

silnik PM BLDC, automatyzacja pomiarów, LabView

Paweł EWERT*, Jacek SMOLEŃ**

MONITOROWANIE PRACY NAPĘDU Z SILNIKIEM PM BLDC PRZY WYKORZYSTANIU ŚRODOWISKA LabVIEW

W artykule przedstawiono możliwość zastosowania środowiska LabVIEW do automatyzacji pomiarów na stanowisku z silnikiem PM BLDC. Opracowany program umożliwia rejestrację podstawowych sygnałów pomiarowych takich jak: prądy, napięcia międzyfazowe, moment i prędkość obrotową. Dodatkowym atutem aplikacji jest możliwość zarejestrowania sygnałów pomiarowych w stanach statycznych jak i dynamicznych badanej maszyny. Opracowany program pozwala wykreślić charakterystyki mechaniczne badanego silnika. Zastosowanie środowiska LabVIEW umożliwia łatwą rozbudowę programu o dodatkowe funkcje takie jak np. generowanie raportów z badań, tworzenie baz danych z wykonanych pomiarów itd.

1. WPROWADZENIE

Wraz z rozwojem elektroniki wzrosło zapotrzebowanie na niezawodne silniki małej mocy, które charakteryzowałyby się dokładnym odwzorowaniem prędkości obrotowej oraz bezobsługową eksploatacją o czasie zbliżonym do trwałości układów elektronicznych. Obecnie wszystkie użytkowe napędy dysków twardej, czytników płyt oraz dyskietek jak i wentylatorów komputerowych są zasilane z silników o komutacji elektronicznej. Mimo tendencji do projektowania współczesnych urządzeń elektronicznych bez zbędnych elementów ruchomych (smartfony, tablety, a wkrótce również netbooki) oraz zastępowanie napędów dysków pamięciami SSD, silniki PM BLDC znajdują zastosowanie w obiecujących nowoczesnych technologiach, np.: napęd dronów. Silniki PM BLDC znajdują również zastosowanie w przemyśle samochodowym, automatyce przemysłowej, medycynie czy kosmonautyce [1], [2].

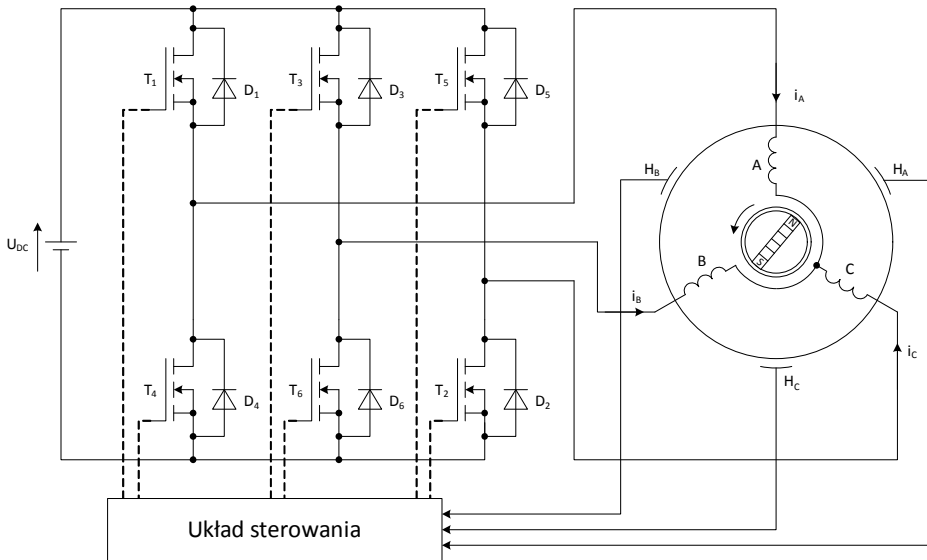
Silniki PM BLDC są silnikami synchronicznymi. Stojan silnika PM BLDC zbudowany jest ze stalowych laminatów i uzwojeń fazowych umieszczonych w żłobieniach. Konstrukcja jest zbliżona do stojana silnika indukcyjnego [1]. Uzwojenia stojana połączo-

* Politechnika Wroclawska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, e-mail: pawel.ewert@pwr.edu.pl

** Student Wydziału Elektrycznego Politechniki Wrocławskiej.

ne są w gwiazdę a wartość napięcia znamionowego zasilającego stojan zależy od zastosowania i konstrukcji silnika. W przemyśle samochodowym, robotyce itp. najczęściej spotyka się napięcia 48 V i niższe. W urządzeniach konsumenckich, automatyce i przemyśle napięcia znamionowe wynoszą 100 V i więcej [1]. Wirnik zbudowany jest z par magnesów przytwierdzonych do rdzenia. Liczba par magnesów waha się między 2 a 6. Magnesy trwale użyte do budowy silnika mogą być ferrytowe lub ze stopów metali ziem rzadkich: neodymowe (Nd), samarowo-kobaltowe (SmCo) albo ze stopu neodymu, ferrytu i boronu (NdFeB) jeśli wymagany jest lepszy stosunek gęstości strumienia do objętości [1]. Użycie stopów metali ziem rzadkich wiąże się z wyższymi kosztami.

W przeciwieństwie do szczotkowych silników prądu stałego, silniki o komutacji elektronicznej wymagają informacji o położeniu wirnika. Można to zrealizować na dwa sposoby – bezczujnikowo mierząc indukowaną SEM w uzwojeniach niezasilanych lub czujnikowo wykorzystując do tego czujniki Halla [2], [3].



