

Michał KRYSKOWIAK*
Dominik MATECKI*

MODEL EKSPERYMENTALNY ENERGOELEKTRONICZNEGO STEROWANEGO ŹRÓDŁA PRĄDOWEGO BAZUJĄCEGO NA STRUKTURZE BUCK – CZĘŚĆ 1

W artykule zaprezentowano energoelektroniczne sterowane źródło prądu stałego bazujące na układzie impulsowym DC/DC typu BUCK z dolnoprzepustowym filtrem wyjściowym. Układ sterowania opisywanego przekształtnika zbudowano na platformie cyfrowej wyposażonej w zmiennopozycyjny procesor sygnałowy DSP rodziny SHARC, który realizuje zaimplementowany algorytm sterowania układem zamkniętym. Przedstawiono wybrane wyniki badań eksperymentalnych dla poszczególnych warunków pracy opisywanego układu, m.in. dla różnych obciążeń oraz nastaw regulatora prądu.

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

1. WSTĘP

1.1. Pojęcie energoelektronicznego sterowanego źródła prądowego

Sterowane źródło prądowe jest elementem czterozaciskowym (czwórnikiem). Charakteryzuje się tym, że prąd źródłowy związany z jedną parą zacisków jest proporcjonalny do napięcia lub prądu związanego z drugą parą zacisków. Na tej podstawie można wyróżnić dwa rodzaje prądowych źródeł sterowanych:

- źródło prądu sterowane napięciowo,
- źródło prądu sterowane prądowo.

We wszystkich rodzajach źródeł sterowanych wielkość wyjściowa, będąca wielkością sterowaną, jest proporcjonalna do wielkości wejściowej, będącej wielkością sterującą. Współczynnik proporcjonalności między wielkością sterującą a wielkością sterowaną jest liczbą rzeczywistą.

Sygnal wyjściowy idealnego sterowanego źródła prądowego nie zależy od obciążenia, a jedynie od wielkości sterującej. Fakt ten wykorzystuje się w wielu

* Politechnika Poznańska.

aplikacjach wymagających generowania sygnału prądowego o ściśle określonych parametrach, np.: w zaawansowanych systemach ładowania baterii akumulatorów, generatorach pola magnetycznego [1].

W niniejszym artykule zaprezentowano sterowane energoelektroniczne źródło prądowe prądu stałego bazujące na przekształtniku energoelektronicznym typu BUCK z dolnoprzepustowym filtrem wyjściowym. W wyniku zastosowania odpowiedniej struktury części silnoprądowej oraz algorytmu regulacji nadążnej prądu możliwe jest generowanie prądu stałego o zadanej wartości (zadeklarowanej przez użytkownika końcowego za pośrednictwem cyfrowego układu sterowania).

1.2. Ogólna idea i stosowane struktury układów regulacji nadążnej prądu

Ogólnie regulacją nadążną nazywamy rodzaj regulacji automatycznej, w której wartość wielkości wyjściowej zmienia się w zależności od zmian wielkości wejściowej (zadanej). Przebieg w czasie wielkości sterującej, w odróżnieniu od regulacji programowej, nie jest znany [2]. Zwykle również przebieg w czasie wielkości wejściowej nie jest znany. Zadaniem regulacji nadążnej jest zatem możliwie wierne odwzorowanie wielkości wejściowej, przy zadanej dynamice regulatora, zapewniając jednocześnie odpowiednie pasmo przenoszenia sygnałów użytecznych i tłumieniu tych niepożądanych (związanych np. z pracą modulatora PWM).

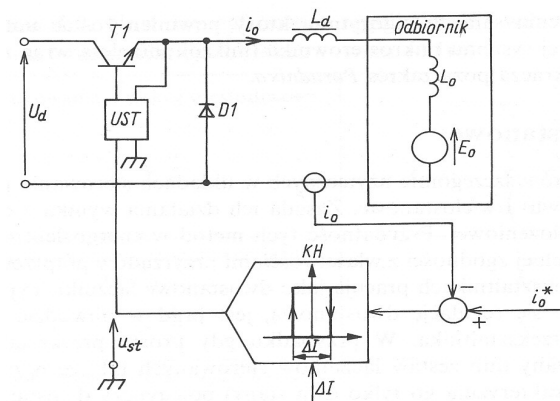
W analizowanym przypadku zrealizowano algorytm regulacji nadążnej prądu implementując w torze sterowania regulator prądu o określonej strukturze i parametrach. Zwykle w tego typu aplikacjach stosuje się najczęściej regulatory opisane w dalszej części niniejszego artykułu.

