

Andrzej Tutaj, Tomasz Drabek, Tomasz Dziwiński, Paweł Piątek, Jerzy Baranowski
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

AUTOMATYCZNE STANOWISKO POMIAROWE DO BADAŃ WYSOKOOBROTOWYCH SILNIKÓW ELEKTRYCZNYCH MAŁYCH MOCY

AUTOMATIC MEASURING SYSTEM FOR TESTING HIGH-SPEED LOW-POWER ELECTRIC MOTORS

Streszczenie: W artykule przedstawiono stanowisko pomiarowe do badań wysokoobrotowych silników elektrycznych przeznaczonych do napędu elektronarzędzi. Są to silniki o mocach znamionowych typowo do 2 kW i prędkościach obrotowych zwykle nie przekraczających 15000 obr/min. Stanowisko umożliwia pomiar momentów silnika, prędkości obrotowej, prądów i napięć obecnych w całym układzie napędu elektrycznego oraz obserwację i rejestrację przebiegów czasowych wymienionych wielkości. Obciążenie badanego silnika stanowi wysokoobrotowa, trójfazowa prądnica z magnesami trwałymi, oddająca energię do zestawu rezystorów. Zastosowany przerywacz tranzystorowy umożliwia płynną regulację obciążenia. Automatyzacja eksperymentów i testów jest możliwa dzięki zastosowaniu programowalnych instrumentów pomiarowych. Polega ona na komputerowym sterowaniu przebiegiem pomiarów oraz rejestracją ich wyników. Scenariusz testu bądź pomiaru zapisywany jest w postaci skryptu w obiektowym języku programowania wysokiego poziomu *Python*. Komunikacja z instrumentami realizowana jest z wykorzystaniem programowej architektury *VISA* i interfejsów sprzętowych *RS-232* oraz *USB-TMC*. Dialog z przyrządami jest prowadzony w języku *SCPI*. Wykorzystywane są również możliwości nadrzędnego sterowania przekształtnikiem energoelektronicznym zasilającym silnik oraz zdalnego odczytu zwracanych przez niego wielkości. Automatyzacja stanowiska istotnie skraca czas wykonywanych pomiarów, minimalizuje ryzyko popełnienia błędów i obciąża obsługę.

Abstract: The paper presents a laboratory test bed for drive units with high-speed electric motors designed for power tools. The rated power of such motors does not exceed 2 kW while the rotational speed is less than 15 000 rpm. The test stand enables measurement of motor torque, rotational speed, electric currents and voltages in the electronic drive system as well as visualisation and registration of time series of the observed quantities. A high-speed, three-phase permanent-magnet generator and a set of resistors load the tested motor. A MOSFET transistor chopper allows continuous adjustment of the load. Use of programmable measuring instruments enables automatization of experiments and tests. The procedure involves a computerised control of the measurement process and recording of test results. The measurement scenario is coded as a script in Python high-level object-oriented programming language. Communication with instruments is carried out using VISA software architecture and various hardware interfaces including RS-232, Ethernet and USB. Commands and queries making up the dialogue with instruments are formulated in SCPI language. The proposed procedure takes advantage of remote control and measurement functionalities implemented in the prototype inverter firmware. Tests automatization considerably shortens time of experiments, minimizes risk of errors and reduces staff involvement.

Słowa kluczowe: automatyzacja pomiarów, programowalne przyrządy pomiarowe, hamownia, bezszczotkowy silnik prądu stałego

Keywords: tests automation, programmable instruments, motor test bench, DC brushless

1. Wprowadzenie

W ostatnich latach wzrosła cenowa dostępność magnesów neodymowo-borowych. Umożliwiło to masową produkcję bezszczotkowych silników prądu stałego (*BLDC*), z trójfazowym stojanem i magnesami trwałymi na wirniku, o mocach znamionowych dochodzących do pojedynczych kilowatów. Stają się one alternatywą dla silników uniwersalnych, powsze-

chnie stosowanych do napędu elektronarzędzi [1]. Przewyższają je trwałością, ze względu na brak układu komutator - szczotki, i wykazują wyższe sprawności, zarówno samego silnika, jak i całego napędu, wraz z jego częścią energoelektroniczną [2, 3].