Rys. 1. Schemat przekształtnika zasilającego silnik BLDC [3]

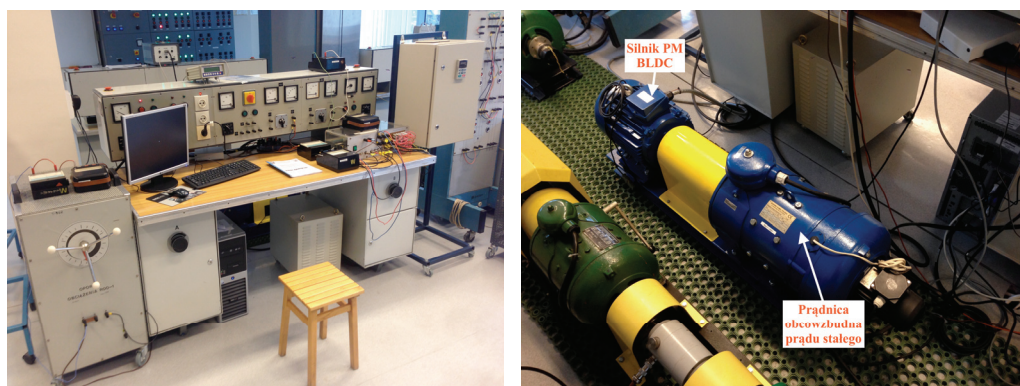
Sterowanie silnikiem BLDC realizowane jest poprzez przekształtnik energoelektroniczny (rys. 1). Układ sterowania załącza poszczególne tranzystory w odpowiedniej kolejności w zależności od sygnałów z czujników Halla. Przekształtnik pełni również funkcję regulatora prądu metodą modulacji szerokości impulsów (MSI). Każdy z tranzystorów jest aktywny przez 120° okresu a zmiany par aktywnych tranzystorów odbywają się co 60° . Przekłada się to na zasilanie uzwojeń stojana w 6 krokach. Oznaczając zaciski połączonych w gwiazdę uzwojeń stojana A, B, C, zasilane są kolejno fazy: A-C, A-B, C-B, C-A, B-A, B-C. Jest to tzw. komutacja 6-stopniowa.

W artykule skupiono się na przedstawieniu aplikacji umożliwiającej monitorowanie pracy układu napędowego z silnikiem BLDC oraz rejestrowanie sygnałów pomiarowych takich jak: prądy fazowe, napięcia międzyfazowe, moment oraz prędkość. Zaprezentowano zarejestrowane przebiegi zmiennych elektrycznych i mechanicznych, w stanach ustalonych i dynamicznych.

2. STANOWISKO LABORATORYJNE

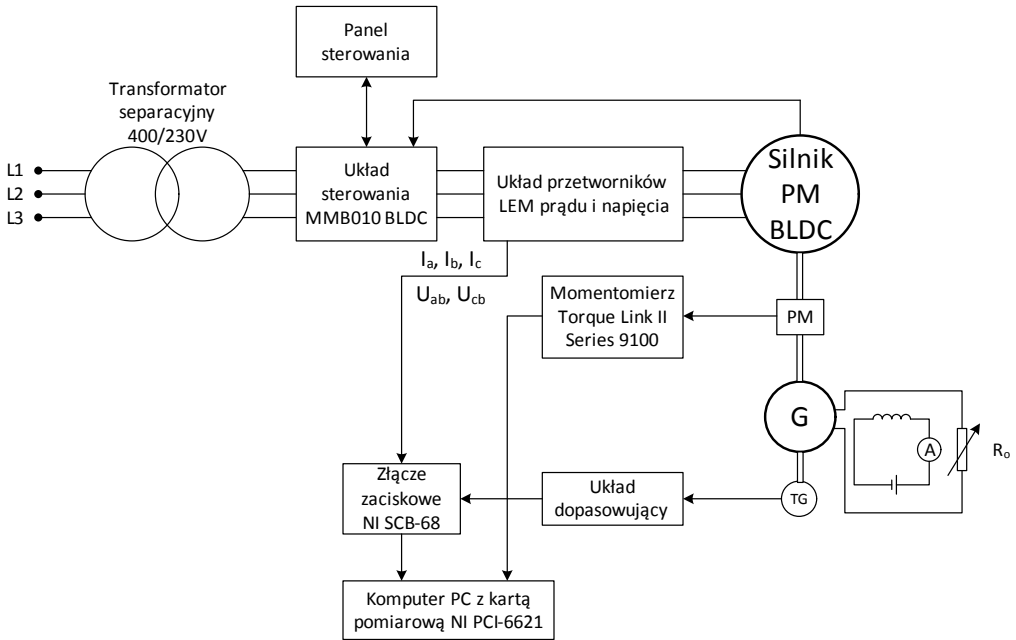
Testowanie opracowanej w środowisku LabVIEW aplikacji umożliwiającej automatyzację pomiarów wykonano w Laboratorium Automatyki Napędu Elektrycznego Katedry Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. W skład układu pomiarowego wchodzi (rys. 2):

- silnik synchroniczny wzbudzany magnesami trwałymi KOMEL PMSg132S-4T,
- komputer klasy PC z kartą pomiarową NI PCI-6621 ze złączem zaciskowym NI SCB-68,
- momentomierz Torque Link II Series 9100 z czujnikiem,
- transformator 3-fazowy separacyjny Elhand ET3-o 5,0,
- komutator elektroniczny wraz z układem sterowania MMB010 BLDC,
- układ przetworników LEM prądu i napięcia,
- prądnica obcowzbudna prądu stałego AR0Zc 160 SX wraz z opornicą pełniącą rolę obciążenia badanego silnika,
- tachoprądnica do pomiaru prędkości obrotowej zamontowana na wale prądnicy.



Rys. 2. Zdjęcie stanowisko pomiarowe oraz silnika PM BLDC sprzęgniętego z prądnicą obcowzbudną prądu stałego

Schemat ideowy układu badawczego silnika PM BLDC pokazano na rys. 3.



Rys. 3. Schemat ideowy układu pomiarowego

Ze względu na niższe od sieciowego napięcia znamionowe falownika układ zasilany jest za pośrednictwem transformatora separacyjnego firmy Elhand ET3-o 5,0 Dy5 400/230 [V] o mocy 5 [kVA].

Komutacja elektroniczna realizowana jest przez układ sterowania MMB010 BLDC, który realizuje również funkcję regulacji prędkości kątowej wirnika silnika PM BLDC. Układ składa się z prostownika diodowego od strony sieci, obwodu pośredniczącego z kondensatorami i mostka tranzystorowego na wyjściu.

Układ MMB010 BLDC steruje wszystkimi trzema fazami zasilającymi silnik PM BLDC. Jest wyposażony w regulator PI, a sterowanie napięciem i prądem odbywa się w zamkniętej pętli sprzężenia zwrotnego. Możliwa jest regulacja prędkości w obu kierunkach od 0 do 1500 [obr/min]. Dostępne są dwa sposoby sterowania: z wykorzystaniem sygnału z czujników Halla lub bezczujnikowo.

