

Wspomaganie procesu nauczania napędu elektrycznego z wykorzystaniem wirtualnej platformy ePEDlab

Streszczenie. W artykule przedstawiono uruchomioną w Katedrze Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki Politechniki Śląskiej wirtualną platformę wspomagającą proces nauczania w zakresie energoelektronicznych układów napędowych. Przedstawiono ideę projektu, format opublikowanych materiałów oraz źródła finansowania. Potencjalny sposób wykorzystania platformy w procesie dydaktycznym pokazano na przykładzie zagadnienia sterowania połowo zorientowanego silnika indukcyjnego klatkowego.

Abstract. The virtual teaching platform of power electronic drive systems launched in the Department of Power Electronics, Electrical Drives and Robotics of Silesian University of Technology is presented in the paper. The overall idea and sources of funding are described. An example of using, based on field oriented control method of induction machine, has been given. (**Supporting the teaching process of electrical drive with use of the virtual platform ePEDlab**).

Słowa kluczowe: dydaktyka, napęd elektryczny, platforma edukacyjna.

Keywords: didactic, electrical drive, e-learning platform.

Wstęp

Układy napędowe mają istotny udział w zużyciu energii elektrycznej. Szacuje się że pobierają one prawie 50% całkowitego globalnego zużycia energii elektrycznej i około 70% całkowitej energii elektrycznej zużywanej przez przemysł [1]. Zastosowanie przekształtników energoelektronicznych znacznie zwiększyło efektywność układów napędowych. Ze względu na nieustający rozwój możliwości technicznych, ciągłą modernizację istniejących instalacji i projektowanie nowych, odpowiednie przygotowanie przyszłych kadr inżynierskich ma niezwykle istotne znaczenie. Dydaktyka z zakresu napędu elektrycznego jest o tyle trudniejsza, że wymaga od studentów solidnego przygotowania z zakresu maszyn elektrycznych, przekształtników energoelektronicznych i teorii sterowania.

W Katedrze Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki Politechniki Śląskiej prowadzone są zajęcia z zakresu napędu elektrycznego na studiach I i II stopnia, a także w ramach studium podyplomowego. Na większości kierunków studiów pierwszego stopnia (zarówno stacjonarnych jak i niestacjonarnych) wykładane są przedmioty obejmujące podstawy napędu elektrycznego. Na stopniu magisterskim kierunku Elektrotechnika występuje przedmiot obligatoryjny Dynamika Napędu Elektrycznego, a dla specjalności Przetwarzanie i Użytkowanie Energii Elektrycznej przygotowano przedmiot Sterowanie Napędów Przekształtnikowych. Proces nauczania obejmuje wykłady, dostarczające studentom wiedzy teoretycznej oraz zajęcia laboratoryjne, pozwalające wykorzystać w praktyce przyswojone informacje. Uzupełnieniem są zajęcia projektowe oraz seminaryjne, wymagające od studentów większej samodzielności.

Projekt ePEDlab

W celu zwiększenia atrakcyjności i skuteczności procesu nauczania w zakresie energoelektronicznych układów napędowych w Katedrze Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki Politechniki Śląskiej prowadzony jest projekt, którego efektem jest platforma zdalnej edukacji (rys. 1) o akronimie ePEDlab (Power Electronic Drives laboratory) [3]. W tym celu pozyskano dofinansowanie ze środków funduszy norweskich i funduszy EOG, pochodzących z Islandii, Liechtensteinu i Norwegii w ramach programu Rozwój Polskich Uczelni prowadzonego przez Fundację Rozwoju Systemu Edukacji. Zaproponowane zwiększenie atrakcyjności nauczania

polega na wprowadzeniu czynnika interaktywności do materiałów wykładowych oraz wstawieniu stopnia pośredniego pomiędzy teorią a eksperymentem w postaci ćwiczeń symulacyjnych. Jako ostatni stopień proponuje się ćwiczenia praktyczne na stanowiskach dydaktycznych, wykorzystujących urządzenia spotykane w przemyśle.



