

Sebastian SZKOLNY

TECHNIKI SZYBKIEGO PROTOTYPOWANIA ELEKTROMECHANICZNYCH PRZETWORNIKÓW ENERGII

STRESZCZENIE *Projektowanie elektromechanicznych przetworników energii elektrycznej obejmuje trzy etapy: analizę teoretyczną, modelowanie i badania symulacyjne oraz implementację i badania w warunkach laboratoryjnych. Współpraca układów mikroprocesorowych z środowiskami programistycznymi umożliwia nie tylko szybsze przejście pomiędzy kolejnymi fazami prowadzonych badań, ale również równoległe ich prowadzenie. W artykule przedstawiono możliwość wykorzystania w tym celu środowiska LabView oraz JMAG. Omówione zostały techniki HIL (ang. Hardware In the Loop) oraz RCP (ang. Rapid Control Prototyping) w zakresie komputerowego wspomaganie projektowania elektromechanicznych przetworników energii elektrycznej.*

Słowa kluczowe: *elektromechaniczne przetworniki energii, LabVIEW*
DOI: 10.5604/01.3001.0009.4815

1. WSTĘP

Rozwój cywilizacji nierozzerwalnie związany jest ze wzrostem zapotrzebowania na energię elektryczną. Obserwuje się rocznie kilkuprocentowy wzrost jej zużycia, co pociąga konieczność rozbudowy systemu elektroenergetycznego o nowe jednostki wytwórcze lub modernizację już istniejących. Jednak mając na uwadze, że krajowa energetyka zawodowa oparta jest głównie na surowcach kopalnych, a ich kurzące się zasoby, wymusza podjęcie dodatkowych działań, które koncentrują się na pozyskiwaniu energii ze źródeł odnawialnych oraz zwiększenia efektywności energetycznej maszyn i urządzeń. Krajowe, jak i międzynarodowe prawodawstwo za swój cel przyjęło wymuszenie na producentach wprowadzania na rynek maszyn i urządzeń, o jak najwyższym stopniu wykorzystania energii elektrycznej. W przypadku napędów elektrycznych dokumentem określającym

dr inż. Sebastian SZKOLNY
e-mail: sebastian.szkolny@zut.edu.pl

Katedra Elektroenergetyki i Napędów Elektrycznych,
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie,
ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin

minimalne wartości sprawności, jakie muszą one spełniać, jest międzynarodowa norma IEC 60034-30. W 2011 roku nowa edycja tej normy wprowadziła kategorię IE4 oraz zasygnalizowała wprowadzenie w przyszłości nowej kategorii IE5. Analizując wymagane wartości sprawności dla kategorii IE4, nasuwa się wniosek, że niewiele typów maszyn może spełnić te wymagania. W przypadku kategorii IE5, która ma zostać wprowadzona wraz z nową edycją normy, zakłada się dodatkowy 20% wzrost sprawności w stosunku do kategorii IE4. Wymogi te wykluczą z tej grupy większość typów maszyn [1].

Od kilku lat producenci systemów napędowych sukcesywnie wprowadzają do swojej oferty układy spełniające wymogi kategorii IE4. Na rynku można spotkać silniki synchroniczne z magnesami trwałymi lub reluktancyjne. Poza silnikami o rozruchu bezpośrednim (wyposażonymi w uzwojenie rozruchowe [2]) pozostałe typy silników wymagają współpracy z przekształtnikami energii. Przykładowo firma ABB oferuje silnik reluktancyjny synchroniczny w pakiecie z przemiennikiem częstotliwości ACS880 spełniający kategorię IE4. Przykład ten wskazuje na trend, jaki obserwuje się obecnie na rynku napędów elektrycznych. Za kilka lat rynek zostanie zdominowany przez napędy przekształtnikowe, gdyż tylko takie układy będą mogły spełnić tak wysokie wymagania. Ten trend wymusza podejścia do projektowania elektromechanicznych przetworników energii elektrycznej jako całości (maszyna elektryczna zasilana z przemiennika częstotliwości), a nie jako dwa oddzielne układy. Mimo, że projekt maszyny elektrycznej i przemiennika częstotliwości wymaga odmiennego podejścia i uwzględnienia innych wymogów, wskazane jest, aby oba zagadnienia przez cały proces projektowania od wstępnych założeń, a skończywszy na badaniach układu były analizowane całościowo, uwzględniając przy tym dynamikę całego układu napędowego [19]. Z drugiej strony na proces projektowania przetworników wpływ mają czynniki ekonomiczne, wymuszające skrócenie czasu opracowania prototypu, jak również ograniczenie kosztów jego przygotowania. Dodatkowo ze względu na złożoność zagadnienia, projekt wymaga zebrania zespołu specjalistów z różnych dziedzin. Czynniki te wymuszają zastosowanie odpowiednich technik i narzędzi do realizacji tego zadania, umożliwiające łatwą wymianę informacji między członkami zespołu.