Za pośrednictwem panelu sterowania umieszczonego na pokrywie urządzenia MMB możliwa jest zmiana parametrów nastaw regulatora PI, prędkości zadanej oraz wartości „odcięcia prądowego”. Panel sterowania wyświetla również aktualną prędkość obrotową wirnika mierzoną za pomocą czujników Halla oraz wartość prądu twornika.

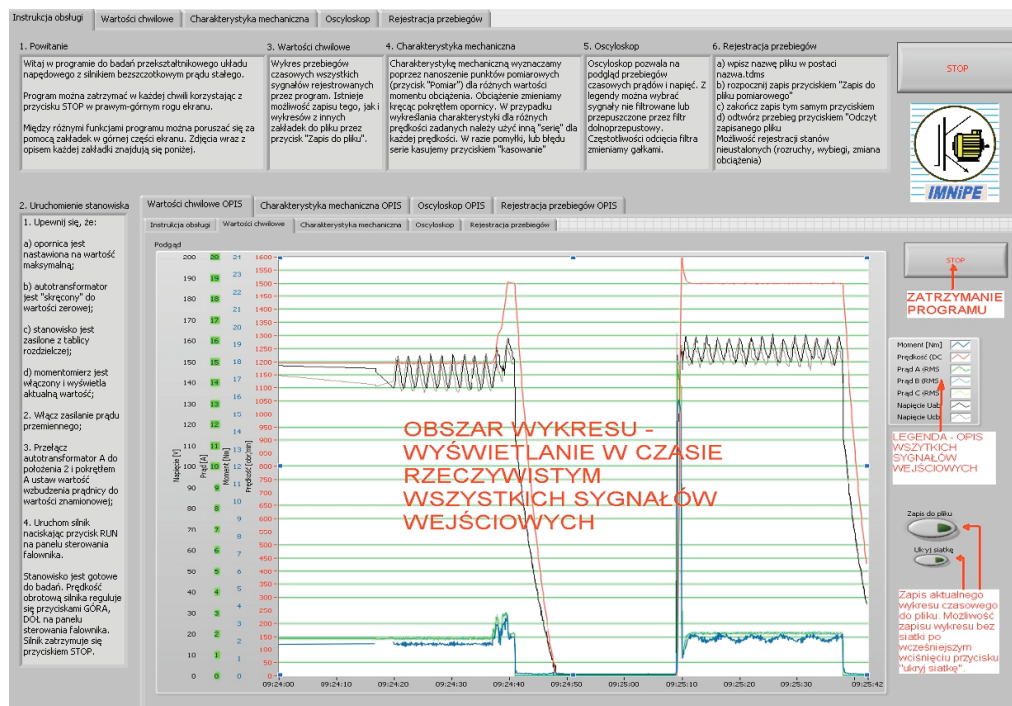
Wał silnika BLDC jest sprzęgnięty z prądnicą obcowzbudną prądu stałego. Moment oporowy jest wymuszany poprzez zmianę rezystancji opornicy obciążenia włączonej w obwód twornika prądnicy. Na wale pomiędzy silnikiem a prądnicą zamontowany jest czujnik momentomierza Torque Link II.

Pomiar prądów fazowych i napięć międzyfazowych realizowany jest przez układ prze-tworników prądowych i napięciowych typu LEM. Pomiar prędkości obrotowej realizowany jest za pomocą prądnicy tachometrycznej zamontowanej na wale prądnicy prądu stałego.

Do pomiaru momentu mechanicznego wykorzystano momentomierz Torque Link II Series 9100 z czujnikiem pomiarowym Series 2000. Momentomierz został ustawiony na tryb ciągłego pomiaru z wysyłaniem wskazań na wyświetlacz LCD oraz w kodzie ASCII przez magistralę komunikacyjną RS232 do komputera.

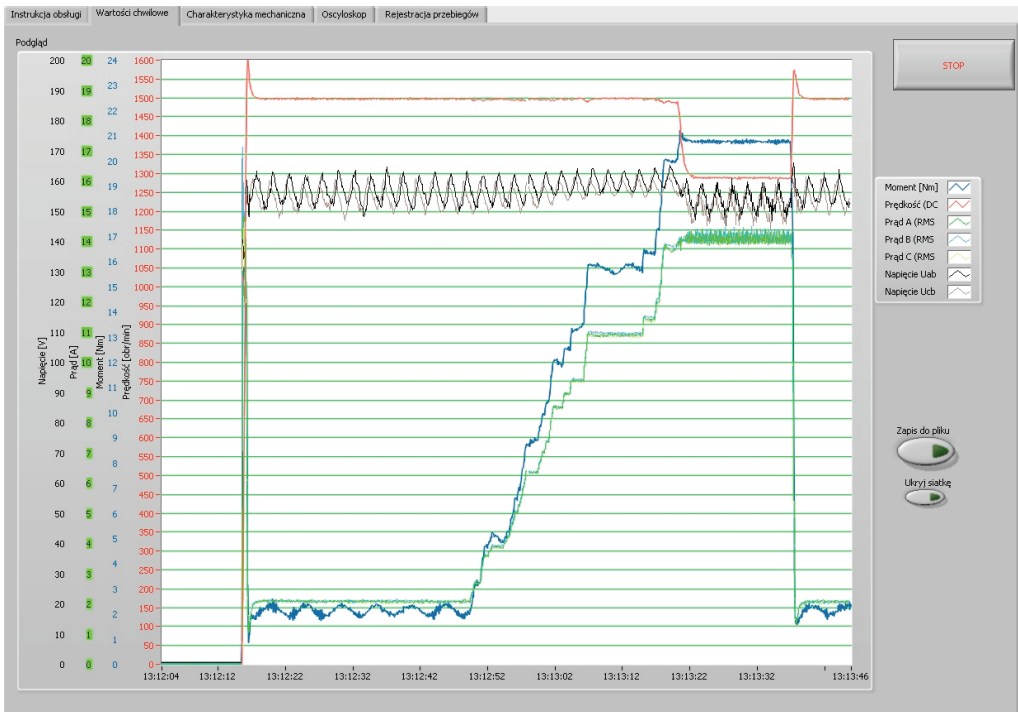
3. APLIKACJA DO MONITOROWANIA PRACY NAPĘDU Z SILNIKIEM BLDC

Założeniem projektowym było opracowanie przejrzystej oraz intuicyjnej aplikacji umożliwiającej monitorowanie pracy napędu oraz automatyzację pomiarów na stanowisku z silnikiem PM BLDC. Założenie to zrealizowano przez podział programu na kilka przejrzystych zakładek. Użytkownika, po uruchomieniu aplikacji przywita strona tytułowa ze wstępem i instrukcją obsługi (rys. 4).



