

Modulator prądu w zmodyfikowanej strukturze szerokopasmowego sterowanego źródła prądowego

Streszczenie. W artykule zaprezentowano model symulacyjny zmodyfikowanej struktury sterowanego energoelektronicznego źródła prądowego z zaimplementowanym dodatkowym modulatorem prądu. Zaproponowane rozwiązanie umożliwia m.in. znaczące zwiększenie pasma przenoszenia przekształtnika. W konsekwencji, w porównaniu z konwencjonalnymi rozwiązaniami energoelektronicznych źródeł prądowych, zwiększono wyraźnie dynamikę układu, polepszając tym samym jakość odwzorowania w prądzie wyjściowym sygnału referencyjnego.

Abstract. In this article the elaborated simulation model of the modified controlled current source structure with current modulator was presented. With aid of such solution we can increase the bandwidth of described converter. Consequently, in comparison with conventional solution of power electronics current sources, the better dynamic properties and quality of output signal of presented converter were achieved. (**Current modulator implemented in modified wideband controlled current source**).

Słowa kluczowe: sterowane źródło prądowe, modulator prądu, regulator prądu, aktywny kompensator równoległy.

Keywords: controlled current source, current modulator, current regulator, active parallel compensator.

doi:10.12915/pe.2014.06.17

Wstęp

W artykule zaprezentowano budowę oraz ideę działania opracowanego modelu szerokopasmowego sterowanego energoelektronicznego źródła prądowego współpracującego z zaimplementowanym modulatorem prądu. Opisano zarówno część silnoprądową układu, jak i sterującą. Zaproponowana struktura umożliwia wyraźne zwiększenie pasma przenoszenia w porównaniu z powszechnie stosowanymi rozwiązaniami. W konsekwencji układ odznacza się polepszonymi właściwościami dynamicznymi, dzięki czemu możliwe jest polepszenie jakości odwzorowania w sygnale wyjściowym sygnału referencyjnego o dużej dynamice zmian (np. sygnału prostokątnego).

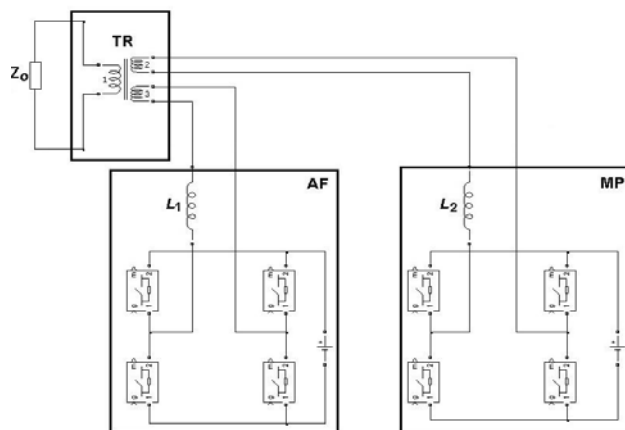
Zaprezentowano wybrane wyniki badań symulacyjnych wykonanych za pomocą narzędzia Matlab oraz Orcad. Przedstawiono rezultaty badań otrzymane dla niezależnie działającego energoelektronicznego źródła prądowego, jak i również przykładowej aplikacji prezentowanego przekształtnika – w układzie aktywnej kompensacji równoległej [1, 2].

Część silnoprądowa sterowanego źródła prądowego

Uproszczony model symulacyjny części silnoprądowej sterowanego energoelektronicznego źródła prądowego zasilającego odbiornik (Z_o) zaprezentowano na rysunku 1. Zaproponowana struktura przekształtnika składa się z dwóch modułów, a mianowicie: modułu głównego (AF) oraz dodatkowego energoelektronicznego modulatora prądu (MP). Rozwiązanie to może stanowić alternatywę dla konwencjonalnych źródeł prądowych bazujących na 1-fazowych mostkach tranzystorowych z dolnoprzepustowymi filtrami wyjściowymi. Umożliwia bowiem m.in. polepszenie dynamiki układu, przy jednoczesnym ograniczeniu strat przełączeń.

