

Ryszard PORADA\*  
Adam GULCZYŃSKI\*

## ENERGOELEKTRONICZNY SPRZĘG ALTERNATYWNYCH ŹRÓDEŁ ENERGII Z SIECIĄ ELEKTROENERGETYCZNĄ

W pracy przedstawiono ogólną charakterystykę energoelektronicznych sprzęgów alternatywnych źródeł energii z siecią elektroenergetyczną. Omówiono energoelektroniczne źródło prądu generujące prąd o kształcie sinusoidalnym przekazujący energię do sieci. Pokazano metodę sterowania źródła prądu jako układu zamkniętego z prądowym sprzężeniem zwrotnym. Zamieszczono wybrane wyniki badań modeli symulacyjnych takiego układu dla sinusoidalnego kształtu sygnałów zadanych.

SŁOWA KLUCZOWE: energoelektronika, falowniki, sterowanie dyskretne

### 1. WPROWADZENIE

Wykorzystanie alternatywnych źródeł energii może być związane z dostarczaniem energii elektrycznej do wydzielonej grupy odbiorników indywidualnych lub przekazywanie uzyskanej energii bezpośrednio do sieci elektroenergetycznej. W tym celu korzysta się z energoelektronicznych falowników napięcia pracujących jako źródła prądu. Celem pracy takiego źródła prądu jest uzyskanie kształtu prądu zbliżonego do sinusoidy, przy minimalnej zawartości składowych wysokoczęstotliwościowych będących efektem stosowanej w sterowaniu falownika modulacji dyskretnej MSI. Sterowanie takimi układami pracującymi jako układy zamknięte jest zagadnieniem trudnym ze względu na występujące efekty nieliniowe. Mimo tego sterowanie często jest realizowane z wykorzystaniem klasycznych regulatorów PID jako dobrze znanych i szeroko stosowanych w praktycznych rozwiązaniach ze względu na stosunkowo proste metody strojenia parametrów regulatora. Coraz częściej korzysta się także z innych metod, jak np. bardziej rozbudowanych korektorów, których struktura i parametry są określane (także w wersji cyfrowej) w oparciu o syntezę zapewniającą uzyskanie optymalnych odpowiedzi obiektu [1, 2, 3].

W pracy przedstawiono ogólną charakterystykę energoelektronicznych sprzę-

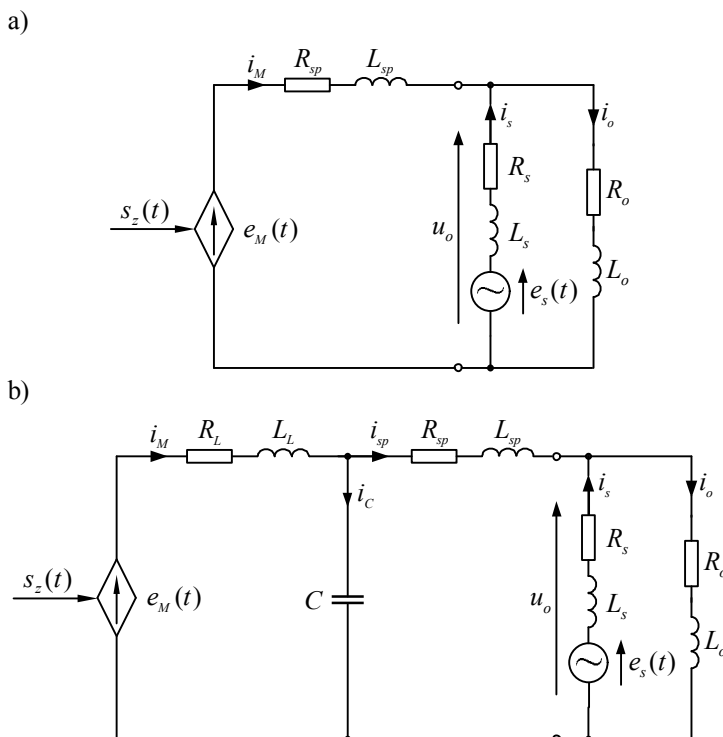
---

\* Politechnika Poznańska.