Niezbędnym elementem napędu elektrycznego z silnikiem *BLDC* jest obwód elektronicznego

komutatora, na ogół pełniącego również rolę modulatora *PWM* napięć fazowych maszyny. Ze względu na złożoność całego napędu, nie sposób w sposób niezawodny przewidzieć jego własności w sposób teoretyczny, ani w oparciu o symulacje komputerowe. Dlatego w procesie prototypowania silnika i napędu niezbędne jest prowadzenie testów i pomiarów na hamowni.

Wielokrotne powtarzanie licznych, podobnych do siebie eksperymentów jest żmudne i czasochłonne, a obecność czynnika ludzkiego zwiększa ryzyko pomyłek. Dlatego pożądana jest automatyzacja procedur pomiarowych i testowych, dotycząca zmiany parametrów układu, sterowania jego pracą oraz dokonywania pomiarów i rejestracji ich rezultatów. Automatyzację taką można zrealizować stosując programowalne przyrządy pomiarowe. Należy je połączyć stosownymi interfejsami z komputerem nadrzędnym, na którym uruchamia się oprogramowanie, zdolne realizować scenariusze testów i pomiarów. Scenariusze te dogodnie jest zapisać w postaci skryptów w języku programowania wysokiego poziomu, dla którego dostępny jest interpreter umożliwiający zarówno pracę wsadową, jak i interaktywną. Umożliwia to łatwe modyfikowanie scenariuszy pomiarów oraz szybkie ich testowanie już na etapie tworzenia. W artykule opisano zautomatyzowane stanowisko pomiarowe hamowni, pierwotnie przeznaczone do badań wysokoobrotowego ($n_N = 10000$ obr/min), trójfazowego silnika *BLDC* oraz współpracującego z nim 6-tranzystorowego falownika *IGBT*, realizującego funkcję komutatora elektronicznego i modulatora *PWM* napięć fazowych silnika.

2. Stanowisko pomiarowe hamowni

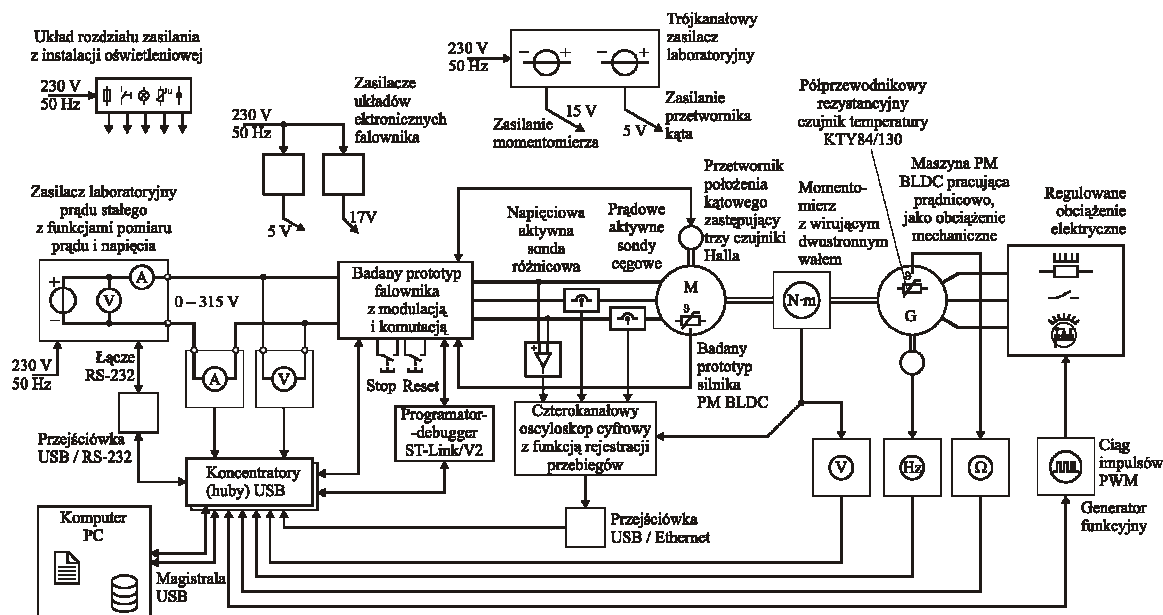
Główne elementy i przyrządy, wchodzące w skład stanowiska hamowni, wymieniono w tabeli 1, zaś schemat blokowy i fotografię stanowiska przedstawiono na rysunkach 1 i 2.

