

Podsystemy projektowe

- ✓ zasilanie: transformator trójfazowy Y/Y, przesunięcie godzinowe 0h;
- ✓ prostowanie: prostownik rewersyjny 3T;
- ✓ odbieranie mocy:
 - a) RL,
 - b) RLE,
 - c) OSPA;
- ✓ sterowanie:
 - a) sprzężenie prądowe z regulatorem typu PI,
 - b) sprzężenie napięciowe z filtrem i regulatorem PI,
 - c) sprzężenie prędkościowe z regulatorem typu PI.

Znamionowe parametry odbiorników

- a) RL: $R = 2.581\Omega, L = 0.028H$.
- b) RLE: $R = 2.581\Omega, L = 0.028H, E = 0...400V$.
- c) SPS: tabliczka znamionowa parametry konstrukcyjne

$P_n = 2.2kW$,	$R_t = 2.581\Omega$,
$U_n = 230V$,	$L_t = 0.028H$,
$I_n = 10.808A$,	$R_w = 230\Omega$,
$U_{wn} = 230V$,	$L_w = 1H$,
$I_{wn} = 1A$,	$J = 0.03432N \cdot m$.
$M_n = 14.385N \cdot m$,	
$n_n = 1450 \text{ min}^{-1}$.	

Podsystem zasilania i prostowania

Informacje, dotyczące transformatora

Transformator w energoelektronicznych systemach prostownikowych spełnia następujące funkcje:

- ✓ dopasowania wartości napięcia sieci zasilającej oraz ich fazę do potrzeb układu tyrystorowego i wymagań odbiornika;
- ✓ izolowania galwanicznego jako dodatkowego środka ochrony przeciwporażeniowej;
- ✓ tłumienia zakłóceń, pochodzących jak z sieci zasilającej (np. na skutek wszelkiego rodzaju procesów łączeniowych, atmosferycznego oddziaływania) i rozprzestrzeniających się w kierunku prostownika, tak i z układu przekształtnikowego (np. komutacyjne załamania napięcia, generacja wyższych harmonicznnych) rozprzestrzeniających się w kierunku sieci.

Negatywną cechą, różniącą współpracę transformatora ze skojarzeniem uzwojeń w Y/Y z prostownikiem 3-pulsowym jest fakt obecności w jego strumieniu jarzmowym, zamykającym się przez obudowę transformatora składowych stałej i przemiennej. Działalność pierwszej odzwierciedla się w przesunięciu punktu pracy transformatora i tym samym zmniejszeniu możliwości wykorzystania jego rdzenia. Wynikiem pracy drugiej, z kolei, jest podgrzewanie obudowy prądami wyższych harmonicznnych, co negatywnie wpływa nie tylko na czas „życia” elementów izolacyjnych transformatora, ale również i na wartość całkowitej rezystancji jego uzwojeń.

Jak wiadomo, wraz ze zmianą kąta wysterowania tyrystorów przekształtnika, zmienia się kąt przesunięcia fazowego pomiędzy pierwszą harmoniczną jego prądu a napięciem zasilającym.

Wynika stąd i przepływ mocy biernej indukcyjnej, wywołując spadki napięcia na elementach reaktancyjnych sieci. Temu, projektując tego typu układy prostownikowe, należy w taki sposób dobierać wartość napięcia wtórnego (przekładni), ażeby uzyskać możliwość długotrwałego obciążenia znamionowego przy możliwie minimalnych katachysterowania.

Informacje, dotyczące tyrystorów

Tyrystory – energoelektroniczne klucze mocy, służące do uzyskania możliwości sterowania układami o znacznej energii z-pod poziomu niskomocowych systemów. Podstawowe parametry decydujące o wyborze tego czy innego typu tyrystora:

- ✓ dopuszczalne obciążenie prądowe (dobór prądowy i termiczny);
- ✓ właściwości dynamiczne (dobór na krytyczne stromości narastania prądu przewodzenia, napięcia blokowania oraz czasy załączania i wyłączania);
- ✓ maksymalne napięcie (dobór napięciowy).

Dobór prądowy tyrystorów przeprowadza się wykonując obliczenia parametrów termicznych na podstawie właściwości cieplnych struktury złączowej i elementu odprowadzającego ciepło. Obliczenia wykonywane są w 2 etapy:

I. Całkowitą średnią wartość strat mocy ΔP_{sr} , wydzielonej na złączu półprzewodnikowym w chwili przerywania przepływu prądu obliczamy przy znajomości poszczególnych jej składników:

- ΔP_T – straty mocy w czasie przewodzenia;
- ΔP_D – straty mocy w czasie blokowania;
- ΔP_Z – straty mocy w czasie załączania;
- ΔP_W – straty mocy w czasie wyłączania;
- ΔP_G – straty mocy w obwodzie bramki.

$$\Delta P_{sr} = \Delta P_T + \Delta P_D + \Delta P_Z + \Delta P_W + \Delta P_G$$

II. Maksymalną temperaturę T_{jM} , która może wystąpić w strukturze złączowej obliczamy na podstawie znajomości poszczególnych rezystancji termicznych oraz temperatury otoczenia:

- R_{thj-c} – rezystancja termiczna „półprzewodnik”-obudowa;
- R_{thc-r} – rezystancja termiczna obudowa-radiator;
- R_{thr-a} – rezystancja termiczna radiator-otoczenie;
- R_{thj-a} – rezystancja termiczna „półprzewodnik”-otoczenie;
- T_a – temperatura otoczenia.

$$R_{thj-a} = R_{thj-c} + R_{thc-r} + R_{thr-a}$$

$$T_{jM} = T_a + R_{thj-a} \cdot \Delta P_{sr}$$

III. Właściwy dobór tyrystorów jest spełniony przy $T_{jM \text{dop}} \geq T_{jM}$, przy czym $T_{jM \text{dop}}$ – maksymalna dopuszczalna temperatura pracy struktury półprzewodnikowej.

Dobór napięciowy tyrystorów wykonuje się na podstawie znajomości maksymalnego napięcia, które może pojawić się podczas jego pracy i znajomości poniższych warunków:

$$U_{DRM} \geq (1.5 \div 2.5) \cdot U_M$$

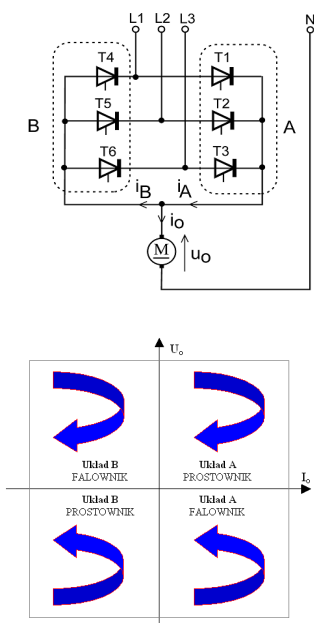
$$U_{RRM} \geq (1.5 \div 2.5) \cdot U_M$$

U_{DRM} – powtarzalne szczytowe napięcie blokowania;

U_{RRM} – powtarzalne szczytowe napięcie wsteczne.

Informacje, dotyczące przekształtnikowego układu zasilania

Najczęściej, obecnie, stosowaną metodą regulacji prędkości obrotowej silników prądu stałego jest zastosowanie przekształtników tyrystorowych o komutacji sieciowej, gdyż umożliwiają płynną regulację napięcia i prądu. Są one wykorzystywane do zasilania obwodów twornikowych oraz, w układach dwustrefowej regulacji prędkości, do zasilania obwodów wzbudzenia. Napędy prądu stałego z przekształtnikami tyrystorowymi, przy zastosowaniu właściwego układu regulacji, umożliwiają uzyskanie płynnej zmiany prędkości i innych wymaganych wielkości jak np. momentu obrotowego. Układ regulacji umożliwia pożądane kształtowanie charakterystyk mechanicznych silnika, zapewniając przy odpowiednim sprzężeniu ich sztywność.



Przekształtnik nawrotny (rewersyjny) umożliwia praktycznie bezprzerwową (max. przerwa wynosi 5...50ms) zmianę kierunku przepływu energii i prądu. Zmiana ostatniego nie odbywa się poprzez przełączenie zacisków odbiornika (bezprądowy okres trwa min. 100ms) ale przez odpowiednie załączenie energoelektronicznych zaworów. Typowym zastosowaniem tego typu układów zasilających jest nawrotny napęd prądu stałego. Np. gdy wirnik maszyny wiruje w określonym kierunku, to w celu jego zahamowania należy przejść od pracy silnikowej do prądnicowej. Przy stałym wzbudzeniu oznacza to zmianę kierunku przepływu prądu twornika. Przekształtniki takie składa się z dwóch układów zaworowych połączonych przeciwsobnie i sterowanych symetrycznie, niesymetrycznie lub naprzemiennie (sterowanie rozdzielone), umożliwiając prawie bezprzerwową zmianę kierunku przepływu energii (stanowią czterokwadrantowe źródło napięcia $\pm U_o$ oraz $\pm I_o$). W przypadku sterowania symetrycznego przekształtniki składowe A i B pracują jednocześnie (jeden jako prostownik, zaś drugi – jako falownik) i wartości średnie napięcia generowanego są sobie równe ($U_o \cos \alpha = U_o \cos \beta$, przy

$\alpha = \beta$, α – kąt opóźnienia wysterowania tyrystorów przekształtnika A, β – kąt wyprzedzenia wysterowania tyrystorów przekształtnika B). Przy takim sposobie sterowania występują napięcia wyrównawcze między prostownikiem a falownikiem, będące różnicą chwilowych wartości napięć wyjściowych obu tych układów. Powodują one przepływ prądu wyrównawczego przez te układy zaworowe omijających odbiornik. Na skutek przepływu prądu wyrównawczego powstają dodatkowe straty mocy w transformatorze i przekształtniku oraz zwiększenie poboru mocy biernej z sieci zasilającej. W celu uniknięcia składowej stałej napięcia wyrównawczego, wprowadzającego przekształtnik rewersyjny w stan zwarcia, należy spełnić warunek $U_o \cos \alpha \geq U_o \cos \beta$, przy $\alpha \leq \beta$ (sterowanie niesymetryczne), a do ograniczenia wartości średniej prądów wyrównawczych zastosować tzw. dławiki wyrównawcze.

Podczas sterowania naprzemiennego nie występują prądy wyrównawcze, gdyż w stanie przewodzenia znajdują się tylko tyrystory jednego układu zaworowego, natomiast tyrystory drugiego układu są w stanie blokowania. Cechą charakterystyczną tego typu sterowania jest brak dławików wyrównawczych, natomiast obecność czujników przepływu prądu wyprostowanego (zazwyczaj wymagana minimalna czułość mieści się w granicach 0.1...0.5% I_n) oraz od kilkumilisekundowej do kilkudziesięciomilisekundowej, nieco większej od czasu trwania jednego pulsu prostownika, przerwy w przebiegu prądu odbiornika przy zmianie jego kierunku z uwagi na konieczność przełączania przewodzenia z jednego układu zaworowego na drugi w stanie bezprądowym, gdyż w przeciwnym przypadku nastąpiłby przewrót falownika – stan pracy awaryjnej, powstały na skutek, w ogólnym przypadku, braku zakończenia wymiany prądu między sąsiednimi tyrystorami w przedziale czasu leżącym na lewo od punktu komutacji naturalnej.

Podsystem analogowego sterowania

Podjęcie decyzji o wyborze regulatorów ze strukturą proporcjonalno-całkującą uwarunkowane charakterem jego pracy, a mianowicie działaniem forsującym, potrzebnym do kompensacji inercji ze względu na obecność dużych stałych czasowych obiektu regulacji (tą czynność wykonuje część proporcjonalna regulatora) oraz działaniem całkującym, pozwalającym minimalizować uchyb regulacji w stanie ustalonym (tą czynność wykonuje część całkująca regulatora).

Informacje, dotyczące regulatora prądu

Nastawy regulatora prądu przeprowadzane na podstawie kryterium optimum modułowego, polegającym na takim ich dobraniu, aby moduł układu zamkniętego $|G_z(s)| \approx 1$ w możliwie szerokim paśmie częstotliwości.

Dla obiektu o transmitancji $G_o(s) = K_o \frac{1}{1+sT_1} \prod_{i=2}^k \frac{1}{1+sT_i}$ wprowadza się transmitancję zastępczą

$G_o(s) = K_o \frac{1}{1+sT_1} \frac{1}{1+sT_v}$, przy czym T_1 – dominująca stała czasowa, $T_v = \sum_{i=2}^k T_i$ – suma małych

stałych czasowych, $T_1 \gg T_v$ i przy zastosowania regulatora o transmitancji $G_R(s) = K_R \frac{1+sT_R}{sT_R}$,

kryterium to określa $K_R = \frac{T_1}{2K_oT_v}$ oraz $T_R = T_1$. Transmitancja obwodu regulacji uzyskuje postać

$$G(s) = \frac{1}{1+sT_v+s^2 2T_v^2}.$$

W przypadku silnika obcowzbudnego prądu stałego bądź odbiornika RL (RLE) nastawy regulatora

są postaci $K_R = \frac{T_t R_t}{2k_i k_p \tau_p}$ oraz $T_R = T_t$ przy $\tau_p \ll T_t$, gdzie:

- ✓ $T_t = \frac{L_t}{R_t}$ – elektromagnetyczna stała czasowa obwodu twornika;
- ✓ k_i – współczynnik wzmocnienia układu pomiarowego prądu;
- ✓ $k_p = \frac{U_{uch-I}}{U_{sr-WY}}$ – współczynnik wzmocnienia przekształtnika;
- ✓ $\tau_p = \frac{T_{jednego-pulsu}}{2}$ – stała czasowa przekształtnika.

Dla:

$$T_t = \frac{0.028H}{2.581\Omega} = 10.849 \cdot 10^{-3} s$$

$$\tau_p = \frac{0.02s}{3 \cdot 2} = 3.33 \cdot 10^{-3} s$$

$$k_i = 1$$

$$k_p = \frac{99.95A}{10.34V} = 9.666 \frac{A}{V}$$

Mamy:

$$K_R = \frac{10.849 \cdot 10^{-3} s \cdot 2.581\Omega}{2 \cdot 9.666 \frac{A}{V} \cdot 3.33 \cdot 10^{-3} s} = 0.4345$$

$$T_R = 10.849 \cdot 10^{-3} s$$

Wartość współczynnika wzmocnienia przekształtnika k_p wyznaczona na podstawie przeprowadzonej próby skokowej jako stosunek średniej wartości uchybu prądu do uśrednionej

wartości napięcia wyjściowego w punkcie maksymalnego przeregulowania. Wstępne nastawy regulatora w czasie próby: $T_R = T_t = 10.849 \cdot 10^{-3} s$ oraz $k_R = 100$.

Informacje, dotyczące regulatora napięcia

Zastępcza transmitancja układu, powstałego na skutek szeregowego połączenia regulatora prądu typu PI, dostrojonego według optimum modułowego, przekształtnika oraz obiektu sterowania w postaci odbiornika RL, RLE, OSPA jest transmitancją członu inercyjnego I rzędu o wartości inercji, odpowiadającej częstości impulsowania przekształtnika.

➤ *Odbiornik RL, RLE*

Obiekt regulacji nie zawiera wyróżnionej dużej stałej czasowej. Stanisław Bielawski w swojej książce „Teoria napędu elektrycznego” mówi, że w tym przypadku należy zastosować regulator typu I nastawiany według optimum modułowego. Jednak nie uwzględniono zaleceń autora, gdyż symulacje, przeprowadzone w pakiecie SIMULINK programu MATLAB, wykazują iż stosując regulator typu PI, parametry którego dobrane na podstawie powyższego kryterium, uzyskuje się ulepszoną jakość regulacji (zdecydowanie mniejsze przeregulowanie i czas dojścia do stanu ustalonego).

Dla obiektu i regulatora o transmitancjach odpowiednio $G_o(s) = \frac{K_o}{1 + sT_v}$ oraz $G_R(s) = K_R \frac{1 + sT_R}{sT_R}$,

kryterium to określa $K_R = \frac{1}{K_o}$ oraz $T_R = T_v$.

Dla:

$$K_o = 1$$

$$T_v = 2\tau_p$$

Mamy:

$$K_R = 1$$

$$T_R = 6.67 \cdot 10^{-3} s$$

➤ *Odbiornik OSPA*

Nastawy regulatora napięcia są obliczane w ten sam sposób jak i regulatora prędkości. Sygnał do sprzężenia zwrotnego jest brany z czujnika pomiarowego napięcia, następnie jest filtrowany i w odpowiedni sposób konwertowany do sygnału prędkości. Przy tym sposobie regulacji wykorzystuje się zależność $\omega = \frac{U_t - R_t I_t}{k\Phi}$ i zakładając, że $k\Phi = \text{const}$, $R_t I_t \approx 0$, mamy $\omega \sim U_t$.

Zastąpienie regulatora prędkości przez regulator napięcia umożliwia uzyskanie sztywnych charakterystyk mechanicznych dla prędkości z okolicy prędkości biegu jałowego i nieco mniejszych takich, przy których spadek napięcia na rezystancji twornika jest pomijalnie mały. Natomiast, przy znaczącym obciążeniu silnika, spadek napięcia na tej rezystancji staje się coraz bardziej decydującym i prowadzi do pogorszenia sztywności charakterystyk napędu. W celu eliminacji jego negatywnych skutków i uzyskania sztywnych charakterystyk mechanicznych konieczne jest wprowadzenia w układ sterowania dodatkowego członu kompensacyjnego.

Informacje, dotyczące regulatora prędkości

Nastawy regulatora napięcia określone na podstawie kryterium optimum symetrycznego, polegającym na takim ich dobraniu, aby transmitancja układu zamkniętego $G_z(s)$ spełniała warunki symetrii:

$$\begin{cases} G_z(s2T_v) \cdot G_z\left(\frac{1}{s2T_v}\right) = 1, \\ G_z(s2T_v) + G_z\left(\frac{1}{s2T_v}\right) = 1; \end{cases}$$

Dla obiektu i regulatora o transmitancjach odpowiednio $G_o(s) = K_o \frac{1}{sT_s} \frac{1}{1+sT_v}$ oraz

$$G_R(s) = K_R \frac{1+sT_R}{sT_R}, \text{ przy czym } T_s - \text{stała całkowania, kryterium to określa } K_R = \frac{T_s}{2K_oT_v}, T_R = 4T_v.$$

Transmitancja obwodu regulacji uzyskuje postać $G(s) = \frac{1+4T_v}{1+s4T_v+s^28T_v^2+s^38T_v^3}.$

W przypadku silnika obcowzbudnego prądu stałego nastawy regulatora są postaci $K_R = \frac{k\Phi T_m k_i}{4R_i k_{TG} \tau_p}$

oraz $T_R = 8\tau_p$, gdzie:

- ✓ $T_m = \frac{JR_i}{(k\Phi)^2}$ – elektromechaniczna stała czasowa silnika;
- ✓ J – moment bezwładności silnika;
- ✓ k_{TG} – współczynnik wzmocnienia układu pomiarowego prędkości.
- ✓ $k\Phi = \frac{U_n - R_i I_n}{\frac{\pi}{30} n_n}$ – iloczyn stałych konstrukcyjnych, stałej momentu oraz strumienia wzbudzenia silnika.

Dla:

$$k_{TG} = 1$$

$$k\Phi_n = \frac{230V - 2.581\Omega \cdot 10.808A}{\frac{\pi}{30} 1450 \text{ min}^{-1}} = 1.331 \frac{V \cdot s}{rad}$$

$$T_m = \frac{0.03432 N \cdot m \cdot 2.581\Omega}{\left(1.331 \frac{V \cdot s}{rad}\right)^2} = 50 \cdot 10^{-3} s$$

Mamy:

$$K_R = \frac{1.331 \frac{V \cdot s}{rad} \cdot 50 \cdot 10^{-3} s}{4 \cdot 2.581\Omega \cdot 3.33 \cdot 10^{-3}} = 1.9338$$

$$T_R = 8 \cdot 3.33 \cdot 10^{-3} s = 26.64 \cdot 10^{-3} s$$

Podsystem logicznego sterowania

Informacje, dotyczące blokady prądów wyrównawczych

Aby zapewnić jeden z warunków poprawnej pracy przekształtnika rewersyjnego bez prądów wyrównawczych konieczne jest stosowanie logicznego podsystemu sterowania zwanego blokadą, działanie której sprowadza się do zablokowania grupy zaworowej, nie biorącej w danej chwili udziału w przewodzeniu prądu odbiornika poprzez odcięcie impulsów wyzwalających tyrystory. Podjęcie decyzji o wyborze grupy przekształtnikowej, która musi znaleźć się w stanie aktywnym (wysterowania) bądź pasywnym (blokowania) następuje po sprawdzeniu kilku warunków:

- ✓ w przypadku, gdy jeden z dwóch układów zaworowych przewodzi prąd, wtedy drugi (przeciwny) nie może być wysterowany;
- ✓ przy zmianie znaku wielkości zadanej powinno następować przełączanie obwodu przewodzenia z jednego układu prostownikowego na drugi;

- ✓ zablokowanie impulsów wyzwalających tyrystory nie może nastąpić zanim prąd nie zmaleje do zera.

W rozwiązaniach praktycznych mają miejsce kilka sposobów realizacji układu blokady różniących się rodzajem sygnałów wejściowych:

- ✓ blokada, reagująca na obecność prądu obu grup zaworowych i znak prądu zadanego;
- ✓ blokada, reagująca na obecność prądu obciążenia oraz relacji między znakiem prądu zadanego i aktualnym stanem blokady;
- ✓ blokada, reagująca tylko na obecność prądu w obu grupach prostownikowych.

Z uwagi na prostą i przejrzystą strukturę rozwiązania pierwszego, wykorzystano go sterowania przekształtnikiem rewersyjnym.

DEC	BIN			LOG	
—	I_B^L	I_A^L	I_Z^L	Y_B	Y_A
0	0	0	0	0	1
1	0	0	1	1	0
2	0	1	0	1	0
3	0	1	1	1	0
4	1	0	0	0	1
5	1	0	1	0	1
6	1	1	0	1	1
7	1	1	1	1	1

$$I_A^L = \begin{cases} 0 \rightarrow I_A = 0, \\ 1 \rightarrow I_A = I_O; \end{cases}$$

postać logiczna prądu I_A w grupie A.

$$I_B^L = \begin{cases} 0 \rightarrow I_B = 0, \\ 1 \rightarrow I_B = I_O; \end{cases}$$

postać logiczna prądu I_B w grupie B.

$$I_Z^L = \begin{cases} 0 \rightarrow I_A \neq 0, I_B = 0, \\ 1 \rightarrow I_A = 0, I_B \neq 0; \end{cases}$$

postać logiczna prądu zadanego I_Z .

Tablica prawdy dla funkcji blokady

$I_B^L \backslash I_A^L I_Z^L$	00	01	11	10
0	0 ⁰	1 ¹	1 ³	1 ²
1	0 ⁴	0 ⁵	1 ⁷	1 ⁶

Tablica Karnaugh'a dla funkcji Y_B

$$Y_B = \sum(1,2,3,6,7)$$

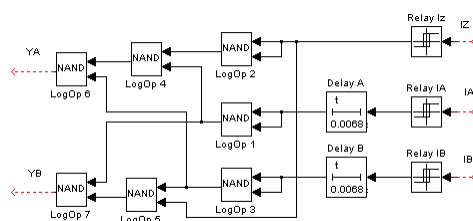
$$Y_B = \overline{I_B} I_Z + I_A = \overline{\overline{\overline{\overline{I_B} I_Z}}} + I_A = \overline{\overline{\overline{I_B} I_Z}} + I_A$$

$I_B^L \backslash I_A^L I_Z^L$	00	01	11	10
0	1 ⁰	0 ¹	0 ³	0 ²
1	1 ⁴	1 ⁵	1 ⁷	1 ⁶

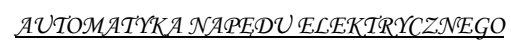
Tablica Karnaugh'a dla funkcji Y_A

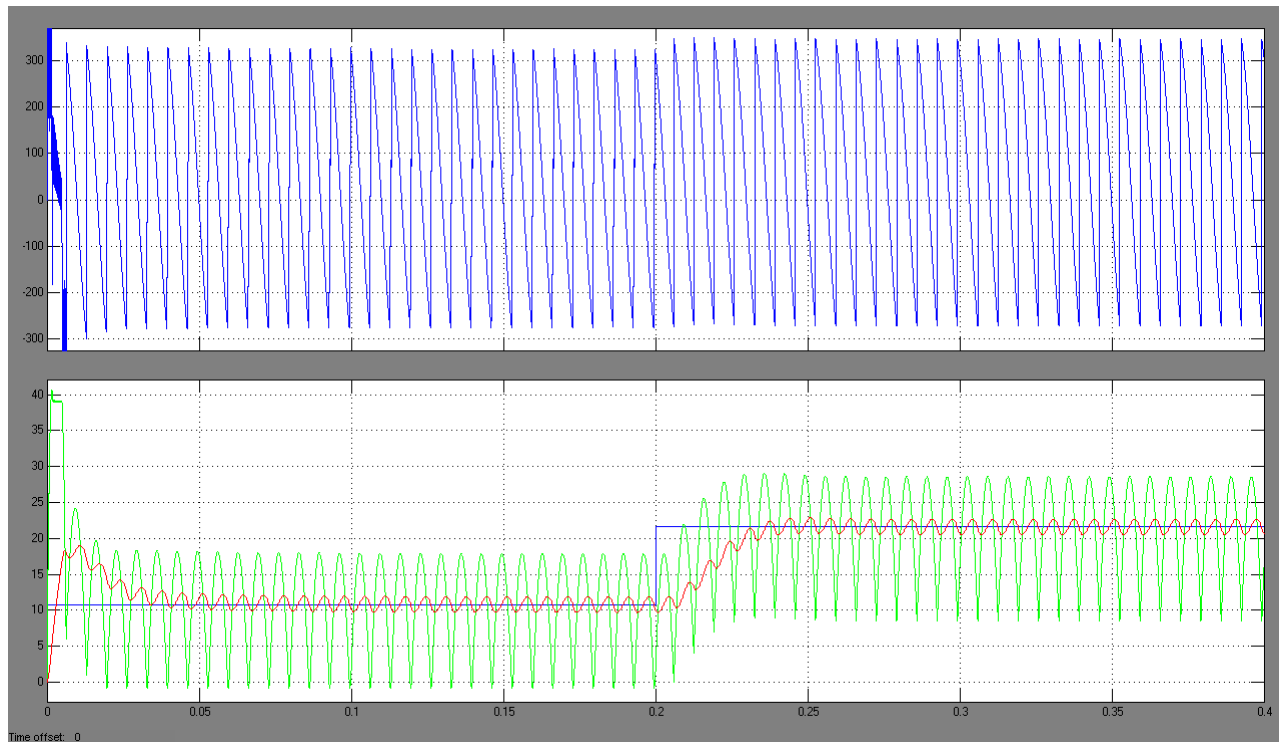
$$Y_A = \sum(0,4,5,6,7)$$

$$Y_A = \overline{I_A} I_Z + I_B = \overline{\overline{\overline{\overline{I_A} I_Z}}} + I_B = \overline{\overline{\overline{I_A} I_Z}} + I_B$$



Realizacja na bramkach NAND funkcji blokady

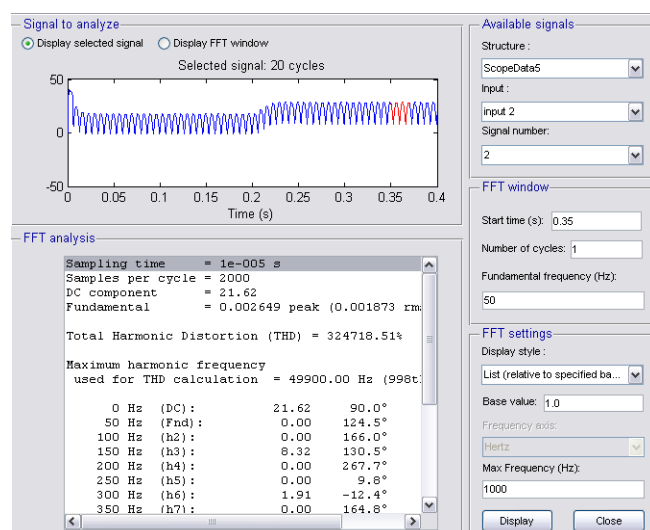
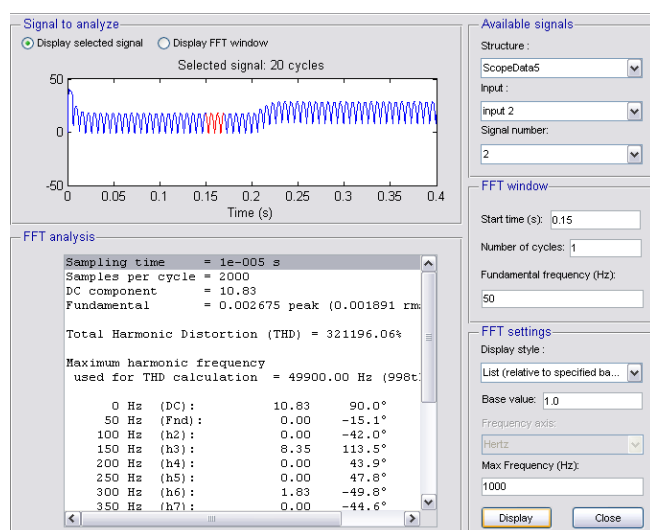




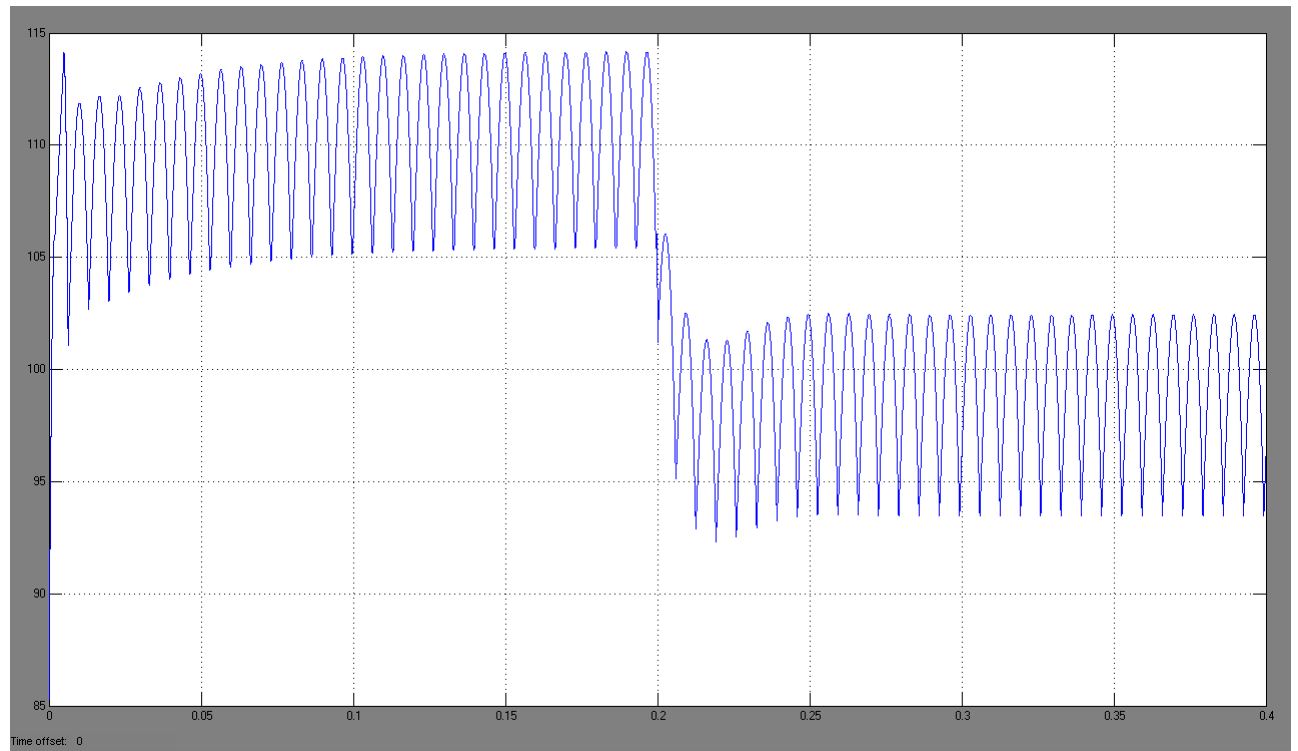
Napięcie, prąd zadany, prąd mierzony oraz wyfiltrowany prąd mierzony

dla $t \in [0; 0.2)$: $I_z = 10.808A$

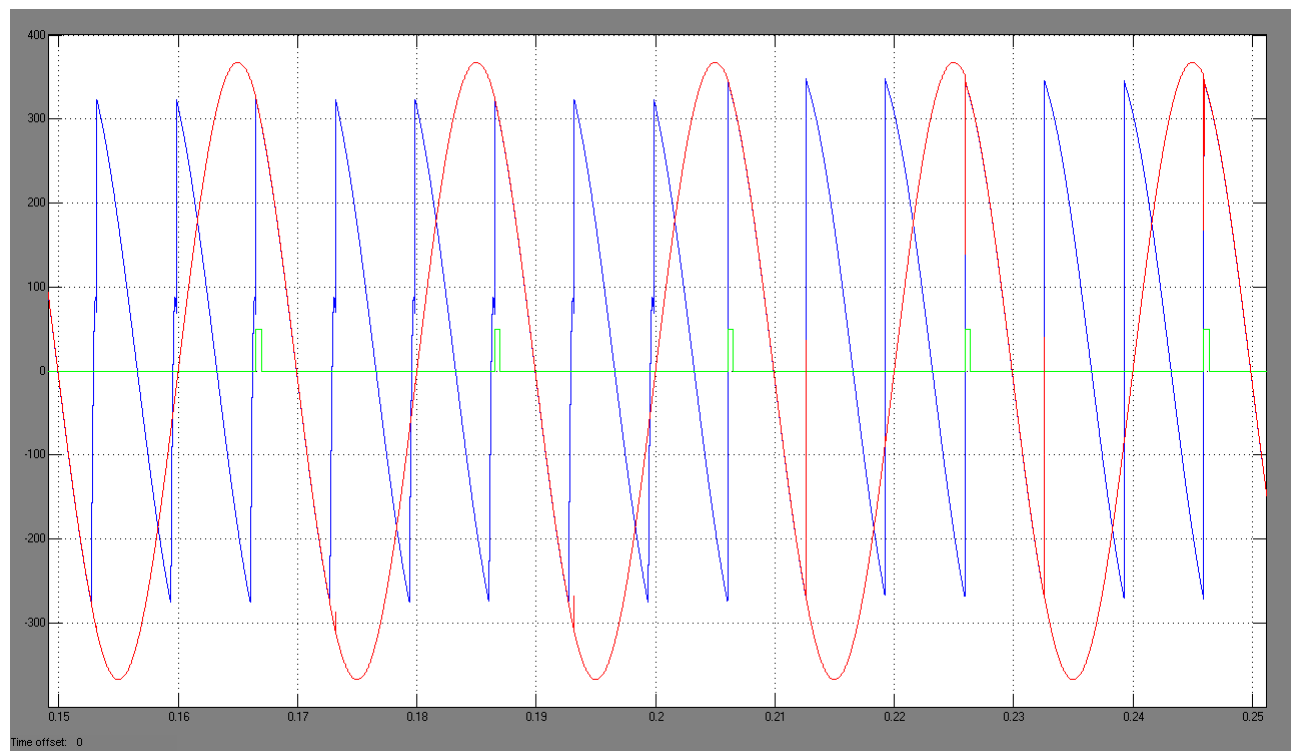
dla $t \in [0.2; 0.4]$: $I_z = 21.616A$



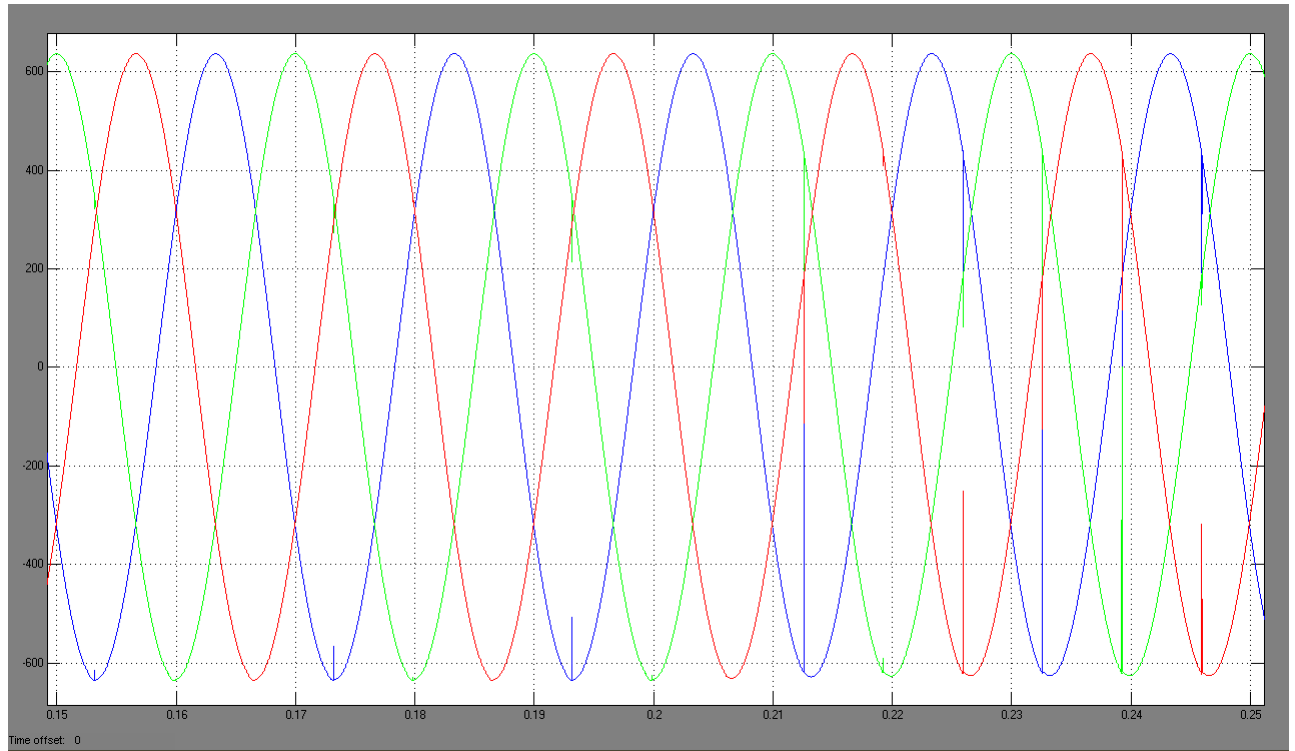
Analiza na zawartość harmoniczną w prądzie odbiornika