gów alternatywnych źródeł energii z siecią elektroenergetyczną. Omówiono energoelektroniczne źródło prądu generujące prąd o kształcie sinusoidalnym przekazujący energię do sieci. Pokazano metodę sterowania źródła prądu jako układu zamkniętego z prądowym sprzężeniem zwrotnym. Zamieszczono wybrane wyniki badań modeli symulacyjnych takiego układu z korektorem analogowym i dyskretnym oraz badania związane ze współpracą źródła prądu z siecią elektroenergetyczną.

## 2. STRUKTURA ŹRÓDŁA PRĄDU

Schemat blokowy 1-fazowego niezależnego energoelektronicznego źródła prądu współpracującego z siecią elektroenergetyczną pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Struktura blokowa źródła prądu do współpracy a siecią elektroenergetyczną: a) z indukcyjnością sprzęgającą; b) z dodatkowym filtrem dolnoprzepustowym

Badania układu dotyczyły dwóch wariantów pracy źródła prądu. Pierwszy z nich (rys. 1a) składa się z sterowanego, zmodulowanego źródła napięcia  $e_M(t)$  [5, 6], połączonego z siecią elektroenergetyczną poprzez indukcyjność sprzęga-

jąca o parametrach  $R_{sp}$ ,  $L_{sp}$ . Drugi wariant źródła (rys. 1b) zbudowany jest również z sterowanego, zmodulowanego źródła napięcia  $e_M(t)$ , połączonego z odbiornikiem prądu (siecią elektroenergetyczną) poprzez indukcyjność sprzęgającą za pośrednictwem prostego filtra dolnoprzepustowego drugiego rzędu (struktura odwrócone  $\Gamma$ ). Sygnał sterujący  $s_z(t)$  jest generowany przez korektor toru głównego w układzie zamkniętym ze sprzężeniem prądowym.

Sieć elektroenergetyczną na schematach przedstawionych na rysunku 1 reprezentuje prosta szeregową gałąź  $e_s(t)R_sL_s$ . Dodatkowych odbiorców energii elektrycznej przedstawia szeregową gałąź  $R_oL_o$ .

Badania struktur pokazanych na rysunku 1 miały na celu określenie skuteczności dostarczania energii elektrycznej przez energoelektroniczne źródło prądu generujące prąd o kształcie sinusoidalnym, dla różnych typów modulacji – bipolarnej oraz unipolarnej.

### 3. KOREKTOR UKŁADU ZAMKNIĘTEGO ŹRÓDŁA PRĄDU

Na podstawie metodyki przedstawionej w pracach [5, 6, 7, 8], zaproponowano wykorzystanie syntezy transmitancji korektora na podstawie prototypowej transmitancji układu zamkniętego. Transmitancję korektora wyznacza się w oparciu o wymagania projektowe (specyfikacje) – określające pożądane cechy układu sterowania [1, 2, 3]. Na bazie przedstawionych tam wyników oraz zgodnie z założeniem, że wolnozmiennne procesy przekazywania energii do sieci nie wymuszają potrzeby dużej dynamiki układu zamkniętego, zaproponowano prostą strukturę korektora w postaci:

$$G_{ka}(s) = K_K \frac{s^2 + l_1s + l_0}{s^2 + m_1s + m_0} \quad (1)$$

gdzie współczynniki licznika i mianownika:

$$l_1 = (K_1 + K_2)/K_2T_1, \quad l_0 = K_1/K_2T_1T_2, \quad m_1 = (T_1 + T_2)/T_1T_2, \quad m_0 = 1/T_1T_2$$

przy czym  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $T_1$ ,  $T_2$  są wielkościami aproksymującymi pełną postać korektora w pasmie ok. 1 kHz [5, 6, 7, 8, 9] powiązanymi z parametrami układu. Ze względu na współpracę źródła prądu z siecią elektroenergetyczną oraz innymi odbiorcami energii elektrycznej, reprezentowanych na schematach układu (rysunek 1) dwoma gałęziami równoległymi, konieczne było dokonanie korekty wielkości  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $T_1$ ,  $T_2$  wyznaczających współczynniki transmitancji korektora (1) w stosunku do pracy autonomicznej źródła prądu.

