ELEKTRYKA 2011
Zeszyt 3 (219) Rok LVII

Damian MAZUR, Lesław GOŁĘBIOWSKI, Marek GOŁĘBIOWSKI
Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Politechnika Rzeszowska

SYMULACJE OPTYMALNEGO STEROWANIA FALOWNIKA PRZY JEGO PRACY NA SIEĆ AUTONOMICZNĄ

Streszczenie. Falownik ma stworzyć sieć trójfazową autonomiczną symetryczną z przewodem zerowym. W poprzednim artykule [7] są przedstawione założenia teoretyczne oraz jest opisana zastosowana metoda sterowania optymalnego falownika. Napięcia tworzonej sieci powinny być symetryczne, nawet przy niesymetrycznym obciążeniu typu RL, jak też przy obciążeniu impulsowym. Układ ten zapewnia też tłumienie wyższych harmonicznych w napięciu tworzonej sieci według zadanego wykazu tych harmonicznych. W tym celu jest obliczane optymalne napięcie wyjściowe z falownika, które zostanie zastosowanie do jego sterowania wektorowego. Natomiast w przedstawianym artykule opisano symulacje rozważanego układu, które mają za zadanie potwierdzenie poprawności i przydatności zastosowanej metody optymalizacji.

Słowa kluczowe: falownik, sterowanie, sieć autonomiczna

SIMULATIONS OF THE OPTIMUM INVERTER CONTROLLING DURING THE OPERATION FOR AUTONOMOUS GRID

Summary. Inverter is supposed to create 3-phase, autonomic and symmetric grid with the neutral line. In the preceding article [7] theoretical assumptions are presented and also applied method of inverter optimal controlling is described. Voltages of the created grid should be symmetric even with non-symmetric RL load, and also with the pulse load. This circuit also provides suppression of higher harmonics in the voltage of the created grid according to the given list of these harmonics. For this purpose, the optimal output voltage from the inverter is calculated, and it will be used to vector controlling of the inverter. In this article, simulations of the circuit under consideration are presented, which are supposed to confirm correctness and usefulness of the applied optimization method.

Keywords: inverter, controlling, autonomous grid

1. WSTĘP

Artykuł [7] przedstawia założenia teoretyczne oraz równania optymalnego sterowania układu falownika, które umożliwiają stworzenie sieci autonomicznej. Układ falownika

tworzącego sieć autonomiczną jest przedstawiony na rysunku 7.1 w [7]. Wielkościami sterującymi są prądy dławików [*Ii*]. Z tych wielkości sterujących było obliczane potrzebne napięcie na wyjściu falownika. Uwzględniono ograniczenia układu, zarówno ze względu na dopuszczalne prądy dławików, jak też na maksymalne napięcia możliwe do osiągnięcia przez falownik. Niewątpliwym ułatwieniem tej metody jest konieczność tylko jednorazowego obliczenia macierzy sterującej [*K_st*] ze wzoru (7.21) z artykułu [7]. W tym artykule będzie przeprowadzone symulacyjne sprawdzenie pracy układu zarówno przy symetrycznym, jak i niesymetrycznym obciążeniu. Zostaną przeprowadzone symulacje również przy niesymetrycznym obciążeniu o charakterze impulsowym. Badano zachowanie się układu, sterowanie którego było obliczane przy niedokładnych parametrach, w szczególności przy bardzo niedokładnych parametrach obciążenia (też impulsowych). Układ, zgodnie z teorią, przedstawioną w artykule [6, 7], nie był wrażliwy na te niedokładności. Tym niemniej przeprowadzano estymację trójfazowego obciążenia. Nowe, udokładnione w ten sposób parametry obciążenia były uwzględniane w przyjętych punktach czasowych. Wówczas należało jednak też ponownie policzyć macierz sterowania [*K_st*] ze wzoru [21].