Tabela 1

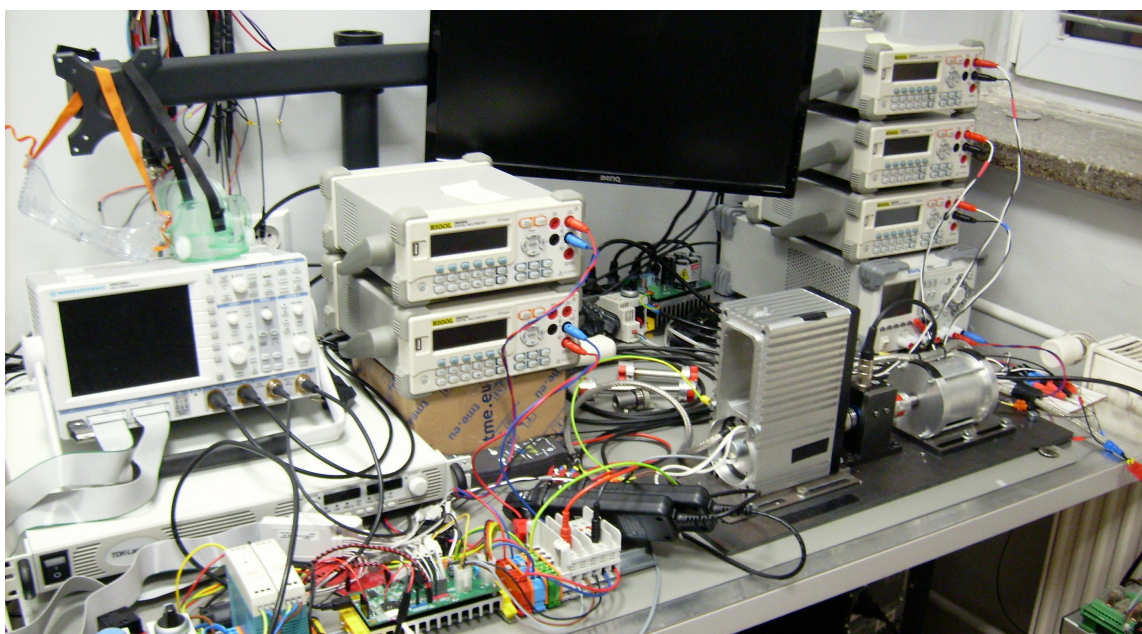
L.p.	Element hamowni
1	Elektroniczny przetwornik pomiarowy momentu, z wyjściem analogowym napięciowym
2	Czterokanałowy oscyloskop cyfrowy z pamięcią, 4 GSa/s
3	Szerokopasmowa, cępowa oscyloskono-

	wa sonda prądowa AC/DC, 100 kHz, 100 mV/A
4	Oscyloskopowa sonda różnicowa, wysokonapięciowa, szerokopasmowa AC/DC, 30 MHz, 1,4 kV, 100:1, 1000:1
5	Programowalny zasilacz laboratoryjny prądu stałego: 315 V, 5,25 A
6	Programowalny trójkanałowy zasilacz laboratoryjny prądu stałego
7	Programowalny generator funkcyjny/arbitralny, 20 MHz, 2 kanały
8	Programowalny multimetr cyfrowy z funkcjami pomiaru napięcia, prądu, oporu, częstotliwości, 5 1/2 cyfry, 0,015%
9	Komputer stacjonarny klasy <i>PC</i> z systemem operacyjnym <i>Microsoft Windows 8</i>
10	Prototypowy falownik – sterownik silnika <i>BLDC</i>
11	Prototypowy silnik <i>BLDC</i>
12	Przetwornik pomiarowy położenia kąowego, zastępujący trzy czujniki Halla oraz inkrementalny enkoder kwadratury z sygnałem indeksującym
13	Prądnica obciążająca
14	Siedmioportowy, aktywny koncentrator <i>USB 2.0</i>
15	Zasilacz wtyczkowy 5 V
16	Konwerter <i>USB / RS-232</i>
17	Konwerter <i>USB / LAN</i> (zewnętrzna karta sieciowa <i>Fast Ethernet</i>)
18	Programator- <i>debugger</i> dla mikrokontrolerów rodziny <i>STM32F4xx</i>
19	Zestaw rezystorów obciążających wraz z łącznikami umożliwiającymi zmianę konfiguracji oraz mostkiem prostowniczym, filtrem pojemnościowym i przerywaczem tranzystorowym wraz z układem sterowania

