

**Ryszard Pałka, Sebastian Szkolny**  
**Katedra Elektroenergetyki i Napędów Elektrycznych,**  
**Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie**

## **STANOWISKO DO BADANIA NAPĘDÓW ELEKTRYCZNYCH Z KOMPUTEROWYM SYSTEMEM POMIAROWYM**

### **THE TEST STAND FOR TESTING OF ELECTRIC DRIVES WITH COMPUTER MEASURING SYSTEM**

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono problematykę badań silnika elektrycznego z regulacją strumienia magnesów trwałych do napędu samochodów. Celem realizowanego projektu, oprócz analizy teoretycznej i budowy silnika, jest przeprowadzenie kompleksowych badań prototypu. W założeniach maszyna ta powinna charakteryzować się wysoką sprawnością w całym zakresie prędkości obrotowych i obciążeń, a jednocześnie powinna posiadać duży moment rozruchowy i zdolność łatwej regulacji prędkości obrotowej do wartości 10000 obrotów/min. Przebadanie prototypu maszyny o tak zdefiniowanych wymaganiach wymaga zastosowania odpowiedniej aparatury. Z tych względów zbudowano od podstaw nowe stanowisko badawcze z komputerowym systemem pomiarowym, w którym zastosowano, jako jednostkę napędową, wysokoobrotowy silnik asynchroniczny kontrolowany przez regeneracyjny przemiennik częstotliwości ze sterowaniem DTC firmy ABB. Sterowanie pracą stanowiska oparte zostało na kontrolerze sb-RIO, a za akwizycję danych pomiarowych odpowiada modułowy układ PXI – oba układy firmy National Instruments. W pracy przedstawiono wszystkie składniki tego stanowiska i omówiono ich działanie.

**Abstract:** The paper deals with the project of an electric motor with permanent magnets flux control for cars. One of the aims of this project is to test the prototype machine. According to the assumptions, this machine should have a high efficiency throughout the motor speed range and load. At the same time it should have a high starting torque and the ability to easy control of the speed of nearly 10,000 rpm. Testing of the prototype machine with such requirements means considerable demands on the test equipment. For these reasons, it was decided to build a new test stand with computer measuring system and high speed asynchronous motor fed regenerative inverter. The control of the test stand is based on the sb-RIO controller, and for measurement data acquisition system shall be responsible PXI modular systems both from National Instruments. All components of the test stand and their functions have also been described.

**Słowa kluczowe:** *napędy elektryczne, stanowisko badawcze*  
**Keywords:** *electrical drives, test stand*

### **1. Wstęp**

Jednym z projektów badawczych prowadzonych przez Katedrę Elektroenergetyki i Napędów Elektrycznych, Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie jest budowa silnika elektrycznego z regulacją strumienia magnesów trwałych do napędu samochodów. Celem tego zadania, oprócz analizy teoretycznej i budowy silnika, jest przeprowadzenie kompleksowych badań prototypu w różnych stanach pracy. Z tego powodu konieczne jest dysponowanie odpowiednim stanowiskiem, które pozwoliłoby na przeprowadzenie badań w warunkach, które w jak najlepszy sposób będą odzwierciedlały rzeczywiste warunki pracy maszyny. W szczególności dotyczy to możli-

wości obciążenia wału badanej maszyny w szerokim zakresie zmian prędkości obrotowej, jak również sposobu kształtowania samego momentu obrotowego.

Stosowane od dziesięcioleci układy stanowisk dynamometrycznych: ciernych, wiroprowadznych, hydraulicznych czy najczęściej spotykanych elektromaszynowych oferują obciążenie statyczne, które nie odzwierciedlają dynamicznych zmian momentu obciążenia. Jest to wystarczające do wyznaczenia parametrów, takich jak sprawność układu napędowego, jego maksymalna moc czy moment obrotowy, jak również do wyznaczenia charakterystyk termicznych. Jednak w przypadku badania przekształtników kontrolujących pracę silnika zmiany momentu dynamicznego mogą mieć istotne znaczenie [2].

