

Michał KRYSKOWIAK\*  
Dominik MATECKI\*

## MODEL SYMULACYJNY ENERGOELEKTRONICZNEGO STEROWANEGO ŹRÓDŁA PRĄDOWEGO PRĄDU STAŁEGO BAZUJĄCEGO NA STRUKTURZE BUCK-BOOST – CZĘŚĆ 2

W artykule zaprezentowano część silnoproudową oraz sterującą zbudowanego modelu symulacyjnego energoelektronicznego sterowanego źródła prądowego prądu stałego. Struktura silnoproudowa opisywanego przekształtnika bazuje na układzie impulsowym typu BUCK-BOOST, dzięki czemu zwiększono możliwy zakres pracy przekształtnika. Przedstawiono również zaproponowaną strukturę i parametry niekonwencjonalnego regulatora prądu dobraneo z uwzględnieniem wybranych kryteriów. W artykule autorzy opisali także wybrane wyniki badań.

SŁOWA KLUCZOWE: przekształtnik energoelektroniczny, BUCK, BOOST, regulator prądu, sterowane źródło prądowe, modulator PWM

### 1. MODEL SYMULACYJNY ENERGOELEKTRONICZNEGO STEROWANEGO ŹRÓDŁA PRĄDU STAŁEGO

#### 1.1. Implementacja niekonwencjonalnego regulatora prądu

W torze sterowania opisywanego układu źródła prądowego zastosowano modulator PWM oraz regulator prądu [1, 2, 3]. Do budowy nadążnego regulatora prądu wykorzystano niekonwencjonalną strukturę bazującą na kombinowanym połączeniu filtrów dolno- i górnoprzepustowych [5, 6]. Transmitancję operatorową opracowanej struktury regulatora prądu wyrażono zależnością (1).

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

gdzie:  $T_{FDP}$  – stała czasowa filtru dolnoprzepustowego,  $K_F$  – wzmacnienie filtru dolnoprzepustowego,  $R_2 C$  – stała czasowa części różniczkującej (filtr górnoprzepustowy),  $R_1$  – parametr umożliwiający ograniczenie wzmacnienia części

---

\* Politechnika Poznańska.

różniczkującej dla wyższych częstotliwości,  $K_I$  – wyraża efektywne oddziaływanie części różniczkującej na cały układ regulacji.

W trakcie doboru parametrów i struktury filtrów (pełniących funkcję regulatora prądu) wykorzystywano następujące kryteria, a mianowicie [5, 6]:

- ograniczenie szybkości zmian sygnału modulującego modulatora PWM,
- zapewnienie stabilności zamkniętego układu regulacji,
- ograniczenie efektu aliasingu.

Pierwszym z analizowanych kryteriów doboru struktury i parametrów regulatora prądu było ograniczenie szybkości zmian sygnału modulującego modulatora szerokości impulsów. Spełnienie tego warunku gwarantuje, że częstotliwość pracy kluczy nie przekroczy progu częstotliwości z jaką pracuje modulator PWM.

Drugim istotnym kryterium dla optymalnego doboru regulatora jest zapewnienie stabilności zamkniętego układu regulacji – przy możliwie wiernym odwzorowaniu w sygnale wyjściowym sygnału referencyjnego.

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 Kotelnikowa-Shanonna, określającego maksymalną wartość pasma sygnału próbkowanego w stosunku do częstotliwości próbkowania.