Regulator histerezowy (dwustanowy) jest najprostszą strukturą bazującą na komparatorze histerezowym. Jego bardzo istotną wadą jest fakt, iż nie daje użytkownikowi bezpośredniej kontroli nad częstotliwością przełączeń, co wiąże się z kolei z niebezpieczeństwem przekroczenia wartości granicznych parametrów dynamicznych zastosowanych kluczy (zwykle tranzystorów) [3].

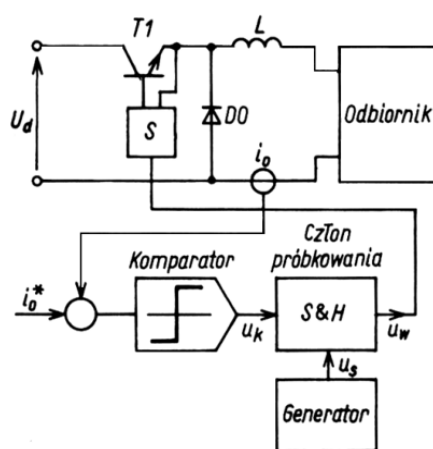
Kolejnym typem powszechnie wykorzystywanego rozwiązania jest tzw. regulator typu delta składający się z dwóch głównych komponentów, a mianowicie: z komparatora bez histerezy oraz układu próbkująco-pamiętającego pracującego z określoną częstotliwością. Rozwiązanie to w przeciwieństwie do regulatora histerezowego umożliwia dokładne określenie maksymalnej częstotliwości pracy kluczy (co jednak nie wyklucza w tym przypadku pracy kluczy z mniejszą częstotliwością) [3].

Najbardziej zaawansowaną powszechnie implementowaną strukturę układu regulacji, która zapewnia jednocześnie najlepszą jakość, jest struktura zbudowana z regulatora będącego np. odpowiednim połączeniem członów proporcjonalnego oraz dolno- i górnoprzepustowego (jak np. w przypadku klasycznych

regulatorów typu PI, PID) oraz modulatora szerokości impulsów PWM [3]. Przy prawidłowo dobranych parametrach częstotliwość pracy kluczy jest w tym przypadku zawsze równa częstotliwości pracy modulatora PWM.



Rys. 1. Schemat ideowy źródła prądowego bazującego na układzie typu BUCK i histerezowym regulatorze prądu [3]



Rys. 2. Schemat ideowy źródła prądowego bazującego na układzie typu BUCK i regulatorze prądu typu delta [3]

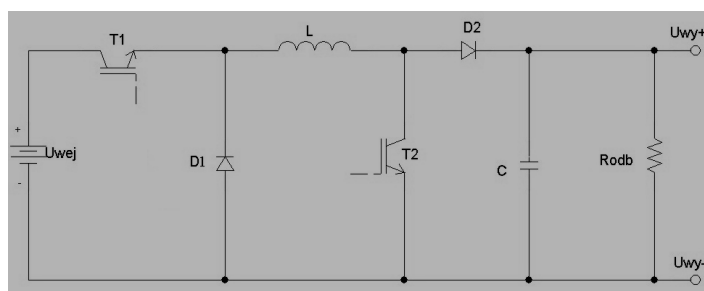
Rozwiązanie to mimo, że umożliwia uzyskanie bardzo dobrych parametrów jakościowych regulacji (m.in. sprowadzenie uchybu ustalonego do zera, skrócenie czasu odpowiedzi, ograniczenie przeregulowania), wymaga jednak doboru optymalnej struktury regulatora prądu oraz jego nastaw, przy jednoczesnym uwzględnieniu następujących kryteriów [4, 5]:

- w przypadku realizacji analogowej należy ograniczyć szybkość zmian sygnału modulującego (sygnału wyjściowego regulatora prądu) modulatora szerokości impulsów PWM (spełnienie tego warunku jest konieczne w celu zapewnienia prawidłowej częstotliwości przełączeń klucza, równej częstotliwości sygnału nośnego),
- zapewnienie stabilności zamkniętego układu regulacji,
- ograniczenie efektu aliasingu zachodzącego w sygnale sprzężenia zwrotnego,
- zapewnienie możliwie szerokiego pasma przenoszenia układu (co bezpośrednio przekłada się na właściwości dynamiczne analizowanego energetycznego sterowanego źródła prądu stałego).

