

# Analysis of Pulse DC Current Generator Enabling Energy Return in the Matlab environment

Marcin Tomczyk <sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> School Complex No. 1, Ulanów 3, 31 - 450 Cracow, Poland, tomczykmarcin@poczta.fm

\* Marcin TOMCZYK, tomczykmarcin@poczta.fm

**Abstract:** The article presents tests based on the use of an application created in the Matlab environment and the fast Fourier transform in the analysis of selected voltage and direct current waveforms. A spectral analysis of the test results obtained for changes in electrical signals occurring during the return of energy from the receiver to the power source using the operation of a DC pulse regulator was presented.

**Keywords:** DC pulse generator; Matlab environment; Fast Fourier Transform

## Analiza regulatora impulsowego prądu stałego umożliwiającego zwrot energii w środowisku Matlab

Marcin TOMCZYK <sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Zespół Szkół Nr 1 w Krakowie, ul. Ulanów 3, 31 – 450 Kraków, Polska, tomczykmarcin@poczta.fm

\* Marcin TOMCZYK, tomczykmarcin@poczta.fm

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono badania dotyczące zastosowania aplikacji utworzonej w środowisku Matlab i szybkiej transformaty Fouriera w analizie wybranych przebiegów napięcia i prądu stałego. Przeprowadzono analizę widmową wyników badań uzyskanych dla zmian sygnałów elektrycznych występujących podczas zwrotu energii z odbiornika do źródła zasilania za pomocą działania regulatora impulsowego prądu stałego.

**Słowa kluczowe:** regulator impulsowy prądu stałego; środowisko Matlab; szybka transformata Fouriera

### 1. Wprowadzenie

Matlab jest środowiskiem programistycznym wykorzystywanym do rozwijania algorytmów, wizualizacji i analizy danych. Program umożliwia również przeprowadzenie obliczeń numerycznych.

Matlab reprezentuje środowisko oferujące wiele narzędzi obliczeniowych i graficznych działających na podstawie predefiniowanych funkcji oraz umożliwia tworzenie własnych skryptów za pomocą posiadanego języka programowania.

W języku MATLAB macierz jest podstawowym typem danych i dlatego istnieje nazwa MATrix LABoratory. W ten sposób w szybki sposób program ten umożliwia rozwiązywanie wielu problemów inżynierskich, które są sformułowane, jako problem o charakterze macierzowym lub wektorowym. Zaprogramowanie ich w innych językach wysokiego poziomu takich, jak np. C lub Fortran spowodowałoby wykorzystanie większe ilości czasu.

W skład środowiska programistycznego Matlab wchodzi narzędzie Simulink. To narzędzie umożliwia tworzenie schematów blokowych za pomocą wbudowanych bloków oraz zawiera edytor graficzny, biblioteki bloków i solvery stosowane do modelowania i symulacji systemów dynamicznych. Jest zintegrowany z Matlabem, umożliwia dołączenie

algorytmów Matlab do modeli. W celu przeprowadzenia dalszej analizy jest możliwy eksport wyników symulacji z Simulinka do Matlab.

Analiza czasowo-częstotliwościowa z wykorzystaniem szybkiej transformaty Fouriera lub transformaty falkowej jest jedną z najpopularniejszych i coraz częściej stosowanych metod stosowanych do przeprowadzenia analiz zmian różnych wielkości fizycznych i występujących również w obwodach elektrycznych.

W ciągu ostatnich kilku lat opublikowano szereg prac prezentujących nowe sposoby analizy obwodów elektrycznych utworzonych w środowisku Matlab z wykorzystaniem metod czasowo-częstotliwościowych. Niektóre z nich warto wymienić:

- przetwarzanie sygnałów muzycznych audio prowadzące do uzyskania ich odpowiedniego tempa za pomocą transformaty Fouriera w programie Matlab [1],
- analiza stanów przejściowych łącząca szereg Fouriera z transformacją Laplace'a – Carsona (LC) w dziedzinie zespolonej oraz wykorzystanie transformaty Fouriera do analizy stanów przejściowych obwodu przetwornicy mocy zarówno przy obciążeniu pasywnym, jak i aktywnym w środowisku Matlab/Simulink [2],
- wykorzystanie szybkiej transformaty Fouriera i modelu GUI w programie Matlab do analizy minimalnej częstotliwości próbkowania sygnałów elektrycznych [3],
- przeprowadzenie analizy i obserwacji wizualizacji fal sinusoidalnych w obwodach elektrycznych przy użyciu szeregow Fouriera w programie Matlab [4],
- modelowanie napięcia i prądu trójfazowego stanowiących parametry kabla wysokiego napięcia i detekcja możliwych uszkodzeń na jego długości w programie Matlab/Simulink [5],
- identyfikacja i analiza uszkodzeń w systemie pięciu magistrali za pomocą dyskretnej transformacji falkowej oraz przedstawienie oceny wartości znamionowej wyłącznika w środowisku Matlab/Simulink [6],
- analiza Fouriera i harmoniczna przeprowadzona za pomocą testów symulacyjnych innych typów przetworników w środowisku Matlab/Simulink [7],
- przedstawienie nowej metody identyfikacji zmian momentu bezwładności mas zredukowanych na wale wchodzącego w skład napędu z silnikiem indukcyjnym za pomocą analizy skalogramów otrzymanych przy zastosowaniu ciągłej transformaty falkowej w środowisku Matlab/Simulink [8].

## 2. Opis działania zaproponowanej metody analizy zwrotu energii elektrycznej z odbiornika do źródła

Przeprowadzono badania z wykorzystaniem regulatora impulsowego prądu stałego w którym jest możliwy przepływ energii z odbiornika do źródła i jest pokazany na rys. 3, w którym zaworem wyłączalnym jest tranzystor sterowany półokresowo IGBT z częstotliwością 50 [Hz] i dołączony równolegle do odbiornika indukcyjno-rezystancyjnego i źródła napięcia  $E_0$ . Włączona między odbiornik a źródło zasilania dioda dołączona w kierunku zaporowym, zwana diodą zwrotną, umożliwia tylko przepływ prądu z odbiornika do źródła zasilania czyli do wyjścia prostownika jednofazowego tyrystorowego. Występuje to wtedy, kiedy napięcie na odbiorniku ma większą wartość niż źródło napięcia. Podczas gdy tranzystor znajduje się w stanie przewodzenia, prąd odbiornika narasta pod wpływem napięcia źródłowego  $E_0$ . Po wyłączeniu tranzystora prąd odbiornika płynie w dalszym ciągu pod wpływem energii zmagazynowanej w indukcyjności  $L_0$ .

W badaniach wykorzystano przebiegi napięcia i natężenia prądu wyprostowanego dla kondensatora dołączonego równolegle do wyjścia zastosowanego prostownika jednofazowego tyrystorowego oraz napięcia i natężenia prądu stałego dla odbiornika i źródła napięcia zarejestrowane podczas symulacji przeprowadzonych w programie Matlab/Simulink.

