

III Konferencja

eTechnologie w Kształceniu Inżynierów eTEE'2016

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, 11 kwietnia 2016

ATRAKCYJNE I EFEKTYWNE NAUCZANIE ZAGADNIENÍ SERWONAPĘDÓW ZA POMOCĄ PLATFORMY ePEDlab

Kazimierz GIERLOTKA¹, Grzegorz JAREK², Michał JELEŃ³, Jarosław MICHALAK⁴

Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Gliwice

1. tel.: 32 237 13 36 e-mail: Kazimierz.Gierlotka@polsl.pl
2. tel.: 32 237 12 20 e-mail: Grzegorz.Jarek@polsl.pl
3. tel.: 32 237 12 20 e-mail: Michal.Jelen@polsl.pl
4. tel.: 32 237 28 42 e-mail: Jaroslaw.Michalak@polsl.pl

Streszczenie: W artykule zaprezentowano projekt ePEDlab, mający na celu uatrakcyjnienie procesu nauczania napędu elektrycznego. Przedstawiono efekty projektu – zestawy interaktywnych materiałów teoretycznych i symulacyjnych. Jako przykład wykorzystania projektu opisano proces nauczania zagadnień związanych ze sterowaniem układami serwonapędowymi. Podkreślono kompletność i wzajemne uzupełnianie się części teoretycznej, symulacyjnej i laboratoryjnej.

Słowa kluczowe: napęd elektryczny, serwonapęd, dydaktyka.

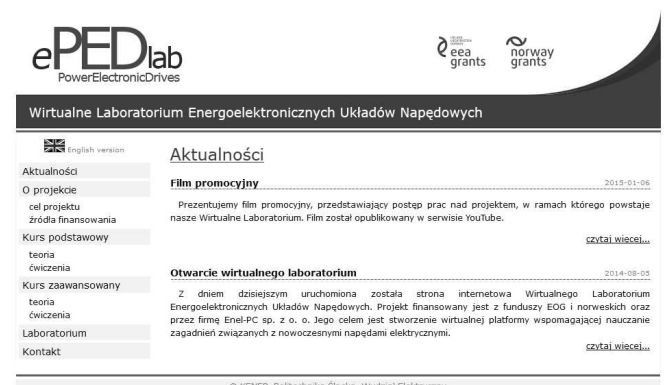
1. PROJEKT ePEDlab

Zastosowanie przekształtników energoelektronicznych do zasilania silników znacznie zwiększyło możliwości napędów elektrycznych. Regulacja prędkości i generowanie momentu może odbywać się z dużą sprawnością. Ma to duże znaczenie ze względu na istotny udział układów napędowych w sumarycznym zużyciu energii elektrycznej w przemyśle. Ciągły rozwój techniki napędowej powoduje konieczność solidnego przygotowania kadr inżynierskich do projektowania i obsługi tych układów.

W Katedrze Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki Wydziału Elektrycznego Politechniki Śląskiej realizowany jest projekt o akronimie ePEDlab. Jego celem jest zwiększenie atrakcyjności nauczania napędu elektrycznego. Zajęcia z napędu prowadzone są na studiach I i II stopnia, a także na studium podyplomowym. Wiedza zdobywana na wykładach jest utrwalana podczas ćwiczeń tablicowych, zajęć laboratoryjnych oraz projektowych. W Laboratorium Energoelektronicznych Układów Napędowych istnieje możliwość przebadania napędów z silnikami prądu stałego, silnikami indukcyjnymi (klatkowymi i pierścieniowymi), a także z silnikami wzbudzanymi magnesami trwałymi.

W projekcie wyróżniono dwie główne drogi realizujące cele szczegółowe. Pierwszą jest opracowanie internetowej platformy gromadzącej interaktywne materiały dydaktyczne, zachęcające do samodzielnego zdobywania wiedzy i umiejętności [1]. Uzupełnieniem tej drogi jest doposażenie bazy sprzętowej laboratorium w zestawy dydaktyczne bazujące na rozwiązaniach przemysłowych.

Na stronie internetowej [2] (rys. 1) umieszczono dwa zestawy materiałów dydaktycznych, podzielone na kurs podstawowy (inżynierski) i zaawansowany (magisterski). Każdy zestaw zawiera interaktywne treści teoretyczne i modele symulacyjne. Interaktywność materiałów wykładowych polega na tym, że większość rysunków uzupełnionych jest o narzędzia do manipulacji, pozwalające na zmianę np. parametrów rodziny charakterystyk. Ponieważ do ich przygotowania wykorzystano środowisko Mathematica [3], konieczne jest zainstalowanie wtyczki do przeglądarki, umożliwiającej odtwarzanie plików .cdf. Tak opublikowane treści wykładowe z jednej strony ułatwiają prowadzącemu wykład tłumaczenie skomplikowanych zagadnień, z drugiej strony mogą zostać wykorzystane przez słuchaczy do ponownego, samodzielnego przestudiowania materiału z wykładu.