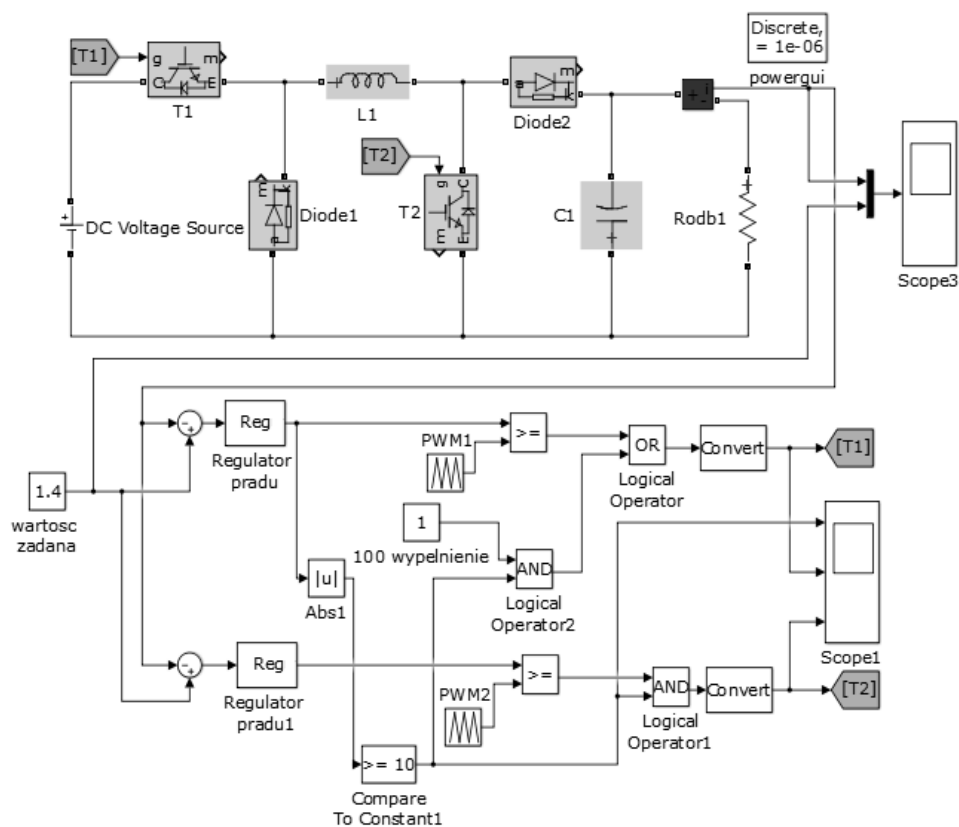
Implementacja filtra dolnoprzepustowego w strukturze regulatora prądu umożliwia ograniczenie zjawiska aliasingu. Traktując modulator PWM jako układ próbkująco-pamiętający można przyjąć, że częstotliwość graniczna filtru powinna być dwukrotnie mniejsza niż częstotliwość pracy modulatora. Natomiast dodatkowa struktura bazująca na członie różniczkującym (filtr górnoprzepustowy), która odznacza się dodatnim przesunięciem fazy w założeniu ma za zadanie m.in. zminimalizować efekty opóźnienia fazy wprowadzone w układ sterowania przede wszystkim przez modulator PWM.

Przedstawioną strukturę zastosowano dwukrotnie w modelu, a mianowicie dla struktury BUCK oraz BOOST. Ze względu jednak na zmianę transmitancji obiektu przy przełączaniu się ze struktury BUCK na BOOST, nastawy regulatorów były różne.

Wybór między strukturami silnoprądowymi BUCK oraz BOOST w analizowanym rozwiązaniu odbywa się w sposób automatyczny w zależności od wartości prądu referencyjnego oraz obciążenia i warunków zasilania przekształtnika. Mianowicie, jeżeli współczynnik wypełnienia impulsów tranzystora struktury BUCK osiąga wartość 100%, wówczas następuje aktywacja modułu BOOST wynikająca z potrzeby dalszego zwiększenia prądu wyjściowego (klucz struktury BUCK jest w tym czasie załączony na stałe, a klucz struktury BOOST załączany jest impulsami o odpowiednim współczynniku wypełnienia wyznaczanym przez układ sterowania).

## 1.2. Model symulacyjny źródła

Do budowy modelu źródła prądowego zastosowano oprogramowanie Matlab Simulink. Schemat modelu zaprezentowano na rys. 1.



