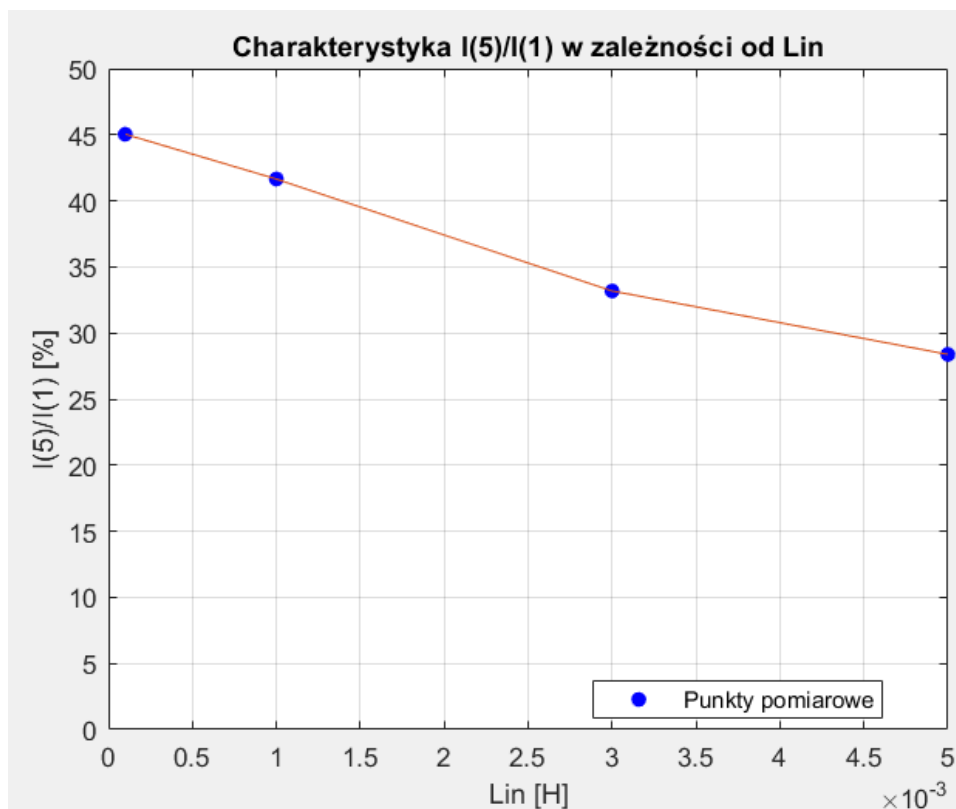
Grafika 63 Wykres zależności całkowitego zniekształcenia harmonicznego (THD) od Lin dla $\alpha=0$



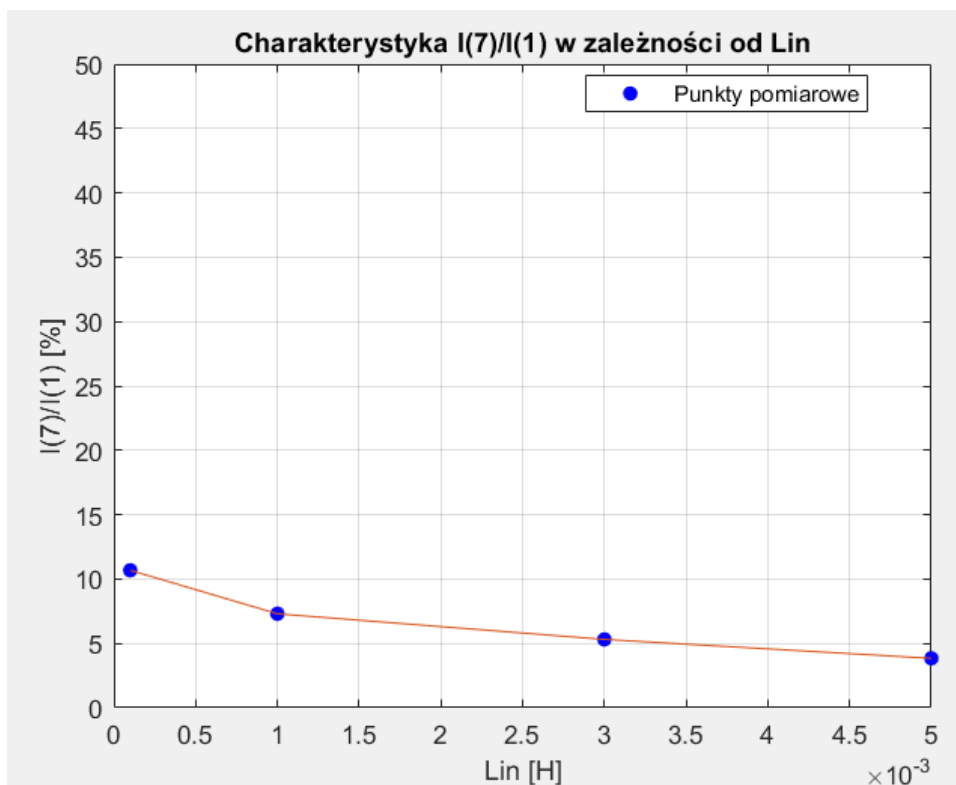
Grafika 64 Wykres zależności całkowitego zniekształcenia harmonicznego (THD) od Lin dla $\alpha=60$