2. PROJEKTOWANIE ELEKTROMECHANICZNYCH PRZETWORNIKÓW ENERGII – PODEJŚCIE KLASYCZNE

Na przestrzeni ponad stu osiemdziesięciu lat podejście do projektowania maszyn elektrycznych zmieniło się, a wpływ na to miało wiele czynników, do których zaliczyć należy stosowane metody oraz środki, ale również formy prezentacji i oceny wyników [3]. Zakres obliczeń projektowych maszyn elektrycznych obejmuje szereg zagadnień związanych z analizą zjawisk fizycznych, takich jak elektromagnetyczne, ciepłone, wibracyjne i wytrzymałościowe. Niewątpliwie poza wymienionymi czynnikami, na decyzje projektowe mają wpływ czynniki ekonomiczne, w tym cykl życia produktu czy dostępność materiałów.

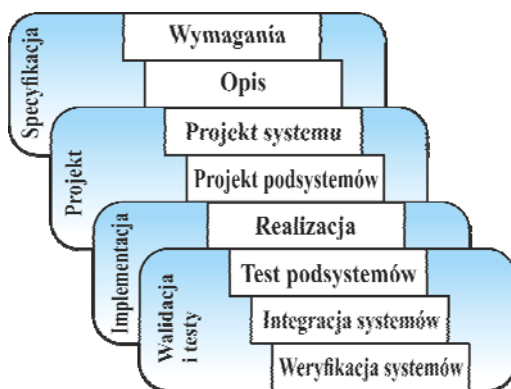
W przypadku analizy zjawisk fizycznych przyjmują one formę matematycznego opisu zagadnienia projektowego. Techniki rozwiązywania tych zagadnień zmieniły się na przestrzeni lat, a wpływ na to miały dostępne środki techniczne. Możemy tu wyróżnić

kilka czynników, które w istotny sposób wpłynęły na rozwój elektromechanicznych przetworników energii. Przede wszystkim należy tu wymienić zastosowanie komputerów, a następnie pojawienie się specjalistycznego oprogramowania (Ansys, Comsol, Flux, JMAG, itp) wykorzystującego metody elementów skończonych. Wprowadzenie tych narzędzi umożliwiło dalszą optymalizację projektowanych konstrukcji maszyn elektrycznych, jednak ze względu na konieczność rozwiązywania coraz większych układów macierzowych, czas obliczeń znacznie się wydłużył. Jednak dzięki temu zwiększyła się dokładności otrzymywanych wyników [4-5].

Współczesne elektromechaniczne przetworniki energii elektrycznej to nie tylko maszyny elektryczne, ale również przemienniki częstotliwości, bez których część typów maszyn nie mogłaby pracować. Pierwsze przemienniki częstotliwości pojawiły się w połowie XX wieku. Jednak impulsem do ich rozwoju było wprowadzenie w latach 80-tych procesorów sygnałowych DSP, a następnie układów FPGA, co spowodowało, że kompetencje zespołu projektowego muszą uwzględniać zagadnienia informatyczne.

Na przestrzeni lat obserwuje się ciągły rozwój konstrukcji przemienników częstotliwości oferowanych na rynku. Producenci przez lata koncentrowali się nad wprowadzaniem nowych metod sterowania maszynami elektrycznymi (FOC, DTC, U/f) oraz poprawą ich efektywności. Jednak w ostatnich latach prace projektowe koncentrują się przede wszystkim na komunikacji przemienników z innymi systemami wykorzystywanymi w przemyśle. Obserwowany trend został pogłębiony za sprawą rządu Niemiec, który w 2011 roku ogłosił projekt strategii zaawansowanych technologii, określony terminem „Industry 4.0”, którego zadaniem jest promowanie komputeryzacji procesów wytwórczych.