Rys. 1. Witryna wirtualnego laboratorium ePEDlab [3]

Uruchomiona witryna internetowa służy do udostępniania materiałów dydaktycznych. Zaplanowano opracowanie interaktywnych materiałów w języku polskim i angielskim, obejmujących zagadnienia kursu podstawowego (inżynierskiego) i zaawansowanego (magisterskiego). Dla obu poziomów materiały podzielono na dwa rodzaje: treści teoretyczne i modele symulacyjne. Materiały teoretyczne nawiązują do tradycyjnych wykładów i umożliwiają ponowne samodzielne utwalenie treści przekazanych na wykładzie. Część symulacyjna, dzięki zgodności z zakresem ćwiczeń laboratoryjnych, pozwala studentom z jednej strony na lepsze przygotowanie do przeprowadzenia ćwiczenia, z drugiej strony może być narzędziem do porównania otrzymanych w laboratorium wyników, znalezienia różnic między symulacją a eksperymentem, czy sprawdzenia nabytych w laboratorium umiejętności. Na stronie projektu sukcesywnie uzupełniane są kolejne fragmenty kursów. W chwili oddawania tego artykułu dostępne były już wszystkie modele symulacyjne.

Jako oddzielne zadanie projektu zaplanowano uzupełnienie bazy laboratoryjnej o nowe stanowiska dydaktyczne. Partnerem Uczelni w tym zadaniu jest firma ENEL-PC, specjalizująca się w opracowywaniu i produkcji przekształtników energoelektronicznych stosowanych w napędzie i energetyce odnawialnej. Firma ma również

doświadczenie w przygotowywaniu stanowisk dydaktycznych.

Materiały teoretyczne

Do opracowania części teoretycznej materiałów wybrano oprogramowanie Mathematica firmy Wolfram. Umożliwia ono przygotowanie atrakcyjnych wizualnie podręczników elektronicznych, wprowadzając elementy interaktywności. Zaproponowany przez Wolfram typ pliku cdf [4], w odróżnieniu od popularnego formatu pdf, zapewnia interakcję z użytkownikiem. Przykładowo: możliwa jest zmiana wartości parametru równania, a ilustrująca zależność charakterystyka również ulegnie zmianie. Jak zostanie przedstawione w dalszej części artykułu, znakomicie ułatwia to nauczycielowi tłumaczenie, a studentom zrozumienie nawet skomplikowanych zagadnień. Do wyświetlenia dokumentów cdf konieczne jest zainstalowanie specjalnego czytelnika, do pobrania ze strony producenta. Występuje on również w formie wtyczki do przeglądarki internetowej.

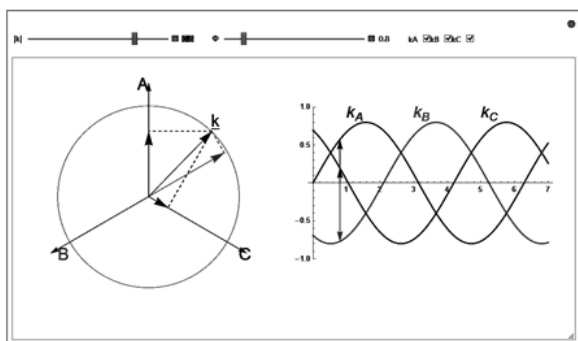
Jako przykład do przedstawienie kompletnego zestawu uzupełniających się narzędzi wybrano zagadnienie sterowania połowo zorientowanego FOC silnika indukcyjnego klatkowego. U jego podstaw leży idea zapisu wektorowego równań maszyny. Proponowane interaktywne podejście do materiałów teoretycznych jest pomocne na przykład podczas omawiania związków pomiędzy wektorem przestrzennym a chwilowymi wartościami prądu. Definicję wektora przestrzennego stanowi zależność:

$$(1) \quad \underline{k} = \frac{2}{3} (\underline{k}_A(t) + \underline{k}_B(t) + \underline{k}_C(t)),$$

gdzie: \underline{k} – wektor przestrzenny zmiennej k , k_A , k_B , k_C – wartości chwilowe wielkości k w poszczególnych fazach, $\underline{1}$, \underline{a} , \underline{a}^2 – wektory jednostkowe:

$$(2) \quad \underline{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}}, \quad \underline{a}^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}}.$$

