

AGH

Energoelektronika

Temat projektu:
Trójfazowy mostek tyrystorowy

Projekt wykonali:

Jakub Cios
Maciej Duda

AGH, Kraków 19.11.2023 r.

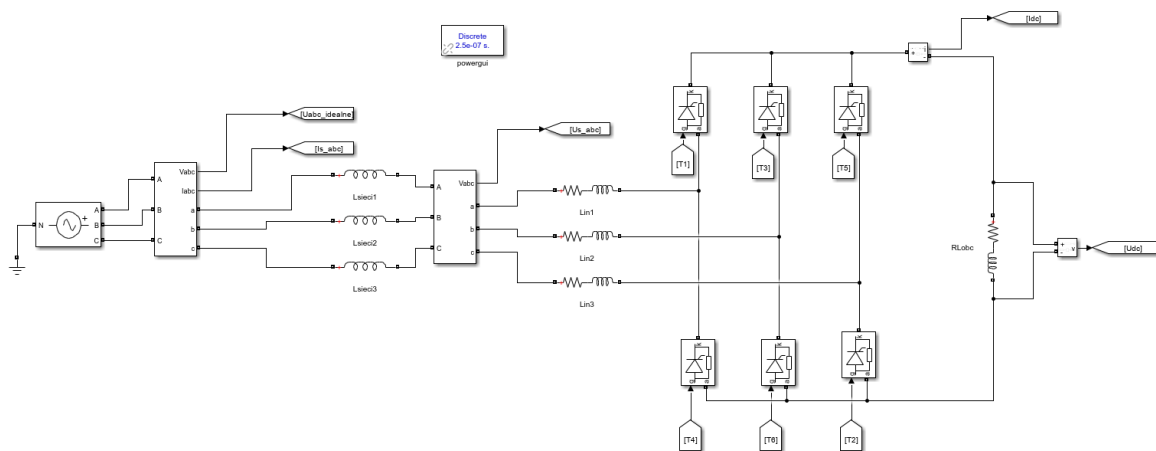
Spis treści:	Strona:
1. Cel projektu	2
2. Model	
a. Schemat układu.....	2
b. Parametry układu.....	3
c. Działanie układu.....	3
3. Wpływ kąta ALFA na wybrane przebiegi	
a. Przebiegi prądu fazowego.....	4
b. Moc czynna, bierna oraz pozorna.....	7
c. Parametry jakości elektrycznej zmierzone dla prądu fazowego.....	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

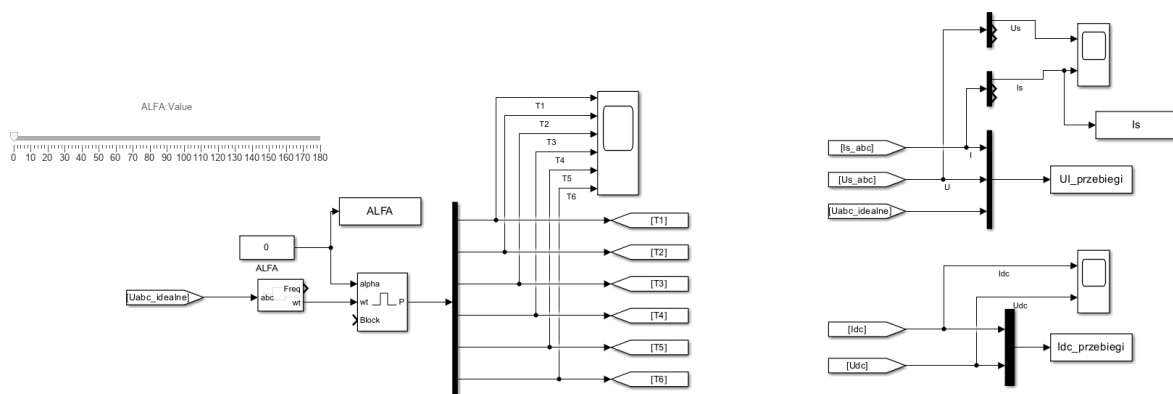
Głównym założeniem projektu jest zapoznanie studentów ze środowiskiem Matlab Simulink oraz z układem energoelektronicznym zawierającym trójfazowy mostek tyrystorowy. W dalszej części sprawozdania zostaną przedstawione wykonane analizy wybranych przebiegów.

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 α) 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, wprowadzając skoki napięcia i przyczyniając się do zniekształceń kształtu fali.

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;  
alfa=0;  
sim('untitled1')
```

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  
load('Wyniki_R90.mat')  
subplot(2,1,1)
```

```

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

```

```

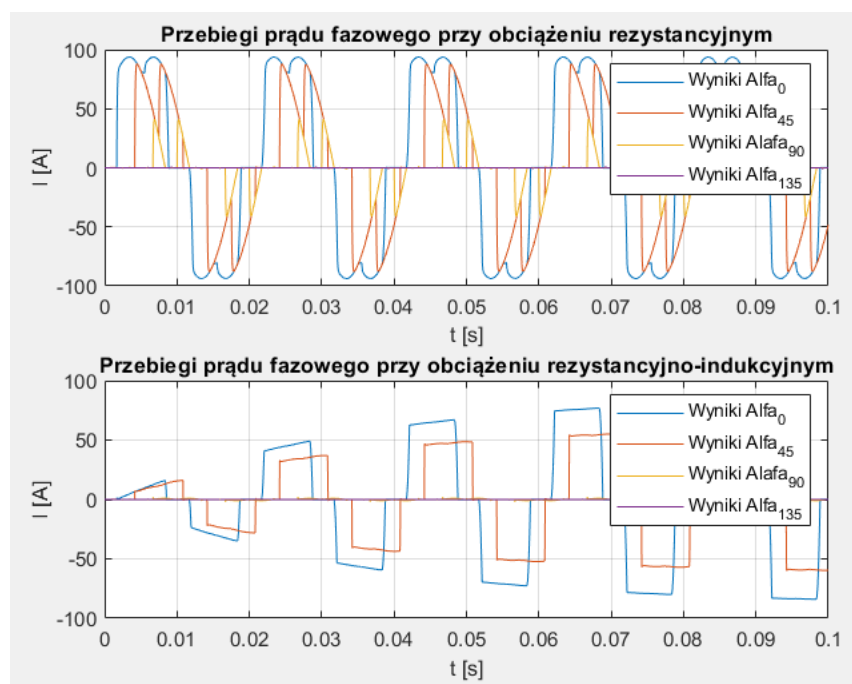
plot(Is.time,
Is.signals.values(:,1))
hold on
grid on
load ('Wyniki_R135.mat')
subplot(2,1,1)
plot(Is.time,
Is.signals.values(:,1))
legend('Wyniki Alfa_0',
'Wyniki Alfa_4_5','Wyniki
Alafa_9_0','Wyniki
Alfa_1_3_5');
% legend('Wyniki
Alafa_9_0','Wyniki
Alfa_1_3_5');
title('Przebiegi prądu
fazowego przy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

```

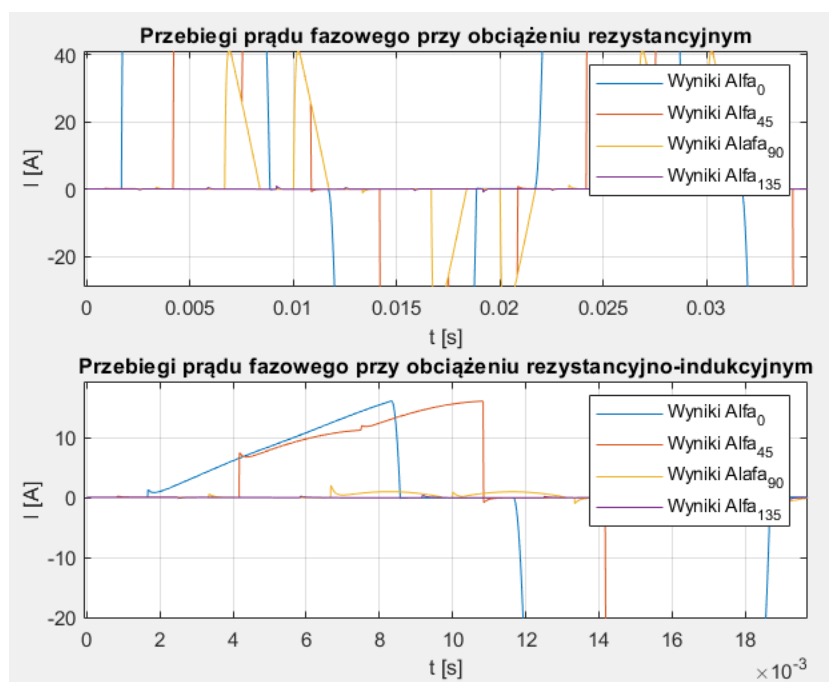
```

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]');

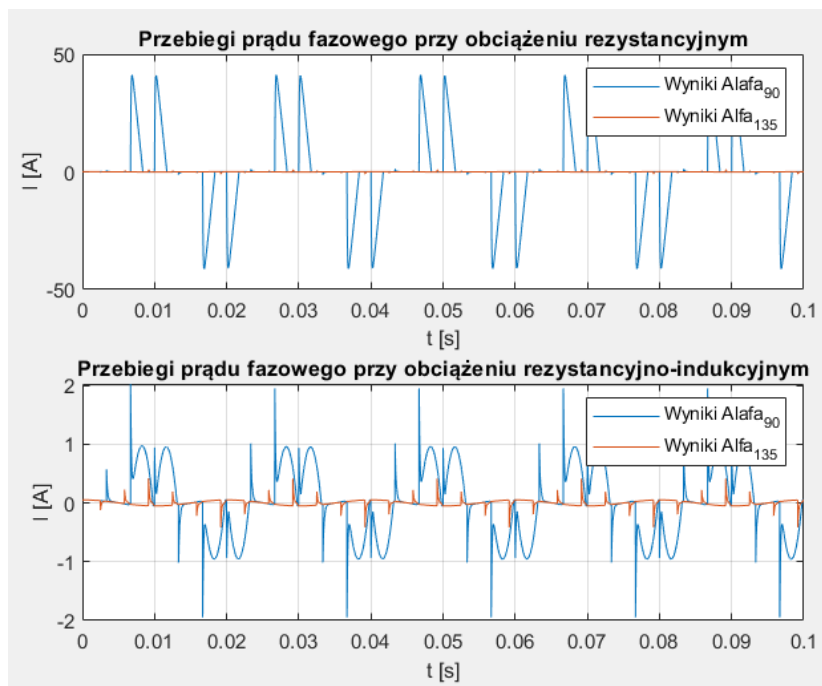
```



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 alfa reprezentuje kąt opóźnienia, przy którym tyrystory są wyzwalane w każdym półcyklu wejściowego napięcia przemiennego. Im większy kąt alfa, 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 alfa tym przebiegi prądu fazowego mają mniejsze wartości. 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

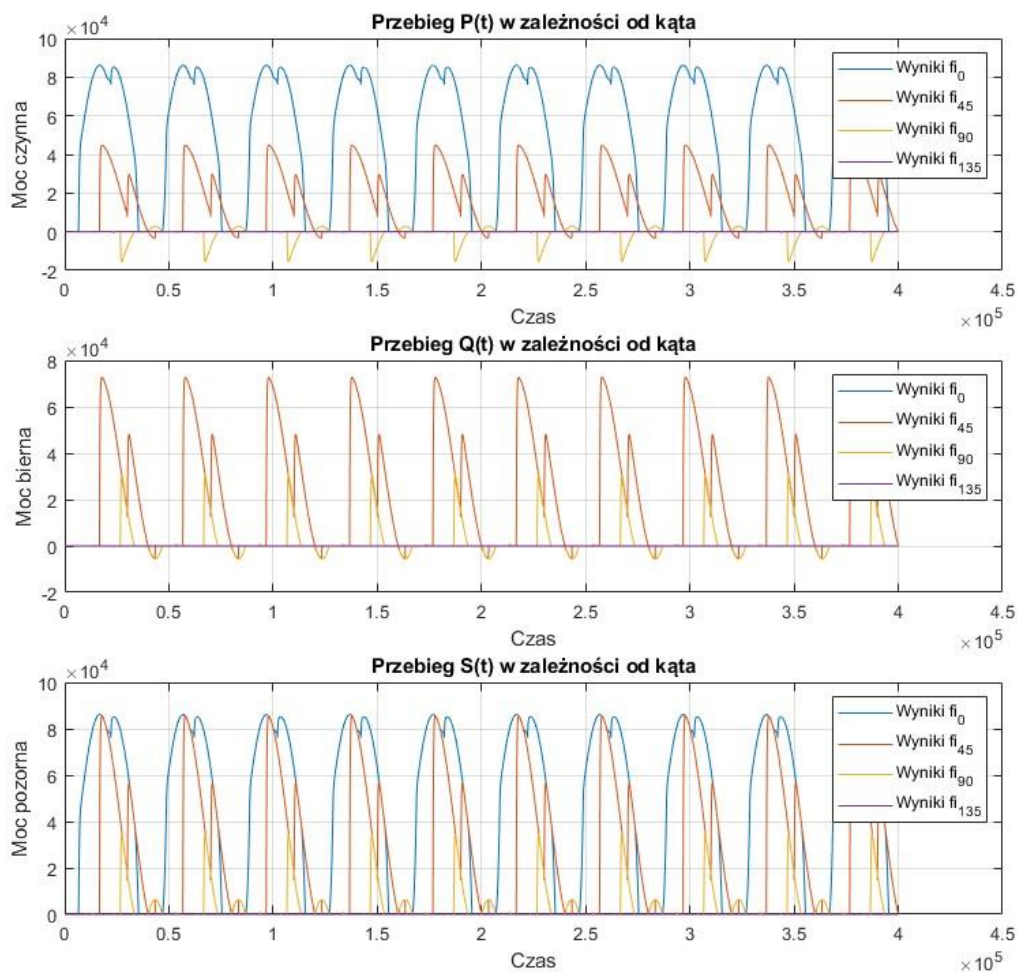
```
clc; close all;

%parametry wejściowe
Us_ab=400;
f=50;
fi=0;
w=2*pi*f;
Ls=50e-6;
Lin=20-3;
Rin=1/30*w*Lin;
R_obc=6;
L_obc=10e-6;
Rdiode=1e-3;
Vdiode=1.5;
%PRZEBIEGI
figure() %pierwsza faza dla ALFA=0
czas=UI_przebiegi.time;
fip=0;
subplot(3,1,1)
P=3.*UI_przebiegi.signals.values(:,1).*
UI_przebiegi.signals.values(:,4).*cos(f
ip);
plot(P)
grid on; hold on
subplot(3,1,2)
Q=3.*UI_przebiegi.signals.values(:,1).*
UI_przebiegi.signals.values(:,4).*sin(f
ip);
plot(Q)
grid on; hold on
subplot(3,1,3)
S=sqrt(P.^2+Q.^2);
plot(S)
grid on; hold on

%pierwsza faza dla ALFA=90
fip=90;
subplot(3,1,1)
P=3.*UI_przebiegi.signals.values(:,1).*
UI_przebiegi.signals.values(:,4).*cos(f
ip);
plot(P)
grid on; hold on
subplot(3,1,2)
Q=3.*UI_przebiegi.signals.values(:,1).*
UI_przebiegi.signals.values(:,4).*sin(f
ip);
plot(Q)
grid on; hold on
subplot(3,1,3)
S=sqrt(P.^2+Q.^2);
plot(S)
grid on; hold on

%pierwsza faza dla ALFA=135
fip=135;
subplot(3,1,1)
P=3.*UI_przebiegi.signals.values(:,1).*
UI_przebiegi.signals.values(:,4).*cos(f
ip);
plot(P); title('Przebieg P(t) w
zależności od kąta'); legend('Wyniki
fi_0', 'Wyniki fi_4_5', 'Wyniki
fi_9_0', 'Wyniki fi_1_3_5');
xlabel('Czas'); ylabel('Moc czynna')
grid on; hold on
subplot(3,1,2)
Q=3.*UI_przebiegi.signals.values(:,1).*
UI_przebiegi.signals.values(:,4).*sin(f
ip);
plot(Q); title('Przebieg Q(t) w
zależności od kąta'); legend('Wyniki
fi_0', 'Wyniki fi_4_5', 'Wyniki
fi_9_0', 'Wyniki fi_1_3_5');
xlabel('Czas'); ylabel('Moc bierna')
grid on; hold on
subplot(3,1,3)
S=sqrt(P.^2+Q.^2);
plot(S); title('Przebieg S(t) w
zależności od kąta'); legend('Wyniki
fi_0', 'Wyniki fi_4_5', 'Wyniki
fi_9_0', 'Wyniki fi_1_3_5');
xlabel('Czas'); ylabel('Moc pozorna')
grid on; hold on; hold off

%pierwsza faza dla ALFA=45
fip=45;
subplot(3,1,1)
P=3.*UI_przebiegi.signals.values(:,1).*
UI_przebiegi.signals.values(:,4).*cos(f
ip);
plot(P)
grid on; hold on
subplot(3,1,2)
Q=3.*UI_przebiegi.signals.values(:,1).*
UI_przebiegi.signals.values(:,4).*sin(f
ip);
plot(Q)
grid on; hold on
subplot(3,1,3)
S=sqrt(P.^2+Q.^2);
plot(S)
grid on; hold on
```