Rys. 1. Uproszczony schemat modelu symulacyjnego energoelektronicznego źródła prądowego

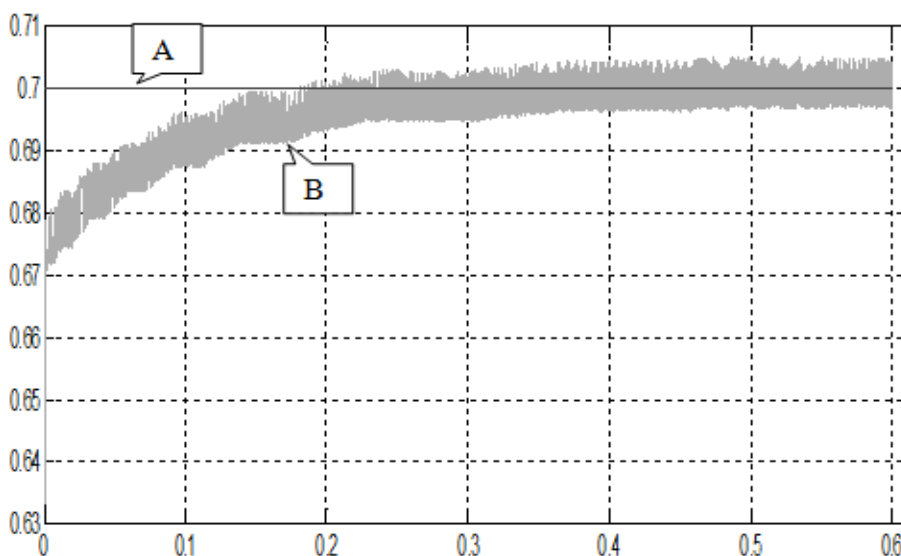
Model został skonstruowany na bazie klasycznej struktury BUCK-BOOST z filtrem LC (parametry filtra dobrano w sposób doświadczalny). Posiada ona dwa elementy kluczujące- tranzystory (T1) oraz (T2). Gdy układ pracuje w trybie obniżającym napięcie (BUCK) kluczowany jest tranzystor T1, natomiast T2 stanowi przerwę w obwodzie. Gdy współczynnik wypełnienia impulsów sterujących pracą T1 osiąga wartość 100%, wtedy układ pracuje na strukturze BOOST (tranzystor T1 jest załączony na stałe, a tranzystor T2 jest kluczowany). Zaimplementowany system sterowania bazuje na dwóch niekonwencjonalnych regulatorach prądów składających się, z opracowanych w ramach badań, struktur dolno- i górnoprzepustowej. Ponadto wykorzystano dwa modula-

tory PWM oraz dodatkowy układ umożliwiający automatyczne przełączanie się między strukturą BUCK oraz BOOST (bazujący na bloku wyznaczania wartości bezwzględnej sygnału wyjściowego regulatora prądu przekształtnika typu BUCK oraz komparatora odpowiedzialnego za detekcję współczynnika wypełnienia impulsów większego lub równego 100%).