Rosnące z roku na rok wymagania klientów w stosunku do elektromechanicznych przetworników energii skupiają się przede wszystkim na ich efektywności energetycznej. Jej motorem są czynniki ekonomiczne, a także możliwości komunikacji z systemami informatycznymi przemienników częstotliwości lub inteligentnych czujników zamontowanych bezpośrednio w maszynie elektrycznej, gdzie wykorzystywana jest koncepcja „Internetu Rzeczy, Usług i Ludzi” (Internet of Things, Services and People, IoTSP). Wszystkie te czynniki, a przede wszystkim konieczność skrócenia czasu od pomysłu do realizacji sprawia, że koniecznością staje się sięgnięcie po nowe narzędzia oraz technologie.



Rys. 1. Tradycyjny proces projektowania

Proces projektowania elektromechanicznych przetworników energii elektrycznej obejmuje kilka etapów: analizę teoretyczną, modelowanie i badania symulacyjne oraz implementację i badania w warunkach laboratoryjnych. Tradycyjne podejście do projektowania przetworników energii ma szereg ograniczeń wynikających z przepływu informacji między kolejnymi etapami (rys. 1.). Po pierwsze przepływ informacji i zarządzanie nimi odbywa się przez środki dokumentacji tekstowej, która ze względu na czynnik ludzki może być obciążona błędami interpretacji. Z drugiej strony wymagania konstrukcyjne elektromechanicznego przetwornika energii mogą być modyfikowane z różnych powodów. Ta zmiana może pociągnąć za sobą opracowanie nowych wymogów i ich weryfikacji, wynikających z kolejnych iteracji projektu. Takie podejście jest nieefektywne i może w istotny sposób wpływać na rozwój projektu. Inne poważne ograniczenie w przypadku projektowania przemienników częstotliwości może wynikać z faktu, że kod algorytmu sterowania tworzony za pomocą edytorów tekstowych jest czasochłonny, jak i podatny na błędy wdrożeniowe. Wreszcie, w tym tradycyjnym „ręcznym” podejściu do projektowania, otrzymanie prototypu na wczesnym etapie rozwoju projektu jest bardzo trudne, a przede wszystkim bardzo kosztowne. W konsekwencji weryfikacja wymagań projektowych oraz błędy są wykrywane późno w cyklu projektowania, co prowadzi do kosztownych opóźnień, a nawet może zagrozić całemu projektowi.

3. PROJEKTOWANIE ELEKTROMECHANICZNYCH PRZETWORNIKÓW ENERGII ZA POMOCĄ MODELI

Wady tradycyjnego podejścia do projektowania elektromechanicznych przetworników energii można wyeliminować, wykorzystując metodę projektowania bazującą na modelach (*ang.* Model-Based Design). W tej metodzie projektowania dokumenty specyfikacyjne można zastąpić modelami matematycznymi projektowanego przetwornika energii. Modele te poprzez kolejne iteracje symulacji umożliwiają dojście do zdefiniowanych wymagań projektowych. W przypadku, gdy wymagane parametry projektu zostały osiągnięte, a następnie zatwierdzone, projektanci mogą automatycznie wygenerować dokumentację projektową, w tym wymiary konstrukcyjne maszyny elektrycznej lub w przypadku przemiennika częstotliwości kod aplikacji sterującej. W przypadku takiego podejścia do projektowania, jego weryfikacja, a następnie walidacja jest prowadzona na wszystkich etapach tworzenia produktu, umożliwiając zidentyfikowanie błędów na wczesnym etapie, kiedy ich naprawienie jest łatwiejsze i mniej kosztowne. Etapy tej metody projektowania wpisują się w kształt litery V (rys. 2).

