

Projekt laboratoryjnego falownika 3-fazowego sterowanego przy użyciu środowiska symulacyjnego PLECS

Streszczenie. W artykule zawarto przebieg procesu projektowania trójfazowego falownika napięcia, sterowanego z wykorzystaniem środowiska symulacyjnego PLECS. Przedstawiono etapy, począwszy od teoretycznych założeń i symulacji, kończąc na projekcie rzeczywistego modelu. Przedstawiono wyniki przeprowadzonych badań zbudowanego falownika, które obejmowały współpracę układu z środowiskiem symulacyjnym PLECS oraz demonstrację praktycznego układu sterowania momentem i prędkością obrotową silnika indukcyjnego klatkowego. Wykorzystanie procesora LAUNCHXL-F28069M oraz środowiska PLECS pozwoliło na dużo łatwiejszą oraz bardziej intuicyjną implementację różnych metod sterowania energoelektronicznymi przemiennikami częstotliwości. Zaprojektowany falownik stanowi narzędzie do praktycznej implementacji nowych technik sterowania oraz jako układ o zastosowaniu w celach dydaktycznych.

Abstract. The article presents construction process of the three-phase voltage inverter, controlled with the use of the PLECS simulation environment. The work goes through theoretical assumptions and simulations to design of the real model. The results of the tests of the built inverter were presented, which included the cooperation of the system with the PLECS simulation environment and demonstrations of the practical torque and speed control system for a squirrel-cage induction motor. The use of the LAUNCHXL-F28069M processor and the PLECS environment allowed for a much easier and more intuitive implementation of various methods of controlling power electronic frequency converters. The designed inverter is a tool for the practical implementation of new control techniques and as a system for didactic purposes. (**Design of a laboratory 3-phase inverter controlled using the PLECS simulation environment**).

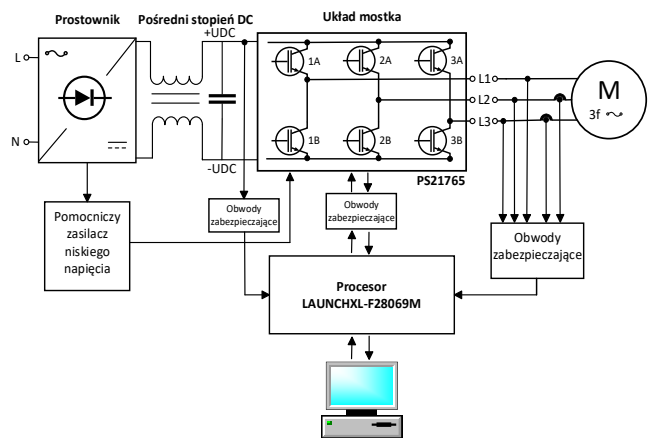
Słowa kluczowe: falownik trójfazowy, falownik napięcia, PLESC, sterowanie skalarne, silnik indukcyjny.
Keywords: three-phase inverter, voltage inverter, PLECS, scalar control, induction motor.

Wprowadzenie

Nieustannie rosnący trend zapotrzebowania na energię elektryczną zaobserwowany w skali świata oraz coraz częstsze umieszczenie urządzeń energoelektronicznych pomiędzy źródłem zasilania, a zasilanym odbiornikiem powodują, że głównym celem współczesnej energoelektroniki jest jak najskuteczniejsze zminimalizowanie strat mocy w wyniku przetwarzania, sterowania oraz odpowiedniego dopasowania parametrów energii elektrycznej [1],[2]. W ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat dziedzina sterowanych napędów elektrycznych uległa szybkiemu rozwojowi, głównie za sprawą zalet oferowanych przez nowoczesne generację mikrokontrolerów. Wprowadzane ulepszenia technologiczne umożliwiły opracowanie coraz efektywniejszych metod sterowania napędem prądu przemiennego z mniejszym rozpraszaniem mocy wynikającym z procesu przełączania oraz uzyskanie dokładniejszych struktur sterowania. Sterowanie napędem elektrycznym stają się dokładniejsze w tym sensie, że kontrolowane są nie tylko wielkości prądu stałego, ale także trójfazowe prądy przemiennie i napięcia, które zarządzane są przez tak zwane sterowanie wektorowe [3]. Do najczęściej stosowanych elementów łącznikowych stosowanych w układach falowników wykorzystuje się tranzystory polowe z izolowaną bramką (MOS) lub ze względu na swoje bardzo dobre właściwości przełączania - tranzystory bipolarnie z izolowaną bramką (IGBT) [4]. Zgodnie z analizą rynku większość wykorzystywanych silników w przemyśle stanowią silniki indukcyjne prądu przemiennego. Powodem takiego stanu rzeczy jest ich duża wytrzymałość, wyższa niezawodność, niższa cena oraz wysoka sprawność (do 80%) w porównaniu z innymi typami silników [5]. Jednak zastosowanie silników indukcyjnych nie należy do najłatwiejszych ze względu na złożony model matematyczny, nieliniowe zachowanie podczas nasycenia oraz temperaturowe oscylację parametrów elektrycznych, które zależą od fizycznego wpływu temperatury. Czynniki te sprawiają, że sterowanie silnikiem indukcyjnym jest skomplikowane i wymaga zastosowania algorytmów sterowania o wysokiej wydajności, takich jak „sterowanie wektorowe” oraz wydajnego mikrokontrolera.