W celu analizy zmian badanych sygnałów elektrycznych przyjęto metodę w której wykorzystano zmiany kąta załączenia tyrystorów  $\alpha_z$  zastosowanych w prostowniku jednofazowym dostarczającym energię elektryczną do odbiornika rezystancyjno-indukcyjnego i źródła napięcia. Oprócz zmian kąta załączenia  $\alpha_z$  przeprowadzono również zmniejszanie rezystancji odbiornika  $R_0$  i zwiększanie wartości źródła napięcia. Wartości tych parametrów zmieniano w ustalonej następującej kolejności odpowiednio rosnącej i malejącej:

- - kąt załączenia tyrystorów  $\alpha_z$  o wartościach równych:  $5^\circ$ ,  $10^\circ$  i  $90^\circ$ ,
- - amplitudę źródła napięcia o wartościach równych: 50[V], 80[V] i 120 [V].
- - rezystancję odbiornika o wartościach równych: 300[Ω], 250[Ω] i 200[Ω].

W każdym przeprowadzonym badaniu w celu lepszej wizualizacji wszystkich badanych przebiegów czasowych napięć i natężeń prądu stałego wybrano odpowiednią liczbę zarejestrowanych próbek i wybieranych od próbek

zarejestrowanych od początku testu symulacyjnego do wartości określonej za pomocą parametru  $a_1$ . Ponadto próbki te były wybierane zawsze w tej samej kolejności i co 10 próbkę oraz dla otrzymanych ich wartości znajdujących się w zakresie pomiędzy otrzymaną wartością minimalną i otrzymaną wartością maksymalną badanego napięcia lub natężenia prądu stałego. Parametr  $a_1$  oraz macierz czasu  $T_1$  zostały określone stosownie według poniższych zależności:

$$T_1 \in [0, a_1] \tag{1}$$

$$a_1 = \begin{pmatrix} a_2 \\ a_3 \end{pmatrix} \tag{2}$$

gdzie:  $a_2 = 10$ ;  $a_3 = 50$

Prezentowane na rysunkach wartości przebiegów badanych przebiegów czasowych napięcia kondensatora  $U_{c1}$ , napięcia odbiornika rezystancyjno-indukcyjnego i źródła napięcia  $U_{o1}$ , natężenia prądu kondensatora  $I_{c1}$  i natężenia prądu odbiornika rezystancyjno-indukcyjnego  $I_{o1}$  były określone za pomocą następujących zależności:

$$U_{c1(i)} = U_{c(i)} \in [\min(U_{c(i)}), \max(U_{c(i)})]; i = 1, 2 \dots n_1 \tag{3}$$

$$U_{o1(i)} = U_{o(i)} \in [\min(U_{o(i)}), \max(U_{o(i)})]; i = 1, 2 \dots n_1 \tag{4}$$

$$I_{c1(i)} = I_{c(i)} \in [\min(I_{c(i)}), \max(I_{c(i)})]; i = 1, 2 \dots n_1 \tag{5}$$

$$I_{o1(i)} = I_{o(i)} \in [\min(I_{o(i)}), \max(I_{o(i)})]; i = 1, 2 \dots n_1 \tag{6}$$

gdzie:  $U_c, U_o, I_c, I_o$  – wartości zarejestrowane dla badanych przebiegów czasowych i odpowiednio napięcia kondensatora, napięcia odbiornika rezystancyjno-indukcyjnego, natężenia prądu kondensatora i natężenia prądu dla odbiornika rezystancyjno-indukcyjnego;

$n_1$  – liczba próbek zarejestrowanych podczas testu symulacyjnego.

Dla każdego przeprowadzonego testu symulacyjnego została przeprowadzona analiza widma Fouriera badanego przebiegu czasowego napięcia lub natężenia prądu stałego pomnożonego przez współczynniki okna czasowego zastosowanego do filtracji badanego przebiegu czasowego. Dla wszystkich badanych napięć i natężeń prądu stałego przeprowadzono obliczenia widma Fouriera dla trzech okien czasowych: okna symetrycznego Hanninga, okno symetrycznego Blackmana i okna Kaisera.

Widma Fouriera dla analizowanych przebiegów czasowych zostały określone za pomocą poniższych zależności:

$$F_{c1(k)} = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} U_{c(i)} * M_{1(i)} * e^{j\left(\frac{2*\pi}{n_1}\right)(-k*i)}}{n_1}; i, k = 1, 2 \dots n_1 \tag{7}$$

$$F_{o1(i)} = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} U_{o(i)} * M_{1(i)} * e^{j\left(\frac{2*\pi}{n_1}\right)(-k*i)}}{n_1}; i, k = 1, 2 \dots n_1 \tag{8}$$

$$F_{c2(i)} = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} I_{c(i)} * M_{1(i)} * e^{j\left(\frac{2*\pi}{n_1}\right)(-k*i)}}{n_1}; i, k = 1, 2 \dots n_1 \tag{9}$$

$$F_{o2(i)} = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} I_{o(i)} * M_{1(i)} * e^{j\left(\frac{2*\pi}{n_1}\right)(-k*i)}}{n_1}; i, k = 1, 2 \dots n_1 \tag{10}$$

gdzie:  $F_{c1}, F_{o1}, F_{c2}, F_{o2}$  – wartości widma Fouriera obliczone dla badanych przebiegów czasowych i odpowiednio napięcia kondensatora, napięcia odbiornika rezystancyjno-indukcyjnego, natężenia prądu kondensatora i natężenia prądu dla odbiornika rezystancyjno-indukcyjnego;

$M_1$  – macierz dla odpowiedniego okna czasowego.

Dla okna Hanninga (Hanninga) wartości macierzy  $M_1$  oblicza się stosownie według poniższej zależności:

$$M_{1(i)} = 0.5 * \left( 1 - \cos\left(\frac{2*\pi*i}{n_1}\right) \right); i = 1, 2 \dots n_1 \tag{11}$$

Dla okna Bartletta wartości macierzy  $M_1$  oblicza się za pomocą następującej zależności:

$$M_{1(i)} = 1 - \left| \frac{i - \frac{n_1 - 1}{2}}{\frac{n_1 - 1}{2}} \right|; i = 1, 2 \dots n_1 \tag{12}$$

W przypadku okna Blackmana wartości macierzy  $M_i$  wyznacza się za na podstawie zastosowania poniższej zależności:

$$M_{1(i)} = b_0 - b_1 * \left( \cos \left( \frac{2*\pi*i}{n_1-1} \right) \right) + b_2 * \left( \cos \left( \frac{4*\pi*i}{n_1-1} \right) \right); i = 1,2 \dots n_1 \quad (13)$$

$$\text{gdzie: } b_0 = \frac{1-\alpha}{2}; \quad (14)$$

$$\alpha = 0.16; b_1 = 0.5; b_2 = 0.5$$

Następnie dokonano obliczenia widm amplitudowych dla odpowiednich części otrzymanych widm Fouriera analizowanych przebiegów czasowych. Przeprowadzono obliczenia stosownie według poniższych zależności:

$$M_{c1(i)} = 8 * |F_{c1(i)}|; i = 1,2 \dots n_3; n_3 = \text{int} \left( \frac{n_1}{8} \right) \quad (15)$$

$$M_{o1(i)} = 8 * |F_{o1(i)}|; i = 1,2 \dots n_3; n_3 = \text{int} \left( \frac{n_1}{8} \right) \quad (16)$$

$$M_{c2(i)} = 4 * |F_{c2(i)}|; i = 1,2 \dots n_3; n_3 = \text{int} \left( \frac{n_1}{4} \right) \quad (17)$$

$$M_{o2(i)} = 4 * |F_{o2(i)}|; i = 1,2 \dots n_3; n_3 = \text{int} \left( \frac{n_1}{4} \right) \quad (18)$$

gdzie:  $M_{c1}, M_{o1}, M_{c2}, M_{o2}$  – wartości widma amplitudowego obliczone dla badanych części widm Fouriera i odpowiednio widma napięcia kondensatora, widma napięcia odbiornika rezystancyjno-indukcyjnego, widma natężenia prądu kondensatora i widma natężenia prądu dla odbiornika rezystancyjno-indukcyjnego;  
 $n_1$  – ilość próbek zarejestrowanych podczas testu symulacyjnego.