2. MODEL LABORATORYJNY ENERGOELEKTRONICZNEGO STEROWANEGO ŹRÓDŁA PRĄDU STAŁEGO

2.1. Część silnopiędowa oraz pomiarowa przekształtnika

Przy projektowaniu układu założono, że docelową aplikacją dla zbudowanego źródła prądowego jest ładowanie akumulatorów (np. kwasowych, lub żelowych) o napięciu znamionowym 12 V, które to wymagają ładowania stałym prądem. Część silnopiędowa opisywanego układu wykorzystuje klasyczną strukturę przetwornicy impulsowej DC/DC typu BUCK z dolnoprzepustowym filtrem wyjściowym oraz zaimplementowanym pomiarem napięcia wejściowego oraz napięcia i prądu wyjściowego. Takie rozwiązanie umożliwia m.in. regulację wartości natężenia prądu ładowania w zależności od napięcia na zaciskach baterii (zależnego od stopnia jej naładowania). Schemat poglądowy części silnopiędowej układu zaprezentowano na rys. 3.



Rys. 3. Schemat ideowy części silnopiędowej przekształtnika BUCK-BOOST

Należy zaznaczyć, że zaprojektowana część silnopiędowa (schemat poglądowy na rys. 3) bazuje na układzie typu BUCK-BOOST, mimo, że w niniej-

szym rozwiązaniu wykorzystano tylko strukturę obniżającą napięcie (BUCK). Układ celowo został zaprojektowany i zbudowany nadmiarowo, ponieważ przewidywane są dalsze prace rozwojowe, zwiększające zakres pracy układu przy większej zmienności napięcia zasilającego.

W skład struktury typu BUCK wchodzi następujące elementy:

- źródło zasilania napięcia stałego (U_{wej}),
- tranzystor (T1) impulsowany ze zmiennym współczynnikiem wypełnienia (zależnym m.in. od wymaganej wartości prądu wyjściowego),
- dioda (D1),
- dławik (L),
- dioda (D2) konieczna ze względu na prawidłowe funkcjonowanie struktury BOOST,
- kondensator (C)
- odbiornik (w tym przypadku rezystancyjny R_{odb}).

Natomiast na strukturę typu BOOST składają się:

- źródło zasilania napięcia stałego (U_{wej}),
- tranzystor (T1) załączony na stałe,
- dławik (L),
- tranzystor (T2) impulsowany ze zmiennym współczynnikiem wypełnienia,
- dioda (D2) zapobiegająca zwarcia kondensatora wyjściowego przy załączeniu T2,
- kondensator (C),
- obciążenie (R_o).

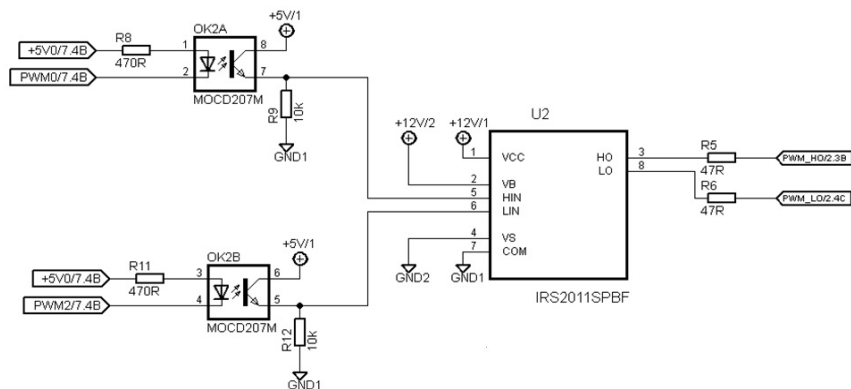
W celu umożliwienia prawidłowego zasilania poszczególnych układów pomiarowych i sterujących, a także układów pomocniczych, należało zagwarantować nie tylko odpowiednie parametry zasilania, ale i w niektórych przypadkach także izolację galwaniczną. W tym celu wykorzystano dobrane stabilizatory liniowe oraz przetwornice izolowane [6].