Na podstawie wersji analogowej transmitancji korektora określono jego postać dyskretną. W literaturze podawanych jest wiele wzorów na algorytmy regulatorów cyfrowych uzyskiwanych na podstawie ich odpowiedników analogowych. W prezentowanych badaniach dla wyznaczenia postaci cyfrowej regulato-

ra zastosowano metodę residuum [1, 3].

Ostatecznie korektor dyskretny uzyskany na podstawie korektora analogowego (1) ma postać:

$$G_K(z) = K_K \frac{b_2 z^2 + b_1 z + b_0}{z^2 + a_1 z + a_0} \quad (2)$$

przy czym dla układu bez dodatkowego filtra LC współczynniki korektora cyfrowego określają wyrażenia:

$$b_0 = \frac{1}{K_2} [K_2 K_2 e^{-T/T_1} - K_1 (K_2 - e^{-T/T_1}) e^{-T/T_2}]$$

$$b_1 = \frac{1}{K_2} [K_2 (K_1 - K_2) - K_1 (1 - K_2) e^{-T/T_2} + (K_1 - K_2 K_2) e^{-T/T_1}]$$

$$b_2 = \frac{1}{K_2} [K_1 - K_2 (K_1 - K_2)]$$

$$a_0 = e^{-T/T_1} e^{-T/T_2}, \quad a_1 = -(e^{-T/T_1} + e^{-T/T_2})$$

natomiast dla układu z filtrem LC (rysunek 1b):

$$b_0 = e^{-T/T_1} - (K_1/K_2) e^{-T/T_2} (1 - e^{-T/T_1})$$

$$b_1 = [(K_1/K_2) - 1] - [(K_1/K_2) + 1] e^{-T/T_2}, \quad b_2 = 1$$

$$a_0 = e^{-T/T_1} e^{-T/T_2}, \quad a_1 = -(e^{-T/T_1} + e^{-T/T_2})$$

gdzie  $T$  jest przyjętym okresem próbkowania, a współczynniki  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $T_1$ ,  $T_2$  są określone z syntezy wersji analogowej korektora.

#### 4. BADANIA SYMULACYJNE

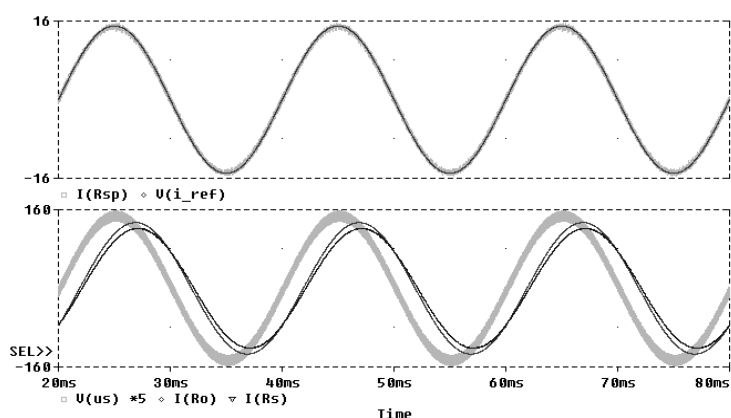
Skuteczność działania energoelektronicznego źródła prądu we współpracy z siecią elektroenergetyczną przetestowano na przykładzie falownika 1-fazowego, pracującego z dwoma typami modulacji – unipolarną i bipolarną. Założono maksymalną moc czynną oddawaną przez alternatywne źródło energii na poziomie 10% mocy czynnej pobieranej przez innych odbiorców. Przy tych założeniach wartość skuteczną prądu źródła przyjęto na poziomie  $I = 10$  A (częstotliwość prądu 50 Hz), natomiast wartość skuteczną prądu odbiorników innych odbiorców  $I = 100$  A.