Występująca we wzorach (15),(16),(17) i (18) wartość  $n_3$  jest wynikiem zaokrąglenia do liczby całkowitej wyniku ilorazu wartości  $n_1$  przez 4 lub przez 8. Jeżeli otrzymana reszta z tego ilorazu czyli część ułamkowa jest mniejsza od wartości 0.5 to wynikiem zaokrąglenia jest otrzymana liczba całkowita tego ilorazu, w przeciwnym wypadku wynikiem zaokrąglenia będzie liczba całkowita większa o wartość 1 niż otrzymana z ilorazu liczba całkowita.

Obliczone widma amplitudowe zostały przeskalowane w dziedzinie częstotliwości. W tym celu utworzono odpowiednio przeskalowane macierze częstotliwości oraz przeprowadzono obliczenia dla widm amplitudowych w skali logarytmicznej i w odniesieniu do ich wartości średnich za pomocą następujących zależności:

$$M_{a1(i)} = 20 \log \frac{M_{c1(i)}}{m_{c1}}; i = 1,2 \dots n_3; n_3 = \text{int} \left( \frac{n_1}{8} \right) \quad (19)$$

$$M_{a2(i)} = 20 \log \frac{M_{o1(i)}}{m_{o1}}; i = 1,2 \dots n_3; n_3 = \text{int} \left( \frac{n_1}{8} \right) \quad (20)$$

$$M_{a3(i)} = 20 \log \frac{M_{c2(i)}}{m_{c2}}; i = 1,2 \dots n_3; n_3 = \text{int} \left( \frac{n_1}{4} \right) \quad (21)$$

$$M_{a4(i)} = 20 \log \frac{M_{o2(i)}}{m_{o2}}; i = 1,2 \dots n_3; n_3 = \text{int} \left( \frac{n_1}{4} \right) \quad (22)$$

gdzie:  $M_{a1}, M_{a2}, M_{a3}, M_{a4}$  – wartości widma amplitudowego obliczone w skali logarytmicznej i odpowiednio widma napięcia kondensatora, widma napięcia odbiornika rezystancyjno-indukcyjnego, widma natężenia prądu kondensatora i widma natężenia prądu dla odbiornika rezystancyjno-indukcyjnego;  
 $m_{c1}, m_{o1}, m_{c2}, m_{o2}$  – wartości średnie widma amplitudowego i obliczone odpowiednio dla widma napięcia kondensatora, widma napięcia odbiornika rezystancyjno-indukcyjnego, widma natężenia prądu kondensatora i widma natężenia prądu dla odbiornika rezystancyjno-indukcyjnego;  
 $n_1$  – ilość próbek zarejestrowanych podczas testu symulacyjnego.

Wartości średnie widm amplitudowych obliczone na podstawie poniższych zależności:

$$m_{c1(i)} = \frac{\sum_{i=1}^{n_3} M_{c1(i)}}{n_3}; i = 1,2 \dots n_3; n_3 = \text{int} \left( \frac{n_1}{8} \right) \quad (23)$$

$$m_{o1(i)} = \frac{\sum_{i=1}^{n_3} M_{o1(i)}}{n_3}; i = 1,2 \dots n_3; n_3 = \text{int} \left( \frac{n_1}{8} \right) \quad (24)$$

$$m_{c2(i)} = \frac{\sum_{i=1}^{n_3} M_{c2(i)}}{n_3}; i = 1,2 \dots n_3; n_3 = \text{int} \left( \frac{n_1}{4} \right) \quad (25)$$

$$m_{o2(i)} = \frac{\sum_{i=1}^{n_3} M_{o2(i)}}{n_3}; i = 1, 2 \dots n_3; n_3 = \text{int}\left(\frac{n_1}{4}\right) \quad (26)$$

W celu utworzenia macierzy częstotliwości dla analizowanych widm amplitudowych obliczonych w skali logarytmicznych konieczne było obliczenie macierzy częstotliwości pełnego widma  $F_1$ . Wszystkie działania przeprowadzono przy wykorzystaniu następujących zależności:

$$F_{1(i)} = i * \left(\frac{1}{n_1 * a_4}\right) i = 1, 2 \dots n_1 \quad (27)$$

$$F_{2(i)} = F_{1(i)}; i = 1, 2 \dots n_3; n_3 = \text{int}\left(\frac{n_1}{8}\right) \quad (28)$$

$$F_{3(i)} = F_{1(i)}; i = 1, 2 \dots n_3; n_3 = \text{int}\left(\frac{n_1}{4}\right) \quad (29)$$

gdzie:  $F_2$  – wartości macierzy częstotliwości obliczone dla analizowanego widma amplitudowego napięcia kondensatora i napięcia odbiornika rezystancyjno-indukcyjnego przy wykorzystaniu macierzy częstotliwości pełnego widma  $F_1$ ;

$F_3$  – wartości macierzy częstotliwości obliczone dla analizowanego widma amplitudowego natężenia prądu kondensatora i natężenia prądu odbiornika rezystancyjno-indukcyjnego przy wykorzystaniu macierzy częstotliwości pełnego widma  $F_1$ ;

$$a_4 = \frac{1}{10000};$$

$n_1$  – ilość próbek zarejestrowanych podczas testu symulacyjnego.

W celu lepszej wizualizacji niektórych analizowanych widm amplitudowych zastosowano skalowanie tych widm w dziedzinie częstotliwości. W ten sposób wybrano odpowiednią liczbę zarejestrowanych próbek i proces wybierania tych próbek rozpoczęto od pierwszej zarejestrowanej próbki podczas testu symulacyjnego do wartości określonej za pomocą częstotliwości granicznej  $f_{g1}$  i  $f_{g2}$ . Dane te były również wybierane zawsze w tej samej kolejności i dla otrzymanych ich wartości znajdujących się w zakresie pomiędzy wartością zerową i uzyskaną wartością maksymalną dla widma amplitudowego badanego napięcia lub natężenia prądu stałego.

Opisaną wyżej metodę wizualizacji przebiegów widm amplitudowych zastosowano dla napięcia odbiornika rezystancyjno-indukcyjnego oraz natężenia prądu stałego kondensator i natężenia prądu dla odbiornika rezystancyjno-indukcyjnego.