Filtrację napięcia wejściowego oraz wyjściowego zapewniono implementując kondensatory ceramiczne oraz elektrolityczne.

Jako kluczy w pełni sterowalnych w niniejszym rozwiązaniu użyto tranzystorów typu MOSFET, zapewniających dużą częstotliwość łączeń (co przekłada się m.in. na jakość prądu wyjściowego). Wykorzystanie tego typu kluczy w zastosowaniach impulsowych wymaga szybkiego przejścia ze stanu nieprzewodzenia w stan nasycenia. Izolowana bramka tranzystora tworzy pojemność, zwaną pojemnością bramki. Pojemność ta musi być ładowana lub rozładowywana za każdym razem, kiedy tranzystor jest załączany lub wyłączany. Aby załączyć tranzystor, potrzebne jest odpowiednie napięcie bramki, więc pojemność bramki powinna być ładowana do poziomu tego napięcia. Analogicznie, przy wyłączaniu klucza, pojemność bramki powinna być rozładowywana od poziomu napięcia załączenia tranzystora do zera. Jednak, jeśli proces załączania i wyłączania od-

bywa się zbyt wolno, tym samym nie następuje szybka zmiana rezystancji z (teoretycznie) nieskończenie dużej do wartości rezystancji w stanie załączenia, wówczas na tranzystorze wydziela się duża ilość mocy cieplnej, która może uszkodzić tranzystor. Mniej szkodliwym efektem może być zakłócenie pracy logiki procesora.

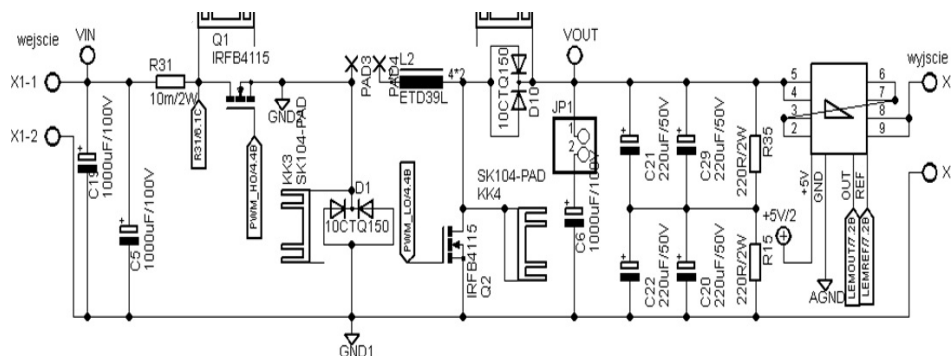
Aby zapobiec wymienionym problemom przy sterowaniu pracą tranzystorów, użyty został sterownik (tzw. driver) bramek tranzystorów. Można go traktować, jako wzmacniacz mocy - na wejście podawany jest sygnał z procesora sygnałowego o małej mocy, który jest wzmacniany i podawany na wyjście, czyli do bramek tranzystorów. Schemat obwodu sterownika zamieszczono na rys. 4. Ponadto, w celu dodatkowego zabezpieczenia procesora przed sygnałami części silnopiędowej, zastosowano izolację galwaniczną w postaci transoptora.



Rys. 4. Sposób implementacji drivera tranzystorów MOSFET

Jak wspomniano powyżej, w układzie zaimplementowano pomiar napięcia wejściowego i wyjściowego oraz prądu wyjściowego. Do pomiaru napięcia wyjściowego użyty został przetwornik napięcia ACPL-C87X. Mierzy on napięcie na wejściu w zakresie do 2V. Posiada optyczną izolację galwaniczną pomiędzy wejściem a wyjściem. Pomiar prądu wyjściowego zagwarantowano dzięki przetwornikowi LEM CKSR 25-NP. Przetwarza on sygnał prądowy na napięciowy. Także i w tym przypadku, sygnały są izolowane galwanicznie. W odróżnieniu od wcześniej wymienionego przetwornika z optyczną separacją galwaniczną, sygnały są odseparowane od siebie dzięki sprzężeniu indukcyjnemu. Do pracy przetwornika LEM wymagane jest zasilanie go napięciem o wartości 5 V.