Grafika 6 Przebiegi mocy w zależności od kąta ALFA

Na grafice 6 zostały zestawione przebiegi mocy w zależności od kąta ALFA. 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. Już sam stosunek mocy czynnej dla kąta 0° oraz 45° jest około dwukrotny.

c. Parametry jakości elektrycznej zmierzone dla prądu fazowego

```

Kod:
clc; close all

alfap=[0 45 90 135];

THD=zeros(1,4);
data_cell=cell(1,4);
data_cell1=cell(1,4);

for n=1:4
    alfa=alfap(n);
    sim("untitled1.slx")

    FFTDATA =
power_fftscope(Is);
    FFTDATA.fundamental=50;
    FFTDATA.startTime=1e-8;
    FFTDATA.cycles=1;

    FFTDATA.maxFrequency=1000;

    FFT=FFTDATA.mag/FFTDATA.magF
undamental*100;

    figure()
    bar(FFTDATA.freq,FFT);
    grid on;
    title('FFT');
    ylabel('Mag [% of
Fundamental]');
    xlabel('Frequency
[Hz]');

    THD(n)=FFTDATA.THd;

    data_cell{n}=FFTDATA.phase;

    data_cell1{n}=cos(data_cell{
n});

    FFT51(n)=FFT(5)/FFT(1);
    FFT71(n)=FFT(7)/FFT(1);
end

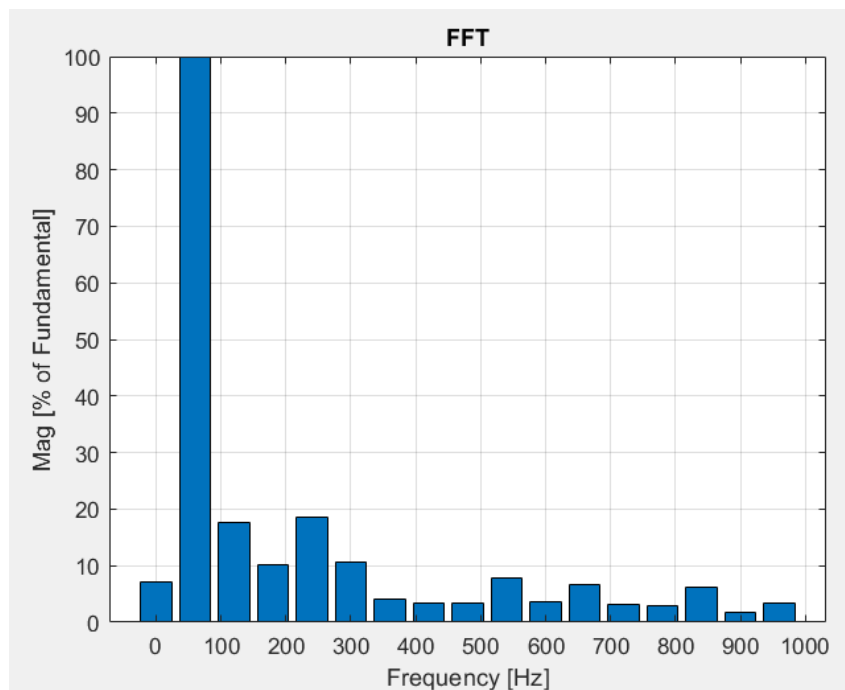
data_cell1{5}=[1:17]';

figure()
for i=1:4
    x=data_cell1{5};

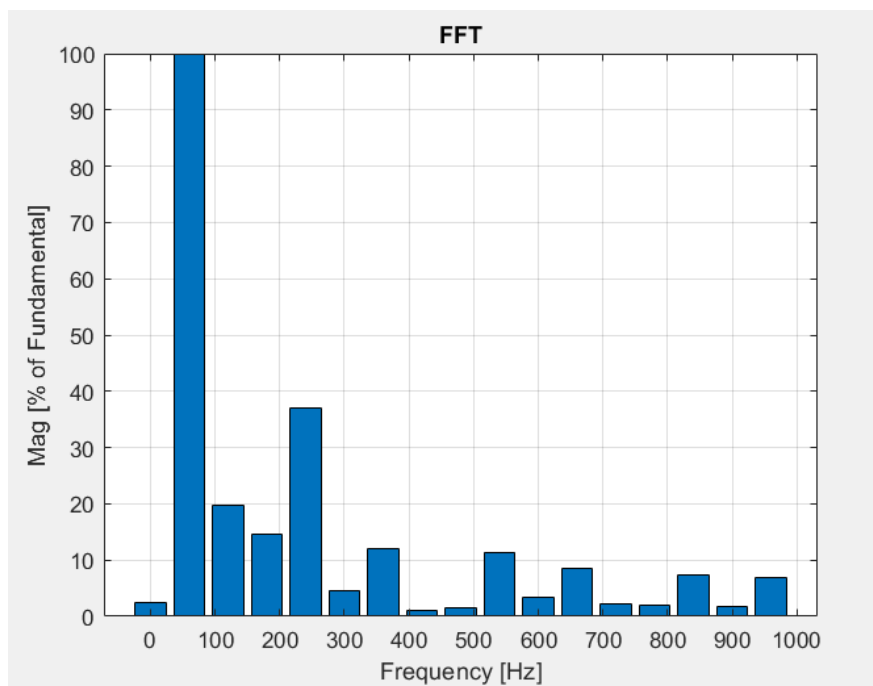
    y=alfap(i)*ones(size(da
ta_cell1{5}));
    z=data_cell1{i};

    plot3(x,y,z,'LineWidth'
, 2);
    hold on
end
title('Wykres cosfi
f(alfa)');
ylabel('alfa
[degrees]');
xlabel('harmoniczna [
]');
zlabel('cos fi [ ]')
figure
plot(alfap,THD,'b.',
'MarkerSize', 20);
hold on;
plot(alfap,THD);
title('THD=f(alfa)');
ylabel('THD [ ]');
xlabel('alfa
[degrees]');
figure
plot(alfap,FFT51,'b.',
'MarkerSize', 20);
hold on;
plot(alfap,FFT51);
title('I(5)/I(1)=f(alfa
)');
ylabel('I(5)/I(1) [
]');
xlabel('alfa
[degrees]');
figure
plot(alfap,FFT71,'b.',
'MarkerSize', 20);
hold on;
plot(alfap,FFT71);
title('I(7)/I(1)=f(alfa
)');
ylabel('I(5)/I(1) [
]');
xlabel('alfa
[degrees]');

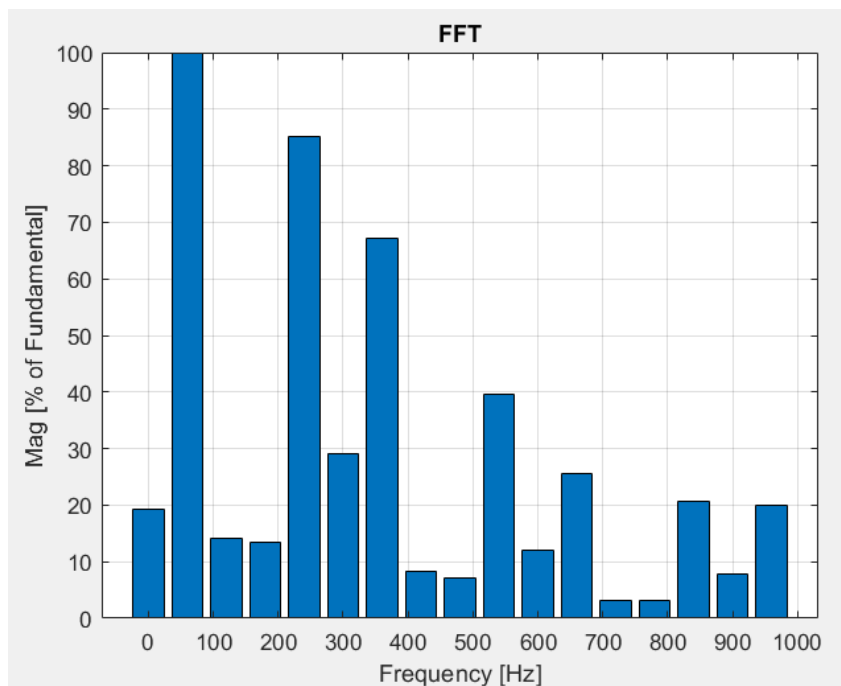
```



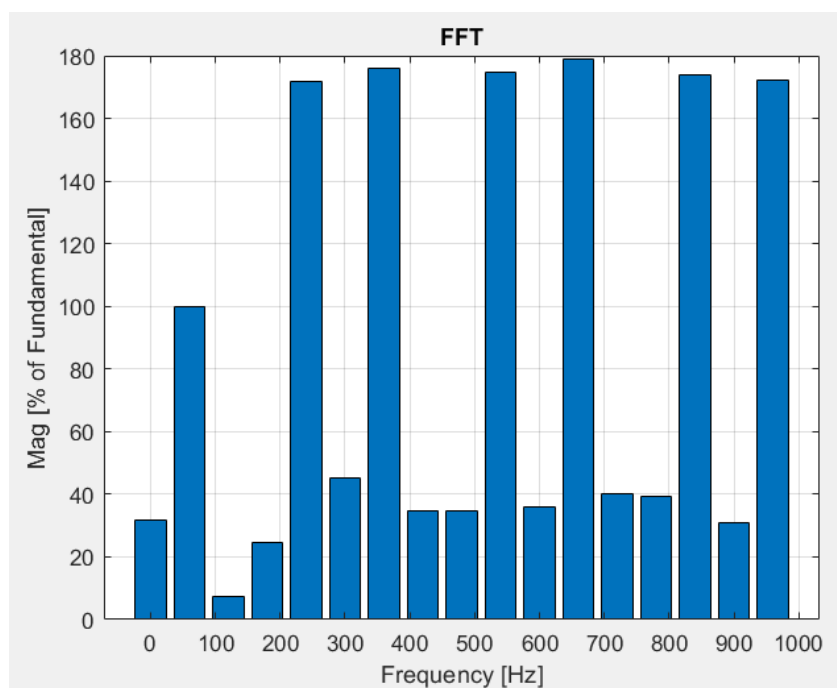
Grafika 7 Analiza FFT prądu fazowego dla $\alpha=0$



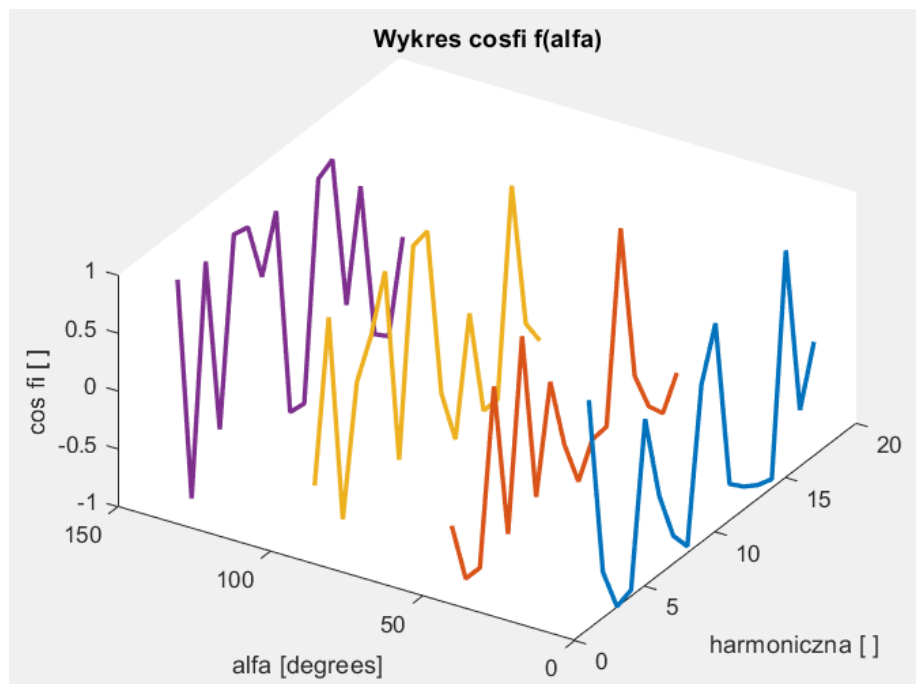
Grafika 8 Analiza FFT prądu fazowego dla $\alpha=45$



