

Marcin SKÓRA\*

## **STANOWISKO DO BADANIA UKŁADÓW NAPĘDOWYCH Z SILNIKIEM PM BLDC**

W pracy przedstawiono strukturę i możliwości stanowiska do badań silników bezszczotkowych prądu stałego z magnesami trwałymi (PM BLDC). Stanowisko umożliwia realizację badań napędów z silnikami PM BLDC w różnych układach sterowania, w warunkach normalnej pracy oraz w wybranych stanach awaryjnych. W szczególności na stanowisku możliwe jest testowanie metod detekcji i identyfikacji uszkodzeń oraz ich kompensacji. Stanowisko wykorzystuje wydajny procesor DSP typu DS1103, współpracujący z oprogramowaniem sterująco-diagnostycznym na komputerze PC. W artykule omówiono budowę sprzętową stanowiska, oprogramowanie kontrolno-diagnostyczne oraz przedstawiono przykładowe wyniki badań.

### **1. WSTĘP**

W ostatnich latach zaobserwować można wzmożone zainteresowanie pojazdami elektrycznymi i hybrydowymi, począwszy od autobusów i ciężarówek, przez samochody osobowe, po rowery, wózki inwalidzkie, czy hulajnogi. Z jednej strony wynika to z trendów proekologicznych, a z drugiej – z możliwości technicznych współczesnych mikrokontrolerów i układów półprzewodnikowych mocy. W związku z tym uwaga ośrodków naukowych i badawczo-rozwojowych skupia się na opracowywaniu nowych metod sterowania silnikami elektrycznymi, układami zarządzania energią i całymi pojazdami. Szczególna uwaga poświęcana jest kwestiom szeroko pojętego bezpieczeństwa, np. poprzez detekcję awarii przeróżnych podzespołów, w tym elektrycznych, takich jak czujniki czy tranzystory mocy, a następnie opracowaniu postępowania minimalizującego skutki awarii. Kwestia bezpieczeństwa jest szczególnie istotna w pojazdach z silnikami PM BLDC przeznaczonymi dla osób niepełnosprawnych. Również w przypadku pojazdów poruszających się po drogach publicznych (rowery, skutery elektryczne) oraz napędach pomp, wentylatorów, itp. bardzo ważna

---

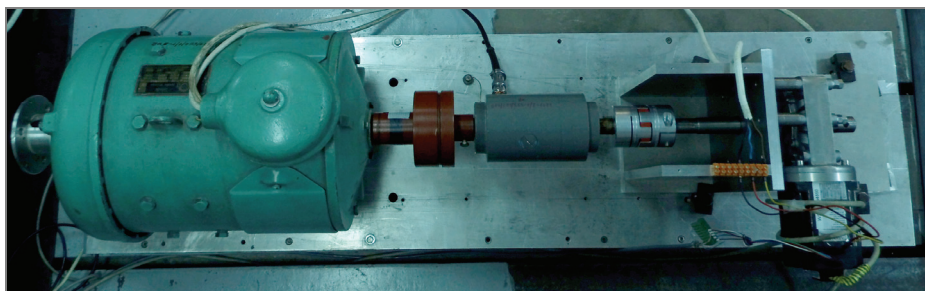
\* Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, Politechnika Wroclawska, ul. Smoluchowskiego 19, 50-370 Wrocław, e-mail: Marcin.Skora@pwr.edu.pl.



- komputer PC z oprogramowaniem ControlDesk,
- maszyna obcowzbudna prądu stałego z czterokwadrantowym tyrystorowym zespołem napędowym prądu stałego DML-0030/BN333, skonfigurowanym do pracy w trybie regulacji momentu elektromagnetycznego,
- zasilacz prądu stałego,
- momentomierz o nominalnym zakresie 50 Nm,
- układy pomiarowe prądów fazowych, napięć międzyfazowych, prądów i napięć obwodu pośredniczącego komutatora elektronicznego, z dolnoprzepustowymi filtrami antyaliasingowymi.

Dodatkowym wyposażeniem stanowiska badawczego jest oscyloskop oraz karta pomiarowa NI-9215 podłączona do komputera PC, do analizy badanych sygnałów w środowisku LabView.

Do kołnierza badanego silnika PM BLDC dołączona została przekładnia, w związku z czym należało zaprojektować dodatkowy element mocujący, pozwalający na mechaniczne sprzęgnięcie badanego silnika z maszyną obciążającą. Wygląd zestawu laboratoryjnego przedstawiono na rysunku 2.