Główną ideą projektowego cyklu „V”, jest oparcie jego wszystkich etapów projektowania na badaniach symulacyjnych: od symulacji off-linowych prowadzonych w fazie przygotowania koncepcji projektu, a następnie symulacji z wykorzystaniem systemów czasu rzeczywistego (RT) w przypadku projektowania algorytmu sterowania przemienników częstotliwości, aż do testów i walidacji projektowanego przetwornika.

Fazę koncepcyjną projektu elektromechanicznego przetwornika energii dotyczącą konstrukcji projektowanej maszyny można zrealizować w oparciu o oprogramowanie JMAG-Express, będące specjalistycznym oprogramowaniem przeznaczonym do projektowania maszyn elektrycznych, bazującym na równaniach analitycznych oraz

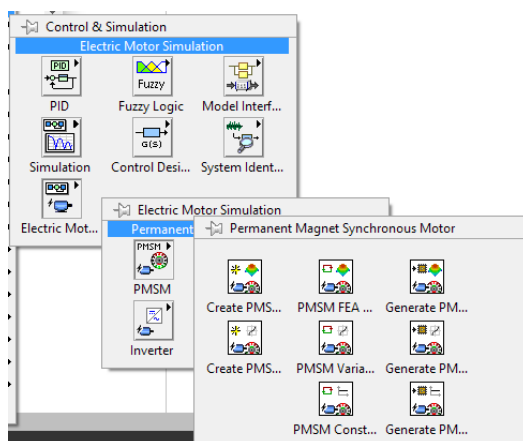
Oprogramowanie JMAG-Express jest aplikacją w pełni zintegrowaną z oprogramowaniem JMAG-Designer. Umożliwia ona wygenerowanie modelu polowego projektowanej maszyny na podstawie danych wygenerowanych przez JMAG-Express. Program umożliwia przygotowanie modelu (2D lub 3D) zawierającego geometrię, dane materiałowe oraz warunki brzegowe uwzględniające występujące w modelu symetrie. Tak przygotowany model umożliwia uruchomienie analizy polowej z wykorzystaniem metody elementów skończonych, a następnie przeprowadzenie dokładniejszej optymalizacji projektowanej konstrukcji. Aplikacja JMAG-Express pozwala również na lepsze poznanie wpływu poszczególnych parametrów na właściwości ruchowe maszyn umożliwiając projektantowi przeprowadzenie tysięcy analiz typu „what if” oraz wybór najlepszego wariantu.

To podejście do projektowania maszyn elektrycznych oraz zaimplementowanych równań analitycznych pozwalają na wyznaczenie parametrów modelu matematycznego projektowanej maszyny. Dzięki tym danym można przejść do kolejnego etapu projektowania elektromechanicznych przetworników energii wykorzystując, w tym celu symulację w systemach czasu rzeczywistego. Koncentrując się tu na opracowaniu algorytmów sterowania, które następnie zostaną zaimplementowane w przemienniku częstotliwości. Oczywiście model ten będzie wstępnym przybliżeniem, gdyż parametry modelu zostają oparte na wstępnych założeniach konstrukcyjnych. Dokładniejsze modele matematyczne projektowanej maszyny otrzymuje się po przeprowadzonych obliczeniach z wykorzystaniem analizy polowej w programie JMAG-Designer, gdzie można wygenerować modele zredukowane (macierzy odpowiedzi układu), a następnie przeprowadzić tzw. co-symulację w programie LabVIEW łącząc części elektromagnetyczną z układem. Sprzężenie JMAG’a z LabVIEW pozwala na połączenie nieliniowej części elektromagnetycznej układu z częścią obwodową umożliwiając projektowanie i analizę [6-7], nie tylko pojedynczych komponentów, ale kompletnych systemów mechatroniki. Dzięki możliwości wygenerowania modeli zredukowanych, wyniki analiz otrzymywane są na tyle szybko, że możliwe jest ich zastosowanie do badań z wykorzystaniem systemów czasu rzeczywistego i ich integrację z układem sterowania.

