

Łukasz CIEPLIŃSKI*, Michał KRYSTKOWIAK*, Michał GWÓŹDŹ*

MODEL SYMULACYJNY JEDNOFAZOWEGO PROSTOWNIKA DIODOWEGO Z MODULATOREM PRĄDU

W artykule zaprezentowano strukturę oraz zasadę działania jednofazowego prostownika diodowego z modulatorem prądu w obwodzie wejściowym. Rozwiązanie to charakteryzuje się poborem sinusoidalnego prądu z sieci elektroenergetycznej, zgodnego w fazie z podstawową harmoniczną napięcia. Opisano zarówno część silnoprądową, jak i sterującą zbudowanego modelu symulacyjnego. Zaprezentowano również wyniki badań modelu w wybranych warunkach pracy.

SŁOWA KLUCZOWE: prostownik diodowy, transformator szerokopasmowy, modulator prądu.

1. WPROWADZENIE

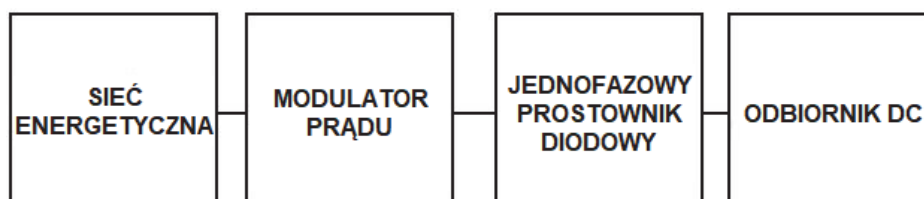
W artykule zaprezentowano strukturę części silnoprądowej oraz układu sterowania opracowanego prostownika diodowego z modulatorem prądu w obwodzie wejściowym. Rozwiązanie to odznacza się poborem sinusoidalnego prądu sieci, zgodnego w fazie z podstawową harmoniczną napięcia zasilającego.

Idea działania prezentowanego układu bazuje na modulacji prądu wejściowego przekształtnika. Modulator prądu jest energoelektronicznym sterowanym źródłem prądowym, połączonym z obwodem głównym za pomocą szerokopasmowego transformatora. W wyniku zastosowania modulatora możliwe jest uzyskanie quasi-sinusoidalnego prądu zasilającego, zgodnego w fazie z podstawową harmoniczną napięcia sieci [1, 2, 3]. Ponadto, rozwiązanie to pozwala na regulację wartości napięcia wyjściowego, mimo że część silnoprądowa bazuje na niesterowanym mostku diodowym. W artykule przedstawiono wybrane wyniki badań modelu symulacyjnego układu.

* Politechnika Poznańska

2. IDEA DZIAŁANIA JEDNOFAZOWEGO PROSTOWNIKA DIODOWEGO Z WEJŚCIOWYM MODULATOREM PRĄDU

Schemat blokowy układu, odzwierciedlający sposób połączenia jego poszczególnych elementów, zaprezentowano na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat blokowy jednofazowego prostownika diodowego z modulatorem prądu

Zastosowany modulator prądu, sprzężony z obwodem wejściowym układu prostownika diodowego poprzez szerokopasmowy transformator o niewielkim strumieniu rozproszenia, może pracować w trzech trybach pracy, a mianowicie:

- obniżającym napięcie wyjściowe,
- podwyższającym napięcie wyjściowe,
- niezmiennym napięcia wyjściowego (w tym przypadku jego wartość jest taka sama, jak dla klasycznych układów prostowników diodowych).