Rys. 4. Zakładka I (Instrukcja obsługi)

Pierwsza zakładka aplikacji (rys. 4) zawiera instrukcję, która krok po kroku wyjaśnia jak uruchomić stanowisko pomiarowe. Użytkownik może się zapoznać z opisem funkcjonalności każdej zakładki, a także przejrzeć zdjęcia przykładowych pomiarów z opisem wszystkich elementów panelu. Aplikację można zatrzymać z każdej zakładki programem przyciskiem *STOP* znajdującym się w prawym górnym rogu ekranu.

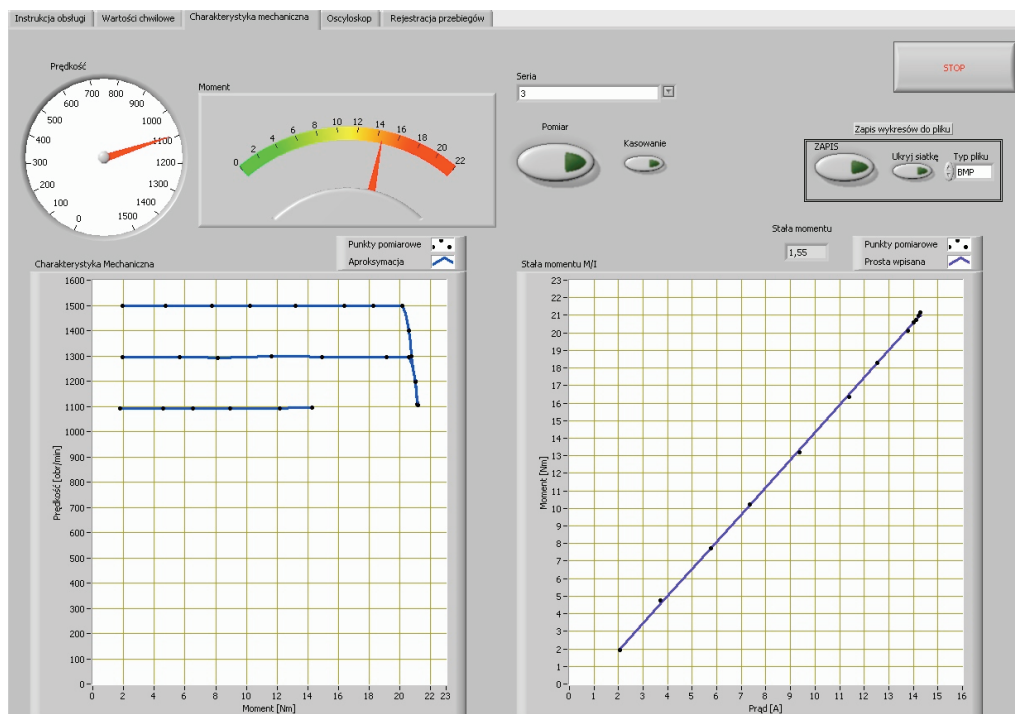


Rys. 5. Zakładka II (Wartości chwilowe)

Druga zakładka aplikacji (rys. 5) to rejestrator przebiegów czasowych wszystkich mierzonych sygnałów. Wykres jest uaktualniany w czasie rzeczywistym a przełączanie zakładek nie ma wpływu na funkcjonowanie wykresu. Dzięki temu użytkownik w każdej chwili ma możliwość podglądu ostatnich 40 sekund przebiegów czasowych. Oś rzędnych została rozdzielona i wyskalowana tak, aby każdy parametr wykorzystywał całą wysokość wykresu. Po prawej stronie ekranu znajduje się legenda. Użytkownik ma możliwość zapisania aktualnego wykresu do pliku. Dla zwiększenia czytelności wykresu można wyłączyć siatkę.

Trzecia zakładka aplikacji (rys. 6) umożliwia wykreślenie charakterystyki mechanicznej badanego układu napędowego. Wskaźniki – mierniki analogowe prędkości

i momentu mechanicznego ułatwiają precyzyjne nastawianie obciążenia. Do nanoszenia kolejnych punktów pomiarowych służy przycisk *Pomiar*. Program po każdym kolejnym punkcie pomiarowym dokonuje aproksymacji funkcji przeliczając za każdym razem wszystkie punkty pomiarowe.



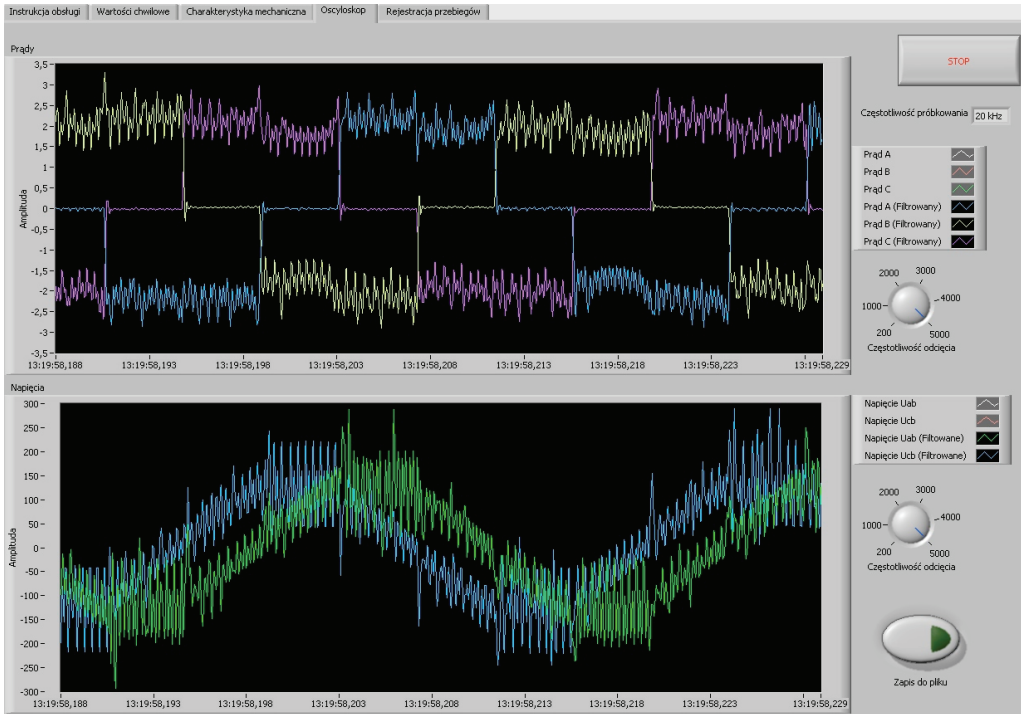
Rys. 6. Zakładka III (Charakterystyka mechaniczna)