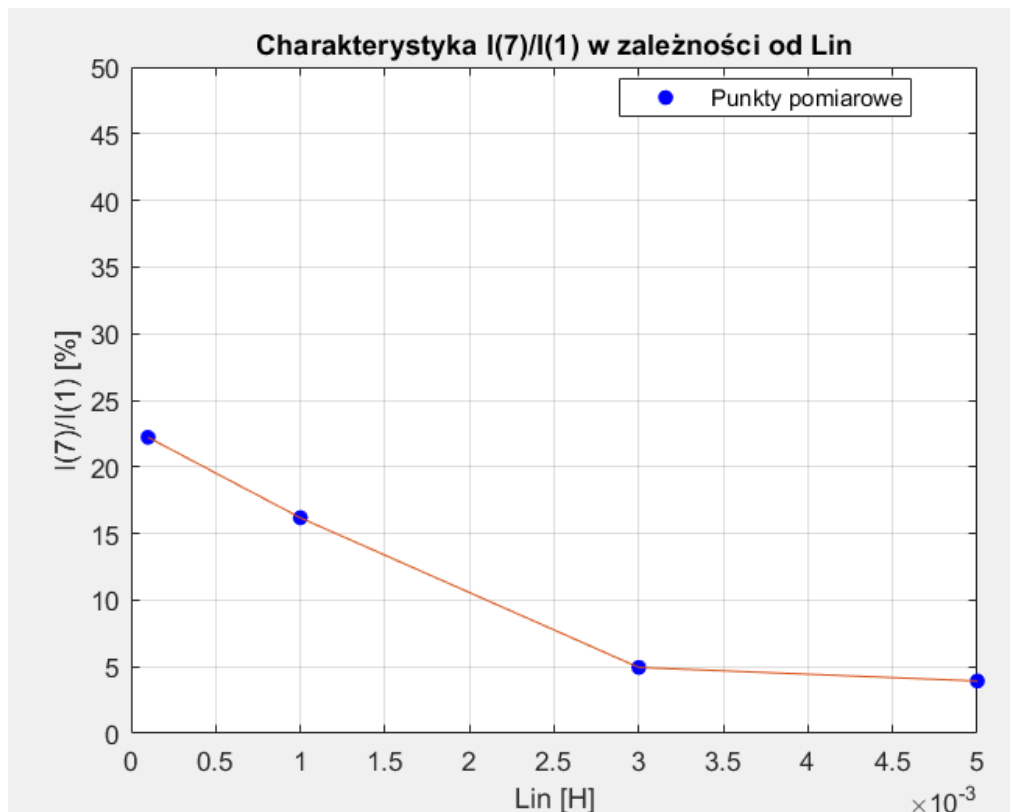
Grafika 65 Wykres stosunku piątej do pierwszej harmonicznej od Lin dla $\alpha=0$



Grafika 66 Wykres stosunku piątej do pierwszej harmonicznej od Lin dla $\alpha=60$



Grafika 67 Wykres stosunku siódmej do pierwszej harmonicznej od Lin dla $\alpha=0$



Grafika 68 Wykres stosunku siódmej do pierwszej harmonicznej od Lin dla $\alpha=60$

Na grafikach 47-62 przedstawione zostały analizy FFT, dla dokładniejszej analizy dodane zostało $Lin=3e-3$. Czym dane analizy i dlaczego wyglądają w następujący sposób zostało wytłumaczone w przypadku analizy THD w zależności od kąta α . Odczytane z analiz wartości zostały zestawione w tabelach 5 i 6, następnie przedstawione w postaci wykresów na grafikach 63-68. Dla obu analizowanych przypadków zależność od Lin przedstawia się podobnie tzn. wraz z jego wzrostem harmoniczne oraz współczynnik THD maleje. Dla przypadku z kątem α równym 60 wartości są większe, ale to zjawisko zostało już wytłumaczone przy analizie zależności THD od kąta α .

c. Wartość średnia napięcia U_{dc}

Kod:

```
L_obc=100e-6;
alfa=60;
sim('untitled1')
save('Wyniki_R60.mat')
```

```
Lin=1e-3;
alfa=0;
```

```
load('Wyniki_R0in2.mat')
figure()
plot(Udc.time, Udc.signals.values(:,1))
hold on
grid on
ylabel('Udc [V]');
xlabel('t [s]');
excludeRange = 1:38889;
```

```

sim ('untitled1')
save ('Wyniki_R0in2.mat')
alfa=60;
sim ('untitled1')
save ('Wyniki_R60in2.mat')

Lin=5e-3;
alfa=0;
sim ('untitled1')
save ('Wyniki_R0in3.mat')
alfa=60;
sim ('untitled1')
save ('Wyniki_R60in3.mat')

clear all
close all
clc

load ('Wyniki_R60.mat')
figure()
plot(Udc.time, Udc.signals.values(:,1))
hold on
grid on
ylabel('Udc [V]');
xlabel('t [s]');
excludeRange = 1:33335;
averageValueR60 =
mean(Udc.signals.values(excludeRange+1:
end, 1))