Zgodnie z zależnością (1):

$$(J_E + J_L) \cdot \dot{\omega} + (f_E + f_L) \cdot \omega = T_E - T_L \quad (1)$$

gdzie:  $J_E$  – moment bezwładności silnika,  
 $J_L$  – moment bezwładności obciążenia,  
 $f_E$  – współczynnik tarcia silnika,  
 $f_L$  – współczynnik tarcia obciążenia,  
 $T_E$  – moment obrotowy silnika,  
 $T_L$  – moment obciążenia

każda zmiana prędkości obrotowej wywołana celowo lub poprzez zakłócenia powoduje powstanie momentu dynamicznego, którego wartość i kierunek uzależnione są od zmiany wartości prędkości obrotowej, ale również od zmiany momentu bezwładności. Znacznie komplikują się badania, w których należy uwzględnić przypadek połączenia mechanicznego badanej maszyny poprzez elementy giętkie, lub takie, w których mogą występować luzy [8]. Równanie (2) opisuje dynamikę układu napędowego w przypadku połączenia maszyny badanej z obciążeniem poprzez elementy sprężyste (np. długi wał) [7]:

$$\begin{aligned} J_E \cdot \ddot{\theta}_E + f_E \cdot \dot{\theta}_E + k \cdot (\theta_E - \theta_L) &= T_E \\ J_L \cdot \ddot{\theta}_L + f_L \cdot \dot{\theta}_L + k \cdot (\theta_L - \theta_E) &= T_L \end{aligned} \quad (2)$$

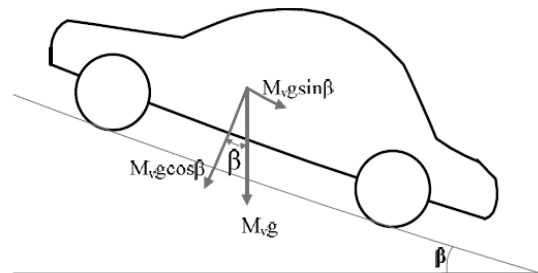
gdzie:  $\theta_E$  – kąt położenia wirnika maszyny badanej,  
 $\theta_L$  – kąt położenia wirnika obciążenia,  
 $k$  – współczynnik sprężystości.

Stanowisko o takich właściwościach, tj. kształtujące nie tylko moment statyczny, ale również dynamiczny wymaga ciągłego kontrolowania prędkości obrotowej. Jednak w przypadku symulowania połączeń sprężystych konieczny jest pomiar położenia wirnika (2). Realizacja takiego stanowiska wymaga zastosowania układu sterowania, który w czasie rzeczywistym będzie rozwiązywał odpowiednie równania różniczkowe. W obecnych czasach z takimi układami nie ma większego problemu. W zasadzie można pójść o krok dalej i pokusić się o kształtowania obciążenia zbliżone do warunków rzeczywistych [3,4,5], np. podczas badania silnika przeznaczonego do napędu samochodu uwzględnić: masę pojazdu, prędkość czy nachylenie toru jazdy. Przykładową zależność opisująca charakterystykę obciążenia silnika napędzającego samochód przedstawia wzór [6]:

$$F_L = M_V \cdot a + \frac{1}{2} \rho C_d A v^2 + C_r M_V g + M_V g \sin \beta \quad (3)$$

$$T_L = \frac{F_L \cdot r}{i \cdot \eta} \quad (4)$$

gdzie:  $M_V$  – masa pojazdu,  $a$  – przyspieszenie pojazdu,  $\rho$  – gęstość powietrza,  $C_d$  - współczynnik oporu aerodynamicznego,  $A$  - powierzchnia czołowa pojazdu,  $v$  – prędkość pojazdu,  $C_r$  – współczynnik oporu toczenia,  $\beta$  – nachylenie drogi,  $r$  – promień kół,  $i$  – przekładnia mechaniczna,  $\eta$  – sprawność układu przeniesienia napędu.