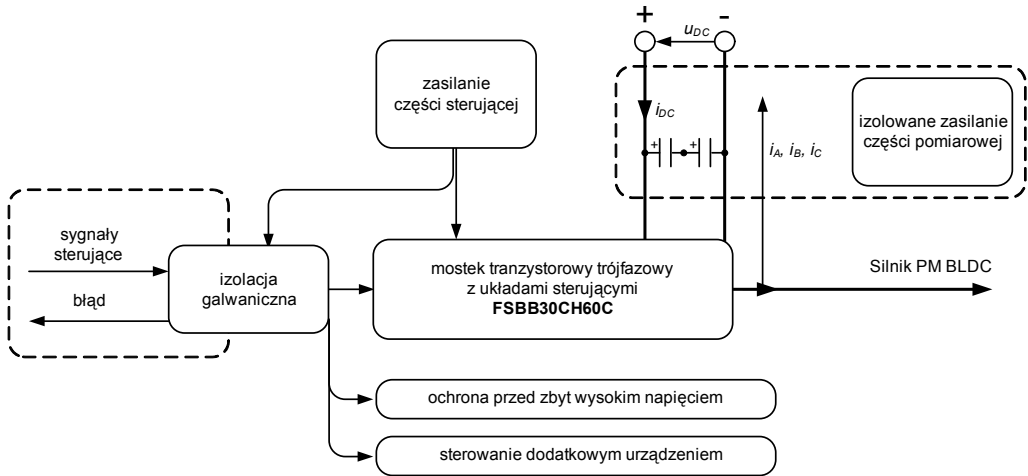


Rys. 2. Wygląd zestawu maszynowego

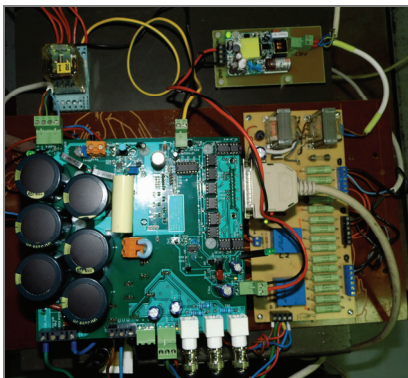
## 2.2. CHARAKTERYSTYKA TECHNICZNA STANOWISKA

Dla prowadzenia badań układów napędowych z silnikami elektrycznymi kluczowe są dwa elementy: badany silnik oraz odpowiedni do danego zadania układ zasilający. W przypadku analizy układu sterowania odpornego na wybrane uszkodzenia w strukturze komutatora elektronicznego czy też dyskretnych czujników wyznaczających pozycję wirnika należy dysponować układem zasilającym, w którym możliwe będzie bezpośrednie sterowanie kluczami tranzystorowymi. Do tego celu opracowano układ o topologii falownika napięciowego (rys. 3). Oparty został on o inteligentny moduł mocy typu FS230CH60C (dopuszczalny prąd ciągły: 30 A, maksymalny w szczycie: 60 A), zawierający w sobie tranzystory mocy, ich układy wyzwalające i zabezpieczenia. Wygląd układu przedstawia rysunek 4. Układ komutatora elektronicznego (rys. 3) może być rozbudowany o dodatkowe urządzenia sterowane. Przykładowym dodatko-

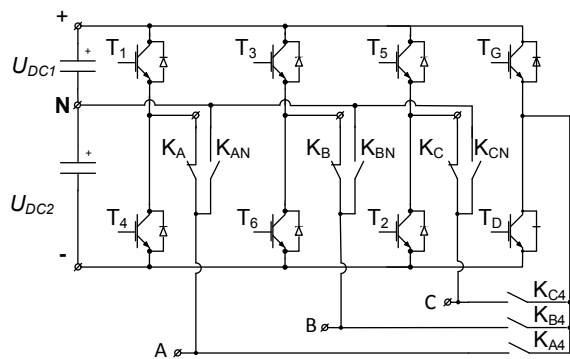
wym urządzeniem (rys. 3) jest przełącznik służący do rekonfiguracji układu w ramach kompensacji uszkodzonych tranzystorów. Rekonfiguracja może polegać na przełączeniu pasma silnika z gałęzi z uszkodzonym łącznikiem do gałęzi redundantnej lub też do punktu neutralnego zasilania [2], [3]. Na rysunku 5 przedstawiono topologię falownika napięciowego trójfazowego, w którym możliwe są oba sposoby rekonfiguracji, dla każdego pasma.