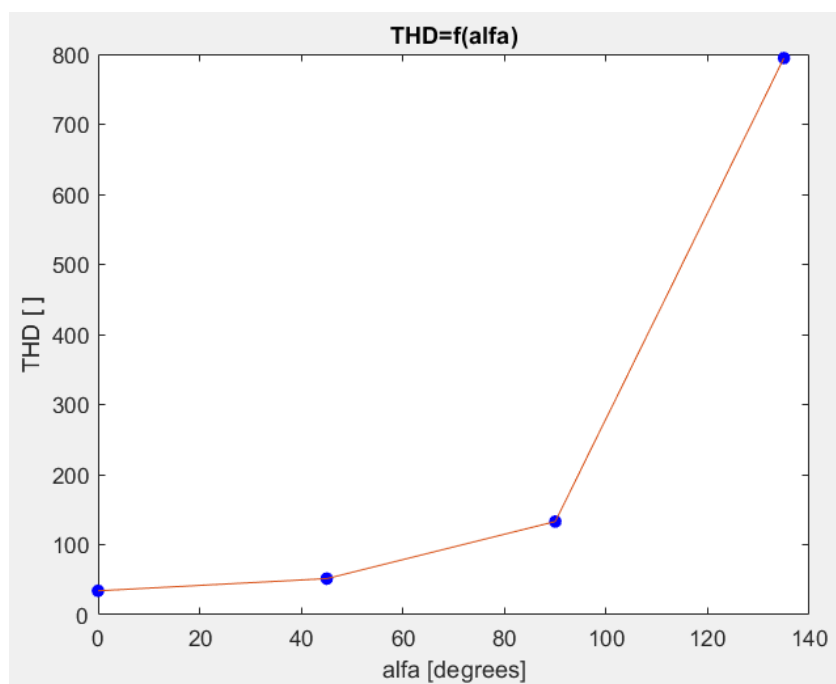
Grafika 9 Analiza FFT prądu fazowego dla $\alpha=90$



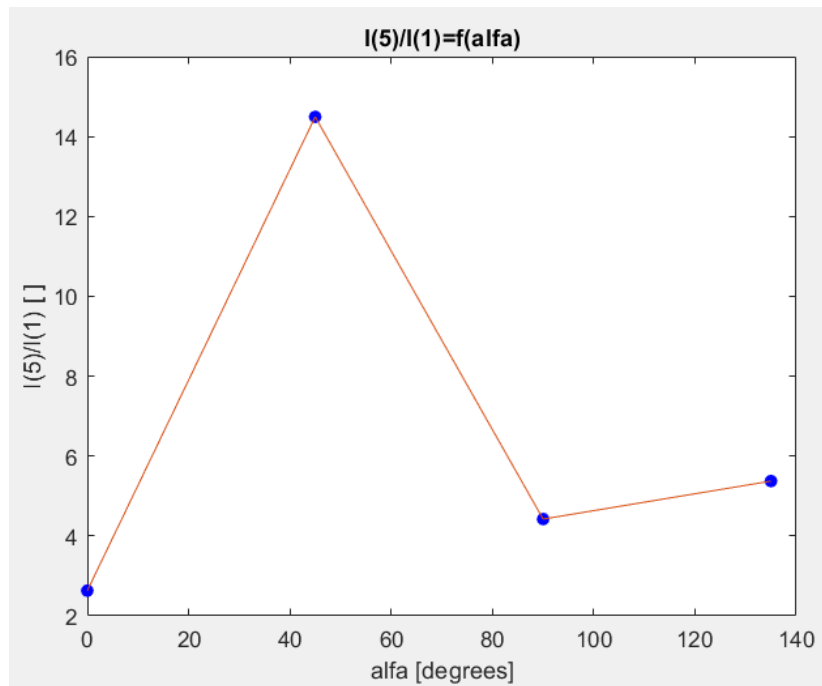
Grafika 10 Analiza FFT prądu fazowego dla $\alpha=135$



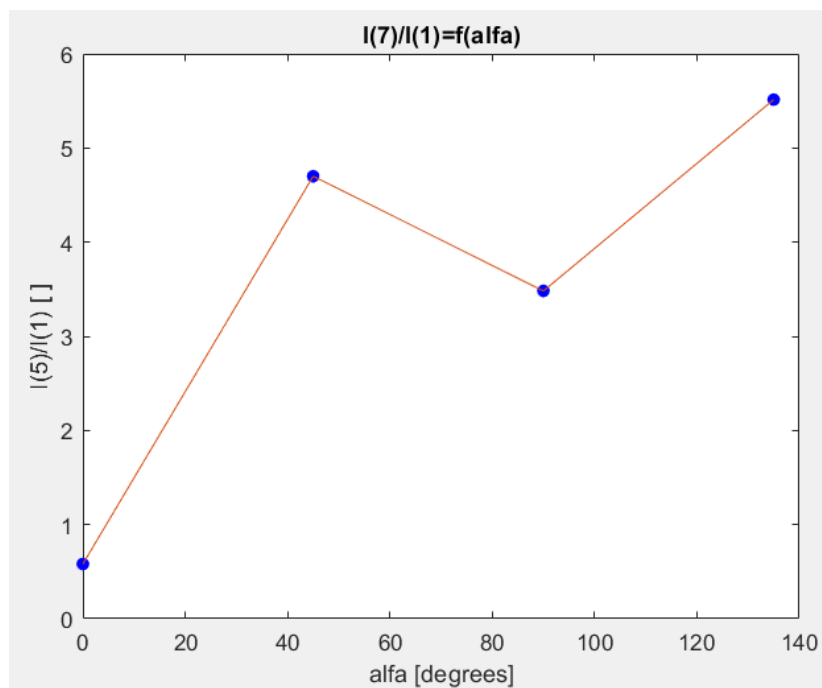
Grafika 11 Wykresy kątów f_i w zależności od kąta α oraz harmonicznej



Grafika 12 Wykres zależności całkowitego zniekształcenia harmonicznego (THD) od kąta α



Grafika 13 Wykres stosunku piątej do pierwszej harmonicznej w zależności od kąta α



Grafika 14 Wykres stosunku siódmej do pierwszej harmonicznej w zależności od kąta α

Analiza FFT wyglądała bardzo podobnie zarówno w przypadku obciążenia rezystancyjnego jak i rezystancyjno-indukcyjnego. W związku z czym w sprawozdaniu zostały umieszczone tylko grafiki dla obciążenia rezystancyjnego.

Na grafikach 4-7 zostały przedstawione charakterystyki FFT (Fast Fourier Transform), która jest 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

Funkcja cosinus reprezentuje podstawową częstotliwość fali, a jej harmoniczne są całkowitymi wielokrotnościami częstotliwości podstawowej. Amplituda każdej harmonicznej jest określona przez cosinus jej kąta fazowego. Całkowite zniekształcenia harmoniczne (THD) jest obliczane poprzez uwzględnienie wartości RMS wszystkich składowych harmonicznych w stosunku do częstotliwości podstawowej. Zatem obecność i amplituda każdej harmonicznej są związane z cosinusem jej kąta fazowego, co możemy zaobserwować porównując wyżej wymienione charakterystyki do grafiki 8.

Na grafice 9 możemy zaobserwować, iż THD rośnie wraz z kątem alfa. Wyzwalanie tyrystorów przy niezerowych kątach alfa, w konsekwencji opóźnione, może wprowadzać harmoniczne do przebiegu prądu fazowego.

Wraz ze zmianą kąta alfa, amplituda niektórych harmonicznych może wzrosnąć lub zmaleć, a zależność fazowa między harmonicznymi a częstotliwością podstawową może ulec zmianie. Zjawisko to możemy zaobserwować na grafikach 9 oraz 10.

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))

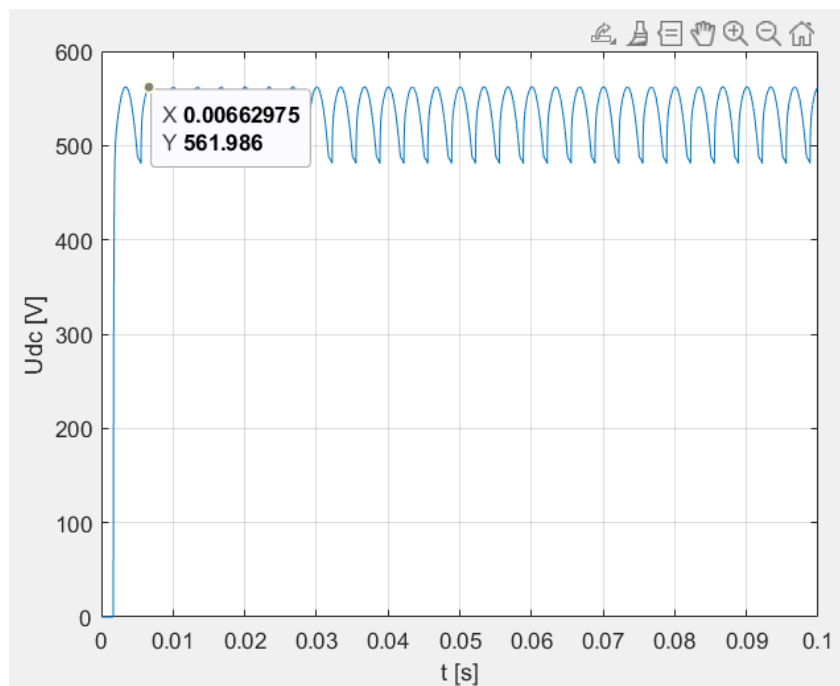
load ('Wyniki_R135.mat')
figure()
plot(Udc.time, Udc.signals.values(:,1))
hold on
grid on
ylabel('Udc [V]');
xlabel('t [s]');
excludeRange = 1:63335;
averageValueR135 =
mean(Udc.signals.values(excludeRange+1:
end, 1))