W konsekwencji, za pomocą generowanego przez modulator prądu (o odpowiednim kształcie), możliwa jest nie tylko poprawa jakości wypadkowego prądu pobieranego z sieci, ale również sterowanie przepływem mocy w systemie – w zależności od aktualnych potrzeb. Sam modulator bazuje na falowniku napięcia z wyjściowym indukcyjnym filtrem dolnoprzepustowym, pracującym w zamkniętym układzie regulacji nadążnej, stanowiąc energoelektronicznie sterowane źródło prądowe [4, 5, 6, 7, 8]. Za pomocą transformatora impulsowego prąd modulatora jest dodawany (ze znakiem „+” lub „-”) do prądu wejściowego prostownika diodowego. W ten sposób możliwe jest kształtowanie wypadkowego prądu sieci. Ponadto możliwa jest także regulacja przepływu mocy w systemie, a dzięki temu, także regulacja napięcia na odbiorniku.

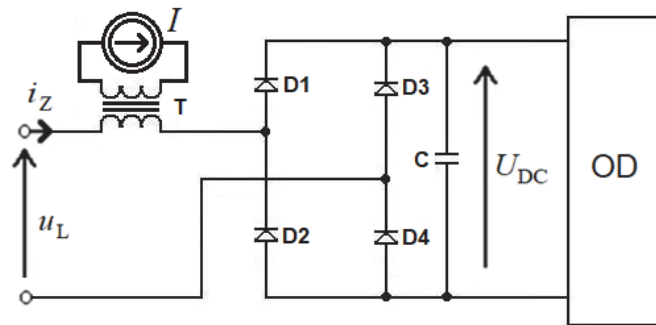
3. BUDOWA PROSTOWNIKA DIODOWEGO Z MODULACJĄ PRĄDU ZASILAJĄCEGO

3.1. Struktura prostownika z modulatorem prądu

Układ bazuje na klasycznej strukturze mostka diodowego, w którego obwód wejściowy włączono dodatkowo modulator prądu. Zastosowano w tym celu sprzężenie transformatorowe dwóch obwodów. Takie rozwiązanie umożliwia kształtowanie prądu pobieranego z sieci (zarówno, co do zawartości wyższych

harmonicznych, jak i przesunięcia fazowego rozpatrywanego sygnału). Modulator prądu może być zrealizowany na bazie mostka tranzystorowego typu H z wyjściowym filtrem indukcyjnym. Jednak w niniejszym artykule wykorzystano idealne sterowane źródło prądowe.

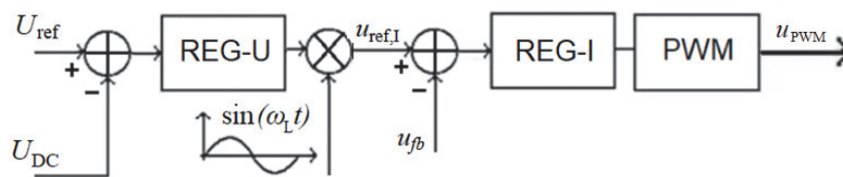
Na rysunku 2 przedstawiono schemat ideowy części silnoprądowej jednofazowego prostownika diodowego z modulatorem prądu.



Rys. 2. Schemat ideowy części silnoprądowej jednofazowego prostownika diodowego z modulatorem prądu

Zadaniem modulatora (sterowanego źródła prądowego I) jest takie modulowanie prądu wejściowego, aby był on, jak najbardziej zbliżony do przebiegu sinusoidalnego i zgodny w fazie z podstawową harmoniczną napięcia sieci (minimalizacja mocy biernej oraz odkształcenia). Takie rozwiązanie wymaga pomiaru wartości chwilowej prądu pobieranego z sieci oraz napięcia na szynie DC – w celu umożliwienia m.in. synchronizacji generowanego sygnału z napięciem sieci oraz regulacji przepływu mocy czynnej (poprzez kontrolę wartości napięcia na szynie stałoprądowej DC).

Schemat blokowy opracowanego układu sterowania modulatorem prądu zaprezentowano na rysunku 3.