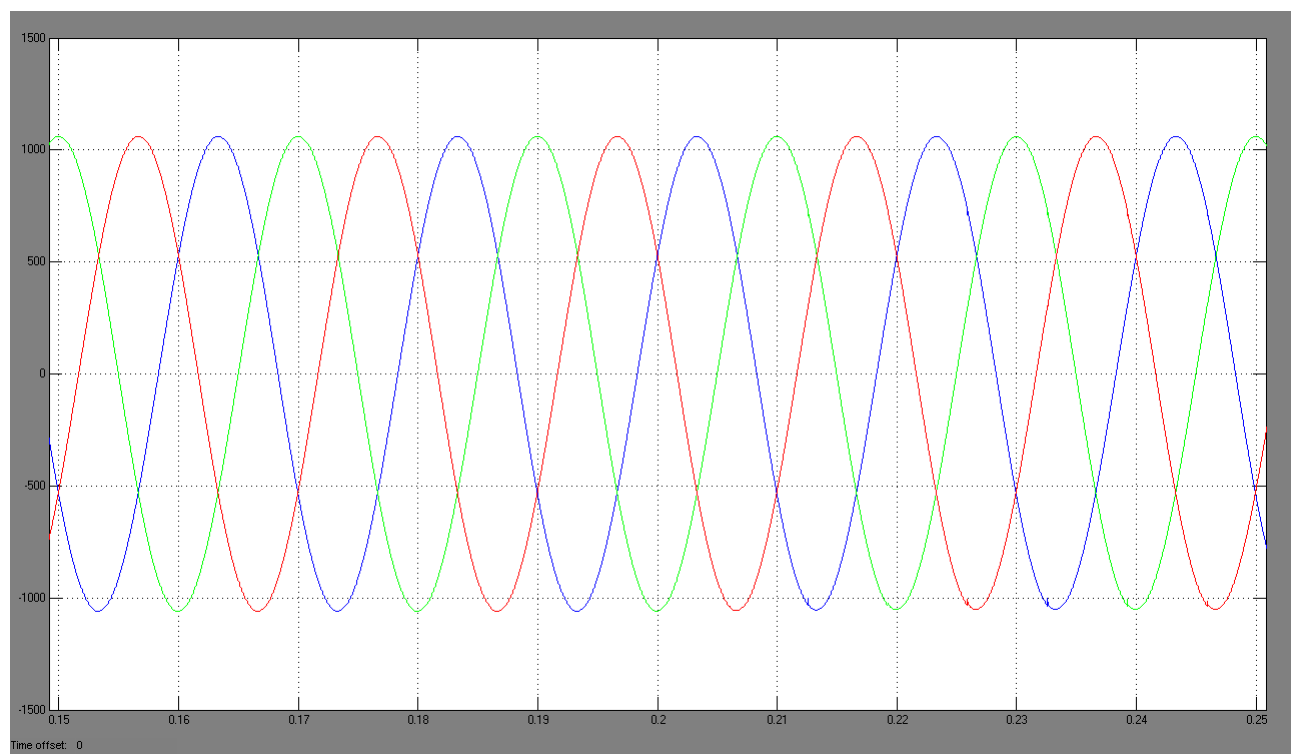
Kąt sterowania przekształtnikiem



Napięcie na odbiorniku, impulsy sterujące oraz napięcie fazowe na tyrystorze

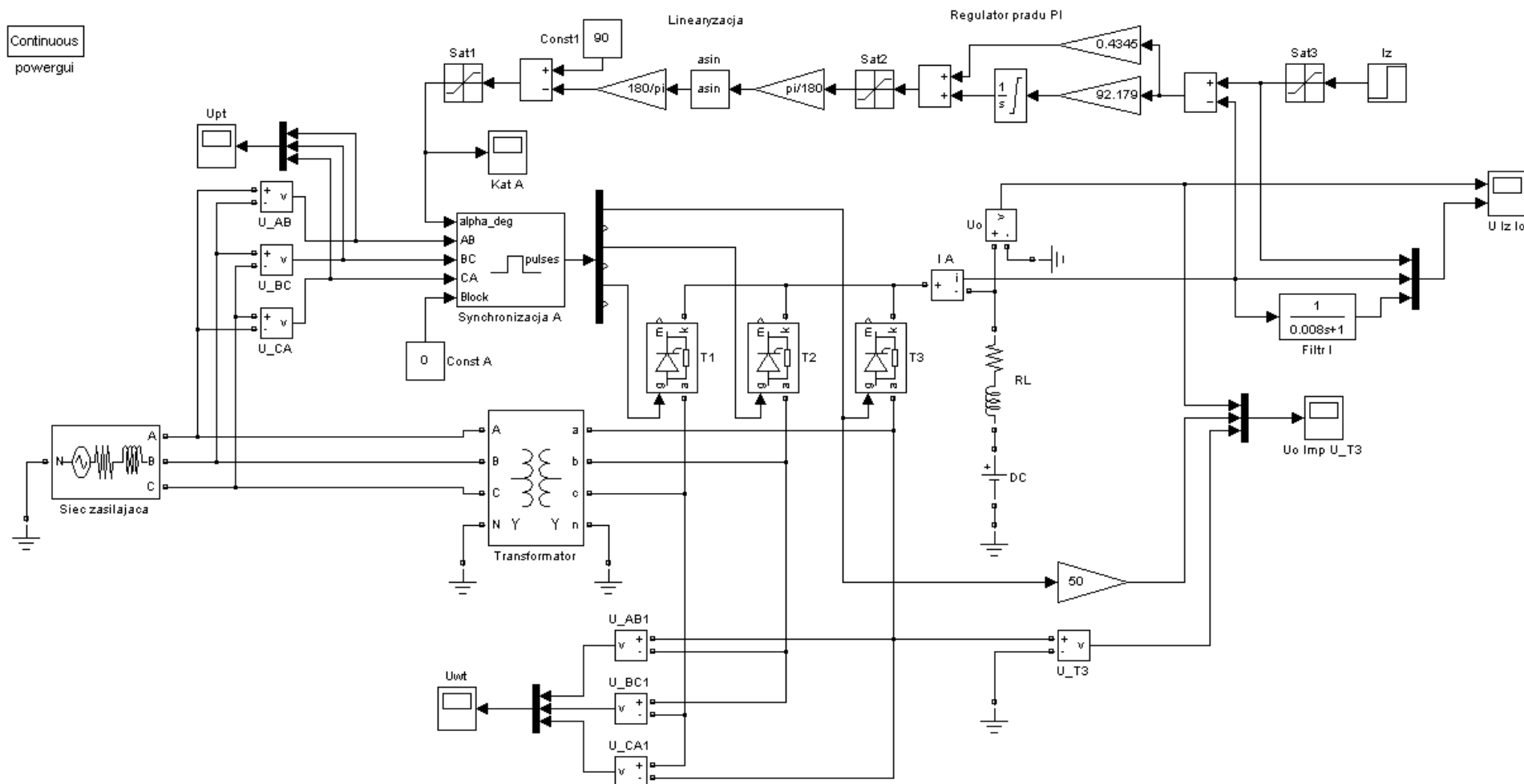


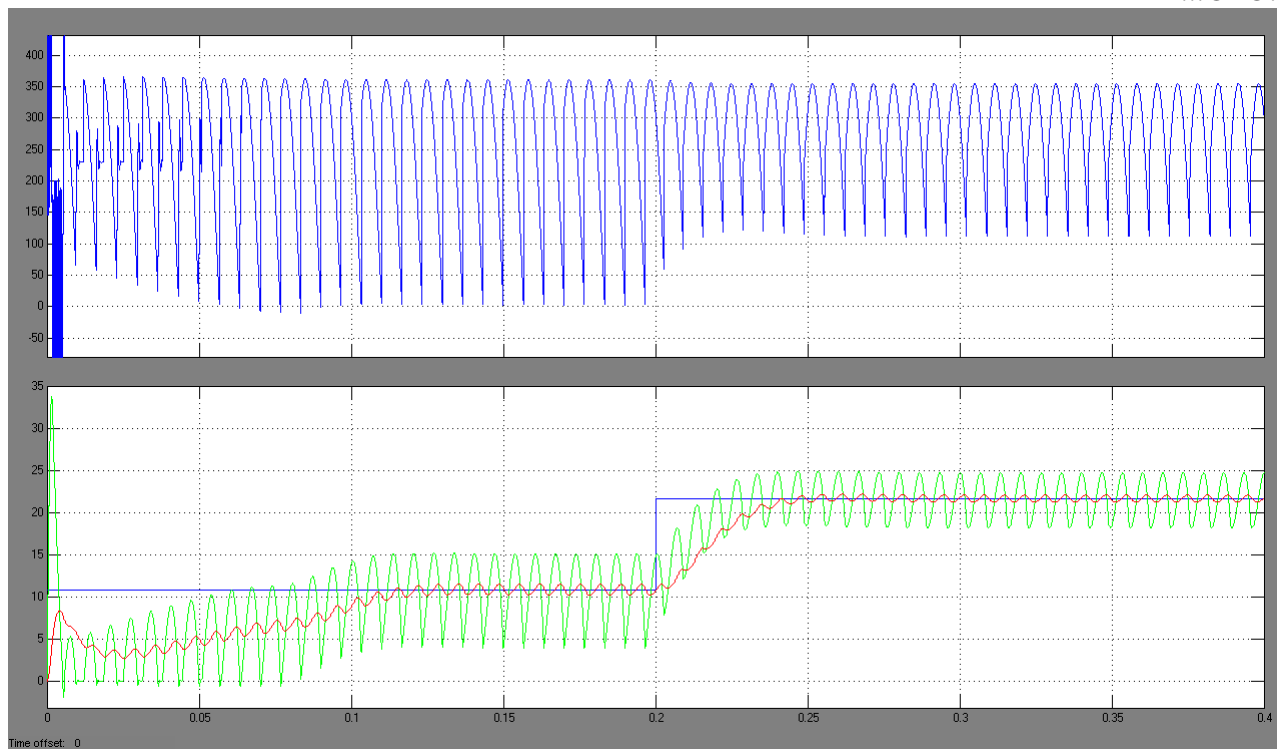
Napięcie strony wtórnej transformatora



Napięcie strony pierwotnej transformatora

System sterowania prądem odbiornika RL+E

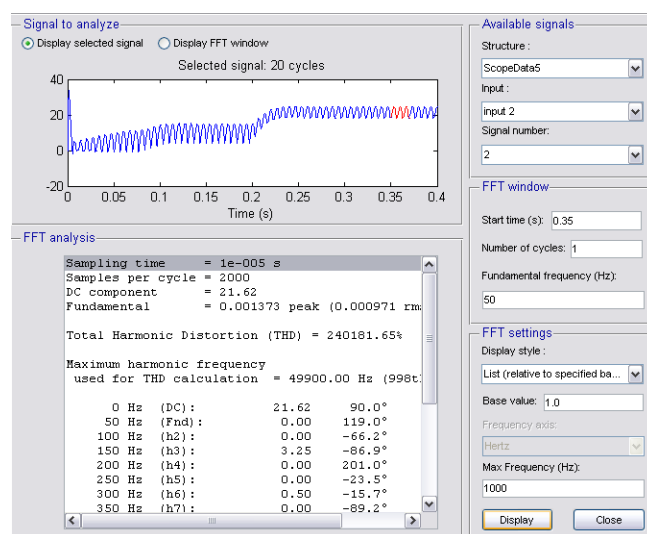
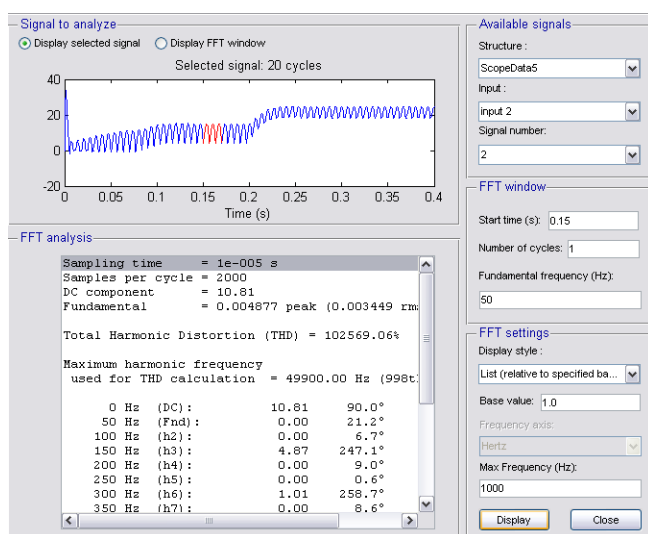




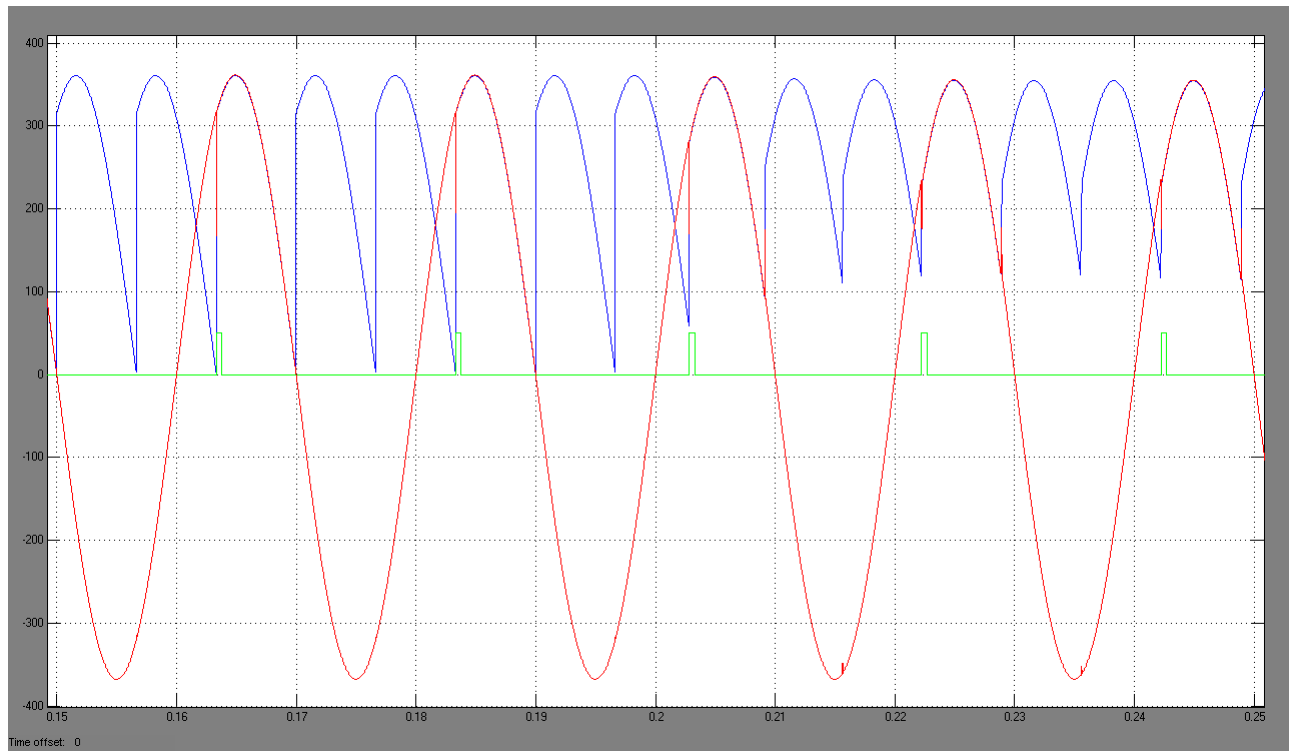
Napięcie, prąd zadany, prąd mierzony oraz wyfiltrowany prąd mierzony.

dla $t \in [0;0.2)$: $I_z = 10.808A$, $U_{DC} = 230V$

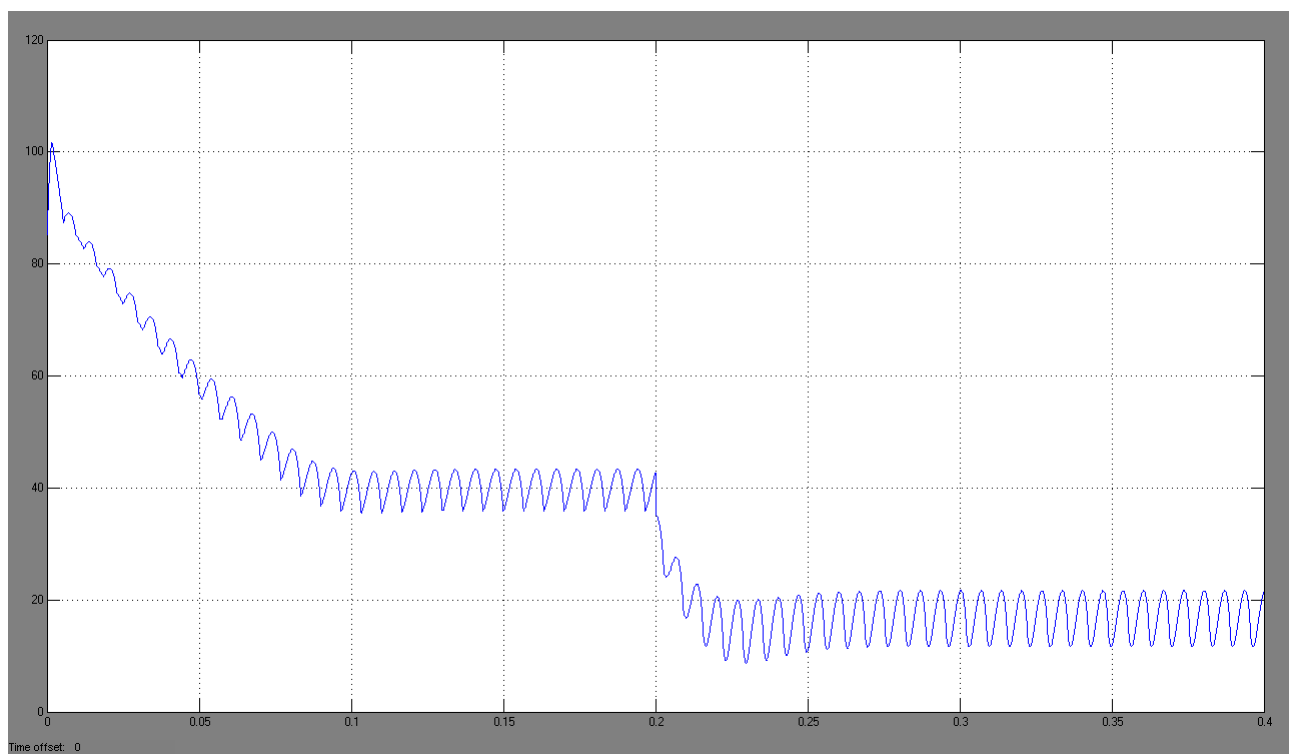
dla $t \in [0.2;0.4]$: $I_z = 21.616A$, $U_{DC} = 230V$



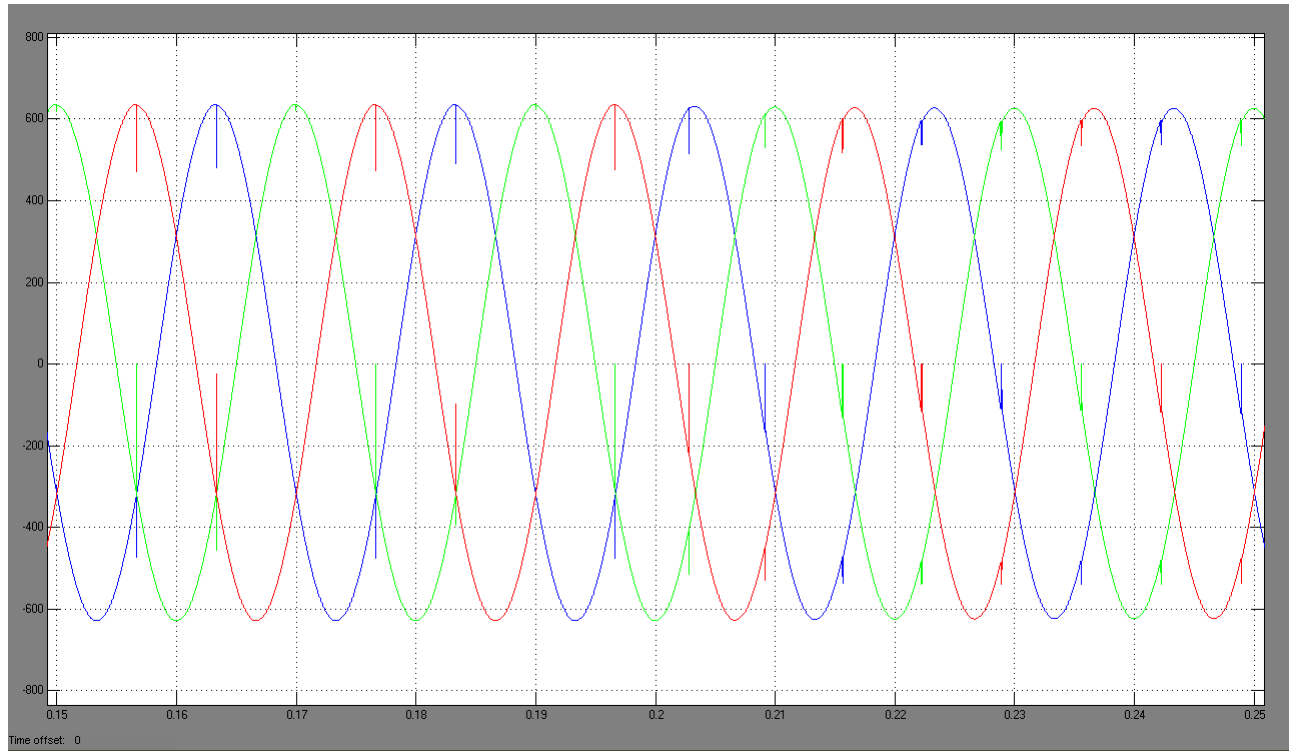
Analiza na zawartość harmoniczną w prądzie odbiornika



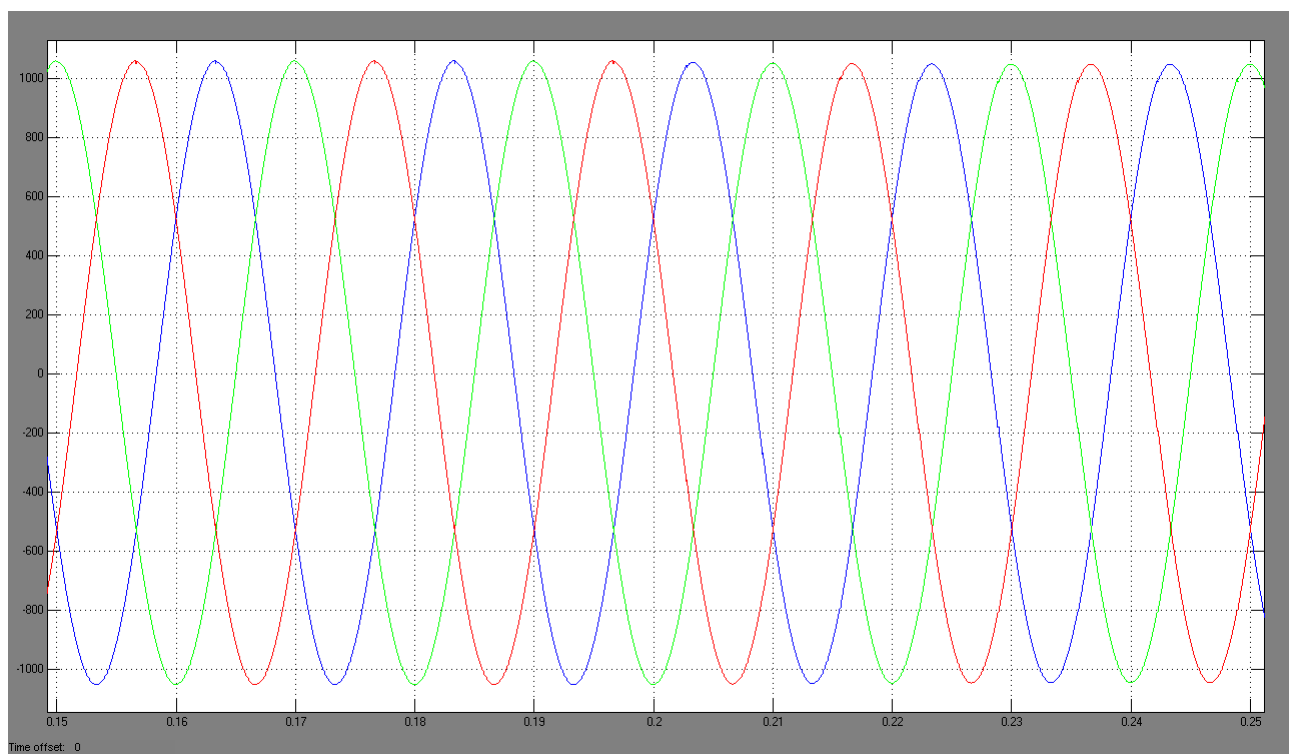
Napięcie na odbiorniku, impulsy sterujące oraz napięcie fazowe na tyrystorze



Kąt sterowania przekształtnikiem

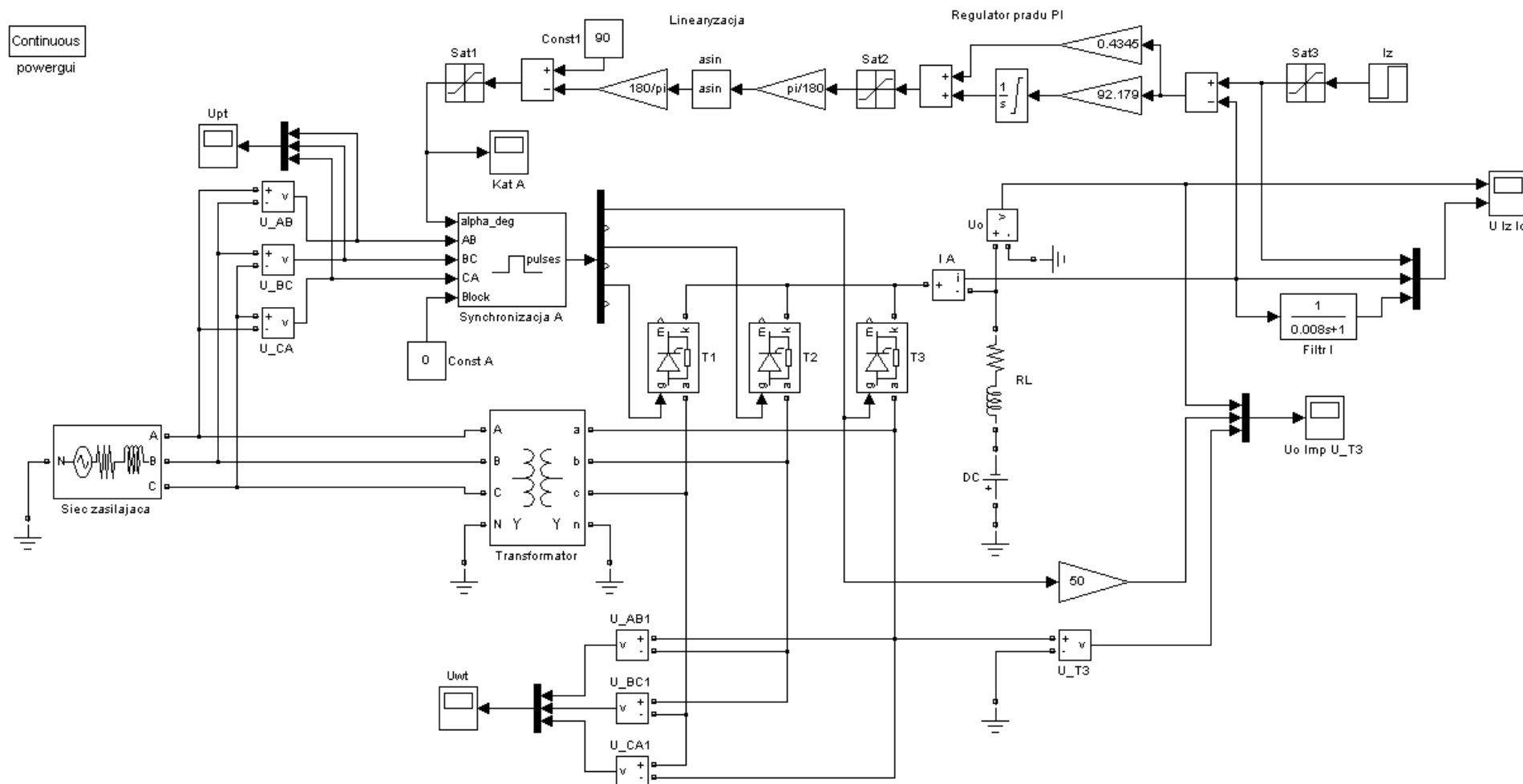


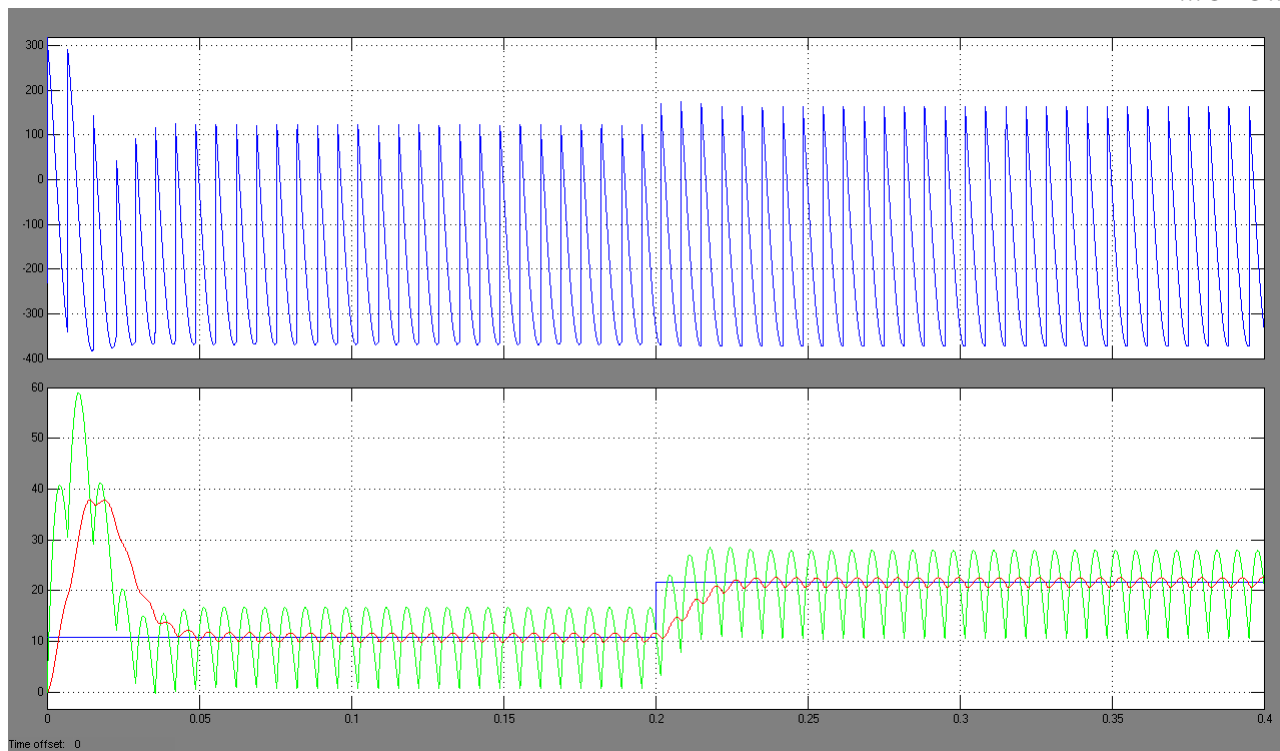
Napięcie strony wtórnej transformatora



Napięcie strony pierwotnej transformatora

System sterowania prądem odbiornika RL-E

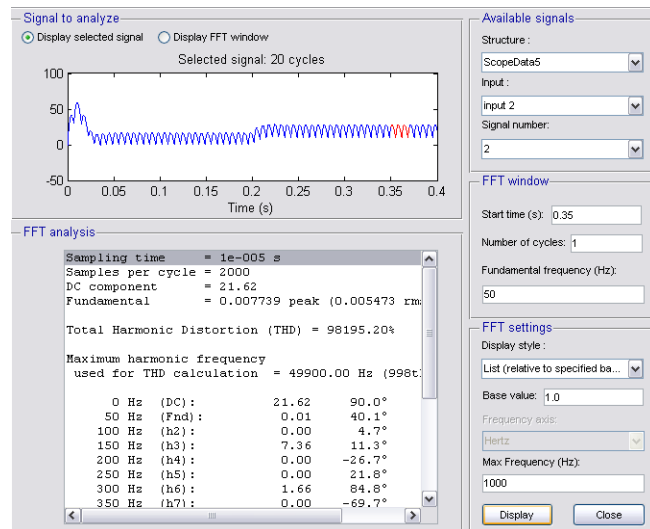
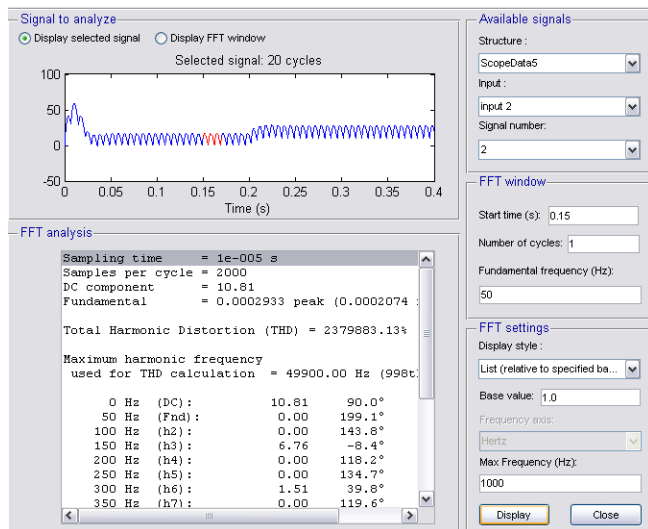




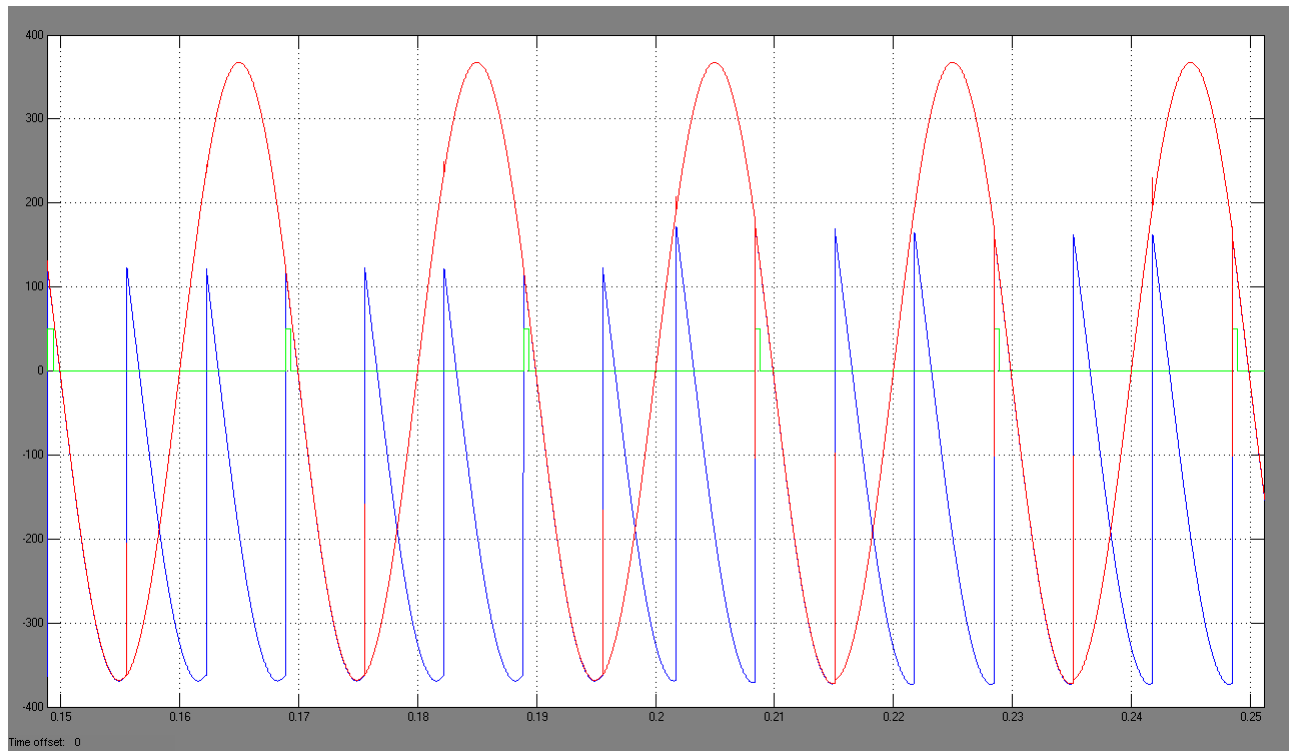
Napięcie, prąd zadany, prąd mierzony oraz wyfiltrowany prąd mierzony.

dla $t \in [0; 0.2)$: $I_z = 10.808A$, $U_{DC} = -400V$

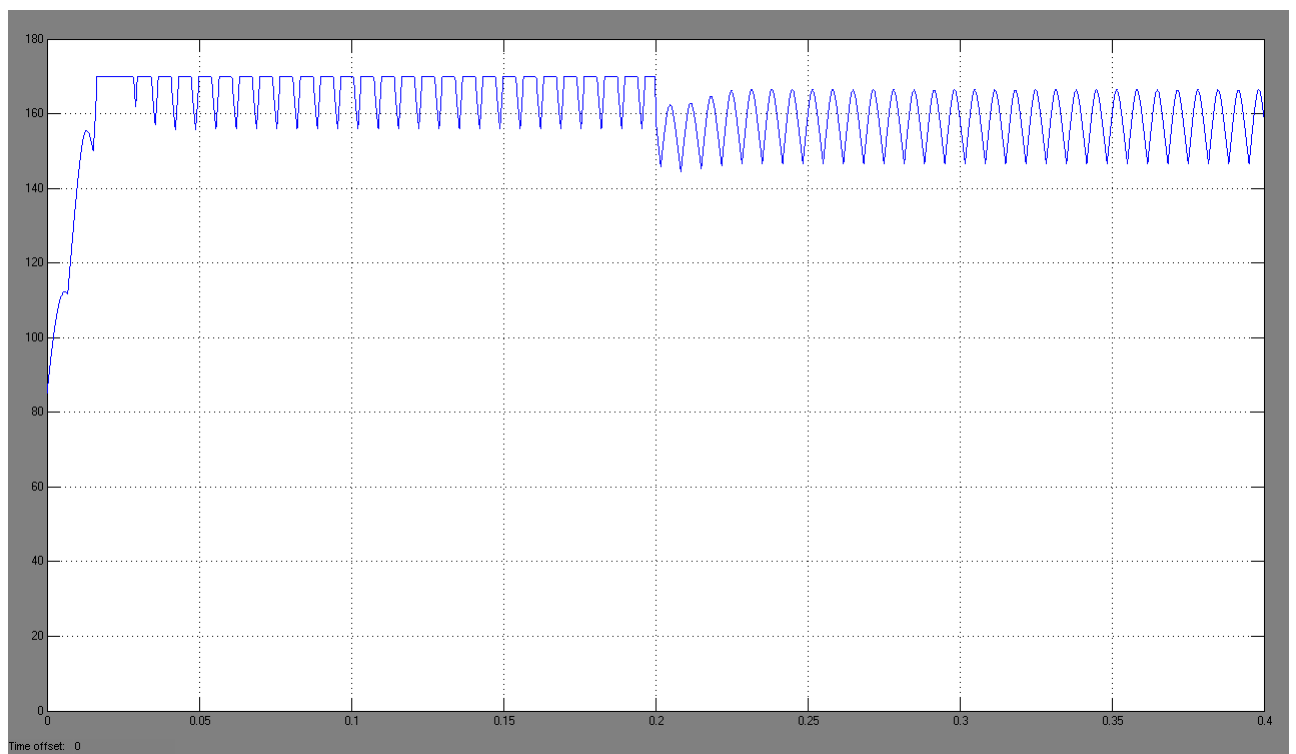
dla $t \in [0.2; 0.4]$: $I_z = 21.616A$, $U_{DC} = -400V$



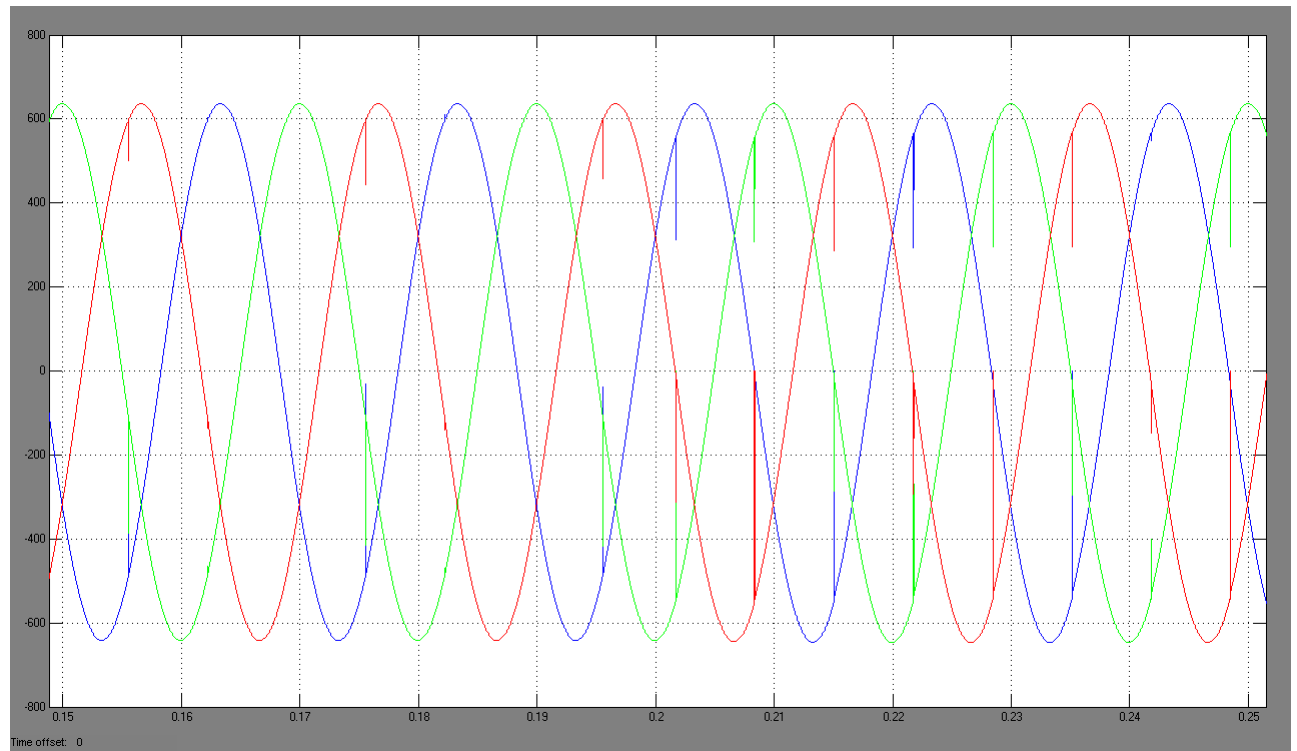
Analiza na zawartość harmoniczną w prądzie odbiornika



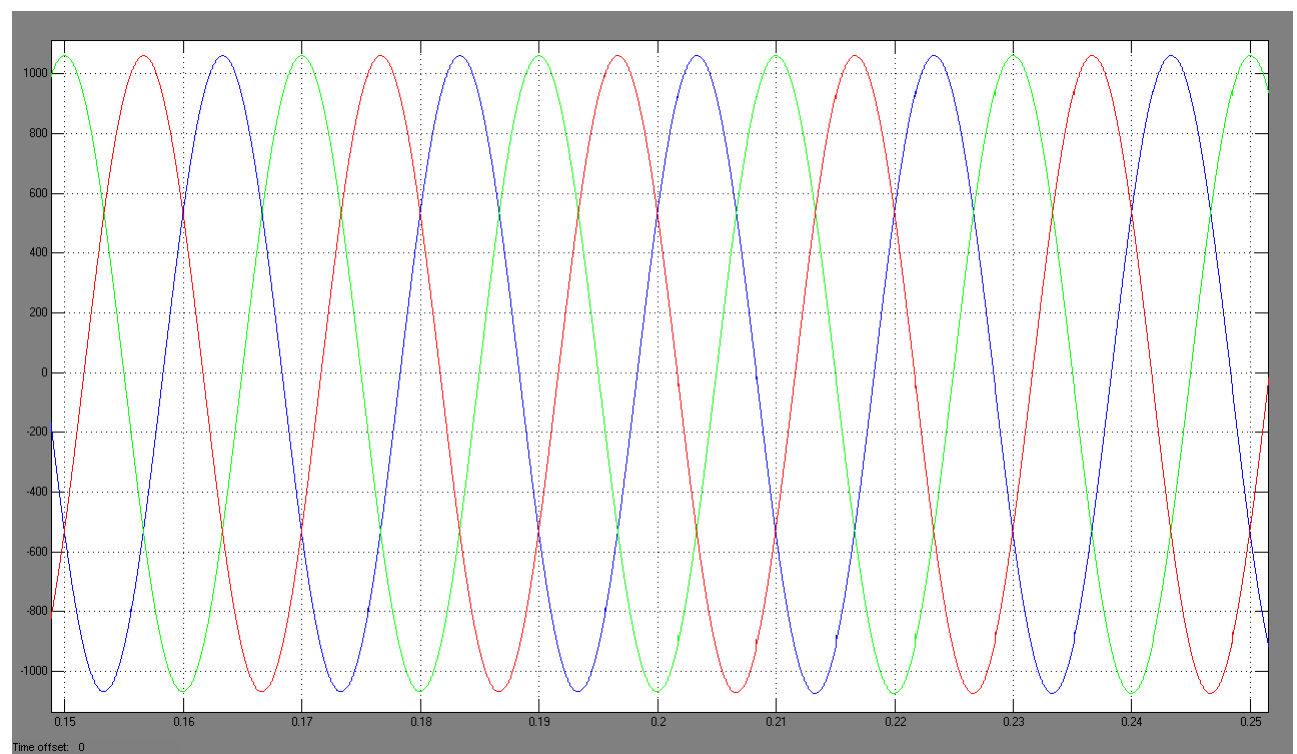
Napięcie na odbiorniku, impulsy sterujące oraz napięcie fazowe na tyrystorze