Rys. 1. Strona internetowa projektu ePEDlab

Uzupełnieniem treści teoretycznych są materiały symulacyjne, przygotowane w środowisku GeckoCIRCUITS [4] i opublikowane na stronie internetowej projektu w postaci apletów Javy [5,6]. Zakresy tematyczne modeli pokrywają się z zestawami ćwiczeń przygotowanymi dla studiów inżynierskich i magisterskich. Potencjalne wykorzystanie tych modeli obejmuje kilka możliwości. Przykładowo mogą być one pomocne podczas przygotowywania się do przeprowadzenia ćwiczenia, albo podczas opracowywania sprawozdania z pomiarów. Wyposażenie każdego stanowiska w komputer pozwala

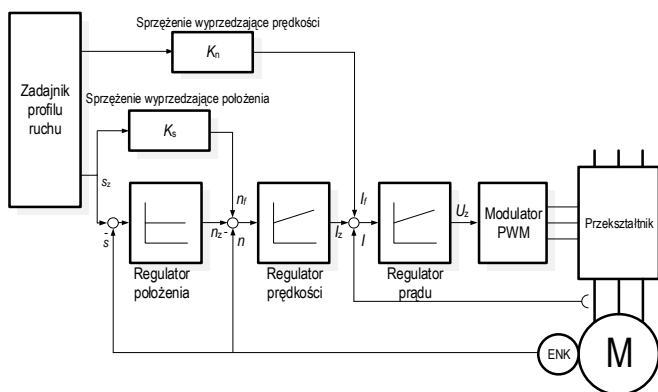
na jednoczesne prowadzenie eksperymentu i symulacji, a następnie interpretację różnic w wynikach pomiarów i obliczeń. Innym praktycznym zastosowaniem jest warunkowe przeprowadzenie ćwiczenia wyłącznie na drodze symulacyjnej, w przypadku usprawiedliwionej nieobecności na zajęciach.

Fizycznym efektem projektu jest wzbogacenie wyposażenia laboratorium o nowy sprzęt komputerowy i stanowiska dydaktyczne, demonstrujące współczesne rozwiązania przemysłowe. Do tej pory w laboratorium korzystano głównie z stanowisk, w których układy sterowania napędami były zaimplementowane w sterownikach mikroprocesorowych przez pracowników laboratorium [7]. Możliwość wizualizacji przebiegów czasowych sygnałów „wewnętrznych” układu sterowania stanowiska pozwalają na łatwiejsze wytłumaczenie i zrozumienie zasady działania napędów przekształtnikowych. Nowe stanowiska, dzięki wykorzystaniu komercyjnych układów napędowych, pozwalają studentom sprawdzić, jak informacje zdobyte na wykładach i laboratorium mogą być wykorzystane w przyszłym miejscu pracy.

2. ZAGADNIENIA STEROWANIA SERWONAPĘDÓW

Serwonapędem nazywa się zamknięty układ regulacji położenia. Taki charakter pracy nakłada na silnik duże wymagania dotyczące dynamiki i precyzji. Stosuje się zatem najbardziej zaawansowane technologicznie rozwiązania – silniki synchroniczne z magnesami trwałymi (PMSM – ang. *Permanent Magnet Synchronous Motor*) sprzężone z czujnikami położenia (np. enkoderami). Poza maszyną w skład serwonapędu wchodzi również mechanizm (np. w postaci przekładni, lub modułu zmieniającego ruch obrotowy na liniowy) oraz przekształtnik zasilający silnik wraz ze sterownikiem ruchu.

W układzie sterowania serwonapędu najczęściej stosuje się strukturę PIV – proporcjonalny regulator położenia nadrzędny wobec proporcjonalno-całkującego regulatora prędkości (rys. 2). Cechą charakterystyczną jest również stosowanie sprzężeń wyprzedzających. Poprawiają one właściwości dynamiczne przez kompensację momentu bezwładności. Dzięki bezpośredniemu wyznaczeniu prędkości zadanej działają szybciej niż klasyczne regulatory reagujące na zmianę w sprzężeniu zwrotnym – prowadzi to do dokładniejszego śledzenia wartości zadanej położenia.



Rys. 2. Schemat blokowy układu sterowania serwonapędem

Z punktu widzenia dydaktyki można wyróżnić kilka zagadnień, odpowiadających składowym serwonapędem.