Projekt falownika

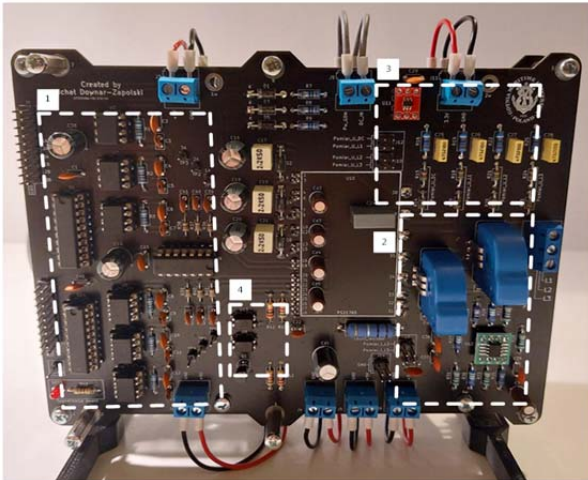
Przed przystąpieniem do prac projektowych postanowiono przeanalizować istniejące rozwiązania konstrukcyjne nisko napięciowych przemienników częstotliwości oraz zapoznano się z ofertą energoelektronicznych komponentów dostępnych u różnych producentów. Rezultatem powyższych działań było podjęcie decyzji o oparciu przyszłego falownika na układzie PS21765 produkcji Mitsubishi Electric. Moduł PS21765 zawiera w swojej budowie 3-fazowy dwupoziomowy mostek oparty na tranzystorach IGBT oraz zintegrowany z nim układ driverów wraz z wyprowadzeniami umożliwiającymi sterowanie i kontrole procesu przełączania. Jako procesor postanowiono wykorzystać mikrokontroler firmy Texas Instruments LAUNCHXL-F28069M. Decyzję podjęto na podstawie szerokich możliwości jakie oferują dany mikrokontroler m. in. 12 wyjść PWM, 12 wejść analogowych oraz specjalne wejścia sygnałowe umożliwiające podłączenie enkodera inkrementalnego. Ogólna konstrukcja falownika została przedstawiona w postaci schematu blokowego widocznego na rysunku 1.



Rys. 1. Ogólny schemat blokowy układu falownika

Budowę układu falownika zrealizowano za pomocą obwodu drukowanego, do którego wlutowano komponenty

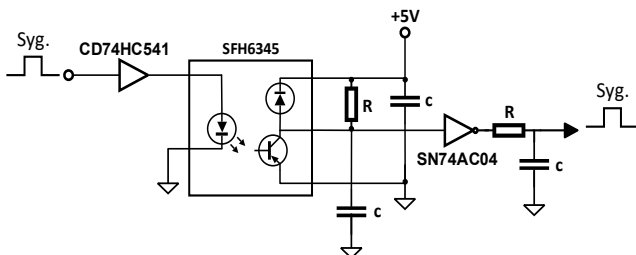
wykonane w technologii THT. Zaprojektowany układ posiada czterowarstwową strukturę oraz pokryty jest warstwą lakieru, którego celem jest zwiększenie ogólnej wytrzymałości elektrycznej całego obwodu. Na rysunku 2 przedstawiono widok przedniej strony układu ukończonego falownika.