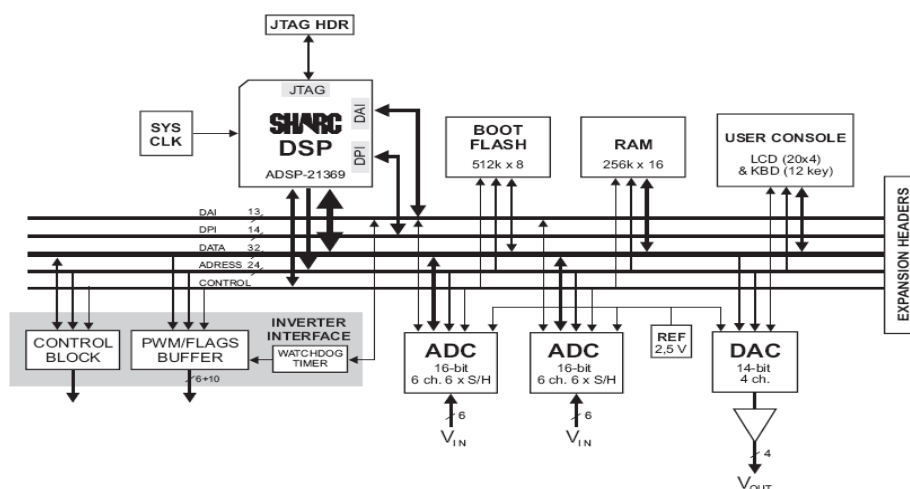
Schemat montażowy części silnopiędowej zbudowanego przekształtnika zaprezentowano na rys. 5.



Rys. 5. Schemat części silnoprądowej zbudowanego przekształtnika impulsowego DC/DC [6]

2.2. Część sterująca oraz zaimplementowany algorytm sterowania

Układ sterowania kluczem energoelektronicznego sterowanego źródła prądu stałego zrealizowano w oparciu o system uruchomieniowy ALS-G3-1369. Jego schemat blokowy zaprezentowano na rys. 6 [7].

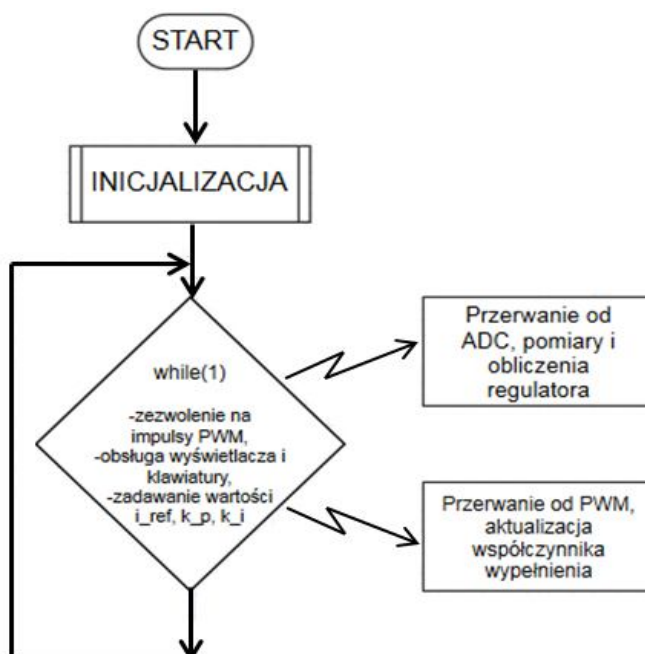


Rys. 6. Schemat blokowy systemu uruchomieniowego ALS-G3-1369

Układ bazuje na zmiennoprzecinkowym procesorze sygnałowym rodziny SHARC 3 – generacji typu ADSP-21369 firmy Analog Devices. W wyniku zastosowania wydajnego procesora sygnałowego wyposażonego w rozbudowany, 16-kanalowy moduł generatora MSI możliwe jest zaimplementowanie złożonych algorytmów sterowania przekształtnikami energoelektronicznymi. Za przetwarzanie sygnałów analogowych odpowiada interfejs analogowo-cyfrowy, wy-