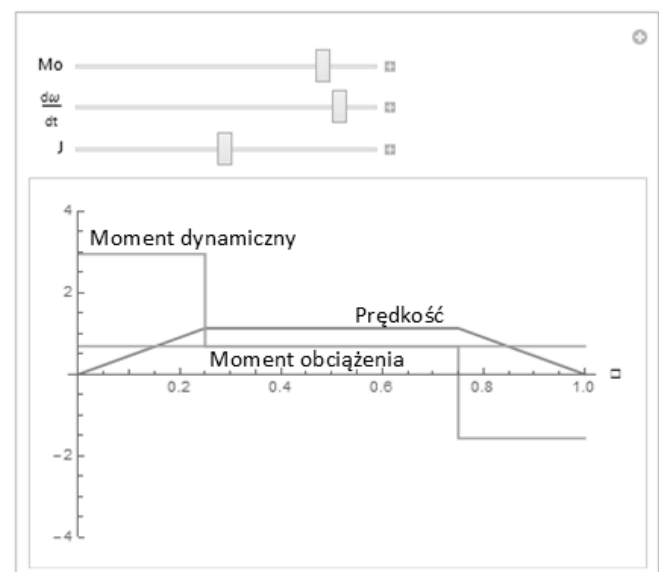
Hierarchicznie najniższą warstwą serwonapędu jest element wykonawczy, a więc silnik z przekładnią. Konieczne jest wyjaśnienie budowy i zasady działania silnika oraz przedstawienie możliwych do zastosowania układów sterowania. Kolejnym zagadnieniem jest dobór parametrów układu regulacji oraz sposób kształtowania profili ruchu. W programie nauczania trzeba również uwzględnić sposoby pomiaru położenia wirnika. W dalszej części artykułu zaprezentowano w jaki sposób opracowane w ramach projektu ePEDlab materiały mogą wspomóc dydaktykę z zakresu zagadnień serwonapędowych.

3. INTERAKTYWNE MATERIAŁY TEORETYCZNE

Pierwszy etap kształcenia stanowią wykłady teoretyczne. Podczas opracowywania założeń do projektu poszukiwano narzędzia odpowiedniego do przygotowania materiałów atrakcyjnych wizualnie i pozwalających użytkownikowi na interakcję. Oprogramowaniem spełniającym założenia, a jednocześnie wykorzystującym matematyczny opis prezentowanych treści, jest Mathematica firmy Wolfram. Umożliwia ono przygotowanie plików w formacie .cdf (ang. *Computational Document Format*). Interaktywność materiałów polega na wprowadzeniu „ożywienia” do tradycyjnych statycznych materiałów wykładowych, np. przez umożliwienie użytkownikowi zmiany parametrów w prezentowanych charakterystykach.

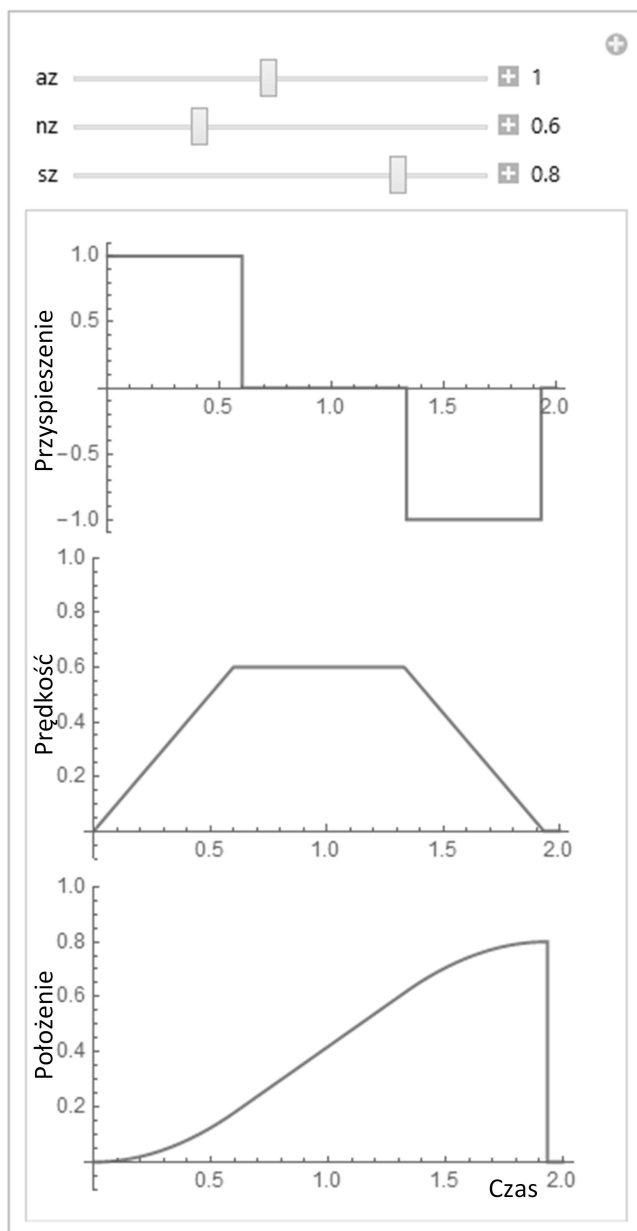
W artykule jako przykład wykorzystania opisywanego narzędzia wybrano część prezentacji dotyczących sterowania serwonapędami. W kursie zawarto animacje dotyczące budowy silnika PMSM, działania regulatorów prądu, prędkości i położenia, a także generowanie profili ruchu, czy sposoby pomiaru bieżącej wartości położenia wału maszyny.