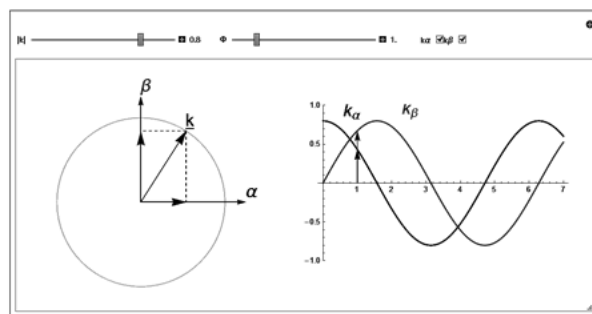
Powyższy zapis najczęściej ilustruje się konstrukcją wektora przestrzennego ze składowych odpowiadających wartościom chwilowym poszczególnych faz. O wiele bardziej przyswajalna jest wersja dynamiczna, w której użytkownik może zmieniać za pomocą suwaków wartości amplitudy i położenia wektora przestrzennego, cały czas obserwując dopasowujące się wielkości chwilowe na wykresie wektorowym i przebiegu czasowym. Interaktywną ilustrację niniejszego zagadnienia w wybranej chwili przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Ilustracja konstrukcji wektora przestrzennego w materiałach interaktywnych

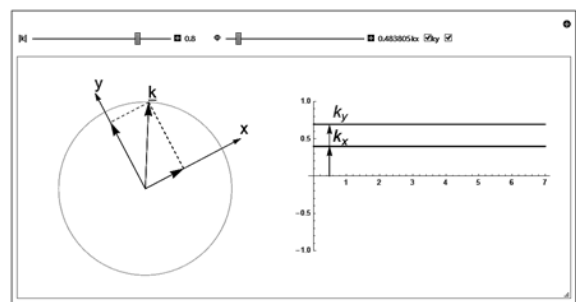
Kolejnym etapem jest przedstawienie wektora przestrzennego na płaszczyźnie zespolonej. Dynamiczna

ilustracja pozwala na zmianę amplitudy i kąta wektora i obserwację składowych w poszczególnych osiach oraz odniesienie do przebiegów czasowych (rys. 3).



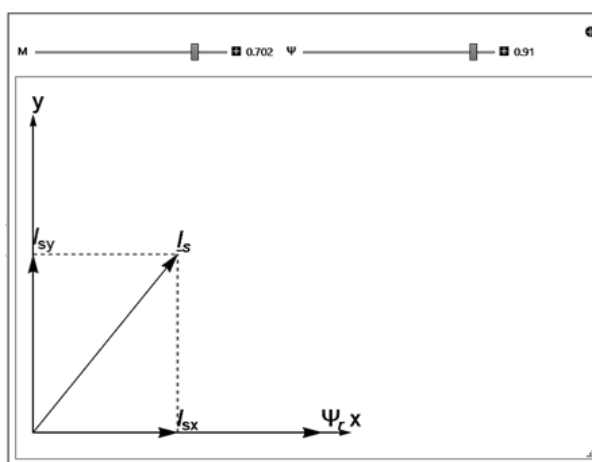
Rys. 3. Wektor przestrzenny na stacjonarnej płaszczyźnie zespolonej

Również transformację Parka można przedstawić z wykorzystaniem narzędzi interaktywnych. Na ilustracji z rysunku 4 przyjęto, że układ współrzędnych wiruje z prędkością wirowania prezentowanego wektora przestrzennego. W takim przypadku student może zaobserwować, że wartości chwilowe rzutów wektora na poszczególne osie są stałe w czasie.