posażony w dwa 6-kanalowe 16-bitowe przetworniki analogowo-cyfrowe z jednoczesnym próbkowaniem bipolarnych kanałów analogowych i o programowalnym zakresie napięcia wejściowego. 4-kanalowy 14-bitowy przetwornik C/A z wyjściami napięciowymi, bipolarnymi umożliwia śledzenie przebiegów wielkości cyfrowych. System wyposażono również w zewnętrzną pamięć 8-bitową typu FLASH (Boot Memory) oraz 16-bitową typu SRAM (opcjonalnie MRAM). Na płycie znajduje się również gniazdo JTAG gwarantujące możliwość komunikacji z zewnętrzną sondą emulacyjną.

Schemat blokowy opracowanego i zaimplementowanego algorytmu sterowania przedstawiono na rys. 7.



Rys. 7. Schemat blokowy zaimplementowanego algorytmu sterowania źródłem prądowym

W początkowym etapie realizacji algorytmu następuje inicjalizacja programu, deklaracja zmiennych oraz przypisanie wartości początkowych danym zmiennym. Jednocześnie następuje aktywacja funkcji o nazwie `SYS_Init`. Funkcja ta definiuje m.in. częstotliwości pracy rdzenia, wewnętrznego zegara procesora oraz częstotliwość nośną PWM. Określona także zostaje rozdzielczość współczynnika wypełnienia oraz czas martwy. Następuje tu ponadto konfiguracja sposobu pracy przetworników A/C i C/A.

W kolejnym kroku następuje przejście do pętli `while(1)`. W pętli tej realizowana jest obsługa interfejsu użytkownika (klawiatura oraz wyświetlacz LCD),

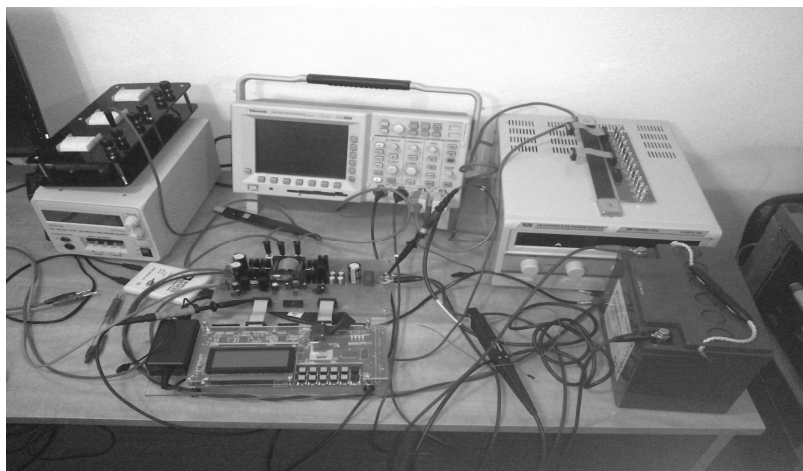
za pomocą którego możliwa jest zmiana wartości zadanej prądu wyjściowego oraz dokonywanie korekt nastaw zaimplementowanego regulatora prądu. Pozostała część algorytmu wykonywana jest w dwóch przerwaniach, których źródłem są odpowiednio: przetwornik A/C oraz specjalizowany koprocessor PWM.

Pomiary sygnałów napięciowych oraz prądowych dokonywane są w ramach obsługi przerwania od przetwornika A/C. Również w tym miejscu wyznaczany jest uchyb regulacji i realizowany algorytm regulatora prądu typu PI z dodatkową funkcją anti-windup umożliwiającą dezaktywację części całkującej regulatora w przypadku, kiedy jego sygnał wyjściowy osiąga wartość graniczną [8].

W przerwaniu od koprocessora PWM wyznaczana jest natomiast wartość współczynnika wypełnienia impulsów załączających tranzystor części silnopiędowej przekształtnika.