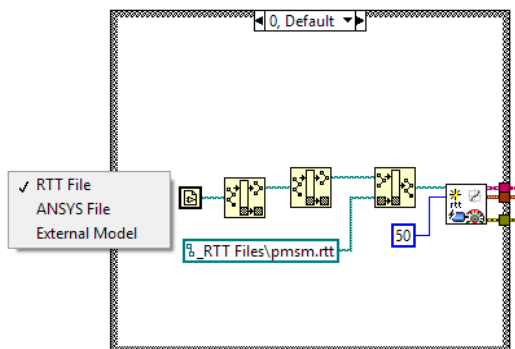


Rys. 4. Modułowy system pomiarowy oparty na platformie PXI firmy National Instruments

Takie podejście do projektowania algorytmów sterowania przemienników częstotliwości, a mianowicie symulowanie działania maszyny elektrycznej w środowisku czasu rzeczywistego wraz z częścią układu zasilania w postaci obwodów mocy tego przemiennika, wykorzystuje tutaj technikę określaną szybkim prototypowaniem sterowników (Rapid Control Prototyping – RCP). Wymaga to zastosowania bardzo wydajnego procesora, który gwarantuje wysokie osiągi w systemach wieloprocesorowych oraz szybki dostęp do urządzeń wejścia/wyjścia opartych na układach FPGA. Wejścia i wyjścia służą do połączenia środowiska symulowanego z rzeczywistym mikrokontrolerem, który zostanie zastosowany w projektowanym przemienniku częstotliwości. Na rynku dostępnych jest kilka systemów, które spełniają tak wysokie wymagania. Zalicza się do nich m.in. platforma PXI firmy National Instruments (rys. 4) czy układy firmy OPAL-RT Technologies. Oczywiście, żeby można było mówić o szybkim prototypowaniu, platforma sprzętowa została wsparta dedykowanym dla elektromechanicznych przetworników energii zestawem narzędzi NI Electric Motor Simulation Toolkit rozszerzających funkcjonalność programów LabVIEW (rys. 5) oraz Veristand.

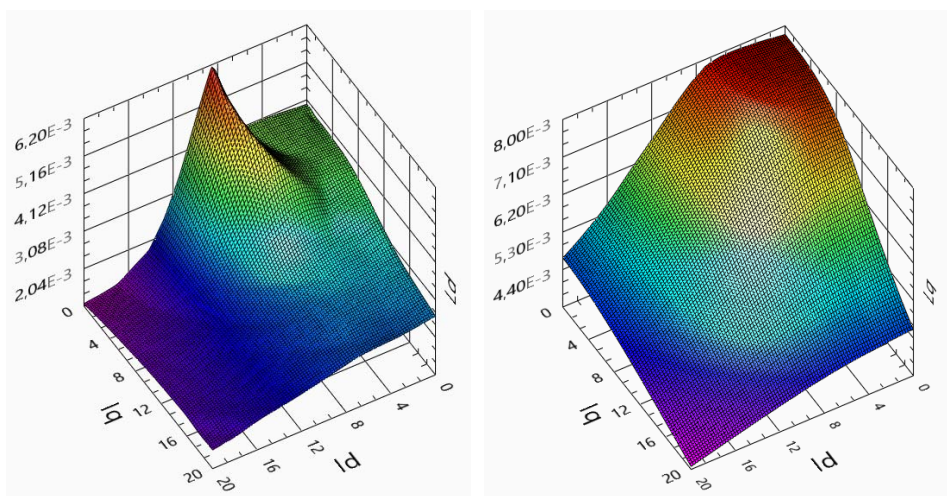


Rys. 5. Paleta narzędzi NI Electric Motor Simulation Toolkit

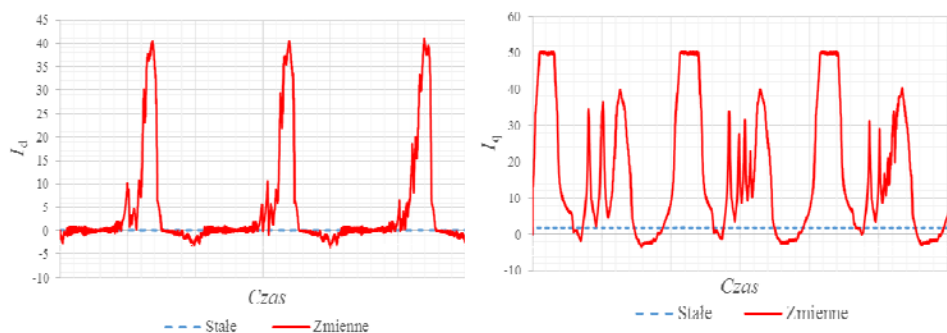


Rys. 6. Fragment kodu odpowiedzialny za wybór parametrów modelu matematycznego maszyny PMSM