Centralną część hamowni stanowi badany silnik, połączony za pośrednictwem sprzęgieł i przetwornika pomiarowego momentu z generatorem obciążającym. Energia elektryczna z prądnicy wydzielana jest w konfigurowalnych zestawach rezystorów mocy, z których część jest modulowana przerywaczem tranzystorowym.



Rys. 1. Schemat blokowy stanowiska hamowni



Rys. 2. Fotografia stanowiska hamowni

Przebiegi czasowe dwóch prądów fazowych badanego silnika oraz jednego napięcia międzyprzewodowego mogą być rejestrowane przy pomocy oscyloskopu cyfrowego, dzięki zastosowaniu cęgowych sond prądowych oraz różnicowej sondy napięciowej. Badany napęd zasilony jest z separowanego zasilacza stabilizowanego, dostarczającego napięcie stałe, regulowane do 315 V.

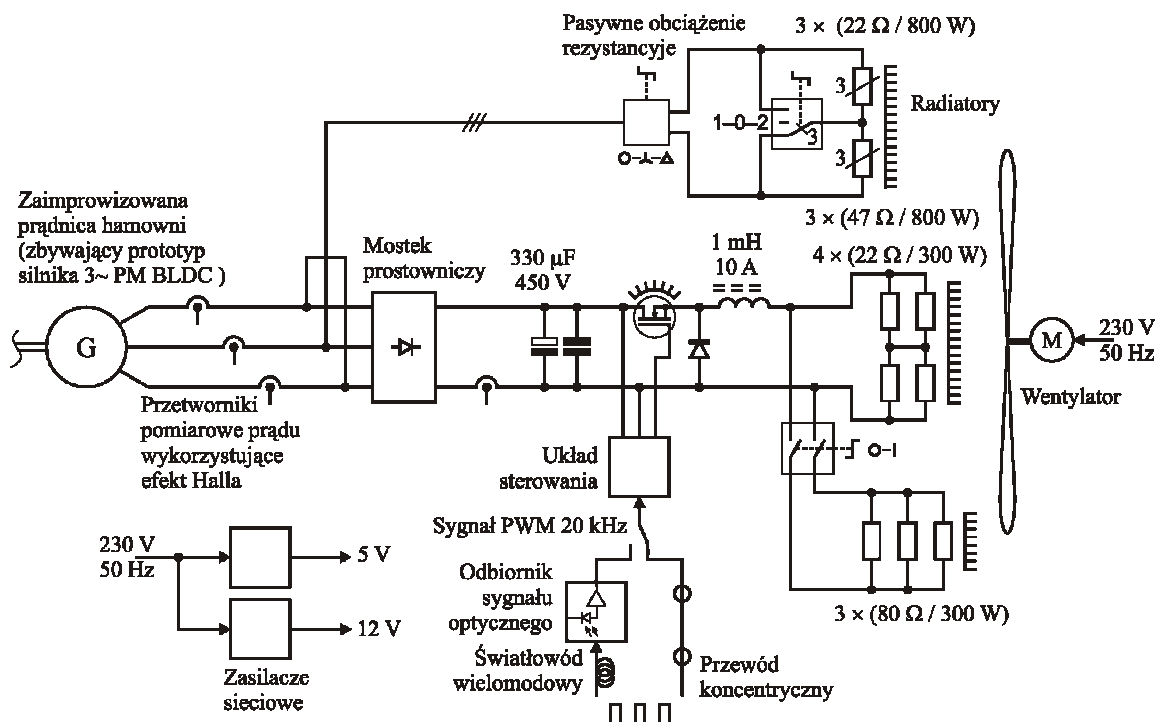
Prąd i napięcie zasilacza mierzone są na dwa sposoby: wbudowanym woltmierzem i ampermierzem oraz niezależnymi, programowanymi multimetrami cyfrowymi. Trzy inne multimetry mierzą odpowiednio: napięcie wyjściowe przetwornika momentu, częstotliwość sygnału cyfrowego z przetwornika kąta (proporcjonalną do prędkości obrotowej) oraz rezystancję półprzewodnikowego czujnika tempera-