```

```

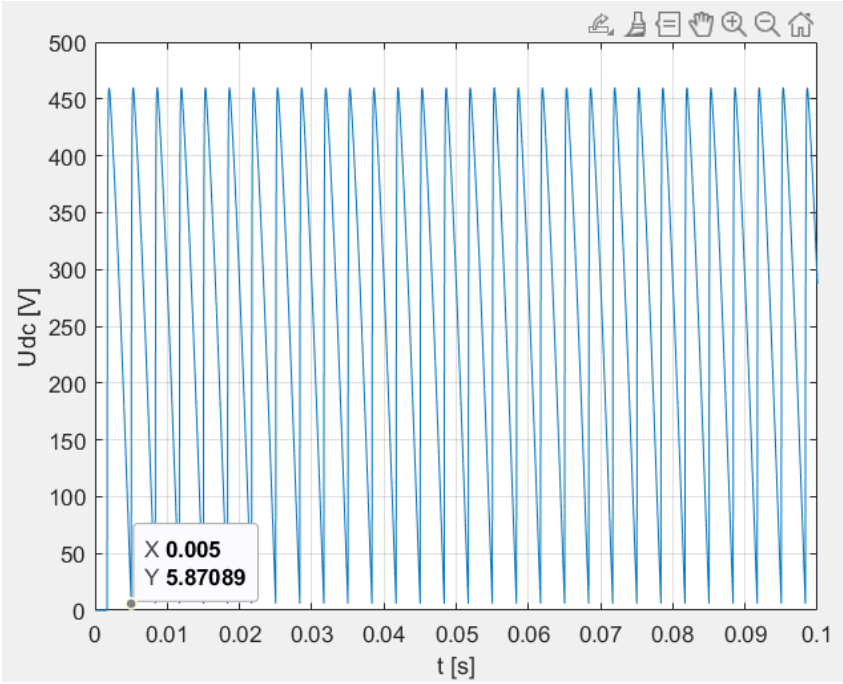
averageValueR60in2 =
mean(Udc.signals.values(excludeRange+1:
end, 1))

load ('Wyniki_R60in2.mat')
figure()
plot(Udc.time, Udc.signals.values(:,1))
hold on
grid on
ylabel('Udc [V]');
xlabel('t [s]');
excludeRange = 1:20001;
averageValueR60in2 =
mean(Udc.signals.values(excludeRange+1:
end, 1))

load ('Wyniki_R0in3.mat')
figure()
plot(Udc.time, Udc.signals.values(:,1))
hold on
grid on
ylabel('Udc [V]');
xlabel('t [s]');
excludeRange = 1:51445;
averageValueR0in3 =
mean(Udc.signals.values(excludeRange+1:
end, 1))

load ('Wyniki_R60in3.mat')
figure()
plot(Udc.time, Udc.signals.values(:,1))
hold on
grid on
ylabel('Udc [V]');
xlabel('t [s]');
excludeRange = 1:67087;
averageValueR60in3 =
mean(Udc.signals.values(excludeRange+1:
end, 1))