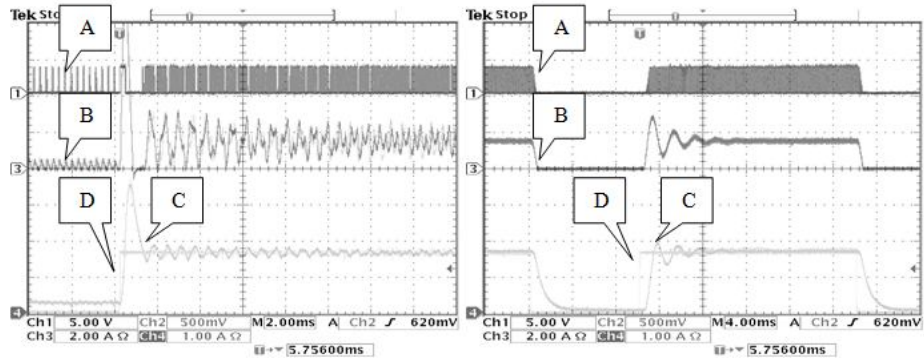
3. BADANIA EKSPERYMENTALNE ENERGOELEKTRONICZNEGO ŹRÓDŁA PRĄDU STAŁEGO

Badania przeprowadzono dla odbiornika rezystancyjnego o rezystancji 4Ω oraz akumulatora żelowego o pojemności 33 Ah. Zdjęcie zbudowanego stanowiska badawczego zaprezentowano na rys. 8.

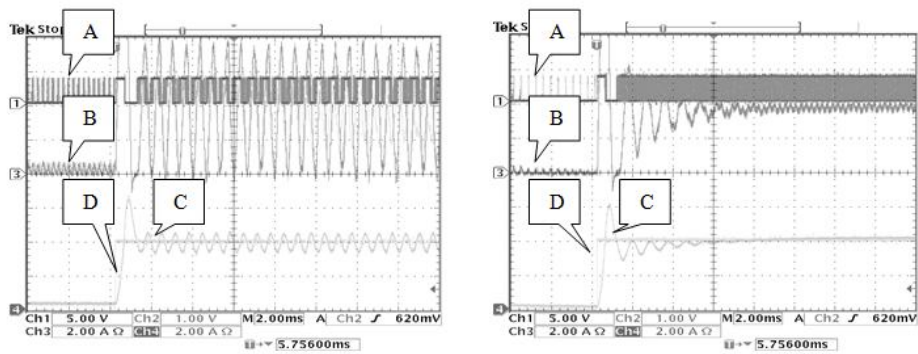


Rys. 8. Zdjęcie poglądowe zbudowanego stanowiska badawczego

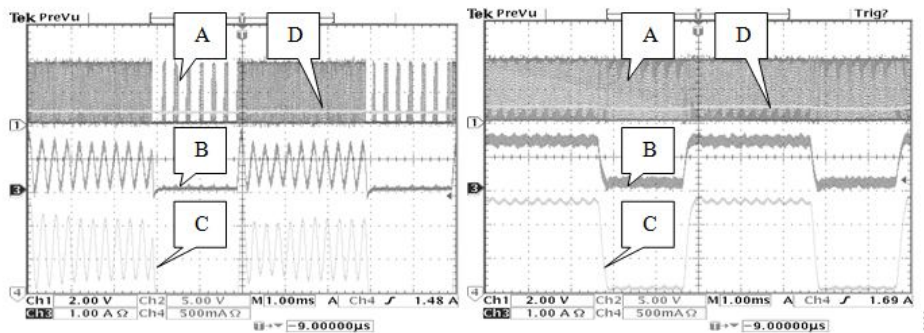
Przykładowe przebiegi uzyskane w trakcie badań dla skokowej zmiany prądu referencyjnego i odbiornika o charakterze rezystancyjnym zaprezentowano na rys. 9 i 10. Natomiast oscylogramy zamieszczone na rys. 11 dotyczą przypadku obciążenia układu akumulatorem.