Moduł AF bazuje na jednofazowym tranzystorowym (w modelu wykorzystano klucze idealne) falowniku z wyjściowym dolnoprzepustowym filtrem indukcyjnym (L_1). Przekształtnik ten pracuje w zamkniętym układzie regulacji nadążnej prądu, stanowiąc tym samym energoelektroniczne sterowane źródło prądowe. Dynamika modułu AF, a zatem i skuteczność odwzorowania prądu referencyjnego o dużej dynamice zmian, uzależniona jest od wielu czynników. Należą do nich m.in.: wartość napięcia zasilającego w obwodzie stałoprądowym, wartość indukcyjności filtra wyjściowego, parametry układu sterowania (częstotliwość impulsowania kluczy, struktura i nastawy zastosowanego

regulatora prądu). Konieczność stosowania dławika na wyjściu źródła prądowego jest jedną z ważniejszych przyczyn ograniczenia pasma przenoszenia przekształtnika. Dobór wartości jego indukcyjności podyktowany jest m.in. możliwością ograniczenia pulsacji sygnału wyjściowego źródła prądowego (ograniczenie harmonicznym związanych z częstotliwością przełączeń kluczy).

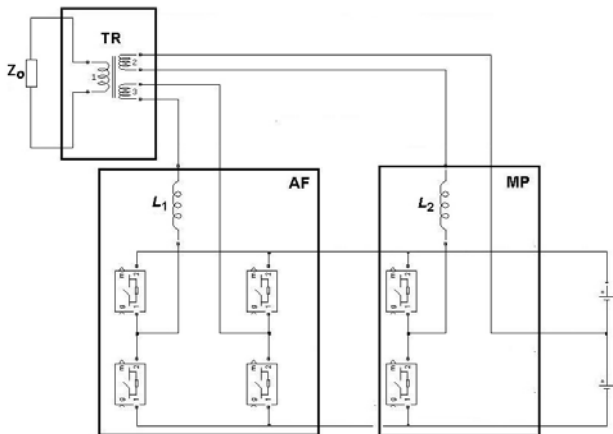


Rys.1. Uproszczony model symulacyjny części silnoprądowej energoelektronicznego źródła prądowego

W celu poprawy właściwości dynamicznych prezentowanego przekształtnika zaimplementowano dodatkowy moduł energoelektronicznego modulatora prądu MP sprzężonego poprzez transformator (TR) (rys. 1) [1]. Generowany przez ten układ sygnał umożliwia modulację prądu wyjściowego modułu głównego AF [2, 3]. Analogicznie, jak moduł AF, przekształtnik ten bazuje na falowniku z dolnoprzepustowym indukcyjnym filtrem wyjściowym, pracującym w regulacji nadążnej prądu. Zastosowany dławik (L_2) ma jednak mniejszą wartość indukcyjności (w opisywanym przypadku 5-krotnie). Spełnienie tego warunku jest konieczne w celu zwiększenia szerokości pasma przenoszenia (dynamiki) zaimplementowanego modułu MP.

W ramach dalszych etapów prac zmodyfikowano część silnoprądową układu. Przedstawiono ją na rysunku 2. Moduł modulatora prądu MP zbudowano na bazie półmostka tranzystorowego z filtrem wyjściowym. Zastosowano również wspólną szynę stałoprądową dla obu modułów AF i

MP [1]. Rozwiązane to wydaje się być uzasadnione, ponieważ do realizacji obu modułów wykorzystano jeden trójfazowy mostek tranzystorowy powszechnie dostępny na rynku w postaci zintegrowanego tranzystorowego modułu inteligentnego IPM.