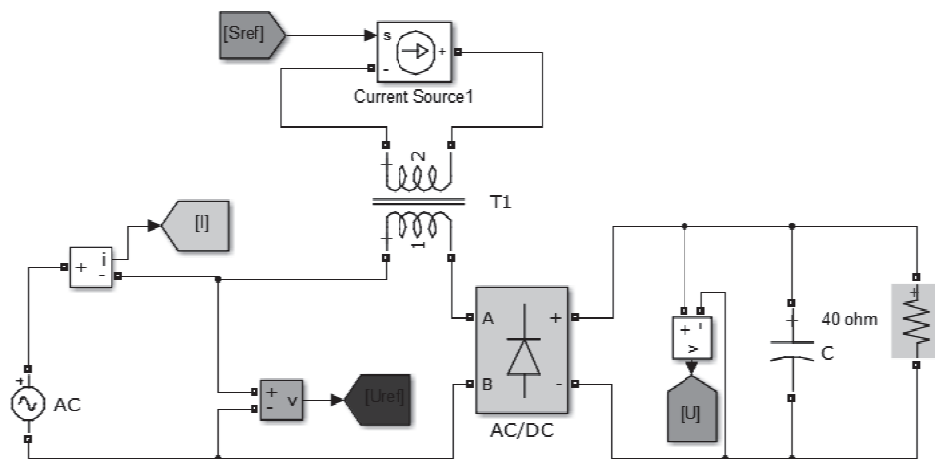
Rys. 3. Schemat blokowy układu sterowania modulatorem prądu

Zastosowano w tym przypadku regulację kaskadową, w której regulatorem nadrzędnym jest regulator napięcia wyjściowego na szynie stałoprądowej DC. Odpowiada on za wyznaczenie amplitudy prądu referencyjnego dla modulatora prądu. W wyniku jej przemnożenia przez sygnał sinusoidalny (o jednostkowej

amplitudzie), będący zgodny w fazie z napięciem sieci, otrzymano sygnał zadany dla podrzędnego regulatora prądu, którego zadaniem jest kształtowanie prądu zastosowanego modulatora w obwodzie wejściowym przekształtnika. Blok PWM reprezentuje modulator impulsowy PWM odpowiedzialny za generowanie impulsów sterujących pracą kluczy modulatora prądu.

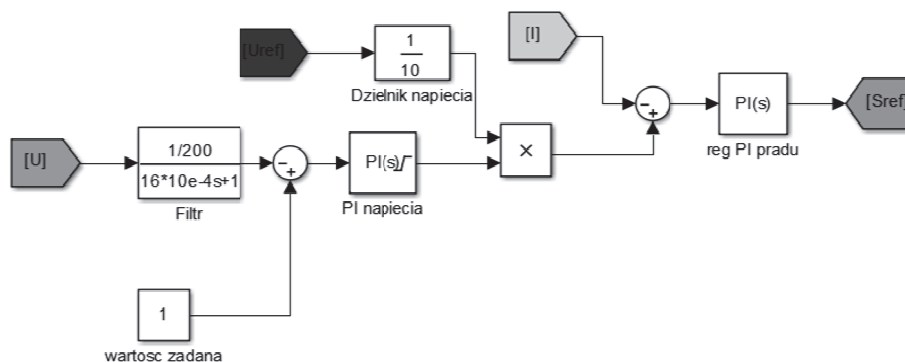
3.2. Model symulacyjny części silnoprądowej i sterującej przekształtnika

Na rysunku 4 przedstawiono model symulacyjny części silnoprądowej opisywanego układu. Wykorzystano w tym celu oprogramowanie Matlab Simulink firmy The MathWorks, Inc. [9, 10, 11, 12]. Ponieważ przeprowadzone badania miały jedynie umożliwić weryfikację poprawności działania koncepcji układu, wykorzystano elementy idealne, pomijając ich parametry pasożytnicze. Modulator zamodelowano, jako sterowane źródło prądu.



Rys. 4. Model symulacyjny części silnoprądowej prostownika z modulacją wejściowego prądu sieci

Na rysunku 5 zaprezentowano natomiast strukturę układu sterowania. Ponieważ modulator prądu w rozpatrywanym przypadku bazuje na idealnym sterowanym źródle prądowym, nie uwzględniono modulatora PWM (ze względu na sposób realizacji części wykonawczej modulatora prądu).