Rys.1 Rozkład sił działających na samochód [6]

By uzyskać uniwersalność stanowiska dynamometrycznego, oprócz samego kształtowania obciążenia momentem maszyny badanej w reżimie silnikowym, konieczne jest przeprowadzenie podobnych badań w reżimie generatorowym. Wymusza to zastosowanie takich układów, które pozwalają na przepływ mocy w obu kierunkach, tzn. stanowisko dynamometryczne powinno generować moment hamujący, ale również moment napędzający. Jednym z możliwych rozwiązań tego problemu jest zastosowanie maszyny elektrycznej zasilanej z przekształtnika energii z możliwością jej zwrotu do sieci.

## 2. Układ napędowy stanowiska

Tak wysoko zdefiniowane parametry budowy stanowiska badawczego, które oprócz kształtowania statycznych momentów na wał badanej maszyny, będzie generowało moment dynamiczny, a charakterystyki statyczne będą odzwierciedlały rzeczywisty moment obrotowy obciążający badaną maszynę, wymaga zastosowania odpowiednich komponentów. Niewątpliwie najważniejszymi z nich, stanowiący serce tego stanowiska, jest silnik, który będzie kształtował moment hamujący lub napędzający badaną maszynę oraz przekształtnik, którego zadaniem będzie kontrola

pracy tego silnika na podstawie sygnałów zadawanych przez układ pomiarowo-kontrolny. Autorzy przeanalizowali wiele rozwiązań technicznych, jednak ze względu na fakt, że większość z nich nie spełniała wymagań, skoncentrowano się na dwóch rozwiązaniach. Pierwsze to zastosowanie maszyny obcowzbudnej zasilanej z przekształtnika mocy, drugie to silnik asynchroniczny zasilany z regeneracyjnego przemiennika częstotliwości [1]. W tym przypadku, jako wariantowe rozwiązanie wzięto pod uwagę zastosowanie wysokoobrotowego silnika asynchronicznego. W tabeli 1 zestawiono dane analizowanych maszyn oferowanych przez firmę ABB.

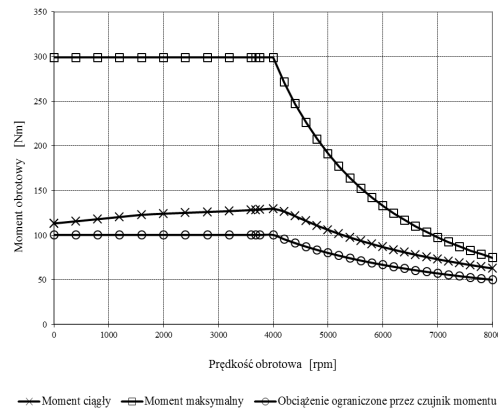
Tabela 1. Porównanie wariantów maszyn elektrycznych do zastosowania na stanowisku badawczym

Typ	$P_N$	$n_N$	$n_{max}$	$T_N$	$J$
	[kW]	[rpm]	[rpm]	[Nm]	[kgm <sup>2</sup> ]
<b>A</b>	55,0	2964	3600	177	0,281
<b>B</b>	54,4	<b>4000</b>	<b>8000</b>	130	<b>0,150</b>
<b>C</b>	56,4	2640	3500	<b>204</b>	0,240

gdzie: **A** – silnik asynchroniczny typ M2AA 250 SMA;  
**B** – wysokoobrotowy silnik asynchroniczny typ CM-5-7; **C** – silnik obcowzbudny prądu stałego typ FR 156 601-EB.

Celem projektu badawczego jest budowa wysokoobrotowej maszyny przeznaczonej do napędu samochodu. Przeprowadzenie kompleksowych badań (w reżimie generatorowym i silnikowym) takiej maszyny wymaga stanowiska, na którym możliwe będzie osiągnięcie prędkości obrotowych założonych na etapie projektowania silnika. Wysokie prędkości obrotowe można uzyskać wykorzystując standardowy silnik połączony z przekładnią mechaniczną, podnoszącą prędkość obrotową do wymaganej wartości, jednak takie rozwiązanie posiada kilka istotnych wad. Przekładnie mechaniczne wprowadzają dodatkowe straty oraz momenty bezwładności, a luzy występujące w nich mogą powodować, że kształtowanie momentów dynamicznych może być niemożliwe do zrealizowania. Z tych powodów obszar poszukiwań silnika ograniczył się do konstrukcji wysokoobrotowych. Ostatecznie zdecydowano się na zastosowanie wysokoobrotowego silnika asynchronicznego typ CM-5-7 firmy ABB. Silnik ten pozwala na uzyskanie prędkości