Istnieje możliwość wykreślenia charakterystyk dla różnych zadanych prędkości obrotowych. Realizuje się to poprzez wybór kolejnego numeru serii z rozwijanego menu *Seria*. Jedna seria odpowiada jednej zadanej prędkości obrotowej.

W przypadku błędu (np. dokonanie pomiaru w stanie przejściowym) można skasować nieudaną serię przyciskiem *Kasowanie*. Skasowaniu ulegnie tylko wybrana seria pomiarowa.

Podczas wyznaczania charakterystyki mechanicznej automatycznie wykreślona jest również charakterystyka momentu w funkcji prądu ($f = M(I)$). Używając funkcji aproksymacji liniowej obliczana jest stała momentu, która jest wartością a w równaniu prostej $y = ax + b$.

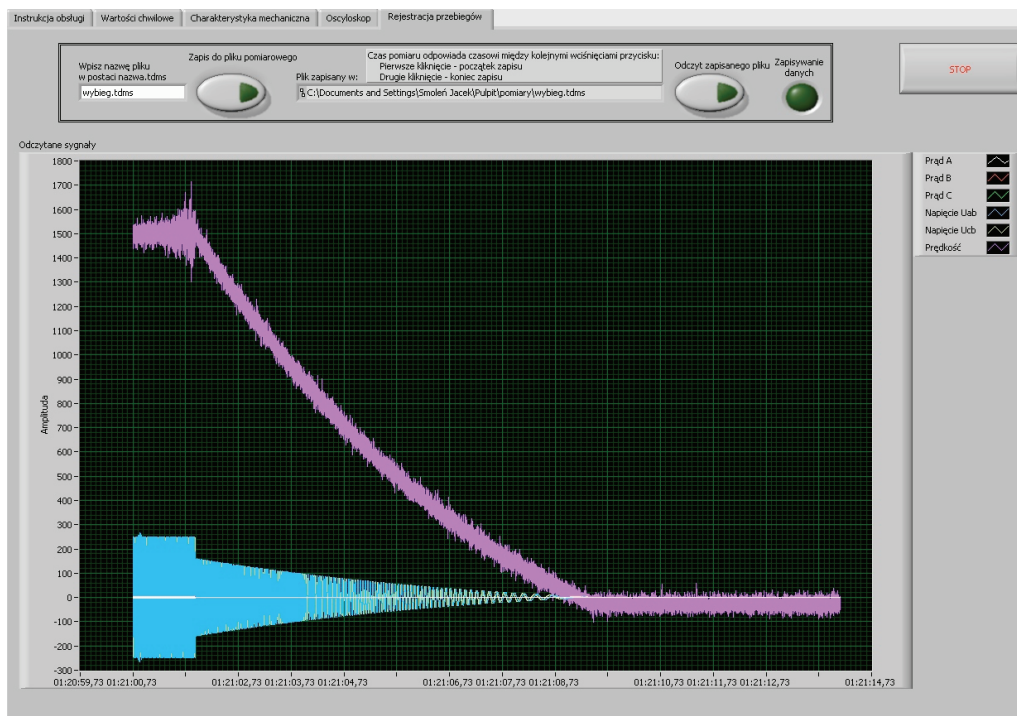
Po otrzymaniu pożądaných charakterystyk można zapisać wykresy do pliku przyciskiem *ZAPIS*.



Rys. 7. Zakładka IV (Oscyloskop – przebiegi czasowe prądów i napięć)

Czwarta zakładka aplikacji (rys. 7) daje użytkownikowi możliwość obserwacji przebiegów czasowych prądów fazowych i napięć międzyfazowych w jednym okresie mechanicznym. Pozwala to zrozumieć zasadę działania przekształtnikowego układu napędowego. W celu uzyskania czytelniejszych przebiegów zastosowano filtr dolno-przepustowy. Częstotliwość odcięcia filtra można regulować pokrętkiem *Częstotliwość odcięcia*. Możliwe jest także wyświetlenie sygnałów niefiltrowanych. Częstotliwość próbkowania karty pomiarowej została ustawiona na 20 [kHz]. Ustawienie wyższej częstotliwości próbkowania wiąże się z większym obciążeniem procesora, co powoduje znaczny spadek płynności działania programu. Tak jak i w poprzednich zakładkach możliwe jest zapisanie wykresu do pliku.

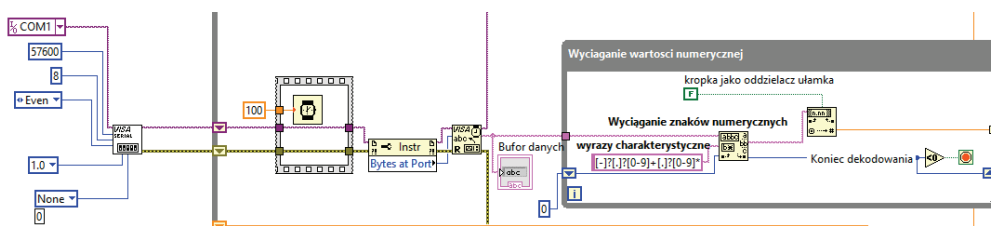
Piąta zakładka aplikacji (rys. 8) daje użytkownikowi możliwość rejestracji przebiegów sygnałów pomiarowych w stanach dynamicznych. Należy wpisać nazwę pliku do którego mają zostać zapisane sygnały a następnie rozpocząć proces zapisywania. Poprawna rejestracja przebiegów zmiennych jest sygnalizowana diodą *Zapisywanie danych*. Aby dokonać weryfikacji pomiarów należy nacisnąć przycisk *Odczyt zapisanego pliku*. Zapisane przebiegi zostaną wyświetlone na wykresie.