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))
```

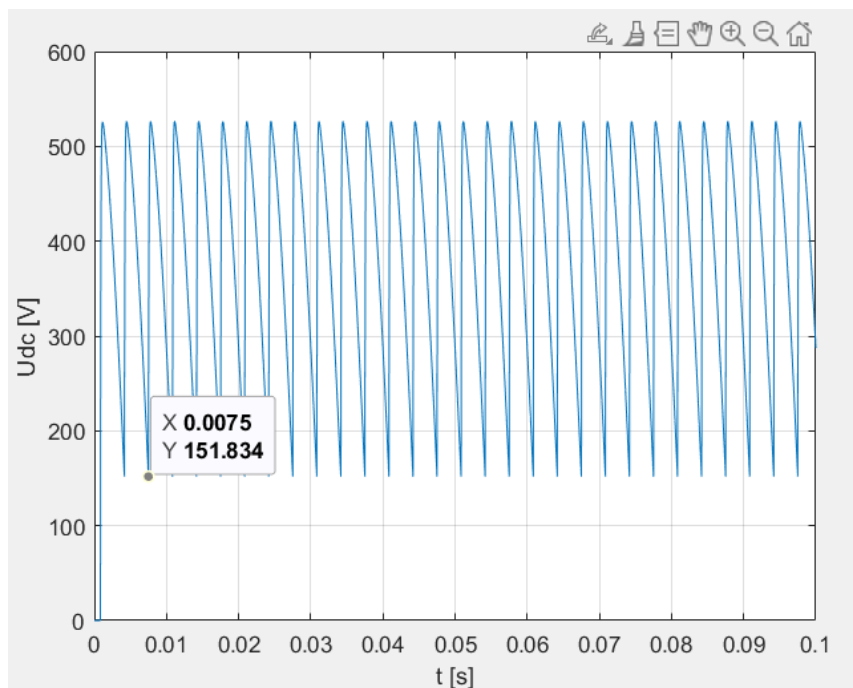



Grafika 15 Przebieg U_{dc} dla $\alpha=0$ oraz obciążenia rezystancyjnego

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

averageValue =

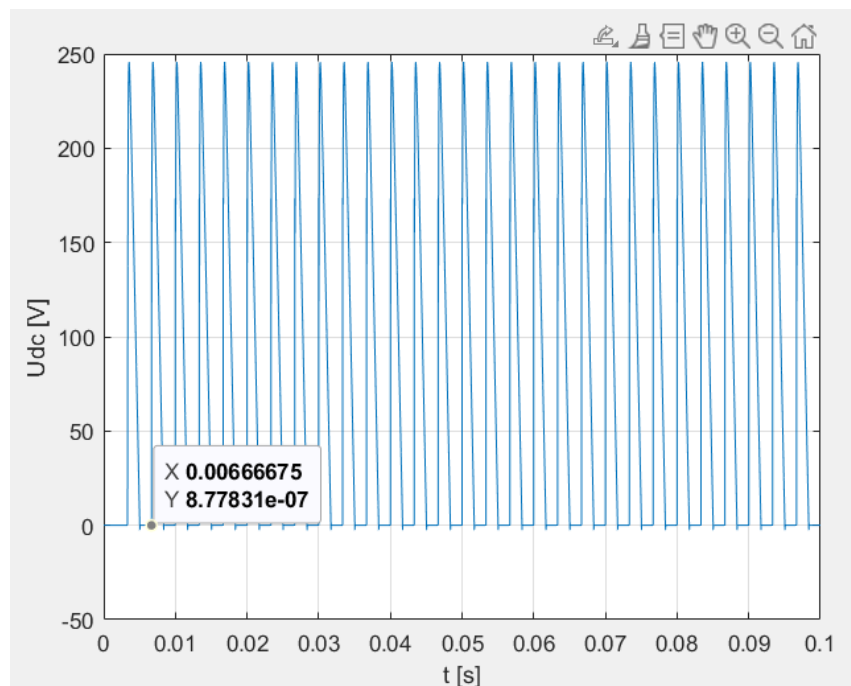
524.0554



Grafika 16 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

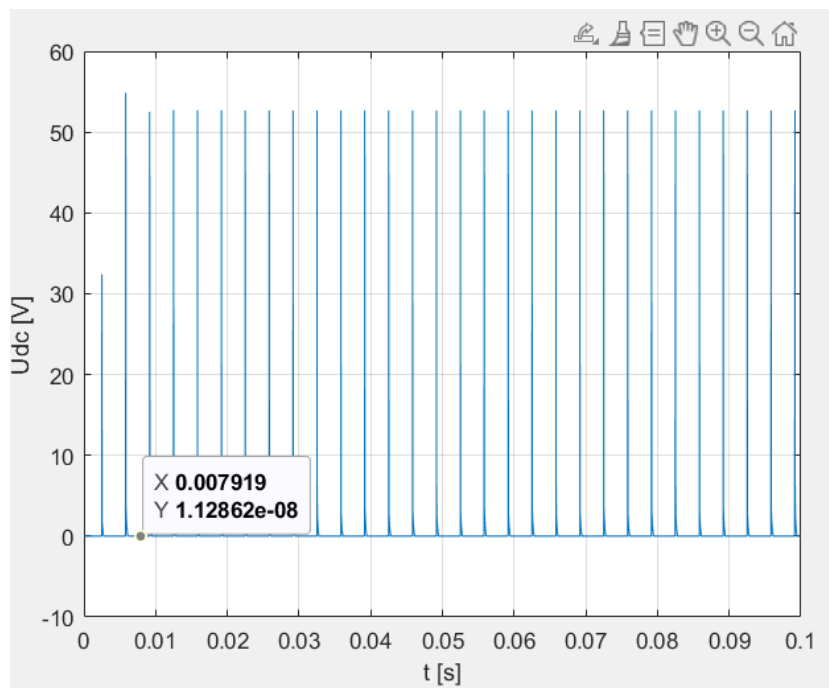


Grafika 17 Przebieg U_{dc} dla $\alpha=90$ oraz obciążenia rezystancyjnego

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

averageValue =

68.3863

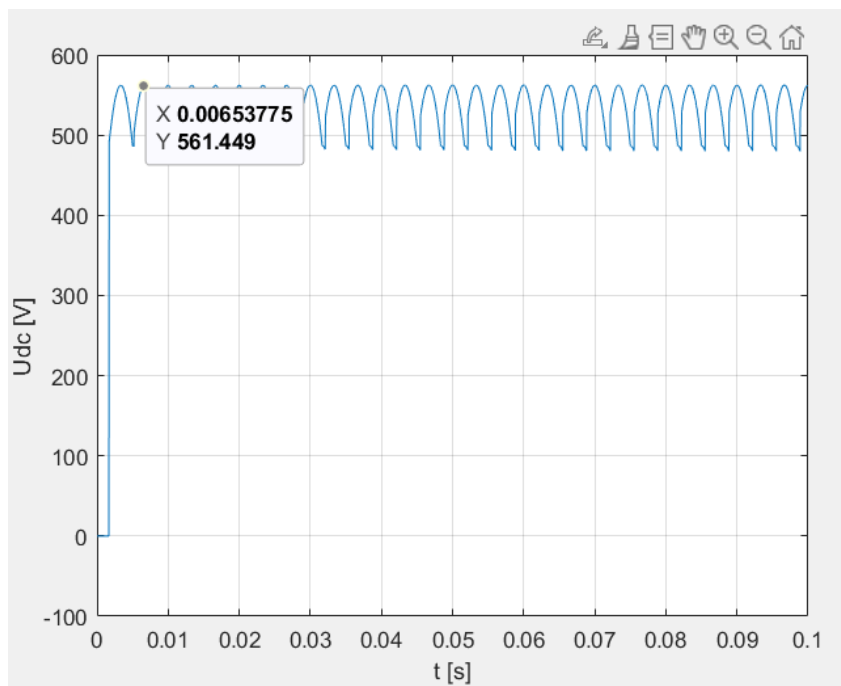


Grafika 18 Przebieg U_{dc} dla $\alpha=135$ oraz obciążenia rezystancyjnego

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

averageValue =

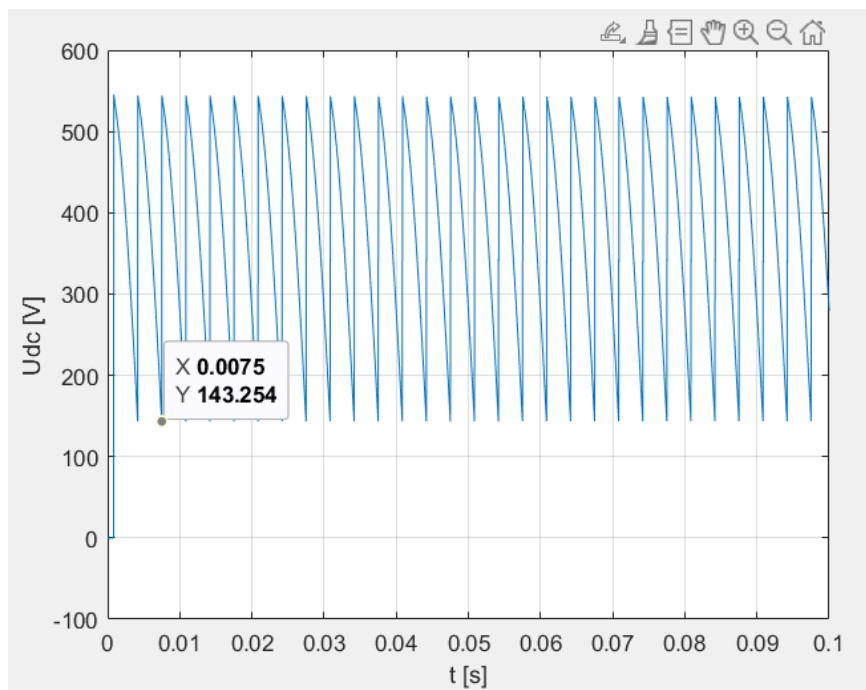
0.1386



Grafika 19 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  
  
>>
```

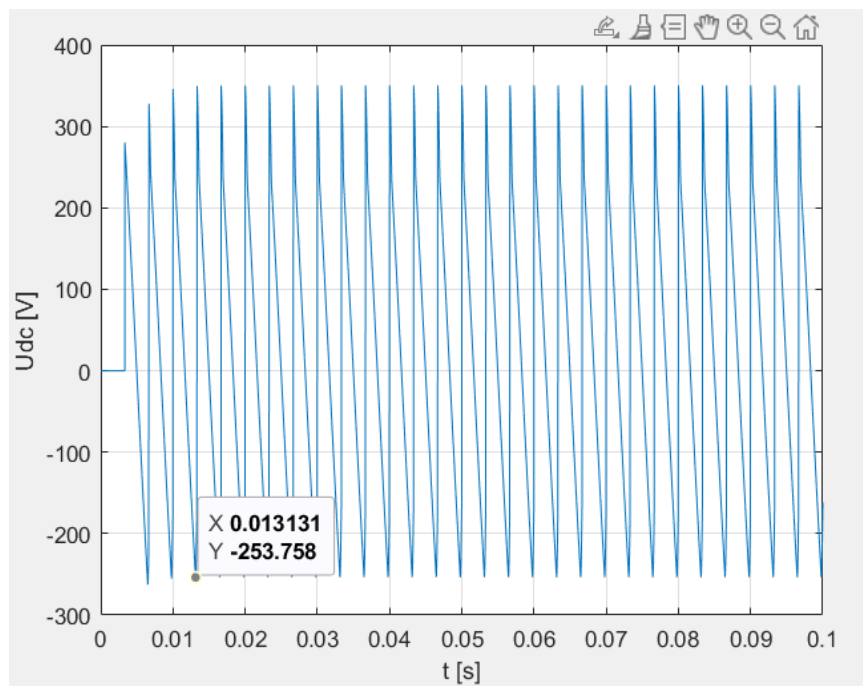


Grafika 20 Przebieg U_{dc} dla $\alpha=45$ oraz obciążenia rezystancyjno-indukcyjnego

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

averageValue =

374.9394

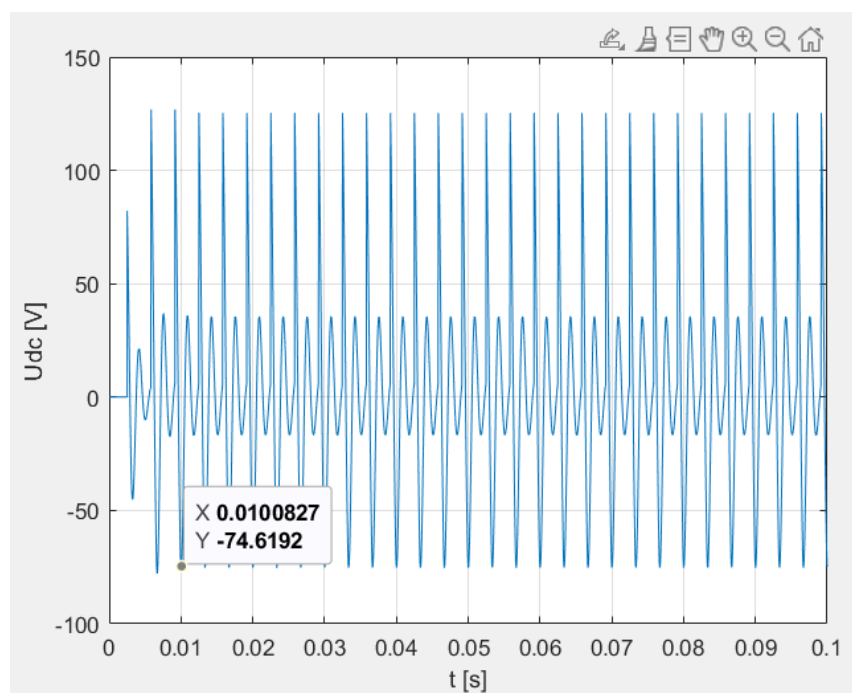


Grafika 21 Przebieg U_{dc} dla $\alpha=90$ oraz obciążenia rezystancyjno-indukcyjnego

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

averageValue =

3.5426

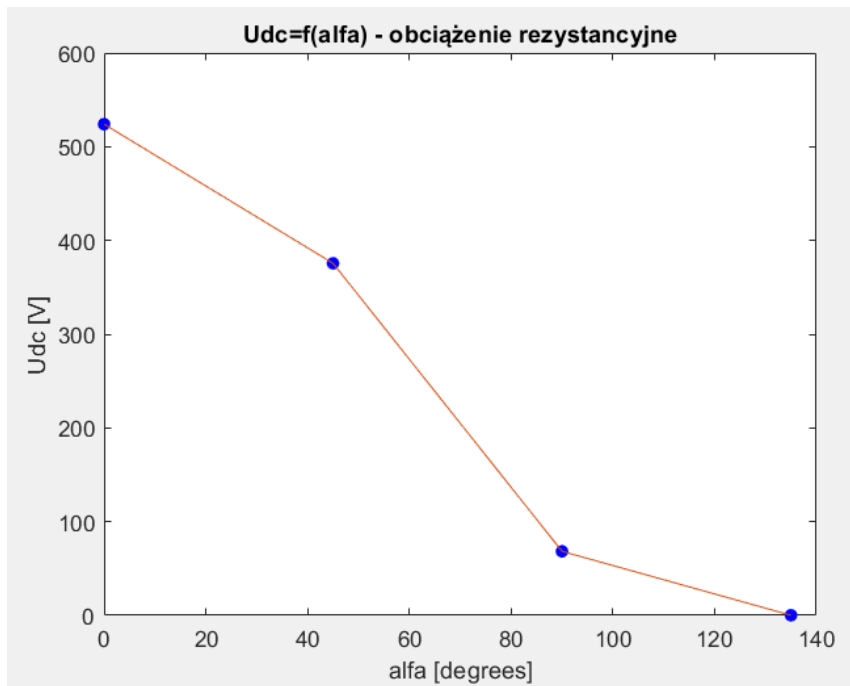


Grafika 22 Przebieg U_{dc} dla $\alpha=135$ oraz obciążenia rezystancyjno-indukcyjnego

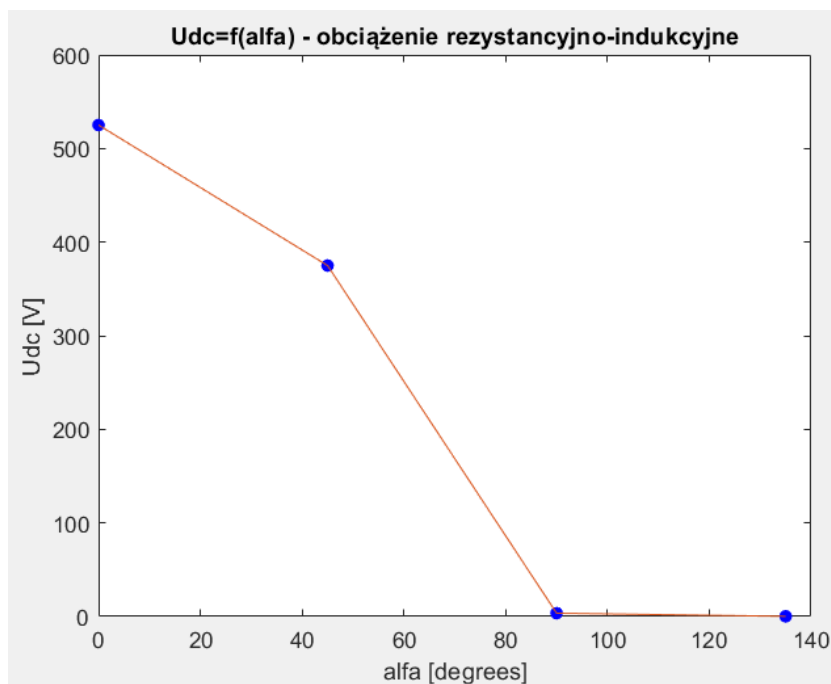
53419	-75.2672	
53420	-75.2673	
53421	-75.2674	
53422	-75.2675	
53423	-75.2675	
53424	-75.2674	
53425	-75.2672	

averageValue =

0.2189



Grafika 23 Wykres zależności wartości średniej U_{dc} od kąta α dla obciążenia rezystancyjnego



Grafika 24 Wykres zależności wartości średniej U_{dc} od kąta α dla obciążenia rezystancyjno-indukcyjnego

Kąt α reprezentuje opóźnienie włączenia tyrystorów w każdym półcyklu napięcia wejściowego AC. Zatem wraz ze zwiększaniem kąta α , opóźniony zostaje moment, w którym tyrystory zaczynają przewodzić. Opóźnienie to skraca efektywny czas przewodzenia tyrystorów, prowadząc do krótszego czasu trwania dodatnich półcykli.