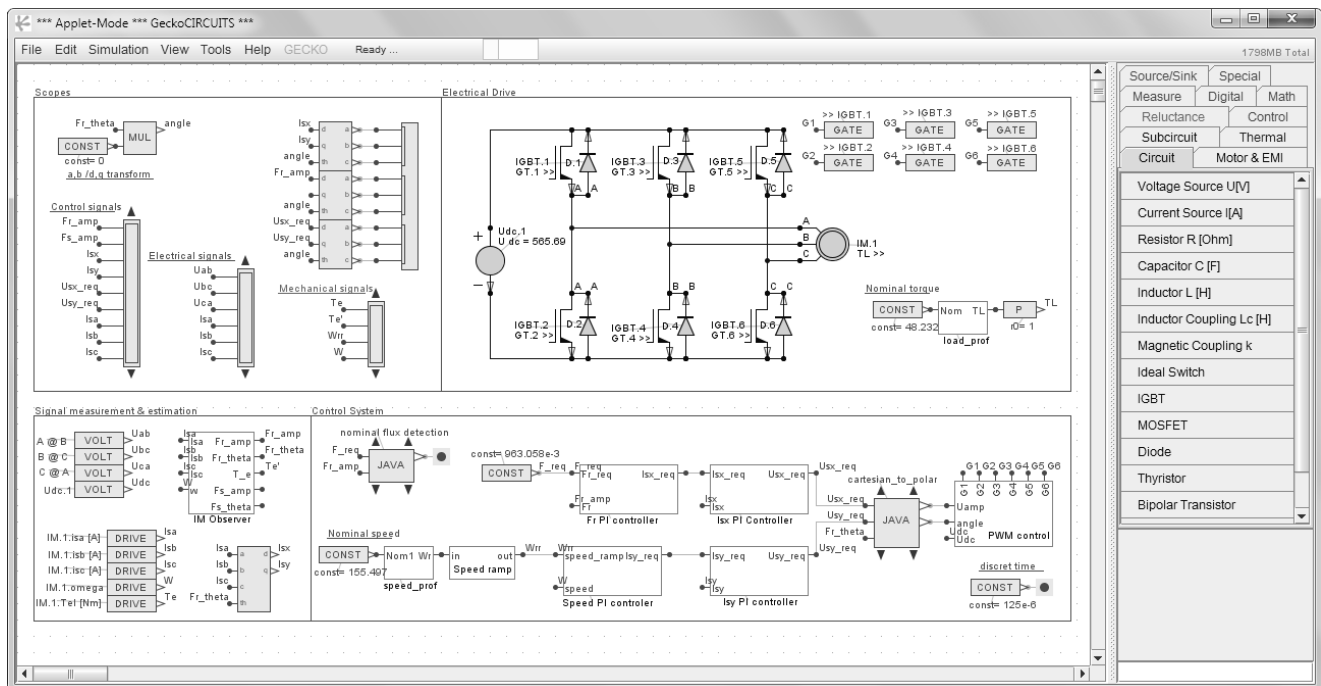


Rys. 4. Ilustracja przekształcenia Parka – wektor przestrzenny w wirującym układzie współrzędnych

Mając pewność, że zagadnienia podstawowe zostały dobrze przyswojone przez słuchaczy, można przystąpić do omówienia zasady działania sterowania połowo zorientowanego. Pomocną ilustracją jest wtedy konstrukcja wektora przestrzennego prądu stojana ze składowych odpowiedzialnych za moment i amplitudę strumienia (rys. 5).



Rys. 5. Zasada podziału wektora przestrzennego prądu na składową odpowiedzialną za moment i amplitudę strumienia



Rys.6. Model symulacyjny sterowania FOC, przygotowany w środowisku GeckoCIRCUITS

Model symulacyjny

Modele symulacyjne poszczególnych ćwiczeń, w tym model układu sterowania połowo zorientowanego silnika klatkowego, zostały przygotowane w środowisku GeckoCIRCUITS [5,6,7]. Modele zamieszczono na stronie internetowej projektu w formie Apletów Javy, co oznacza, że do ich działania nie jest konieczne posiadanie programu GeckoCIRCUITS, wymagana jest jedynie obecność w systemie operacyjnym JRE (ang. *Java Runtime Environment* – środowisko uruchomieniowe Javy). Środowisko to jest często zainstalowane we współczesnych komputerach osobistych, a zatem uruchamianie modeli symulacyjnych jest proste i może odbywać się bezpośrednio z poziomu przeglądarki internetowej, bez konieczności podejmowania dodatkowych czynności.

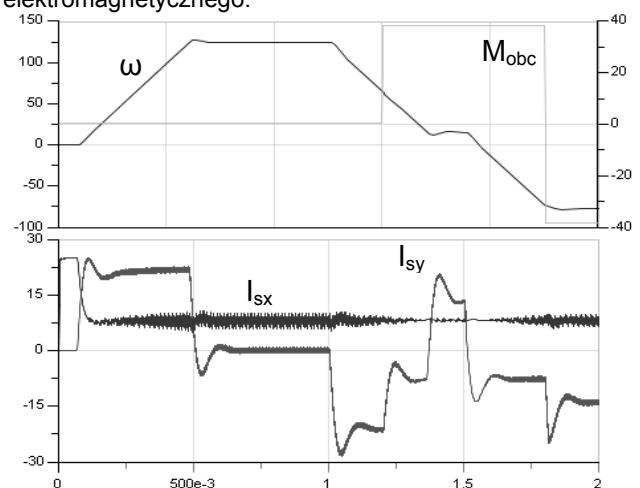
Wszystkie modele symulacyjne zostały przygotowane w oparciu o przyjęty wzorzec, w którym można wyróżnić kilka bloków funkcjonalnych (rys. 6) [8]. W lewym górnym rogu modelu umieszczono zestaw przyrządów pomiarowych, umożliwiających obserwację i rejestrację przebiegów czasowych charakterystycznych wielkości. Obok znajduje się część silnopiętowa układu, zawierająca model silnika i przekształtnika energoelektronicznego. Na dole po lewej stronie zawarto elementy pomiarowe oraz estymatory, natomiast po prawej umieszczono właściwy model układu sterowania, złożony z regulatorów oraz modułu PWM. W przypadku sterowania FOC sygnałami wejściowymi do układu sterowania są wartości zadane amplitudy strumienia wirnika oraz prędkości obrotowej, natomiast na wyjściu otrzymuje się sygnały sterujące tranzystorami. Wszystkie modele wyposażone są w zadajnik wielkości wejściowej, który umożliwia realizację cyklu pracy poprzez podanie chwil czasowych oraz odpowiadających im wartości, określanych w procentach względem wartości znamionowej.