Rys. 2. Widok przedniej strony przemiennika częstotliwości z układami kontrolno-pomiarowymi i modułem PS21765

Zaprezentowany obwód drukowany na rysunku 2 zawiera w swojej budowie układy kontrolno-pomiarowe (2,3,4) oraz układ zapewniający separację galwaniczną sygnałów sterujących (1).

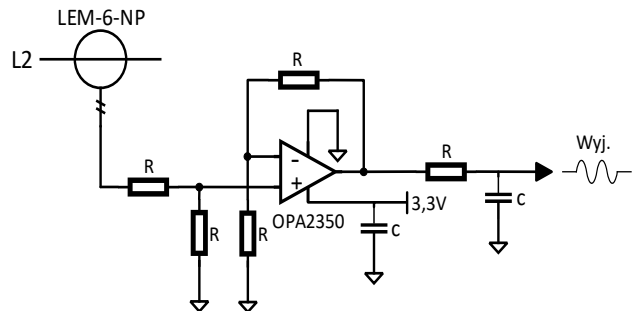
1) W tej części oznaczono całość komponentów wchodzących w strukturę układu sterowania. Sygnał sterujący generowany na wyjściu mikrokontrolera posiada niewystarczającą wydajność prądową, aby bezpośrednio załączać poszczególne łączniki tranzystorowe, dlatego w pierwszej kolejności wzmacniono sygnał. W tym celu wykorzystano 8 kanałowy nieodwracalny bufor CD74HC541. Wzmocniony w ten sposób sygnał doprowadzany jest do układu transoptora SFH6345, który stanowi galwaniczną separację. W następnej kolejności sygnał przekazywany jest do logicznego negatora SN74AC04, z którego wyjść sygnały sterujące są podawane bezpośrednio na układ PS21765 (rys. 3).



Rys. 3. Schemat przedstawiający układ optycznej separacji dla pojedynczej linii sygnału sterującego

2) Znajdujące się w tej części obwody odpowiedzialne są za pomiary prądów w fazie L2 oraz L3. Prąd w trzeciej fazie obliczany jest na podstawie pomiarów dokonanych w dwóch pozostałych fazach zgodnie z zasadą zachowania mocy, gdyż suma prądów w trzech fazach musi równać się zero. Zastosowanie bezpośredniego pomiaru prądu w trzech fazach doprowadziłoby do niepotrzebnego skomplikowania konstrukcji układu. Pomiar dokonywany jest za pomocą dwóch przekładników prądowych LEM-6-NP, które jednocześnie stanowią element separacji galwanicznej. W skład układu pomiarowego wchodzi również układ podwójnego wzmacniacza operacyjnego

OPA2350, którego zadaniem jest normalizacja napięcia do zakresu akceptowalnego przez mikrokontroler. Na rysunku 4 przedstawiono schemat układu pomiarowego dla pojedynczej fazy.

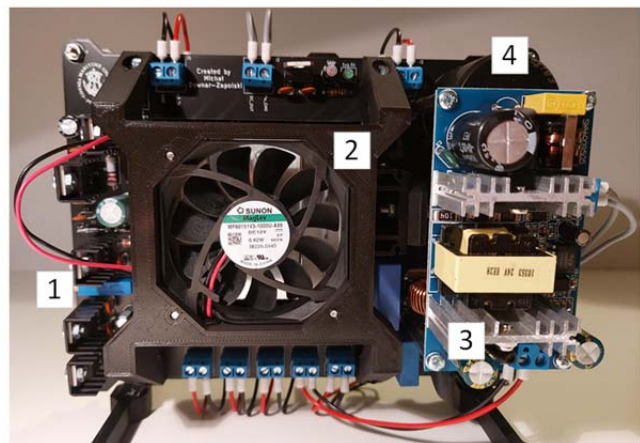


Rys. 4. Schemat wyjaśniający zasadę działania obwodu pomiarowego dla fazy L2

3) Obwód ten odpowiedzialny jest za pomiar napięcia fazowego oraz napięcia stałego pochodzącego z pośredniczącego obwodu DC. Jego budowa została oparta na dzielniku napięcia, którego przełożenie wynosi 1:125. W skład obwodu pomiarowego wchodzi układ NUP4201MR6, którego zadaniem jest ochrona wejść mikroprocesora przed niepożądanymi skokami napięcia, które mogłyby doprowadzić do trwałego uszkodzenia procesora.