Punktem wyjścia do zrozumienia działania napędu jest równanie ruchu, mówiące o tym, że maszyna musi wytworzyć taki moment, który z jednej strony pozwoli pokonać bezwładność i osiągnąć żądane przyspieszenie, a jednocześnie skompensuje hamujący moment obciążenia. Interaktywny wykres przedstawiony na rysunku 3 pozwala użytkownikowi na sterowanie wartościami przyspieszenia, bezwładności i momentu obciążenia i obserwację przebiegu czasowego całkowitego momentu generowanego przez maszynę.



Rys. 3. Fragment materiałów teoretycznych ilustrujących równanie ruchu

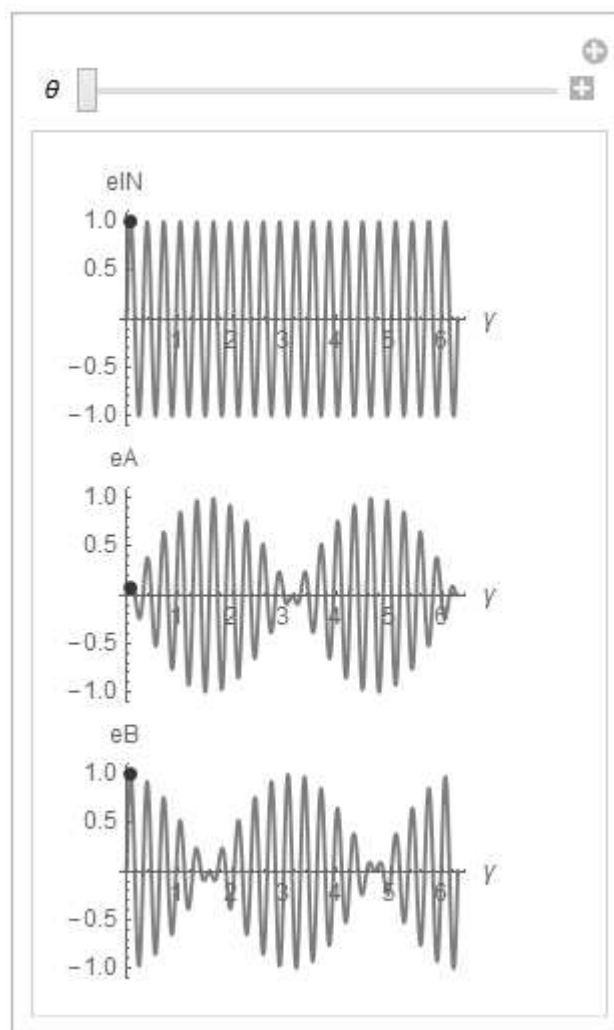
Na rysunku 4 zamieszczono fragment materiałów wykładowych dotyczący parametryzacji profili ruchu. Pojedynczy ruch mechanizmu opisany jest przez zadaną zmianę położenia oraz dopuszczalne: prędkość i przyspieszenie (symetryczne lub niesymetryczne). Komplet informacji stanowi tzw. profil ruchu, a zadaniem generatora profili jest wyznaczenie czasów trwania poszczególnych etapów ruchu: przyspieszania, ruchu ze stałą prędkością i hamowania. Zmieniając trzema suwakami widocznymi w górnej części rysunku 4 parametry profilu można obserwować zmiany w przebiegach czasowych tych wielkości. Możliwe jest sprawdzenie w jaki sposób bezwładność mechanizmu, a więc dopuszczalne przyspieszenie, wpływa na czas osiągnięcia pozycji docelowej.



Rys. 4. Fragment materiałów teoretycznych ilustrujący kształtowanie profili ruchu

Niezbędne w serwonapędach sprzężenie zwrotne od bieżącego położenia może być realizowane na kilka sposobów, zawsze wymagany jest jednak czujnik położenia kąтового wału maszyny. W przedstawieniu zasady działania spotykanych rozwiązań pomocne są również dynamiczne

ilustracje. Na rysunku 5 zamieszczono fragment materiałów prezentujący przebiegi czasowe obserwowane na zaciskach resolwera podczas jego pełnego obrotu.