obrotowej do 4000 obr/min przy charakterystyce stało-momentowej, z możliwością podniesienia prędkości nawet do 8000 obr/min (rys. 2). Dodatkowo zaletą tego silnika jest około 40 % mniejsza wartość momentu bezwładności w stosunku do silników standardowych (tab. 1).



Rys. 2 Charakterystyki mechaniczne napędu zastosowanego do budowy stanowiska dynamometrycznego

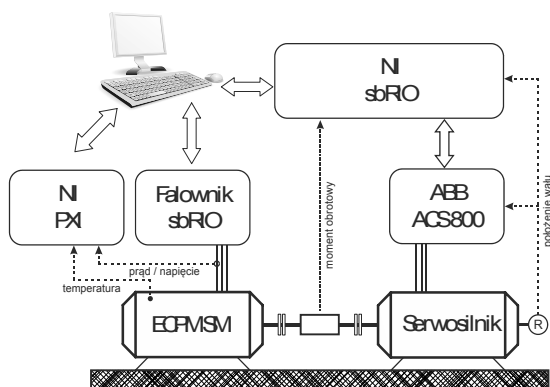
Kolejnym elementem składowym stanowiska badawczego jest układ umożliwiający kształtowanie momentów na wale badanej maszyny, od którego wymaga się precyzyjnego sterowania oraz szybkiej odpowiedzi na zapotrzebowanie momentu obrotowego. Dodatkowo ze względu na planowane przeprowadzenie badań projektowanej maszyny w reżimie silnikowym, jak i generatorowym, od układu wymaga się kontroli momentu obrotowego we wszystkich czterech kwadrantach charakterystyki mechanicznej. Biorąc pod uwagę powyższe wymagania zdecydowano się na zastosowanie regeneracyjnego przemiennika częstotliwości z bezpośrednią kontrolą momentu (DTC) ACS 800 firmy ABB. Na wybór tego falownika wpłynęło doświadczenie producenta w zakresie napędów z bezpośrednią kontrolą momentu, ale przede wszystkim dokładność regulacji momentu obrotowego.

Rysunek 2 przedstawia charakterystykę mechaniczną silnika kształtowaną przez regeneracyjny przemiennik częstotliwości. Wartość momentu możliwa do uzyskania na wale tego silnika została ograniczona przez zastosowany czujnik momentu, którego nominalna wartość wynosi 100 Nm i tę wartość można utrzymać aż do 5200 obr/min. Przy zwiększeniu prędkości do wartości

maksymalnej, czyli 8000 obr/min, wartość momentu maleje do 62 Nm. Zważywszy na wartość momentu osiąganą przez budowaną maszynę, wartość ta jest wystarczająca.

### 3. Sterowanie stanowiskiem dynamometrycznym

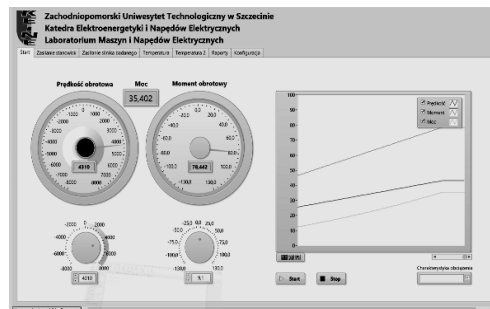
Jedną z funkcjonalności stanowiska dynamometrycznego jest symulowanie momentu statycznego maszyn, ale również momentów dynamicznych, co wymaga zastosowania nadrzędnego układu sterowania. Zadaniem tego układu jest wyznaczanie wartości momentu zadanego falownika, wykorzystując do tego wielkości mechaniczne i elektryczne pomierzone na stanowisku dynamometrycznym (rys. 3). Pomiar momentu obrotowego realizowany jest przez czujnik momentu DataFlex 32/100, którego duża dokładność pozwoli na dodatkowe zwiększenie dokładności jego regulacji.