Po prawej stronie okna znajduje się biblioteka elementów programu GeckoCIRCUITS, z której można skorzystać w celu modyfikacji lub rozbudowy modelu symulacyjnego.

Przeprowadzenie symulacji sprowadza się do wybrania opcji *Simulation / Init & Start* lub wciśnięcia klawisza F1. Po wykonaniu obliczeń możliwa jest obserwacja przebiegów

czasowych wielkości prezentowanych na użytych oscyloskopach (rys. 7). W przypadku wykresów wektorowych cenna jest możliwość prezentacji wyników podczas wykonywania obliczeń, dzięki czemu możliwa jest obserwacja wzajemnych położenia wektorów przestrzennych w trakcie pracy układu. Dzięki tej funkcjonalności środowiska GeckoCIRCUITS możliwe jest skorelowanie wiadomości z interaktywnych materiałów teoretycznych z wynikami symulacji komputerowych.

Poza obserwacją wykresów wektorowych użytkownik może przeprowadzić działania podobne do wykonywanych na zajęciach laboratoryjnych. Są to między innymi: obserwacja przebiegów czasowych w odpowiedzi na skok jednostkowy wartości zadanej, określenie wpływu zmian parametrów regulatorów na dynamikę układu, a nawet określenie charakterystyk, np. wartości składowej wektora prądu stojana w osi y w funkcji zmian momentu elektromagnetycznego.



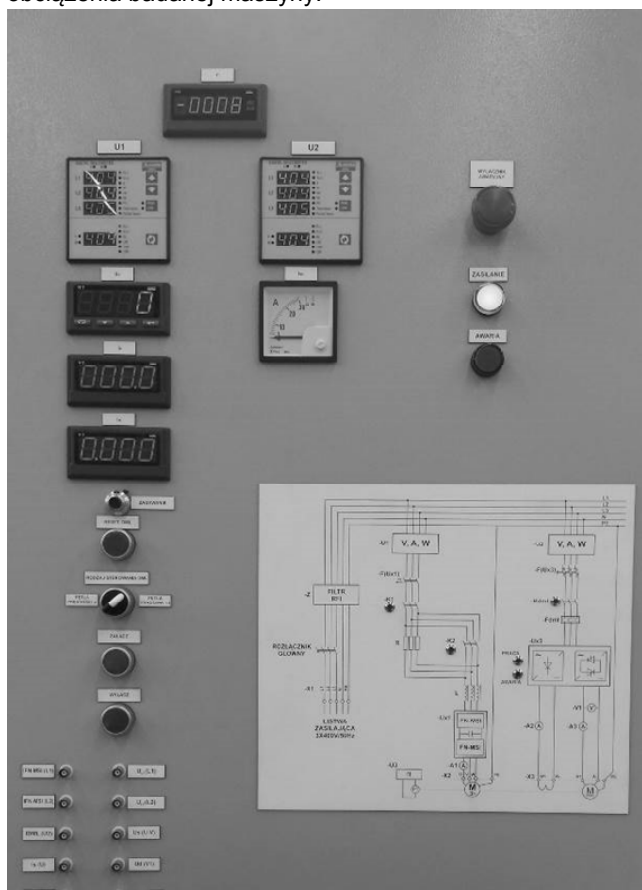
Rys.7. Wyniki symulacji w postaci przebiegów czasowych charakterystycznych wielkości

Stanowisko laboratoryjne

Stanowisko laboratoryjne do badania wektorowych metod sterowania silnika indukcyjnego klatkowego, w tym metody połowo zorientowanej, zrealizowano w formie szafy

(rys. 8), zawierającej przekształtniki energoelektroniczne oraz cały niezbędny osprzęt do zasilania maszyn i interakcji z użytkownikiem [2]. Na panelu frontowym umieszczono zestaw przyrządów pomiarowych prądu, napięcia, mocy i prędkości obrotowej oraz inne elementy interfejsu użytkownika, takie jak lampki sygnalizacyjne, przyciski, przełączniki czy potencjometry. Za pomocą złącz typu BNC wprowadzone zostały sygnały pomiarowe dla oscyloskopu.