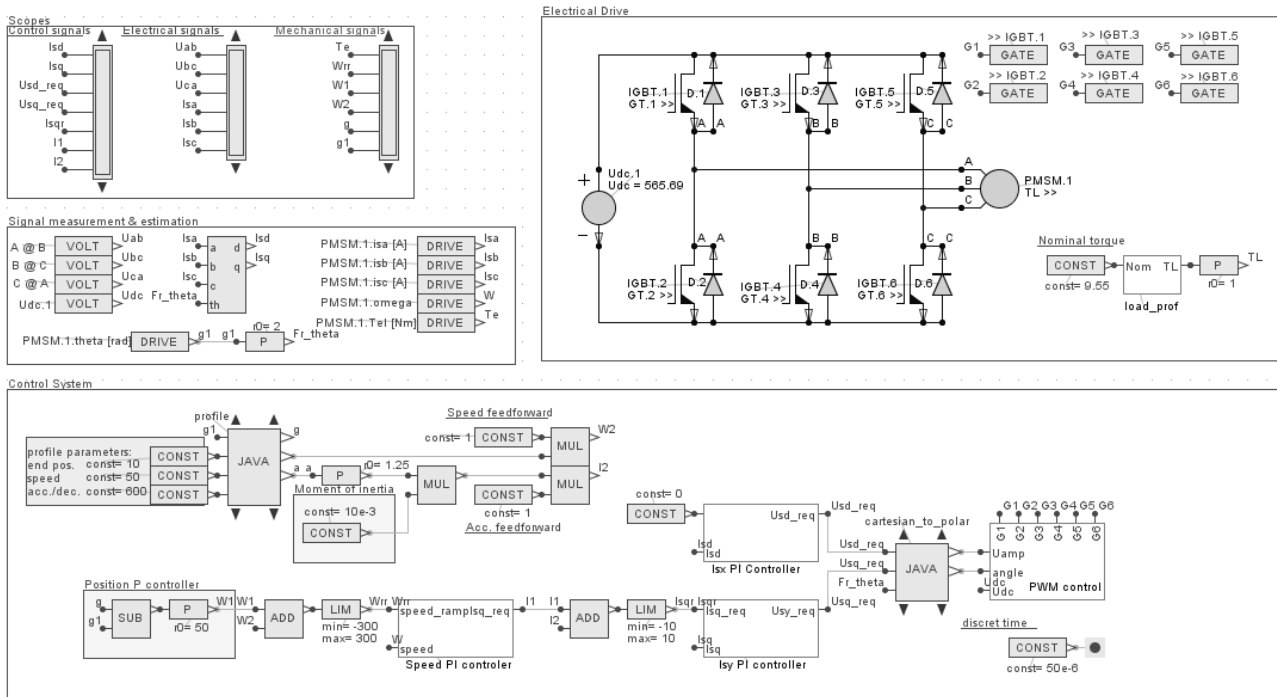


Rys. 5. Fragment materiałów teoretycznych ilustrujący zasadę działania resolwera

4. MODEL SYMULACYJNY

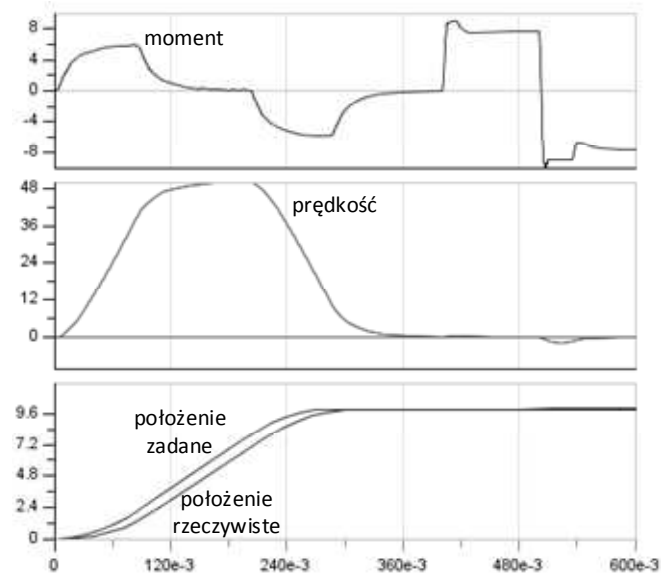
Kolejnym etapem procesu dydaktycznego jest praca z modelami komputerowymi. Do realizacji modeli układów napędowych wykorzystano oprogramowanie GeckoCIRCUITS, które daje możliwość zapisu modelu w postaci tzw. apletu Javy i opublikowanie go np. na stronie internetowej. Istotnym jest, że plik apletu, pomimo niewielkich rozmiarów, zawiera w sobie całe środowisko obliczeniowe i może być uruchomiony na komputerze bez zainstalowanego GeckoCIRCUITS – wystarczy, że użytkownik posiada tzw. Wirtualną Maszynę Javy.