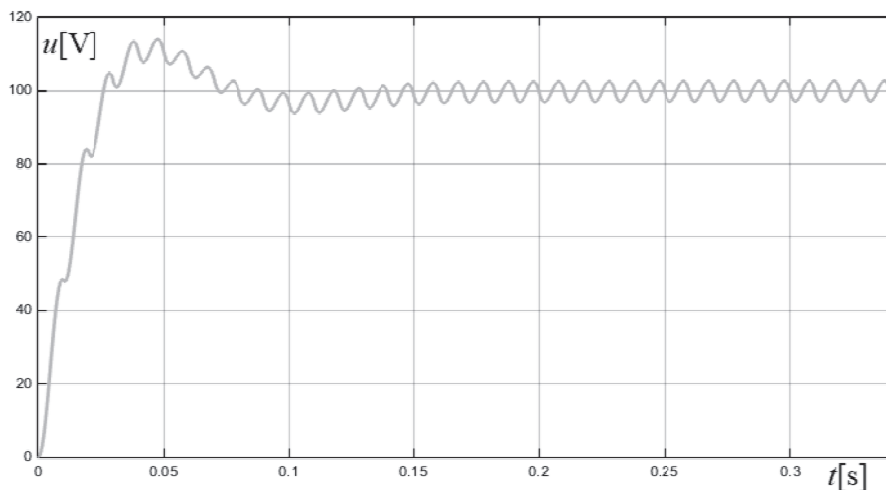


Rys. 5. Model symulacyjny układu sterowania modulatorem prądu

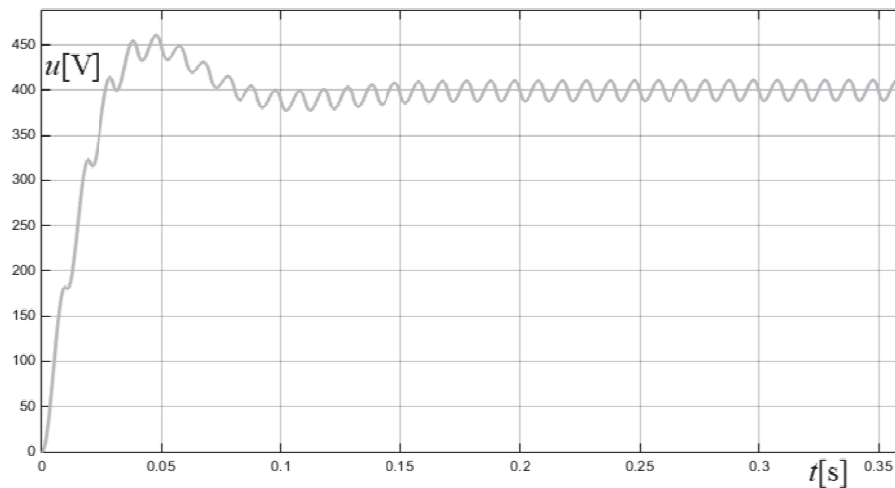
Zarówno w przypadku regulatora napięcia, jak i prądu zastosowano strukturę typu PI. Wstępne strojenia ich nastaw dokonano na podstawie metody Zieglera-Nicholsa.