Rys. 8. Zakładka V (Rejestracja przebiegów)

Program składa się z pętli głównej, w której umieszczone są wszystkie elementy składowe użyte do stworzenia aplikacji. Takie rozwiązanie pozwoliło na uniezależnienie każdej z zakładek, a operacje wykonywane w jednej z nich nie mają wpływu na funkcjonowanie pozostałych.

Pomiar momentu mechanicznego odbywa się za pomocą momentomierza Torque Link II połączonego z komputerem łączem RS232. Aby można było wykorzystać otrzymywany strumień danych należy go poprawnie rozkodować. Na schemacie blokowym z rys. 9 pokazano część programu odpowiadającą za odczyt danych z portu COM1 oraz zamianę kodu ASCII na wartości liczbowe.



Rys. 9. Schemat blokowy pomiaru momentu mechanicznego

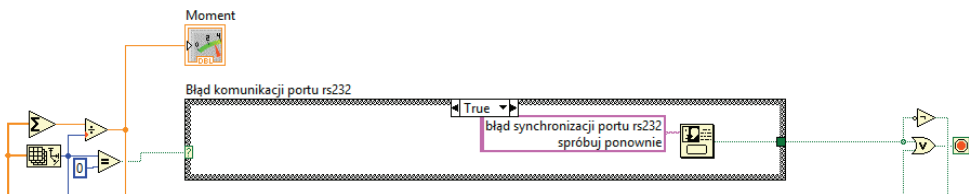
Blok *VISA serial* odpowiada za poprawną konfigurację portu COM1. Do konfiguracji użyto domyślne wartości z instrukcji obsługi momentomierza [4]. Blok *VISA serial* został umieszczony poza pętlą programową aby otwierał port tylko przy uruchomieniu programu, a nie w każdej jego iteracji.

Po wejściu do pętli programowej następuje wstrzymanie programu na 100 [ms]. Zapobiega to odczytywaniu pustych strumieni danych, które powodowałyby błędy odczytu.

Blok *Instr* odczytuje liczbę bajtów otrzymaną przez port COM1, a następnie wysyła liczbę bajtów do *VISA Read*. Teoretycznie przez okres 100 [ms], przy taktowaniu momentomierza 50 [Hz], program zarejestruje 5 odczytów. Jednak ze względu na inne bloki funkcyjne znajdujące się w pętli głównej czas wykonania jednej iteracji programowej jest zmienny. Zastosowanie bloku funkcyjnego *Instr* w połączeniu z blokiem *VISA Read* zwiększa elastyczność programu na wahania czasu jednej iteracji programowej.

Po odczycie danych przez blok *VISA Read* otrzymujemy macierz w której zawarte są odczytane wartości momentu w kodzie ASCII w postaci +/-00.000 Nm. Aby możliwe było użycie wartości momentu trzeba ją rozkodować jako wartość numeryczną. Jest to realizowane przez pętlę *Wyciąganie wartości numerycznej*. Blok funkcyjny *Match Pattern* opisany na schemacie jako *Wyciąganie znaków numerycznych* filtruje kolejne wiersze macierzy porównując je do wyrazów charakterystycznych podanych na wejście bloku funkcyjnego. Tak wyselekcjonowane wiersze trafiają do bloku funkcyjnego *String To Number*, który zamienia wartość tekstową na wartość liczbową. Gdy funkcja *Match Pattern* skończy filtrować wszystkie odczytane wartości podaje liczbę -1 na wyjście opisane jako *Koniec dekodowania*. Liczba -1 zostaje przyrównana do zera, a ponieważ jest mniejsza od zera, pętla *Wyciąganie wartości numerycznej* zatrzymuje się, aż nie zostanie ponownie uruchomiona w kolejnej iteracji programowej.

Po takim procesie otrzymuje się macierz 1-wymiarową z odczytanymi wartościami momentu mechanicznego. Macierz ta trafia do kolejnych bloków funkcyjnych przedstawionych na rys. 10.



Rys. 10. Schemat blokowy uśredniania wartości momentu oraz wyświetlania błędu synchronizacji

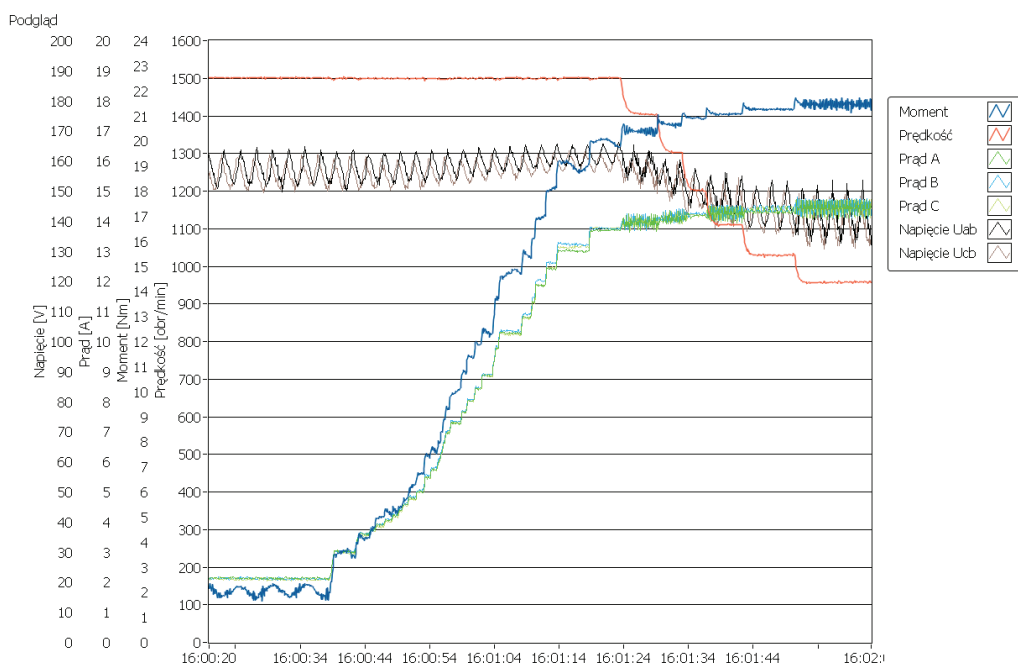
Kolejnym etapem jest zamiana macierzy wartości momentu mechanicznego na pojedynczą wartość liczbową. Realizowane jest to poprzez zsumowanie wszystkich wartości i podzielenie otrzymanej liczby przez rozmiar macierzy. Tak uśredniona

wartość trafia do wskaźnika momentu umieszczonego w zakładce III oraz do pozostałych bloków funkcyjnych, które wykorzystują wartość momentu mechanicznego.