Jednym z opublikowanych plików symulacyjnych jest model komputerowy serwonapędu z silnikiem PMSM (rys. 6). Podobnie jak modele pozostałych układów, również w tym przypadku wyróżniono część silnoprządową (przekształtnik energoelektroniczny i silnik PMSM), część odpowiedzialną za sterowania oraz części gromadzące sygnały i wyświetlające je w postaci przebiegów czasowych. Układ sterowania obejmuje zarówno warstwę wewnętrzną, odpowiedzialną za regulację prądu, prędkości i położenia, jak i warstwę zewnętrzną, stanowiącą zadajnik profili ruchu.

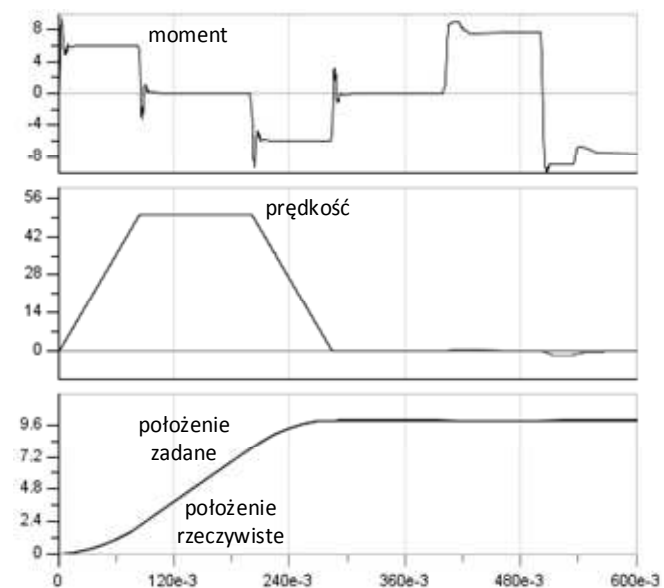


Rys. 6. Ilustracja modelu symulacyjnego serwonapędu

Układ sterowania odpowiada strukturze PIV (rys. 2), obejmuje również sprzężenia wyprzedzające regulatorów prędkości i położenia. Na rysunkach 7-8 przedstawiono przebiegi czasowe momentu, prędkości i położenia (zadanego i rzeczywistego). W pierwszym przypadku (rys. 7) układ sterowania składał się wyłącznie z regulatorów reagujących na sprzężenie zwrotne. W drugim przypadku (rys. 8) włączone zostały sprzężenia wyprzedzające. Zauważalna jest wyraźna poprawa śledzenia przebiegu wartości zadanej położenia.



Rys. 7. Wyniki symulacji - praca bez sprzężeń wyprzedzających

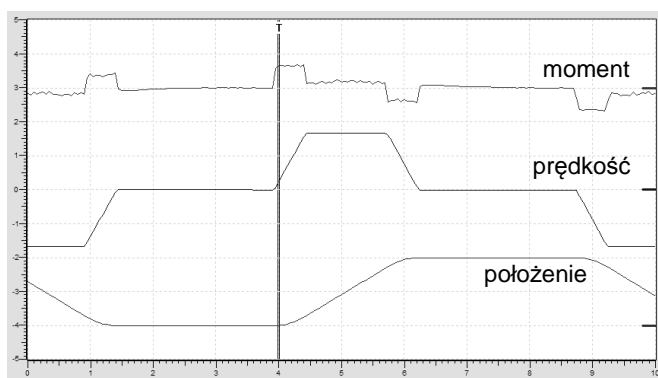


Rys. 8. Wyniki symulacji - praca ze sprzężeniami wyprzedzającymi

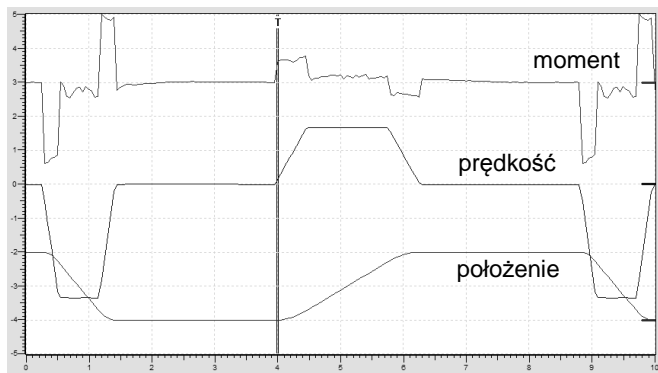
Poza przebiegami czasowymi możliwa jest również prezentacja wykresów wektorowych, obrazujących wzajemne ułożenie wektorów napięcia, strumienia i prądu, co jest często wykorzystywane podczas zajęć laboratoryjnych. Zauważono, że bezpośrednie wskazanie powiązania pomiędzy teorią z wykładu a realizacją praktyczną ułatwia zrozumienie treści i zwiększa zainteresowanie słuchaczy. Wprowadzenie części symulacyjnej zajęć jeszcze lepiej łączy część teoretyczną z praktyczną.