4. WYBRANE WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH

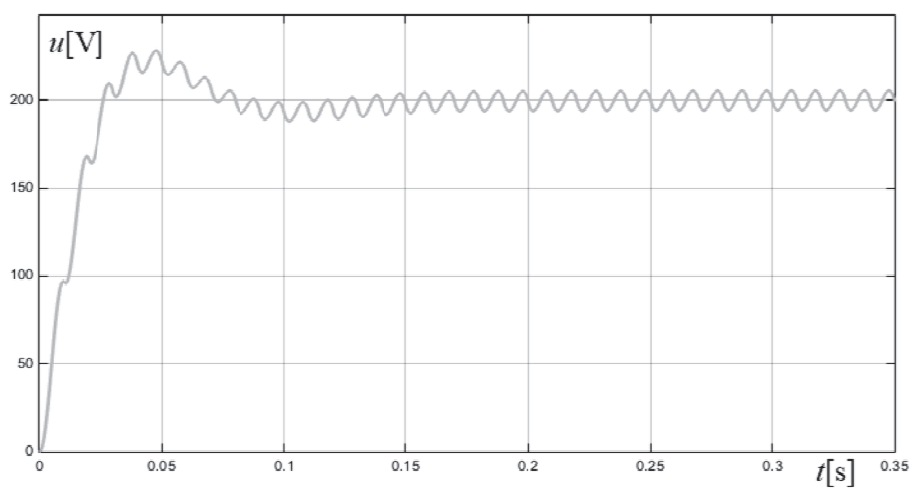
Wybrane wyniki badań symulacyjnych badanego układu przedstawiono na rysunkach od 6 do 12.



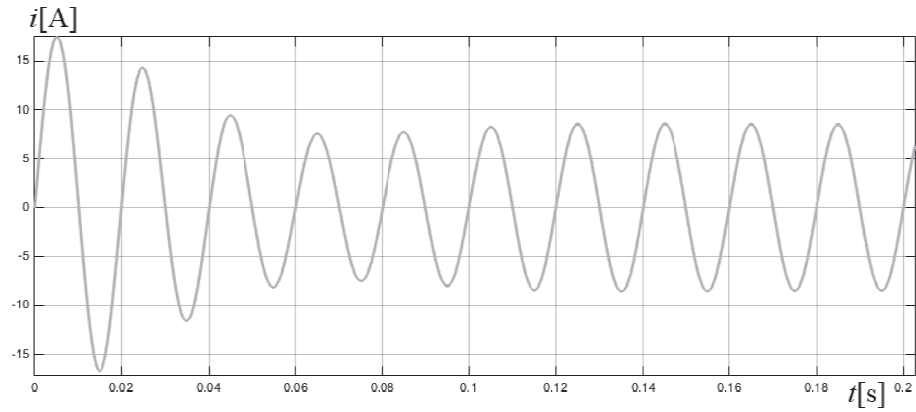
Rys. 6. Napięcie wyjściowe na szynie DC jednofazowego prostownika diodowego z wejściowym modulatorem prądu, napięcie zadane 100 VDC



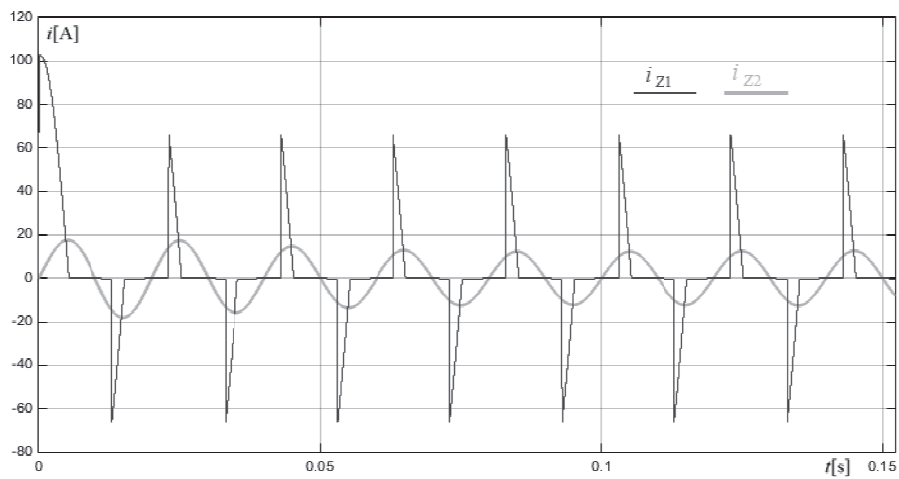
Rys. 7. Napięcie wyjściowe na szynie DC jednofazowego prostownika diodowego z wejściowym modulatorem prądu, napięcie zadane 400 VDC