Kąt sterowania przekształtnikiem

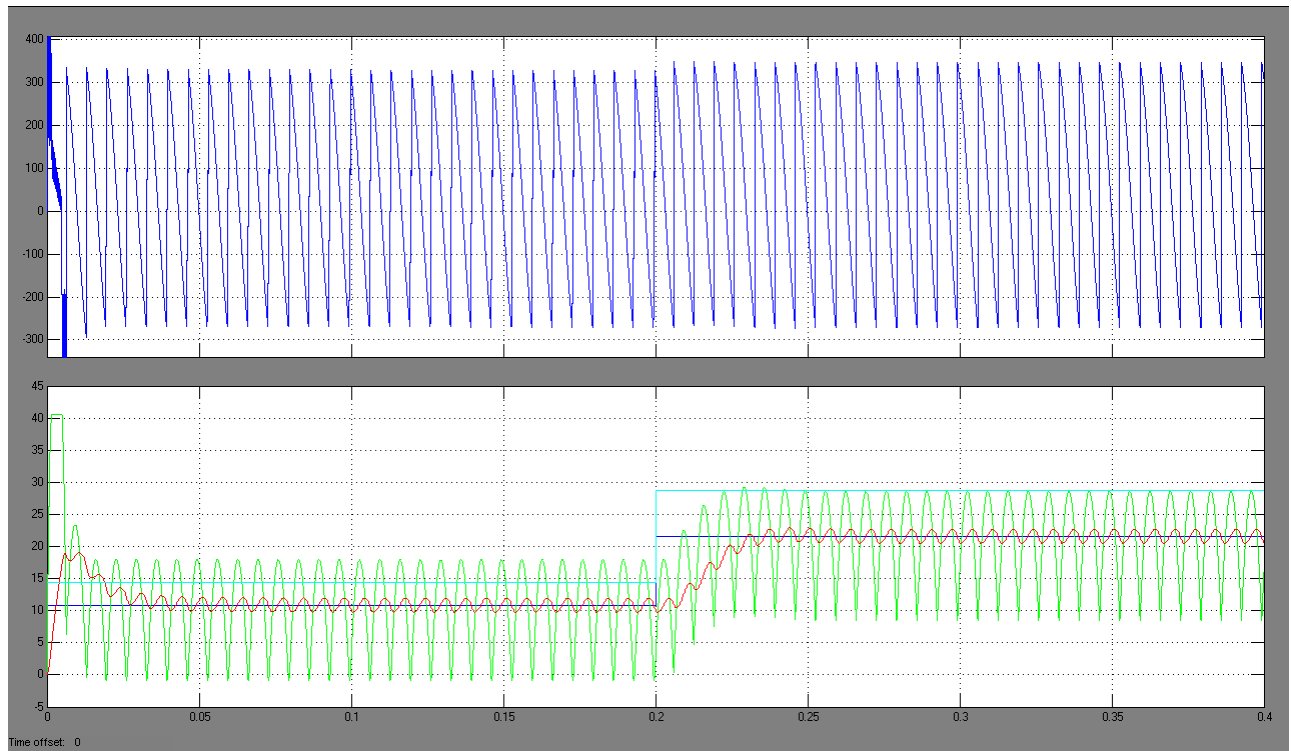


Napięcie strony wtórnej transformatora

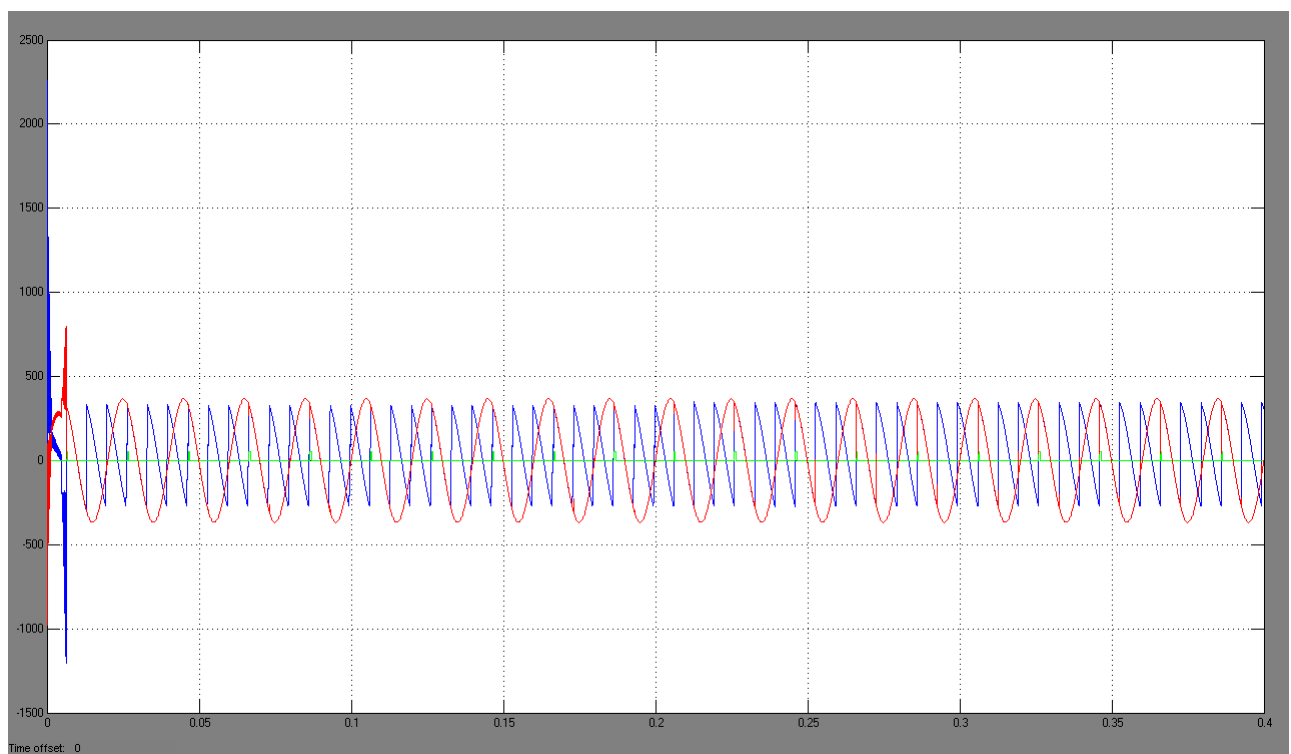


Napięcie strony pierwotnej transformatora

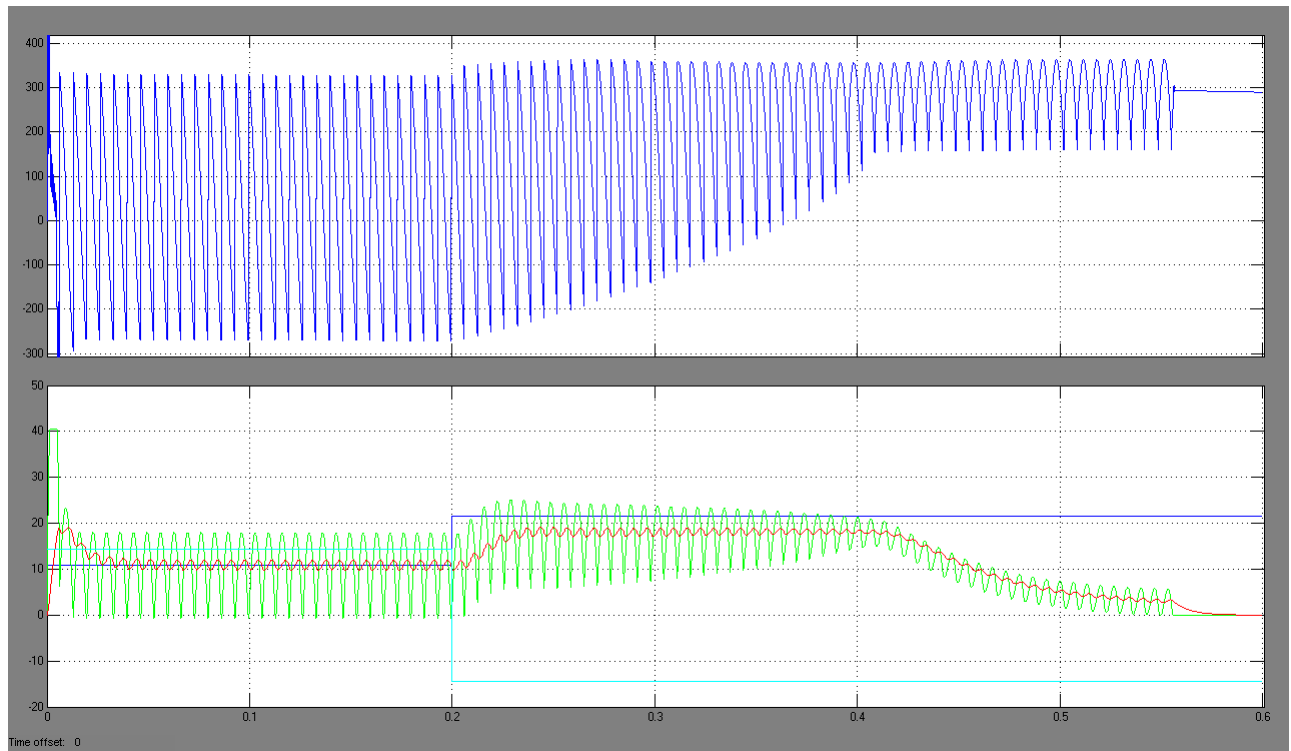




Napięcie, prąd zadany, prąd mierzony, wyfiltrowany prąd mierzony oraz moment obciążenia
 dla $t \in [0;0.2)$: $I_z = 10.808A$, $M_o = 14.385N \cdot m$
 dla $t \in [0.2;0.4]$: $I_z = 21.616A$, $M_o = 28.77N \cdot m$



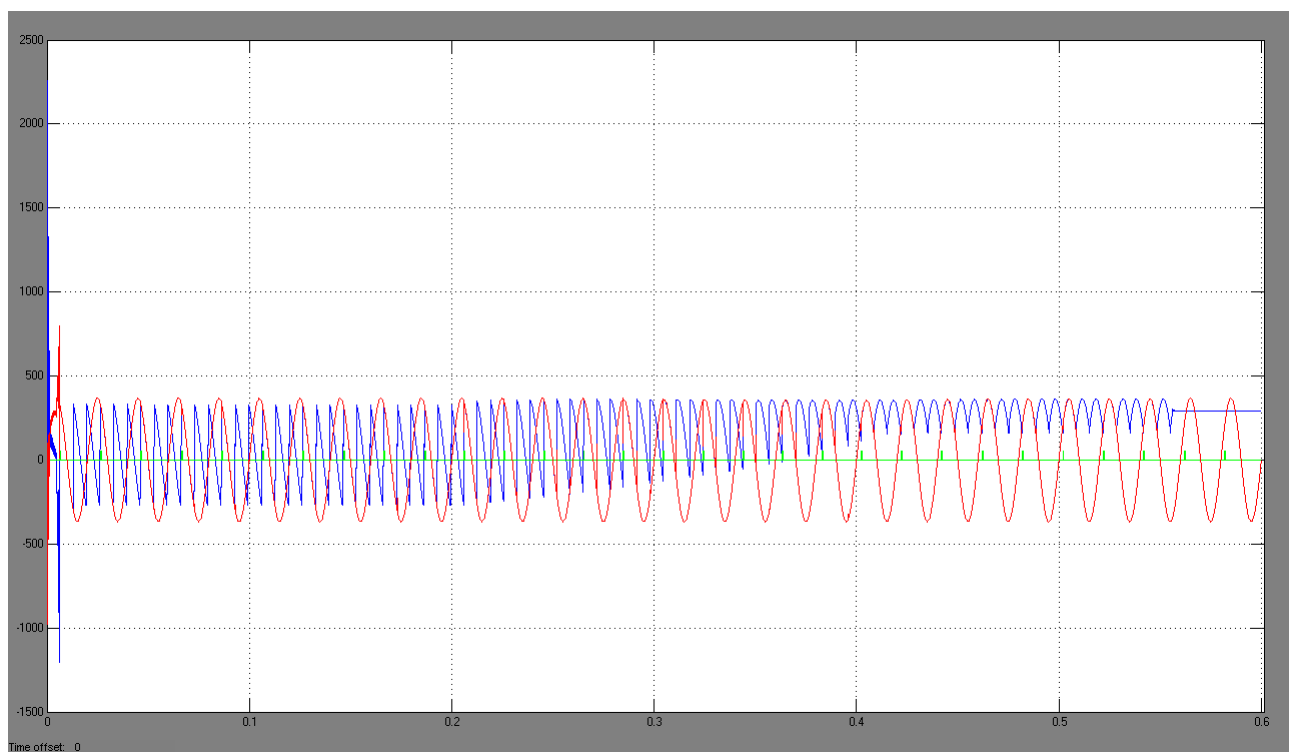
Napięcie na odbiorniku, impulsy sterujące oraz napięcie fazowe na tyrystorze



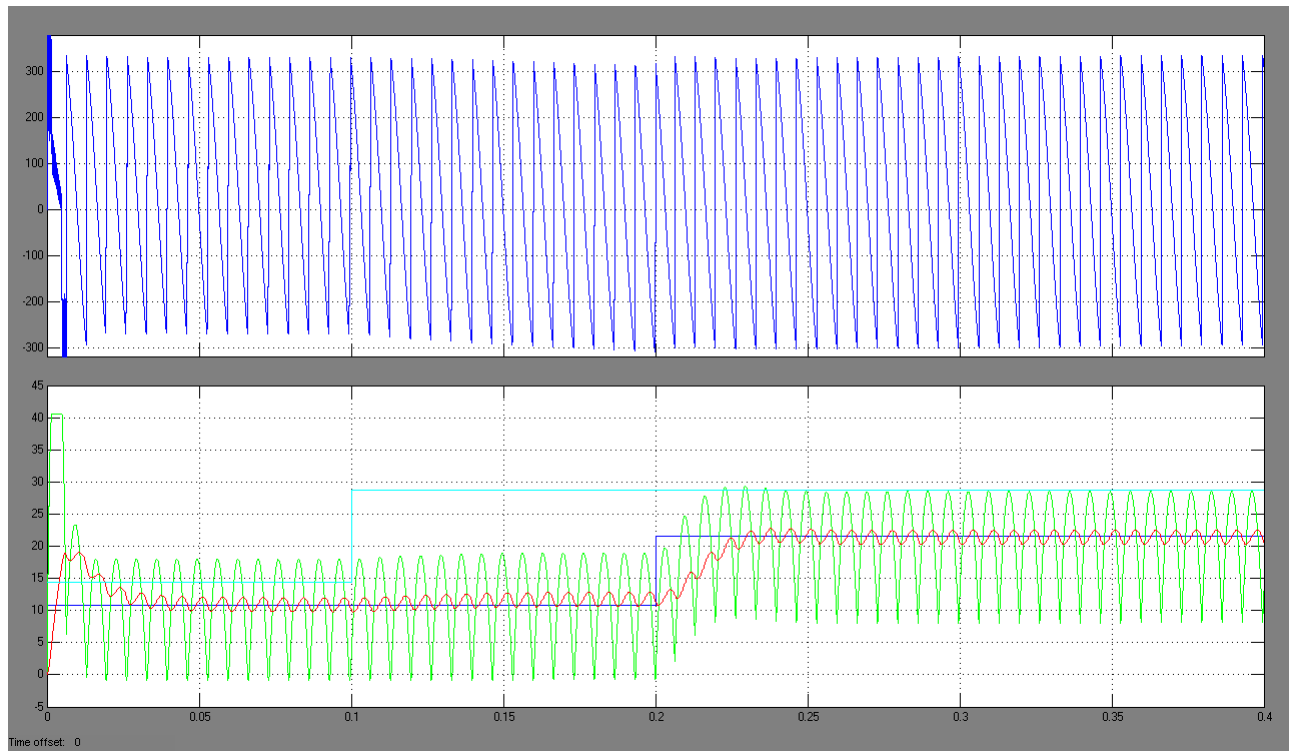
Napięcie, prąd zadany, prąd mierzony, wyfiltrowany prąd mierzony oraz moment obciążenia

dla $t \in [0; 0.2)$: $I_z = 10.808A$, $M_o = 14.385N \cdot m$

dla $t \in [0.2; 0.6]$: $I_z = 21.616A$, $M_o = -14.385N \cdot m$



Napięcie na odbiorniku, impulsy sterujące oraz napięcie fazowe na tyrystorze



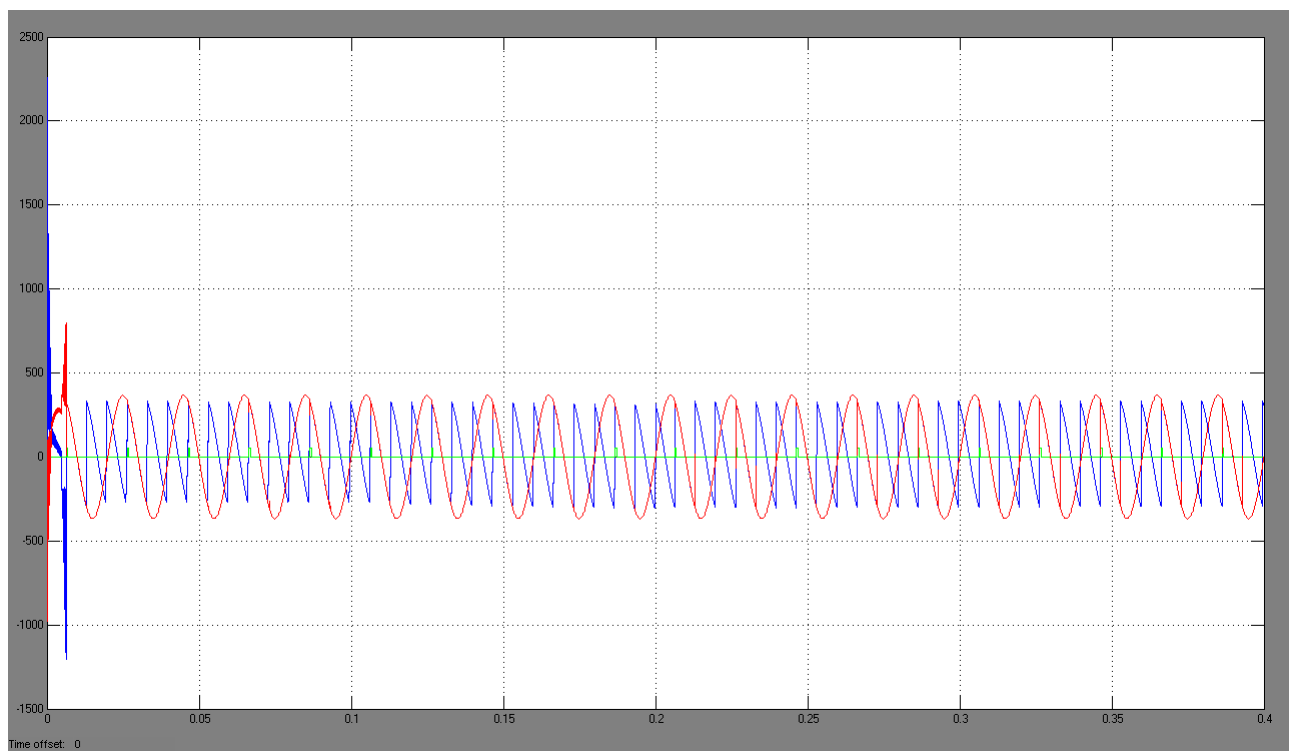
Napięcie, prąd zadany, prąd mierzony, wyfiltrowany prąd mierzony oraz moment obciążenia

dla $t \in [0;0.2)$: $I_z = 10.808A$

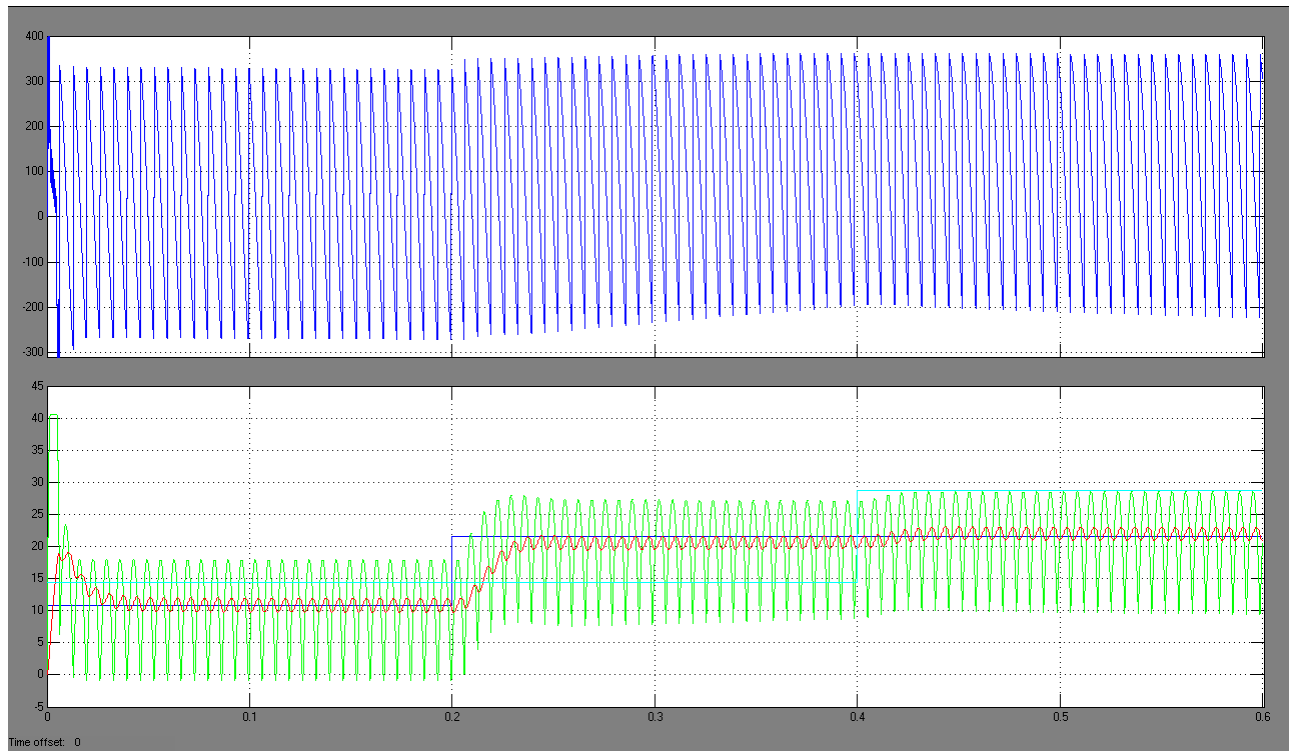
dla $t \in [0.2;0.4]$: $I_z = 21.616A$

dla $t \in [0;0.1)$: $M_o = 14.385N \cdot m$

dla $t \in [0.1;0.4]$: $M_o = 28.77N \cdot m$



Napięcie na odbiorniku, impulsy sterujące oraz napięcie fazowe na tyrystorze



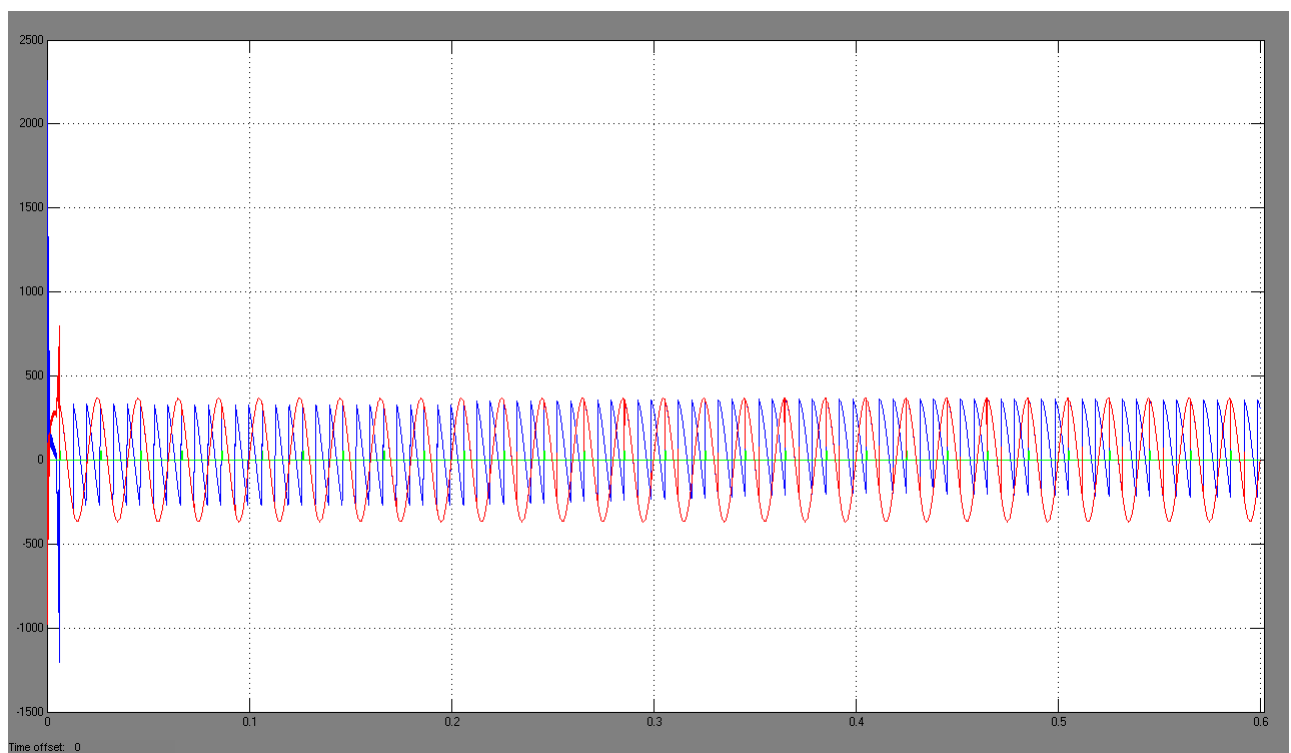
Napięcie, prąd zadany, prąd mierzony, wyfiltrowany prąd mierzony oraz moment obciążenia

dla $t \in [0;0.2)$: $I_z = 10.808A$

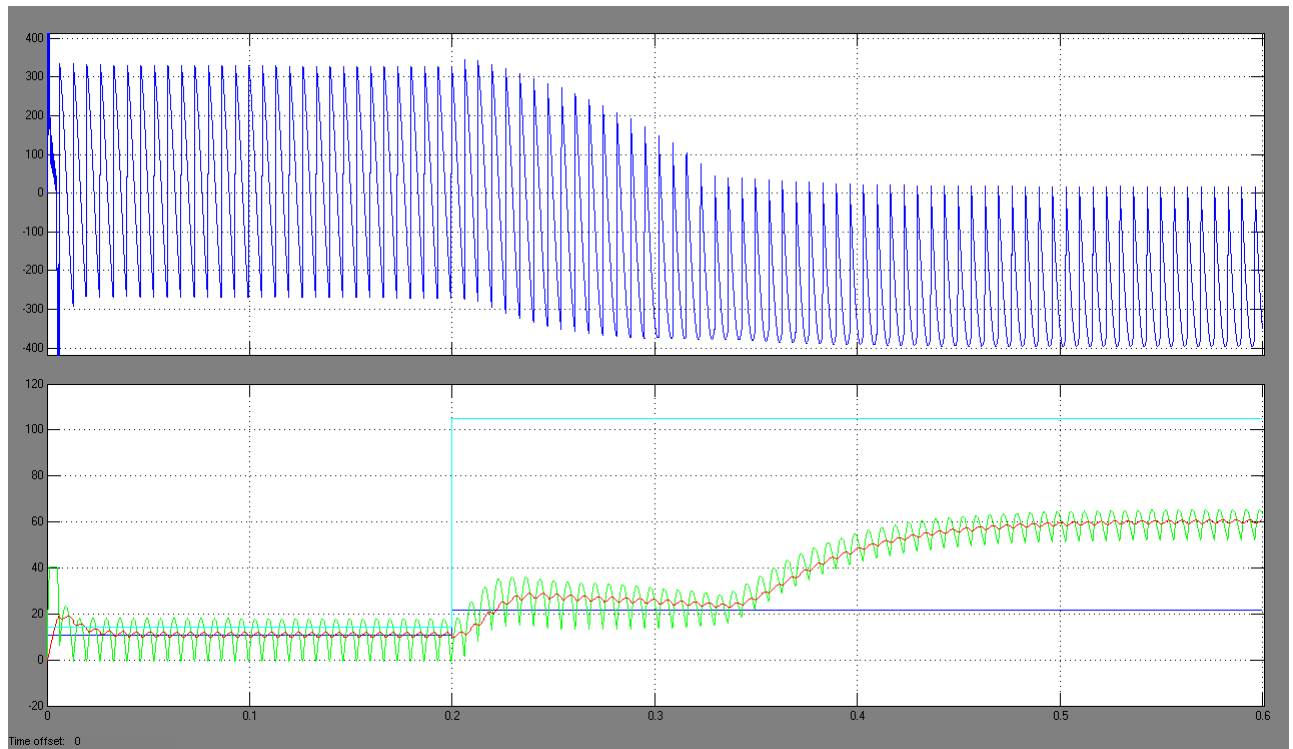
dla $t \in [0.2;0.6]$: $I_z = 21.616A$

dla $t \in [0;0.4)$: $M_o = 14.385N \cdot m$

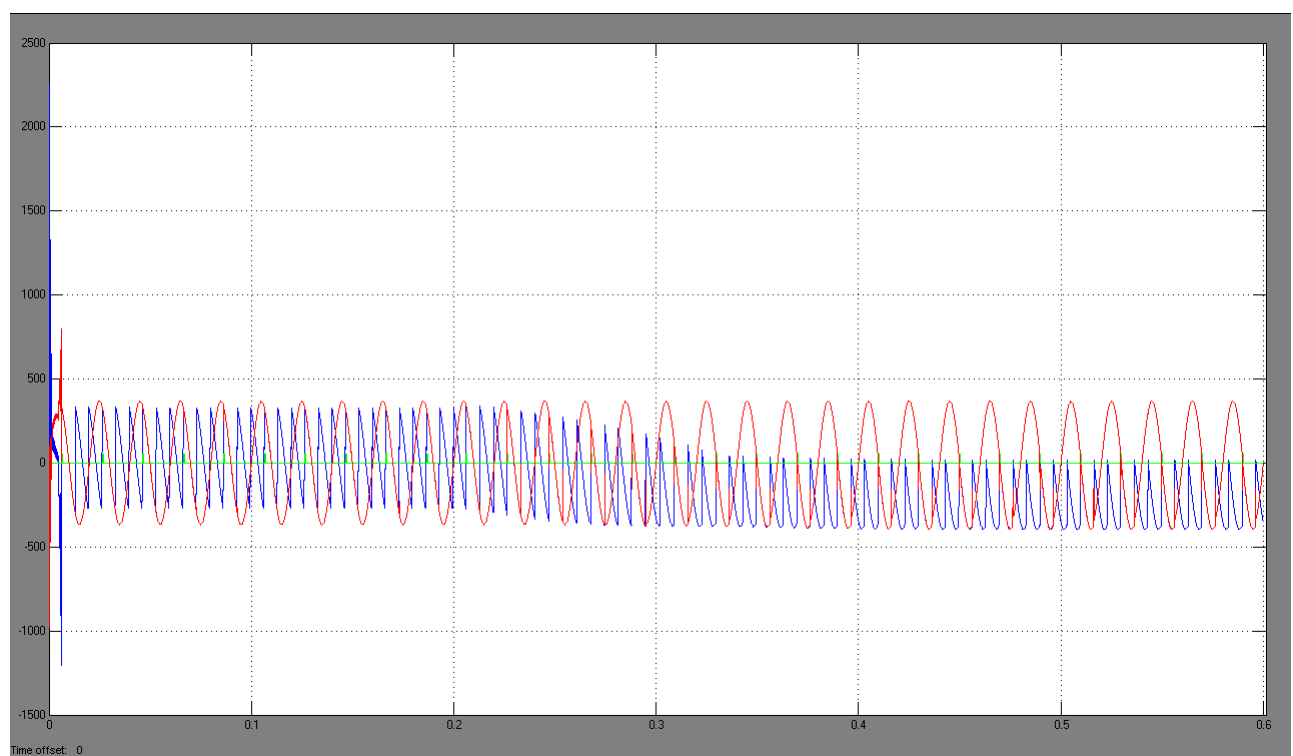
dla $t \in [0.4;0.6]$: $M_o = 28.77N \cdot m$



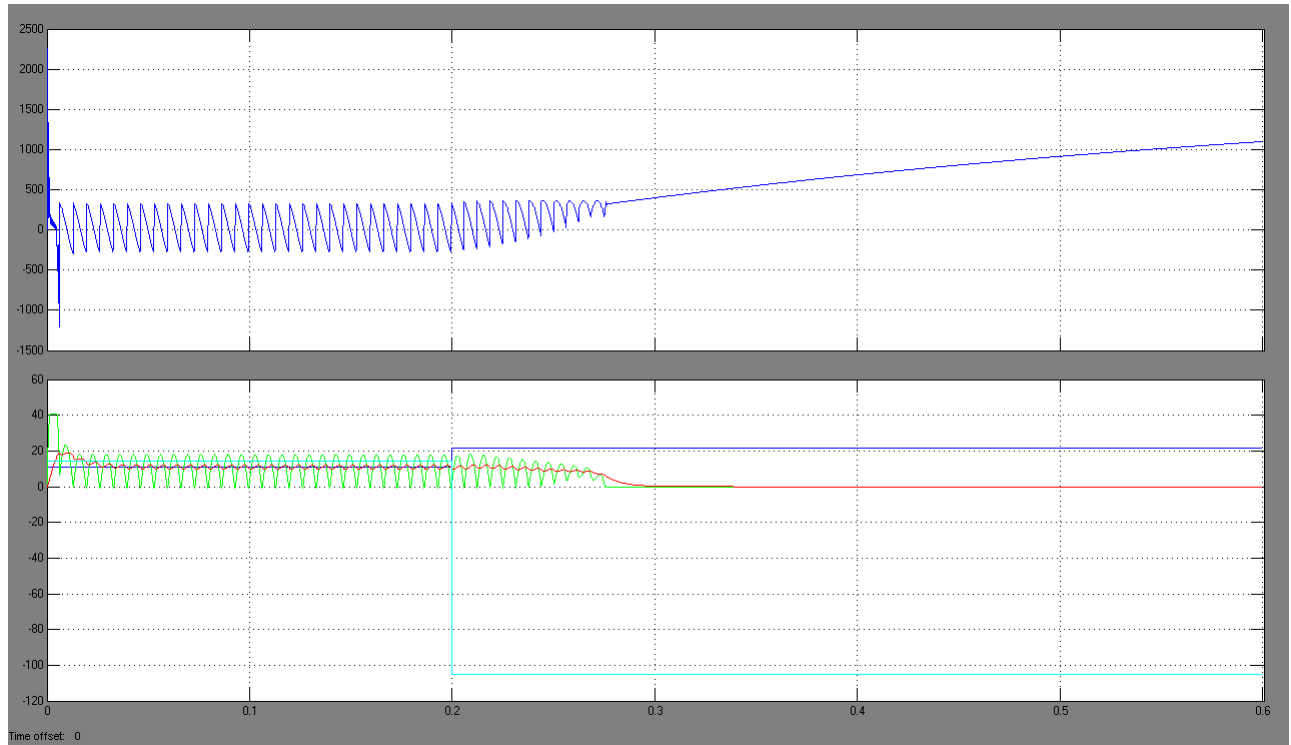
Napięcie na odbiorniku, impulsy sterujące oraz napięcie fazowe na tyrystorze



Napięcie, prąd zadany, prąd mierzony, wyfiltrowany prąd mierzony oraz moment obciążenia
 dla $t \in [0;0.2)$: $I_z = 10.808A$, $M_o = 14.385N \cdot m$
 dla $t \in [0.2;0.6]$: $I_z = 21.616A$, $M_o = 105N \cdot m$



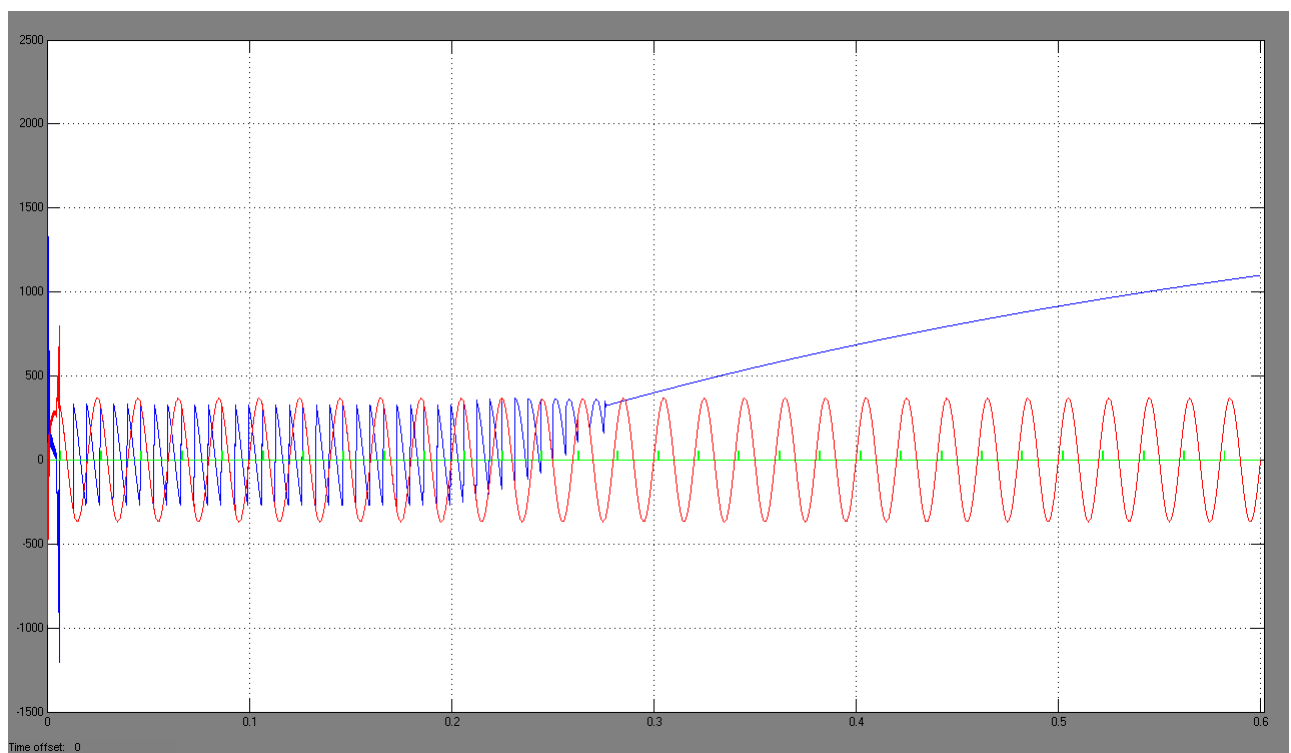
Napięcie na odbiorniku, impulsy sterujące oraz napięcie fazowe na tyrystorze



Napięcie, prąd zadany, prąd mierzony, wyfiltrowany prąd mierzony oraz moment obciążenia

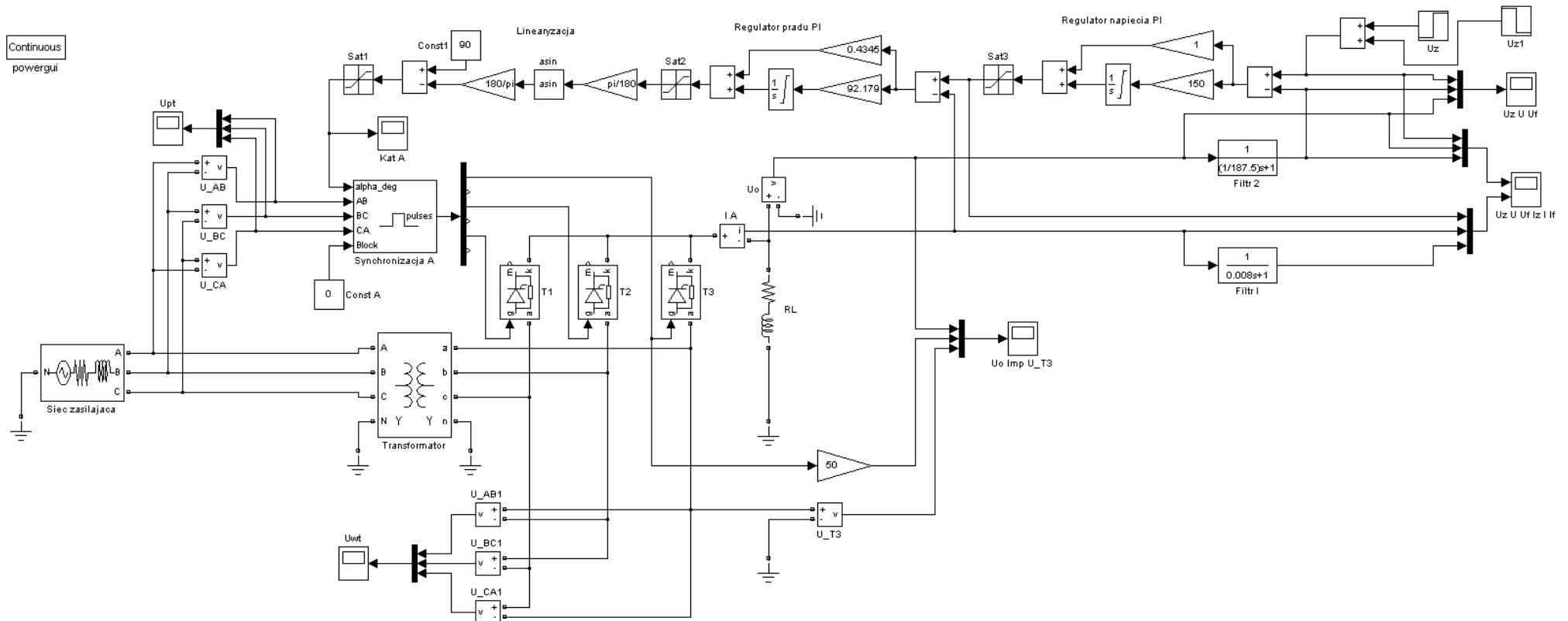
dla $t \in [0;0.2)$: $I_z = 10.808A$, $M_o = 14.385N \cdot m$

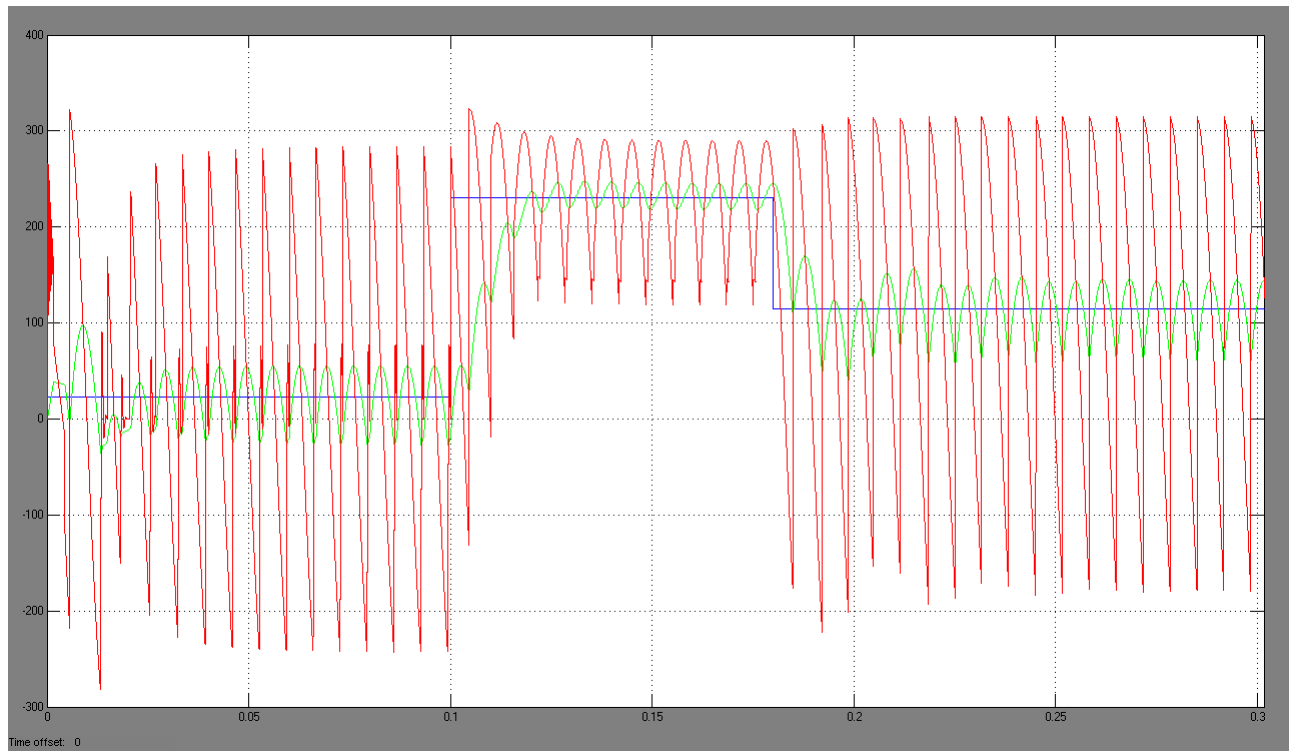
dla $t \in [0.2;0.6]$: $I_z = 21.616A$, $M_o = -105N \cdot m$