W stanowisku wykorzystano zestaw dwóch maszyn, sprzężonych mechanicznie: silnik indukcyjny klatkowy o mocy 7,5 kW oraz silnik obcowzbudny prądu stałego. Maszyny zasilane są za pomocą przekształtników energoelektronicznych – przemiennika częstotliwości firmy ENEL-PC w przypadku silnika klatkowego oraz prostownika tyrystorowego DML firmy Apator, zasilającego silnik prądu stałego. Prostownik wyposażony jest we wbudowany układ sterowania, który zapewnia pracę w pętli regulacji prędkości lub prądu. Silnik obcowzbudny stosowany jest do obciążania momentem badanego silnika klatkowego, zatem DML pracuje ze stabilizacją prądu, którego wielkość zadawana jest za pomocą potencjometru. Możliwe jest uzyskanie dodatkich oraz ujemnych wartości momentu obciążenia badanej maszyny.

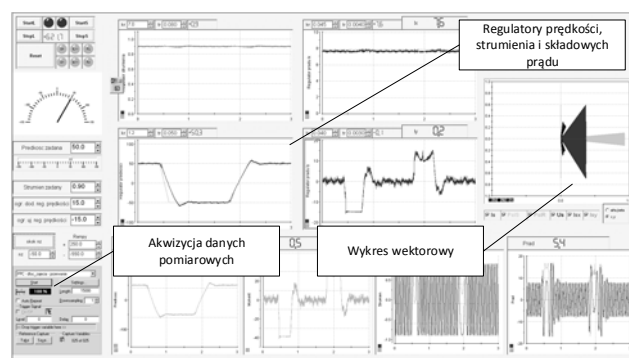


Rys.8. Zdjęcie szafy sterowniczej stanowiska laboratoryjnego

Układ sterowania falownika napięcia zrealizowano przy użyciu karty sterowniczo-pomiarowej DS1104 firmy dSPACE. Karta ta współpracuje z komputerem PC, a jej programowanie możliwe jest w środowisku Matlab-Simulink. Na potrzeby zajęć przygotowany został w Simulinku model symulacyjny układu sterowania, oparty na metodzie polowo zorientowanej, który następnie przystosowano do współpracy z kartą. Czynność ta polegała na sprzężeniu modelu z wejściami oraz wyjściami karty DS1104. Sterowanie polowo zorientowane wymaga pomiaru dwóch prądów fazowych silnika oraz napięcia w obwodzie DC falownika – wielkości te mierzone są za pomocą

przetworników typu LEM, których sygnały wyjściowe wprowadzone zostały na wejścia A/C karty DS1104. Sygnały sterujące tranzystorami wytwarzane są w bloku PWM karty i wyprowadzone za pomocą wyjść cyfrowych na zewnątrz układu sterowania, skąd przy użyciu światłowodów przesyłane są do falownika. Dodatkowo wykorzystano również kilka innych wejść oraz wyjść cyfrowych do sterowania stycznikami czy sprzężeniami zwrotnymi od zabezpieczeń (np. sygnał FAULT falownika).

Oprócz sterowania FOC w karcie sterowniczo-pomiarowej realizowany jest również algorytm sterowania falownikiem sieciowym, zapewniającym dwustronny przepływ energii po stronie sieci przy jednostkowym współczynniku mocy oraz quasi-sinusoidalnym prądzie sieciowym. Również w tym przypadku niezbędne sygnały pomiarowe oraz sterujące przekazywane są za pośrednictwem wejść i wyjść karty.