Badania wykonano dla następujących parametrów układu: napięcie zasilania falownika 50 [V], częstotliwość nośna modulacji MSI (unipolarnej i bipolarnej)  $f_{MSI} = 12,5$  kHz. Przyjęte parametry dławika sprzęgającego wynoszą  $R_{sp} = 0,09$  [ $\Omega$ ],  $L_{sp} = 1,1$  [mH], natomiast filtra LC:  $R_L = 0,05$  [ $\Omega$ ],  $L_L = 440$  [ $\mu$ H],  $C = 44$  [ $\mu$ F] dla modulacji bipolarnej oraz  $R_L = 0,025$  [ $\Omega$ ],  $L_L = 220$  [ $\mu$ H],  $C = 22$  [ $\mu$ F]. Sieć elektroenergetyczna jest reprezentowana gałęzią szeregową o parametrach  $R_s = 0,005$  [ $\Omega$ ],  $L_s = 55$  [ $\mu$ H], uzyskanych po sprowadzeniu na stronę n/n parametrów transformatora o mocy 1 [MVA] i napięciu 15/0,4 [kV], dołączonego do linii

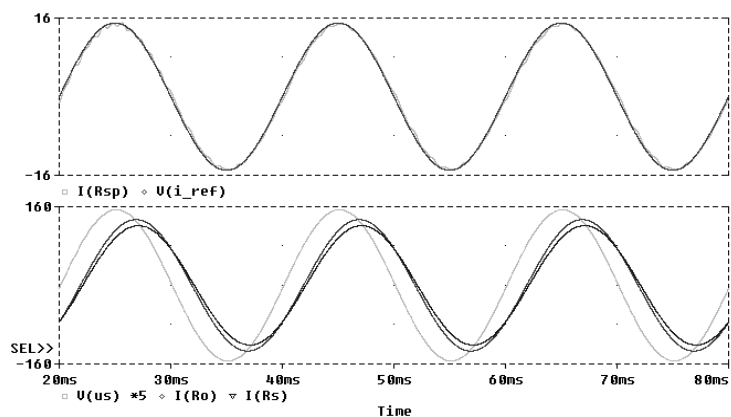
15 [kV] o mocy zwarciowej  $S_{zw} = 24$  [MVA]. Innych odbiorców reprezentuje gałąź szeregową o parametrach  $R_o = 19,55$  [ $\Omega$ ],  $L_o = 385$  [ $\mu\text{H}$ ] ( $\cos\varphi = 0,85$ ).

Na poszczególnych rysunkach w jednolity sposób pokazano: w pierwszym oknie przebiegi prądu źródła, w drugim oknie – przebiegi napięcia sieci, prąd odbiorców (w stanie ustalonym) oraz prąd sieci.

Wyniki badań dla wersji analogowej korektora oraz modulacji bipolarnej, dla dwóch struktur źródła prądu (bez filtru LC oraz z filtrem LC) pokazano na rysunkach 2 i 3, natomiast dla modulacji unipolarnej – na rysunku 4 i 5.



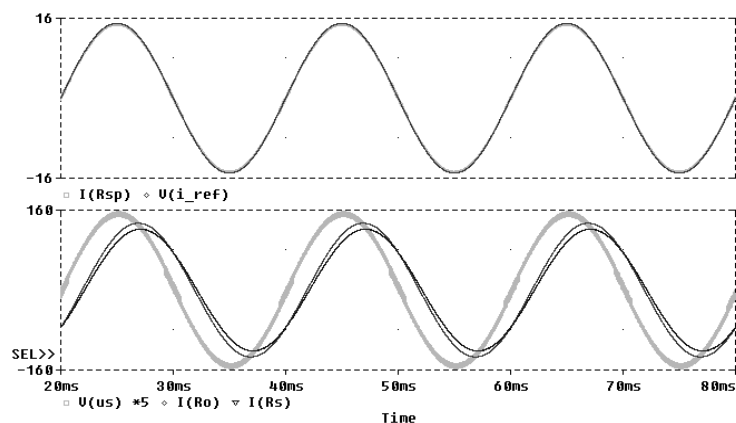
Rys. 2. Wybrane przebiegi prądów i napięć układu dla źródła prądu bez filtru LC