Napięcie na odbiorniku, impulsy sterujące oraz napięcie fazowe na tyrystorze

System sterowania napięciem odbiornika RL



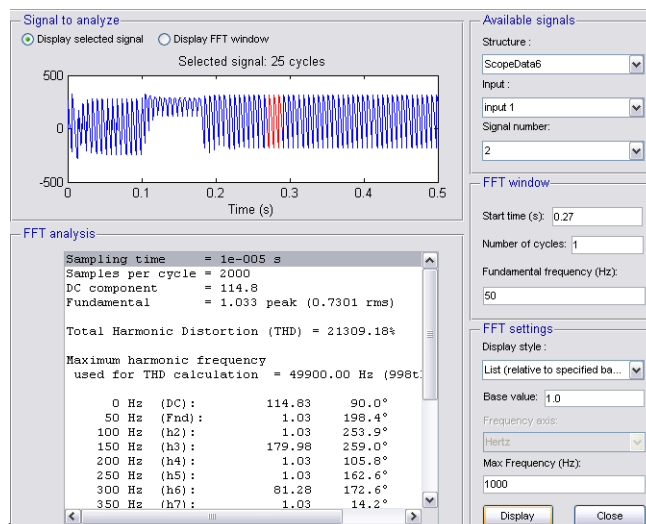
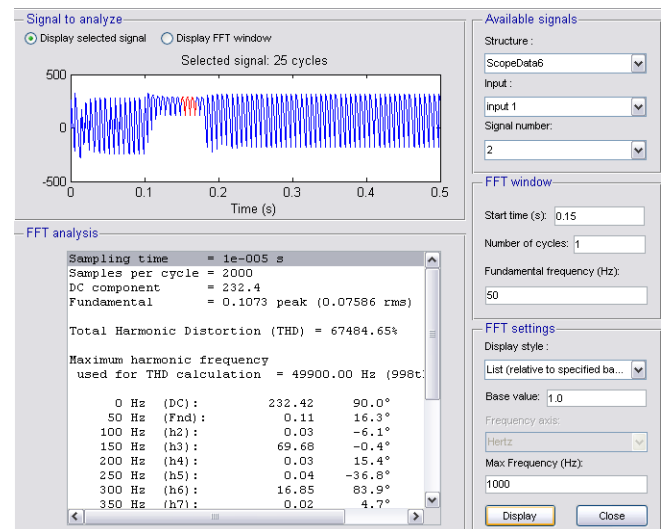
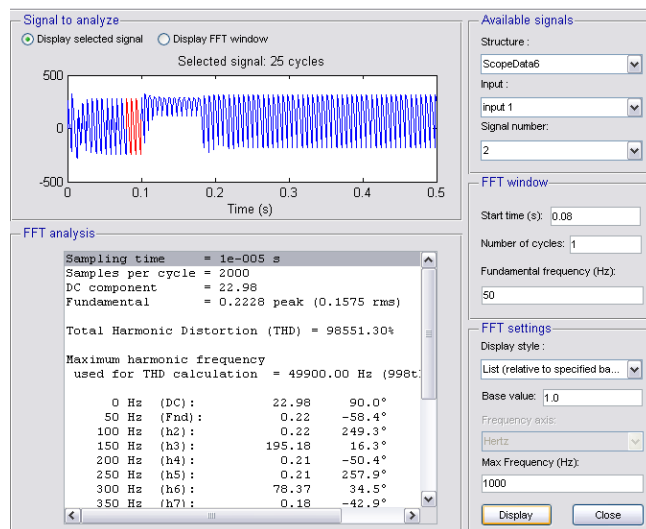


Napięcie zadane, mierzone, wyfiltrowane mierzone

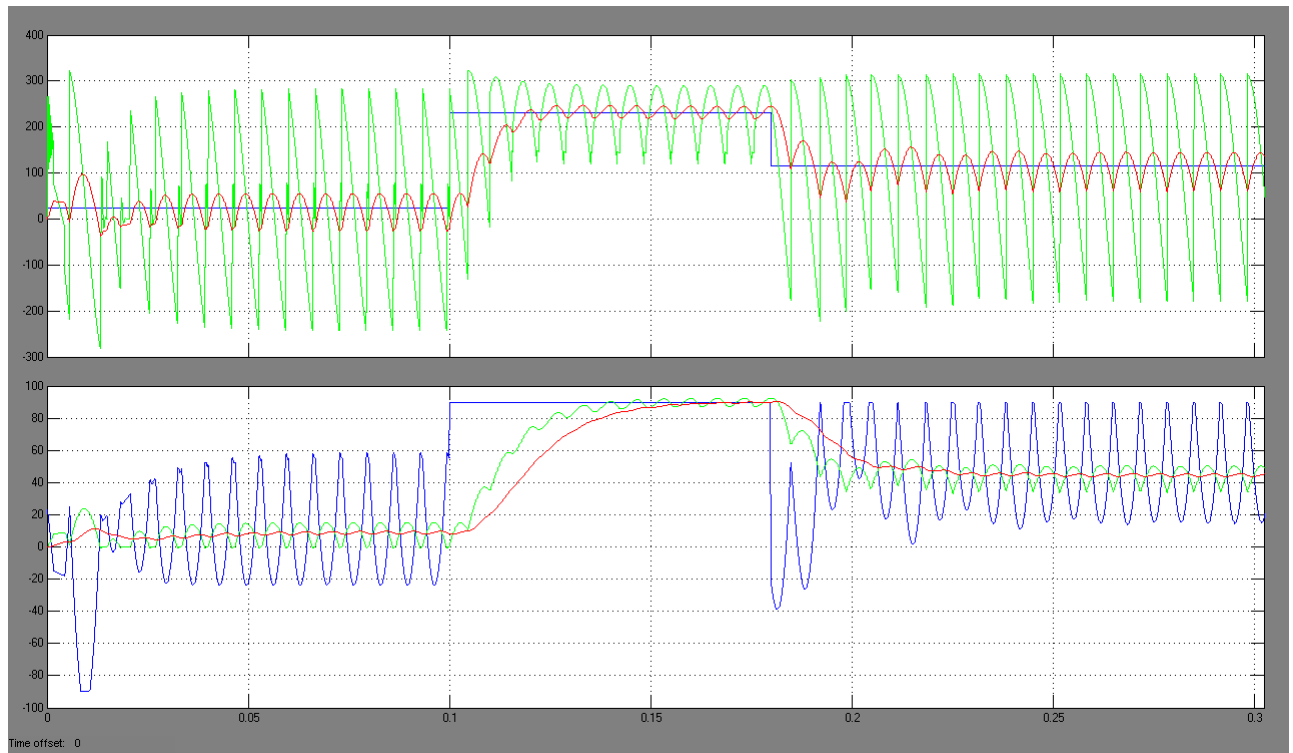
dla $t \in [0;0.1)$: $U_z = 23V$

dla $t \in [0.1;0.18)$: $U_z = 230V$

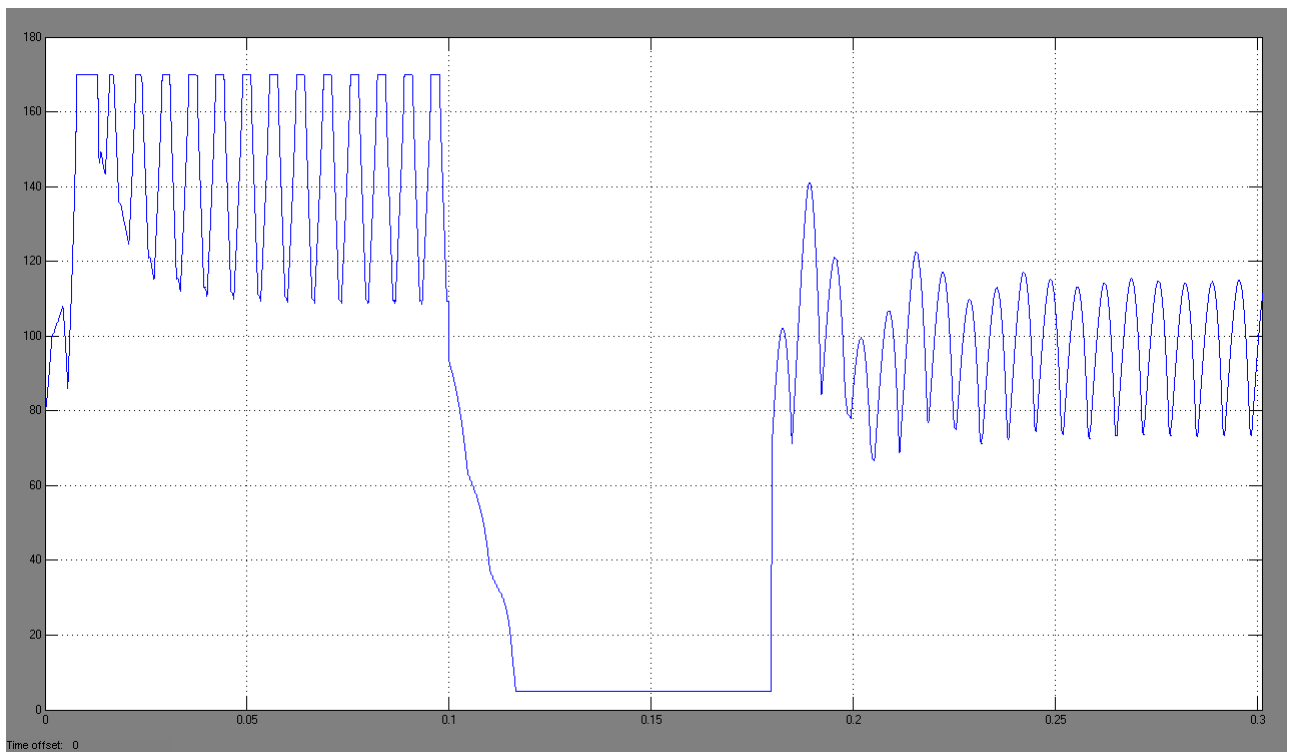
dla $t \in [0.18;0.3]$: $U_z = 115V$



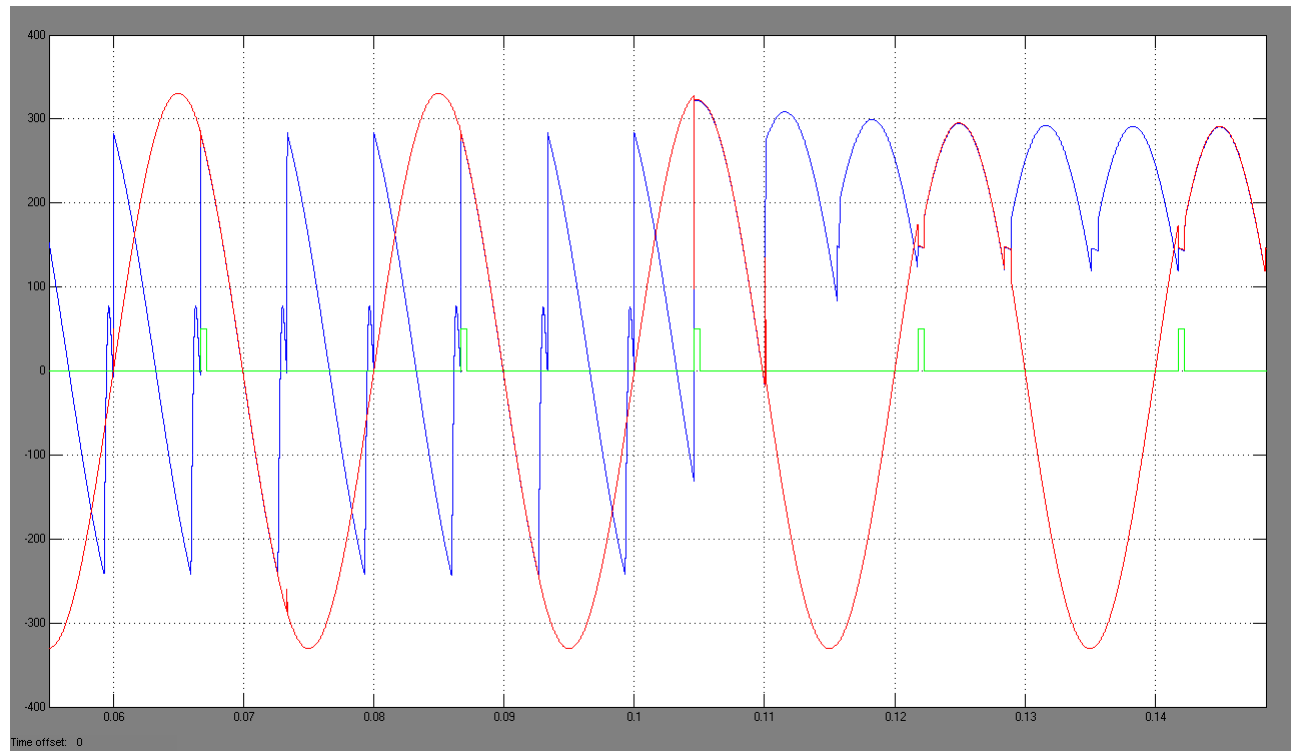
Analiza na zawartość harmoniczną w napięciu odbiornika



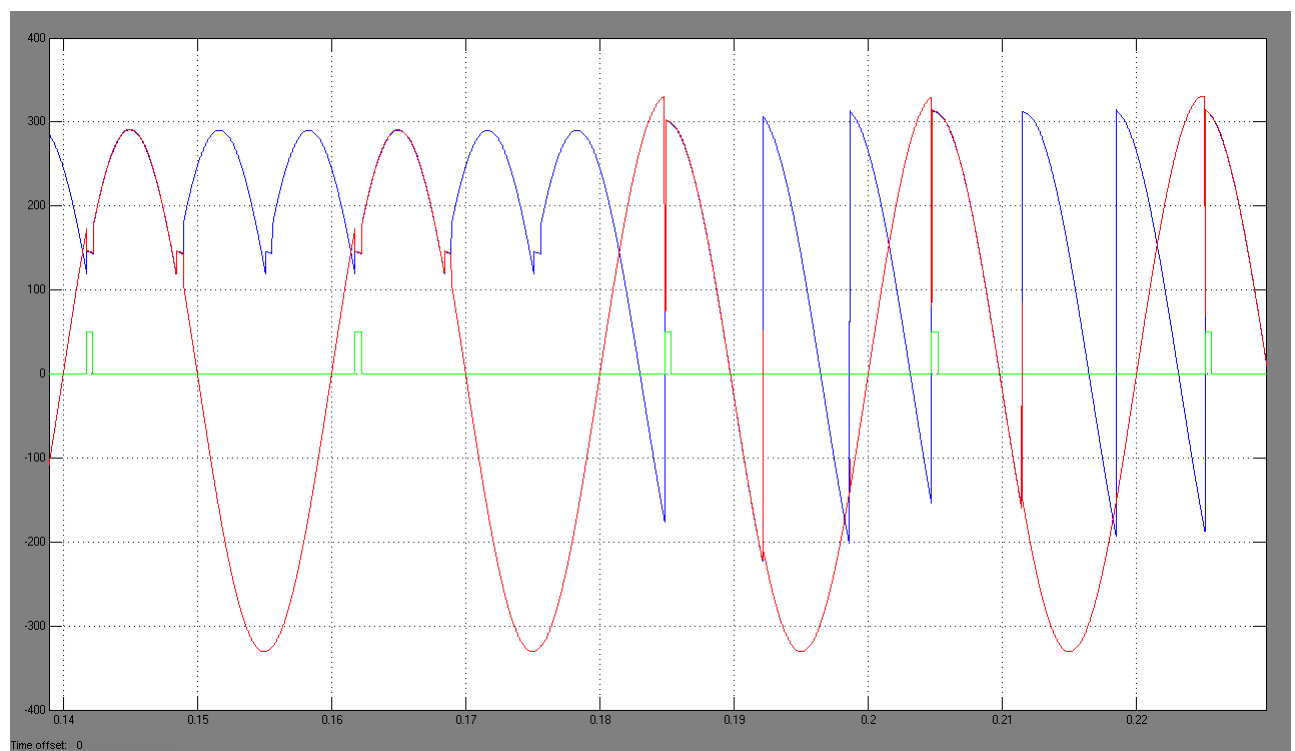
Napięcie zadane, mierzone, wyfiltrowane mierzone; prąd zadany, mierzony i wyfiltrowany mierzony



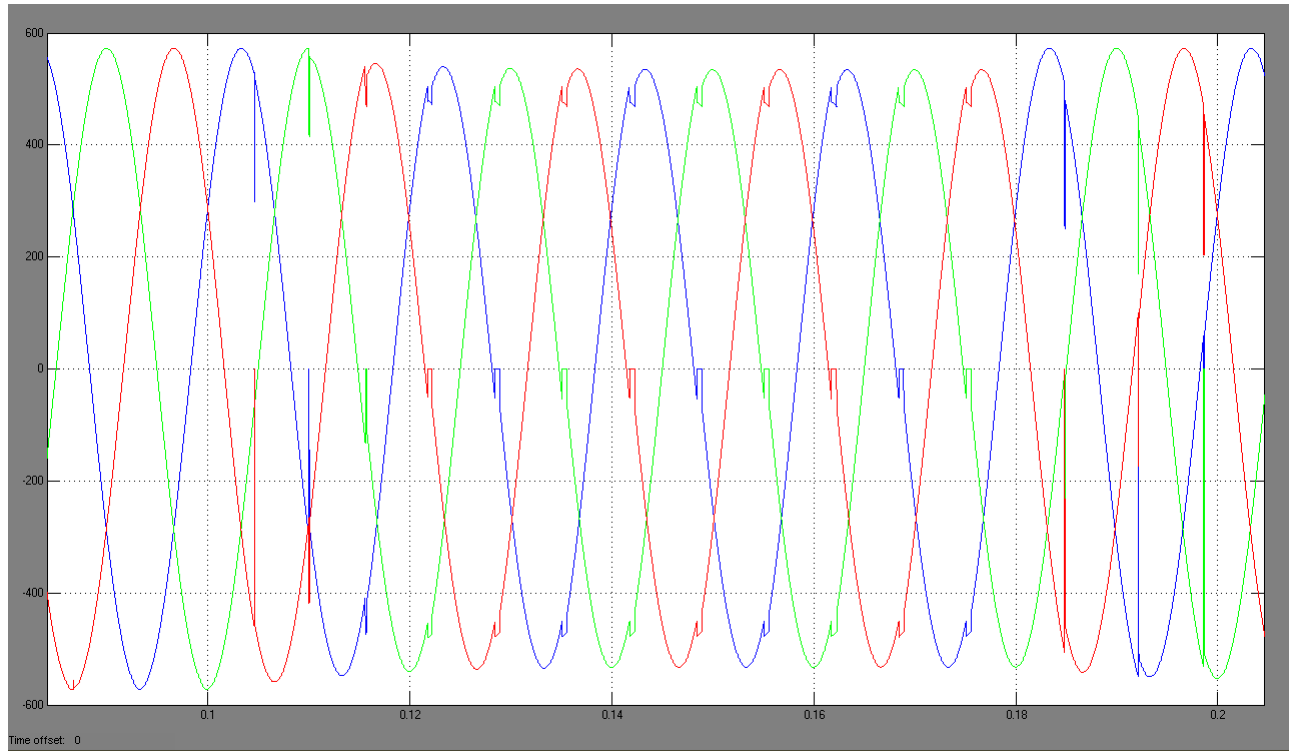
Kąt sterowania przekształtnikiem



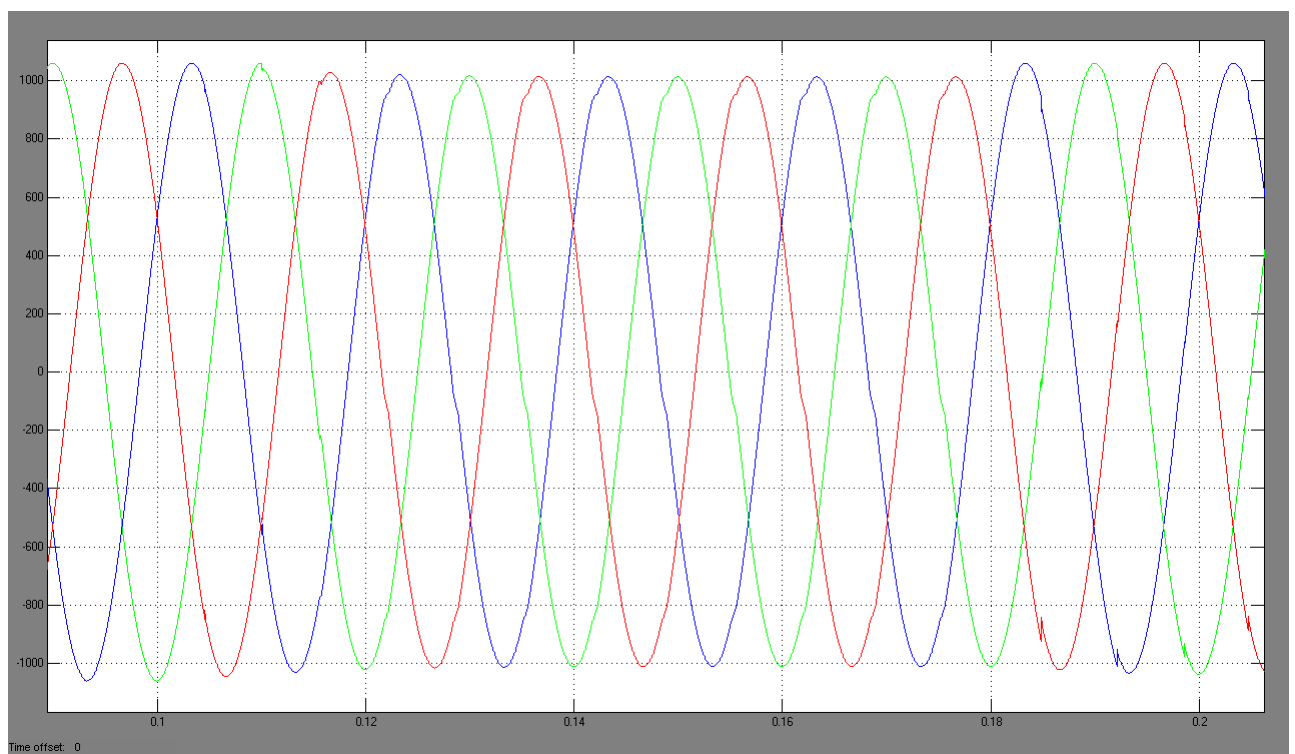
Napięcie na odbiorniku, impulsy sterujące oraz napięcie fazowe na tyrystorze



Napięcie na odbiorniku, impulsy sterujące oraz napięcie fazowe na tyrystorze

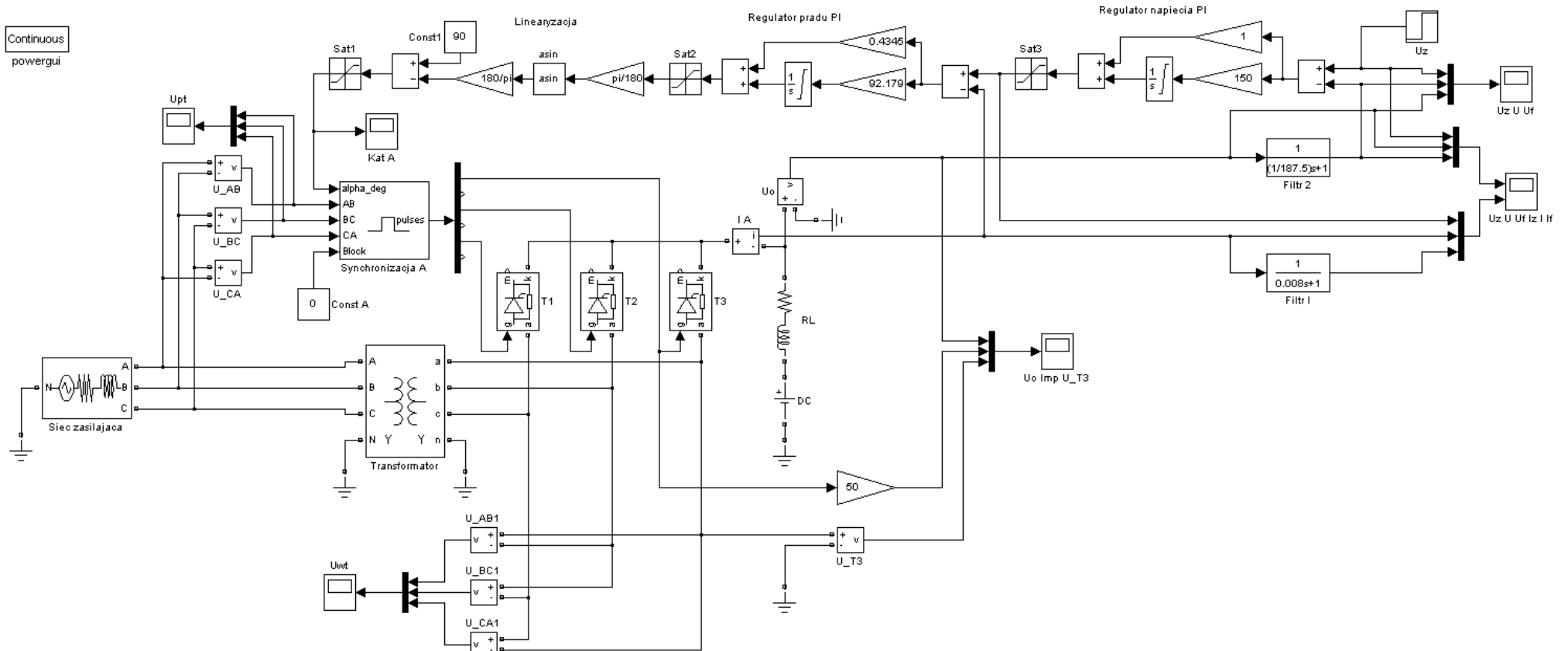


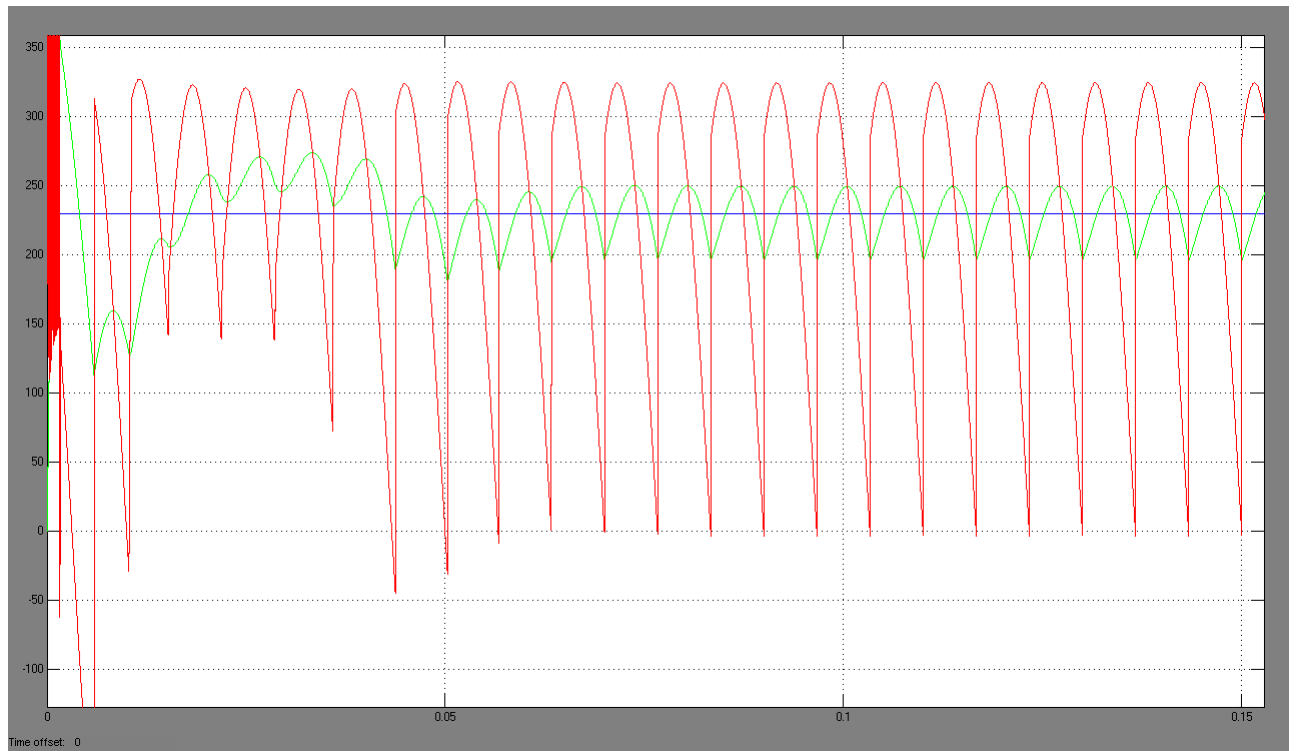
Napięcie strony wtórnej transformatora



Napięcie strony pierwotnej transformatora

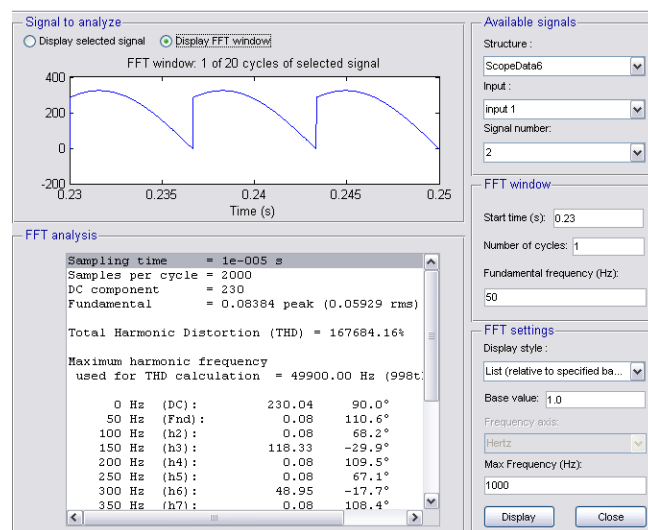
System sterowania napięciem odbiornika RL+E



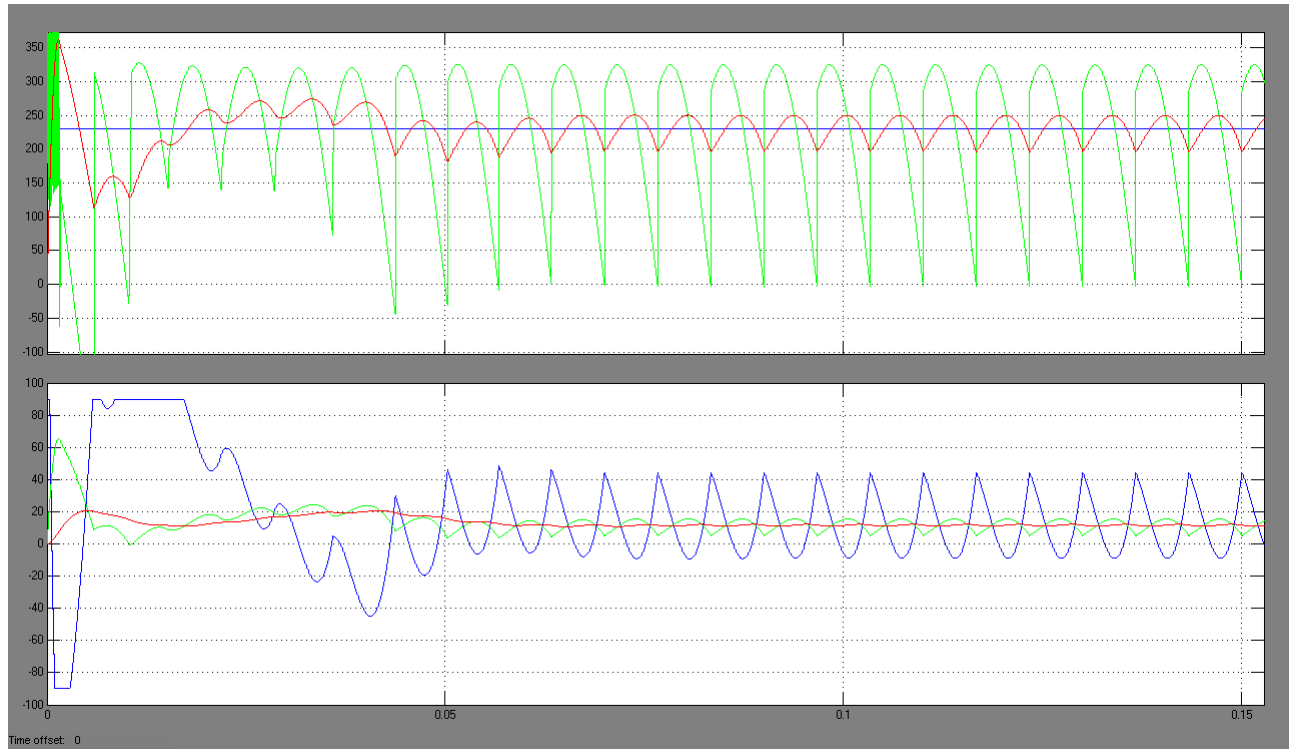


Napięcie zadane, mierzone, wyfiltrowane mierzone

dla $t \in [0; 0.15)$: $U_z = 230V$, $U_{DC} = 200V$

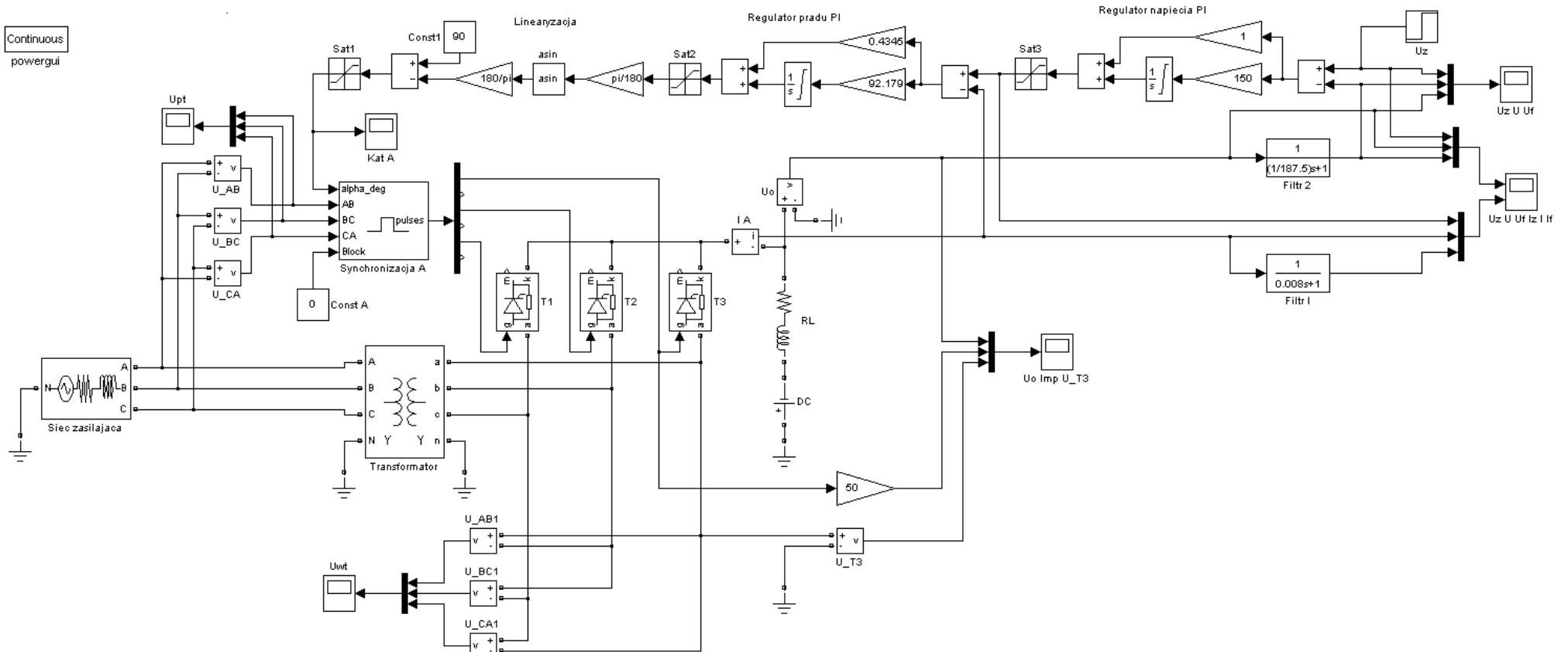


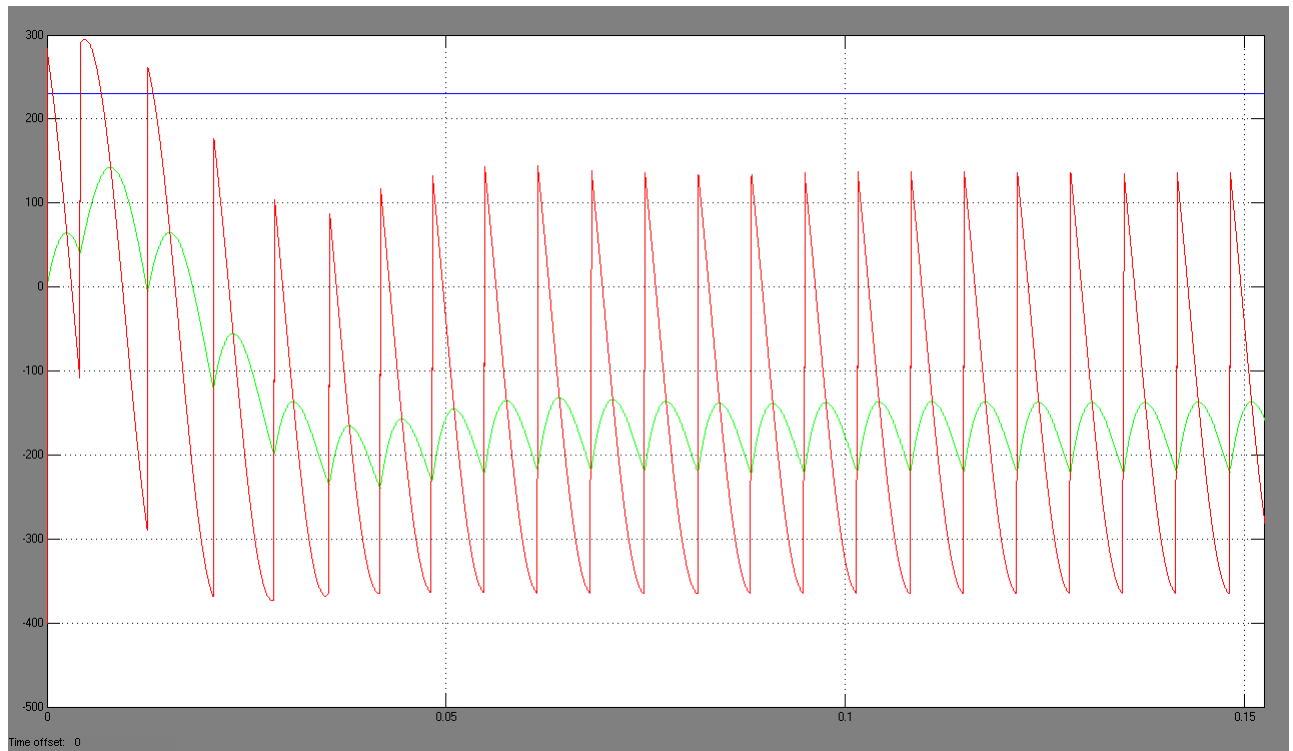
Analiza na zawartość harmoniczną w napięciu odbiornika



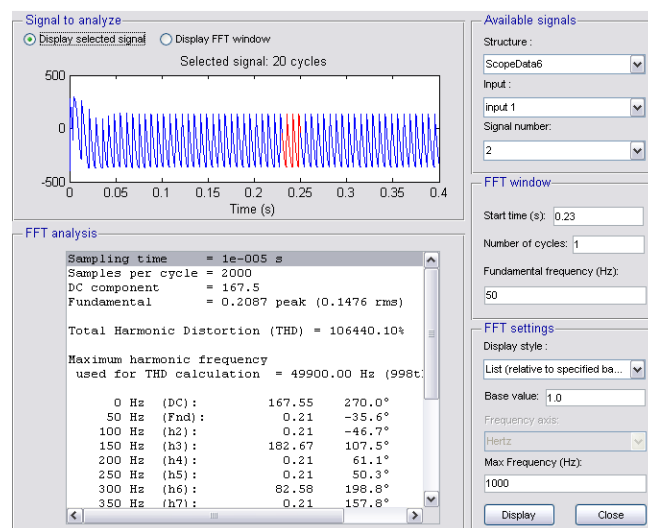
Napięcie zadane, mierzone, wyfiltrowane mierzone; prąd zadany, mierzony i wyfiltrowany mierzony

System sterowania napięciem odbiornika RL-E

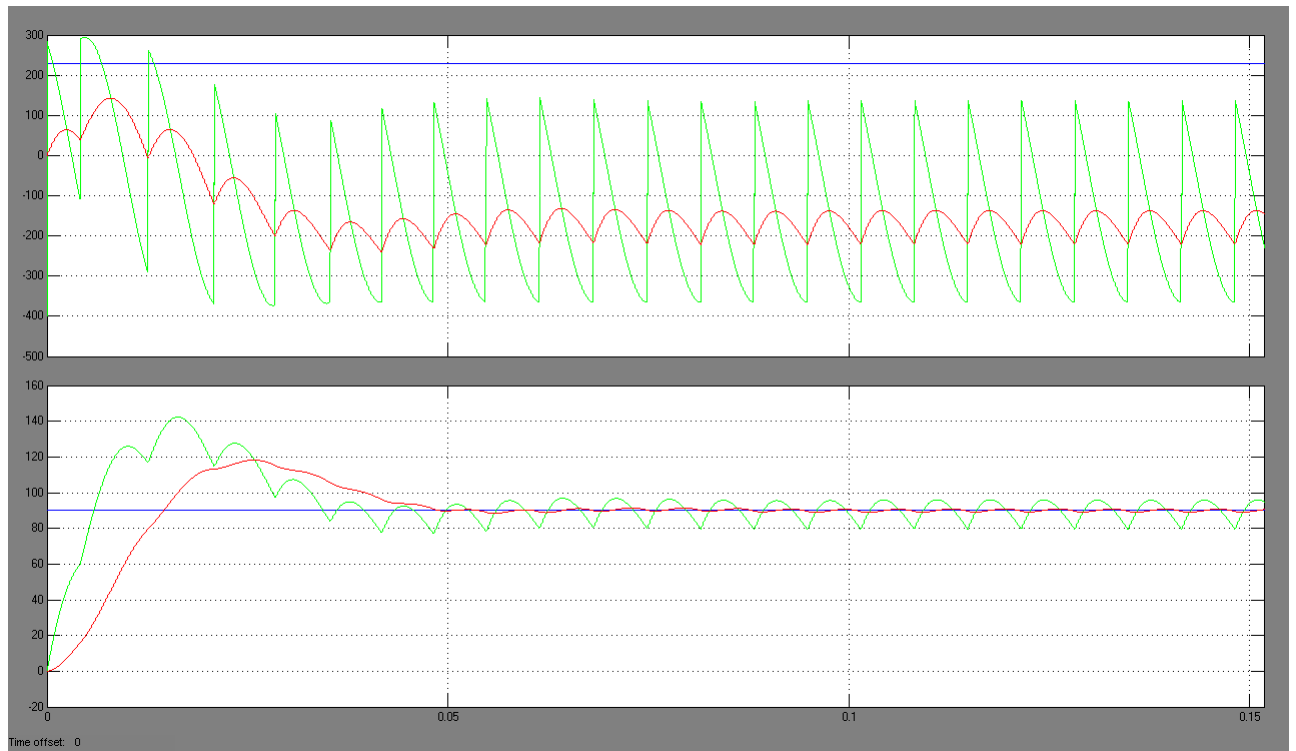




Napięcie zadane, mierzone, wyfiltrowane mierzone
dla $t \in [0; 0.15)$: $U_z = 230V$, $U_{DC} = -400V$