tury, wbudowanego w prądnicę obciążającą. Źródłem danych pomiarowych jest również sterownik falownika badanego silnika.

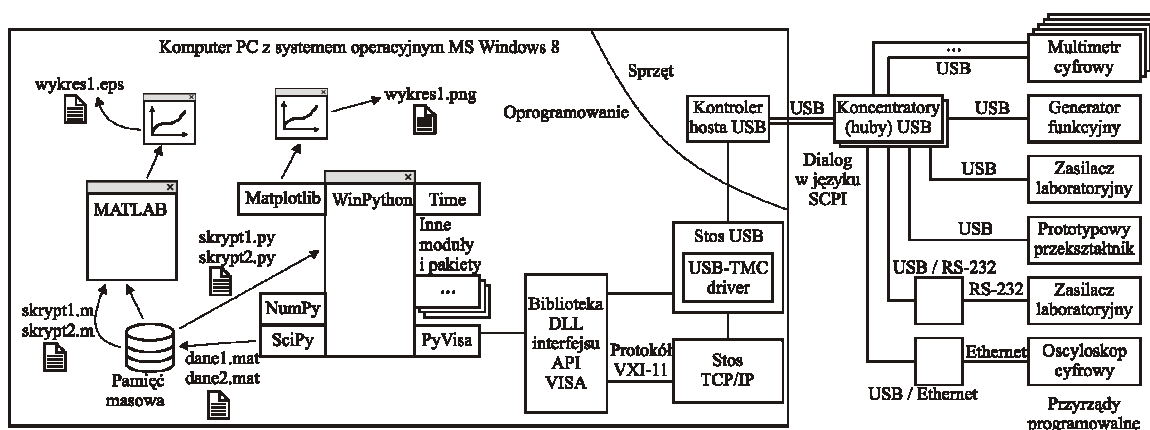
Na stanowisku pomiarowym zainstalowano dwa, połączone równolegle, układy obciążeń rezystancyjnych dla prądnicy hamowni: pasywny i semiaktywny. Ich schemat blokowy przedstawiono na rysunku 3. Mogą one pracować jednocześnie bądź pojedynczo, a każdy z nich pozwala na regulację obciążenia prądnicy: pasywny – skokową, zaś aktywny – skokową i płynną. Na układ pasywny składają się zestawy trzech rezystorów $22\ \Omega / 800\ \text{W}$ i trzech $47\ \Omega / 800\ \text{W}$ oraz dwa łączniki. Jeden łącznik wybiera rezystory o mniejszej lub większej rezystancji albo ich połączenie szeregowe. Drugi umożliwia wybranie konfiguracji gwiazdy lub trójkąta. W układzie aktywnym prąd trójfazowy z generatora jest prostowany i filtrowany pojemnościowo, a następnie kierowany przez przerywacz tranzystorowy *MOSFET* i dławik na jeden lub dwa połączone równolegle zestawy rezystorów mocy o oporze zastępczym, odpowiednio $22\ \Omega$ lub $26,67\ \Omega$. Zmiana współczynnika wypełnienia sygnału sterującego przerywacz pozwala płynnie modulować obciążenie silnika.