4) Zadaniem tego obwodu jest przekazywanie informacji o powstałym zwarceniu w module falownika, która za pomocą układów optycznej separacji przekazywana jest do mikrokontrolera. Zawiera on również w swojej strukturze obwód odpowiedzialny za natychmiastowe wyłączenie całego moduły w razie wystąpienia sytuacji niepożądaną takiej jak np. zwarcie lub przekroczenie nominalnego prądu obciążenia.

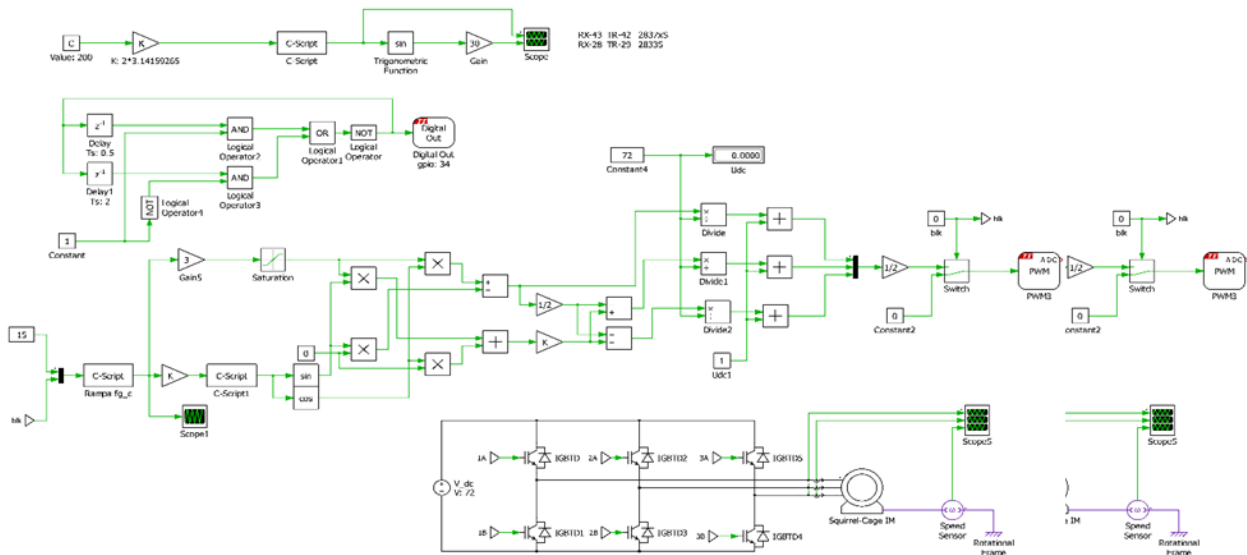
W skład falownika wchodzi również moduł odpowiedzialny za zasilanie układów kontrolno-pomiarowych, sterowania oraz modułu PS21765. W skład układu zasilania (rys. 5) wchodzi: zasilacze pomocnicze 3,3V, 5V, 15V oznaczone numerem 1, zautomatyzowany układ chłodzenia układu mocy (nr 2), przetwornica 230VAC/24DC (nr 3) oraz zintegrowany zasilacz główny 320VDC (nr 4).



Rys. 5. Widok falownika od strony tylnej z układami zasilaczy oraz systemem chłodzenia modułu mocy

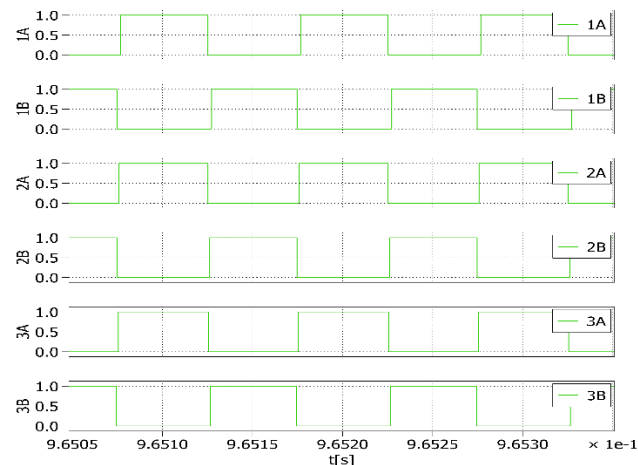
Implementacja kodu oraz badania symulacyjne sterowania z poziomu środowiska symulacyjnego PLECS