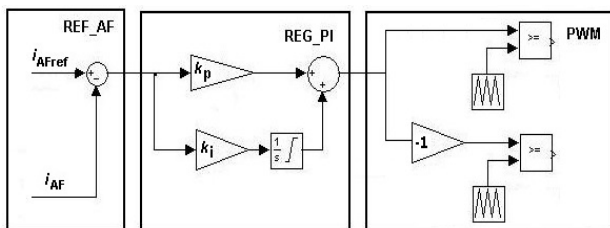


Rys. 2. Model symulacyjny zmodyfikowanej części energetycznej sterowanego źródła prądowego

Zastosowanie transformatora TR sprzęgającego oba moduły AF oraz MP umożliwia nie tylko odpowiednie dopasowanie zakresu napięć roboczych wykorzystanych kluczy, ale zapewnia również niezależną pracę obu zaimplementowanych modułów (separacja galwaniczna obwodów wyjściowych).

Model symulacyjny części sterującej modułem AF

Na rysunku 3 przedstawiono uproszczony model symulacyjny układu sterowania kluczami modułu głównego AF kompensatora.



Rys. 3. Model symulacyjny układu sterowania kluczami modułu AF

Składa się on z następujących bloków: bloku wyznaczenia sygnału referencyjnego (REF_AF), proporcjonalno-całkującego regulatora prądu z ograniczeniem wyjścia członu całkującego (REG_PI) oraz z modulatora szerokości impulsów (PWM) porównującego wyjściowy sygnał regulatora z trójkątnym sygnałem nośnym o częstotliwości 10kHz (modulacja dwustronna jednobiegunowa).

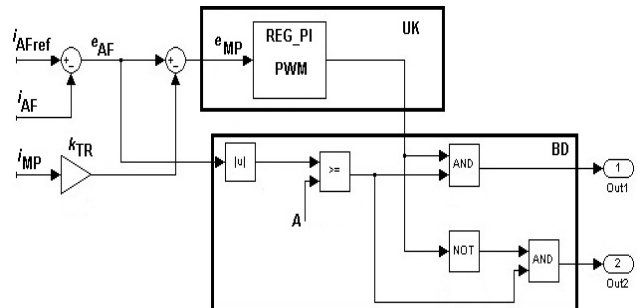
Struktura (w tym przypadku konwencjonalny regulator typu PI) oraz parametry regulatora prądu powinny być dobrane tak, aby umożliwić możliwie wierne odwzorowanie w sygnale wyjściowym modułu AF sygnału referencyjnego (zadanego). Dobór parametrów regulatorów nie jest jednak tematem niniejszego artykułu (planowana jest implementacja regulatorów bazujących na filtrach cyfrowych IIR) [4, 5, 6].

Zaimplementowany modulator PWM realizuje algorytm modulacji jednobiegunowej, dzięki czemu możliwe jest polepszenie jakości sygnału wyjściowego (harmoniczne wynikające z częstotliwości impulsowania kluczy przesunięto w stronę 2-krotnie wyższych częstotliwości).

Model symulacyjny części sterującej modułem MP

Dodatkowy moduł energoelektronicznego modulatora prądu MP zaimplementowano w celu polepszenia właściwości dynamicznych źródła prądowego. Generowany sygnał w wyniku zastosowania sprzężenia transformatorowego moduluje prąd wyjściowy modułu głównego AF [1, 3] w przypadku zaistnienia konieczności generowania prądu wyjściowego o dużej dynamice zmian.

Model symulacyjny układu sterowania dodatkowym modułem MP zaprezentowano na rysunku 4.



Rys. 4. Model symulacyjny układu sterowania dodatkowym modułem modulatora MP

Blok (UK) reprezentuje proporcjonalno-całkujący regulator prądu z ograniczeniem wyjścia członu całkującego (planowana jest implementacja regulatora bazującego na filtrach cyfrowych IIR) oraz modulator PWM (zbudowany z komparatora porównującego sygnał modulujący z trójkątnym sygnałem nośnym). Struktura układu UK jest zatem podobna, jak w przypadku układu przedstawionego na rysunku 3.