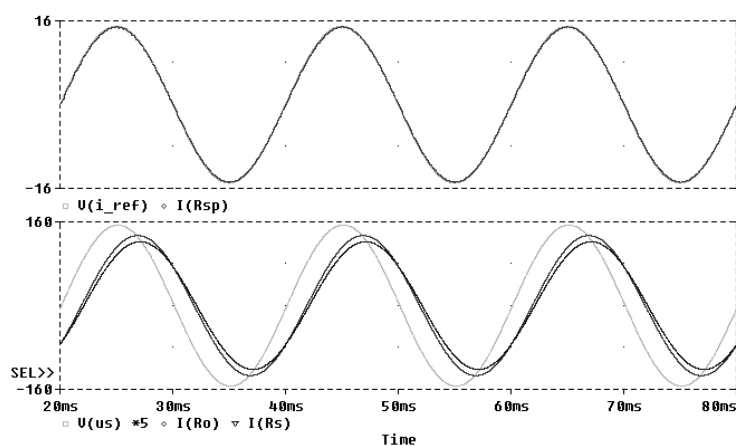
Rys. 3. Wybrane przebiegi prądów i napięć układu dla źródła prądu z filtrem LC

Błąd odwzorowania prądu o kształcie sinusoidalnym w pasmie 2 kHz dla obu przypadków nie przekracza wartości 2%, a błąd statyczny 0,2%. Wyraźnie widoczny jest efekt dostarczania energii z alternatywnego źródła energii do sieci – prąd sieci jest pomniejszony o wartość prądu źródła w stosunku do prądu pobie-

ranego przez innych odbiorców energii. Dla układu źródła prądu bez filtra LC występuje wyraźny wpływ składowych wysokoczęstotliwościowych prądu na kształt napięcia sieci (występują wysokoczęstotliwościowe składowe napięcia). Można zminimalizować ten niekorzystny efekt przez zwiększenie wartości indukcyjności sprzęgającej lub zastosowanie transformatora separującego. Wartość mocy czynnej dostarczanej przez źródło prądu zmniejsza wartość mocy czynnej pobieranej z sieci elektroenergetycznej przez innych odbiorców. Wpływ niskoczęstotliwościowych składowych źródła prądu na harmoniczne napięcia sieci nie przekracza w najgorszym przypadku wartości 0,35%.