3. Automatyzacja pomiarów

Automatyczne prowadzenie pomiarów i testów jest możliwe dzięki zastosowaniu programowalnych przyrządów laboratoryjnych i połączeniu ich z komputerem wyposażonym w odpowiednie oprogramowanie [4]. To ostatnie umożliwia komunikację z przyrządami, realizację skryptów opisujących scenariusze pomiarowe oraz rejestrację, obróbkę i końcową prezentację wyników pomiarów. Pełna automatyzacja nie byłaby możliwa bez wykorzystania sterownika falownika zasilającego badany silnik, którego oprogramowanie wyposażono w funkcje umożliwiające sterowanie nadrzędne i monitorowanie. Dzięki nim do sterownika falownika można przysyłać wartości zadane parametrów pracy hamowni (współczynnik wypełnienia modulującej fali *PWM* obciążenia generatora) oraz odpytywać go o wartości mierzonych przez niego wielkości fizycznych, takich jak prądy, napięcia, prędkość obrotowa czy temperatura uzwojeń silnika. Na rysunku 4 przedstawiono schemat pokazujący relacje między elementami sprzętowymi i programowymi, składającymi się na cały układ automatyzacji pomiarów.



Rys. 3. Schemat blokowy układu obciążenia



Rys. 4. Architektura sprzętowo-programowa

3.1. Architektura sprzętowa

Przyrządy pomiarowe połączone są z komputerem *PC* przy pomocy różnych interfejsów: magistrali *USB*, łącza szeregowego *RS-232* i sieci *LAN Ethernet TCP/IP*. Pomocniczo wykorzystano konwertery *USB/RS-232*, *USB/Ethernet*, ponieważ używany komputer nie był wyposażony w łącze szeregowo *RS-232*, a wbudowana karta sieci *Ethernet* była wykorzystywana do innych celów. Zastosowano też wieloportowy aktywny koncentrator *USB*, gdyż liczba instrumentów przewyższała liczbę portów *USB* użytego komputera. Przy pomocy magistrali *USB* dołączono także prototypowy falownik. Zastosowano w nim izolację galwaniczną tejże magistrali, gdyż w rozwiązaniu docelowym masa obwodu elektronicznego falownika może znaleźć się na potencjale przewodu fazowego sieci elektroenergetycznej.

3.2. Architektura programowa

Użyty komputer klasy *PC* jest zarządzany przez system operacyjny *Microsoft Windows 8*, który domyślnie zawiera stos protokołów *TCP/IP*. W systemie zainstalowano bibliotekę *VISA* pochodzącą od firmy *Rohde&Schwarz*, wraz ze sterownikiem podklasy *TMC (Test and Measurement Class)* klasy *Application Specific* systemu *USB*. Od chwili instalacji sterownik ten staje się częścią stosu *USB*. W systemie są też obecne sterowniki konwerterów *USB/RS-232* oraz *USB/Ethernet*, pochodzące od ich producentów. Taka konfiguracja programowa umożliwia wykorzystanie różnych interfejsów, za pośrednictwem których dołączono przyrządy.

Biblioteka *VISA* stanowi warstwę abstrakcji między przyrządami a aplikacją użytkownika, pozwalającą traktować wszystkie przyrządy w sposób jednolity i zestandaryzowany. Implementuje ona między innymi protokół *VXI-11*, zdefiniowany w standardzie *LXI (LAN eXtension for Instrumentation)*, który w opisywanym stanowisku służy do komunikacji z oscyloskopem.

Rolę wspomnianej wcześniej aplikacji użytkownika pełni interpreter języka *Python* (dystrybucja *WinPython*), uzupełniony o moduł *PyVisa*. Definiuje on klasy pozwalające na dostęp do biblioteki *VISA* z poziomu tego języka programowania. Polecenia i zapytania do przyrządów i instrumentów formułowane są w języku *SCPI (Standard Commands for Programmable Instruments)*, stanowiącym powszechnie obowiązujący standard. Polecenia te są przekazywane jako argumenty do metod *write* lub *query* obsługujących instrumenty. Odpowiedzi przyrządów w formacie tekstowym są interpretowane i przetwarzane do formatu numerycznego przez standardowe metody języka *Python*. Do celów automatyzacji pomiarów, wszystkie niezbędne polecenia języka *Python* można zapisać w skrypcie, a następnie uruchamiać tak zakodowany scenariusz testowy w trybie wsadowym.