Sygnałem wejściowym dla regulatora prądu jest sygnał uchybu e_{MP} (rys. 4) wyrażony wzorem (1).

$$(1) \quad e_{MP} = e_{AF} - i_{MP} k_{TR}$$

gdzie: e_{AF} – sygnał uchybu regulatora modułu AF, i_{MP} – prąd generowany przez moduł MP.

Należy zwrócić uwagę, że sygnał uchybu e_{AF} regulatora modułu AF jest jednocześnie sygnałem referencyjnym (zadany) i_{MPref} dla modułu modulatora prądu MP.

Człon wzmacniający (k_{TR}) reprezentuje wartość wzmocnienia w torze pomiarowym prądu wyjściowego modułu MP. Wartość ta zależna jest od przekładni transformatora sprzęgającego TR.

Ze względu na konieczność zapewnienia szerszego pasma przenoszenia (większej dynamiki układu) modulatora prądu, częstotliwość przełączeń jego kluczy powinna być większa niż częstotliwość pracy kluczy modułu głównego AF. W przypadku rozpatrywanego modelu jest ona dwukrotnie większa i wynosi 20kHz.

Mimo identycznej struktury regulatora prądu jego parametry, w porównaniu do regulatora zaimplementowanego w torze sterowania modułu AF, uległy zmianie. Modyfikacja parametrów regulatora jest konieczna ze względu na zmianę parametrów transmitancji układu otwartego rozpatrywanego przekształtnika. Jest to konsekwencją nie tylko zmiany wartości indukcyjności filtra wyjściowego i częstotliwości impulsowania, ale także innego poziomu napięcia w obwodzie pośredniczącym DC (rys. 2). Przy doborze nastaw regulatorów prądowych posługiwano się m.in. kryterium związanym z ograniczeniem szybkości zmian sygnału modulującego. Spełnienie tego warunku jest konieczne w celu zapewnienia prawidłowej częstotliwości przełączeń zaworów, która powinna być równa częstotliwości sygnału nośnego. Drugim

wykorzystywanym kryterium było zapewnienie stabilności zamkniętego układu regulacji – przy możliwie wiernym odwzorowaniu w sygnale wyjściowym sygnału referencyjnego [4, 5].

Blok decyzyjny (BD) (rys. 4) jest odpowiedzialny za detekcję dużej szybkości zmian prądu referencyjnego, a w konsekwencji uaktywnienie modułu modulatora prądu. Blok ten składa się m.in. z komparatora porównującego wartość bezwzględną sygnału uchybu e_{AF} regulatora modułu głównego AF z pewną stałą odniesienia A . Wartość stałej odniesienia decyduje o progu czułości aktywacji modułu modulatora prądu. Jeżeli spełniona jest nierówność wyrażona zależnością (2), to następuje aktywacja modułu MP, a jego klucze pracują w rozpatrywanym przypadku z częstotliwością dwukrotnie większą od częstotliwości pracy kluczy modułu głównego AF.

$$(2) \quad |e_{AF}| \geq A,$$

gdzie: A – stała odniesienia decydująca o progu czułości aktywacji kluczy modulatora prądu.

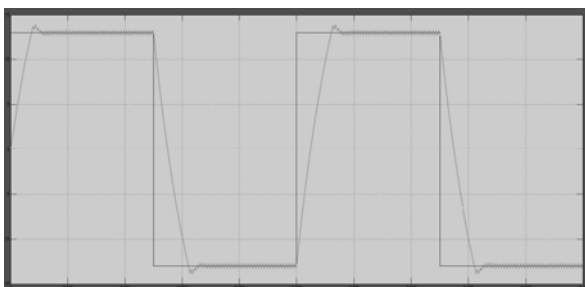
Należy zaznaczyć, że wartość stałej odniesienia A nie powinna być zbyt mała. Może to bowiem doprowadzić do sytuacji aktywacji modułu MP w przypadku, kiedy pasmo przenoszenia (dynamika) modułu głównego jest w zupełności wystarczające. Nie da się sprowadzić wartości chwilowych uchybu regulatora prądu zaimplementowanego w torze sterowania modułu AF do zera. Oscylacja prądu wyjściowego wokół sygnału referencyjnego wynika bowiem z samej istoty działania modulatora PWM (w sygnale wyjściowym pojawiają się charakterystyczne tętnienia, których częstotliwość uzależniona jest od częstotliwości sygnału nośnego modulatora PWM).