W przypadku, gdy z jakiegoś powodu wartości momentu nie są dostarczane do portu COM1 (np. wyłączony momentomierz, odłączony kabel RS232) to rozmiar macierzy będzie równy 0 i zostanie uruchomiona pętla warunkowa *Błąd komunikacji portu rs232*. Efektem tego będzie wyświetlenie wiadomości tekstowej „błąd synchronizacji portu rs232, spróbuj ponownie” i zatrzymanie pętli programowej.

4. PRZYKŁADOWE WYNIKI

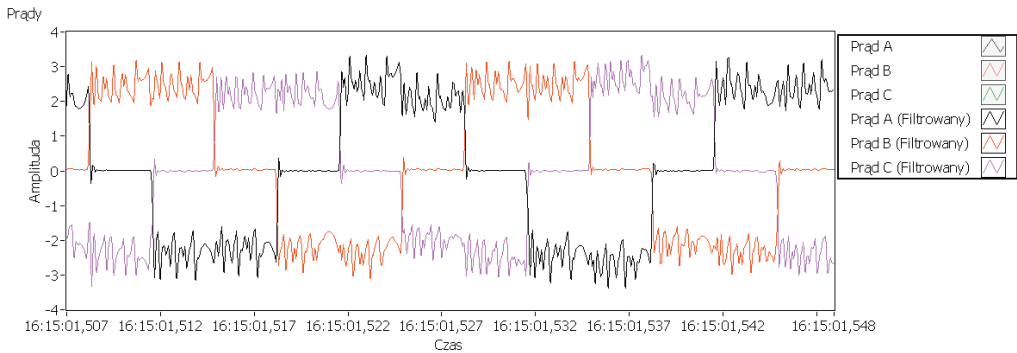
Poniżej przedstawiono wykresy i charakterystyki pomiarów wykonanych na stanowisku do badania przekształtnikowego układu napędowego z silnikiem bezszczotkowym prądu stałego. W badaniach korzystano wyłącznie z zaprojektowanego programu pomiarowego.



Rys. 11. Podgląd sygnałów wejściowych przy stopniowo zwiększającym obciążeniu

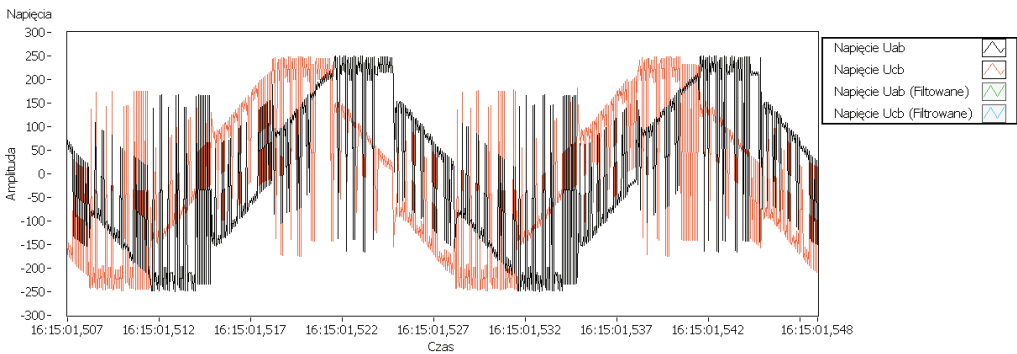
Na rys. 11 przedstawiono wyniki uzyskane dla stopniowego zwiększania obciążenia silnika PM BLDC pracującego z prędkością zadaną 1500 [obr/min]. Na wykresie wyraźnie widać wprost proporcjonalną zależność momentu mechanicznego od prądów

fazowych. Gdy wartość prądu osiągnie wartość „prądu odcięcia” można zauważyć spadek wartości napięcia. Na rysunku widoczne są oscylacje wartości skutecznych napięcia i momentu w stanach ustalonych spowodowane źle dobranymi nastawami regulatora PI w układzie sterowania.



Rys. 12. Przebiegi prądów fazowych (prędkość 1500 [obr/min], silnik pracujący bez obciążenia)

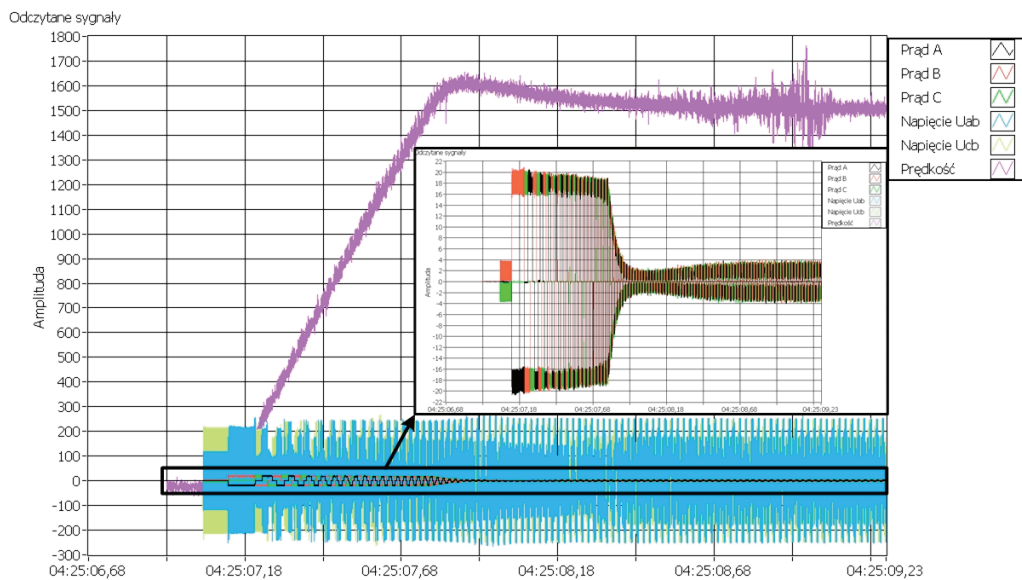
Na rysunkach 12 i 13 przedstawiono przebiegi czasowe napięć i prądów dla jednego cyklu elektrycznego silnika. Można na nich zaobserwować kolejne kroki komutacji elektronicznej.