Do dokonania implementacji kodu niezbędne było zainstalowanie dodatkowego oprogramowania, które stanowi rozszerzenie środowiska symulacyjnego PLECS.



Rys. 6. Schemat blokowy układu napędowego realizującego sterowanie skalarne w środowisku PLECS

W tym celu poszerzono środowisko PLECS Standalone o pakiet PLECS Coder, którego zadaniem jest generacja kodu ANSI-C na podstawie modelu blokowego oraz o pakiet wspierający mikrokontrolery Texas Instruments (TI C2000 Target Support Package). Za sprawą powyższych rozszerzeń uzyskujemy możliwość prostego i intuicyjnego programowania blokowego mikrokontrolera LAUNCHXL-F28069M. W celach demonstracyjnych zaimplementowano sterowanie skalarne. W tym rodzaju sterowania, sygnał sterujący jest skalarem, czyli wartością liczbową, która odpowiada za wartość prędkości lub momentu obrotowego silnika. W celu utrzymania stałej prędkości lub momentu obrotowego, sterowanie skalarne dostosowuje wartość amplitudy napięcia lub częstotliwość do prądu zasilającego silnik jest to osiągane poprzez zastosowanie algorytmów regulacji [7]. Sterowanie skalarne stosowane jest głównie w prostych aplikacjach niewymagających dużej precyzji i dynamiczności [8]. Rysunek numer 6 przedstawia implementację sterowania skalarnego w środowisku PLECS.

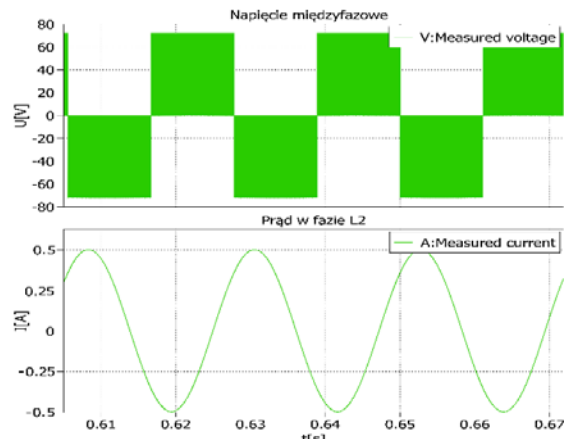


Rys. 7. Oscylogram przedstawiający przebiegi sygnałów sterujących dla poszczególnych tranzystorów układu mostka falownika

Opracowany układ sterowania został przetestowany za pomocą zaimplementowanego uproszczonego modelu falownika widocznego na rysunku numer 6 w prawym dolnym rogu. Test miał za zadanie wykrycie ewentualnych nieprawidłowości w funkcjonowaniu zaimplementowanego

sterowania. Na rysunkach numer 7 i 8 przedstawiono wybrane przebiegi ilustrujące działanie powstałego układu regulacji.

W stworzonej strukturze blokowej układu sterowania za pomocą bloku C-Script w łatwy sposób zaimplementowano funkcję odpowiedzialną za tak zwaną „rampę”. Zastosowanie rampy polega na stopniowym zwiększaniu lub zmniejszaniu wartości częstotliwości prądu zasilającego silnik w trakcie procedury rozruchu lub zatrzymania. Metoda ta przyczynia się do zmniejszenia prądów towarzyszących rozruchowi silnika [9]. W zademonstrowanym układzie rampa może być programowana w falowniku w zależności od wymagań aplikacji, wobec tego, można dostosowywać rampę do specyficznych potrzeb danego procesu, takich jak czas rozruchu, zatrzymania lub ilości energii potrzebnej do uruchomienia silnika.