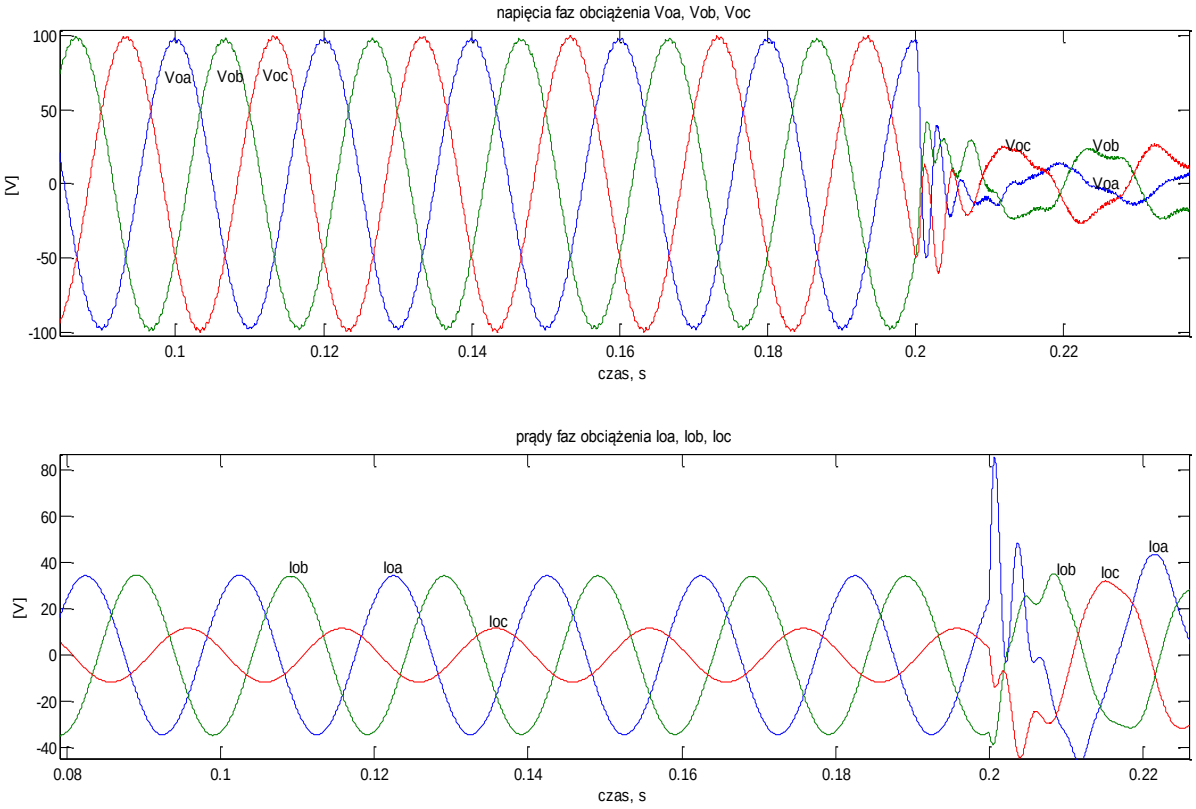
2. SYMULACJE

Wykonano symulacje przy obciążeniu symetrycznym oraz niesymetrycznym. Model dokładny, reprezentujący układ rzeczywisty (7.6), był obciążony rezystancjami Ra_d = 2 Ω, Rb_d = 2 Ω, Rc_d = 6 Ω, połączonymi szeregowo z indukcyjnościami: La_d = Lb_d = 6,36e-3 H, Lc_d = 0,0191 H do czasu 0,2 s. Po tym czasie obciążenie zmieniało się na: Ra_d = 0,2 Ω, Rb_d = 0,5 Ω, Rc_d = 0,5 Ω, La_d = 0,6e-3 H, Lb_d = Lc_d = 1,6e-3 H. Układ nie mógł wytrzymać tego obciążenia (dla t > 0,2 s) ze względu na przekroczenie ograniczenia na prąd maksymalny dławików (|*Ii_g*| > *Ii_m*). Układ równań (7.19), który służył do obliczenia optymalnej macierzy wzmocnienia [*K_st*] (7.21), nie dość, że miał parametry zmienione losowo w granicach ±*ile_pr* = ±*5%* w porównaniu do układu (7.6) symulującego model rzeczywisty (dokładny), to dodatkowo miał bardzo różniące się od rzeczywistego obciążenie: Ra = Rb = Rc = 5 Ω, La = Lb = Lc = 5e-3 H. Podczas obliczeń, korzystając z