Zatem częstotliwości graniczne widma  $f_{g1}$  i  $f_{g2}$  określono na podstawie wyznaczenia wartości maksymalnej częstotliwości pełnego analizowanego widma amplitudowego i stosownie według poniższych zależności:

$$f_{g1} = \max(F_{1(i)}) + 1; i = 2, 3 \dots n_3; n_3 = \text{int}\left(\frac{n_1}{8}\right) \quad (30)$$

$$f_{g2} = \max(F_{1(i)}) + 1; i = 2, 3 \dots n_3; n_3 = \text{int}\left(\frac{n_1}{4}\right) \quad (31)$$

gdzie:  $f_{g1}$  – częstotliwość graniczna określona dla analizowanego widma amplitudowego napięcia odbiornika rezystancyjno-indukcyjnego;

$f_{g2}$  – częstotliwość graniczna określona dla analizowanego widma amplitudowego natężenia prądu kondensatora i natężenia prądu odbiornika rezystancyjno-indukcyjnego;

$n_1$  – ilość próbek zarejestrowanych podczas testu symulacyjnego.

W pracy zamieszczono na rysunkach wartości przebiegów analizowanych widm amplitudowych zarejestrowanych dla badanego napięcia odbiornika rezystancyjno-indukcyjnego i źródła napięcia  $M_{a5}$ , natężenia prądu kondensatora  $M_{a6}$  i natężenia prądu odbiornika rezystancyjno-indukcyjnego  $M_{a7}$  i które zostały wyznaczone za pomocą następujących zależności:

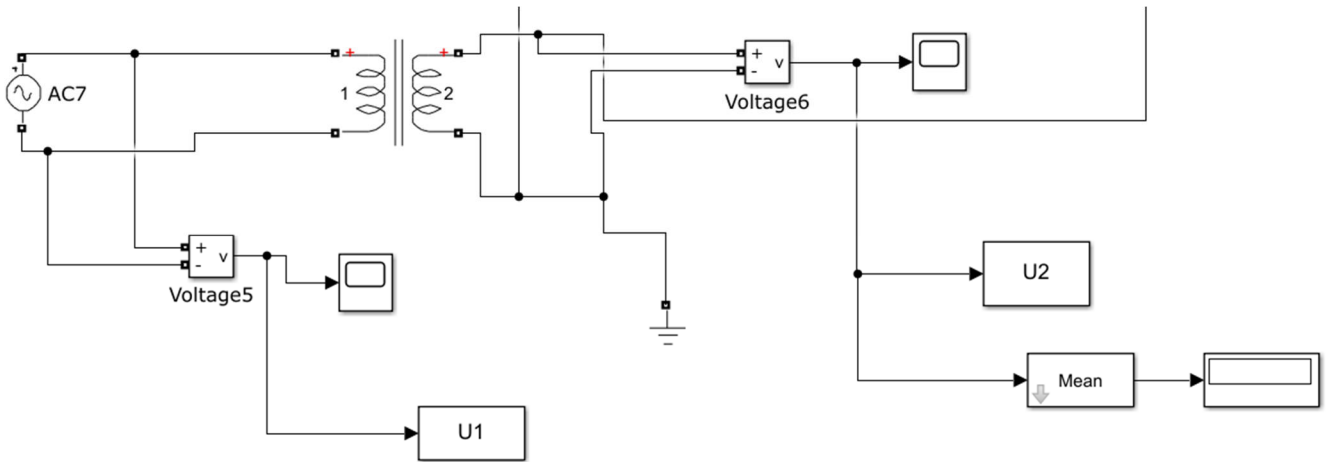
$$M_{a5(i)} = M_{a2(i)} \in [0, \max(M_{a2(i)})]; i = 1, 2 \dots n_3; n_3 = \text{int}\left(\frac{n_1}{8}\right) \quad (32)$$

$$M_{a6(i)} = M_{a3(i)} \in [0, \max(M_{a3(i)})]; i = 1, 2 \dots n_3; n_3 = \text{int}\left(\frac{n_1}{4}\right) \quad (33)$$

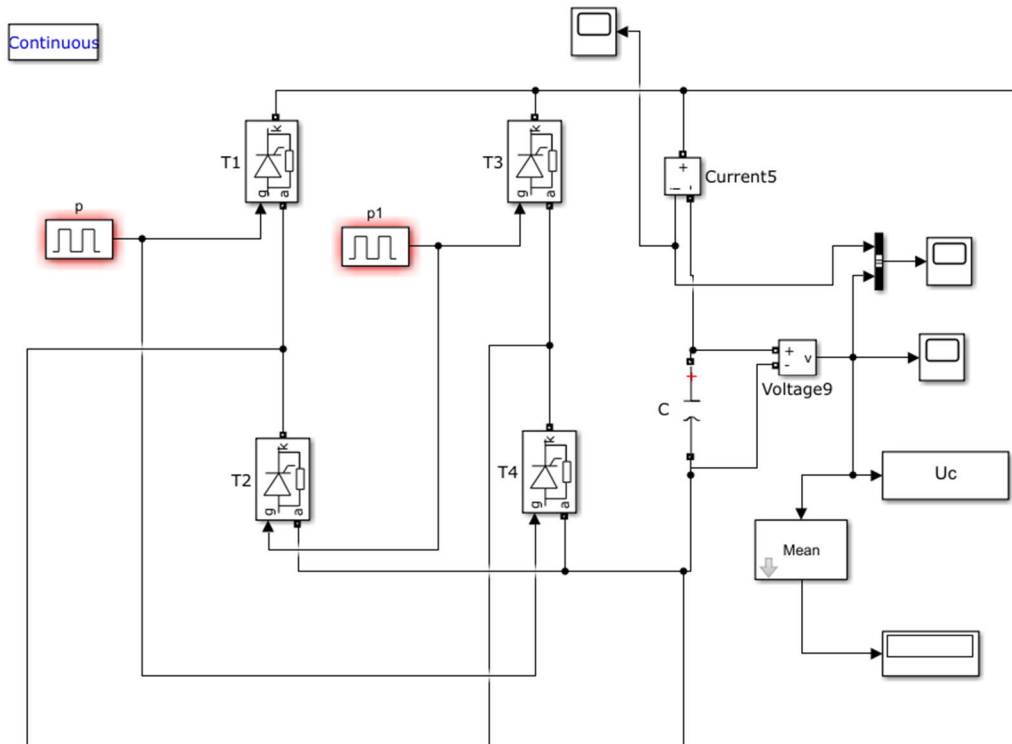
$$M_{a7(i)} = M_{a4(i)} \in [0, \max(M_{a4(i)})]; i = 1, 2 \dots n_3; n_3 = \text{int}\left(\frac{n_1}{4}\right) \quad (34)$$

Gdzie:  $M_{a2}, M_{a3}, M_{a4}$  – wartości widma amplitudowego obliczone w skali logarytmicznej i odpowiednio widma napięcia odbiornika rezystancyjno-indukcyjnego, widma natężenia prądu kondensatora i widma natężenia prądu dla odbiornika rezystancyjno-indukcyjnego;  
 $n_1$  – ilość próbek zarejestrowanych podczas testu symulacyjnego.