W przypadku algorytmu modulacji jednobiegunowej (dotyczy modułu AF) wartość stałej odniesienia A może przyjmować niższe wartości w porównaniu z modulacją dwubiegunową ze względu na uzyskanie mniejszego poziomu oscylacji sygnału wyjściowego wokół sygnału referencyjnego.

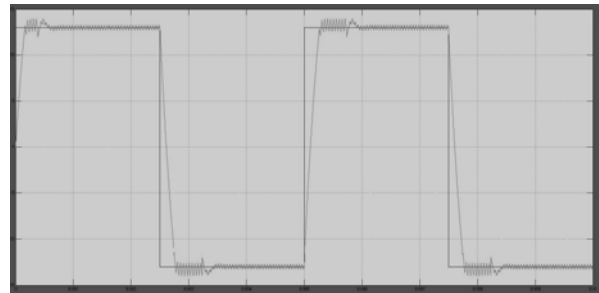
Wybrane wyniki badań symulacyjnych

Badania symulacyjne przeprowadzono z wykorzystaniem m.in. oprogramowania Matlab oraz Orcad. Zaprezentowane wyniki badań dotyczą prostokątnego sygnału referencyjnego o częstotliwości 200Hz i odbiornika (Z_o) o charakterze rezystancyjnym. W celu umożliwienia oceny efektywności działania zmodyfikowanej struktury źródła prądowego badania przeprowadzono zarówno dla klasycznej struktury przekształtnika oraz zmodyfikowanej o dodatkowy moduł modulatora prądu MP.

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że implementacja dodatkowego modułu modulatora MP umożliwia wyraźne skrócenie czasu (około 2-krotnie) niezbędnego na osiągnięcie przez sygnał wyjściowy wartości bliskich sygnałowi referencyjnemu.



Rys. 5. Przebiegi sygnałów zadanych (prostokątnego) oraz wyjściowego dla klasycznej struktury źródła prądowego



Rys. 6. Przebiegi sygnałów zadanych (prostokątny) oraz wyjściowego dla zmodyfikowanej struktury źródła prądowego (moduły AF i MP)

Przykładowa aplikacja źródła prądowego bazującego na modułach AF oraz MP

Szczególnie istotnym problemem współczesnej elektroenergetyki i energoelektroniki jest polepszenie jakości przekształcania energii elektrycznej. Głównymi kryteriami oceny układów wykorzystujących przekształtniki energoelektroniczne są ich wskaźniki energetyczne, a zwłaszcza odkształcenie prądu pobieranego z sieci oraz współczynnik mocy określający m.in. stopień tzw. wyzysku energetycznego urządzenia przy danej mocy pozornej [2]. W przypadku niedostatecznie dużej mocy zwarciowej sieci następstwem pobierania odkształconego prądu jest odkształcenie napięcia sieciowego, które często przekracza dopuszczalny poziom. W konsekwencji poszukuje się rozmaitych metod polepszenia jakości przekształcania energii.

Jednym z rozwiązań poprawiających jakość prądu sieciowego polega na stosowaniu aktywnych kompensatorów równoległych [1, 2], które bazują na energoelektronicznych sterowanych źródłach prądowych. Zadaniem źródła prądowego jest w tym przypadku generowanie prądu kompensującego, którego wartość wzorcową można wyznaczyć z zależności (3).

$$(3) \quad i_{AFref} = i_{Sref} - i_s,$$

gdzie: i_{Sref} – optymalny prąd aktywny, i_s – prąd pobierany z sieci przez odbiornik.