wartości prądów i napięć każdej fazy, była estymowana z dużą dokładnością wartość parametrów R, L każdej fazy. Wykorzystywano w tym celu równanie napięciowe każdej fazy, tworząc nadokreślone (przykładowo z okresu 133e-6 s wstecz) równanie względem parametrów R, L. Przyjęto, że po czasie t_*wl_est_odb* = 0,1 s mogły zostać uwzględniane dokładniejsze wartości estymowane obciążenia R, L każdej fazy w równaniach (7.19) i (7.21), przez co otrzymywano dokładniejszą wartość macierzy sterującej [*K_st*] z (7.20). Okazało się jednak, że estymacyjne udokładnienie parametrów obciążenia, przy przyjętym schemacie

obliczeniowym nie miało większego wpływu na dokładność obliczeń optymalizacyjnych. Wyniki przedstawiono na rysunku 1.

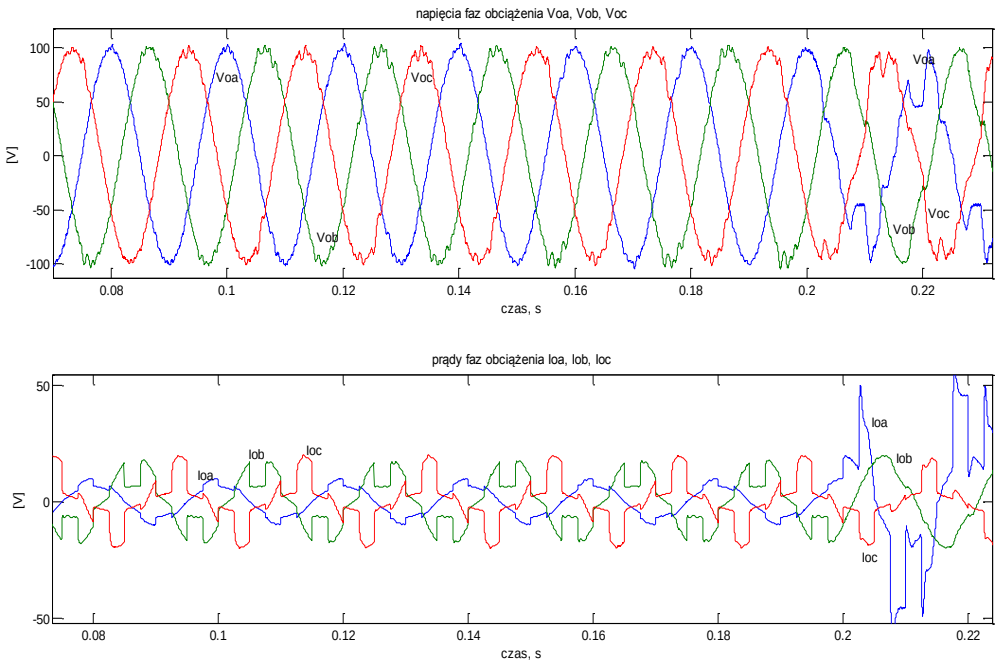
Na rysunku 1 widać działanie zabezpieczające układ przed przeciążeniem prądowym. Nie dopuszcza ono, nawet za cenę odkształconych napięć wyjściowych do przekroczenia prądu dławików [*Ii*] (po zbyt dużym obciążeniu układu w chwili 0,2 s).