5. ĆWICZENIA LABORATORYJNE

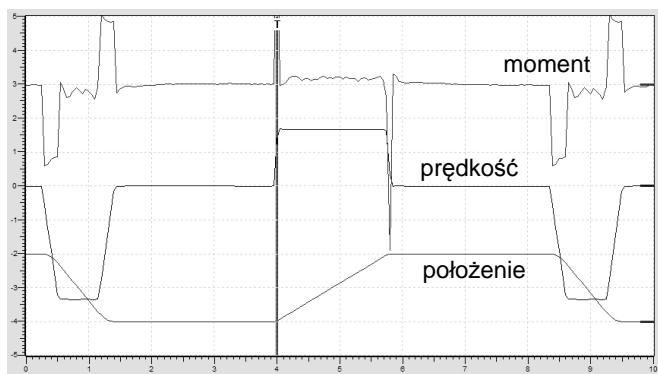
Ostatnim etapem nauczania napędu elektrycznego jest część praktyczna, realizowana w Laboratorium Energoelektronicznych Układów Napędowych. W skład jego wyposażenia wchodzi rozwiązanie serwonapędowe wiodących europejskich producentów techniki napędowej: Lenze i Siemens. Przystąpienie studentów do zajęć laboratoryjnych poprzedzone jest wysłuchaniem wykładu, przestudiowaniem jego wersji elektronicznej, zapoznaniem się z instrukcją laboratoryjną oraz przeprowadzeniem wstępnych badań symulacyjnych przy wykorzystaniu modelu danego ćwiczenia. Jak wspomniano wcześniej, narzędziem zapewniającym dostęp i integrującym ww. materiały dydaktyczne jest platforma ePEDlab. Na zajęciach sprawdzana jest wiedza teoretyczna studentów dotycząca konkretnego ćwiczenia. Zaobserwowano pozytywny wpływ dostępności materiałów interaktywnych na stopień przygotowania studentów do zajęć.



a)



b)

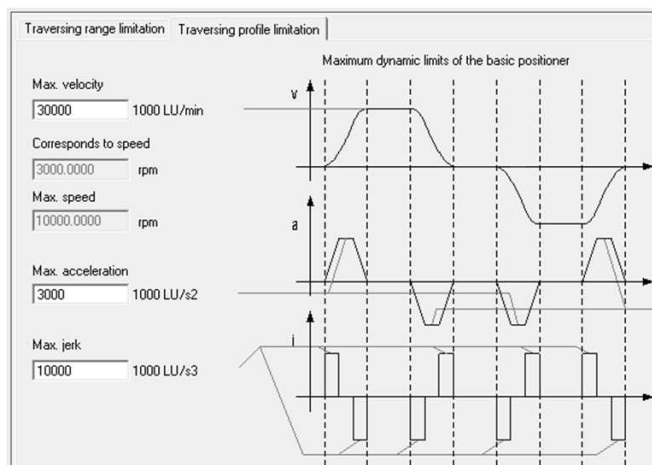


c)

Rys. 9. Przebiegi czasowe charakterystycznych wielkości, wykreślone w oprogramowaniu Lenze Engineer

Podczas zajęć laboratoryjnych dotyczących serwonapędów na kursie inżynierskim zadaniem studentów jest zaprogramowanie napędu pod kątem realizacji konkretnego zestawu ruchów. W tym celu wykorzystywane jest oprogramowanie narzędziowe, w którym parametryzacja profili ruchu i konfiguracja sekwencji ruchów odbywa się w sposób graficzny. Na studiach magisterskich nacisk kładziony jest na samodzielny dobór nastaw układu regulacji prędkości i położenia. Badany jest również wpływ sprzężeń wyprzedzających na dokładność realizacji wartości zadanej położenia.