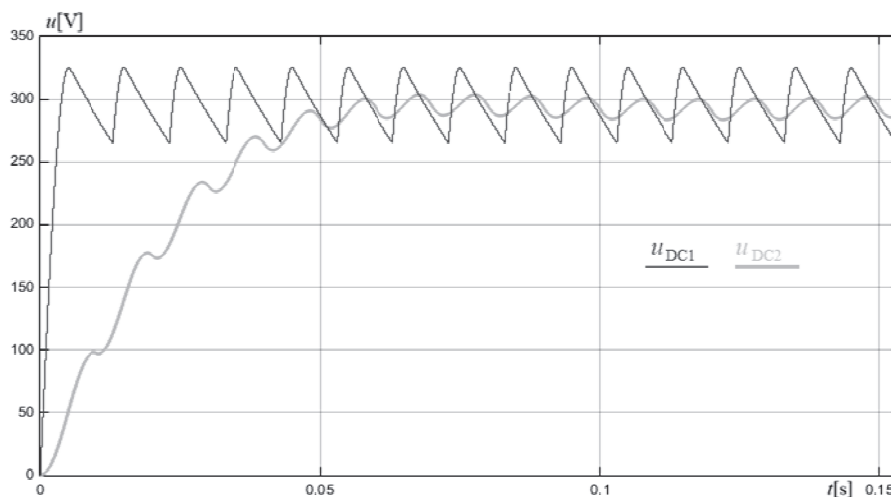
Rys. 8. Napięcie wyjściowe na szynie DC jednofazowego prostownika diodowego z wejściowym modulatorem prądu, napięcie zadane 200 VDC



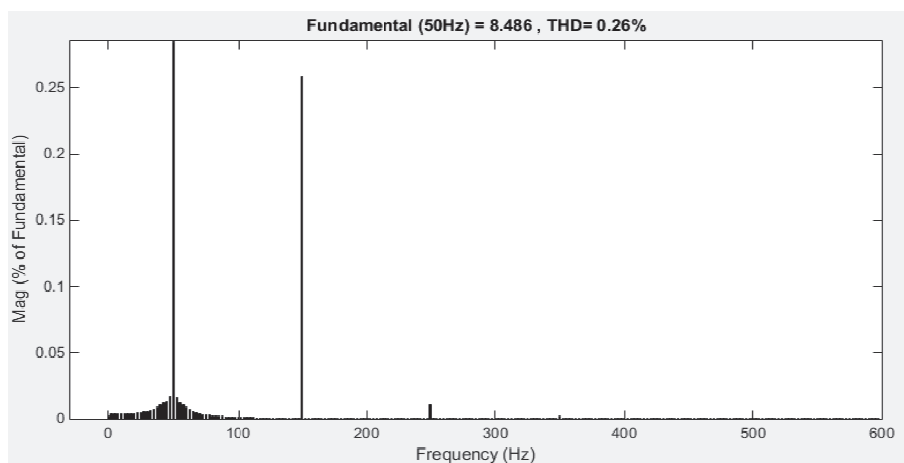
Rys. 9. Prąd pobierany z sieci przez jednofazowy prostownik diodowy z wejściowym modulatorem prądu, napięcie zadane 200 VDC



Rys. 10. Porównanie prądu i_{z1} niesterowanego prostownika diodowego i prądu i_{z2} prostownika diodowego z wejściowym modulatorem prądu, napięcie zadane 300 VDC



Rys. 11. Porównanie napięcia u_{DC1} na wyjściu niesterowanego prostownika diodowego i napięcia u_{DC2} na wyjściu prostownika diodowego z wejściowym modulatorem prądu, napięcie zadane 300 VDC



Rys. 12. Widmo amplitudowe prądu pobieranego z sieci przez jednofazowy prostownik diodowy z modulatorem prądu, napięcie zadane 200 VDC

Zastosowanie modulatora prądu w obwodzie wejściowym jednofazowego prostownika diodowego umożliwia nie tylko poprawę jakości prądu pobieranego z sieci (współczynnik THD wynosi ok. 0,3%), ale również regulację i stabilizację napięcia wyjściowego na szynie DC do żądanej wartości.