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=20-3;
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

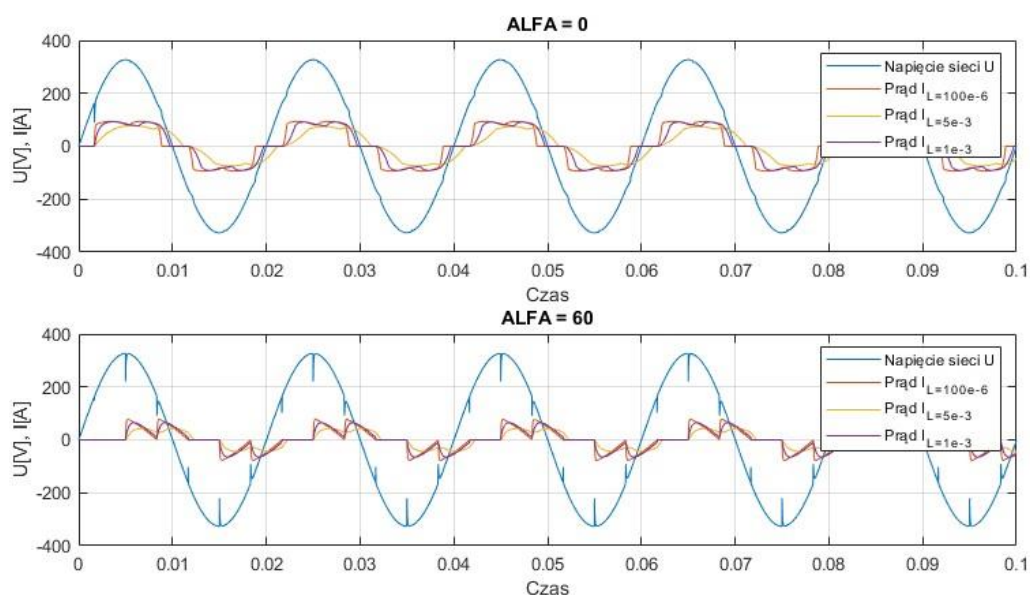
fip=60; %ALFA=60 L=100e-6
Lin=100e-6;
Rin=1/30*w*Lin;
sim('spr_sim')
czas=UI_przebiegi.time;
U=UI_przebiegi.signals.values(:,4);
I=UI_przebiegi.signals.values(:,1);
subplot(2,1,2)
plot(czas,U,czas,I)
grid on
hold on

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

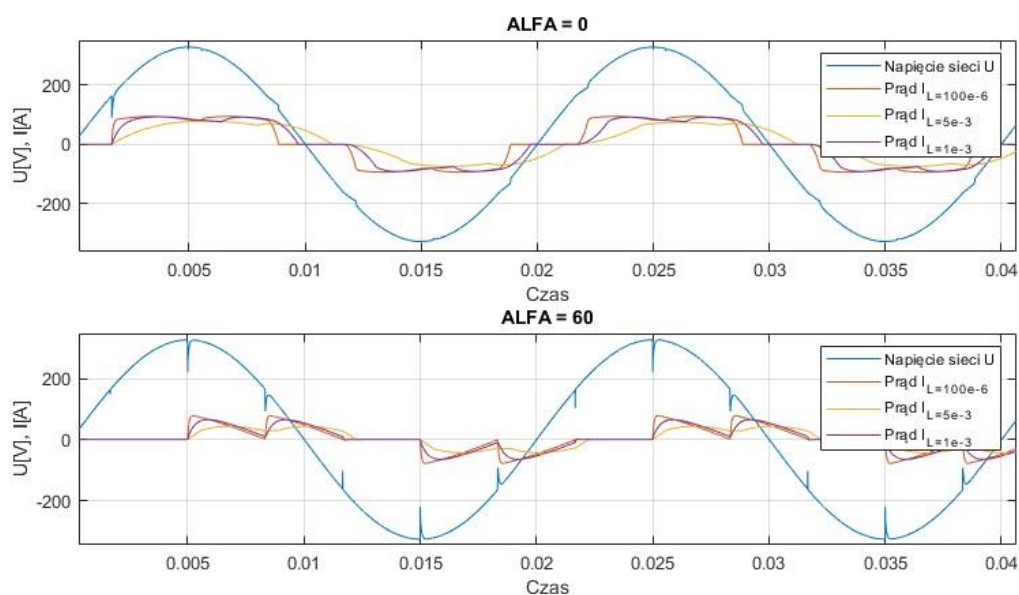
fip=60; %ALFA=60 L=5e-3
Lin=5e-3;
Rin=1/30*w*Lin;
sim('spr_sim')
czas=UI_przebiegi.time;
U=UI_przebiegi.signals.values(:,4);
I=UI_przebiegi.signals.values(:,1);
subplot(2,1,2)
plot(czas,I)
grid on; hold on

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');
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=1_0_0_e_-6', 'Prąd I_L=5_e_-3', 'Prąd I_L=1_e_-3');
xlabel('Czas'); ylabel('U[V], I[A]')
grid on; hold on
```



Grafika 25 Przebiegi prądu wejściowego na tle napięcia sieci



Grafika 26 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 zniekształca przebieg prądu. Potwierdzają to grafiki 25 oraz 26. Dzieje się tak ponieważ wzrostem indukcyjności na wejściu, tempo zmian prądu staje się wolniejsze z powodu wstecznej siły elektromotorycznej indukowanej w cewkach indukcyjnych. Zgodnie z prawem indukcji elektromagnetycznej Faradaya, indukowane napięcie przeciwstawia się zmianie prądu. Ten indukcyjny spadek napięcia powoduje, że prąd rośnie bardziej stopniowo i wprowadza przesunięcie fazowe między przebiegami napięcia i prądu. Z perspektywy działania układu jest to niekorzystne

i powinno się tak dobierać indukcyjność wejściową mostka, by była na tyle niska by nie zniekształcała przebiegu prądu.

b. Analiza FFT dla przebiegu prądu sieci

Kod:

```
clc; close all
```

```
Linp=[100e-6 1e-3 5e-3];
```

```
THD=zeros(1,3);
```

```
data_cell=cell(1,3);
```

```
data_cell1=cell(1,3);
```

```
for n=1:3
```

```
    Lin=Linp(n);
```

```
    sim("untitled1.slx")
```

```
    FFTDATA = power_fftscope(Is);
```

```
    FFTDATA.fundamental=50;
```

```
    FFTDATA.startTime=1e-8;
```

```
    FFTDATA.cycles=1;
```

```
    FFTDATA.maxFrequency=1000;
```

```
    FFT=FFTDATA.mag/FFTDATA.magFundamental*100;
```

```
    figure()
```

```
    bar(FFTDATA.freq,FFT);
```

```
    grid on;
```

```
    title('FFT');
```

```
    ylabel('Mag [% of Fundamental]');
```

```
    xlabel('Frequency [Hz]');
```

```
    THD(n)=FFTDATA.THd;
```

```
    data_cell{n}=FFTDATA.phase;
```

```
    data_cell1{n}=cos(data_cell{n});
```

```
    FFT51(n)=FFT(5)/FFT(1);
```

```
    FFT71(n)=FFT(7)/FFT(1);
```

```
end
```

```
figure
plot(Linp,THD,'b.', 'MarkerSize',
20);
```

```
hold on;
```

```
plot(Linp,THD);
```

```
title('THD=f(alfa)');
```

```
ylabel('THD [ ]');
```

```
xlabel('Lin [H]');
```

```
figure
```

```
plot(Linp,THD,'b.', 'MarkerSize',
20);
```

```
hold on;
```

```
plot(Linp,FFT51);
```

```
title('I(5)/I(1)=f(Lin)');
```

```
ylabel('I(5)/I(1) [ ]');
```

```
xlabel('Lin [H]');
```

```
figure
```

```
plot(Linp,THD,'b.', 'MarkerSize',
20);
```

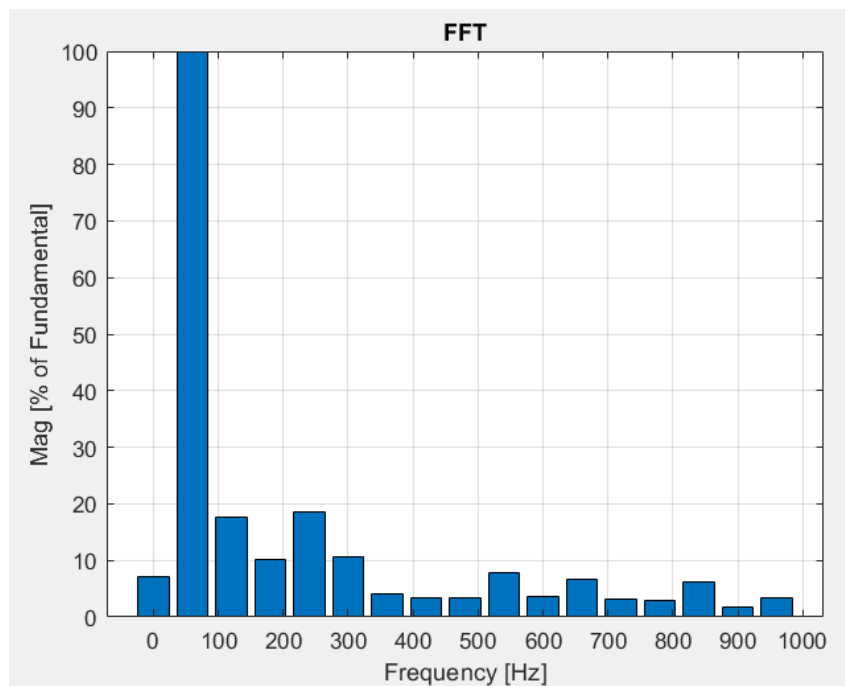
```
hold on;
```

```
plot(Linp,FFT71);
```

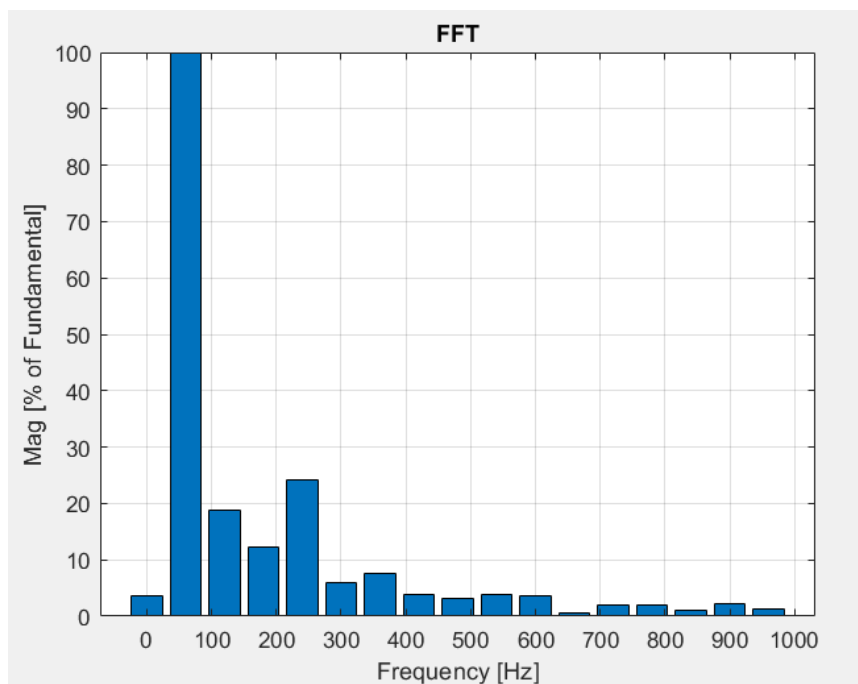
```
title('I(7)/I(1)=f(Lin)');
```