```

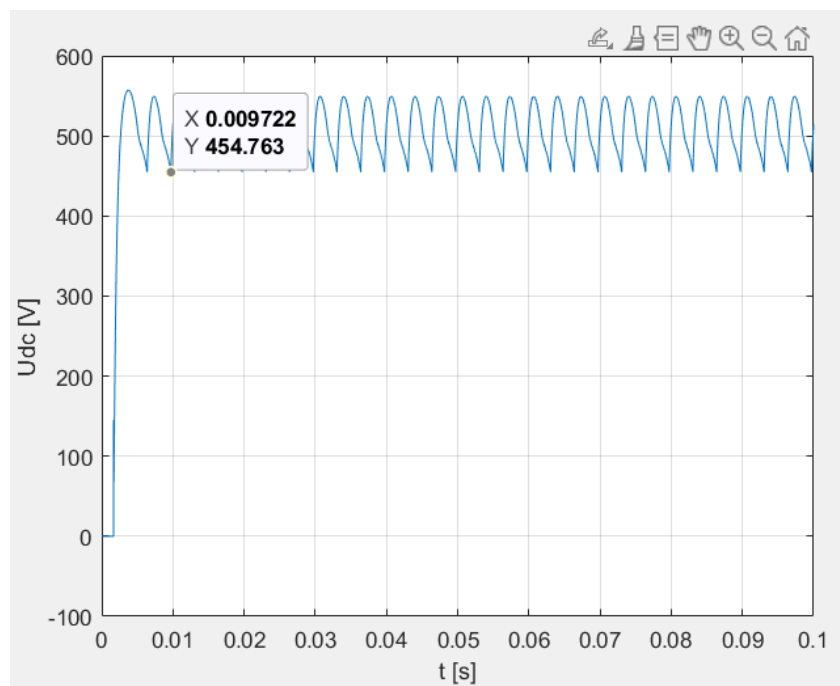


Grafika 7 Przebieg U_{dc} dla $Lin= 100e-6$ oraz $\alpha=60$

33334	5.8857	
33335	5.8413	
33336	140.0086	

averageValue =

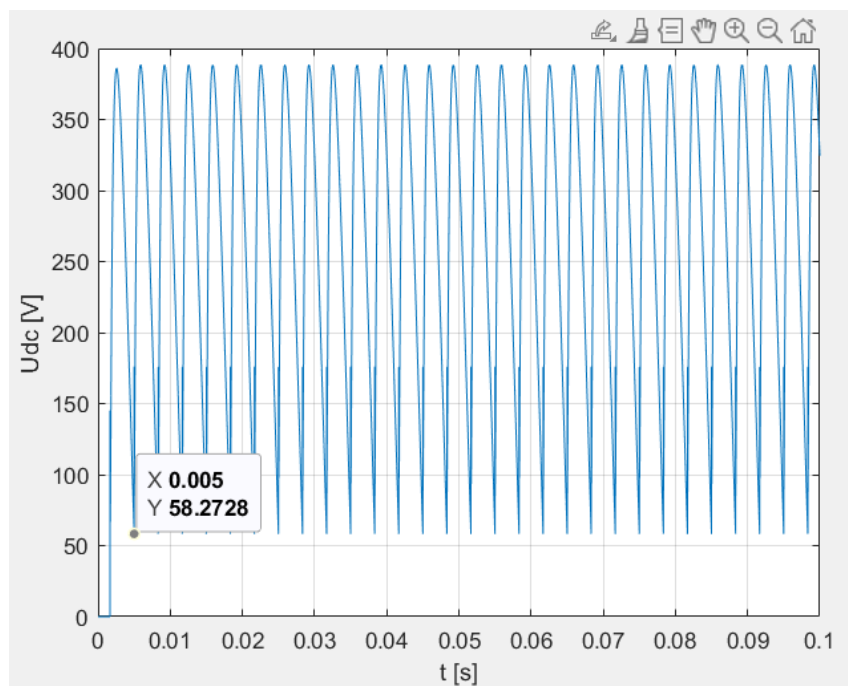
264.2976



Grafika 8 Przebieg U_{dc} dla $L_{in} = 1e-3$ oraz $\alpha = 0$

38887	454.7871	
38888	454.7736	
38889	454.7632	
38890	456.8560	
38891	458.3314	

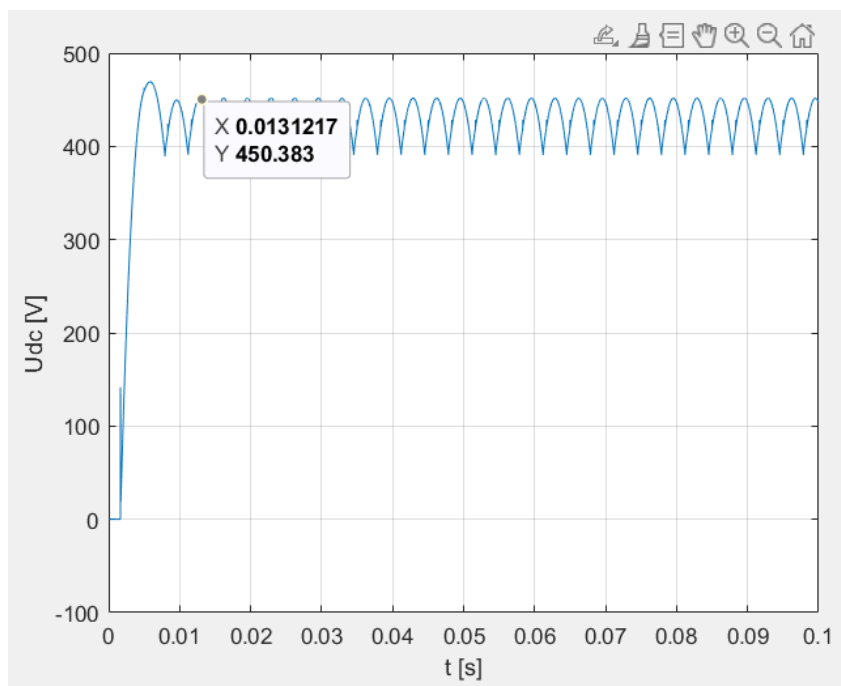
averageValue =
500.3336



Grafika 9 Przebieg U_{dc} dla $L_{in} = 1e-3$ oraz $\alpha = 60$

20000	58.3166
20001	58.2728
20002	175.9635
...	...