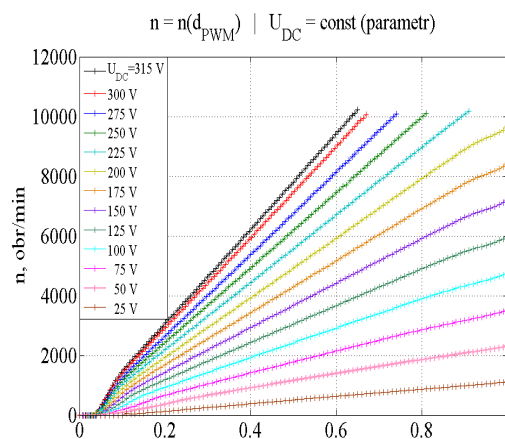
3.3. Skrypty pomiarowe

Scenariusze pomiarowe testów zapisywane są w postaci skryptów języka *Python*. Interpreter języka *Python* umożliwia też pracę w trybie interaktywnym, co ułatwia uruchamianie skryptów. Zawartość skryptu zależy oczywiście od rodzaju prowadzonego eksperymentu, jednak

pewne elementy powtarzają się. Na początku skryptu ładowany jest moduł *PyVisa*, po czym tworzony jest obiekt *managera* zasobów *VISA*. Z pomocą tego obiektu otwiera się połączenia do poszczególnych przyrządów. Stan połączenia można sprawdzić wydając zapytanie `*IDN?` języka *SCPI*. Dalej następuje wstępna konfiguracja przyrządów (wybór funkcji, zakresu pomiarowego, wartości zadanych napięć i prądów) i ich uaktywnienie. Tworzone są też puste zmienne tablicowe (lista (*list*) języka *Python* lub tablica (*array*) modułu *NumPy*), przeznaczone do przechowywania wyników pomiarów. Zasadnicza część skryptu ma zwykle postać pętli `for` – pojedynczej lub kilku zagnieżdżonych. W pętli wewnętrznej zmienia się wartość zmiennej niezależnej wyznaczonej zależności funkcyjnej, zaś w pętlach zewnętrznych – wartości parametrów. W pojedynczej iteracji do przyrządów pomiarowych i sterownika falownika wysyłane są wartości zadane, potem następuje oczekiwanie na stan ustalony napędu, a następnie wykonywany jest pomiar, którego wyniki dopisywane są do list danych. Po wykonaniu wszystkich iteracji hamownia doprowadzana jest do stanu wyjściowego, po czym zamykane jest połączenie z przyrządami pomiarowymi i sterownikiem falownika oraz sam *manager* zasobów *VISA*. Ostatni etap pomiarów to obróbka numeryczna uzyskanych wyników pomiarowych, ich graficzna prezentacja w postaci wykresów oraz zapis do plików dyskowych w formacie umożliwiającym dalsze wykorzystanie (np. *CSV* lub *MAT*).

3.4. Przykładowe wyniki pomiarów

Na rysunku 5 przedstawiono rodzinę charakterystyk regulacyjnych badanego prototypowego układu napędowego z wysokoobrotowym silnikiem *BLDC* [5, 6]. Parametrem rodziny jest napięcie zasilacza *DC*, zmienną niezależną – współczynnik wypełnienia fali *PWM* regulacji napięć fazowych silnika, zmienną zależną – prędkość obrotowa silnika. Przebiegiem eksperymentu sterował skrypt z dwiema zagnieżdżonymi pętlami `for`. Widoczne charakterystyki można wykreślić wprost w środowisku *Python*, korzystając z modułu `matplotlib.pyplot`, lecz tutaj wykres wykonano w środowisku *MATLAB*, przenosząc dane przez plik dyskowy w binarnym formacie *MAT*.