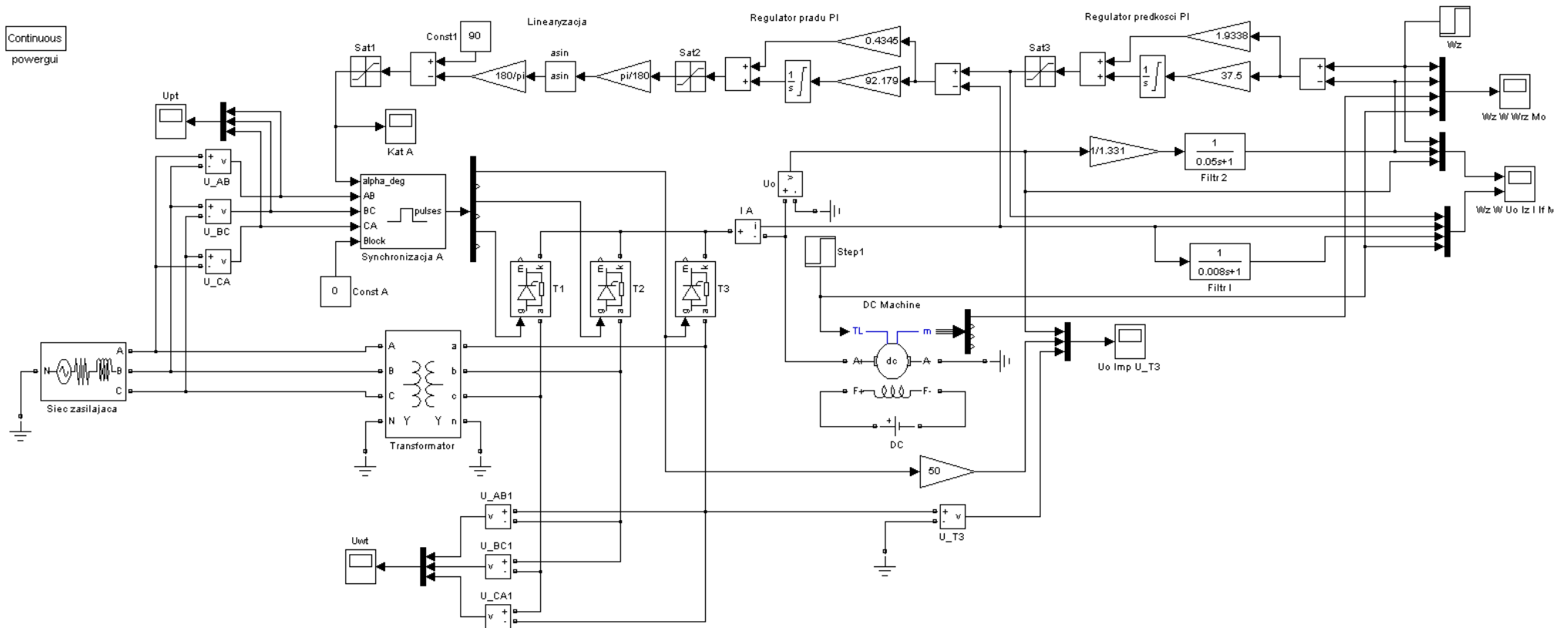


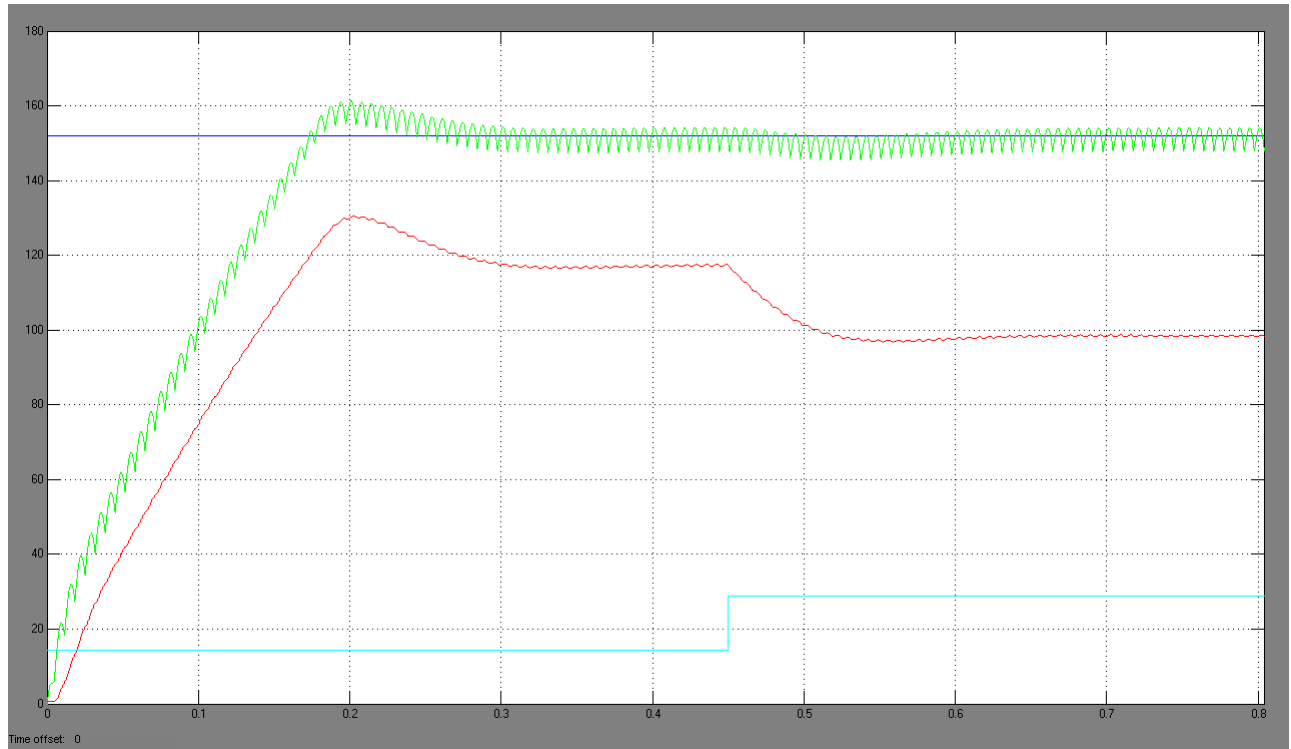
Analiza na zawartość harmoniczną w napięciu odbiornika



Napięcie zadane, mierzone, wyfiltrowane mierzone; prąd zadany, mierzony i wyfiltrowany mierzony

System sterowania napięciem sprowadzonym do prędkości OSPS

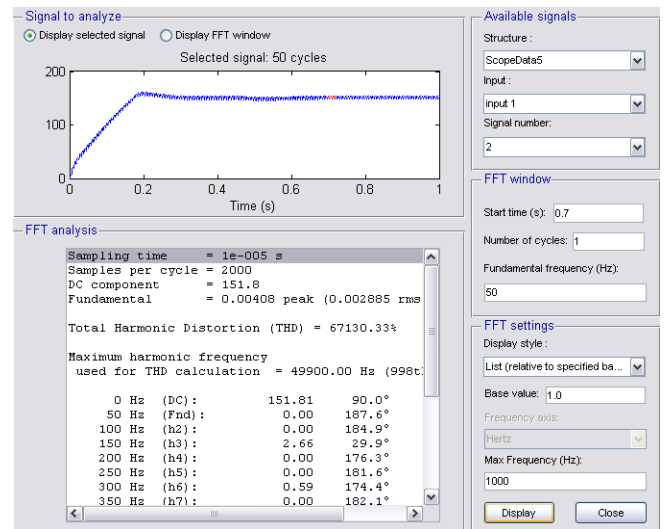
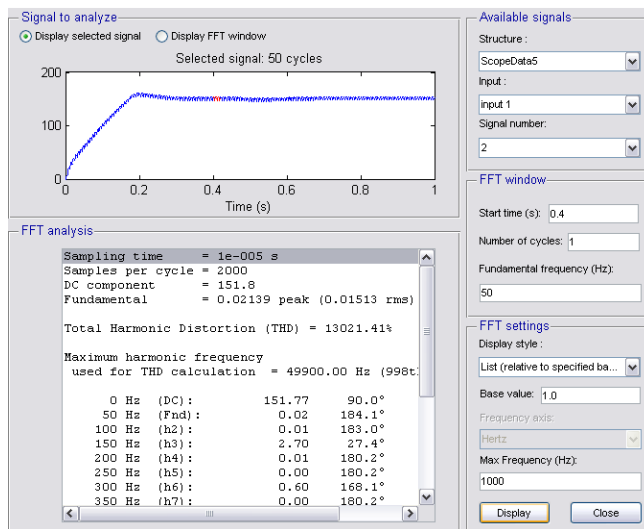




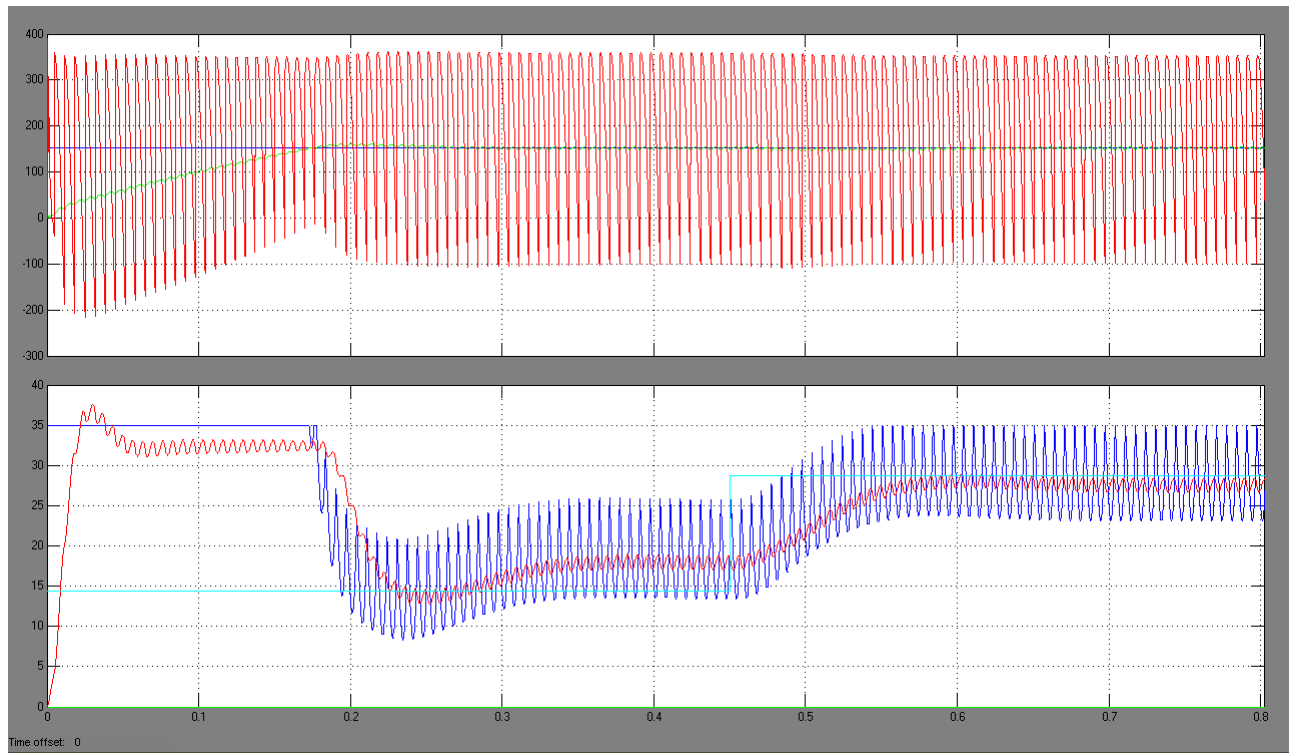
Prędkość zadana, mierzona, rzeczywista mierzona oraz moment obciążenia

$$\text{dla } t \in [0; 0.45): \quad \omega_z = 151.844 \frac{\text{rad}}{\text{s}}, \quad M_o = 14.385 N \cdot m$$

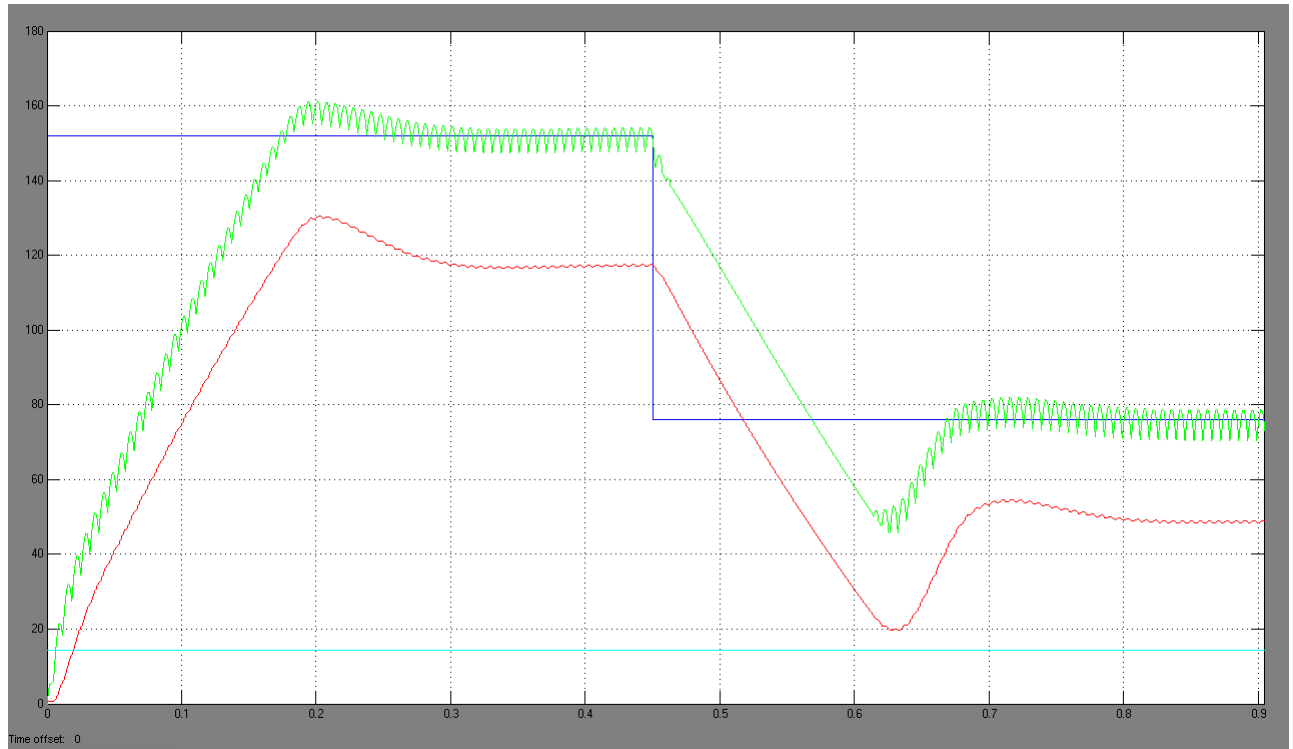
$$\text{dla } t \in [0.45; 0.8]: \quad \omega_z = 151.844 \frac{\text{rad}}{\text{s}}, \quad M_o = 28.77 N \cdot m$$



Analiza na zawartość harmoniczną w przebiegu prędkości silnika



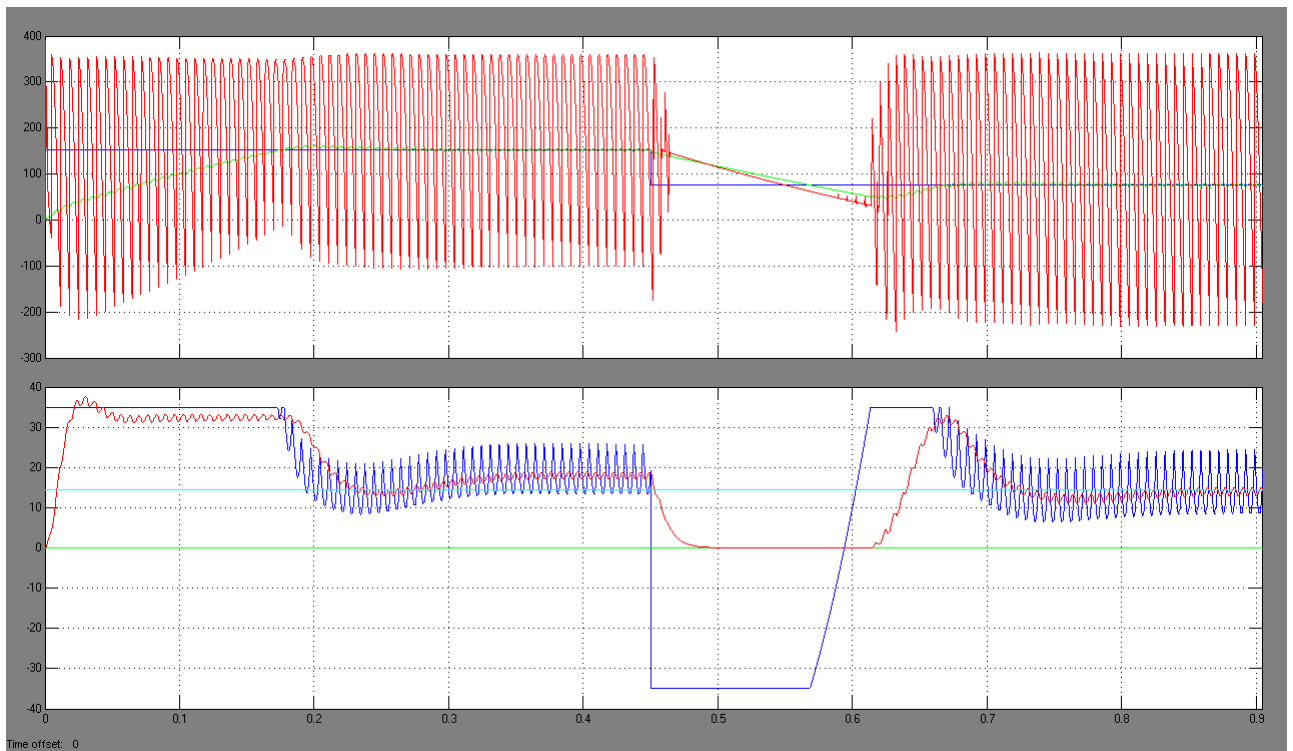
Prędkość zadana, mierzona, napięcie zasilające, prąd zadany, wyfiltrowany mierzony, moment obciążenia



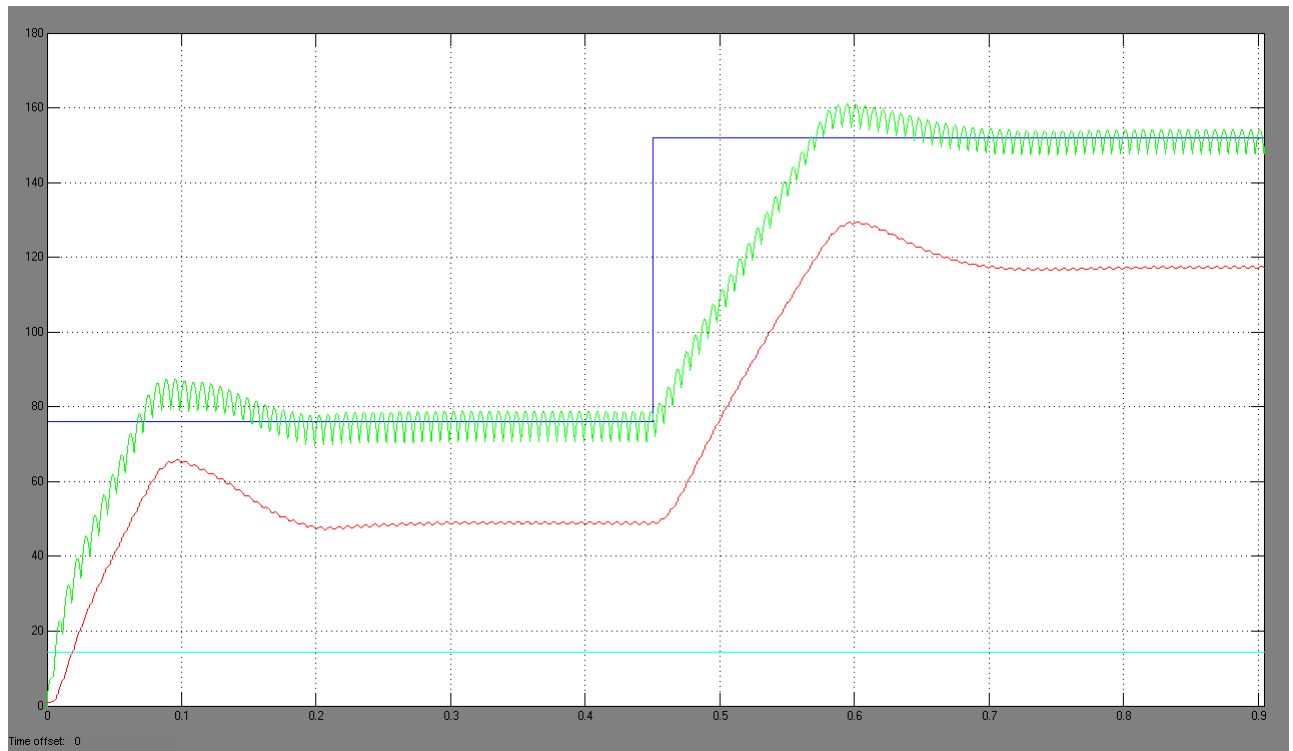
Prędkość zadana, mierzona, moment obciążenia

$$\text{dla } t \in [0; 0.45]: \quad \omega_z = 151.844 \frac{\text{rad}}{\text{s}}, \quad M_o = 14.385 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$\text{dla } t \in [0.45; 0.9]: \quad \omega_z = 75.922 \frac{\text{rad}}{\text{s}}, \quad M_o = 14.385 \text{ N} \cdot \text{m}$$



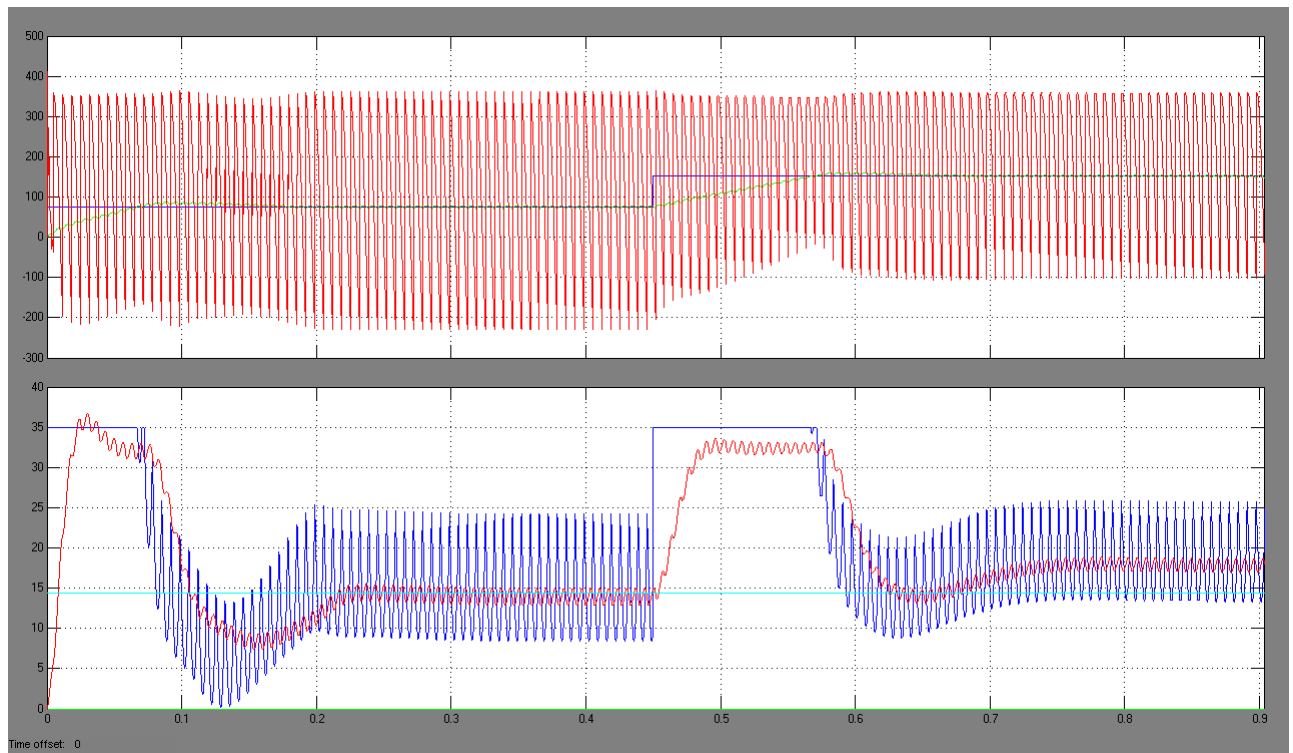
Prędkość zadana, mierzona, napięcie zasilające, prąd zadany, wyfiltrowany mierzony, moment obciążenia



Prędkość zadana, mierzona, moment obciążenia

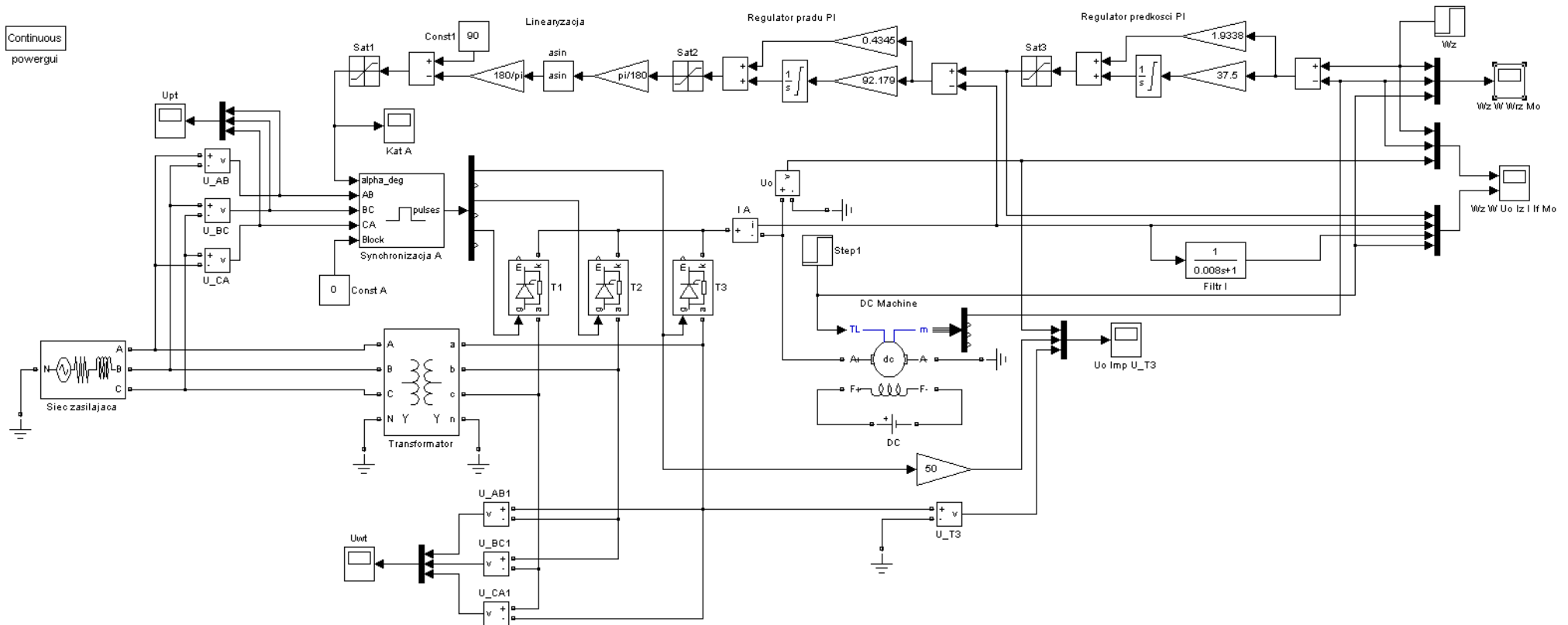
$$\text{dla } t \in [0; 0.45): \quad \omega_z = 75.922 \frac{\text{rad}}{\text{s}}, \quad M_o = 14.385 \text{ N} \cdot \text{m}$$

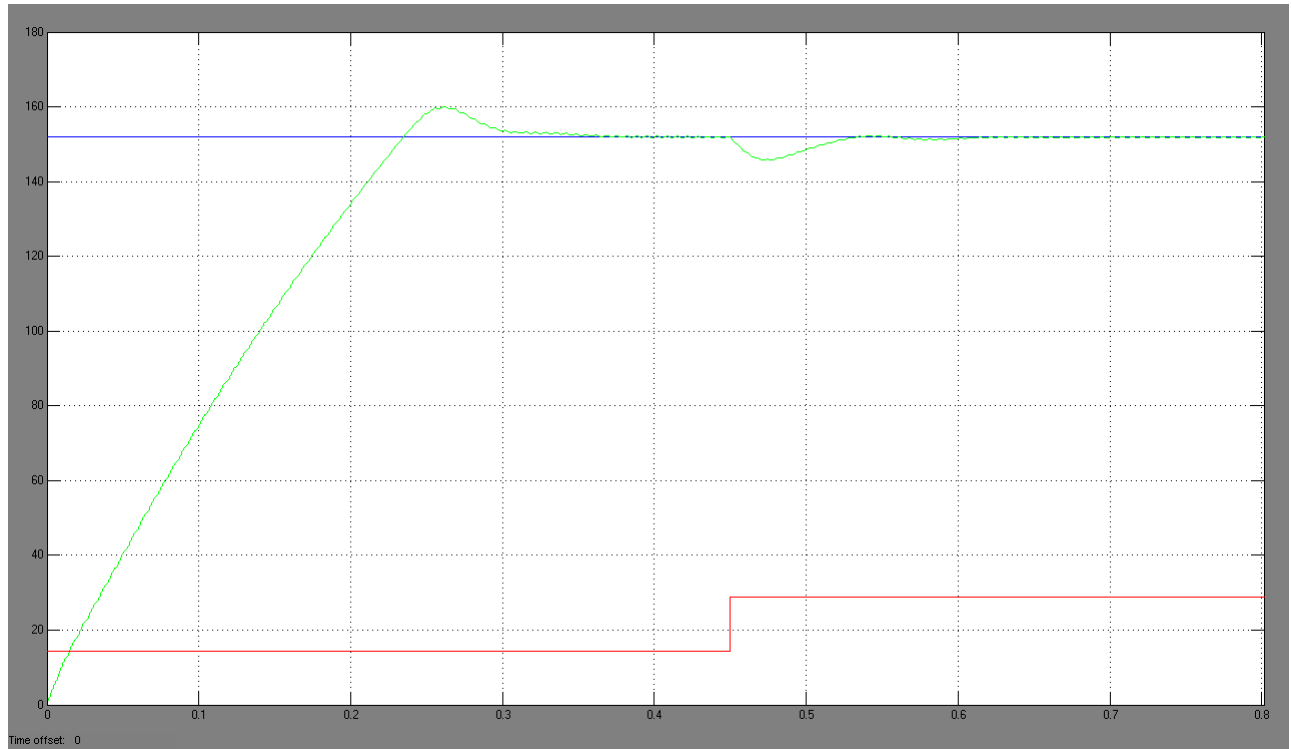
$$\text{dla } t \in [0.45; 0.9]: \quad \omega_z = 151.844 \frac{\text{rad}}{\text{s}}, \quad M_o = 14.385 \text{ N} \cdot \text{m}$$



Prędkość zadana, mierzona, napięcie zasilające, prąd zadany, wyfiltrowany mierzony, moment obciążenia

System sterowania prędkością OSPS

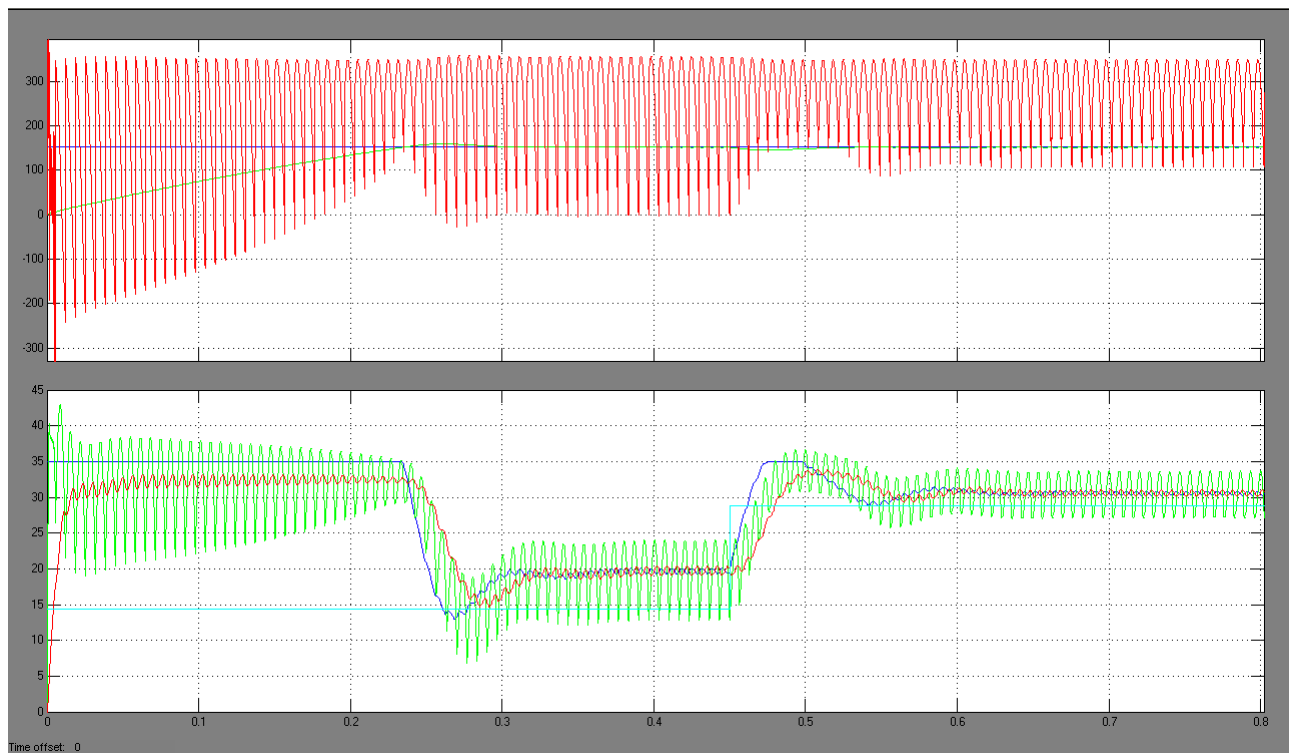




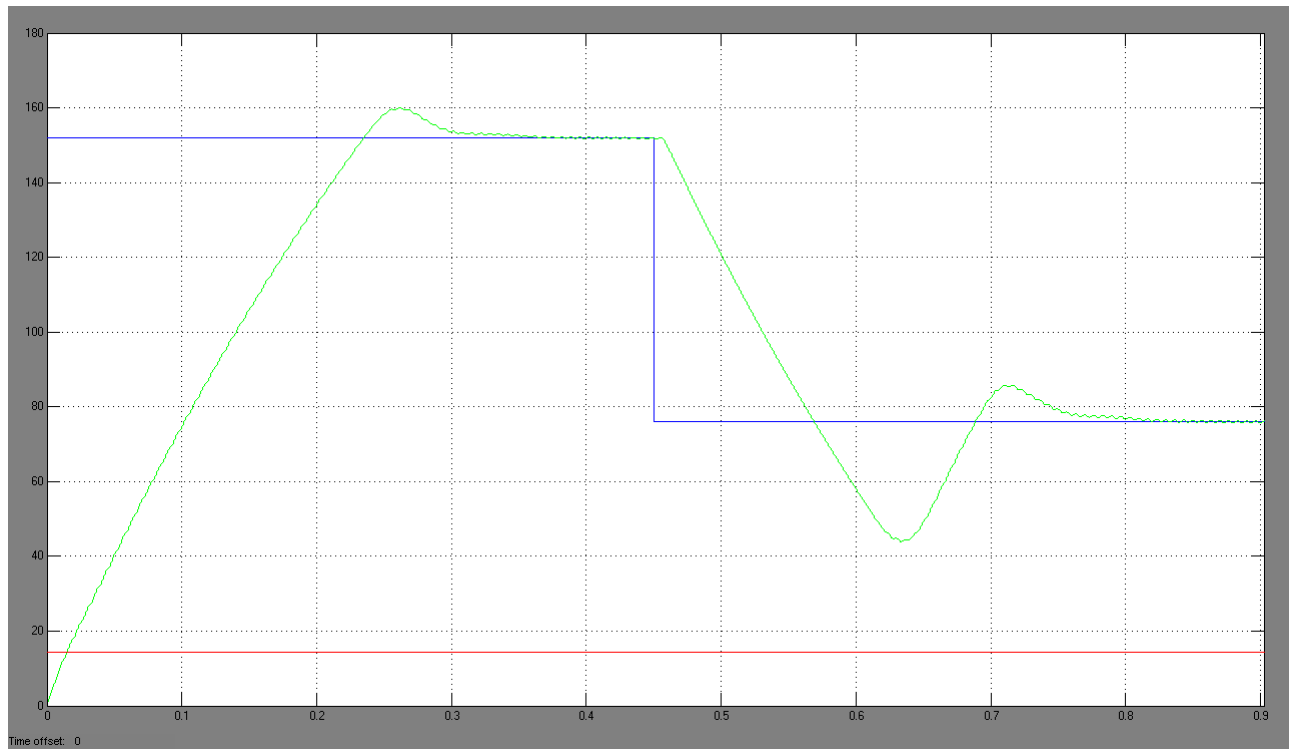
Prędkość zadana, mierzona, moment obciążenia

$$\text{dla } t \in [0; 0.45]: \quad \omega_z = 151.844 \frac{\text{rad}}{\text{s}}, \quad M_o = 14.385 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$\text{dla } t \in [0.45; 0.8]: \quad \omega_z = 151.844 \frac{\text{rad}}{\text{s}}, \quad M_o = 28.77 \text{ N} \cdot \text{m}$$



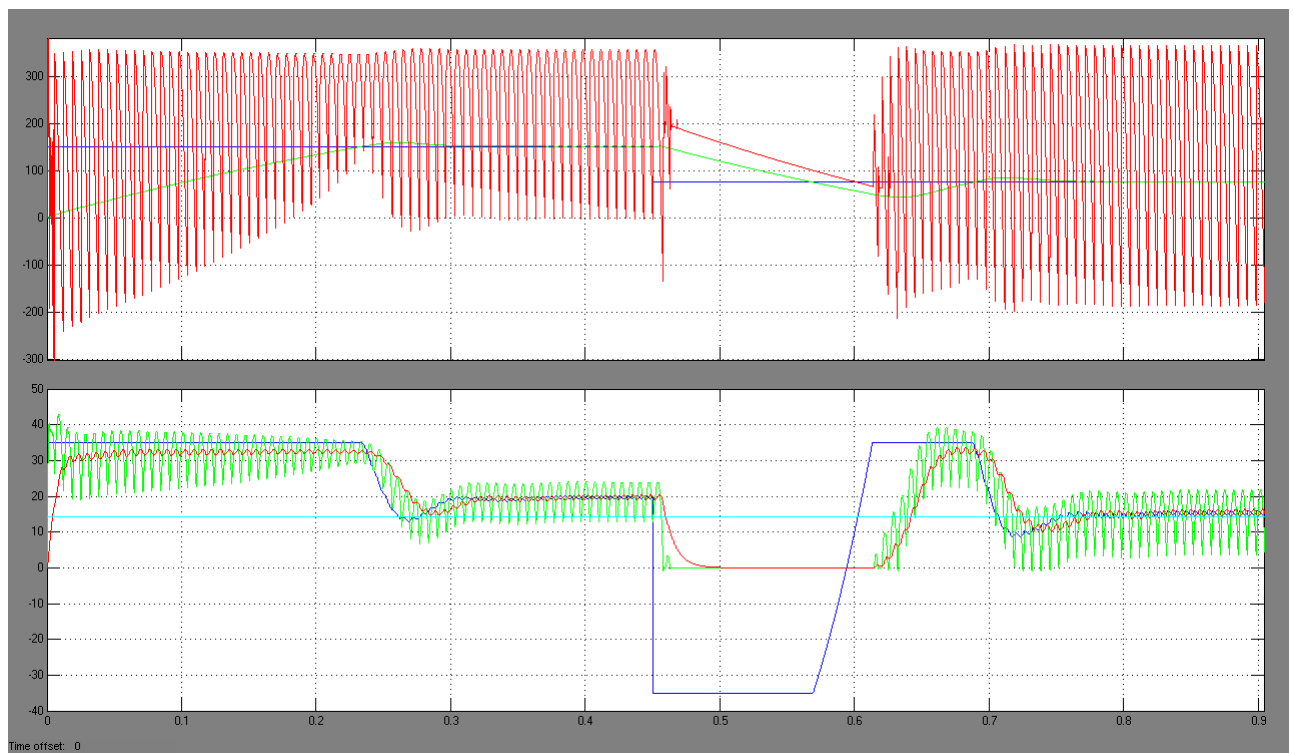
Prędkość zadana, mierzona, napięcie zasilające, prąd zadany, mierzony, wyfiltrowany mierzony, moment obciążenia