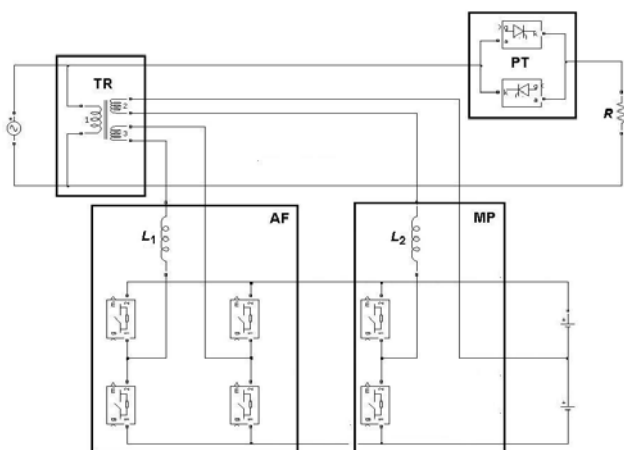
Optymalny prąd aktywny minimalizuje wartość skuteczną prądu sieci oraz jego odkształcenie. Może być wyznaczany z wykorzystaniem różnych metod, np. na bazie teorii mocy Fryzego. Nie jest to jednak przedmiotem niniejszego artykułu, dlatego też aspekt ten pominięto w dalszych rozważaniach.

Model symulacyjny aktywnego kompensatora równoległego bazującego na opracowanej strukturze źródła prądowego zaprezentowano na rysunku 7. Transformator sprzęgający TR z siecią moduły MP oraz AF wchodzące w skład źródła prądowego umożliwia dopasowanie napięć obwodu stałoprądowego zarówno w przypadku pełnego mostka H (moduł AF), jak i półmostka (moduł MP). Tym samym możliwe jest znaczące ograniczenie zakresu napięć roboczych zastosowanych kluczy półprzewodnikowych.

W rozpatrywanym przypadku aktywny kompensator równoległy współpracuje z siecią zasilającą tyrystorowy regulator napięcia przemiennego (PT) obciążony odbiornikiem o charakterze rezystancyjnym.

W celu oceny dynamiki zaprezentowanej struktury kompensatora równoległego, regulator tyrystorowy zasilający odbiornik rezystancyjny PT wysterowano z kątem załączania 90 stopni elektrycznych, wymuszając tym samym bardzo dużą szybkość zmian prądu sieciowego. Badania przeprowadzono zarówno dla klasycznego źródła

prądowego, jak i struktury zaproponowanej przez autora artykułu. Wybrane wyniki przedstawiono na rysunku 8 (strzałkami zaznaczono chwile pracy kluczy modułu MP).



Rys. 7. Model aktywnego układu kompensacji równoległej



Rys. 8. Prąd referencyjny sieci oraz prądy sieci w przypadku wykorzystania kompensatorów aktywnych (z oraz bez modułu MP)

Zastosowanie dodatkowego modułu MP zdecydowanie polepszyło właściwości dynamiczne źródła prądowego, a w konsekwencji ograniczyło odkształcenia prądu sieciowego po kompensacji (zmniejszenie uchybu regulacji).

Modyfikacja zaimplementowanych regulatorów prądu

W realizowanym obecnie układzie eksperymentalnym źródła prądowego z modulacją prądu planowane jest zastąpienie konwencjonalnych regulatorów prądu modułami AF oraz MP strukturą opracowaną w ramach wcześniej prowadzonych prac bazującą na połączeniu filtrów cyfrowych IIR dolno- i górnoprzepustowych [4, 5, 6, 7].

Transmitancję operatorową opracowanej struktury regulatora prądu wyrażono zależnością (4).

$$(4) \quad F(s) = \left(1 + \frac{K_1 s R_2 C}{1 + s R_1 C} \right) \frac{K_F}{1 + s T_{FDP}}$$

gdzie: T_{FDP} – stała czasowa filtru dolnoprzepustowego, K_F – wzmacnienie filtru dolnoprzepustowego, $R_2 C$ – stała czasowa części różniczkującej, R_1 – parametr umożliwiający ograniczenie wzmacnienia części różniczkującej dla wyższych częstotliwości, K_1 – wyraża efektywne oddziaływanie części różniczkującej na cały układ regulacji.