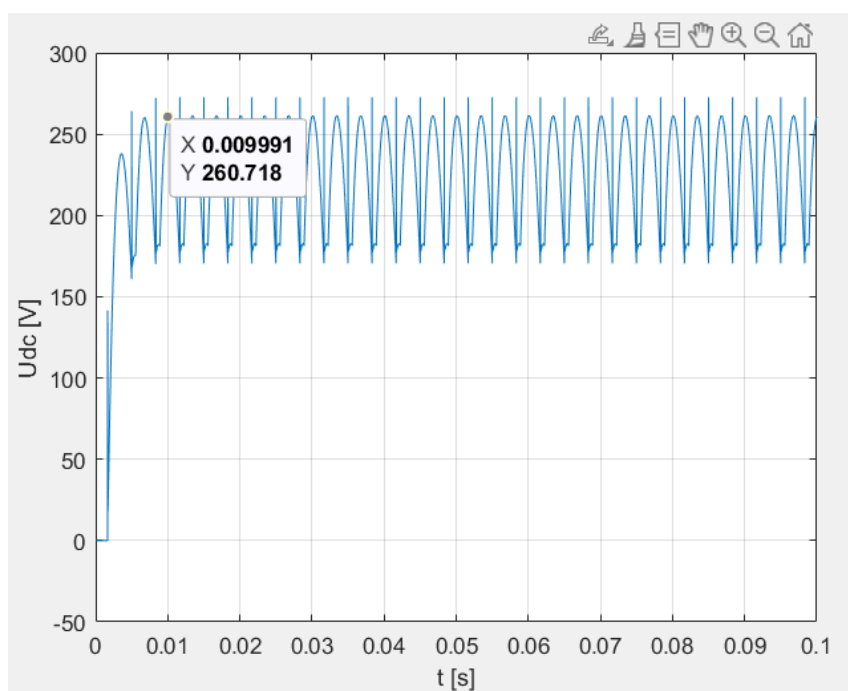
averageValue =
260.2937



Grafika 10 Przebieg U_{dc} dla $L_{in} = 5e-3$ oraz $\alpha = 0$

51441	451.9020	
51442	451.9021	
51443	451.9021	
51444	451.9021	
51445	451.9021	
51446	451.9021	
51447	451.9021	
51448	451.9021	