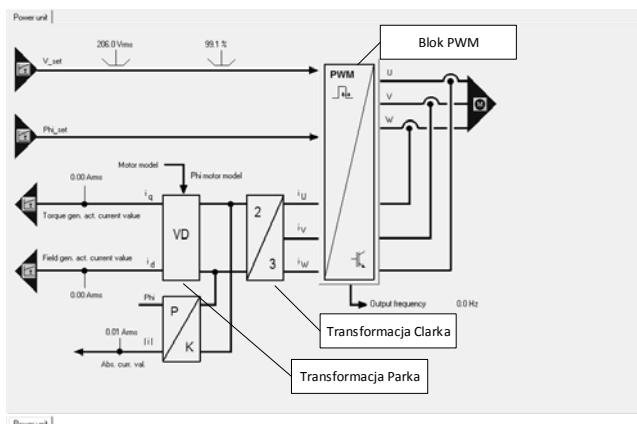
Rys.9. Przykładowy pulpit operatorski w programie ControlDesk

Obsługa sterownika odbywa się przy użyciu komputera PC, a dokładniej dedykowanego oprogramowania ControlDesk, które umożliwia utworzenie wirtualnego pulpitu operatorskiego, działającego w czasie rzeczywistym (rys. 9). Dla każdego ćwiczenia opracowano indywidualny pulpit, w którego skład wchodziły elementy takie jak suwaki, przełączniki, pola tekstowe itp., umożliwiające zadawanie wielkości sterujących (np. prędkości obrotowej) oraz przyrządy pomiarowe, wyświetlające wartości wielkości mierzonych lub obliczonych w sterowniku. Możliwa jest też obserwacja przebiegów czasowych dowolnych wielkości w formie graficznej, znanej z klasycznego oscyloskopu. Pulpit zawiera też elementy sygnalizacyjne, takie jak kontrolki stanu pracy, awarii itp. Wyświetlany jest również wykres wektorowy, który umożliwia obserwację w czasie rzeczywistym wzajemnych położenia wektorów charakterystycznych wielkości w maszynie, co pozwala lepiej zrozumieć ideę działania układu sterowania. Wyniki pomiarów można zapisać na dysku komputera lub na przenośnej pamięci FLASH w celu późniejszej analizy lub – w przypadku studentów – w celu zamieszczenia w sprawozdaniu z ćwiczenia.

Stanowiska przemysłowe

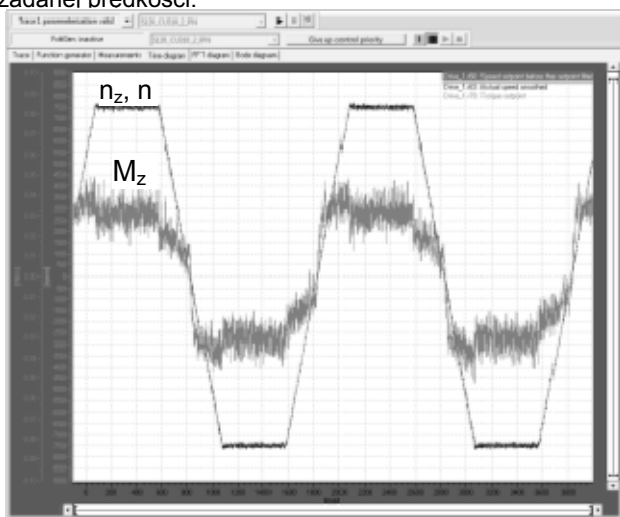
Jednym z celów projektu jest uzupełnienie bazy laboratoryjnej o nowe stanowiska dydaktyczne prezentujące aktualne rozwiązania przemysłowe. Motywacją do podjęcia tych działań była potrzeba przygotowania studentów do obsługi urządzeń, z którymi będą mieli styczność w miejscu pracy. Jednocześnie jest to sposób na pokazanie, w jaki sposób w praktyce wykorzystuje się rozwiązania poznane na wykładach i pozostałych formach zajęć. Na wyposażeniu laboratorium znajdują się już stanowiska z przemiennikami czołowych europejskich producentów – Siemens i Lenze – wykorzystującymi sterowanie skalarnie i wektorowe, a także sterowanie serwonapędami. Do parametryzacji

zaawansowanych układów napędowych najwygodniej jest wykorzystać dedykowane oprogramowanie narzędziowe. Zarówno Engineer firmy Lenze, jak i STARTER firmy Siemens umożliwiają podgląd struktury układu sterowania w sposób graficzny, ustawienie parametrów maszyny, dobór nastaw regulatorów i obserwację przebiegów czasowych na zintegrowanych oscyloskopach programowych.