Układ sterowania pracuje prawidłowo również przy obciążeniu impulsowym. Tak jak poprzednio nie zauważa się wpływu dokładności parametrów obciążenia na jakość sterowania, co przedstawia rysunek 2.



Rys. 1. Napięcie i prądy faz ciągłego niesymetrycznego trójfazowego obciążenia AC przy pełnych pomiarach w układzie rzeczywistym - do czasu 0,1 s równanie (7.19) bez estymacyjnej poprawy parametrów obciążenia; od 0,2 s za duże niesymetryczne obciążenie (od 0,1 s następuje estymacyjna poprawa parametrów obciążenia)

Fig. 1. Voltages and currents of the AC - continuous unsymmetric three-phase load phases at full measurements in the real system – to 0.1 s equation (7.19) without estimating load parameter correction; from 0.2 s too high unsymmetric load (from 0.1 s there follows estimated load parameter correction)



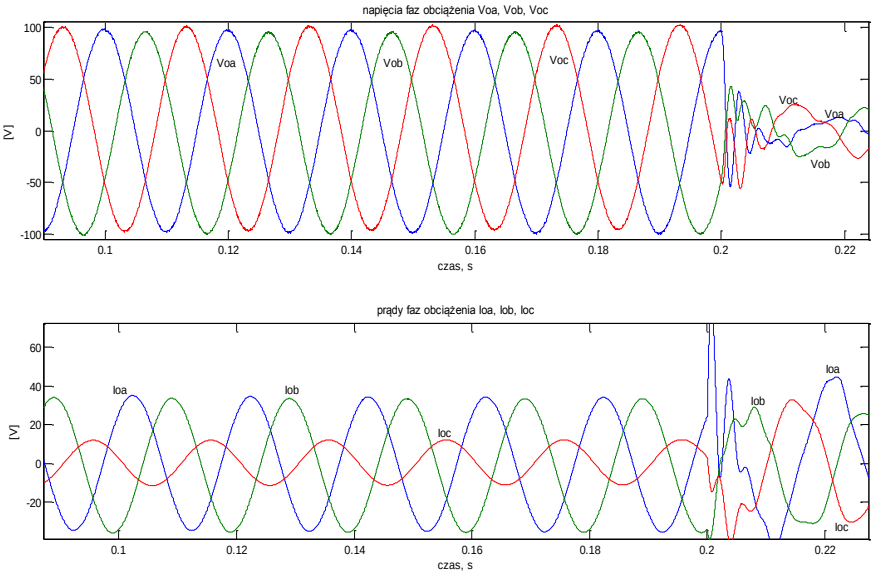
Rys. 2. Napięcia i prądy faz przy impulsowym trójfazowym, niesymetrycznym obciążeniu AC przy pełnych pomiarach w układzie rzeczywistym – do czasu 0,1 s równanie (7.19) bez estymacyjnej poprawy na bieżąco parametrów obciążenia, od 0,2 s za duże niesymetryczne obciążenie (od 0,1 s następuje estymacyjna poprawa parametrów obciążenia)

Fig. 2. Phase voltages and currents at the AC - impulse three-phase unsymmetric load at full measurements in the real system – to 0.1 s equation without estimated load parameter correction systematically, from 0.2 s too high unsymmetric load (from 0.1 s there comes estimated load parameter correction)

Obliczenia były przeprowadzane w przedstawiony sposób, gdy *obl_zz* = 0. Oznaczało to konieczność wykonywania pomiarów wszystkich elementów wektora zmiennych stanu $\vec{x}$, co w programie było symulowane rozwiązaniem modelu dokładnego (rzeczywistego 7.6) oraz układu (7.12). Układ równań (7.19) służył tylko do ustalenia macierzy *Az* i *Bz* celem ich jednorazowego wykorzystania do sterowania (7.21).