```
ylabel('I(7)/I(1) [ ]');
```

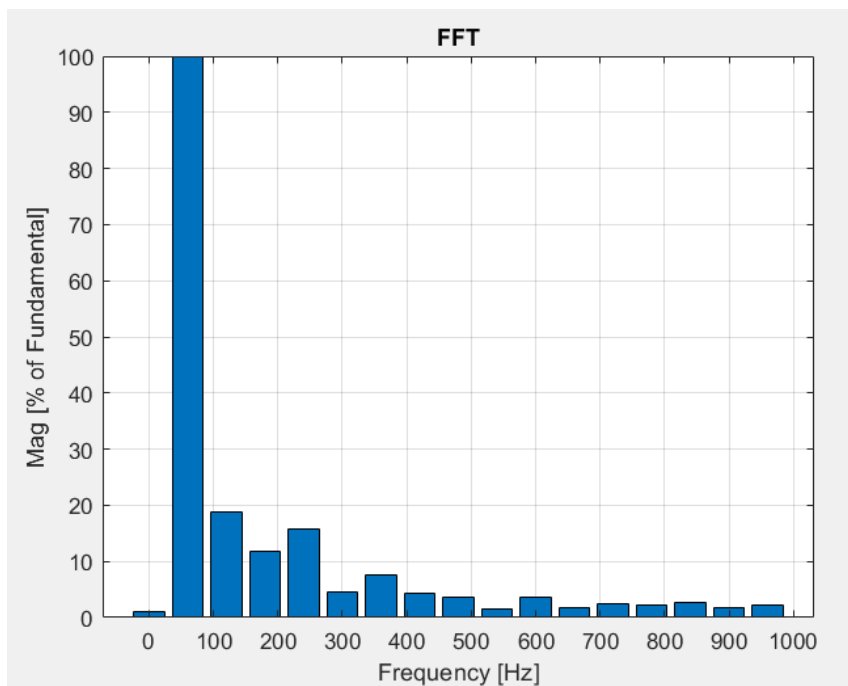
```
xlabel('Lin [H]');
```



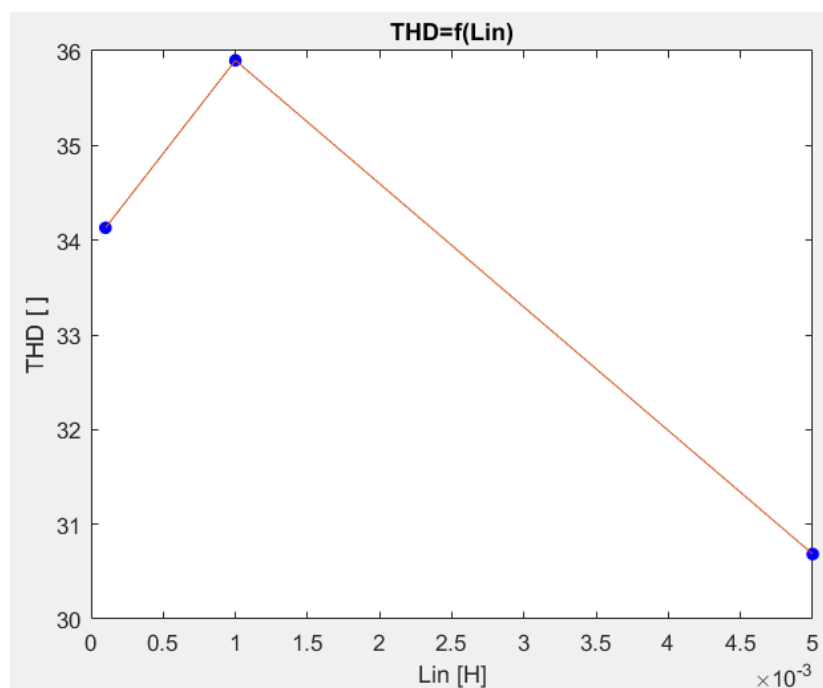
Grafika 27 Analiza FFT prądu fazowego dla $Lin=100e-6$ oraz $\alpha=0$



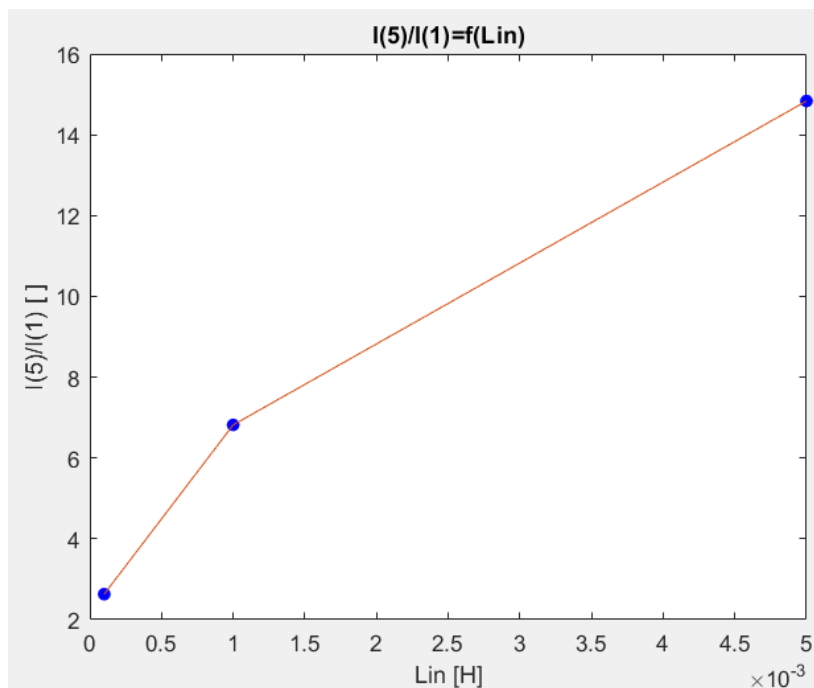
Grafika 28 Analiza FFT prądu fazowego dla $Lin=1e-3$ oraz $\alpha=0$



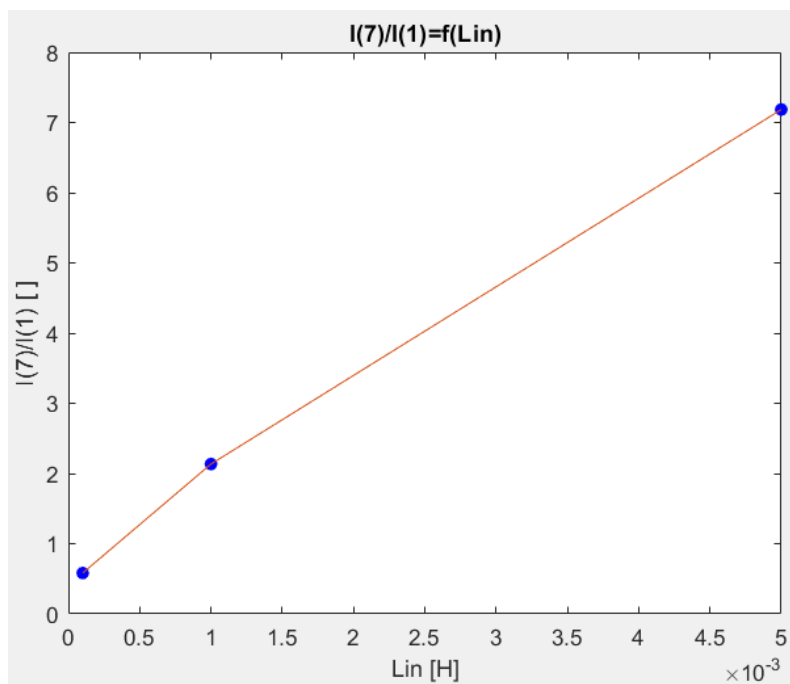
Grafika 29 Analiza FFT prądu fazowego dla $Lin = 5e-3$ oraz $\alpha = 0$



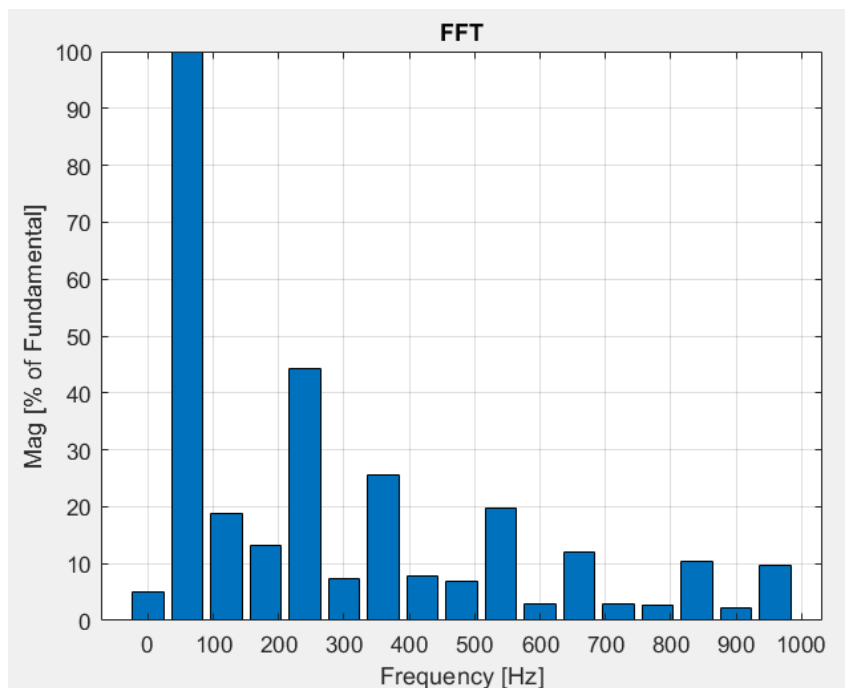
Grafika 30 Wykres zależności całkowitego zniekształcenia harmonicznego (THD) od Lin dla $\alpha = 0$



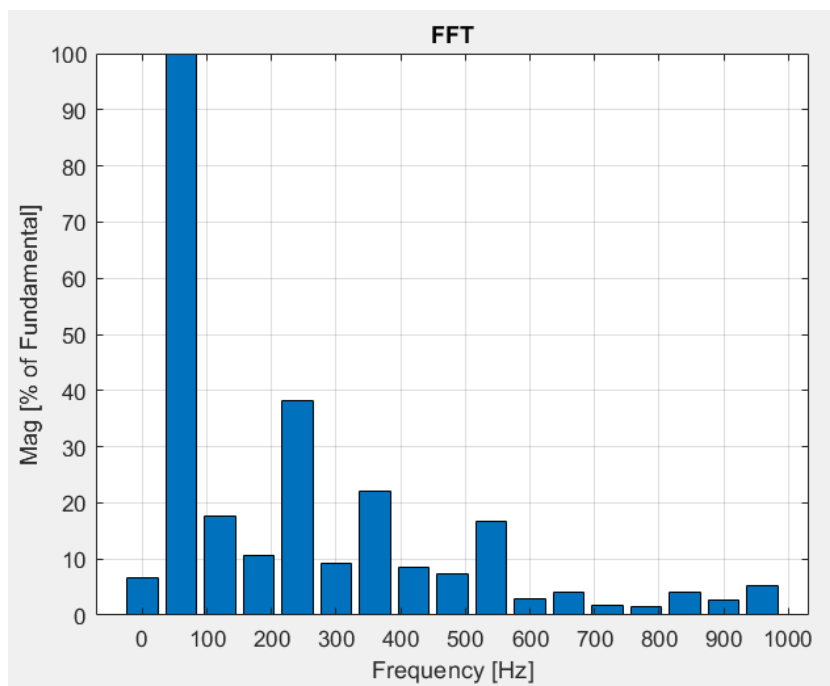
Grafika 31 Wykres stosunku piątej do pierwszej harmonicznej od Lin dla $\alpha=0$



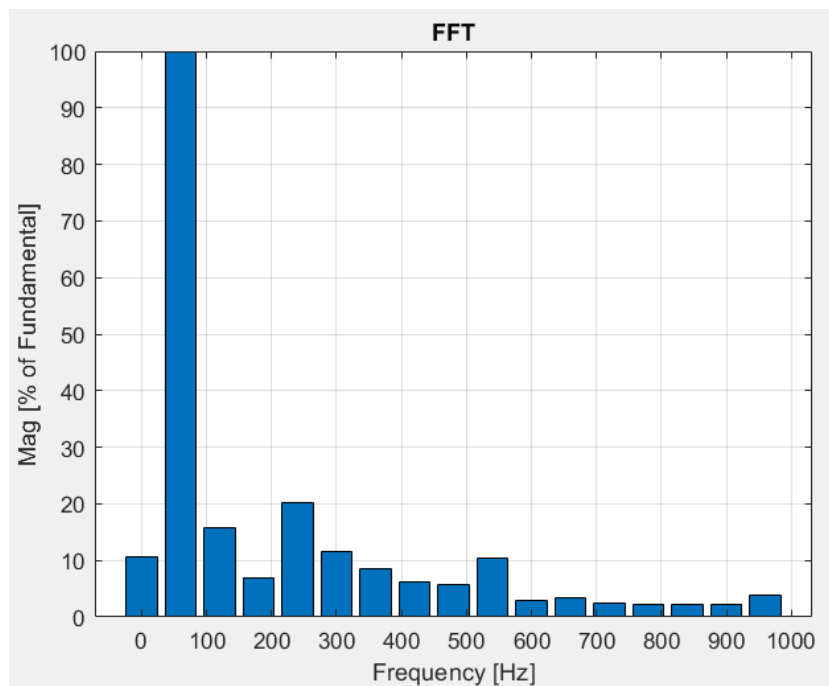
Grafika 32 Wykres stosunku siódmej do pierwszej harmonicznej od Lin dla $\alpha=0$



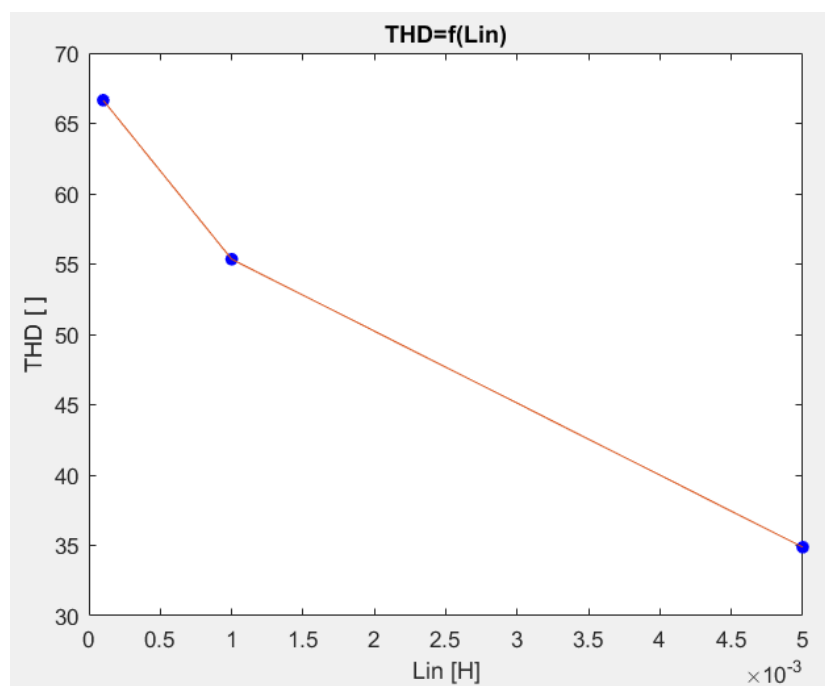
Grafika 33 Analiza FFT prądu fazowego dla $Lin=100e-6$ oraz $\alpha=60$



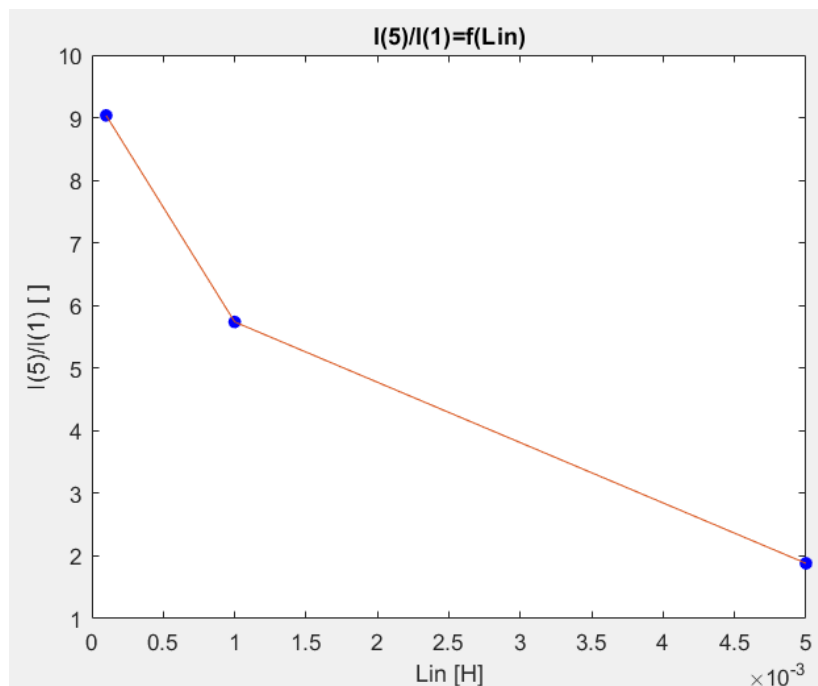
Grafika 34 Analiza FFT prądu fazowego dla $Lin=1e-3$ oraz $\alpha=60$



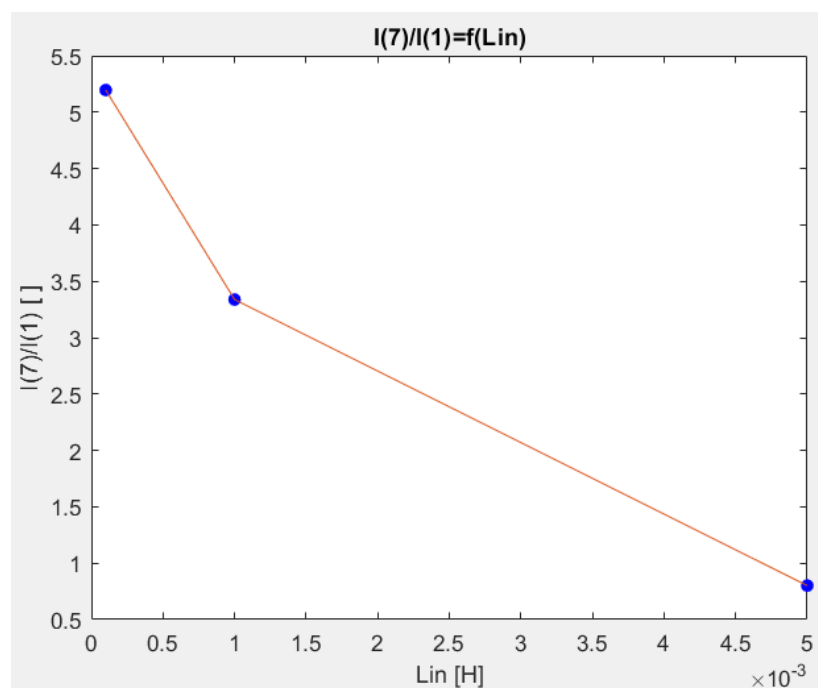
Grafika 35 Analiza FFT prądu fazowego dla $Lin = 5e-3$ oraz $\alpha = 60$



Grafika 36 Wykres zależności całkowitego zniekształcenia harmonicznego (THD) od Lin dla $\alpha = 60$



Grafika 37 Wykres stosunku piątej do pierwszej harmonicznej od Lin dla $\alpha=60$



Grafika 38 Wykres stosunku siódmej do pierwszej harmonicznej od Lin dla $\alpha=60$

Na grafikach obrazujących zależność THD (numery 30 oraz 36) dla kąta $\alpha=0$ obserwujemy początkowy wzrost wartości THD, a następnie jego spadek, natomiast dla $\alpha=60$ obserwujemy wyłącznie spadek. Początkowe zwiększenie indukcyjności w pierwszym przypadku może prowadzić do bardziej wyraźnego opóźnienia między przebiegami napięcia i prądu, szczególnie, że różnica jest znaczna. Może to skutkować wyższym współczynnikiem THD z powodu opóźnionej reakcji prądu na zmiany napięcia. Natomiast spadek THD można wytłumaczyć tym, że wraz ze wzrostem indukcyjności częstotliwość rezonansowa obwodu może ulec przesunięciu. W zależności od parametrów obwodu, może istnieć zakres wartości indukcyjności, w którym system jest bardziej podatny na rezonans, powodując wzrost zawartości harmonicznych. Po przekroczeniu pewnej wartości indukcyjności, efekty rezonansowe mogą zacząć się zmniejszać, prowadząc do spadku THD. Wraz ze zmianą indukcyjności może również ulec zmianie amplituda niektórych harmonicznych, co obserwujemy na grafikach 32, 33, 37, 38. Dla wartości kąta $\alpha=0$ obserwujemy wzrost stosunku harmonicznych, natomiast dla kąta $\alpha=60$ obserwujemy spadek.

c. Wartość średnia napięcia U_{dc}

Kod:

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

Lin=1e-3;
alfa=0;
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]');
```

```
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;
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;
```

```

xlabel('t [s]');
excludeRange = 1:33335;
averageValueR60 =
mean(Udc.signals.values(excludeRange+1:
end, 1))