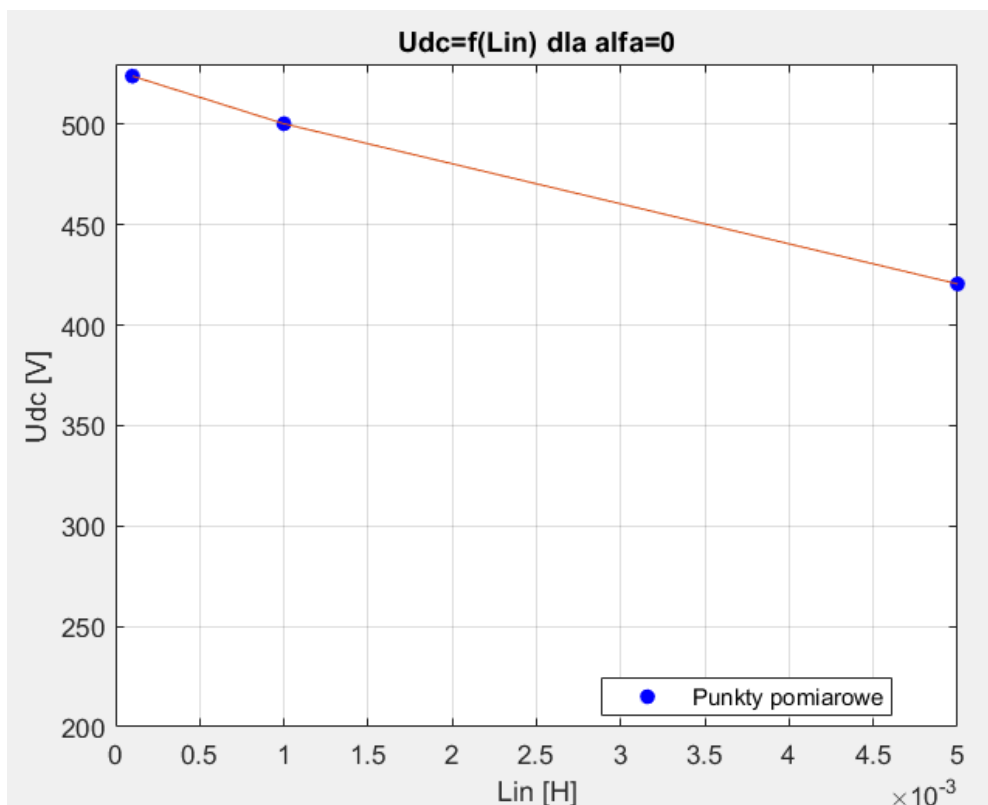
averageValue =
420.5664



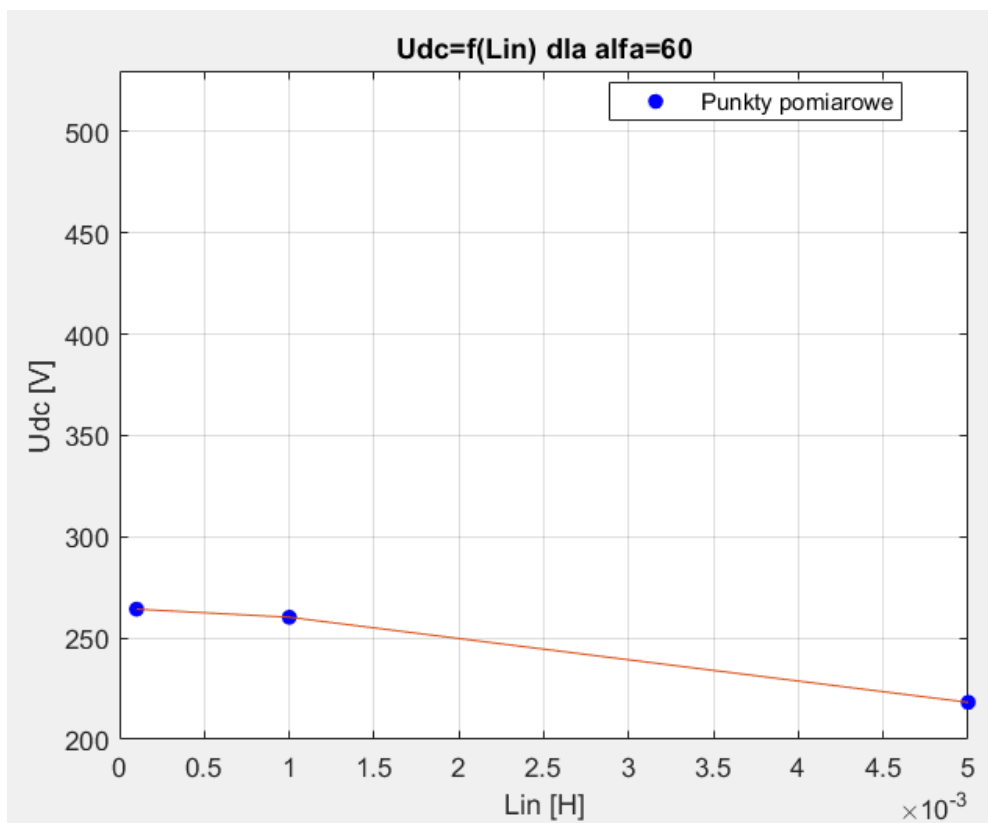
Grafika 11 Przebieg U_{dc} dla $L_{in} = 5e-3$ oraz $\alpha = 60$

67082	261.3966
67083	261.3967
67084	261.3967
67085	261.3967
67086	261.3967
67087	261.3967
67088	261.3967
67089	261.3967
67090	261.3967
67091	261.3966

averageValue =
218.3012



Grafika 12 Wykres zależności wartości średniej U_{dc} od Lin dla kąta $\alpha=0$



Grafika 13 Wykres zależności wartości średniej U_{dc} od Lin dla kąta $\alpha=60$

Grafiki 39-43 przedstawiają przebiegi wartości napięcia z wyznaczonymi na nich punktami przejścia w stan ustalony. Podobnie jak w poprzednim punkcie pod nimi zostały umieszczone mniejsze grafiki dla zobrazowania w jaki sposób zostały wyznaczone użyte w kodzie wartości. Jak możemy zaobserwować na grafikach 44 i 45 wartość średnia napięcia wyjściowego spada wraz ze wzrostem indukcyjności wejściowej mostka. Dzieje się tak ponieważ kąt przewodzenia, czyli część fali prądu przemiennego, podczas której tyrystory przewodzą, zależy od wzajemnego oddziaływania napięcia źródła i prądu obciążenia. Zwiększona indukcyjność jak już wspomniano w poprzednim podpunkcie ogranicza szybkość zmian prądu, wpływając na czas włączania i wyłączania tyrystorów. To z kolei wpływa na kąt przewodzenia i średnie napięcie wyjściowe. Oprócz tego elementy indukcyjne, takie jak cewki indukcyjne, indukują spadki napięcia ze względu na zmienny w czasie charakter prądu w tych elementach.

5. Wpływ reaktancji zastępczej sieci na kształt napięcia wejściowego

Dla tego podpunktu przyjęliśmy następujące założenia:

$$ALFA=0$$

$$R_{load} = 6\Omega$$

$$L_{load} = 100\ \mu H$$

$$L_{in} = 5\ mH$$

Następnie dla następujących wartości indukcyjności zastępczej sieci L_s : 50 μH , 500 μH oraz 1 mH przeprowadziliśmy symulacje.

```
clc; close all;

%parametry wejściowe
Us_ab=400;
f=50;
fi=0;
w=2*pi*f;
Ls=50e-6;
Lin=5e-3;
Rin=1/30*w*Lin;
R_obc=6;
L_obc=100e-6;
Rdiode=1e-3;
Vdiode=1.5;

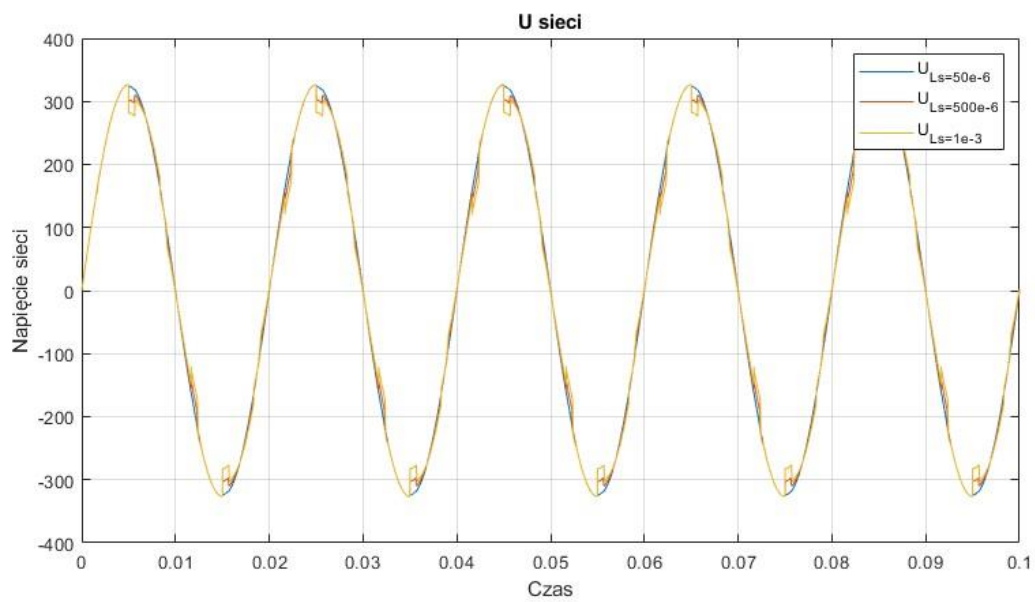
%PRZEBIEGI

figure() %Ls=50e-6
Ls=50e-6;
sim('spr_sim')
czas=UI_przebiegi.time;
U=UI_przebiegi.signals.values(:,4);

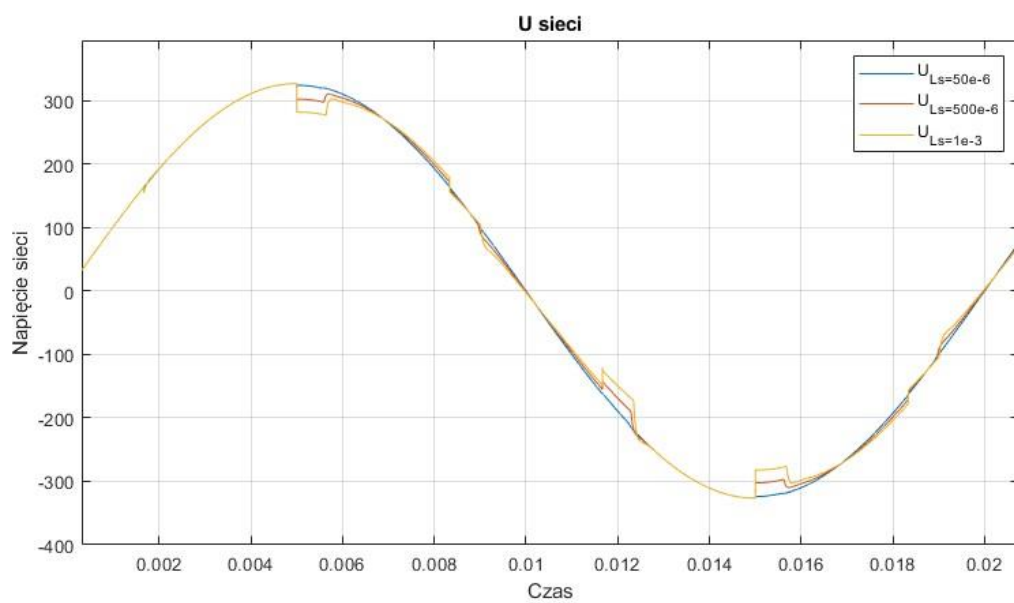
Ls=500e-6;
sim('spr_sim')
czas=UI_przebiegi.time;
U=UI_przebiegi.signals.values(:,4);

Ls=1e-3;
sim('spr_sim')
czas=UI_przebiegi.time;
U=UI_przebiegi.signals.values(:,4);
plot(czas,U); title('U sieci')
legend('U_L_s=_5_0_e_-
_6','U_L_s=_5_0_0_e_-
_6','U_L_s=_1_e_-_3');
xlabel('Czas'); ylabel('Napięcie
sieci')
grid on
hold on
```