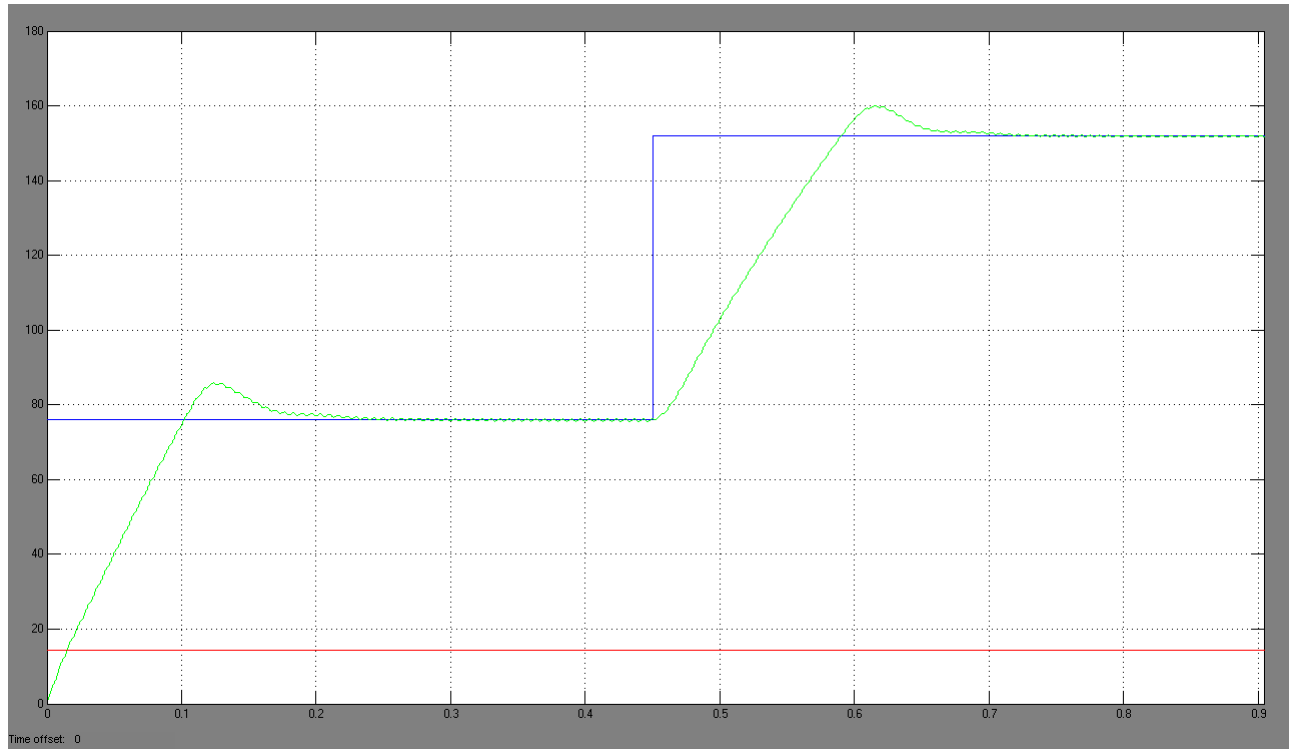
Prędkość zadana, mierzona, moment obciążenia

dla $t \in [0; 0.45)$: $\omega_z = 151.844 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$, $M_o = 14.385 \text{ N} \cdot \text{m}$

dla $t \in [0.45; 0.9]$: $\omega_z = 75.922 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$, $M_o = 14.385 \text{ N} \cdot \text{m}$



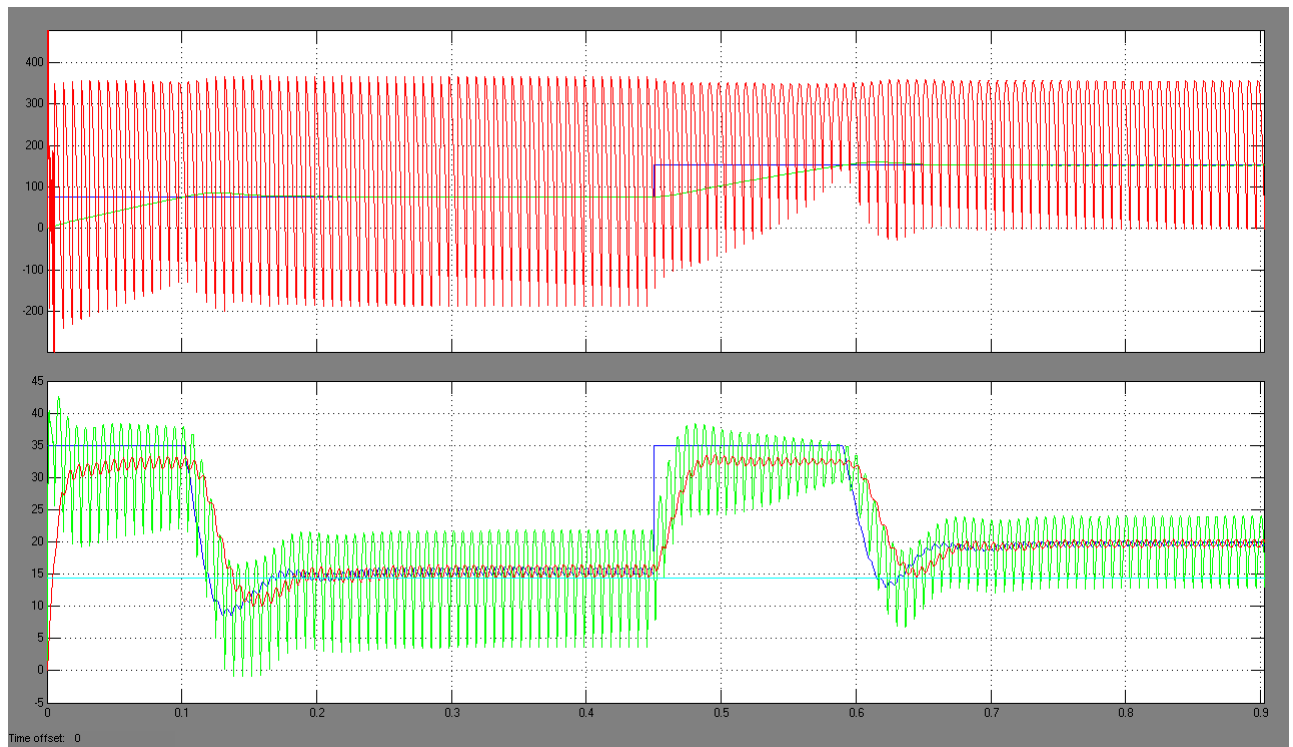
Prędkość zadana, mierzona, napięcie zasilające, prąd zadany, mierzony, wyfiltrowany mierzony, moment obciążenia



Prędkość zadana, mierzona, moment obciążenia

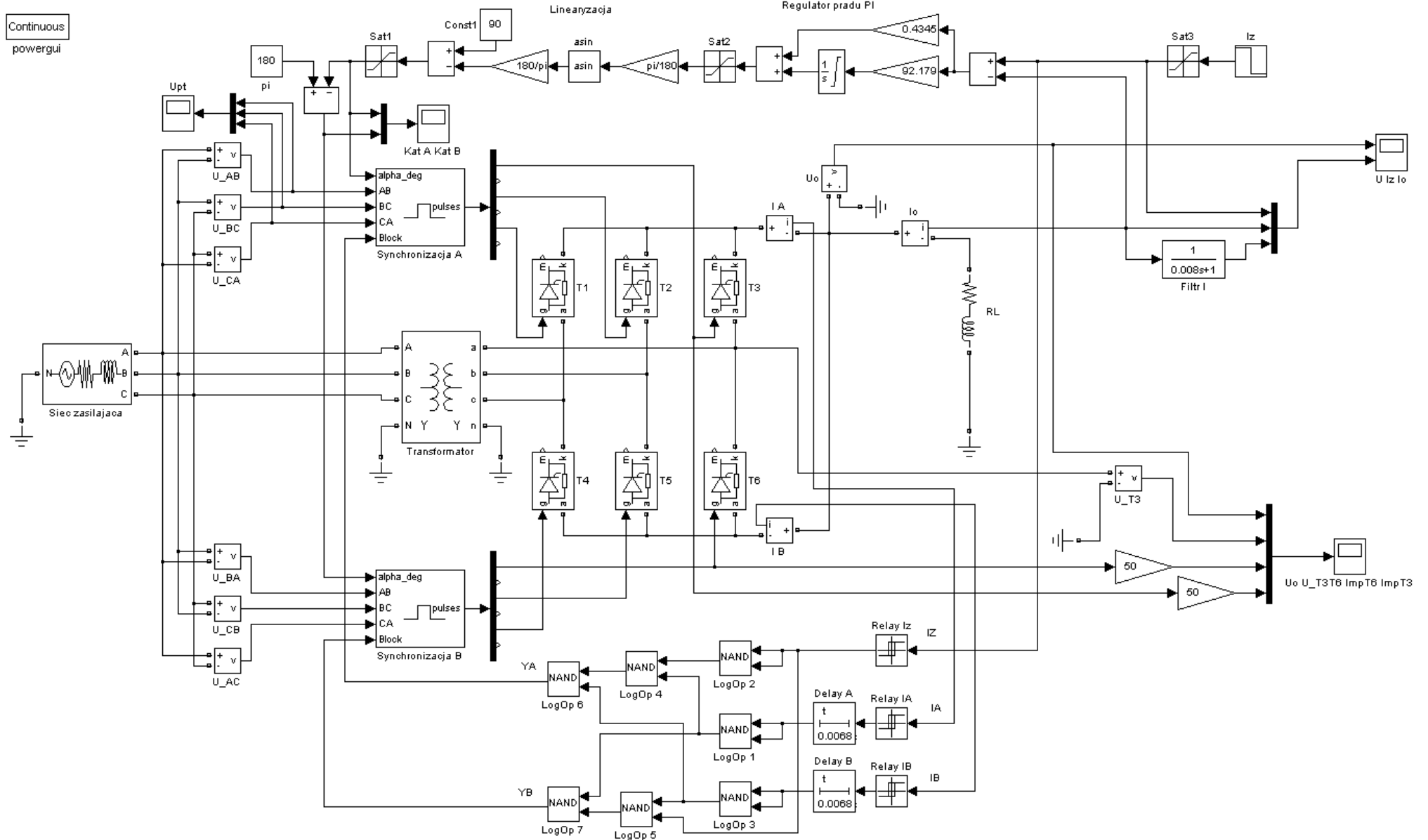
$$\text{dla } t \in [0; 0.45]: \quad \omega_z = 75.922 \frac{\text{rad}}{\text{s}}, \quad M_o = 14.385 \text{ N} \cdot \text{m}$$

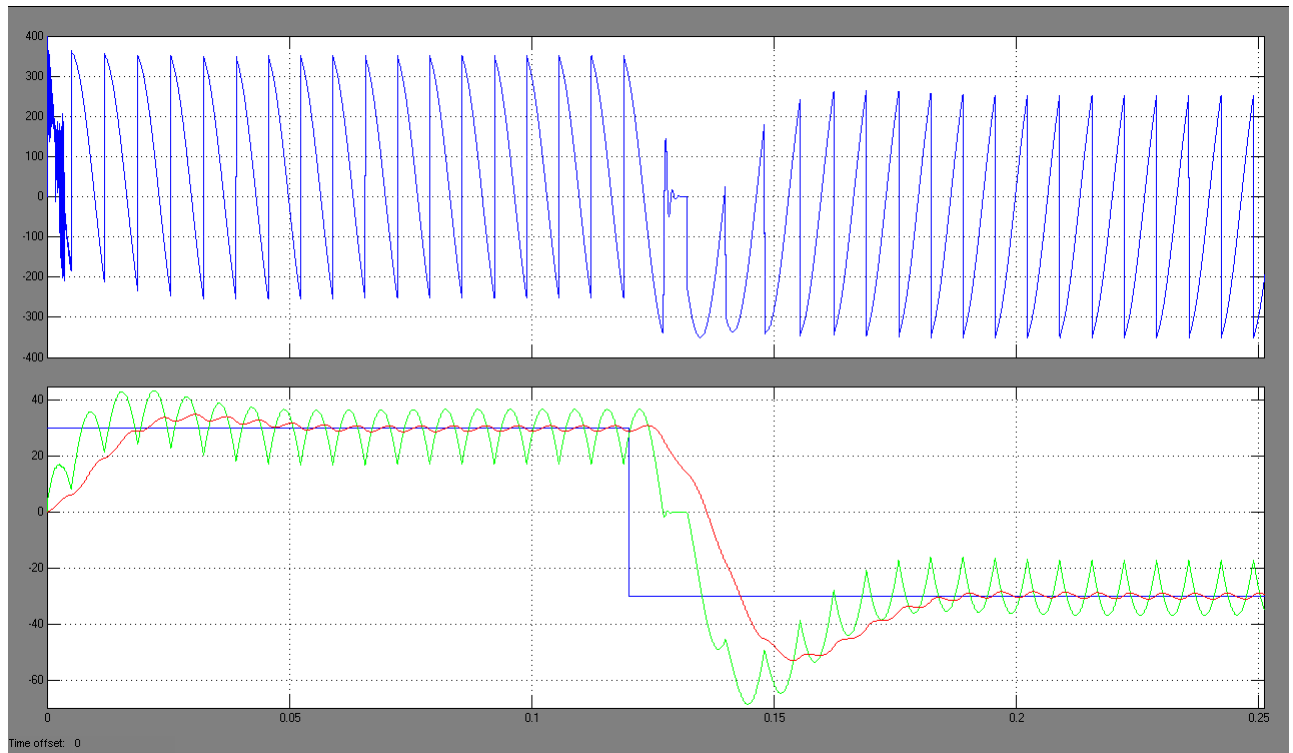
$$\text{dla } t \in [0.45; 0.9]: \quad \omega_z = 151.844 \frac{\text{rad}}{\text{s}}, \quad M_o = 14.385 \text{ N} \cdot \text{m}$$



Prędkość zadana, mierzona, napięcie zasilające, prąd zadany, mierzony, wyfiltrowany mierzony, moment obciążenia

System rewersyjnego sterowania prądem odbiornika RL

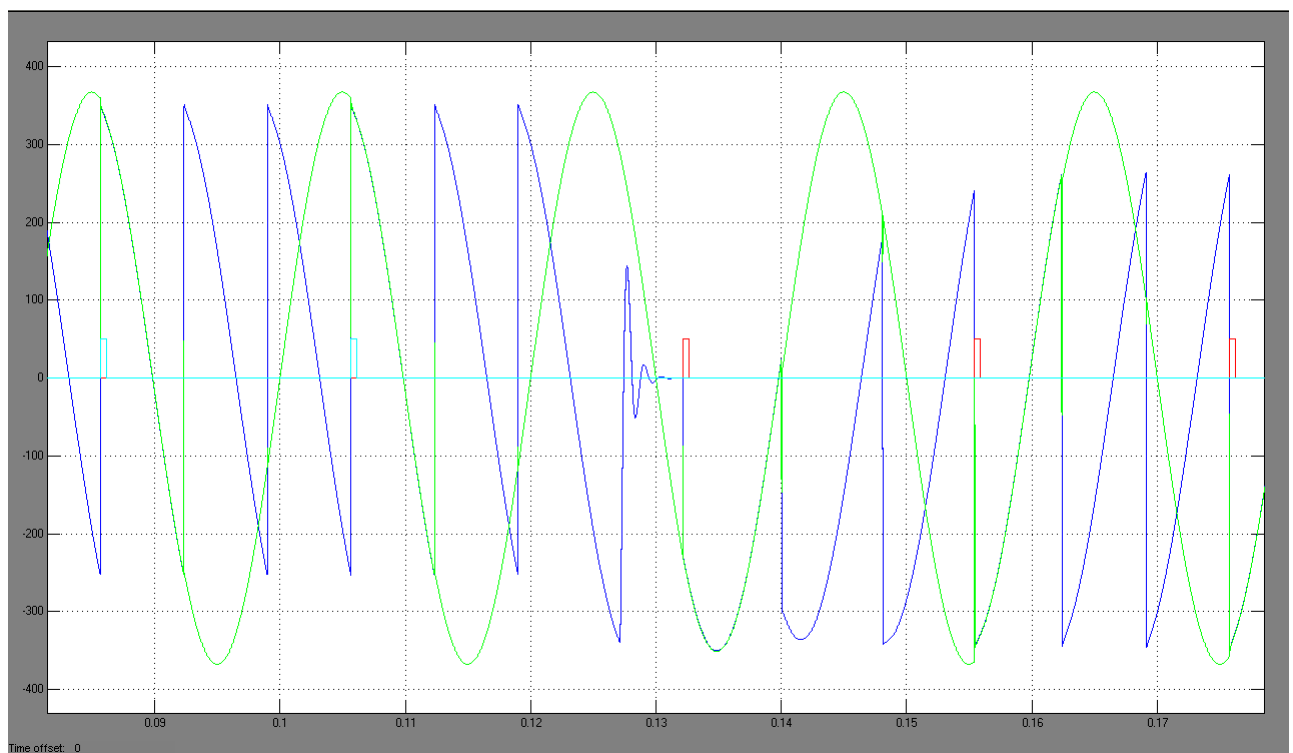




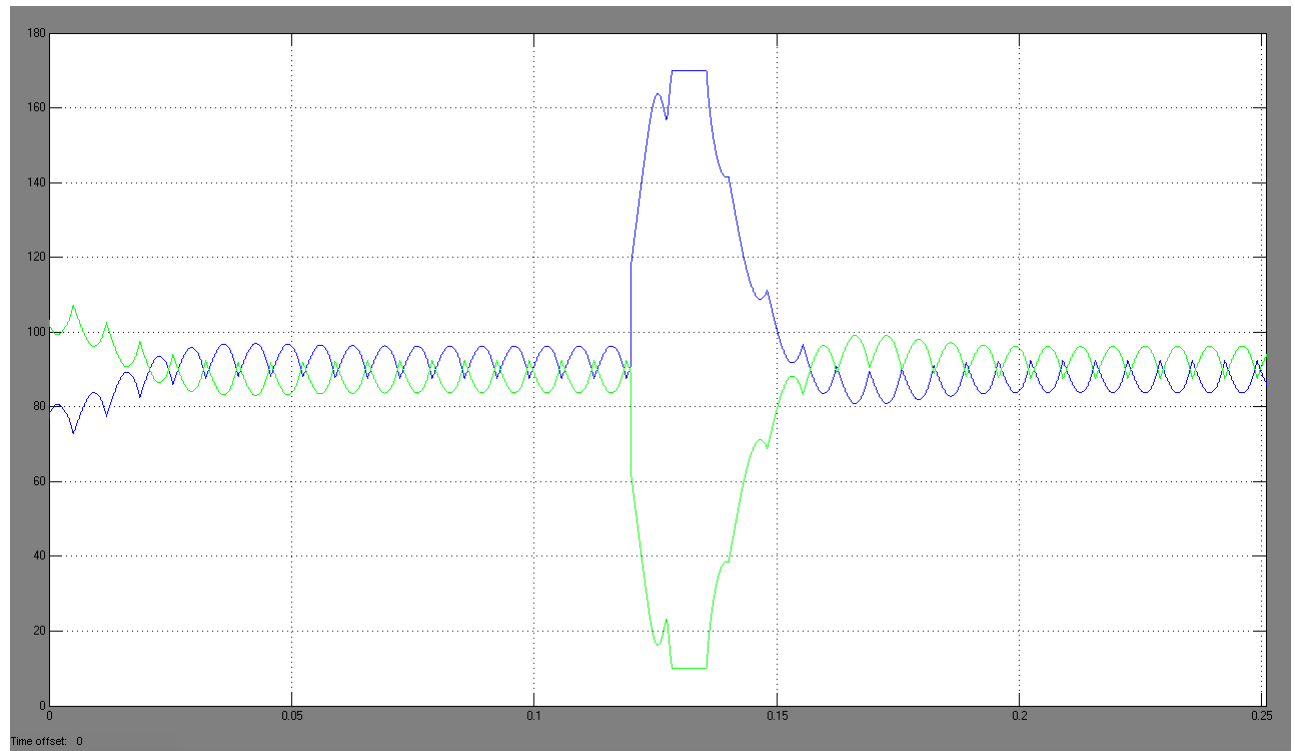
Napięcie, prąd zadany, prąd mierzony oraz wyfiltrowany prąd mierzony

dla $t \in [0;0.12)$: $I_z = 30A$

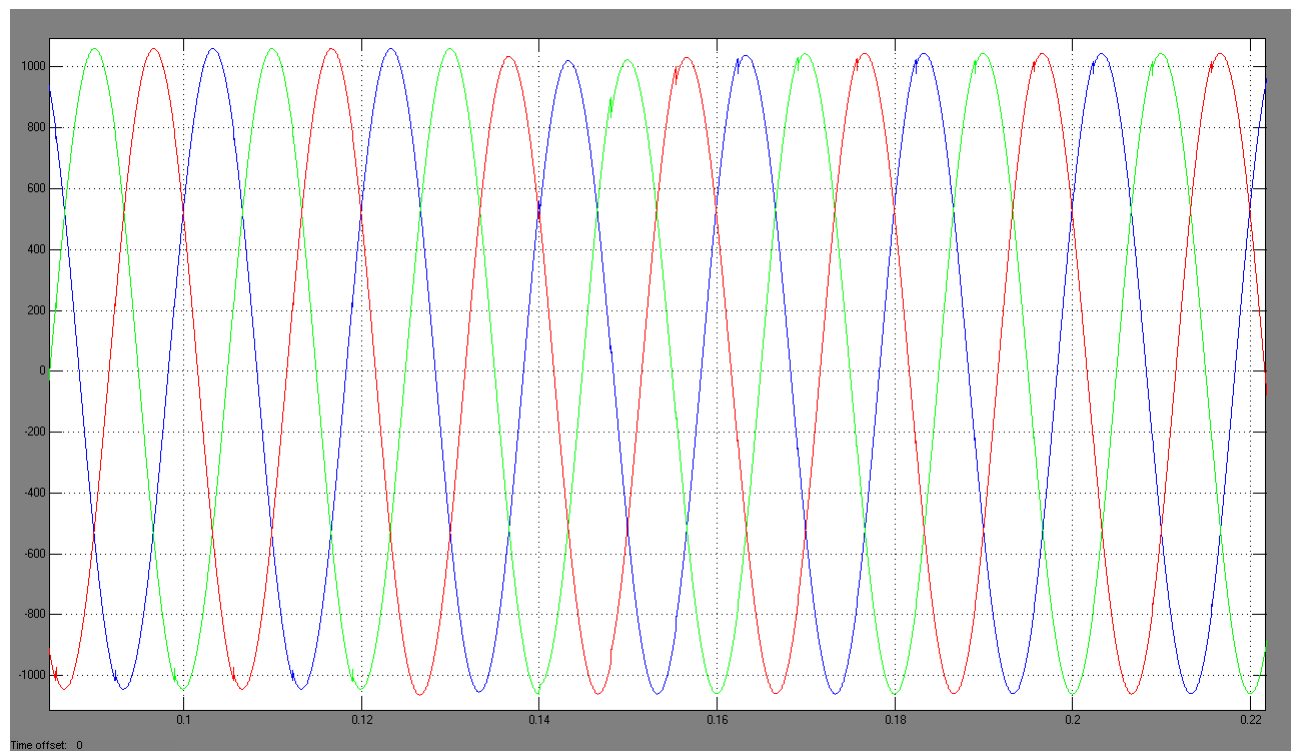
dla $t \in [0.12;0.25]$: $I_z = -30A$



Napięcie na odbiorniku, napięcie fazowe na tyrystorach $T3$ i $T6$ oraz impulsy sterujące tymi tyrystorami

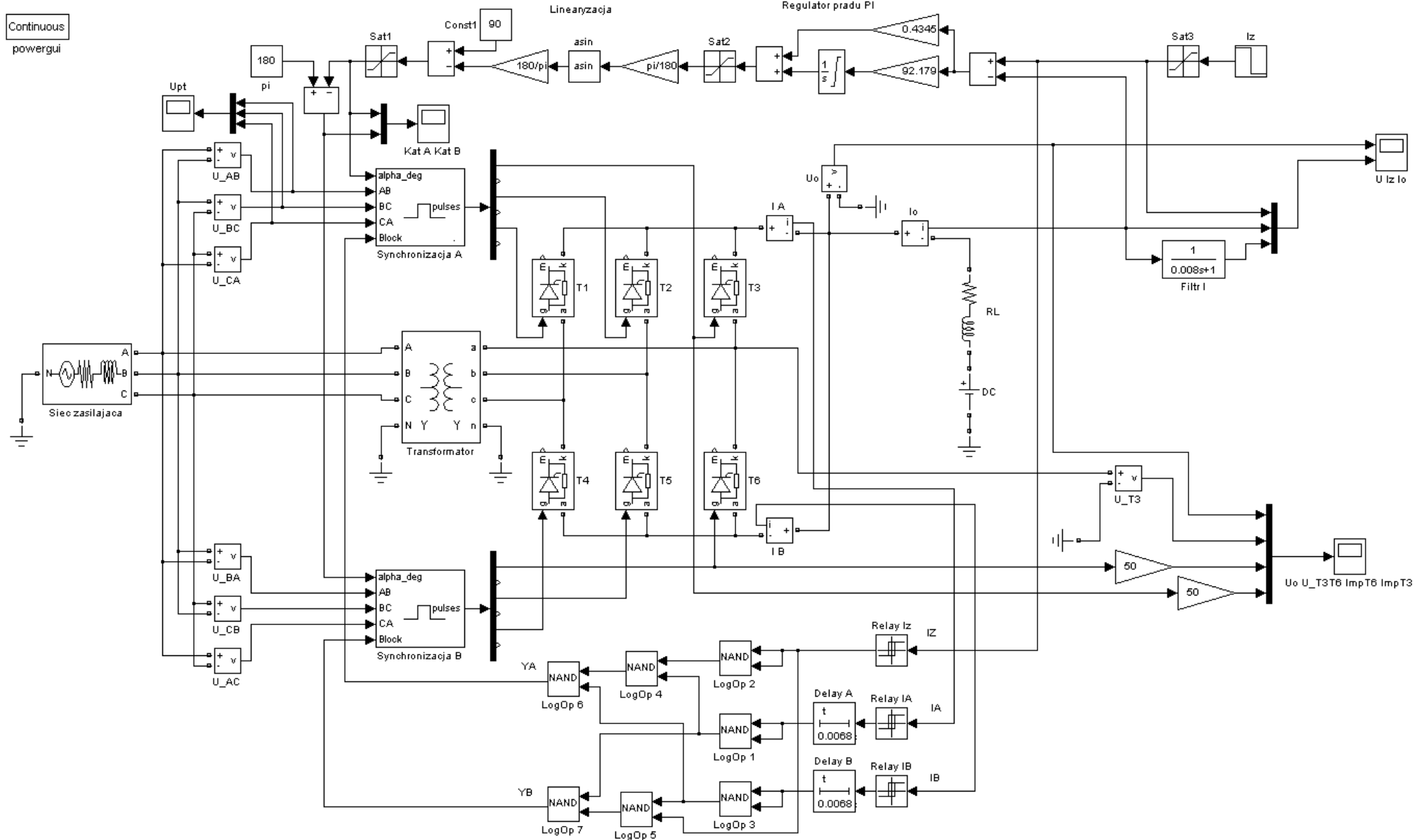


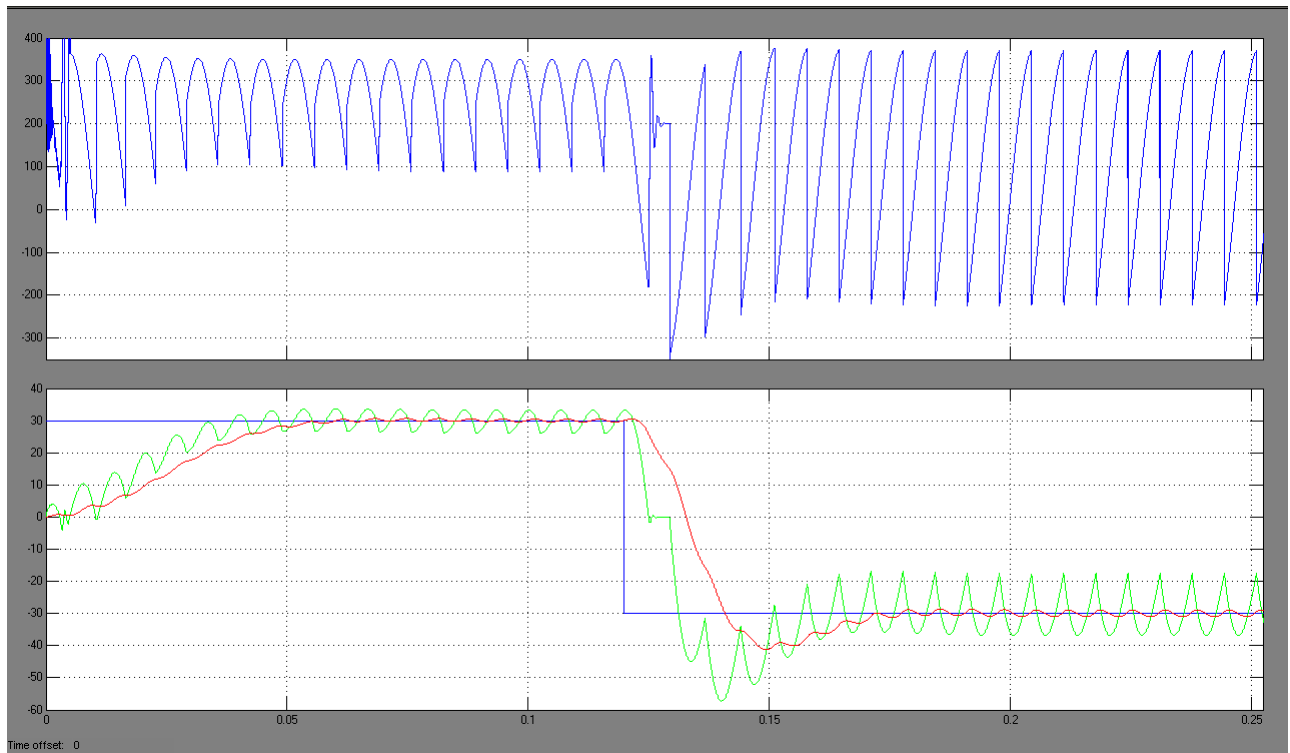
Kąt sterowania przekształtnikiem



Napięcie strony pierwotnej transformatora

System rewersyjnego sterowania prądem odbiornika RL+E

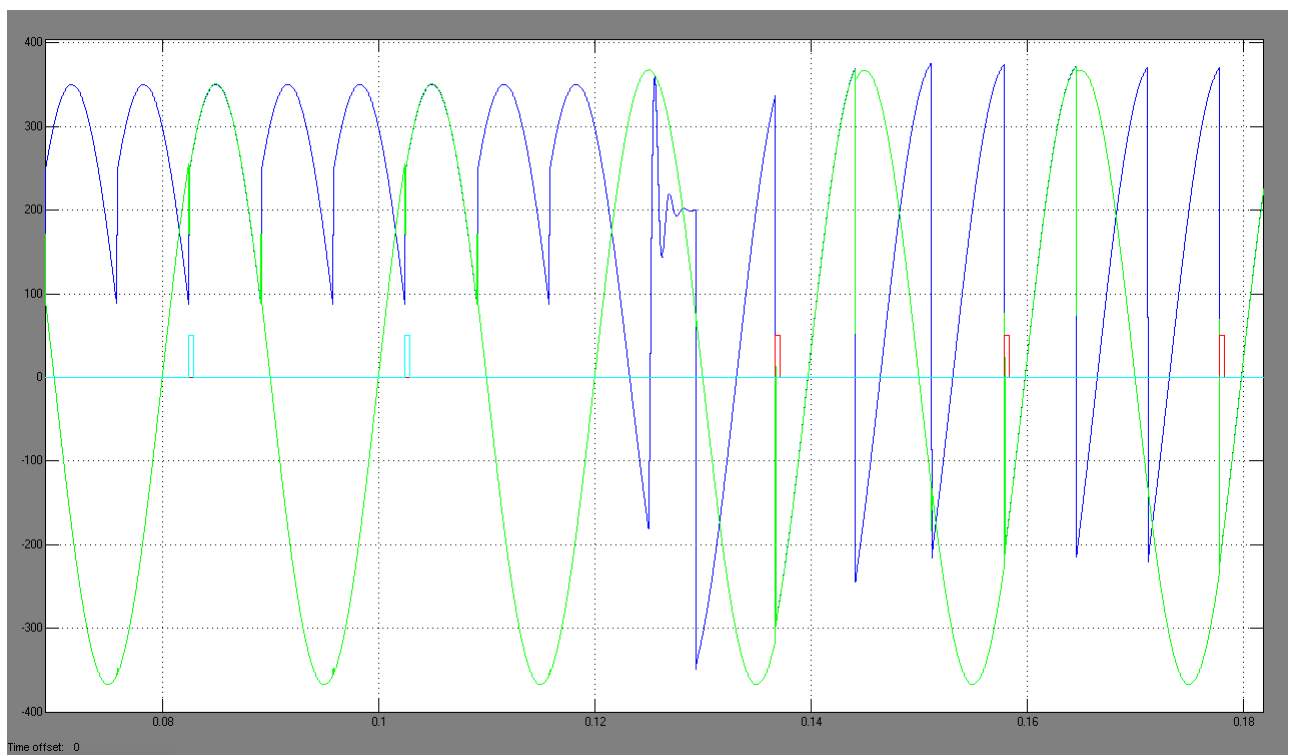




Napięcie, prąd zadany, prąd mierzony oraz wyfiltrowany prąd mierzony

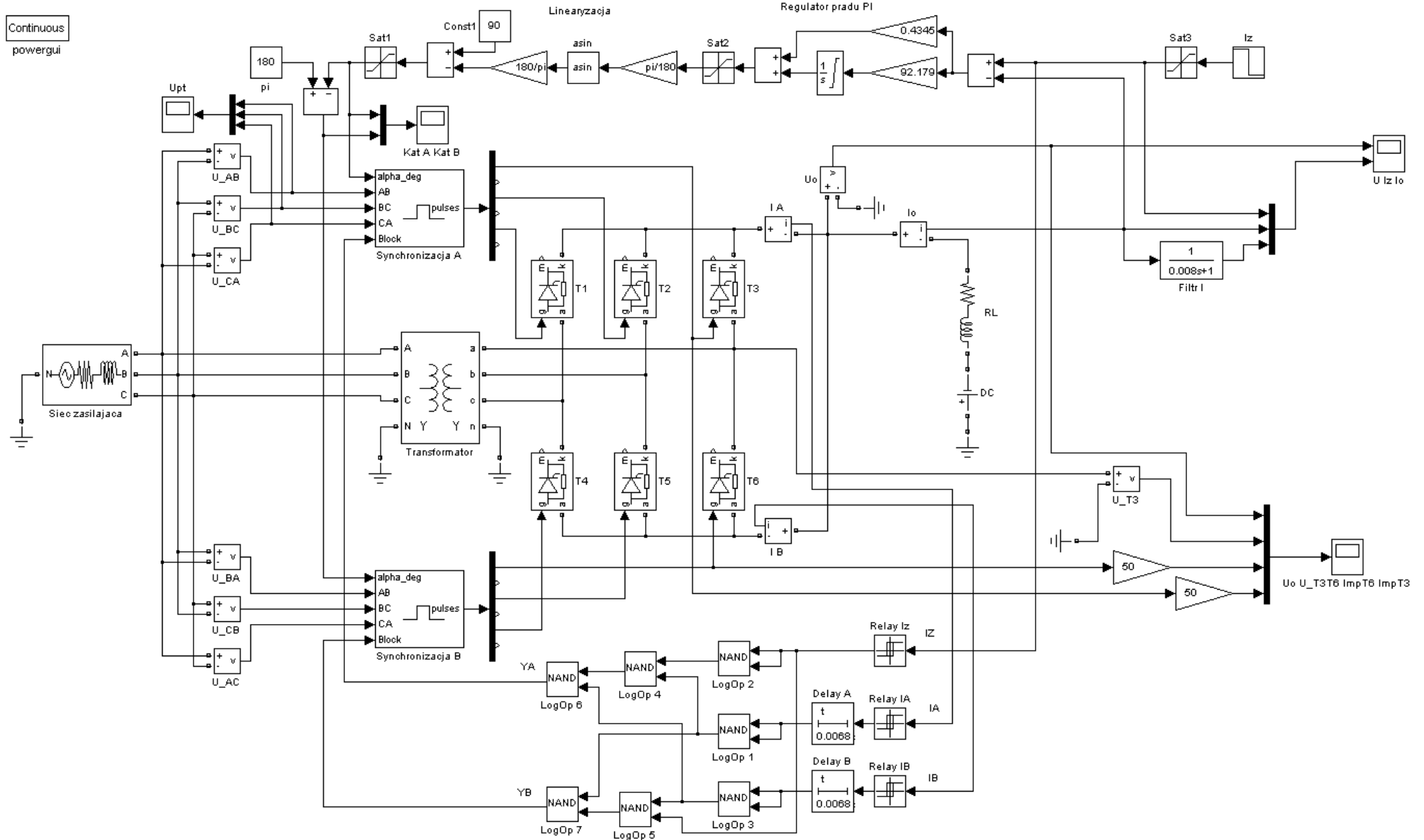
dla $t \in [0;0.12)$: $I_z = 30A$, $U_{DC} = 200V$

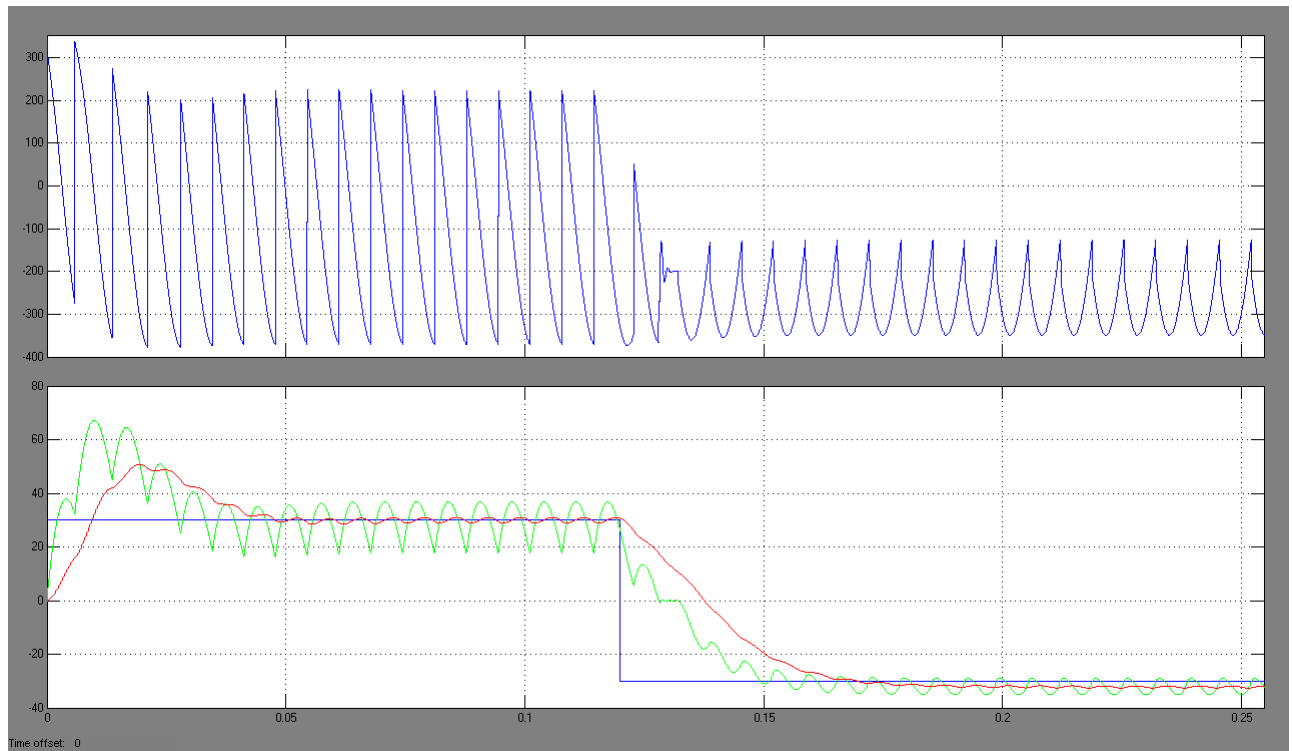
dla $t \in [0.12;0.25]$: $I_z = -30A$, $U_{DC} = 200V$



Napięcie na odbiorniku, napięcie fazowe na tyrystorach $T3$ i $T6$ oraz impulsy sterujące tymi tyrystorami

System rewersyjnego sterowania prądem odbiornika RL-E

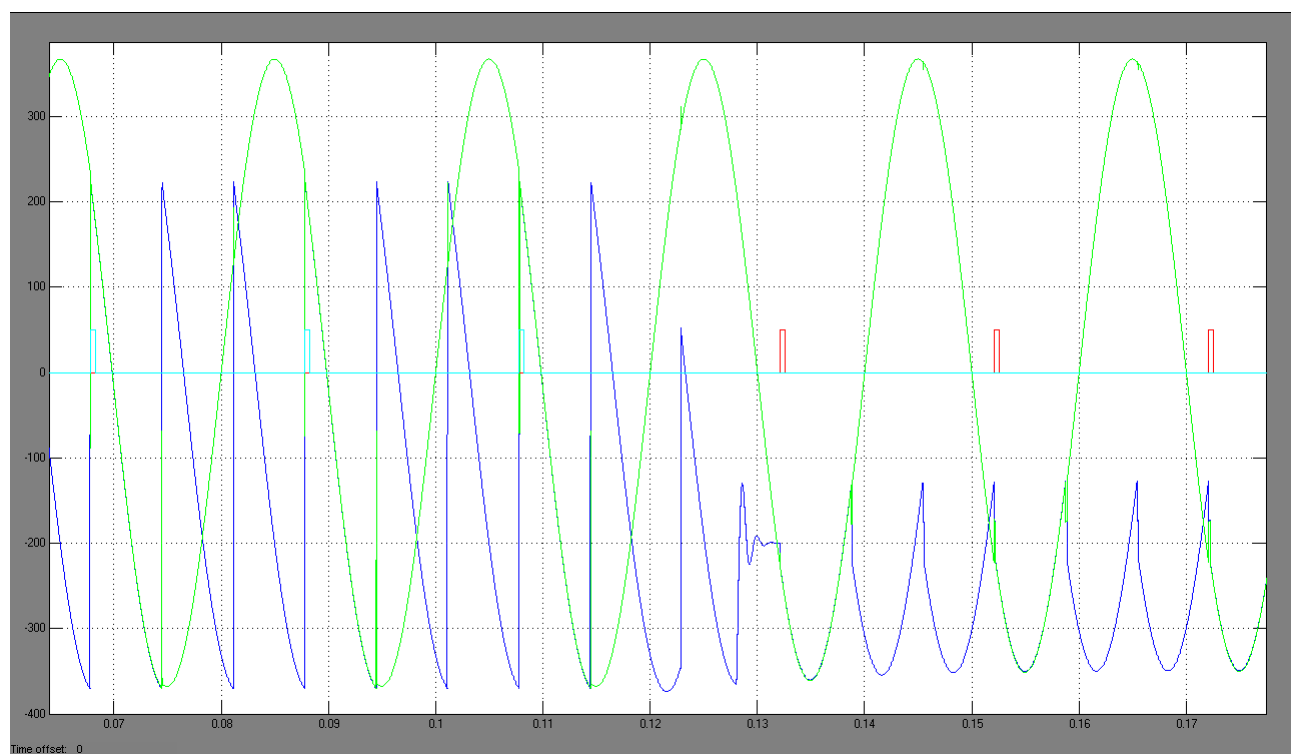




Napięcie, prąd zadany, prąd mierzony oraz wyfiltrowany prąd mierzony

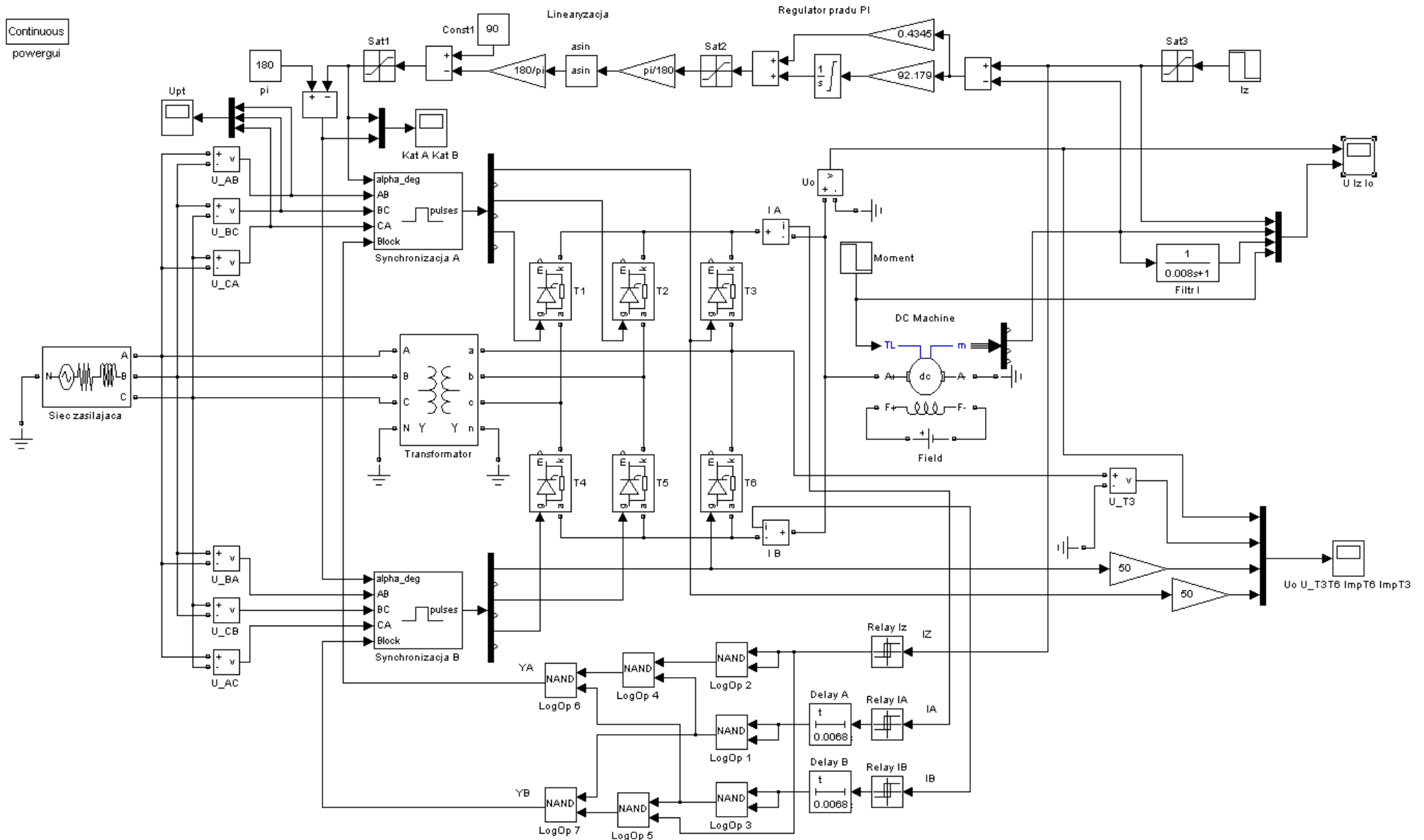
dla $t \in [0; 0.12)$: $I_z = 30\text{A}$, $U_{DC} = -200\text{V}$