Istotną zaletą tego zestawu narzędzi jest możliwość wykorzystania parametrów wyznaczonych przez programy JMAG (Express i Designer), a następnie zapisanych przez moduł JMAG-RT do pliku z rozszerzeniem RTT (rys. 6). Pliki te zawierają parametry modelu matematycznego, których wartości parametrów indukcyjnych mogą być stałe lub zmienne uzależnione od składowych wektora prądu I_d oraz I_q (rys. 7). Dzięki wykorzystaniu modeli matematycznych maszyn o zmiennych wartościach parametrów indukcyjnych możemy przeprowadzać obliczenia uwzględniające specyfikę danej konstrukcji elektromechanicznego przemiennika energii, przede wszystkim wpływając na dokładność odzwierciedlenia zjawisk występujących w projektowanym typie maszyny w środowisku wirtualnym. Przykładowe przebiegi czasowe składowych prądu I_d oraz I_q dla stałych i zmiennych wartości parametrów indukcyjnych maszyny PMSM przedstawiono na rysunku 8.



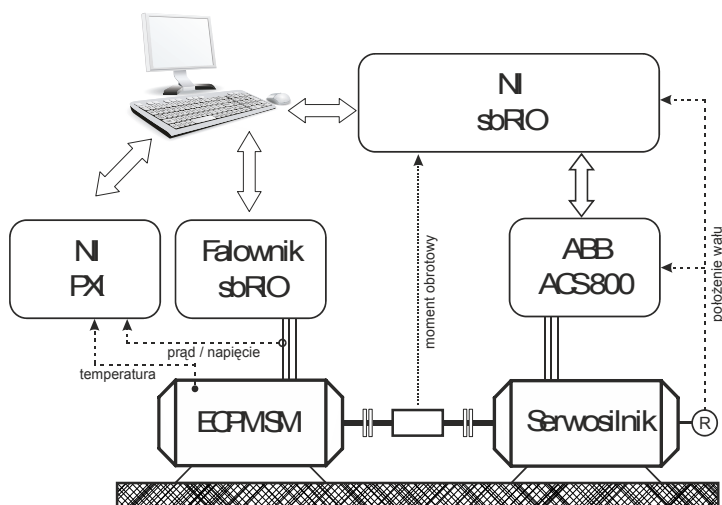
Rys. 7. Przebieg zmian wartości indukcyjności L_d oraz L_q dla różnych wartości składowych prądu I_d oraz I_q



Rys. 8. Przebieg zmian wartości składowych prądu I_d oraz I_q dla stałych oraz zmiennych wartości indukcyjności

Obliczenia symulacyjne przekształtników energii za pomocą NI Electric Motor Simulation Toolkit mogą odbywać się nie tylko na podstawie wyeksportowanych danych z programu JMAG, ale również dane te można importować z oprogramowania firmy ANSYS (rys. 6). Możliwe jest również przygotowanie własnego zestawu parametrów zidentyfikowanych na prototypie maszyny [8-10].