Na rysunku 9 pokazano przykładowe przebiegi, uzyskane na zajęciach prowadzonych dla studentów studiów inżynierskich. Są to odpowiednio: moment silnika, jego prędkość oraz kąt położenia wału serwonapędu. Rysunek 7a dotyczy sytuacji, w której wykonywany jest naprzemiennie ruch „w prawo” o kąt 360° oraz taki sam ruch w przeciwnym kierunku. Prędkości oraz przyspieszenia w tym przypadku były niewielkie, a zadaniem studentów było zwiększenie dynamiki działania układu. Studenci dokonali zwiększenia wartości przyspieszenia oraz prędkości dla ruchu „w lewo” (rys. 7b), co prowadziło do wytworzenia momentu o większej wartości oraz skrócenia czasu ruchu. Rysunek 7c obrazuje sytuację, w której silnie zwiększone zostało przyspieszenie dla ruchu „w prawo”, skutkiem czego wytwarzany w silniku moment uzyskuje dużo większe wartości, niż w poprzednich przypadkach. Przebieg zajęć polega na samodzielnym kształtowaniu przez studentów parametrów profili ruchu serwonapędu, co wyraźnie wpływa pozytywnie na stopień zrozumienia przez nich zależności występujących pomiędzy momentem, przyspieszeniem, prędkością i położeniem wału silnika. Zależność ta opisana jest przez równanie ruchu, przedstawione w wykładach w formie zależności matematycznych oraz interaktywnego wykresu (rys. 3). Zarówno interaktywny wykres, jak i przebiegi czasowe uzyskane w laboratorium pozwalają na lepsze zrozumienie zagadnienia niż w przypadku korzystania wyłącznie ze wzorów matematycznych, co zostało zaobserwowane w trakcie egzaminowania studentów, przeprowadzanego podczas dyskusji nad sprawozdaniem z ćwiczenia.



Rys. 10. Ustawianie dopuszczalnych prędkości i przyspieszeń w oprogramowaniu Siemens Sinamics Starter

6. WNIOSKI KOŃCOWE

Przedstawiony w artykule sposób wykorzystania narzędzi opracowanych w ramach projektu ePEDlab zwiększa atrakcyjność procesu kształcenia. Nadanie materiałom formy interaktywnej pobudza studentów do samodzielnego korzystania z ich pomocy. Dzięki wzajemnemu uzupełnianiu się materiałów teoretycznych, modeli symulacyjnych i ćwiczeń na stanowiskach laboratoryjnych uzyskuje się kompletny pod względem narzędzi proces kształcenia. Istotna jest również możliwość zaobserwowania, jak informacje zdobyte podczas studiów znajdują odzwierciedlenie w rzeczywistych układach napędowych czołowych producentów. Zgodnie z ideą, na podstawie której realizowany jest opisywany projekt ePEDlab, cały zakres tematyczny nauczania napędu elektrycznego na Wydziale Elektrycznym został uwzględniony w nowych materiałach dydaktycznych. Przedstawione materiały dotyczące serwonapędu są tylko przykładem, w podobny sposób zrealizowane są też zagadnienia sterowania układów z maszynami indukcyjnymi, maszynami prądu stałego, a także silnikami krokowymi [8]. Dzięki uzyskaniu dofinansowania z środków norweskich możliwe było opublikowanie materiałów w sposób otwarty, przez co z narzędzi mogą korzystać również inne uczelnie. Prezentacja projektu na konferencji ma za zadanie przybliżyć możliwości platformy użytkownikom spoza Politechniki Śląskiej. Z myślą o użytkownikach zagranicznych (w tym studentach uczestniczących w wymianach akademickich) opracowano też materiały w języku angielskim.

7. BIBLIOGRAFIA

1. Gierlotka K., Jarek G., Jeleń M., Michalak J.: Wspomaganie nauczania napędu elektrycznego z wykorzystaniem wirtualnej platformy ePEDlab, XII Konferencja SENE, Łódź, 18-20.11.2015.
2. Witryna internetowa <http://kener.elekt.polsl.pl/epedlab/>
3. Witryna internetowa <http://www.wolfram.com/cdf/>.
4. Witryna internetowa <http://www.gecko-simulations.com/>.
5. Drofenik 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.
6. 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.
7. Jarek G., Jeleń M., Michalak J.: Zastosowanie technik szybkiego prototypowania w dydaktyce napędu elektrycznego, Logistyka 6/2014, s. 4846-4853.
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.

ATTRACTIVE AND EFFECTIVE TEACHING SERVO DRIVES BY MEANS OF THE ePEDlab PLATFORM

The article presents the ePEDlab project, which was created in order to improve the quality of education in the field of power electronic drive systems. Its aim is to create a complete tool, consisting of three elements: interactive teaching materials, simulation models and laboratory sets. The course is divided into two parts: basic and advanced level. An integral part of the project is a website <http://kener.elekt.polsl.pl/epedlab> which is used to publish interactive teaching materials and simulation models. The scope of the project also includes the construction of new laboratory sets equipped with industrial power electronics converters, which the listeners of the course (students) can meet in their future careers. The results of the project are used in the teaching process for students of first and second degree at the Faculty of Electrical Engineering, Silesian University of Technology. The article shows the way of using described tool, based on an example concerning control servo drives issues. Teaching proces concerning control systems of different types of machine (eg. squirrel-cage induction motors, DC motors as well as stepper motors) is similar to given example. Due to the complementarity between theoretical materials, simulation models and laboratory exercises, the teaching process is complete.

Keywords: electrical drive, servo drive, didactic.