Rys.10. Ilustracja bloków transformacji współrzędnych w programie STARTER (napęd Siemens Sinamics S110)

Serwonapęd Sinamics S110 firmy Siemens w warstwie podrzędnej układu sterowania wykorzystuje sterowanie połowo zorientowane. Przeglądając kolejne diagramy struktury napędu student może zidentyfikować poszczególne elementy układu sterowania, np. transformacje Clarka i Parka służące wyznaczeniu wartości sprzężeń zwrotnych składowych prądu stojana w osiach x i y (rys. 10). Inne diagramy prezentują m. in.: nadrzędny regulator prędkości (z możliwością adaptacji parametrów), podrzędny regulator prądu, układy ograniczenia momentu oraz rampy ograniczające stromość narastania wartości zadanej prędkości.



Rys.11. Przebiegi czasowe otrzymane w oscyloskopie programu Sinamics STARTER

Zintegrowana w oprogramowaniu STARTER funkcja oscyloskopu wraz z generatorem przebiegów wartości zadanej pozwala przeprowadzać testy podobne do tych ze stanowiska laboratoryjnego. Na rysunku 11 przedstawiono zrzutek ekranu z zarejestrowanymi przebiegami czasowymi wartości zadanej oraz rzeczywistej prędkości, a także wartości zadanej momentu.

Stanowiska przemysłowe pozwalają również studentom poznać praktyczne aspekty układów napędowych. Są to m.in. identyfikacja parametrów podłączonej maszyny, automatyczny dobór nastaw regulatorów, czy też sposoby zadawania prędkości (wejście analogowe, wartości predefiniowane, motopotencjometr oraz komunikacja sieciowa).

Podsumowanie

Projekt ePEDlab powstał w celu poprawy jakości kształcenia w zakresie energoelektronicznych układów napędowych. Jego celem jest stworzenie kompletnego narzędzia, umożliwiającego przekazywanie wiedzy teoretycznej, pogłębianej następnie przy wykorzystaniu symulacji komputerowych oraz utrwalanej podczas zajęć laboratoryjnych. Zakres materiału podzielono na dwa kursy, różniące się stopniem zaawansowania. Integralną częścią projektu jest stworzona strona internetowa, za pomocą której udostępniane są interaktywne materiały dydaktyczne, przygotowane nie tylko w języku polskim, ale również angielskim, co znacznie zwiększa zakres potencjalnych odbiorców kursu. W zakres projektu wchodzi też budowa nowych stanowisk laboratoryjnych z przemysłowymi przekształtnikami energoelektronicznymi, a więc urządzeniami, z którymi słuchacze kursu (studenci) zetkną się w przyszłej pracy zawodowej. Wyniki uzyskane podczas realizacji projektu są wykorzystywane w procesie dydaktycznym prowadzonym dla studentów studiów pierwszego i drugiego stopnia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej.

Autorzy: dr hab. inż. Kazimierz Gierlotka, prof. Pol. Śl., Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki, ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, E-mail: Kazimierz.Gierlotka@polsl.pl, dr inż. Grzegorz Jarek, Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki, ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, E-mail: Grzegorz.Jarek@polsl.pl, dr inż. Michał Jeleń, Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki, ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, E-mail: Michal.Jelen@polsl.pl, dr inż. Jarosław Michalak, Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki, ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, E-mail: Jaroslaw.Michalak@polsl.pl

LITERATURA

- [1] Energy efficiency policy opportunities for electric motor-driven systems, International Energy Agency, 2011 Working Paper in the Energy Efficiency Series, by Paul Waide and Conrad U. Brunner, OECD/IEA 2011
- [2] Jarek G., Jeleń M., Michalak J.: Zastosowanie technik szybkiego prototypowania w dydaktyce napędu elektrycznego, Logistyka 6 (2014), 4846-4853
- [3] Witryna internetowa <http://kener.elekt.polsl.pl/epedlab/>
- [4] Witryna internetowa <http://www.wolfram.com/cdf/>
- [5] Witryna internetowa <http://www.gecko-simulations.com/>
- [6] Drogenik U., Miising A., Kolar J. W.: Novel online simulator for education of power electronics and electrical engineering, Proc. of the Int. Power Electronics Conf. (IPEC-ECCE Asia), Sapporo, Japan, June 2010
- [7] Miising A., Kolar J. W.: Successful Online Education – GeckoCIRCUITS as Open-Source Simulation Platform, Proceedings of the International Power Electronics Conference - ECCE Asia (IPEC 2014), Hiroshima, Japan, May 18-21, 2014
- [8] Gierlotka K., Jarek G., Jeleń M., Michalak J., Modele symulacyjne w ePEDlab – wirtualnej platformie wspomagającej nauczanie napędu elektrycznego, XII Konferencja SENE, Łódź, 18-20.11.2015