Rys. 5. Wyznaczona automatycznie rodzina charakterystyk regulacyjnych silnika *BLDC* – zależność prędkości obrotowej silnika od współczynnika wypełnienia fali *PWM*, przy stałym napięciu zasilania falownika

4. Podsumowanie

Automatyzacja pomiarów na stanowisku hamowni posiada szereg zalet w stosunku do podejścia tradycyjnego, angażującego eksperymentatorów. Umożliwia ona obniżenie kosztów badań przez ich przyspieszenie, odciążenie obsługi ze żmudnego zadania zapisywania serii danych oraz zapewnia powtarzalność warunków prowadzenia pomiarów. Ograniczenie udziału człowieka prowadzi do eliminacji pomyłek ludzkich przy rejestracji wyników pomiarów i w prowadzeniu doświadczenia. Łatwość prowadzenia eksperymentów zachęca do gruntowniejszego przebadania testowanego napędu.

W pierwotnej konfiguracji stanowiska pomiarowego źródłem sygnału *PWM* dla przerywacza tranzystorowego obciążenia rezystancyjnego był generator funkcyjny. Zaburzało to jednak płynność pracy układu, gdyż sygnał na wyjściu użytego generatora zanikał chwilowo przy każdej zmianie współczynnika wypełnienia. Dlatego zdecydowano, by w roli generatora wykorzystać sterownik falownika badanego silnika, po odpowiedniej modyfikacji jego oprogramowania. Było to możliwe ze względu na rezerwę mocy obliczeniowej mikrokontrolera sterownika oraz dostępność niewykorzystanego do tej pory układu czasowo-licznikowego mikrokontrolera, zdolnego generować sygnał *PWM* w sposób bezprzerwowy.

W opisanym rozwiązaniu do komunikacji z biblioteką *VISA* wykorzystano interpreter *WinPython* wraz z modułem *PyVisa*, zaś do obróbki i prezentacji zebranych danych pomiarowych

skorzystano z modułów i pakietów *NumPy*, *SciPy* i *Matplotlib*. Postawione zadanie można jednak z powodzeniem zrealizować z użyciem innych środowisk obliczeniowych, jak choćby *MATLAB* z przybornikiem *Instrument Control Toolbox*, *LabVIEW* czy nawet *Microsoft Excel* z interpreterem języka *Visual Basic for Application* i biblioteką *VISA COM Type Library*. Nie jest również konieczna praca w środowisku *MS Windows*, istnieją bowiem implementacje biblioteki *VISA* czy interpretera języka *Python* dla innych systemów operacyjnych, na przykład rodziny *Linux*. Ta ostatnia konfiguracja programowa jest w pełni bezpłatna, co może być istotne w przypadku projektów o ograniczonym budżecie.

5. Literatura

- [1]. Ł. Cyganik, E. Król, J. Baranowski, T. Drabek, T. Dziwiński, P. Piątek: "Konstrukcja bezszczotkowego silnika do zakrętkarki elektromechanicznej", *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 2, str. 141 -145, 2017.
- [2]. M. Baszyński, R. Dudek, A. Dziadecki, A. Stobiecki: "Badanie sprawności układu maszyna PMSM – przekształtnik w szerokim zakresie przetwarzanej mocy", *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 2, str. 101 -106, 2017.
- [3]. P. Bogusz, M. Korkosz, J. Prokop, P. Wygonik: "Wybrane wyniki badań laboratoryjnych bezszczotkowego silnika z magnesami trwałymi", *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 1, str. 237 -241, 2017.
- [4]. M. P. Ciurys, I. Dudzikowski, M. Pawlak: "Laboratory tests of a PM BLDC motor drive", *Selected Problems of Electrical Engineering and Electronics (WZEE)*, Kielce, 17–19 September 2015.
- [5]. K. Krykowski: "Silniki PM BLDC. Właściwości, sterowanie, aplikacje", Wydawnictwo BTC, Legionowo 2015.
- [6]. L. Grzesiak, A. Kaszewski, B. Ufnalski: "Sterowanie napędów elektrycznych. Analiza, modelowanie, projektowanie", wydanie pierwsze, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2016.

Autorzy

Autorzy artykułu są pracownikami Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej.
e-mail: A. Tutaj: tutaj@agh.edu.pl, T. Drabek: drabek@agh.edu.pl, T. Dziwiński: tdz@agh.edu.pl, P. Piątek: ppi@agh.edu.pl, J. Baranowski: jb@agh.edu.pl

Informacje dodatkowe

Projekt jest współfinansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach Programu Badań Stosowanych nr PBS3/B4/13/2015.