5. PODSUMOWANIE

W artykule zaprezentowano część silnoprądową oraz sterującą układu jednofazowego prostownika diodowego z modulatorem prądu na wejściu, który umożliwia pobór prądu sieci o kształcie zbliżonym do sinusoidy. Zaletą ekonomiczną przedstawionego rozwiązania jest m.in. możliwość stosunkowo łatwej implementacji w układach już istniejących. W ramach planowanych prac przewidywane jest udokładnienie części silnoprądowej modelu symulacyjnego (m.in. zastosowanie modulacji impulsowej w źródle prądu), jak i optymalizacja struktur i nastaw zastosowanych regulatorów napięcia i prądu.

LITERATURA

- [1] Barlik R., Nowak M., Jakość energii elektrycznej – stan obecny i perspektywy, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 07/08, 2005, s. 1–12.
- [2] Pytlak A., Świątek H., Zymmer K., Kompatybilność przekształtników z siecią zasilającą. Cz. 1: Odształcenia i odchyłki napięcia występujące w sieci publicznej i przemysłowej. Jakość i Użytkowanie Energii Elektrycznej. Tom III, Zeszyt 1, Rok 1997, s. 31–36.
- [3] Fryze S., Moc rzeczywista, urojona i pozorna w obwodach elektrycznych o przebiegach odkształconych prądu i napięcia, *Przegląd Elektrotechniczny*, Nr 7/8, 1931.
- [4] Gwóźdź M., Porada R., Energoelektroniczne źródło prądu o optymalnej dobroci, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 3, 2004, s. 252–255.
- [5] Krystkowiak M., Zmodyfikowany model szerokopasmowego energoelektronicznego sterowanego źródła prądowego z modulacją prądu wyjściowego, *Elektronika: Konstrukcje, Technologie, Zastosowania*, 2016.
- [6] Krystkowiak M., Przekształcanie energii elektrycznej w układach prostownikowych mocy z modulacją prądu, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 10a, 2012, s. 22–25.
- [7] Gwóźdź M., Krystkowiak M., Control system of power electronics current modulator utilized in diode rectifier with sinusoidal power grid current, *Przegląd Elektrotechniczny* nr 7, 2009.
- [8] Strzelecki R., Benysek G., Noculak A. Wykorzystanie urządzeń energoelektronicznych w systemie elektroenergetycznym. *Przegląd Elektrotechniczny*. R.LXXIX 2/2003, s. 41–48.
- [9] <https://www.mathworks.com>, Dostęp: styczeń, 2019.
- [10] <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>, Dostęp: styczeń, 2019.
- [11] <https://www.mathworks.com/products/simulink.html>, Dostęp: styczeń, 2019.
- [12] Pires V.F., Silva J.F.A., Teaching nonlinear modeling, simulation, and control of electronic power converters using MATLAB/SIMULINK, *IEEE Transactions on Education*, vol. 45, 2002, pp. 253–261.

**SIMULATION MODEL OF ONE-PHASE FULL BRIDGE RECTIFIER
WITH CURRENT MODULATOR**

In the article, the simulation model of a one-phase full bridge rectifier with a current modulator in a DC circuit is described. The proposed solution is characterized by consumption of a sinusoidal current from a power grid. The rule of operation, control algorithms, and the simulation model of the system are presented. Also, selected results of the simulation model investigation are shown.

(Received: 22.02.2019, revised: 04.03.2015)