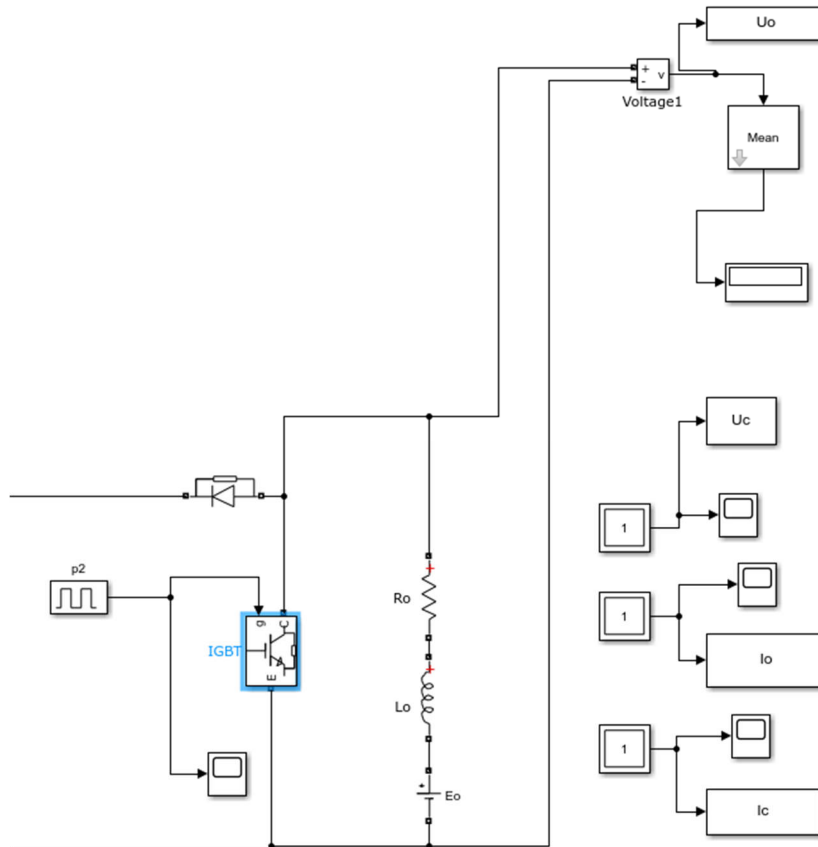
Na zamieszczonych poniżej rysunkach 1, 2 i 3 przedstawiono zrzuty ekranu przedstawiające widok schematu blokowego dla działającej aplikacji utworzonej w środowisku Matlab/Simulink i zastosowanej dla przeprowadzonych analiz badanych przebiegów napięć i natężeń prądu stałego.



**Rysunek 1.** Widok schematu blokowego transformatora jednofazowego utworzonego w środowisku Matlab/Simulink i zastosowanego do zasilania prostownika tyrystorowego oraz przeprowadzenia testów symulacyjnych dla badanych przebiegów napięć i natężeń prądu stałego



**Rysunek 2.** Widok schematu blokowego prostownika jednofazowego tyrystorowego utworzonego w środowisku Matlab/Simulink i zastosowanego do przeprowadzenia testów symulacyjnych dla badanych przebiegów napięć i natężeń prądu stałego



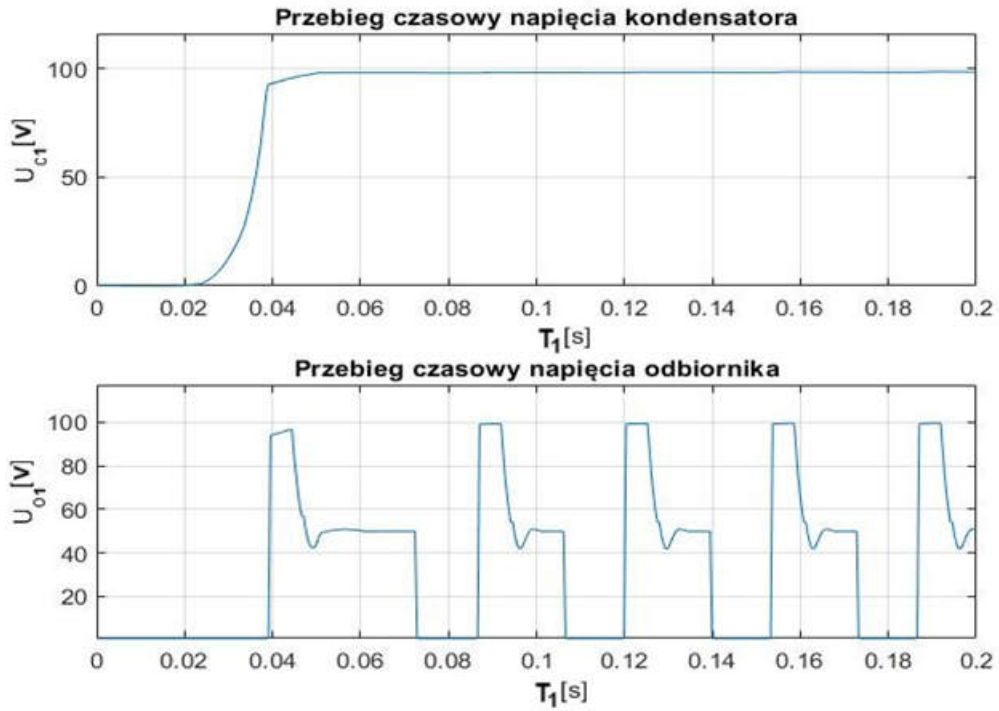
**Rysunek 3.** Widok schematu blokowego regulatora *impulsowego* prądu stałego i obciążenia rezystancyjno-indukcyjnego w raz ze źródłem napięcia utworzonego w środowisku Matlab/Simulink i zastosowanego do przeprowadzenia testów symulacyjnych dla badanych przebiegów napięć i natężeń prądu stałego

### 3. Wyniki badań

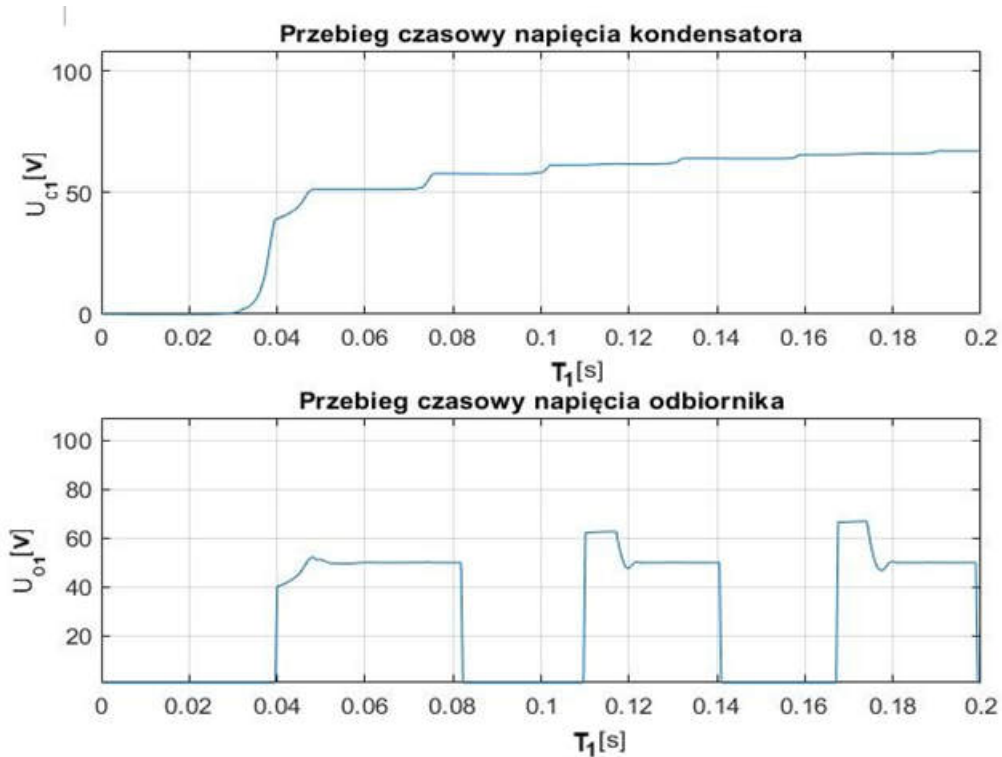
Na zamieszczonych poniżej rysunkach 4 i 6 przedstawiono w celu porównania zarejestrowane przebiegi czasowe analizowanych przebiegów napięcia kondensatora dołączonego równolegle do wyjścia prostownika jednofazowego tyrystorowego i napięcia na odbiorniku rezystancyjno-indukcyjnym i źródle napięcia oraz otrzymane przebiegi czasowe natężenia prądu stałego dla omawianego kondensatora i odbiornika rezystancyjno-indukcyjnego.