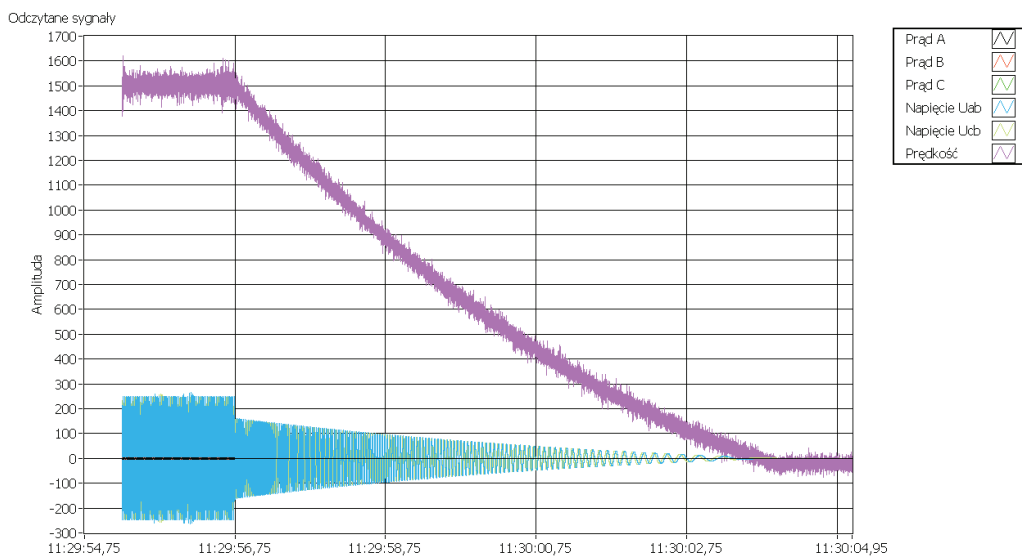
Rys. 13. Przebiegi napięć międzyfazowych (prędkość 1500 [obr/min], silnik pracujący bez obciążenia)

Na rysunku 14 pokazano przebiegi prądów fazowych, napięć międzyfazowych oraz prędkości obrotowej zarejestrowane podczas rozruchu silnika. Z wykresów można wywnioskować jak przekształtnik realizuje zadanie rozruchu. Warto zauważyć, że po zadaniu prędkości obrotowej falownik nie wymusza maksymalnej wartości prądu od samego początku. Od zasilania silnika do pierwszej zmiany stanów komutacji prąd jest ograniczony do 1/5 wartości maksymalnej. Dopiero po pierwszej zmianie komu-

tacyjnej prąd rośnie do wartości maksymalnej. Może być to funkcja ochronna przekształtnika w przypadku zablokowania wirnika. Po osiągnięciu zadanej prędkości, wartość prądu maleje, a kontrolę przejmuje regulator PI prędkości.



Rys. 14. Rozruch silnika PM BLDC – przebiegi czasowe prądów, napięć, prędkości



Rys. 15. Wybieg silnika PM BLDC – przebiegi czasowe prądów, napięć, prędkości

Rysunek 15 przedstawia przebiegi prądów fazowych, napięć międzyfazowych oraz prędkości obrotowej podczas wybiegu silnika. W chwili odcięcia zasilania wartości prądów momentalnie spadają do zera, jednak wartości napięć maleją proporcjonalnie do wartości prędkości obrotowej. Zjawisko to tłumaczy fakt, że wirnik silnika jest wyposażony w magnesy trwałe, których strumień indukuje napięcie w uzwojeniach stojana. Wraz ze spadkiem prędkości obrotowej, prędkość wirowania pola magnetycznego magnesów trwałych również maleje, a co za tym idzie maleje też napięcie przez nie indukowane.

5. PODSUMOWANIE

Opracowane w środowisku LabVIEW oprogramowanie znacznie rozszerzyło możliwości badawcze i dydaktyczne stanowiska laboratoryjnego. Czas niezbędny do wykonania pomiarów potrzebnych do wykreślenia charakterystyki mechanicznej jest znacznie krótszy niż w przypadku wykonywania pomiarów tradycyjną metodą. Możliwe stało się rozszerzenie zakresu badań laboratoryjnych silnika BLDC. Rejestracja przebiegów dynamicznych, obserwacja sygnałów pomiarowych i ich zmiana podczas regulacji obciążenia i prędkości pozwala na skuteczne monitorowanie pracy napędu. Realizacja w sposób automatyczny dokumentacji z badań istotnie skraca badania laboratoryjne. Konstrukcja oprogramowania umożliwiła poszerzenie jego możliwości funkcjonalnych np. o funkcje diagnostyczne.

LITERATURA

- [1] PADMARAJA YEDAMALE, *AN885 Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals*, Microchip Technology, Inc., 2003.
- [2] SKÓRA M., *Porównanie strategii sterowania prądem silnika PM BLDC. Badania symulacyjne*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 69, Seria: Studia i Materiały, Nr 33, Oficyna Wydawnicza PWr., Wrocław 2013, 344–356.
- [3] ZAWIRSKI K., DESKUR J., KACZMAREK T., *Automatyka napędu elektrycznego*, Politechnika Poznańska, Poznań 2012.
- [4] FAST Technology, User Manual TORQUE LINK II Series 9100, Version 1.0.

MONITORING OF THE PM BLDC DRIVE OPERATION USING THE LABVIEW ENVIRONMENT

Possibility of the LabVIEW environment application to measurements automation for PM BLDC motor drive system is presented in this paper. Developed program allows recording basic measurement signals such as: currents, phase-to-phase voltages, torque and rotational speed. The additional advantage of the program is a possibility to save the measurement data both in static and dynamical states of the operation. The created program also allows plotting mechanical characteristic of the tested motor. Application of the LabVIEW allows easy expansion of the program with additional functions, such as tests reports generation, creating data base with performed tests, etc.