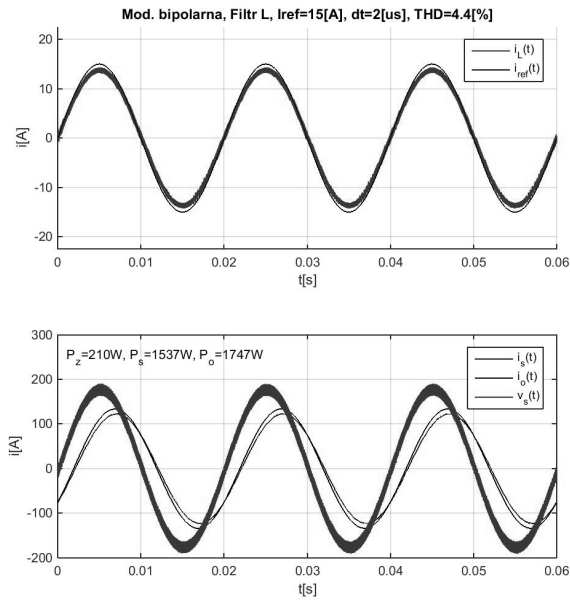


Rys. 4. Wybrane przebiegi prądów i napięć układu dla źródła prądu bez filtra LC

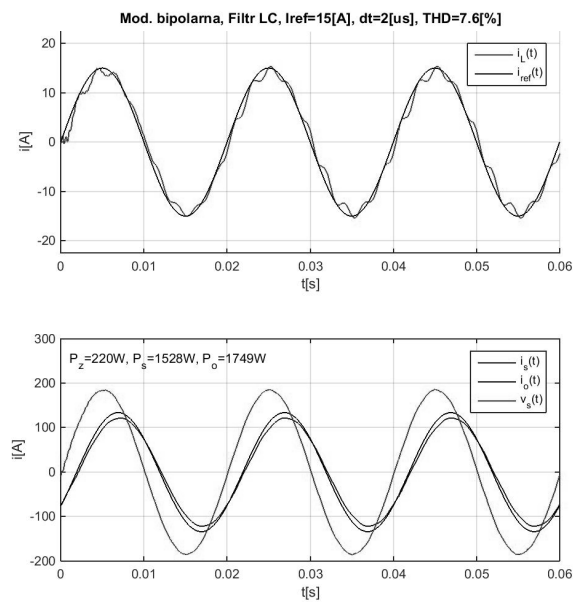


Rys. 5. Wybrane przebiegi prądów i napięć układu dla źródła prądu z filtrem LC

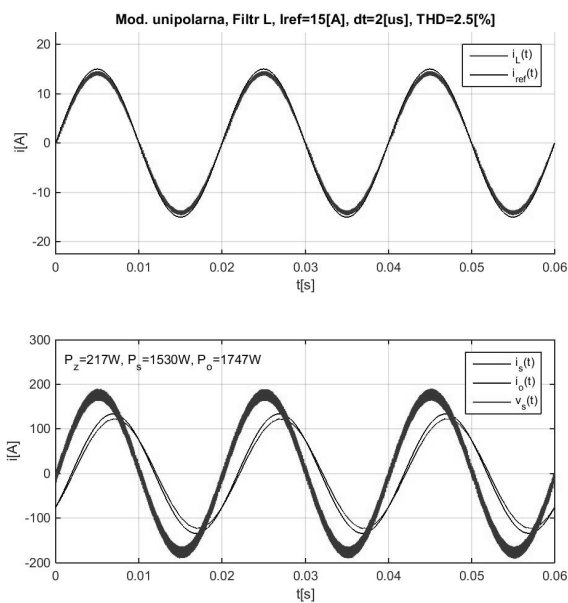
Podobne wnioski wynikają z badań przedstawionych dla falownika pracującego z modulacją unipolarną (rys. 4 i 5).



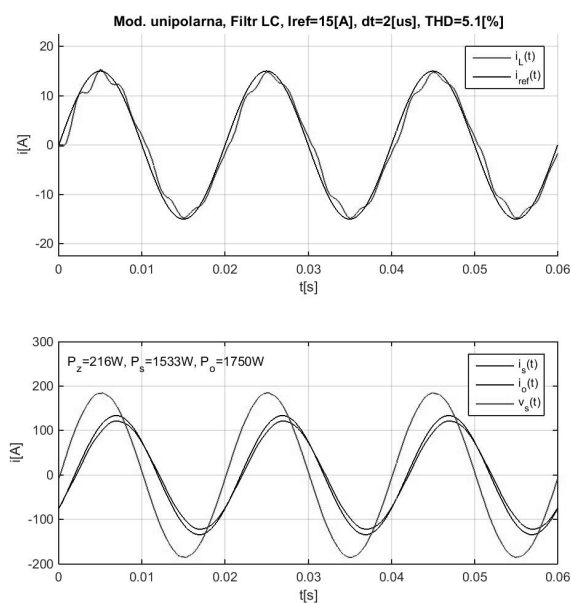
Rys. 6. Wybrane przebiegi prądów i napięć układu dla źródła prądu bez filtru LC