Na zamieszczonych poniżej rysunkach 5 i 7 przedstawiono przebiegi otrzymanych wybranych widm amplitudowych Fouriera w celu monitoringu zmian jego wartości współczynników przeskalowanych w dziedzinie częstotliwości przy różnych zmianach rezystancji odbiornika  $R_o$  i źródła napięcia oraz kąta załączenia tyrystorów  $\alpha_z$ .

a)



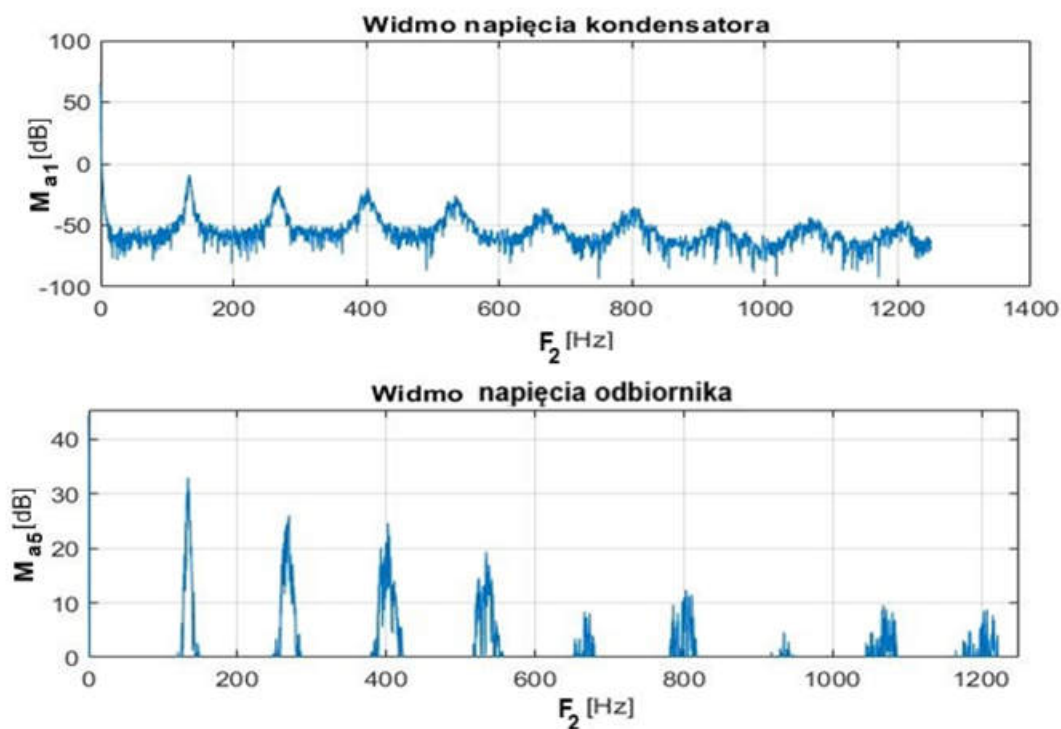
b)



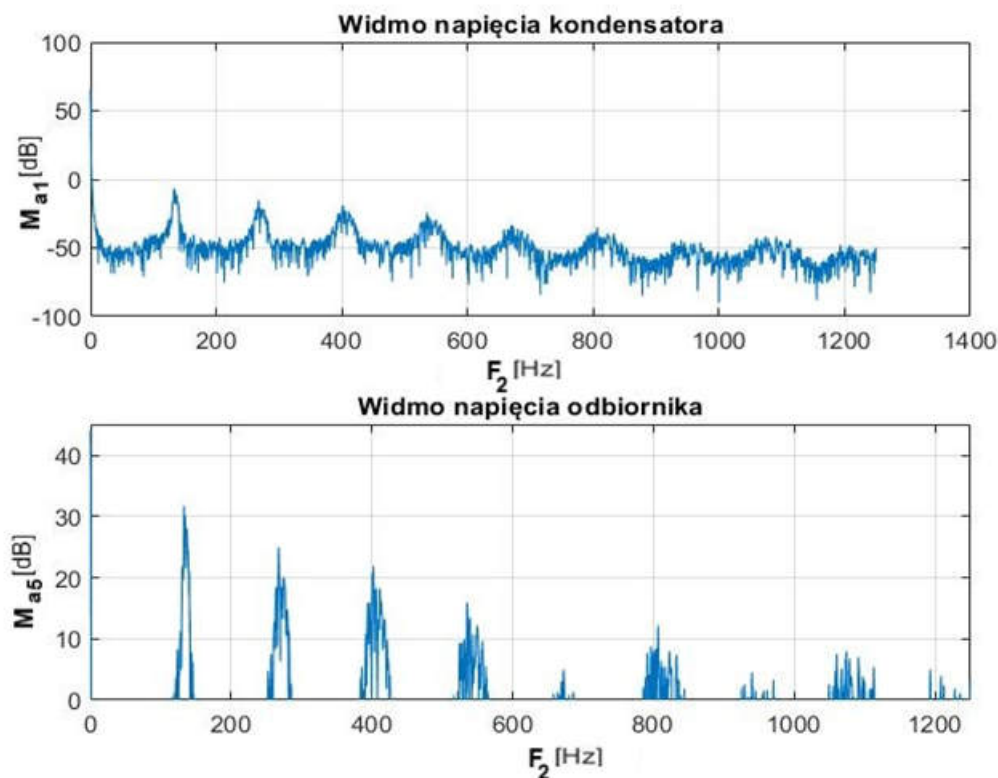
**Rysunek 4.** Przebiegi czasowe analizowanych napięć stałych zarejestrowanych :a) dla kąta załączenia tyrystorów prostownika jednofazowego  $\alpha_z = 10^\circ$  i amplitudy źródła napięcia = 50[V] oraz  $R_o = 200[\Omega]$ , b) dla kąta załączenia tyrystorów prostownika jednofazowego  $\alpha_z = 90^\circ$  i amplitudy źródła napięcia = 50[V] oraz  $R_o = 200[\Omega]$