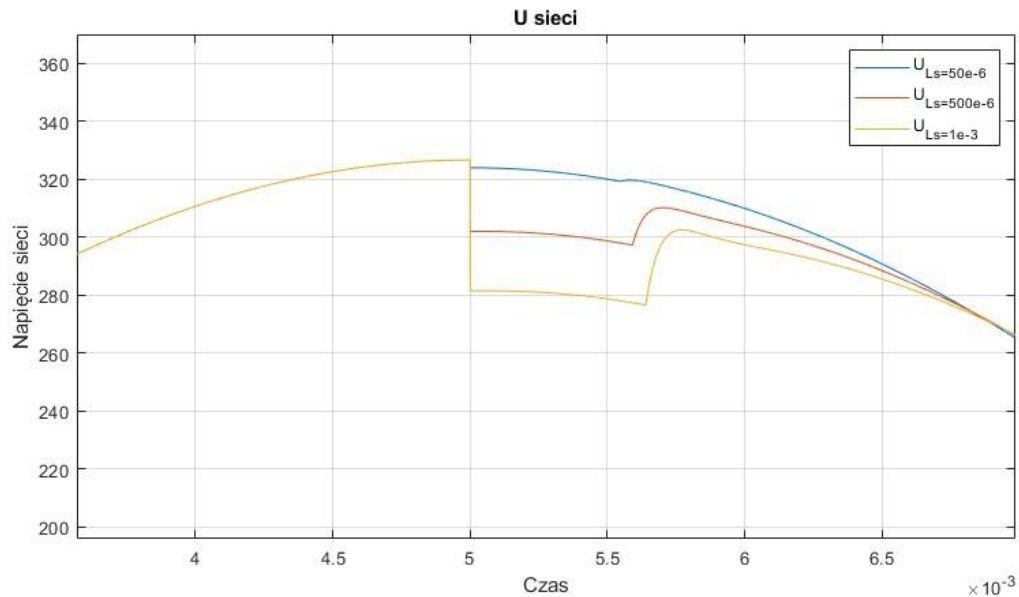
```
plot(czas,U)
grid on
hold on
```



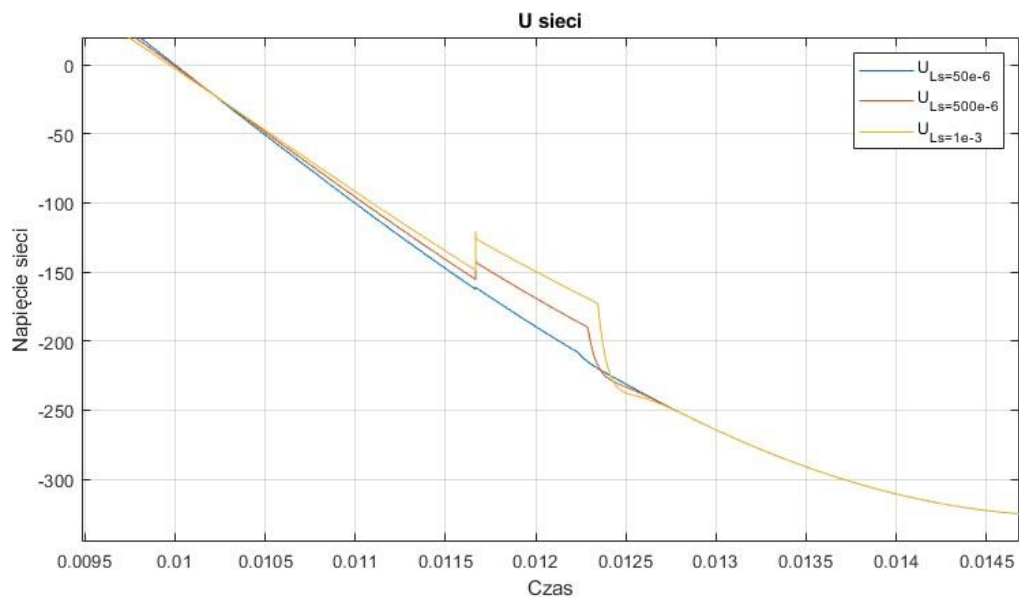
Grafika 14 Przebieg napięcia wejściowego w zależności od reaktancji zastępczej sieci



Grafika 15 Przebieg napięcia wejściowego - 1 okres



Grafika 16 Napięcie wejściowe - powiększenie na różnice w przebiegach przy wartościach maksymalnych



Grafika 17 Napięcie wejściowe - powiększenie na różnice w przebiegach przy wartościach średnich

Na powyższych grafikach możemy zauważyć, że zasadniczo napięcie wejściowe utrzymuje swój sinusoidalny kształt. Jednakże występują pewne odkształcenia sygnału, szczególnie zauważalne przy wartościach maksymalnych oraz minimalnych. Indukcyjny charakter obciążenia, w połączeniu z równoważną indukcyjnością sieci, może prowadzić do skoków napięcia. Te przejściowe efekty mogą powodować zniekształcenia, szczególnie w szczytach i dołkach przebiegu napięcia. Zaobserwowane różnice są tym większe im większa wartość indukcyjności zastępczej sieci, zatem jest to zjawisko niekorzystne.

6. Wnioski i spostrzeżenia

Analiza prostownika tyrystorowego ukazuje, że kąt alfa, reprezentujący opóźnienie włączenia tyrystorów, wpływa na efektywny czas przewodzenia, co skraca okres przebiegu prądu i obniża jego wartość RMS. Zwiększenie kąta alfa prowadzi do mniejszej mocy w układzie, zauważalnej na charakterystykach mocy. Analiza FFT wykazuje, że THD rośnie wraz z kątem alfa, wprowadzając harmoniczne do prądu fazowego. Indukcyjność wejściowa mostka ma istotny wpływ na przebieg prądu, zwiększając zniekształcenia. Wraz ze wzrostem indukcyjności, wartość THD może najpierw wzrosnąć, a potem spaść, zależnie od rezonansu obwodu. Wysoka indukcyjność wpływa także na średnie napięcie wyjściowe, ograniczając efektywny czas przewodzenia tyrystorów i zwiększając spadek napięcia na elementach indukcyjnych. Przejściowe efekty na napięciu wejściowym wynikają z indukcyjnego charakteru obciążenia.