```

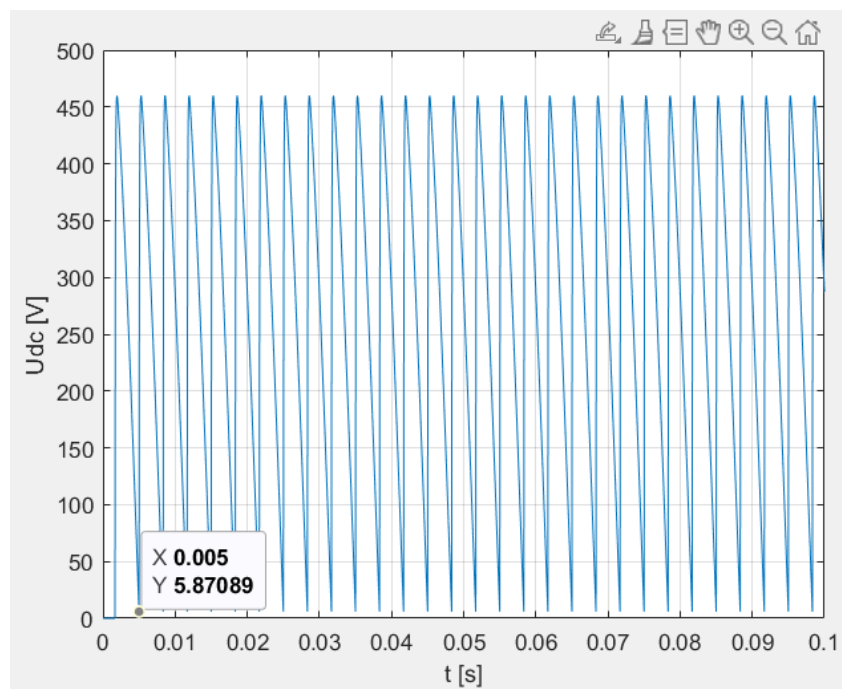
```

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))

```

Przebieg napięcia wyjściowego dla $L_{in}=100e-6$ oraz $\alpha=60$ przedstawia grafika 11.



Grafika 39 Przebieg U_{dc} dla $L_{in}=100e-6$ oraz $\alpha=60$

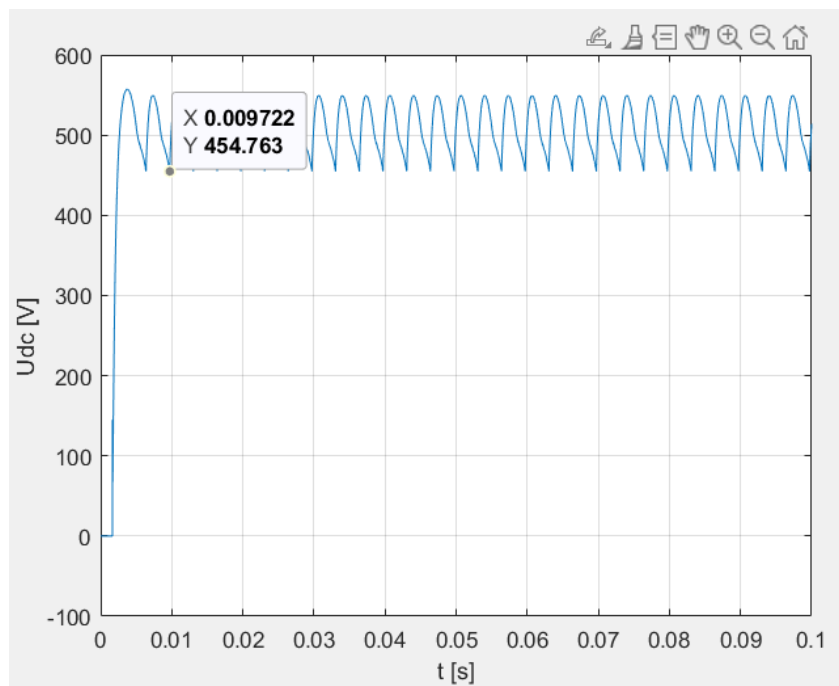
33334	5.8857
33335	5.8413
33336	140.0086

```

averageValue =

264.2976

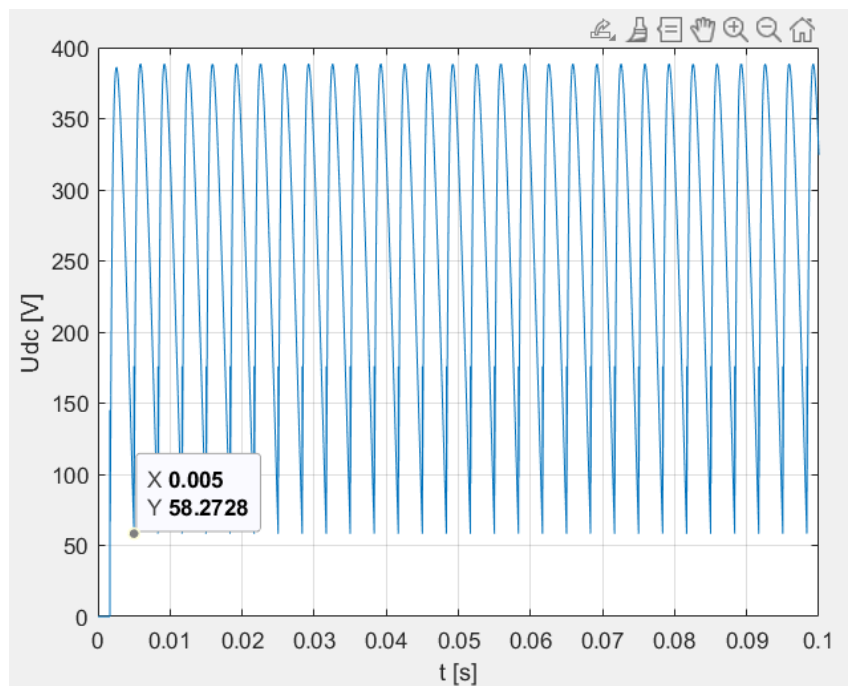
```