Rys.3 Schemat stanowiska dynamometrycznego

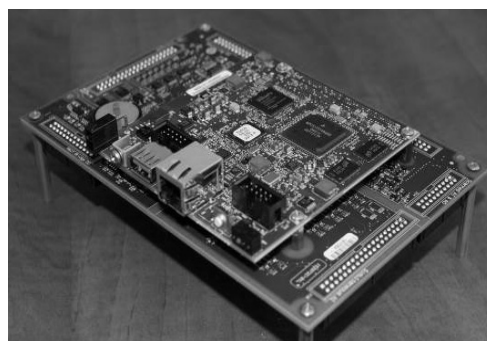
Przetwarzanie danych pomiarowych na sygnał zadawania momentu za pomocą algorytmu symulującego dany typ obciążenia wymaga przeprowadzenia obliczeń w czasie rzeczywistym zarówno dla prostych przypadków stałego lub liniowo zmieniającego się obciążenia (3) na wale badanej maszyny, aż do złożonych modeli obciążeń uwzględniających sprzęgnięcia jej za pomocą połączeń charakteryzujących się pewną giętkością (2) czy luzami. Dodatkowo w przypadku przeprowadzania badań z uwzględnieniem dynamicznej zmiany momentu, konieczne jest wyznaczenie szybkości zmian prędkości obrotowej (1). Takie zadanie wymaga zastosowania kontrolera, który będzie dysponował odpowiednią szybkością przetwarzania sygnałów. Z tych względów zdecydowano się wykorzystać kontroler sb-RIO-9606 firmy National Instruments. Powodem wyboru tego układu było nie tylko zastosowanie w nim układu FPGA czy 400MHz

procesora zapewniającego dużą szybkość przetwarzania sygnałów, ale przede wszystkim ze względu na graficzne środowisko programowania tego układu. Wykorzystanie środowiska LabView znacznie skraca czas przygotowania aplikacji testowej [9], ale również umożliwia przygotowanie przejrzystego interfejsu użytkownika (rys. 4).



Rys.4 Przykładowy panel kontrolny stanowiska dynamometrycznego

Kontroler sb-RIO-9606 (rys. 5), oprócz wspomnianego wcześniej szybkiego procesora oraz układu FPGA Spartan-6 LX45, posiada jedynie podstawowe porty komunikacyjne: 10/100BASE-T Ethernet, RS232, CAN i USB. Aby można było go zastosować na stanowisku dynamometrycznym wymaga on dodatkowego układu kondycjonującego sygnały cyfrowe i analogowe otrzymane na stanowisku badawczym. W tym celu zastosowano dedykowaną do tego kontrolera kartę NI 9683, której wszechstronność pozwala na zastosowanie jej w różnych układach energoelektronicznych i napędu elektrycznego. Karta posiada m.in. 16 wejść analogowych z 12-bitowymi przetwornikami z częstotliwością próbkowania sygnałów wynoszącą 100 kS/s. Ta ilość kanałów pomiarowych jest wystarczająca do zebrania wszystkich sygnałów na stanowisku dynamometrycznym, od momentu obrotowego, aż po wartości napięć i prądów toru zasilającego regeneracyjny przemiennik częstotliwości.



Rys.5 Kontroler NI sb-RIO 9606 z kartą NI 9683

Ze względu na zastosowanie regeneracyjnego przemiennika częstotliwości oraz przewidywanej pracy w szerokim zakresie obciążenia i prędkości obrotowej pojawiła się konieczność monitorowania jakości energii elektrycznej. A to ze względu na harmoniczne generowane przez zastosowany przemiennik częstotliwości, które powodują obniżenie momentu uzyskiwanego na wale maszyny przy małych prędkościach obrotowych, aż o kilkanaście procent w stosunku do parametrów znamionowych silnika.