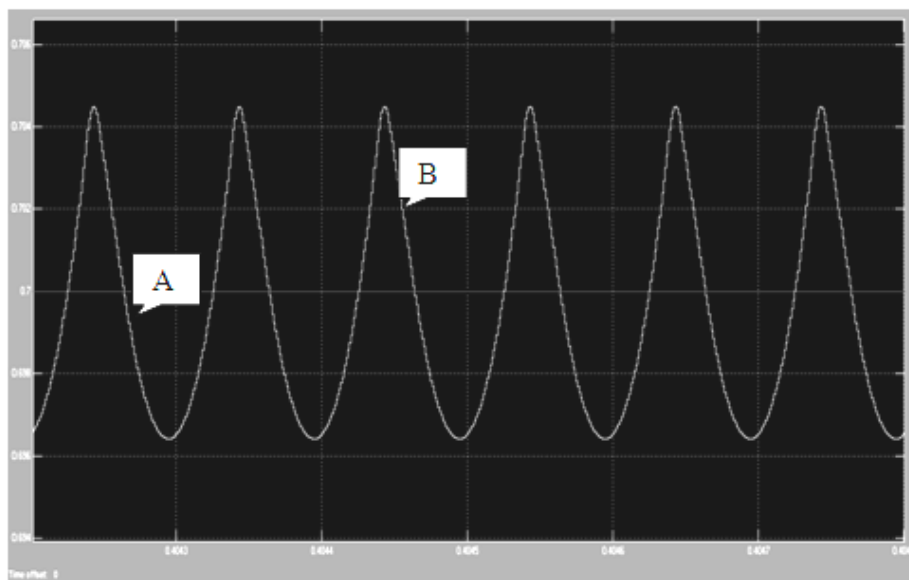
## 2. BADANIA SYMULACYJNE ENERGOELEKTRONICZNEGO ŹRÓDŁA PRĄDU STAŁEGO

Badania przeprowadzono dla odbiornika rezystancyjnego o rezystancji  $30 \Omega$ . Napięcie na zaciskach źródła zasilającego wynosiło 24 V. Symulacje przeprowadzono dla dwóch przypadków. W pierwszym z nich prąd zadany wyniósł 0,7 A. Wówczas pracowała część źródła bazująca na strukturze BUCK. W drugim przypadku prąd zadany wyniósł 1,4 A. W tym przypadku następowała automatyczna aktywacja modułu BOOST.

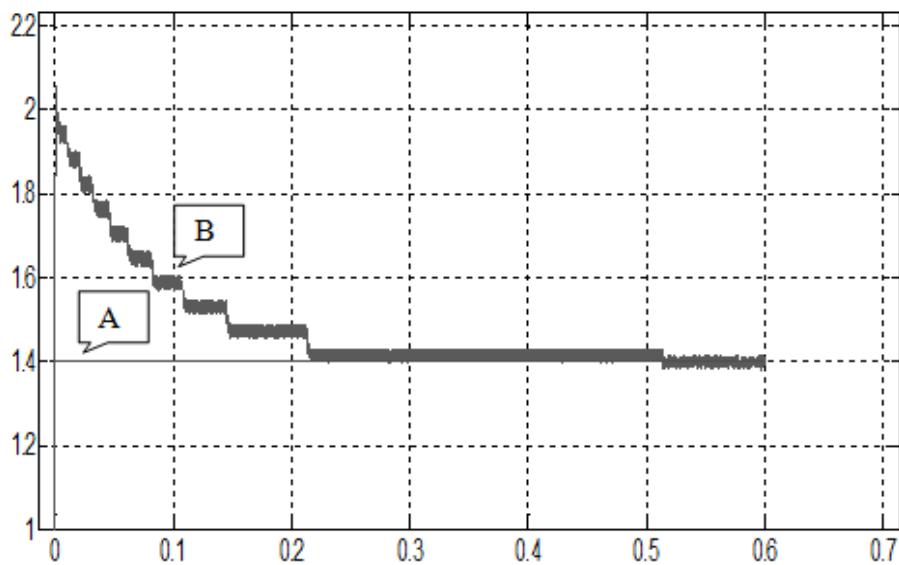
Przebiegi sygnałów uzyskane na drodze symulacji dla wartości zadanej prądu wyjściowego na poziomie 0,7 A przedstawiono na rysunkach 2 i 3. Natomiast rysunki 4 oraz 5 dotyczą wartości zadanej prądu wynoszącej 1,4 A.



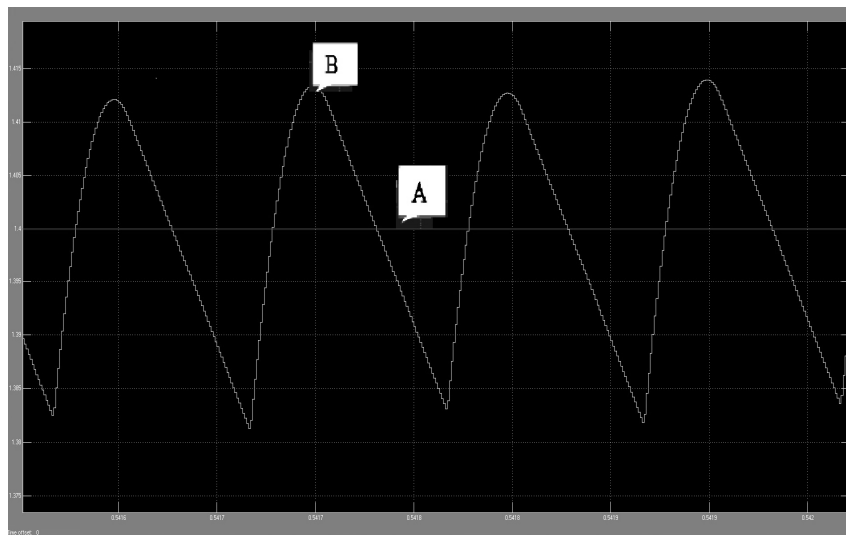
Rys. 2. Przebiegi sygnałów prądowych: zadanego (A) i wyjściowego (B) (wartość zadana: 0,7 A - praca w trybie BUCK)