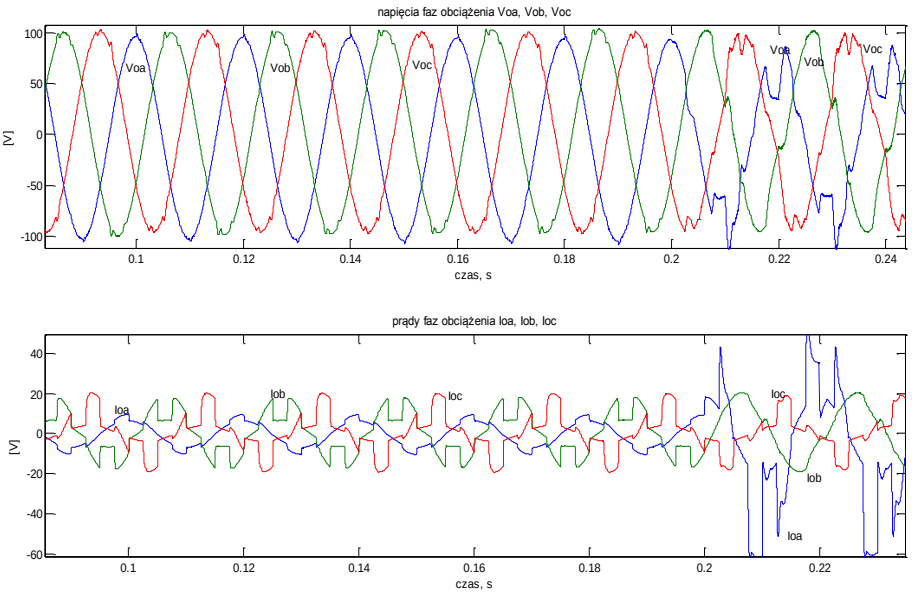
Sprawdzono również możliwość pracy przy niepełnych pomiarach na układzie rzeczywistym (7.6). Jest to najczęściej przyjęta wersja pracy przedstawianego układu. Przyjęto, że są mierzone tylko składowe 5÷7, czyli napięcia $[\vec{V}o]$ faz obciążenia oraz 11÷13, czyli prądy faz obciążenia $[\vec{I}o]$. Dla takiej pracy układu należało przyjąć *obl_zz* = 1. Zamiast pełnych pomiarów na (7.6) oraz obliczenia wektora $\overrightarrow{ni}$ z (7.12) stosowano tylko równanie (7.19) do obliczania wektora $\vec{z}$. Jednak w każdym kroku czasowym ten wektor $\vec{z}$ był poprawiany odczytanymi z modelu dokładnego (7.6) wielkościami $[\vec{V}o]$ i $[\vec{I}o]$. Obliczone w ten sposób sterowanie $[\overrightarrow{Ii_st_r}]$ oraz $[\overrightarrow{Vf_r}]$ było poddawane, tak jak poprzednio, sprawdzeniu na przekroczenia maksymalnych wartości modułów *Ii_m* oraz *Vf_m* i przyjmowane do sterowania układu. Estymacja parametrów obciążenia była włączana również po przekroczeniu czasu 0,1 s. Wyniki przedstawia rysunek 3.

Na rysunku 4 przedstawiono podobny sposób pracy układu sterowania, też przy niepełnych pomiarach zmiennych stanu $\vec{x}$, lecz przy impulsowym obciążeniu, co odpowiada rysunkowi 2.