Po zakończeniu etapu projektu i budowy prototypu elektromechanicznego przetwornika energii następuje kolejny etap, a mianowicie testy i walidacja. Na tym etapie realizacji projektu wskazane jest, by testy odbywały się w możliwie rzeczywistych warunkach, zbliżonych do tych w jakich będzie pracował projektowany układ. W większości przypadków takie warunki nie są możliwe do uzyskania podczas badań laboratoryjnych. Pewne odzwierciedlenie rzeczywistych warunków można osiągnąć za pomocą metod symulacji HIL (ang. Hardware-in-the Loop) [11-13]. Istotą systemów symulacji HIL jest zastępowanie rzeczywistych urządzeń platformą symulacyjną wyposażoną w interfejs umożliwiający połączenie symulatora z innymi rzeczywistymi urządzeniami. W tym przypadku układem symulowanym jest maszyna robocza wraz z układami sterowania, a elementem łączącym platformę symulacyjną z rzeczywistym elektromechanicznym przetwornikiem energii jest stanowisko dynamometryczne (rys. 9) kontrolowane przez procesor charakteryzujący się wysokimi osiąganiami oraz szybkim dostępem do układów wejścia i wyjścia [14-17]. Wartości momentu i prędkości obrotowej na wale testowanego elektromechanicznego przetwornika są kontrolowane przez platformę symulacyjną pracującą pod kontrolą systemu czasu rzeczywistego. Symulowany proces wymaga opisanego odpowiednimi modelami matematycznymi uwzględniającymi dynamikę jego poszczególnych elementów. Zaletą symulacji typu HIL jest niewątpliwie szybkość, z jaką można projektować, rozwijać i testować aplikacje dla istniejących już układów, bez ponoszenia dodatkowych kosztów związanych z wykonaniem fizycznego obiektu lub wykorzystaniem gotowych, często bardzo kosztownych maszyn roboczych.



Rys. 9. Przykładowy schemat stanowiska dynamometrycznego

Integracja i testowanie to ostatni z etapów tworzenia prototypu lub produktu końcowego elektromechanicznego przetwornika energii. Na tym etapie projektowania, dzięki zastosowaniu techniki projektowania HIL, za pomocą kolejnych testów możliwa jest weryfikacja założeń projektowych oraz eliminacja błędów niewykrytych lub powstałych na wcześniejszych etapach. Konsekwencją tego jest zredukowanie kosztów oraz czasu potrzebnego na realizację projektu. Metoda symulacji HIL umożliwia prowadzenie realistycznych testów, a przede wszystkim ich powtarzalność.

4. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono podejście do projektowania elektromechanicznych przetworników energii za pomocą modeli (Model-Based Design) oraz przedstawiono narzędzia, które można zastosować do tej koncepcji projektowania. Omówiono dwie techniki symulacji RCP oraz HIL. Pierwsza z nich (RCP) dotyczy etapu projektowania elektromechanicznego przetwornika energii, podczas którego zagadnienia projektowe dotyczące maszyny oraz zasilającego ją przemiennika częstotliwości mogą być prowadzone równolegle. Podczas każdego kroku optymalizacji konstrukcji projektowanej maszyny, możliwe jest wygenerowanie pliku z parametrami modelu matematycznego i wykorzystanie go do symulacji obwodowych, kładąc nacisk na algorytmy sterowania przemiennika częstotliwości oraz jego funkcjonalność. Przekazywanie pliku może odbywać w sposób automatyczny dzięki wykorzystaniu centralnego repozytorium przechowującego dane projektowe. Druga z opisanych metod symulacji (HIL) koncentruje się na testowaniu zaprojektowanego układu oraz jego weryfikacji z założeniami projektowymi. Artykuł opisuje tylko mały fragment omawianego zagadnienia dotyczącego projektowania maszyny elektrycznej oraz algorytmów sterowania przemiennika częstotliwości.

LITERATURA

1. Herbst A.: IE4 and IE5 efficiency norms – synchronous motors with permanent magnets. Zeszyty problemowe – Maszyny Elektryczne, nr 100, cz. I, str. 39-43, 2013.
2. Chrisanov V.I., Szkolny S.: Study of Line Start up Performances of Permanent Magnet Synchronous Machines. Proceedings of the PELINCEC International Conference, CD ROM, Warsaw, 2005.
3. Dąbrowski M.: Zarys rozwoju projektowania maszyn elektrycznych. Prace Instytutu Elektrotechniki, zeszyt 217, str. 5-38, Warszawa, 2003.
4. May H., Pałka R., Paplicki P., Szkolny S., Candors W.R.: Modified concept of permanent magnet excited synchronous machines with improved high-speed features. Archives of Electrical Engineering 60 (4), str. 531-540, 2011.
5. May H., Pałka R., Paplicki P., Szkolny S.: Comparative research of different structures of a permanent-magnet excited synchronous machine for electric vehicles. Przegląd Elektrotechniczny 88 (12 a), str. 53-55, 2012.
6. Małyżko O., Pałka P., Szkolny S.: Analiza stanów dynamicznych maszyny elektrycznej z regulacją strumienia magnesów trwałych do napędu samochodów. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, nr 66, str. 134-139, Wrocław, 2012.