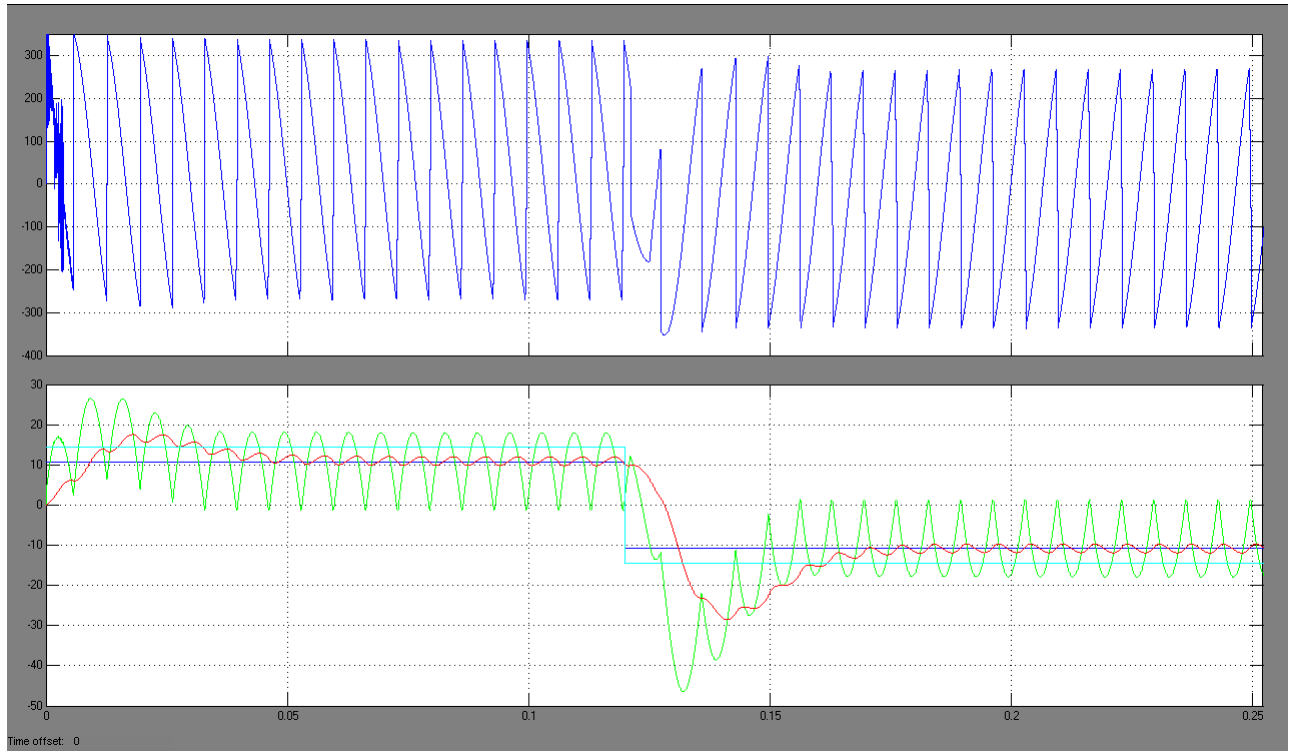
dla $t \in [0.12; 0.25]$: $I_z = -30\text{A}$, $U_{DC} = -200\text{V}$



Napięcie na odbiorniku, napięcie fazowe na tyrystorach $T3$ i $T6$ oraz impulsy sterujące tymi tyrystorami

System rewersyjnego sterowania prądem OSPS

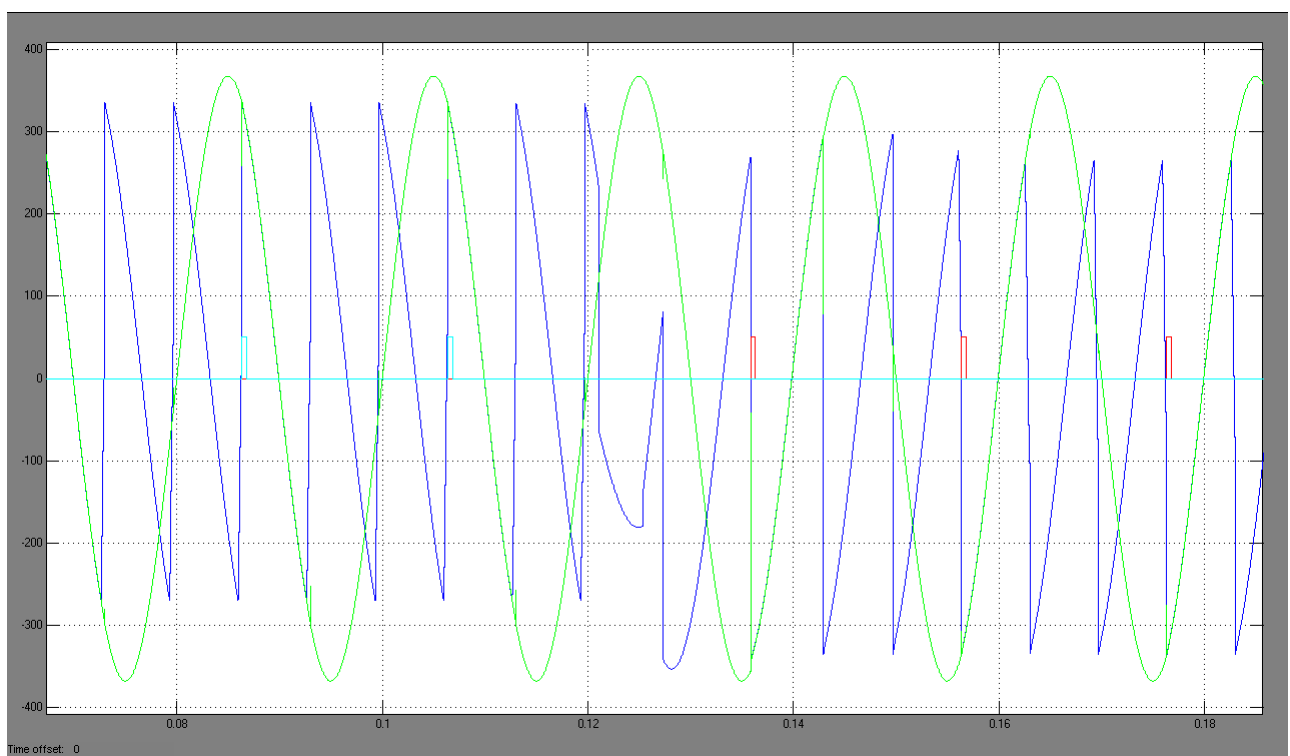




Napięcie, prąd zadany, prąd mierzony, wyfiltrowany prąd mierzony oraz moment obciążenia

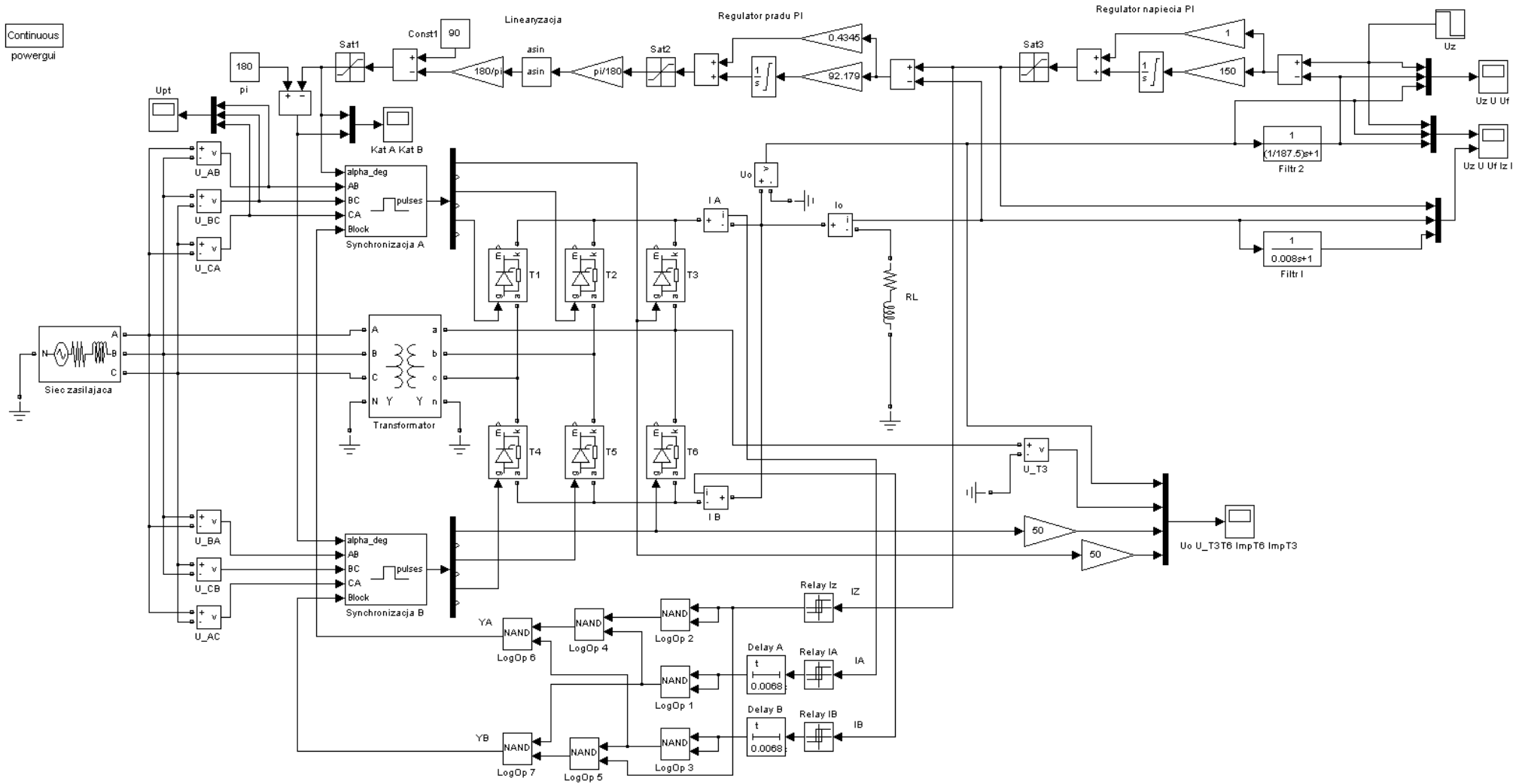
dla $t \in [0; 0.12)$: $I_z = 10.808A$, $M_o = 14.385N \cdot m$

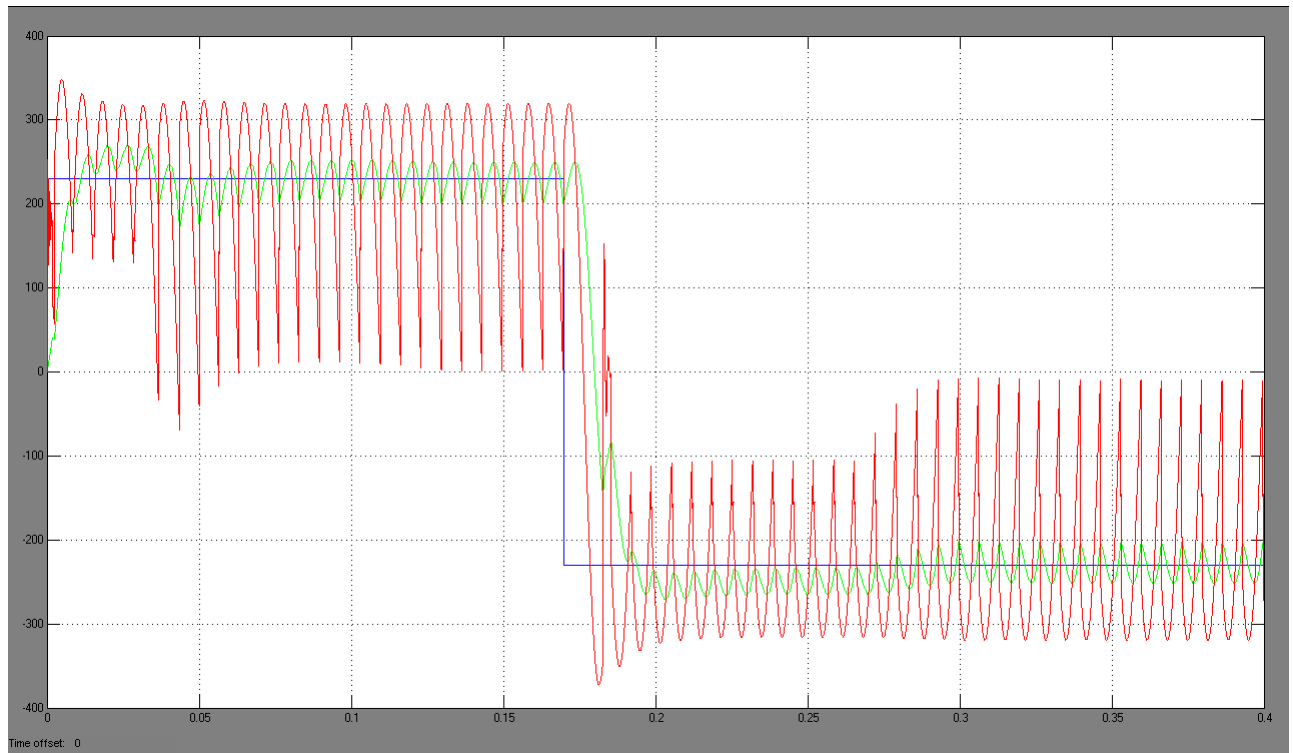
dla $t \in [0.2; 0.25]$: $I_z = -10.808A$, $M_o = -14.385N \cdot m$



Napięcie na odbiorniku, napięcie fazowe na tyrystorach $T3$ i $T6$ oraz impulsy sterujące tymi tyrystorami

System rewersyjnego sterowania napięciem odbiornika RL

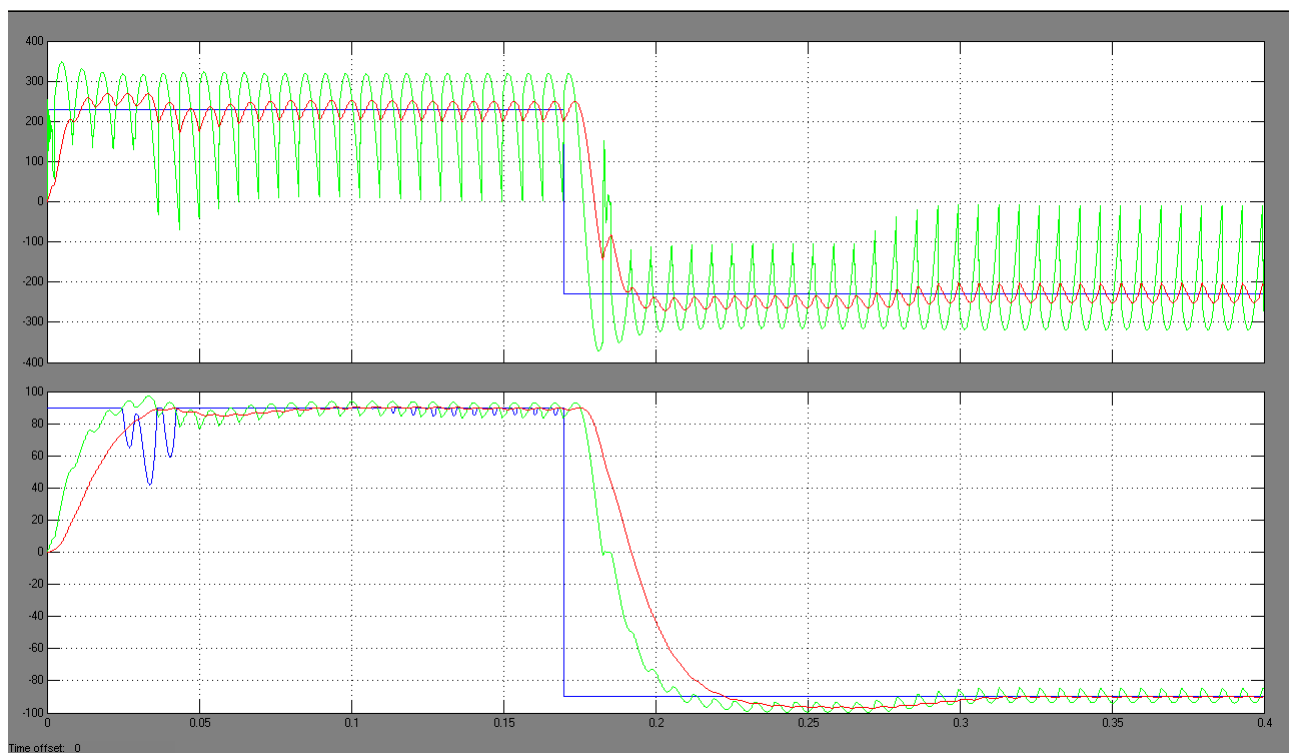




Napięcie zadane, mierzone, wyfiltrowane mierzone

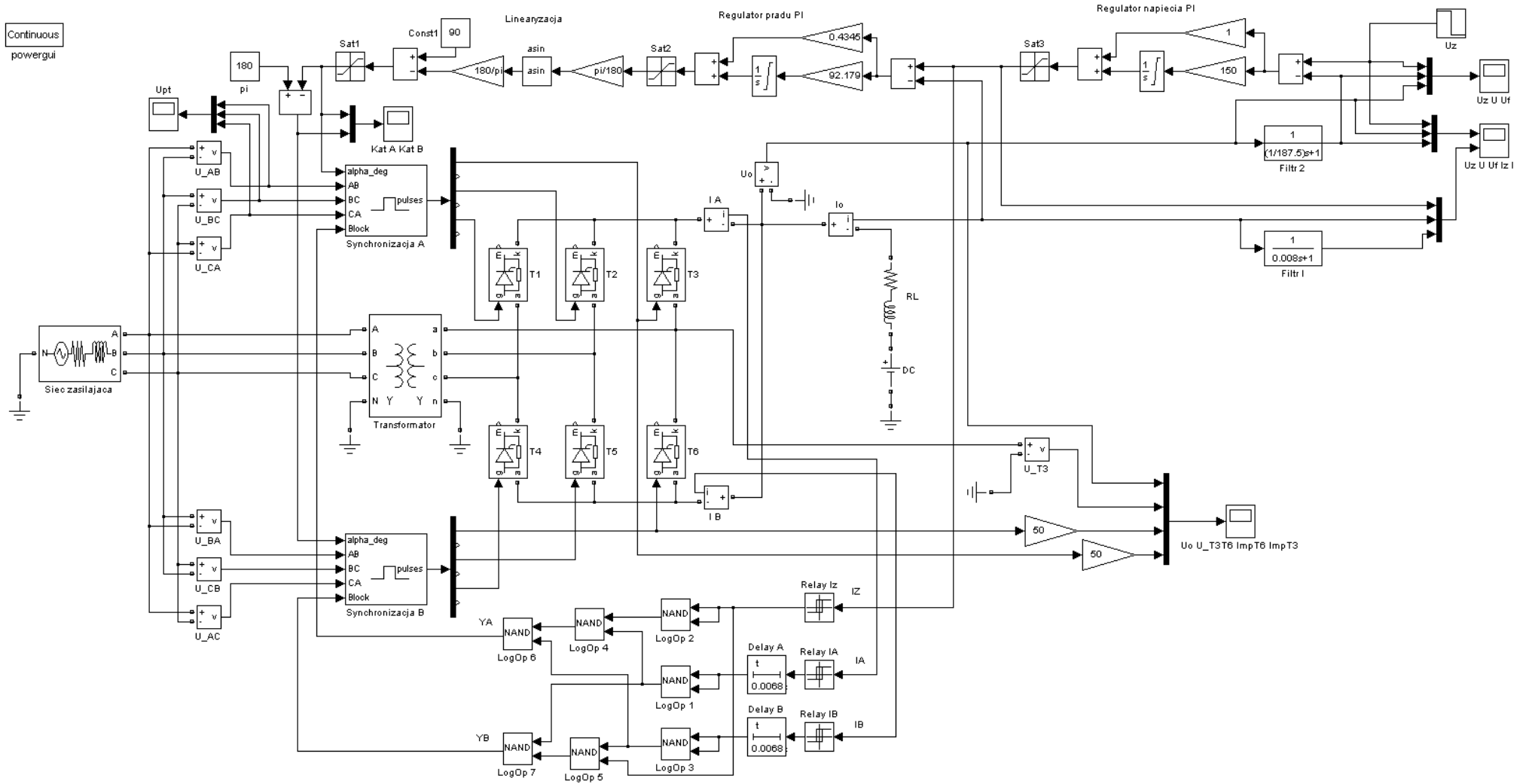
dla $t \in [0; 0.17)$: $U_z = 230V$

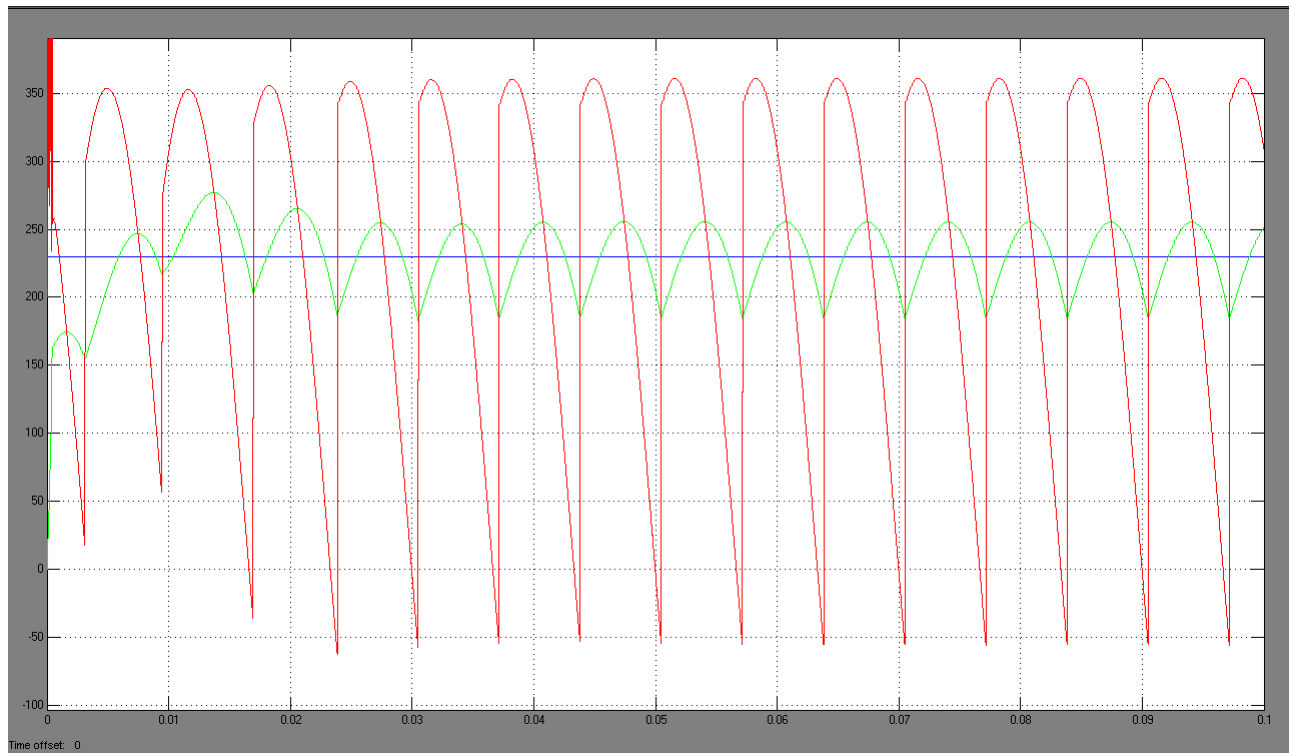
dla $t \in [0.17; 0.4]$: $U_z = -230V$



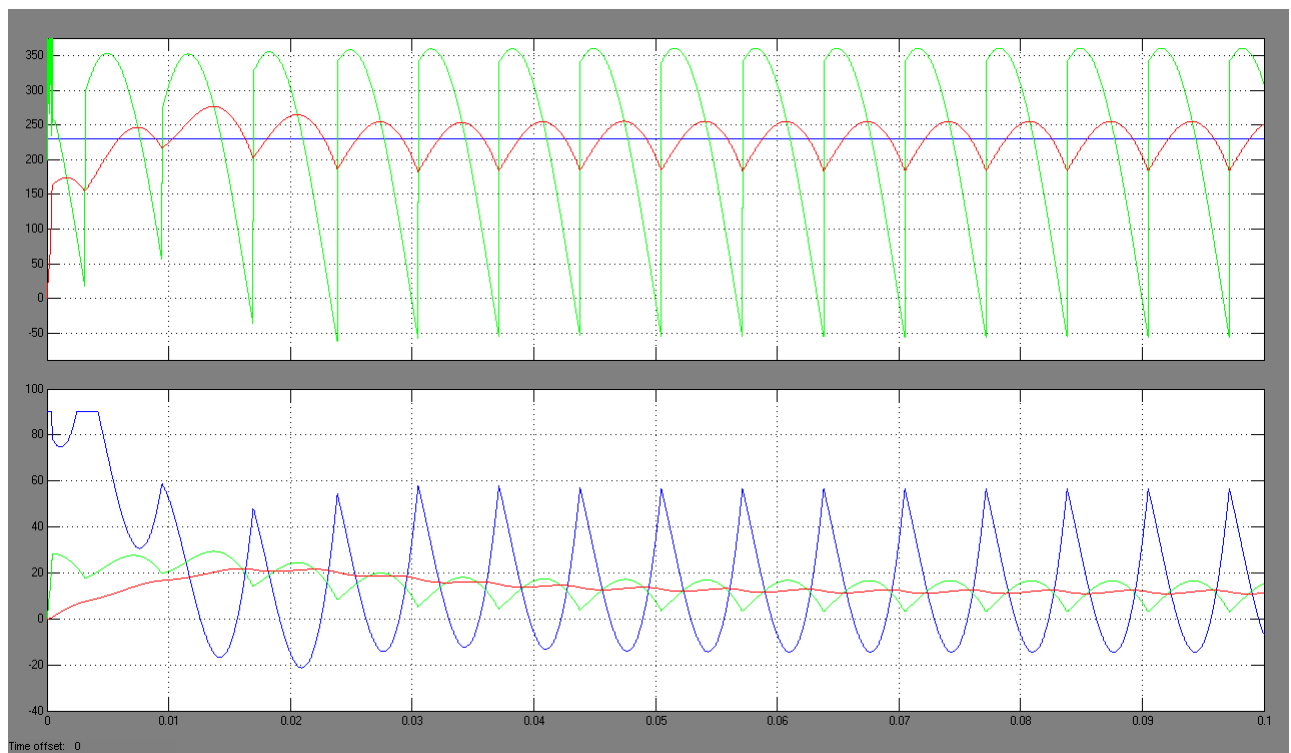
Napięcie zadane, mierzone, wyfiltrowane mierzone, prąd zadany, prąd mierzony oraz wyfiltrowany prąd mierzony

System rewersyjnego sterowania napięciem odbiornika RL+E

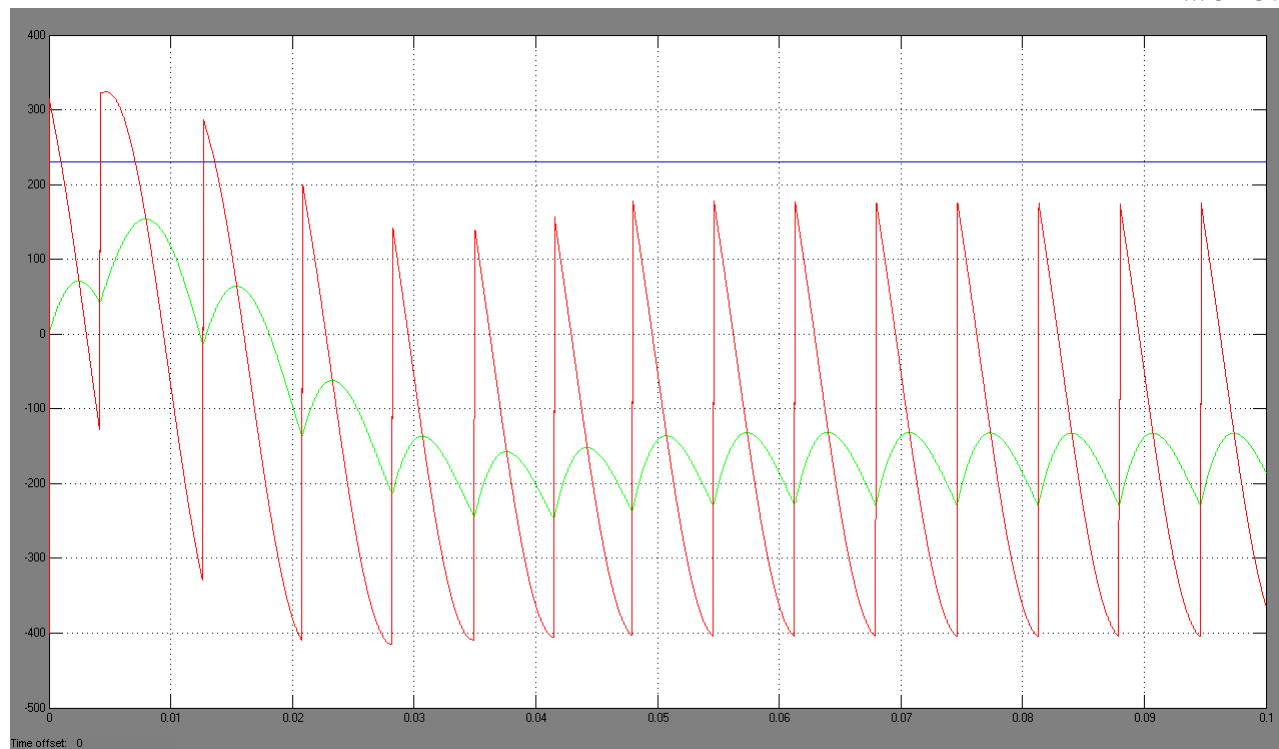




Napięcie zadane, mierzone, wyfiltrowane mierzone
dla $t \in [0; 0.1)$: $U_z = 230V$, $U_{DC} = 200V$

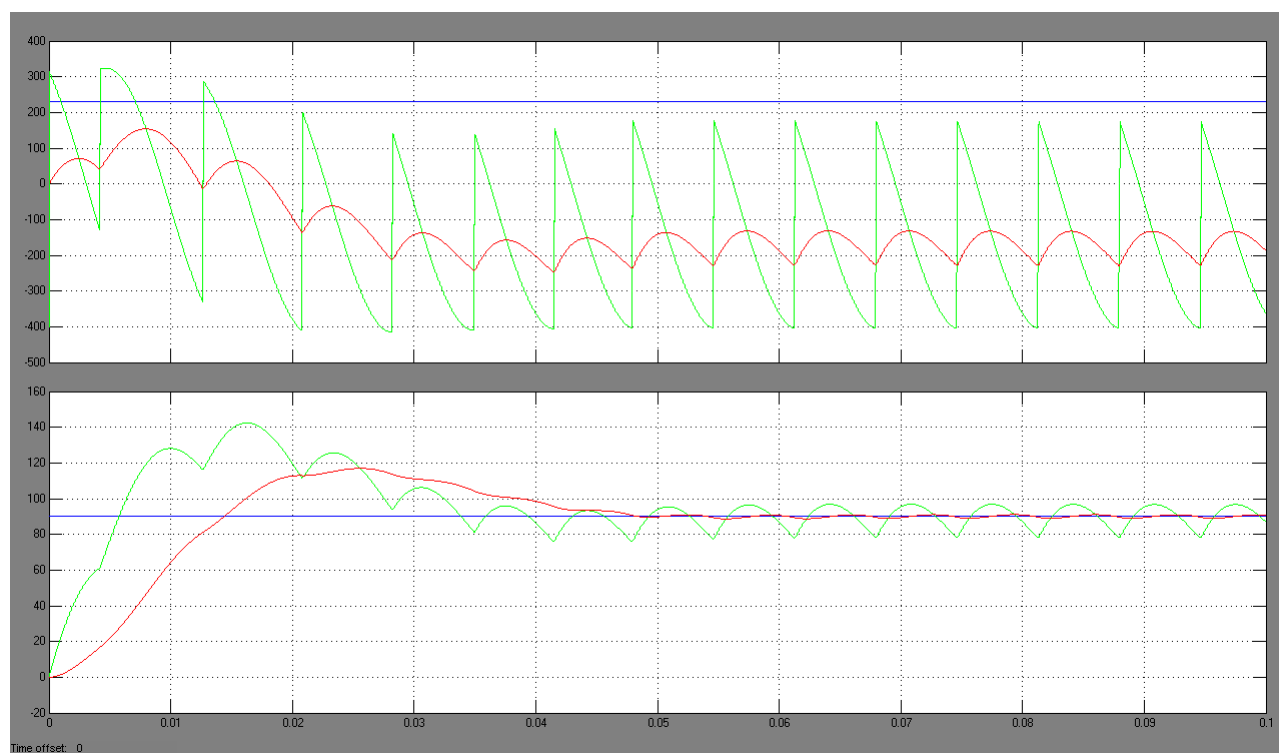


Napięcie zadane, mierzone, wyfiltrowane mierzone, prąd zadany, prąd mierzony oraz wyfiltrowany prąd mierzony



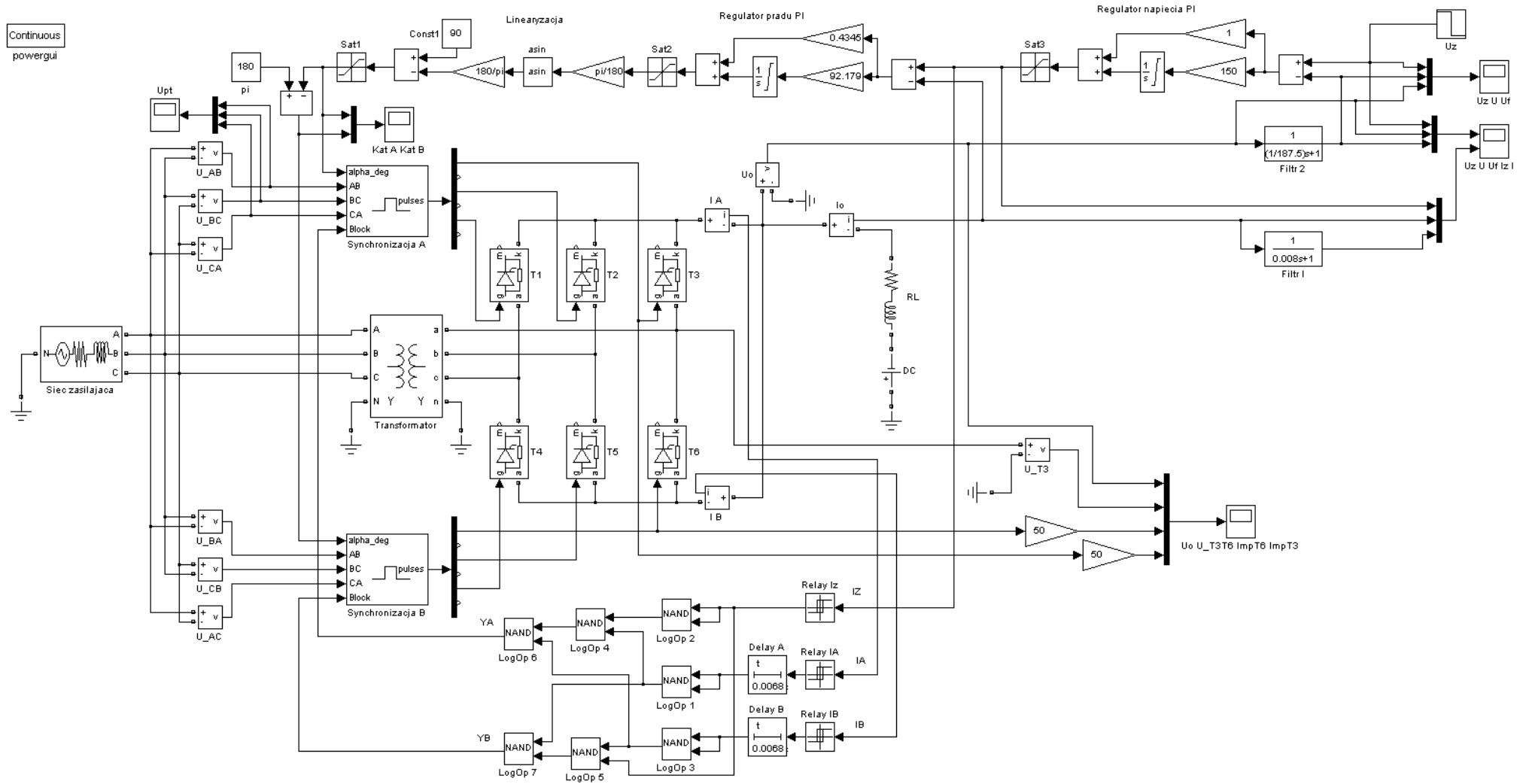
Napięcie zadane, mierzone, wyfiltrowane mierzone

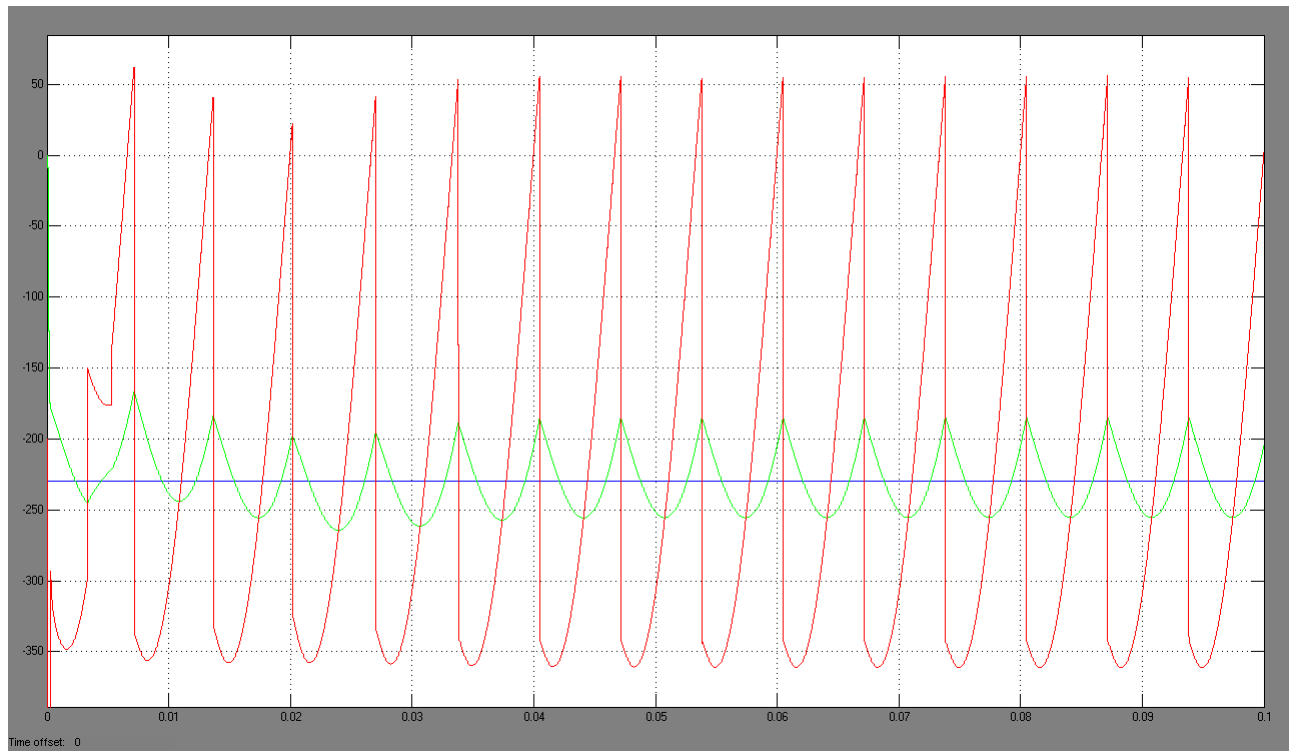
dla $t \in [0;0.1)$: $U_z = 230V$, $U_{DC} = -400V$