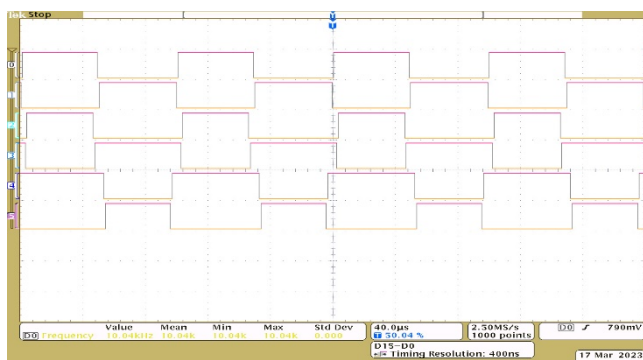
Rys. 8. Przebiegi wartości chwilowej napięcia międzyfazowego i prądu fazy L2 silnika klatkowego – badania symulacyjne

Przedstawione oscylogramy na rysunkach 7 i 8 potwierdzają poprawność wykonanego sterowania. Rysunek numer 7 przedstawia sygnały sterujące generowane na wyjściu układu sterowania, natomiast rysunek numer 8 przedstawia napięcie międzyfazowe oraz prąd w fazie L2 zmierzone na modelu silnika indukcyjnego.

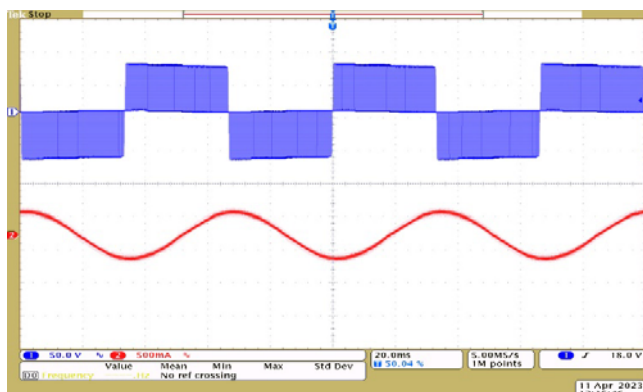
Badania rzeczywistego układu oraz sterownie falownikiem z poziomu środowiska PLECS

Rozpoczynając etap badań rzeczywistego układu przystąpiono do procedury połączenia mikrokontrolera LAUNCHXL-F28069M z środowiskiem symulacyjnym

PLECS. W tym celu w oknie modelu sterowania wybrano opcję *Coder* znajdującą się w górnym pasku narzędzi. W otworzonym oknie *Coder options* w zakładce *Target* wprowadzono parametry wykorzystanego mikrokontrolera. W opcji *Parameter Inlining* należy umieścić wszelkiego rodzaju zmienne kluczowe dla danego procesu niewprowadzenie zmiennych w tym oknie spowodują, że nie będzie możliwości ich modyfikacji podczas pracy programu. Następnym krokiem jest załadowanie programu do procesora przyciskiem *Build* w zakładce *External Mode*. Po poprawnym załadowaniu programu do pamięci utworzono połączenie pomiędzy komputerem a mikroprocesorem za pomocą przycisku *Connect*. Ostatnim krokiem jest wybranie opcji *Activate autotriggering*. Funkcja ta umożliwia nam modyfikację wcześniej wprowadzonych zmiennych w czasie rzeczywistym. Po wykonaniu wszystkich powyższych czynności mamy możliwość sterowania falownikiem z poziomu środowiska symulacyjnego PLECS.



Rys. 9. Oscylogram sygnałów sterowania tranzystorów falownika



Rys. 10. Oscylogram ukazujący przebiegi napięcia międzyfazowego (kolor niebieski) oraz prąd w fazie L2 (kolor czerwony) uzyskane podczas testów silnika na biegu jałowym

W celu weryfikacji działania zbudowanego układu podłączono silnik indukcyjny klatkowy o mocy 0,8kW. Postanowiono zasilić układ obniżonym napięciem o wartości 72VDC identycznie jak w przeprowadzonej symulacji. Zdecydowano się na testy przy użyciu obniżonego napięcia, gdyż pozwala to na bezpieczne przeprowadzenie testów i pomiarów bez ryzyka uszkodzenia urządzenia. Przeprowadzone testy umożliwiają dokładniejsze badanie charakterystyk urządzenia, takich jak: strumień magnetyczny, prąd znamionowy, przyspieszenie momentu obrotowego czy częstotliwość drgań bez wpływu na jego pracę i wydajność. Na rysunkach 9 oraz 10 przedstawiono oscylogramy uzyskane w wyniku przeprowadzenia testów silnika na biegu jałowym.

Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzone symulację i badania rzeczywistego modelu laboratoryjnego potwierdziły spełnienie przedstawionych założeń projektowych. Zaprezentowany układ falownika umożliwia pracę na napięciach do 600V oraz możliwość podłączenia silnika o mocy do 3kW. Za pomocą mikroprocesora LAUNCHXL-F28069M oraz programu PLECS stworzono układ, którego programowanie nie wymaga dogłębnej znajomości języków niskiego poziomu takich jak np. C++. Stanowi on zatem narzędzie do szybkiego i prostego prototypowania nowych technik sterowania układami napędowymi. Niebagatelną zaletą przedstawionego środowiska jest możliwość wprowadzania modyfikacji zmiennych podczas wykonywania programu, daje to możliwość szybkiego wprowadzania korekty oraz znacząco skraca czas przeprowadzanych badań.

Dalsze prace rozwojowe przedstawionego modelu falownika będą prowadzone w kierunku istotnej modernizacji obwodów sterowania polegającej na wprowadzeniu układów sprzężenia zwrotnego umożliwiających pomiar prędkości i położenia wału zasilanego silnika. Przyszłe prace modernizacyjne będą miały na celu zwiększenie możliwości oferowanych przez układ w zakresie implementacji bardziej zaawansowanych metod sterowania, takich jak np. sterowanie wektorowe. Planowane jest stworzenie systemu pomiarowego przebiegów napięć i prądów na wyjściu układu falownika, których wizualizacja będzie odbywała się w programie PLECS. Intencją jest stworzenie prostego w obsłudze środowiska symulacyjnego, w którym będzie możliwość bieżącego porównywania modelu symulacyjnego z rzeczywistym układem napędowym.

Autorzy: mgr inż. Michał Downar-Zapolski, Uniwersytet Morski w Gdyni, Katedra Automatyki Okrętowej, ul. Morska 81/87, 81-225 Gdynia, E-mail: downarzapolski@gmail.com; dr inż. Andrzej Kasprowicz, Uniwersytet Morski w Gdyni, Katedra Automatyki Okrętowej, ul. Morska 81/87, 81-225 Gdynia, E-mail: a.kasprowicz@we.umg.edu.pl.

LITERATURA

- [1] Lai JS., Peng FZ.: Multilevel converters – a new breed of power converters, *IEEE Trans. on Industry Applications*. 1996;32(3):509-517.
- [2] Rodriguez J., Lai JS., Peng FZ. Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*. 2002;49(4):724-738.
- [3] Orłowska-Kowalska T., Sobański P.: Przegląd dwupoziomowych falowników napięcia odpornych na uszkodzenia tranzystorów IGBT, *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej*, 69 (2013), nr.33
- [4] Nowak M., Barlik R.: Poradnik Inżyniera Energoelektronika, *WNT, Warszawa (2016)*, 35-37
- [5] Firma Danfoss: Facts worth knowing about Frequency Converters, *Wydanie (2014)*
- [6] Szerszeń G., Zygadło D.: Zastosowanie zmiennego algorytmu sterowania w falowniku trójfazowym, *In: XIII Interdyscyplinarna Konferencja Naukowa TYGIEL, Lublin 2021*
- [7] Bogdan P., Binkowski T.: System elektronicznego sterowania skalarnego silników indukcyjnych w oparciu o mikrokontrolery STM32F103, *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej*, 289 (2013), 41-51
- [8] Zieliński W.: Synteza ważniejszych metod sterowania skalarnego silnikami indukcyjnymi, *Zeszyty Problemowe Politechniki Lubelskiej, Maszyny Elektryczne*, 72 (2005), 229
- [9] Sotor D., Michalak J.: Mikroprocesorowy system prototypowania do testowania układów sterowania przekształtników, *Zeszyty Problemowe Politechniki Śląskiej, Maszyny Elektryczne*, 2 (2015), 106