W celu monitorowania jakości energii elektrycznej zastosowano jeden z dostępnych w LabVIEW toolkitów, a mianowicie Electrical Power Suite. Funkcje w nim dostępne pozwalają tworzyć aplikacje monitorujące jakość energii elektrycznej, wyznaczając wartości poszczególnych harmonicznych i współczynnika ich zawartości THD, a także wartości podstawowych parametrów elektrycznych tj.: częstotliwości, wartości skutecznych prądów i napięć, czy składowych symetrycznych w celu wykrywania stanów awaryjnych [11].

#### 4. System pomiarowy

Funkcja zastosowanego kontrolera sb-RIO-9606 wraz z kartą kondycjonowania sygnałów NI 9683 ograniczona jest wyłącznie do kontroli pracy stanowiska oraz do pomiaru momentu, prędkości obrotowej oraz zasilania regeneracyjnego przemiennika częstotliwości i jego diagnostyki. W celu przeprowadzenia pomiarów prototypowej maszyny wykorzystano modułowy system pomiarowy oparty na platformie PXI firmy National Instruments (rys. 6). Głównym modułem tej zaawansowanej platformy jest kontroler PXIe-8133, który może pracować pod kontrolą systemu RT lub Windows 7, z mocą obliczeniową procesora Intel i7.



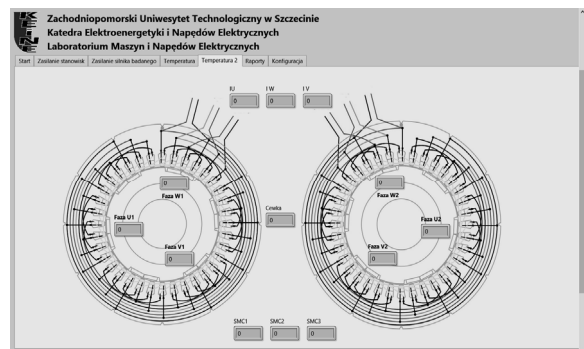
Rys.6 Modułowy system pomiarowy oparty na platformie PXI firmy National Instruments

Zestaw ten został wyposażony w cztery karty pomiarowe, które umożliwiają przeprowadzenie pełnej diagnostyki badanej maszyny, od pomiaru wielkości elektrycznych zasilania badanej maszyny, przez pomiar temperatury, a skończywszy na analizie drgań konstrukcyjnych. Pomiar wielkości elektrycznych można przeprowadzić wykorzystując karty PXIe-6368 lub PXIe-4499. O wyborze tych kart, decydują oczekiwane dokładności uzyskiwanych pomiarów oraz dynamika samych sygnałów (tab. 2).

Tabela 2. Porównanie parametrów kart pomiarowych

	PXIe-6368	PXIe-4499
Rozdzielczość	16 bit	24 bit
Częstotliwość próbkowania	2 Ms/s	204,8 kS/s

W celu wyznaczenia rozkładu temperatury badanej maszyny zastosowano kartę PXIe-4353, która umożliwia przeprowadzenie pomiaru w 32 punktach z rozdzielczością 24 bitów. W projektowanej maszynie zamontowano dziesięć czujników temperatury, po trzy w obu połówkach stojana oraz między rdzeniem a pierścieniem otaczającym go wykonanym z SMC, dodatkowy czujnik został umieszczony w dodatkowej cewce regulującej strumień magnesów trwałych (rys. 7).



Rys.7 Przykładowy panel pomiaru temperatury badanego silnika

Dodatkowo platforma PXI-owa została wyposażona w 7½-cyfrowy multimetr PXI-4071 oraz moduł archiwizowania danych pomiarowych NI 8260 z czterema dyskami SSD.