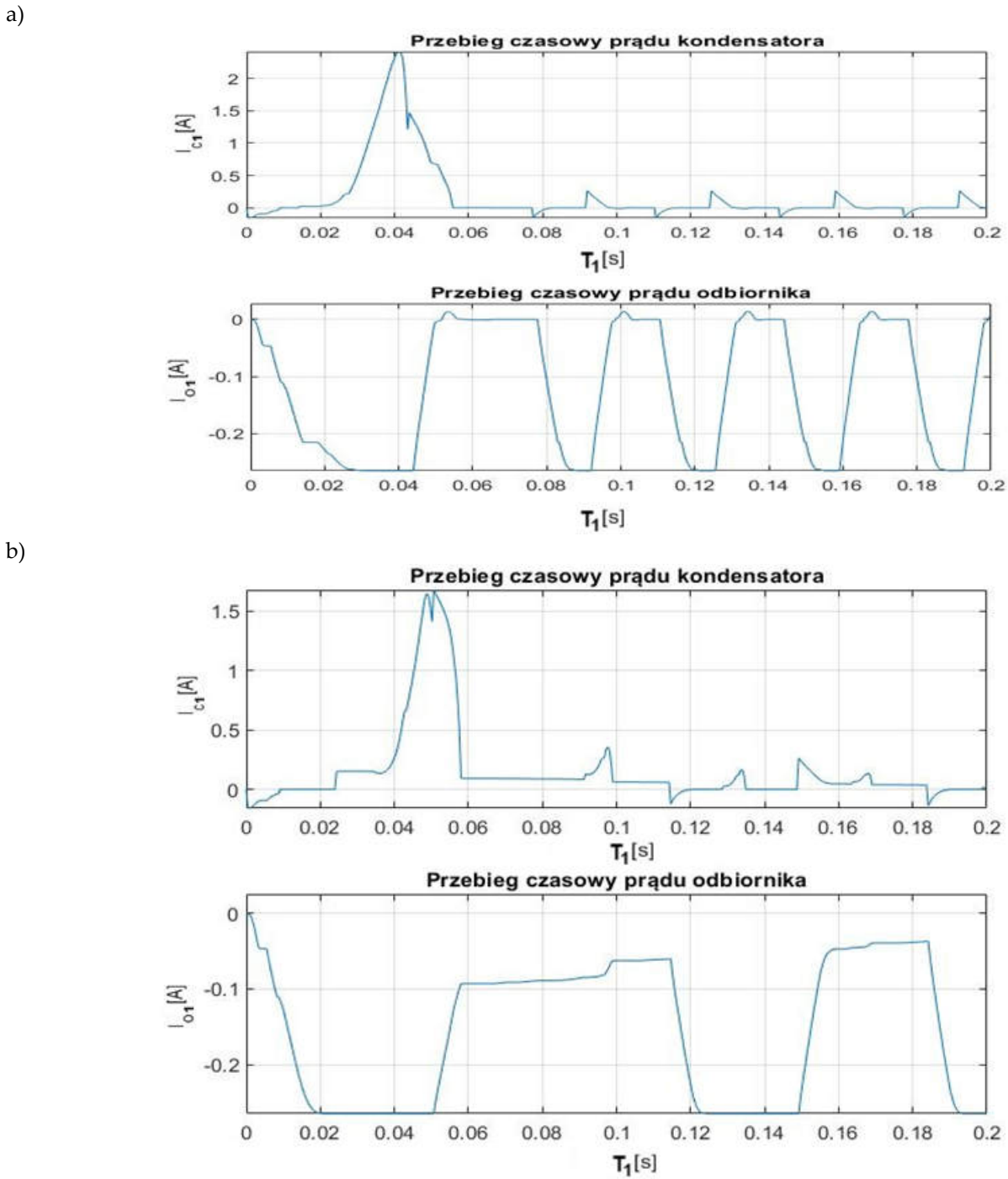
a)



b)

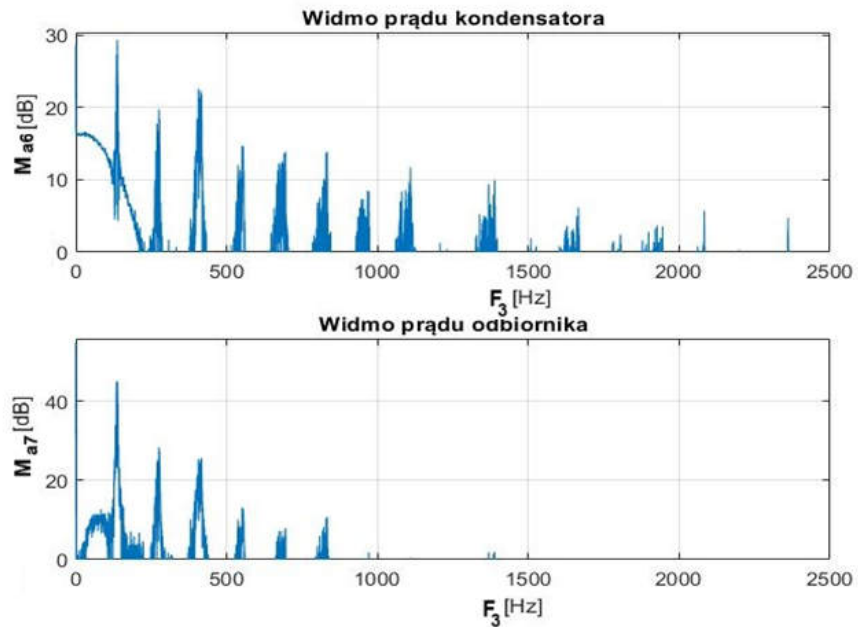


**Rysunek 5.** Widmo amplitudy Fouriera analizowanych napięć stałych zarejestrowanych za pomocą okna czasowego Hanninga: a) dla kąta załączenia tyrystorów prostownika jednofazowego  $\alpha_z = 10^\circ$  i amplitudy źródła napięcia = 50[V] oraz  $R_o = 200[\Omega]$ , b) dla kąta załączenia tyrystorów prostownika jednofazowego  $\alpha_z = 90^\circ$  i amplitudy źródła napięcia = 50[V] oraz  $R_o = 200[\Omega]$