Rys. 7. Wybrane przebiegi prądów i napięć układu dla źródła prądu z filtrem LC



Rys. 8. Wybrane przebiegi prądów i napięć układu dla źródła prądu bez filtru LC



Rys. 7. Wybrane przebiegi prądów i napięć układu dla źródła prądu z filtrem LC



Wyniki badań dla wersji dyskretnej korektora oraz modulacji bipolarnej, dla dwóch struktur źródła prądu (bez filtru LC oraz z filtrem LC) pokazano na rysunkach 6 i 7, natomiast dla modulacji unipolarnej – na rysunku 8 i 9. W badaniach uwzględniono także czas martwy [4], niezbędny dla prawidłowej pracy falownika z modulacją MSI. Wyniki te są zbliżone do wyników uzyskanych dla modelu analogowego dla wszystkich rozpatrywanych przypadków. Przebiegi prądu są jednak bardziej odkształcone, co wynika z wprowadzonego dla modelu dyskretnego czasu opóźnienia (czasu martwego), koniecznego ze względu na prawidłową pracę falownika, lecz będącego źródłem dodatkowych harmonicznych.

## 5. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono ogólną charakterystykę energoelektronicznych sprzęgów alternatywnych źródeł energii z siecią elektroenergetyczną. Omówiono energoelektroniczne źródło prądu generujące prąd o kształcie sinusoidalnym przekazujący energię do sieci. Pokazano metodę sterowania źródła prądu jako układu zamkniętego z prądowym sprzężeniem zwrotnym. Zamieszczono wybrane wyniki badań modeli symulacyjnych takiego układu z korektorem analogowym i dyskretnym oraz badania związane ze współpracą źródła prądu z siecią elektroenergetyczną. Uzyskane wyniki badań symulacyjnych potwierdzają możliwości skutecznego przekazywania energii alternatywnych źródeł energii z wykorzystaniem energoelektronicznych wąskopasmowych źródeł prądu jako sprzęgów z siecią elektroenergetyczną.

## LITERATURA

- [1] Brzózka J., Regulatory i układy automatyki. MIKOM, Warszawa 2004.
- [2] Byrski W., Obserwacja i sterowanie w systemach dynamicznych. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2007.
- [3] Grega W., Metody i algorytmy sterowania cyfrowego w układach scentralizowanych i rozproszonych. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2004.
- [4] Mohan N., Undeland T.M., Robbins W.P., *Power Electronics: Converters, Application and Design*. John Wiley&Sons, New York 2001.
- [5] Porada R.: Aproksymacja filtru dolnoprzepustowego w aspekcie sterowania układów energoelektronicznych. PUT Academic Journal, Electrical Engineering, Poznań 2013, No. 76, ss. 71–78.
- [6] Porada R.: Model częstotliwościowy układów energoelektronicznych z modulacją. PUT Academic Journal, Electrical Engineering, Poznań 2014, No. 78, ss. 209–216.
- [7] Porada R.: Filtry pasywne w falownikach napięcia. Mat. XVI Konf. „Zastosowanie Komputerów w Elektrotechnice”, ZKwE'15, PUT, Academic Journal, Electrical Engineering, Poznań 2015, No. 84, ss. 29–35.

- [8] Porada R.: Zastosowanie metod częstotliwościowych w syntezie korektorów dla zamkniętych układów energoelektronicznych. Mat. XVI Konf. „Zastosowanie Komputerów w Elektrotechnice”, Academic Journal, Electrical Engineering, Poznań 2016, 87, pp. 313–322.
- [9] Porada R., Gulczyński A.: Zmodyfikowane sterowanie dyskretne energoelektronicznym źródłem prądu. Poznan University of Technology, Academic Journals. Electrical Engineering, 2016, 87, pp. 225–233.

#### **THE POWER ELECTRONICS COUPLER ALTERNATIVE SOURCES OF ENERGY WITH THE POWER NETWORK**

The work presents general characteristics of power electronics couplers of alternative energy sources with the power network. One discussed a power electronics current source generating sinusoidal shape current and transferring the energy to the network. One showed a method of control of the current source as closed system with the current feedback. Selected results of such simulation system for sinusoidal shape of reference signals are also included.

*(Received: 13. 02. 2017, revised: 27. 02. 2017)*