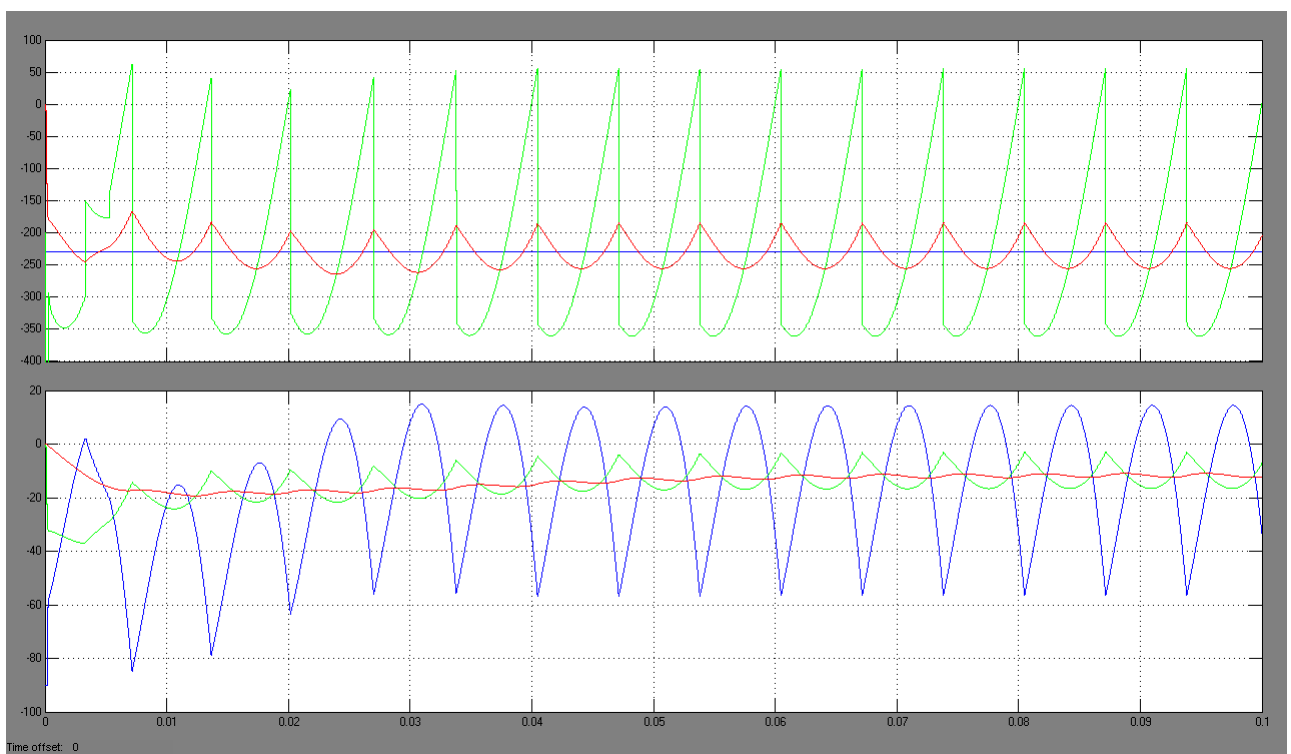
Napięcie zadane, mierzone, wyfiltrowane mierzone, prąd zadany, prąd mierzony oraz wyfiltrowany prąd mierzony

System rewersyjnego sterowania napięciem odbiornika RL-E

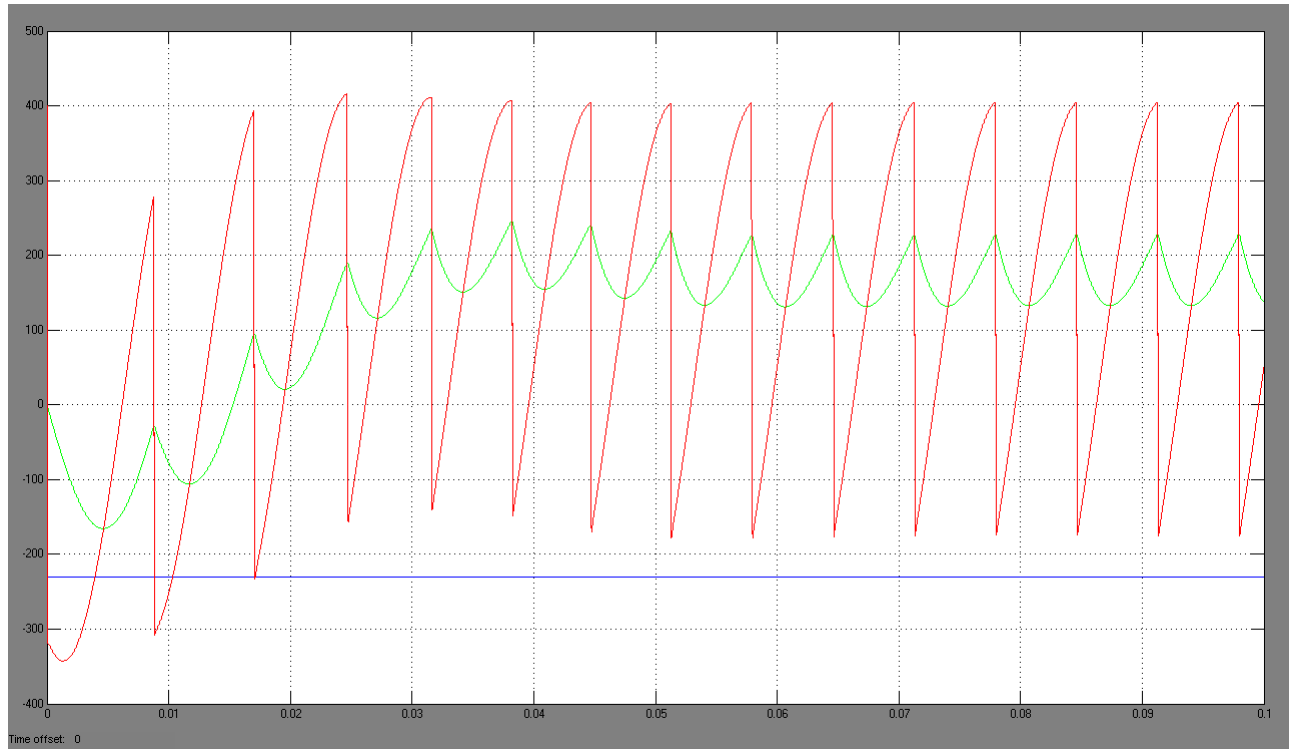




Napięcie zadane, mierzone, wyfiltrowane mierzone
dla $t \in [0;0.1)$: $U_z = -230V$, $U_{DC} = -200V$

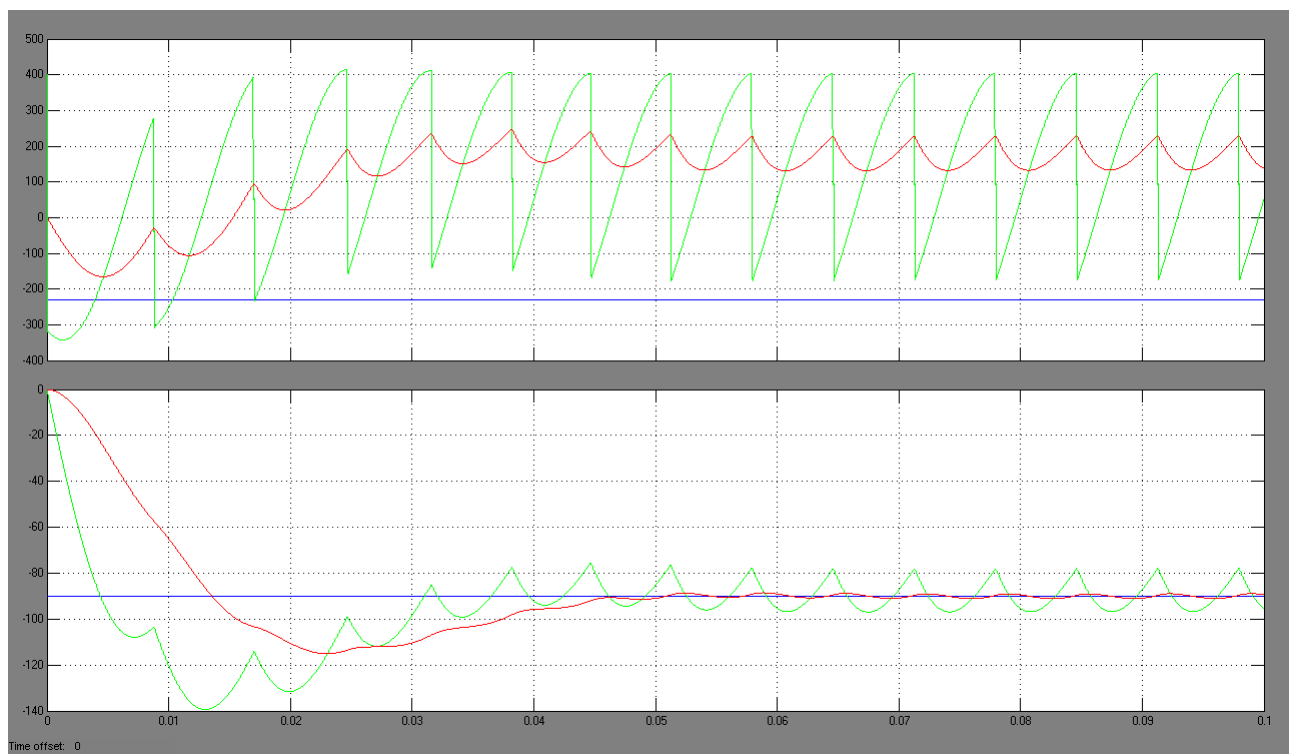


Napięcie zadane, mierzone, wyfiltrowane mierzone, prąd zadany, prąd mierzony oraz wyfiltrowany prąd mierzony



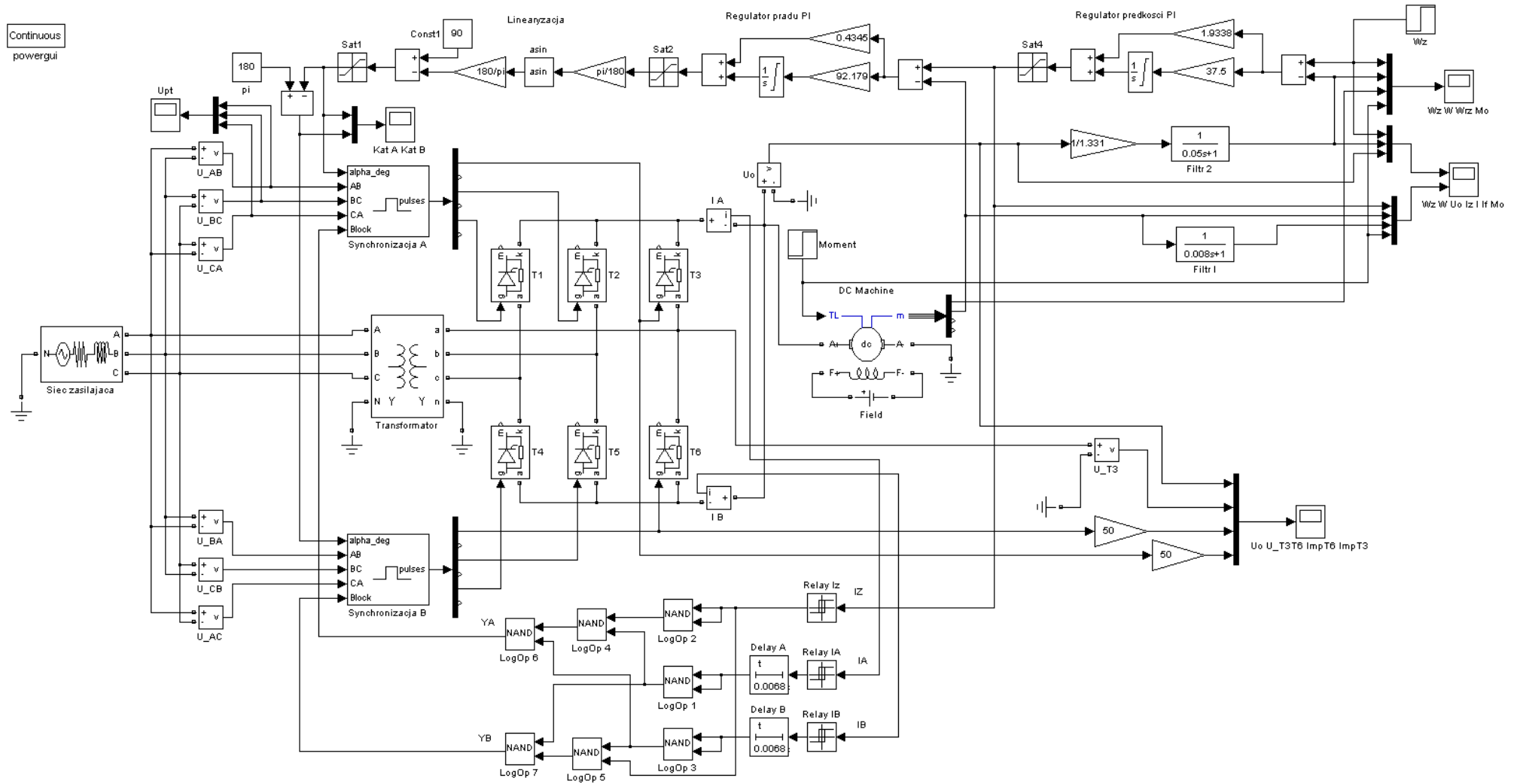
Napięcie zadane, mierzone, wyfiltrowane mierzone

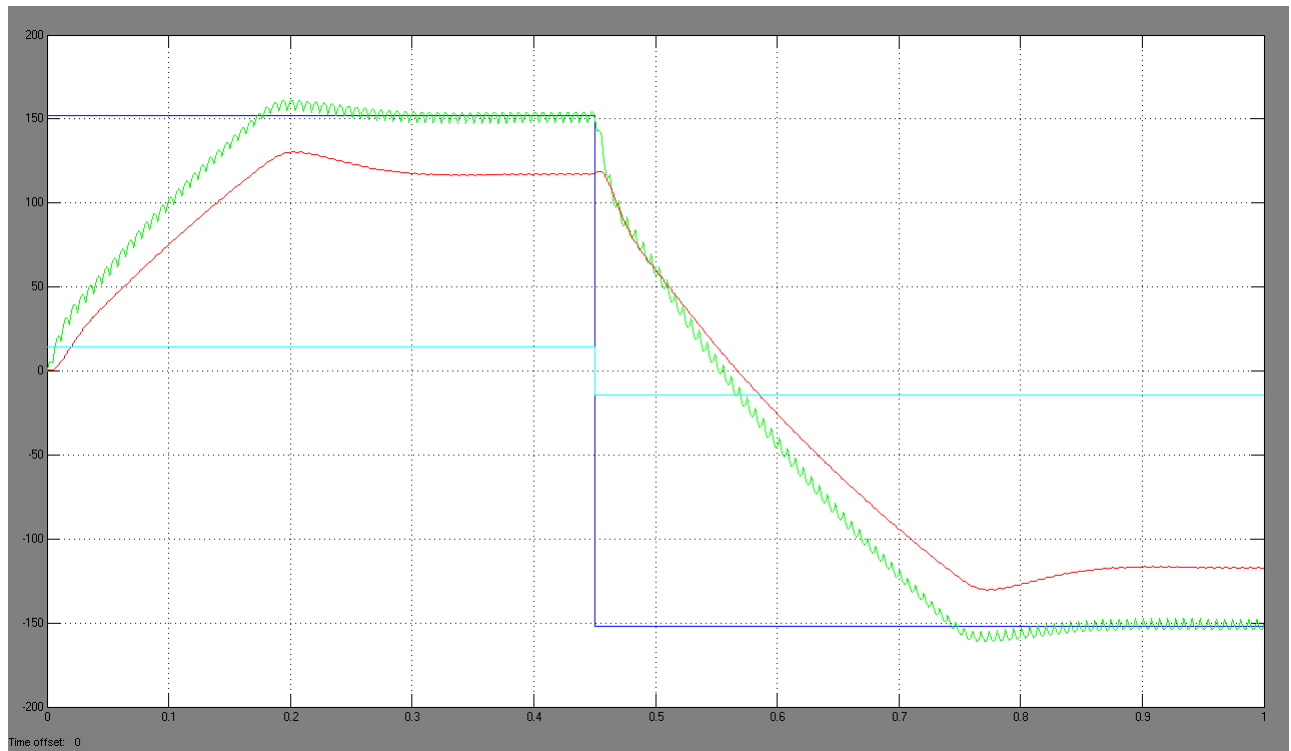
dla $t \in [0;0.1)$: $U_z = -230V$, $U_{DC} = 400V$



Napięcie zadane, mierzone, wyfiltrowane mierzone, prąd zadany, prąd mierzony oraz wyfiltrowany prąd mierzony

System rewersyjnego sterowania napięciem sprowadzonym do prędkości OSPS

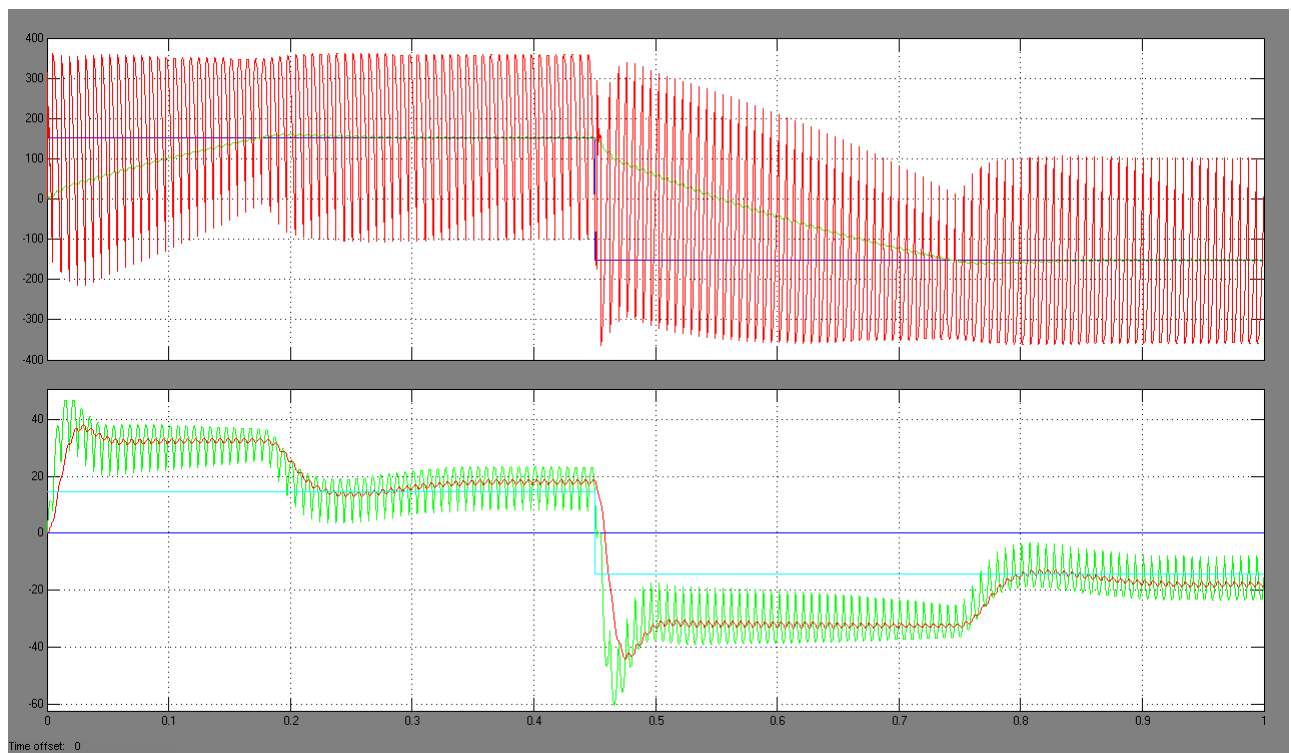




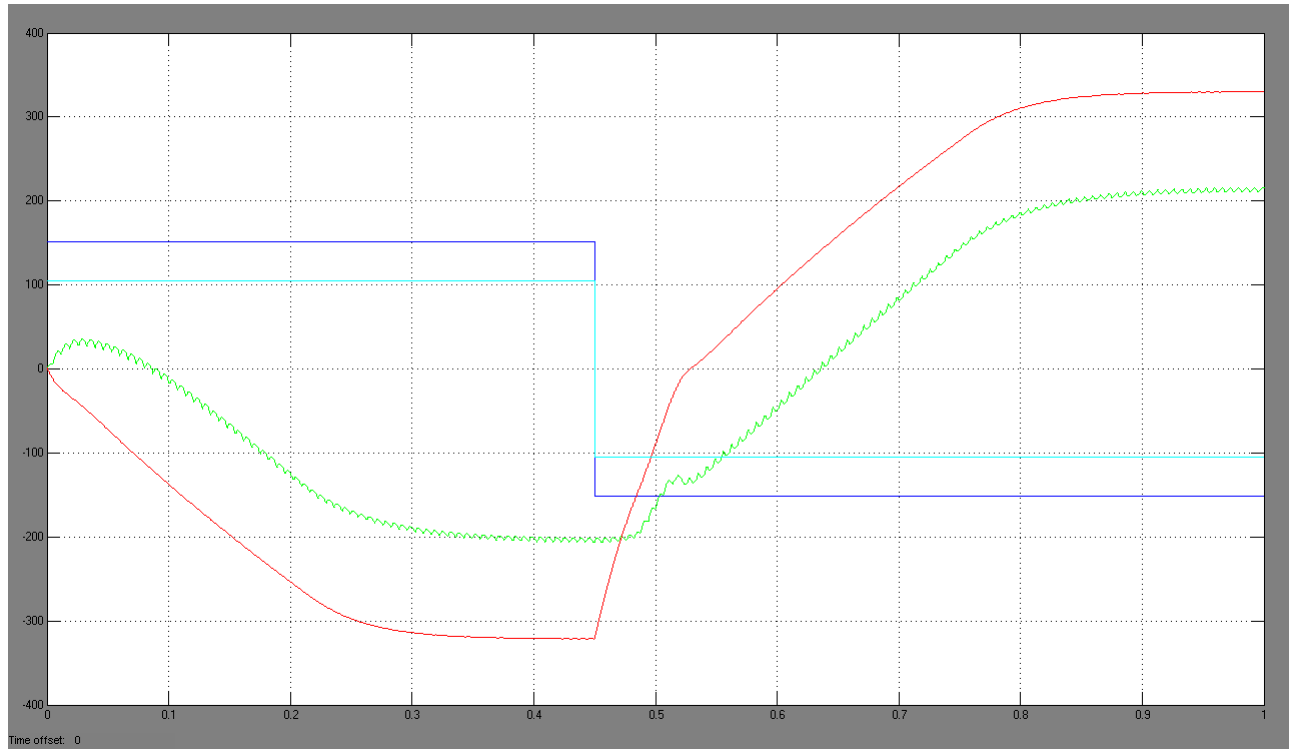
Prędkość zadana, mierzona, rzeczywista mierzona oraz moment obciążenia

$$\text{dla } t \in [0; 0.45): \quad \omega_z = 151.844 \frac{\text{rad}}{\text{s}}, \quad M_o = 14.385 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$\text{dla } t \in [0.45; 1]: \quad \omega_z = -151.844 \frac{\text{rad}}{\text{s}}, \quad M_o = -14.385 \text{ N} \cdot \text{m}$$



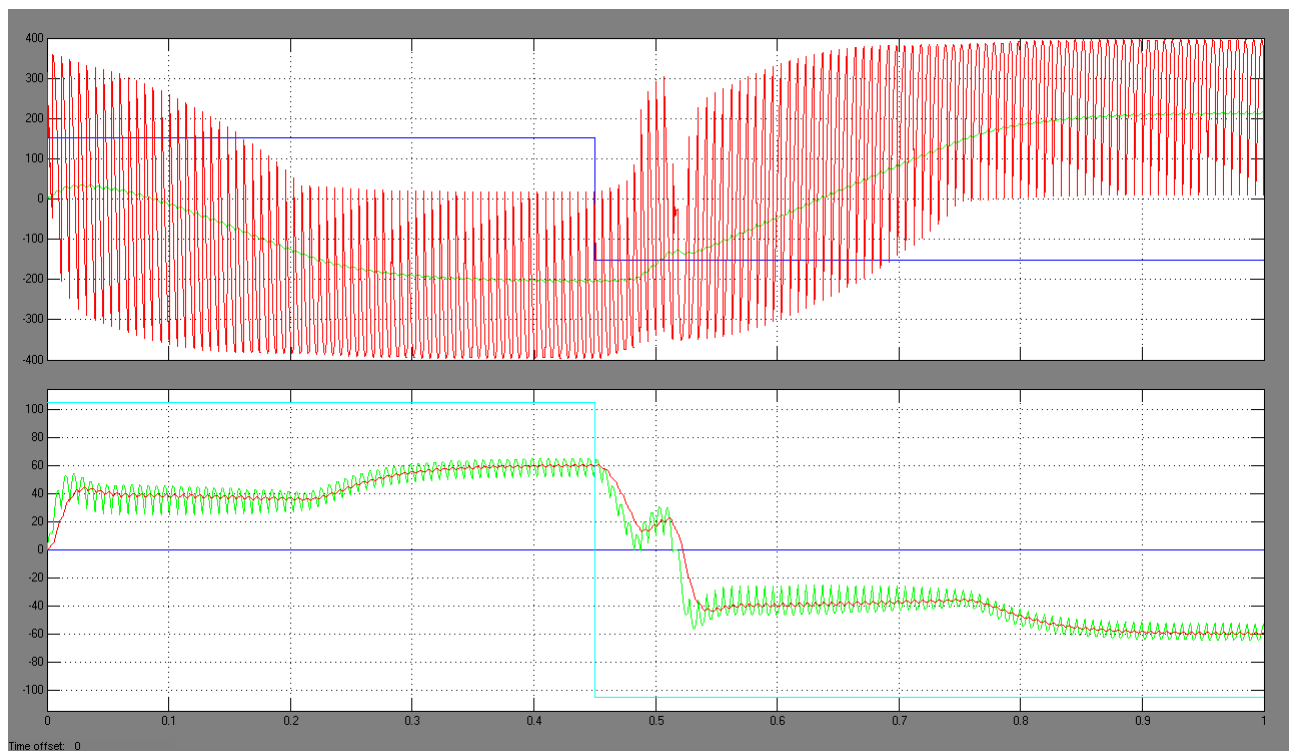
Prędkość zadana, mierzona, napięcie zasilające, prąd zadany, wyfiltrowany mierzony, moment obciążenia



Prędkość zadana, mierzona, rzeczywista mierzona oraz moment obciążenia

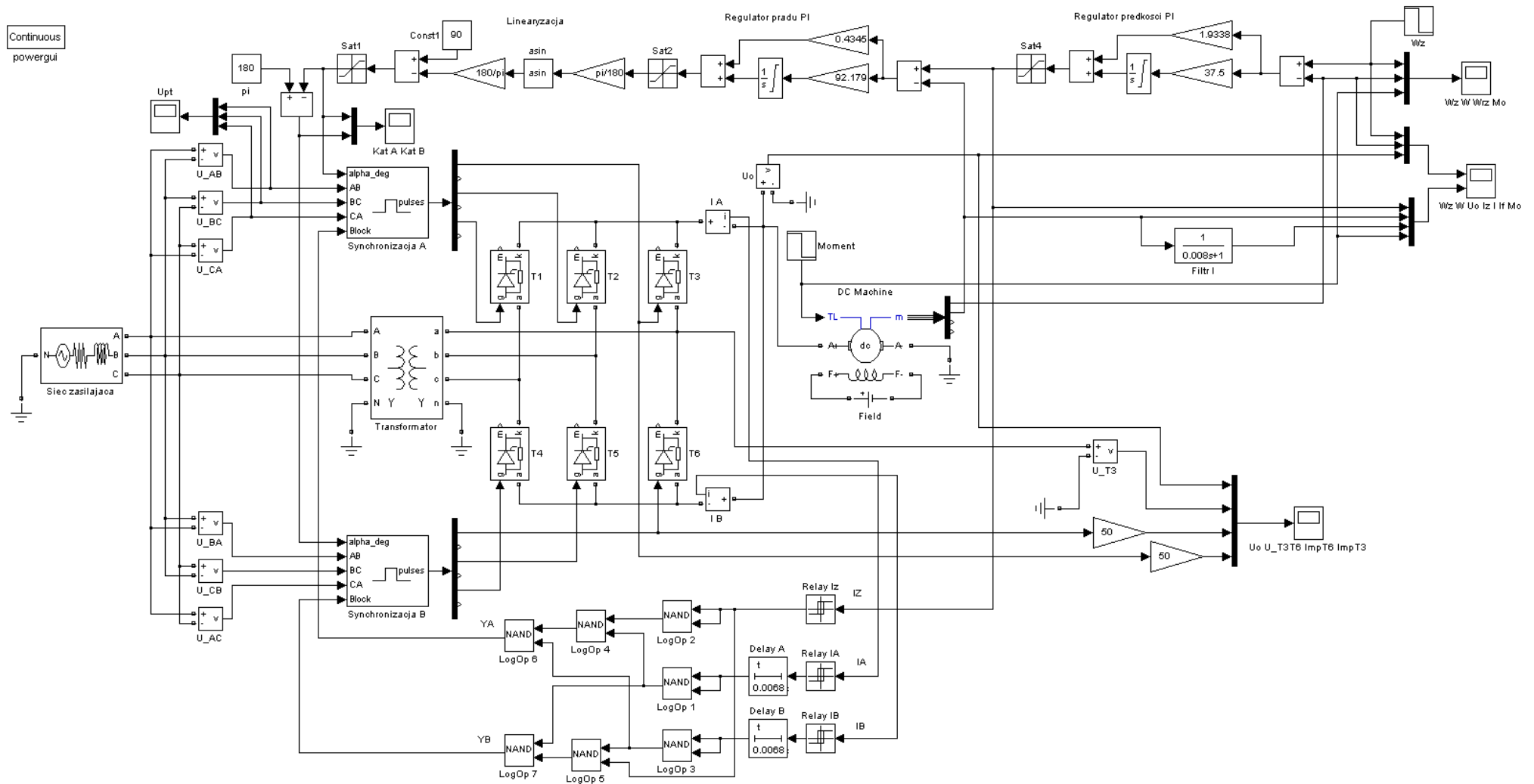
$$\text{dla } t \in [0; 0.45): \quad \omega_z = 151.844 \frac{\text{rad}}{\text{s}}, \quad M_o = 105 \text{ N} \cdot \text{m}$$

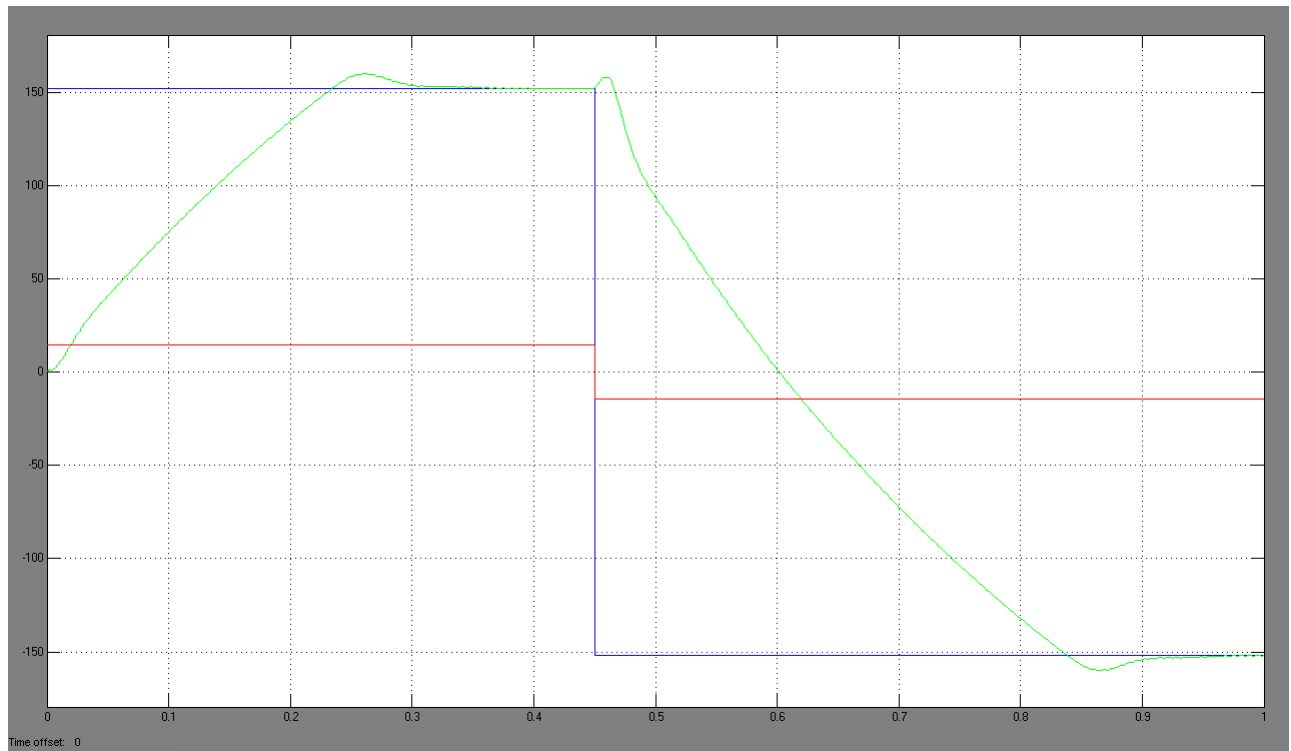
$$\text{dla } t \in [0.45; 1]: \quad \omega_z = -151.844 \frac{\text{rad}}{\text{s}}, \quad M_o = -105 \text{ N} \cdot \text{m}$$



Prędkość zadana, mierzona, napięcie zasilające, prąd zadany, wyfiltrowany mierzony, moment obciążenia

System rewersyjnego sterowania prędkości OSPS

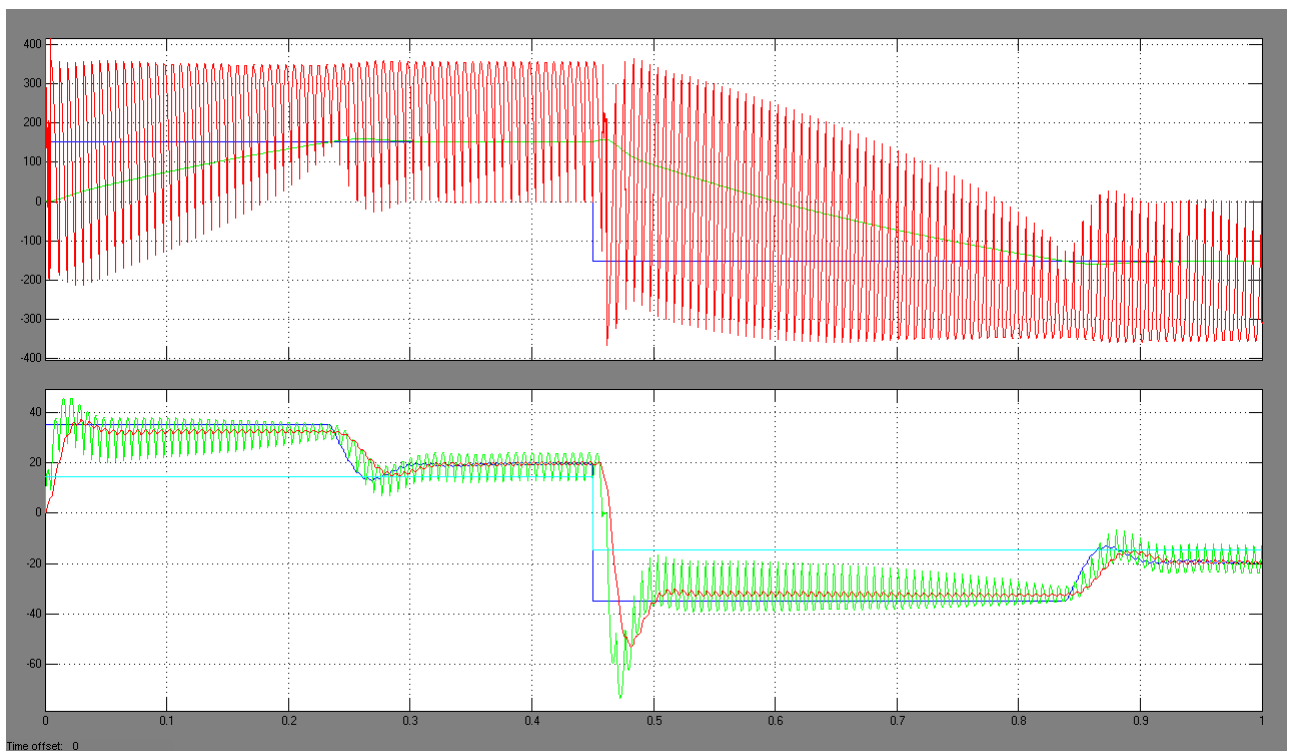




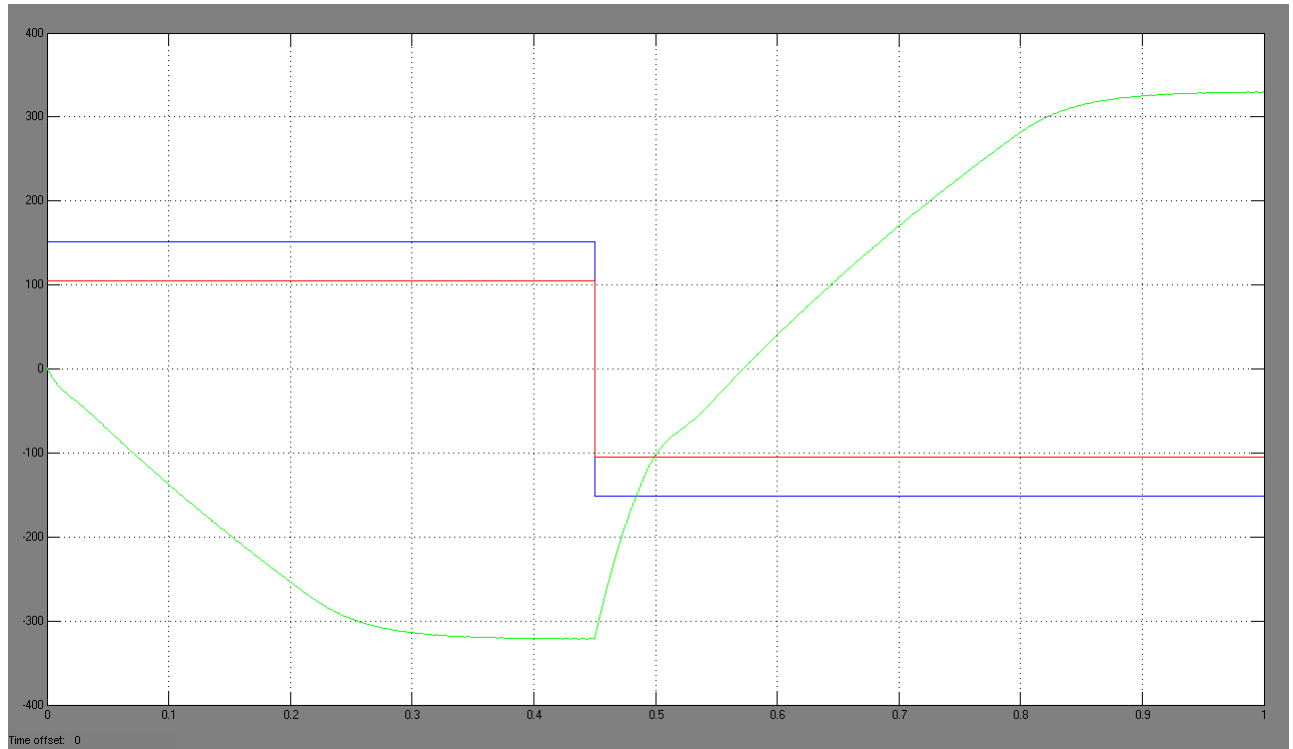
Prędkość zadana, mierzona oraz moment obciążenia

dla $t \in [0; 0.45)$: $\omega_z = 151.844 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$, $M_o = 14.385 \text{ N} \cdot \text{m}$

dla $t \in [0.45; 1]$: $\omega_z = -151.844 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$, $M_o = -14.385 \text{ N} \cdot \text{m}$



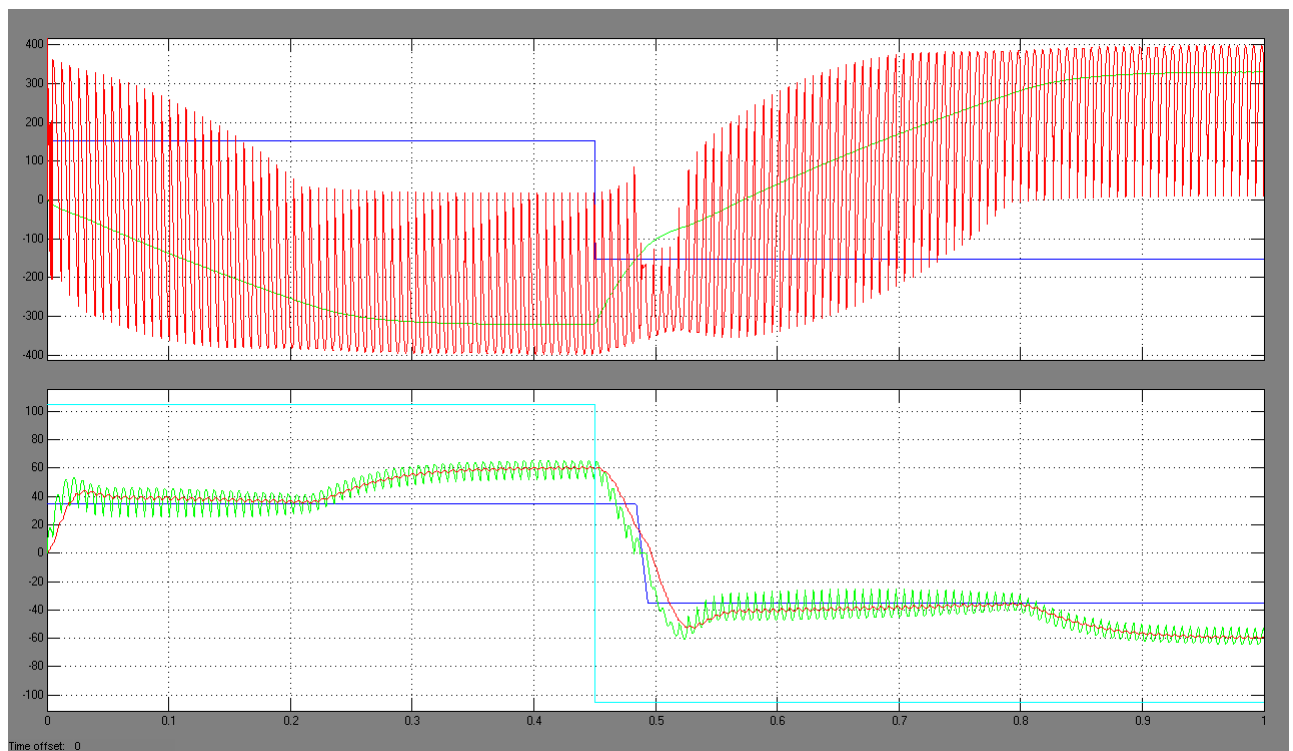
Prędkość zadana, mierzona, napięcie zasilające, prąd zadany, mierzony, wyfiltrowany mierzony, moment obciążenia



Prędkość zadana, mierzona oraz moment obciążenia

$$\text{dla } t \in [0; 0.45): \omega_z = 151.844 \frac{\text{rad}}{\text{s}}, \quad M_o = 105 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$\text{dla } t \in [0.45; 1]: \omega_z = -151.844 \frac{\text{rad}}{\text{s}}, \quad M_o = -105 \text{ N} \cdot \text{m}$$



Prędkość zadana, mierzona, napięcie zasilające, prąd zadany, mierzony, wyfiltrowany mierzony, moment obciążenia