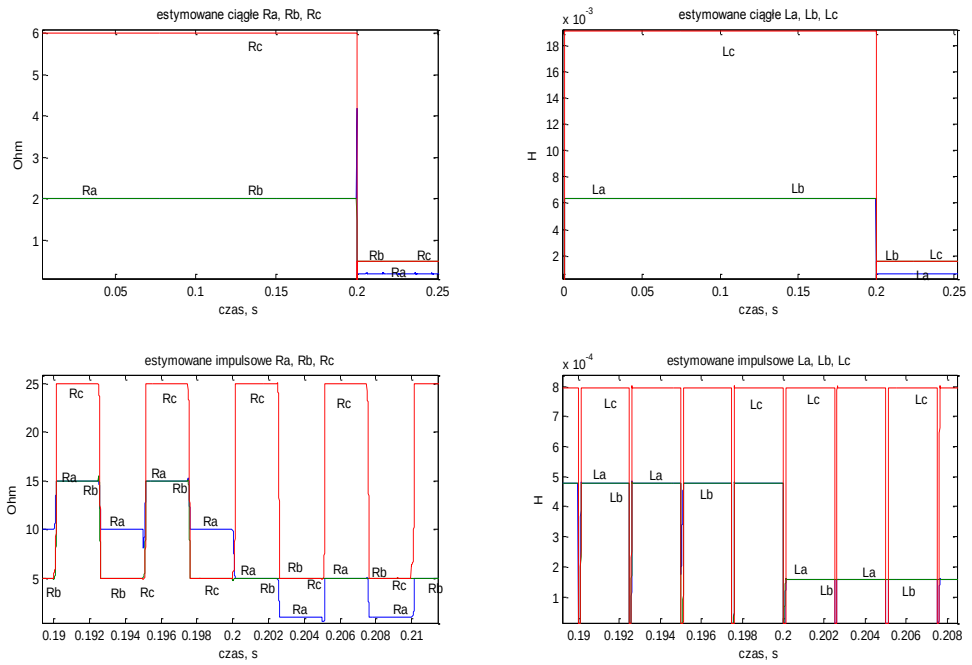
Rys. 3. Napięcia i prądy faz ciągłego, trójfazowego, niesymetrycznego obciążenia AC (jak na rysunku 1), lecz przy niepełnych pomiarach i obliczeniach równaniem (7.19), (obl_zz = 1)

Fig. 3. Voltages and currents of the AC - continuous three-phase unsymmetric load phases (as shown in the figure 1), but at not full measurements and calculations using equation (7.19), (obl_zz = 1)



Rys. 4. Napięcie i prądy fazowe przy impulsowym, trójfazowym, niesymetrycznym obciążeniu AC jak na rysunku 2, przy niepełnych pomiarach wektora zmiennych stanu $\vec{x}$ i obliczeniach równaniem (7.19) (obliczenia jak na rysunku 3 przy obl_zz = 1)

Fig. 4. Phase voltage and currents at the AC – impulse three-phase unsymmetric load as shown in the figure 2, at not full measurements of state variables vector $\vec{x}$ and calculations using equation (7.19) (calculations as shown in the figure 3, obl_zz = 1)



Rys. 5. Estymacje rezystancji i indukcyjności obciążenia, które odzwierciedlały zastosowane parametry R, L; na pozycji (1,1) estymacja rezystancji Ra, Rb, Rc przy ciągłym obciążeniu, na pozycji (1,2) estymacja indukcyjności La, Lb, Lc przy ciągłym obciążeniu, na pozycji (2,1) estymacja rezystancji Ra, Rb, Rc przy impulsowym obciążeniu, na pozycji (2,2) estymacja indukcyjności La, Lb, Lc przy impulsowym obciążeniu

Fig. 5. Resistance and load inductance estimations that illustrated the R, L – parameters applied; at the item (1,1) the Ra, Rb, Rc – resistance estimation at continuous load, at the item (1,2) the La, Lb, Lc – inductance estimation at continuous load, at the item (2,1) the Ra, Rb, Rc – resistance estimation at impulse load, at the item (2,2) the La, Lb, Lc – inductance estimation at impulse load

Do estymacji rezystancji i indukcyjności obciążenia tworzono nadokreślony układ równań, w którym niewiadomymi były te parametry. Dysponując wartościami napięcia oraz prądu na fazie obciążenia w ilości punktów *ilo* z krokiem czasowym d*t*, tworzono różnicowe (zamiast pochodnej d*i*/d*t*) równania napięciowe. Powstawał nadokreślony układ równań o liczbie wierszy (*ilo*-1) z dwoma niewiadomymi R, L, który był rozwiązywany metodą minimalizacji błędu (w Matlabie instrukcją \ ). Czynności te były powtarzane dla każdej fazy obciążenia. Na rysunku 5 przedstawiono otrzymane estymacje parametrów obciążenia, które dokładnie odpowiadają zastosowanym obciążeniom.