Grafika 40 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	

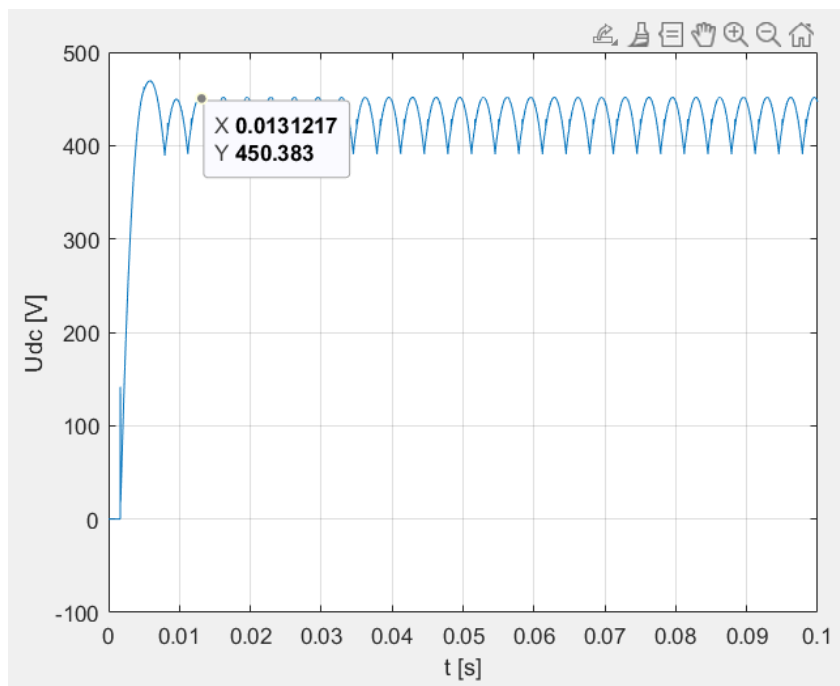
averageValue =
500.3336



Grafika 41 Przebieg U_{dc} dla $L_{in} = 1e-3$ oraz $\alpha = 60$

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

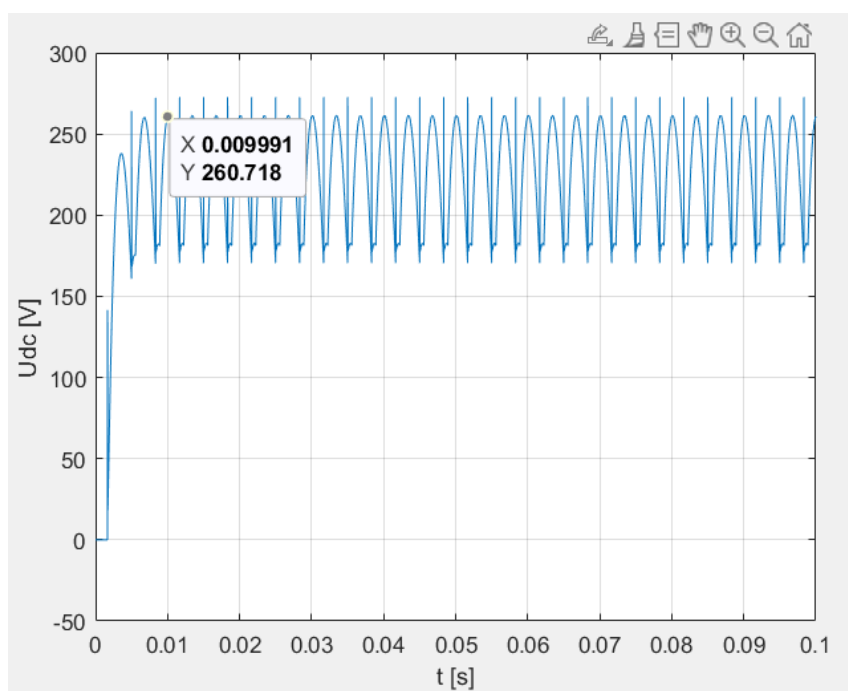
averageValue =
260.2937



Grafika 42 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	

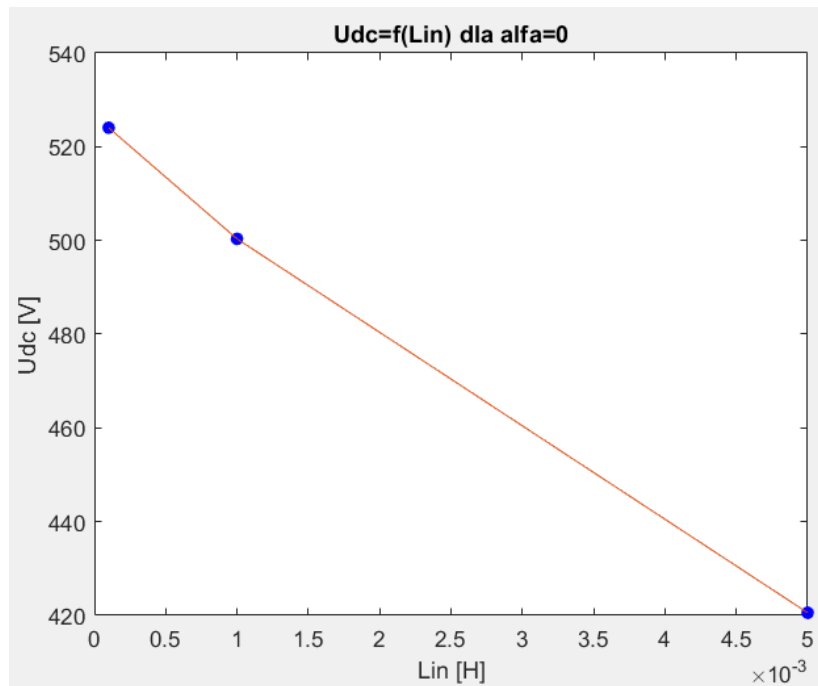
averageValue =
420.5664



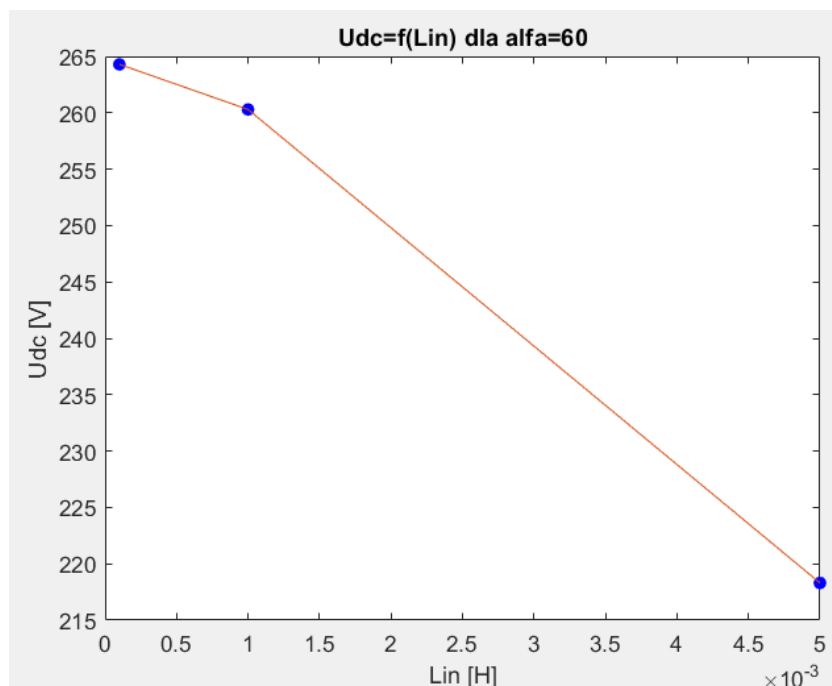
Grafika 43 Przebieg U_{dc} dla $L_{in} = 5e-3$ oraz $\alpha = 60$

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



Grafika 45 Wykres zależności wartości średniej U_{dc} od Lin dla kąta $\alpha=60$

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

może ograniczyć 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. Wraz ze wzrostem indukcyjności w źródle wzrasta również spadek napięcia na elementach indukcyjnych. Może to prowadzić do spadku efektywnego napięcia dostępnego dla procesu prostowania.

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;

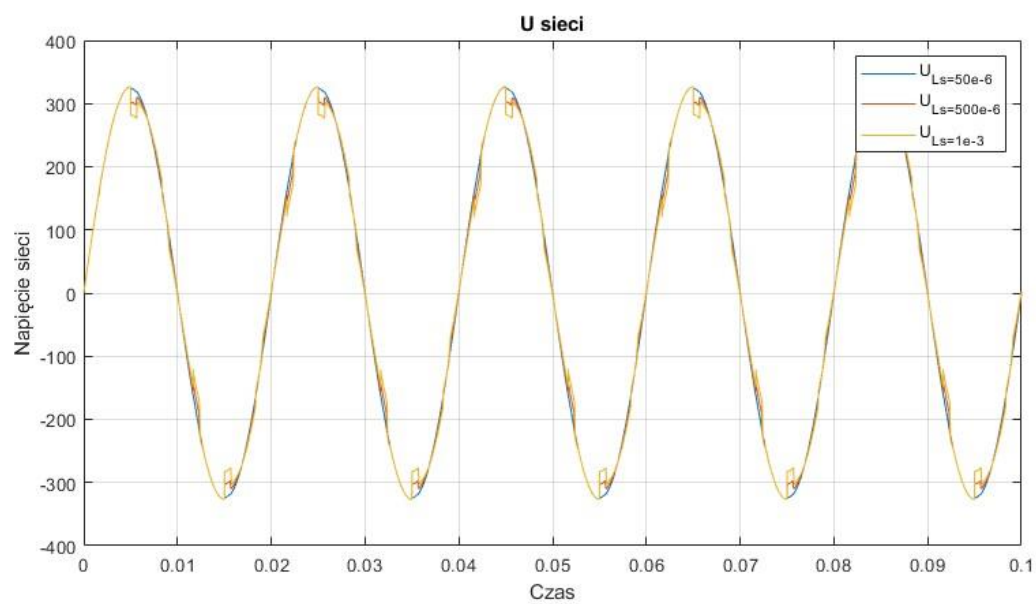
%parametry wejściowe
Us_ab=400;
f=50;
fi=0;
w=2*pi*f;
Ls=50e-6;
Lin=5e-3;
Rin=1/30*w*Lin;
R_obc=6;
L_obc=100e-6;
Rdiode=1e-3;
Vdiode=1.5;

%PRZEBIEGI

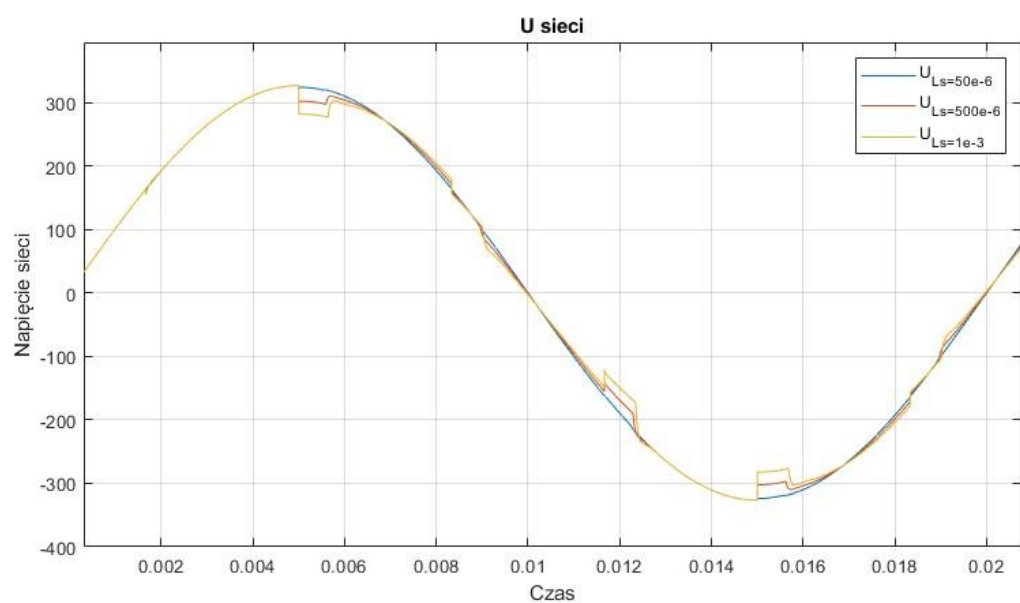
figure() %Ls=50e-6
Ls=50e-6;
sim('spr_sim')
czas=UI_przebiegi.time;
U=UI_przebiegi.signals.values(:,4);
plot(czas,U)
grid on
hold on

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

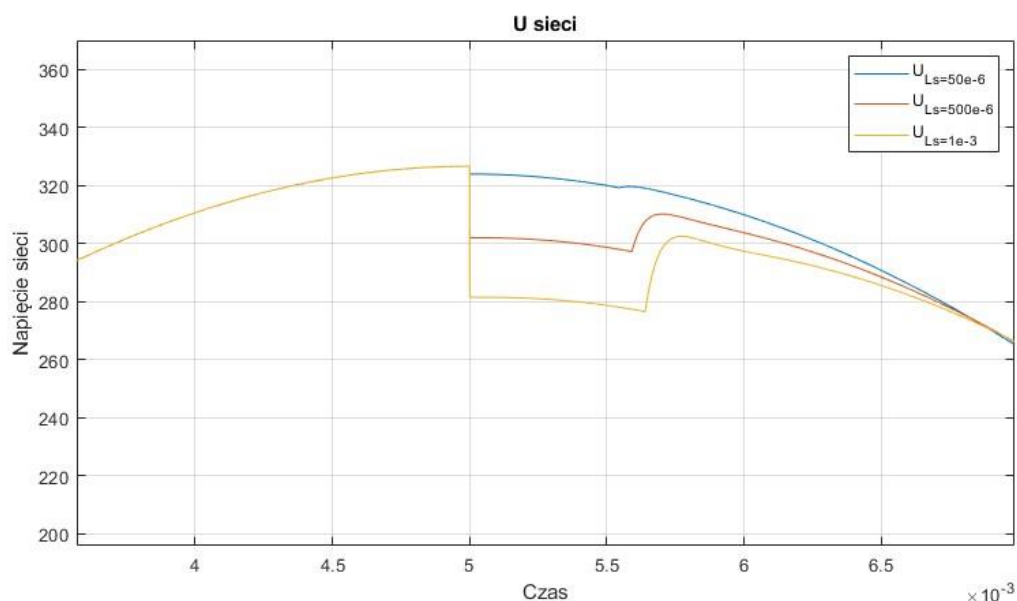
Ls=1e-3;
sim('spr_sim')
czas=UI_przebiegi.time;
U=UI_przebiegi.signals.values(:,4);
plot(czas,U); title('U sieci')
legend('U_Ls=_5_0_e_-_6', 'U_Ls=_5_0_0_e_-_6', 'U_Ls=_1_e_-_3');
xlabel('Czas'); ylabel('Napięcie sieci')
grid on
hold on
```



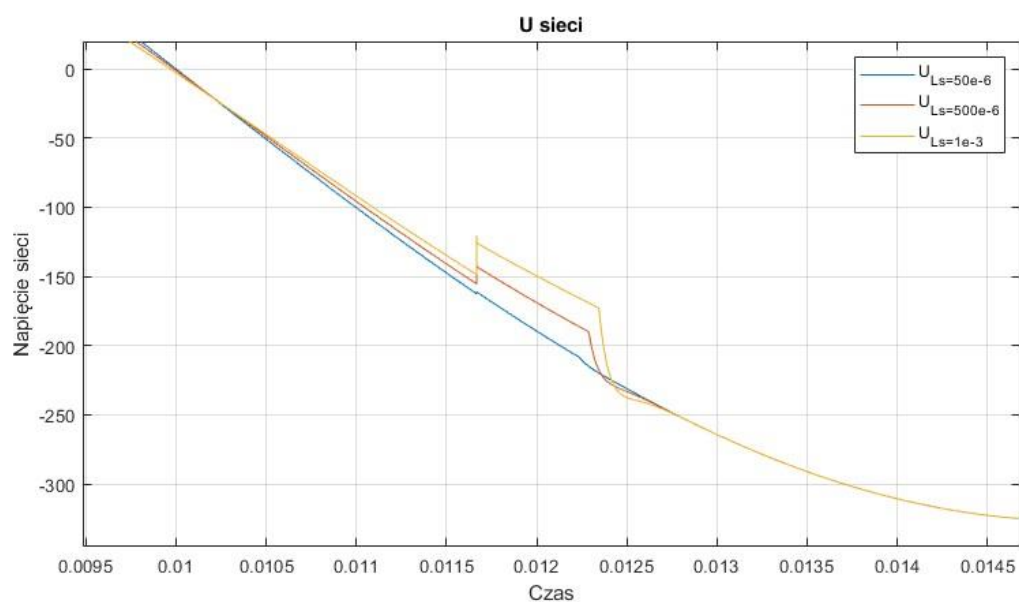
Grafika 46 Przebieg napięcia wejściowego w zależności od reaktancji zastępczej sieci



Grafika 47 Przebieg napięcia wejściowego - 1 okres



Grafika 48 Napięcie wejściowe - powiększenie na różnice w przebiegach przy wartościach maksymalnych



Grafika 49 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. Dodatkowo w okolicy wartości średniej również one występują. 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. Dla bardzo niskich wartości L_s otrzymujemy przebieg idealny.

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.