#### 5. Wnioski

W pracy zostało omówione stanowisko badawcze, które wykonano w ramach prowadzonego projektu badawczego. Celem budowy tego stanowiska było stworzenie warunków do prze-

przewodzenia kompleksowych badań projektowanej maszyny. Komponenty zastosowane do budowy stanowiska pozwalają na przeprowadzenie wszelkich możliwych badań w zakresie pracy generatorowej i silnikowej projektowanej maszyny, a co najważniejsze zastosowany układ kontrolny stanowiska dynamometrycznego pozwolił na przeprowadzenie badań, symulujących rzeczywiste warunki obciążenia badanych maszyn. Dodatkowo, wykorzystanie graficznego środowiska programistycznego LabView stworzyło wręcz nieograniczone możliwości prowadzenia badań na prototypie, a ich czas przygotowania uległ skróceniu dzięki dostępnym toolkitom. Na przykład zastosowanie LabVIEW System Identification Toolkit pozwoliło na przeprowadzenie eksperymentalnej identyfikacji parametrów badanej maszyny zgodnie z przyjętym modelem matematycznym, następnie, za pomocą LabVIEW Simulation Interface Toolkit, przeprowadzenie badań symulacyjnych i zweryfikowanie uzyskanych wyników na zaprojektowanym stanowisku badawczym.

## 7. Literatura

- [1] Dabała K.: *Hamownice prądu stałego i przemiennego ze zwrotem energii do sieci*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 80, 2008, wyd. BOBRME Komel, s. 131 – 135
- [2] Weng, L.; Dong, Z.Y.: *Optimal design of a regenerative dynamic dynamometer using genetic algorithms*. Evolutionary Computation, 2003. CEC '03. The 2003 Congress on , vol.4, no., pp. 2665- 2672
- [3] Hewson C.R., Asher G.M., Sumner M.: *Dynamometer control for emulation of mechanical loads*. Industry Applications Conference, 1998. Thirty-Third IAS Annual Meeting, vol.2, s. 1511 – 1518
- [4] Newton R.W., Betz R.E., Penfold H.B.: *Emulating dynamic load characteristics using a dynamic dynamometer*. Proceedings of 1995 International Conference on Power Electronics and Drive Systems. PEDS 95, vol. 1, s. 465 – 470.
- [5] Arellano-Padilla, J., Asher, G.M., Sumner, M.: *Control of an AC Dynamometer for Dynamic Emulation of Mechanical Loads With Stiff and Flexible Shafts*. IEEE Transactions On Industrial Electronics, Vol. 53, No. 4, August 2006. S. 1250-1260.
- [6] Hongshan Zha, Zhijian Zong: *Emulating Electric Vehicle's Mechanical Inertia Using an Electric Dynamometer*. International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA), 2010, vol.2, s. 100-103.
- [7] Jąderko A. Stanowisko z silnikiem synchronicznym z magnesami trwałymi PMSM do badania układów sterowania napędów z długim elementem sprzężystym. Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 87 NR 12b/2011, s. 72-73
- [8] Lee, J., Nelson, D.J.: Rotating inertia impact on propulsion and regenerative braking for electric motor driven vehicles. IEEE Conference Vehicle Power and Propulsion, 2005, s. 308 – 314.
- [9] Anzurez-Marin, J.; Zavala-Romero, P.; Espinosa-Juarez, E.; Ramirez-Zavala, S.; Zepeda-Ornelas, D.: *Graphic interface for the operation of an induction motor controlled by a commercial adjustable speed drive*. Electrical Engineering Computing Science and Automatic Control (CCE), 2011 8th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control, pp.1-6.
- [10] Jahołkowski K.: *Laboratoryjne stanowisko badania silnika prądu stałego z komputerowym systemem pomiarowym*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 75, 2006, wyd. BOBRME Komel, s. 207-211
- [11] Shahedul Haque L.; Mohibullah M.: *Power Quality Monitoring by Virtual Instrumentation using LabVIEW*. Proceedings of 46th International Power Engineering Conference (UPEC) 2011, pp.1-6

## Autorzy

prof. dr hab. inż. Ryszard Pałka,  
tel. 91 449 48 70, ryszard.palka@zut.edu.pl

dr inż. Sebastian Szkolny,  
tel. 91 449 41 29, sebastian.szkolny@zut.edu.pl

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

## Informacje dodatkowe

Badania finansowane przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, N N510 508040 (2011–2013).

## Recenzent

Prof. dr hab. inż. Czesław Kowalski