Jak widać z zamieszczonych rysunków, estymacje parametrów obciążenia nie miały decydującego znaczenia na poprawność optymalizacji sterowania, zarówno przy pełnym pomiarze wektora zmiennych stanu $\vec{x}$ (gdy *obl_zz* = 0) lub też przy niepełnym jego pomiarze (gdy *obl_zz* = 1).

3. WNIOSKI

Z przedstawionych rozważań i symulacji można wyciągnąć wniosek, że opisana metoda optymalnego sterowania falownikiem sprawdza się przy jego samodzielnej (autonomicznej) pracy w układzie z rysunku 7.1 z [7]. Układ spełniał założenia projektowe, pomimo że podczas sterowania były użyte tylko jego przybliżone parametry. Okazał się też mało wrażliwy na parametry obciążenia, znane z bardzo dużą niedokładnością lub też zmieniane w sposób impulsowy. Pomimo to opracowano sposób bieżącej estymacji parametrów obciążenia. Podczas każdej poprawy parametrów obciążenia było konieczne też obliczenie na nowo macierzy sterowania z [7.19 i 7.21]. Przedstawiono ciekawy sposób generacji sinusoidalnego napięcia wzorcowego podstawowej harmonicznej dla pracy autonomicznej. Na podobnej zasadzie działa też wydzielanie harmonicznych z napięcia obciążenia. Umieszczenie ich w funkcji jakości [7.11] umożliwia ich usuwanie. W dobie rozwoju energoelektroniki można układ powyższy uznać za silną konkurencję dotychczas stosowanych metod PWM, histerezowej czy wektorowej [2, 3, 4].

BIBLIOGRAFIA

1. Keyhani A., Marwali M., Dai M.: Integration of green and renewable energy in electric power systems. John Wiley & Sons, 2010.
2. Tunia H., Barlik R.: Teoria przekształtników. Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1992.
3. Piróg S.: Energoelektronika – negatywne oddziaływania układów energoelektronicznych na źródła energii i wybrane sposoby ich ograniczenia. Uczelniane Wydawnictwo AGH, Kraków 1998.
4. Pasko M., Adrikowski T., Buła D., Dębowski K., Maciążek M.: Analiza wybranych właściwości energetycznych filtrów aktywnych. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2011.
5. Lerch T.: Stany dynamiczne elektrowni wiatrowej z maszyną indukcyjną dwustronnie zasilaną. Wydawnictwa Akademii Górniczej i Hutniczej w Krakowie, książka w druku, 2012.
6. Gołębiowski L., Lewicki J.: Układy elektromagnetyczne w energoelektronice. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, monografia w druku, 2012.

7. Gołębiowski L., Mazur D., Gołębiowski M.: Optymalne sterowanie falownika przy jego pracy na sieć autonomiczną – teoria. XIV Sympozjum, Podstawowe Problemy Energoelektroniki, Elektromechaniki i Mechatroniki, PPEEm 2011 pod patronatem Komitetu Elektrotechniki PAN, Wisła, 9-12 grudnia 2011.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Bogusław Grzesik

Wpłynęło do Redakcji dnia 20 października 2011 r.

Dr inż. Damian MAZUR
Dr hab. inż. Lesław GOŁĘBIOWSKI
Dr inż. Marek GOŁĘBIOWSKI

Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki
Zakład Podstaw Elektrotechniki i Informatyki
ul. W. Pola 2; 35-959 RZESZÓW

tel.: (017) 865-13-30
e-mail: mazur@prz.edu.pl; golebiye@prz.rzeszow.pl; yegolebi@prz.edu.pl