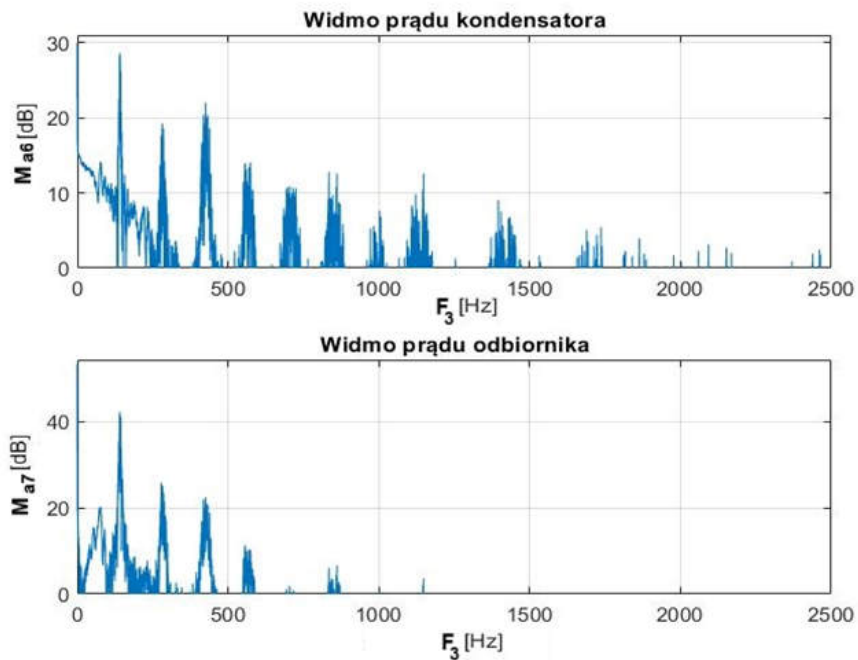


**Rysunek 6.** Przebiegi czasowe analizowanych natężeń prądu stałego zarejestrowanych :a) dla kąta załączenia tyrystorów prostownika jednofazowego  $\alpha_z = 10^\circ$  i amplitudy źródła napięcia = 80[V] oraz  $R_o = 300[\Omega]$ , b) dla kąta załączenia tyrystorów prostownika jednofazowego  $\alpha_z = 90^\circ$  i amplitudy źródła napięcia = 80[V] oraz  $R_o = 300[\Omega]$

a)



b)



**Rysunek 7.** Przebieg widma amplitudy Fouriera analizowanych natężeń prądu stałego zarejestrowanych za pomocą okna czasowego Kaisera: a) dla kąta załączenia tyrystorów prostownika jednofazowego  $\alpha_z = 10^\circ$  i amplitudy źródła napięcia = 80[V] oraz  $R_o = 300[\Omega]$ , b) dla kąta załączenia tyrystorów prostownika jednofazowego  $\alpha_z = 90^\circ$  i amplitudy źródła napięcia = 80[V] oraz  $R_o = 300[\Omega]$

Na podstawie zamieszczonych przebiegów na rysunkach 5 i 7 można stwierdzić, że wyniki analizy badanych tych samych przebiegów napięcia stałego i natężenia prądu stałego zawierające części widma Fouriera przeskalowane w dziedzinie częstotliwości i odniesione do wartości średniej badanego widma Fouriera przedstawiają wyraźne zmiany przy zmianach parametrów takich jak rezystancja odbiornika  $R_o$ , amplituda źródła napięcia i kąt załączenia tyrystorów  $\alpha_z$ .

Ponadto można zaobserwować, że zmieniając okna czasowe w celu zrealizowania filtracji przebiegów czasowych badanych sygnałów przy analizie przeprowadzonej za pomocą szybkiej transformaty Fouriera uzyskuje się widoczne różnice w kształcie i amplitudzie analizowanych przebiegów.

#### 4. Wnioski

Zaprezentowany przykład działania regulatora impulsowego prądu stałego umożliwiającego zwrot energii elektrycznej z odbiornika rezystancyjno-indukcyjnego i źródła napięcia do źródła zasilania zawierał metodę umożliwiającą wykrywanie zmian współczynników szybkiej transformaty Fouriera dla badanych przebiegów napięć i natężeń prądu stałego i obliczonych w wyniku odpowiednich zmian wartości kąta załączenia tyrystorów  $\alpha_z$  w zastosowanym prostowniku jednofazowym, rezystancji odbiornika i wartości amplitudy źródła napięcia stałego połączonego szeregowo z tym odbiornikiem.

Proces wykrywania zmian różnych przebiegów napięcia i natężenia prądu stałego został zrealizowany za pomocą przedstawienia uzyskanych różnych części widma obliczonych w wyniku przeprowadzenia skalowania współczynników szybkiej transformaty Fouriera w dziedzinie częstotliwości oraz odniesieniu amplitudy widma Fouriera badanego sygnału do jego wartości średniej.

Efektywność analizy sygnałów niestacjonarnych przebiegów badanych sygnałów elektrycznych uzyskanych za pomocą obliczania współczynników szybkiej transformaty Fouriera w zauważalny sposób zwiększa zastosowanie filtracji przebiegów czasowych i zrealizowane za pomocą zastosowania odpowiednich okien czasowych. Przeprowadzenie badań symulacyjnych potwierdziło działanie zaproponowanej metodyki wykrywania zmian dla rezystancji odbiornika i amplitudy źródła napięcia w wyniku zastosowania zwiększania wartości kąta załączenia tyrystorów  $\alpha_z$  w prostowniku jednofazowym.

Na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych można zauważyć, że zapewnienie odpowiednich zakresów zmian parametrów odbiornika energii elektrycznej i prostownika jednofazowego tyrystorowego umożliwia uzyskanie dużej efektywności procesu identyfikacji zmian badanych wartości średnich napięcia i natężenia prądu stałego.

#### Literatura

1. Ali N., Sulaiman H. An application of Fourier transform through Matlab in classifying tempos. Proceedings of the International Conference On Mathematical Sciences And Technology 2020 (Mathtech 2020), Penang, Malaysia, December 2020; AIP Conference Proceedings 2021, Vol. 2423(1), 060001, doi: <https://doi.org/10.1063/5.0075318>.
2. Benova M., Dobrucky B., Šedo J., Prazenica M., Koňarik R., Šimko J., Kuchař M. A Novel Approach to Transient Fourier Analysis for Electrical Engineering Applications. Applied Sciences 2024, Vol. 14(21), 9888, doi: <https://doi.org/10.3390/app14219888>.
3. Fan S. Visual analysis of electrical signals. International Conference on Advances in Optics and Computational Sciences (ICAOCS), Ottawa, Canada, January 2021; Journal of Physics: Conference Series 2021, Vol. 1865(2), 022060, doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1865/2/022060>.
4. Fathurohman A., Zarkasih Nur A. Analysis And Wave Visualization of Electrical Circuits Using Fourier Series with Matlab. Jurnal Pendidikan Fisika Dan Keilmuan (JPFK) 2022, Vol. 8(1), pp. 179-190, doi: <https://doi.org/10.25273/jpfk.v8i1.13654>.
5. Hachimenum N.A., Kingsley O.U., Kornom D.M. Modeling of Electrical Cable Parameters and Fault Detection using Fourier Series. Journal of Recent Trends in Electrical Power System 2024, Vol. 7, pp. 44-56, doi: <https://zenodo.org/records/11096455>.
6. Kandel S., Dangi R., Parajuli V., Sen V., Jha R.K. Analysis and Detection of Power System Network Faults with Wavelet Transform. Journal of Electronics and Informatics 2023, Vol. 5(3), pp. 272-289, doi: <https://doi.org/10.36548/jei.2023.3.003>.
7. Pylarinos D., Androulidakis, I., Siderakis K., Drakakis E. A MATLAB/SIMULINK approach for a first course in power electronics. Journal of Engineering Science and Technology Review 2016, Vol. 9(5), pp. 56-60, doi: <https://doi.org/10.25103/jestr.095.07>.
8. Tomczyk M., Plichta A., Mikulski M. Application of image analysis to the identification of mass inertia momentum in electromechanical system with changeable backlash zone. Applied Computer Science 2019, Vol. 15(3), pp. 87-102, doi: <https://doi.org/10.35784/acs-2019-24>.