Rys. 9. Oscylogramy dla odbiornika rezystancyjnego. Po lewej: $i_{ref} = 2 \text{ A}$, $k_p = 120$, $k_i = 0$, po prawej: $i_{ref} = 2 \text{ A}$, $k_p = 0$, $k_i = 0,13$. Przebieg PWM- A, przebieg prądu cewki – B, przebieg prądu wyjściowego – C, sygnał referencyjny – D



Rys. 10. Oscylogramy dla odbiornika rezystancyjnego. Po lewej: $i_{ref} = 5 \text{ A}$, $k_p = 80$, $k_i = 0$, po prawej: $i_{ref} = 5 \text{ A}$, $k_p = 40$, $k_i = 0,1$. Przebieg PWM- A, przebieg prądu cewki – B, przebieg prądu wyjściowego – C, sygnał referencyjny – D



Rys. 11. Oscylogramy dla obciążenia w postaci akumulatora. Po lewej: $i_{ref} = 2 \text{ A}$, $k_p = 31$, $k_i = 0$, po prawej: $i_{ref} = 2 \text{ A}$, $k_p = 8$, $k_i = 0,01$. Przebieg PWM- A, przebieg prądu cewki – B, przebieg prądu wyjściowego – C, przebieg napięcia na akumulatorze – D

Badania miały na celu m.in. dobranie optymalnych nastaw regulatora prądu. Zgodnie z metodą doboru nastaw regulatora PI Zieglera-Nicholsa [8] bazującą na wzmocnieniu granicznym, zwiększano wzmocnienie członu proporcjonalnego (k_p) do momentu wystąpienia w sygnale wyjściowym oscylacji o stałej amplitudzie. Rejestrowano przebiegi układu będącego na granicy stabilności oraz przebiegi po dobraniu optymalnych nastaw, dla których odpowiedź układu najbardziej przypominała sygnał referencyjny.

Niestety, w trakcie badań nie udało się uzyskać takich nastaw, aby uzyskać stabilną pracę układu w szerokim zakresie zmian prądu referencyjnego. Zwiększenie prądu przepływającego przez układ powodowało bowiem zmianę transmitancji obiektu, co wymusiło konieczność zmian nastaw regulatora przy zmianie prądu zadanego. Można wnioskować, że zmiana właściwości obiektu mogła zostać spowodowana przez zmianę parametrów któregoś z elementów źródła lub obiektu regulacji, zależną od wartości zadawanego prądu referencyjnego (najprawdopodobniej przyczyna tkwiła w elemencie indukcyjnym filtra wyjściowego).

Eksperymentalnie potwierdzono, że zwiększenie wzmocnienia członu proporcjonalnego (k_p) powoduje szybsze nadążanie odpowiedzi układu za zmianą sygnału wymuszającego, a dodanie członu całkującego (o wzmocnieniu k_i) pozwala sprowadzić uchyb ustalony do zera.

4. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania potwierdziły poprawność działania części silnopądowej układu, jak i zaimplementowanego regulatora prądu. Możliwa była nadszeregowa regulacja prądu i zmiana parametrów regulatora w celu jak najwierniejszego odwzorowania sygnału zadanego na wyjściu. Odbiornikami użytymi do badania był odbiornik rezystancyjny oraz akumulator żelowy.

Zbudowany model może zostać wykorzystany do celów dydaktycznych, jako stanowisko laboratoryjne. Przewiduje się również jego dalsze modyfikacje w celu umożliwienia pracy układu w trybie BUCK-BOOST, co istotnie zwiększy zakres pracy opisywanego przekształtnika. Ponadto planowane jest zastąpienie regulatora prądu PI własną strukturą opracowaną przez jednego z autorów.

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*, (2009), nr 7, 138 - 140.
- [6] Matecki D., Model eksperymentalny sterowanego energoelektronicznego źródła prądowego prądu stałego, Praca dyplomowa magisterska pod promotorstwem Michała Krystkowiaka, Politechnika Poznańska, 2015.
- [7] Analog Devices: Data Sweet Final – SHARC Processor. ADSP 21-369, Rev. D.
- [8] Horla D.: Podstawy automatyki: ćwiczenia laboratoryjne. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 2003.

THE EXPERIMENTAL MODEL OF POWER ELECTRONICS CONTROLLED CURRENT SOURCE BASED ON BUCK CIRCUIT – PART 1

The article presents the power electronic controlled current source based on DC/DC BUCK circuit with a low pass output filter. The control system of described converter was built with help of digital platform equipped with a floating point DSP processor. Chosen result of research for different conditions, including various load and parameters of implemented current regulator was also shown.

(Received: 21. 01. 2016, revised: 4. 03. 2016)