Rys. 3. Przebiegi sygnałów prądowych w powiększeniu: zadanego (A) i wyjściowego (B)  
(wartość zadana: 0,7 A - praca w trybie BUCK)



Rys. 4. Przebiegi sygnałów prądowych: zadanego (A) i wyjściowego (B)  
(wartość zadana: 1,4 A - praca w trybie BOOST)



Rys. 5. Przebiegi sygnałów prądowych w powiększeniu: zadanego (A) i wyjściowego (B) (wartość zadana: 1,4 A - praca w trybie BOOST)

Na rysunku 2 przedstawiono odpowiedź na sygnał zadany układowi w trakcie pracy w trybie BUCK. Czas ustalania wyniósł około 0,5s. Z rysunku 3, na którym przedstawiono fragment przebiegów w stanie ustalonym wynika, że uchyb ustalony wynosi około  $\pm 0,04$  A.

Rysunek 4 przedstawia natomiast przebieg odpowiedzi na sygnał zadany o wartości 1,4 A. W tym przypadku czas ustalania odpowiedzi wyniósł nieco powyżej 0,2 s. Na powiększeniu (rysunek 5) przedstawiono stan ustalony.

### 3. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania symulacyjne potwierdziły poprawność działania układu, jak i zaimplementowanej niekonwencjonalnej struktury regulatorów prądu z dodatkowym modulem aktywacji struktur odpowiednio BUCK oraz BOOST. Dalsze etapy prac obejmują optymalizację nastaw regulatorów w celu zwiększenia pasma przenoszenia (poprawienia właściwości dynamicznych) prezentowanego przekształtnika. Ponadto przewiduje się implementację opracowanego algorytmu w układzie fizycznym, który jest obecnie budowany.

### LITERATURA

- [1] Supronowicz H., Strzelecki R., Współczynnik mocy w systemach zasilania prądu przemiennego i metody jego poprawy, OWPW (2000).
- [2] Kaczorek T., Teoria sterowania i systemów, Warszawa, PWN 1999.

- [3] Nowak M., Barlik R.: Poradnik inżyniera energoelektronika. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1998.
- [4] Krystkowiak M, Gwóźdź M., Simulation and experimental model of 3-phase diode rectifier with power electronics current modulator, ISNCC (2010), 88-91.
- [5] Gwóźdź M., Krystkowiak M., Control system of power electronics current modulator utilized in diode rectifier with sinusoidal power grid current, Przegląd Elektrotechniczny 7' 2009.
- [6] Krystkowiak M., Rozprawa doktorska, pt.: Układ prostownikowy mocy o polepszonych wskaźnikach z energoelektronicznym modulatorem prądu, Politechnika Poznańska, 2009.

#### **THE SIMULATION MODEL OF POWER ELECTRONICS CONTROLLED DC CURRENT SOURCE BASED ON BUCK-BOOST CIRCUIT – PART 2**

The article presents simulation model of the power electronic controlled DC current source based on DC/DC BUCK-BOOST circuit with a low pass output filter. The control system and power circuit of described converter was built with help of Matlab Simulink software. The elaborated unconventional structure of current regulator also was presented. Chosen results of simulation research was shown.

*(Received: 28. 01. 2016, revised: 4. 03. 2016)*