W trakcie doboru parametrów i struktury filtrów (pełniących funkcję regulatora prądu) wykorzystywano poniżej wymienione kryteria.

Pierwszym z analizowanych kryteriów doboru struktury i parametrów regulatora prądu było ograniczenie szybkości zmian sygnału modulującego modulatora szerokości impulsów.

Drugim istotnym dla optymalnego doboru regulatora kryterium jest zapewnienie stabilności zamkniętego układu regulacji – przy możliwie wiernym odwzorowaniu w sygnale wyjściowym sygnału referencyjnego. Do analizy stabilności wykorzystano kryterium Bodego umożliwiające m.in. uwzględnienie wpływu członu opóźniającego e^{-sT} .

Ostatnim z analizowanych kryteriów doboru struktury i parametrów regulatora było kryterium związane z efektem aliasingu zachodzącym w sygnale sprzężenia zwrotnego. Efekt ten ma miejsce w dyskretnych systemach przetwarzania sygnałów i jest konsekwencją niespełnienia przez takie systemy twierdzenia Kotielnikowa-Shanonna, określającego maksymalną wartość pasma sygnału próbkowanego w stosunku do częstotliwości próbkowania.

Implementacja filtru dolnoprzepustowego w strukturze regulatora prądu umożliwiła ograniczenie zjawiska aliasingu. Traktując modulator PWM jako układ próbkujący-pamiętający można przyjąć, że częstotliwość graniczna filtru powinna być dwukrotnie mniejsza niż częstotliwość pracy modulatora. Natomiast dodatkowa struktura bazująca na członie różniczkującym ma za zadanie m.in. zminimalizować efekty opóźnienia fazy wprowadzone w układ sterowania przez modulator PWM.

Podsumowanie

Na podstawie uzyskanych wyników przeprowadzonych badań można potwierdzić słuszność tezy zastosowania dodatkowego energoelektronicznego modulatora prądu MP. Zaprezentowana zmodyfikowana struktura sterowanego źródła prądowego pozwala zwiększyć pasmo przenoszenia, co z kolei przekłada się na poprawienie jakości odwzorowania sygnałów referencyjnych. Celowość stosowania tego typu rozwiązań jest uzasadniona w przypadku występowania sygnałów zadanych charakteryzujących się dużą szybkością zmian. Pewną wadą rozwiązania jest natomiast konieczność zastosowania transformatora sprzęgającego moduły części silnoprądowej.

LITERATURA

- [1] Krystkowiak M., Zmodyfikowana struktura szerokopasmowego energoelektronicznego sterowanego źródła prądowego z modulatorem prądu, *SENE 2013*, Łódź 2013, art. 72.
- [2] Supronowicz H., Strzelecki R., Współczynnik mocy w systemach zasilania prądu przemiennego i metody jego poprawy, *OWPW 2000*
- [3] Krystkowiak M., Przekształcanie energii elektrycznej w układach prostownikowych mocy z modulacją prądu, *Przegląd Elektrotechniczny 2012*, nr 10a, 22-25
- [4] Gwóźdź M., Krystkowiak M., Energoelektroniczne szerokopasmowe źródła napięcia i prądu, *Przegląd Elektrotechniczny 2011*, 37-40
- [5] Krystkowiak M., Gwóźdź M., Control system of Power electronics current modulator utilized In diode rectifier with sinusoidal source current, *EPE-PEMC 2008*, ID 667
- [6] Krystkowiak M., Metody modelowania oraz dobór parametrów i struktur cyfrowych układów sterowania wybranych przekształtników energoelektronicznych, *Prace badawcze w ramach DS Politechniki Poznańskiej: 42-70/11 DS. MK*
- [7] Kaczorek T., *Teoria sterowania i systemów*, Warszawa, PWN 1999

Autor: dr inż. Michał Krystkowiak, Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: Michał.Krystkowiak@put.poznan.