7. Małyszko O., Pałka P., Szkolny S.: Analiza nietypowych zjawisk w maszynie elektrycznej z regulacją strumienia magnesów trwałych do napędu samochodów. *Przegląd Elektrotechniczny*, 11/2013, str. 159-162, 2013.
8. Szkolny S.: Identyfikacja parametrów, modelowanie i analiza stanów pracy silnika tarczowego wzbudzanego wysokoenergetycznymi magnesami trwałymi. Politechnika Szczecińska, Rozprawa doktorska, Szczecin, 2007.
9. Canders W.R., May H., Pałka P., Paplicki P., Szkolny S.: Model obwodowy maszyny elektrycznej z regulacją strumienia magnesów trwałych do napędu samochodów. *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej*, nr 66, str. 140-145, Wrocław, 2012.
10. Szkolny S., Jakubowski T.: Identyfikacja parametrów modelu matematycznego maszyny elektrycznej z regulacją strumienia magnesów trwałych. *Maszyny Elektryczne: zeszyty problemowe*, Nr 108, str. 15-20, 2015.
11. Abourida S., Dufour Ch., Bélanger J.: Real-Time and Hardware-In-The-Loop Simulation of Electric Drives and Power Electronics: Process, problems and solutions. *The 2005 International Power Electronics Conference*, str. 1908-1913.
12. Dufour Ch., Lapointe V., Bélanger J., Abourida S.: Hardware-in-the-Loop Closed-Loop Experiments with an FPGA-based Permanent Magnet Synchronous Motor Drive System and a Rapidly Prototyped Controller. *2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, str. 2152-2158.
13. Bouscayrol A.: Different types of Hardware-In-the-Loop simulation for electric drives. *2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, str. 2163-5137.
14. Pałka R., Szkolny S.: Stanowisko do badania napędów elektrycznych z komputerowym systemem pomiarowym. *Maszyny Elektryczne: zeszyty problemowe*, Nr 3(100), cz. 1, str. 83-88, 2013.
15. Pałka R., Szkolny S., Jakubowski T.: Stanowisko do badania maszyn i napędów elektrycznych bazujące na platformie LABVIEW. *Maszyny Elektryczne: zeszyty problemowe*, nr 103, str. 263-267, 2015.
16. Szkolny S., Małyszko O.: Symulator typu Hardware-In-The-Loop do testowania generatorów turbin wiatrowych. *Maszyny Elektryczne: zeszyty problemowe*, nr 103, str. 269-274, 2014.
17. Szkolny S., Małyszko O.: Hardware-In-The-Loop simulator for testing wind turbine generators. *Czasopismo Techniczne, Elektrotechnika Zeszyt 1-E (8)*, str. 229-239, 2015
18. Szkolny S.: Zastosowanie technik szybkiego prototypowania w projektowaniu i badaniu elektromechanicznych przetworników energii. *LII Międzynarodowe Sympozjum Maszyn Elektrycznych, SME, Kazimierz Dolny*, str. 479-488, 2016.
19. Małyszko O., Szkolny S.: Badanie nietypowych zjawisk dynamicznych w maszynach synchronicznych z magnesami trwałymi. *LII Międzynarodowe Sympozjum Maszyn Elektrycznych, SME, Kazimierz Dolny*, str. 205-214, 2016.

DESIGN OF ELECTROMECHANICAL ENERGY
TRANSDUCERS BASED ON RAPID PROTOTYPING
TECHNIQUES

Sebastian SZKOLNY

ABSTRACT *The process of designing of an electromechanical transducer consists of three phases: the theoretical analysis, research (modelling and simulation), and the implementation and testing in the laboratory. Computer technologies allow the quick transition between subsequent phases of research, but also their parallel running. This paper presents the possibility of using LabView and JMAG for this purpose. The techniques: Hardware in the Loop (HIL) and Rapid Control Prototyping (RCP) in the field of computer-aided design of electromechanical transducers have been described.*

Keywords: *electromechanical transducers, design, LabVIEW*