Rys. 3. Schemat komutatora elektronicznego z układami zasilającymi i czujnikami pomiarowymi



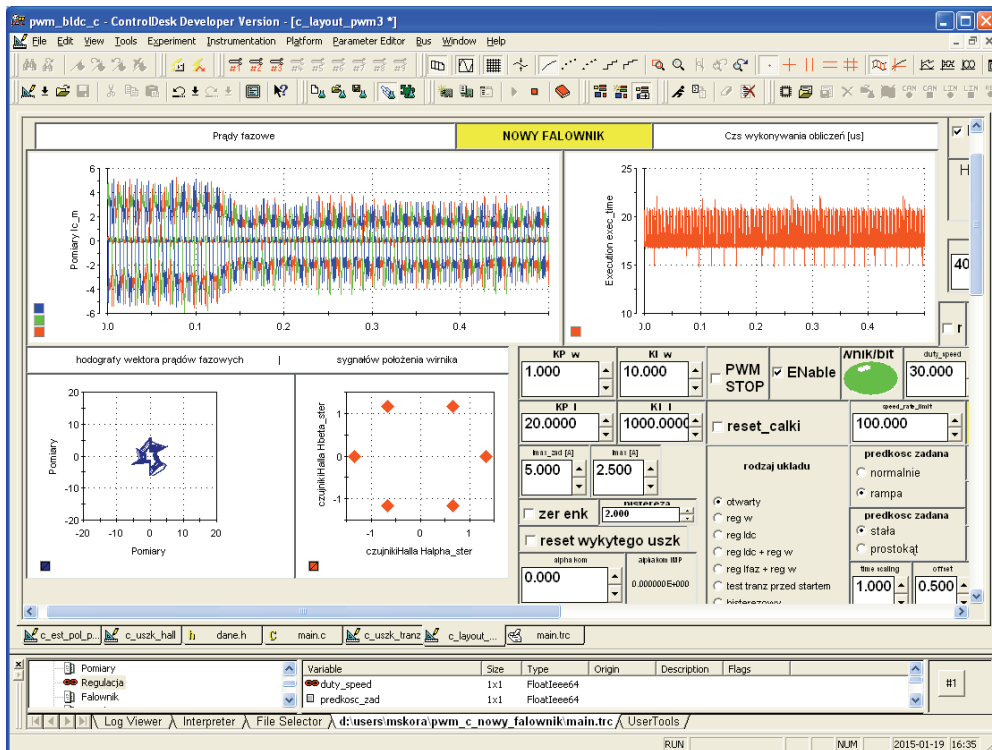
Rys. 4. Widok wykonanego komutatora elektronicznego z układami zasilającymi i czujnikami pomiarowymi



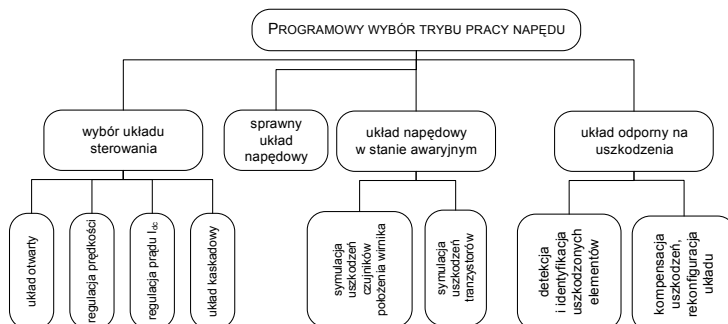
Rys. 5. Topologia trójfazowego falownika napięciowego, z opcjonalną rekonfiguracją połączeń w każdej fazie

### 2.3. OPIS OPROGRAMOWANIA KONTROLNO-DIAGNOSTYCZNEGO

Wykorzystanie platformy szybkiego prototypowania opartej o procesor sygnałowy DS1103 firmy dSPACE GmbH umożliwia zarówno na tworzenie oprogramowania sterującego (w języku C lub też wykorzystanie automatycznej generacji kodu ze ścią-



Rys. 6. Główny fragment interfejsu użytkownika

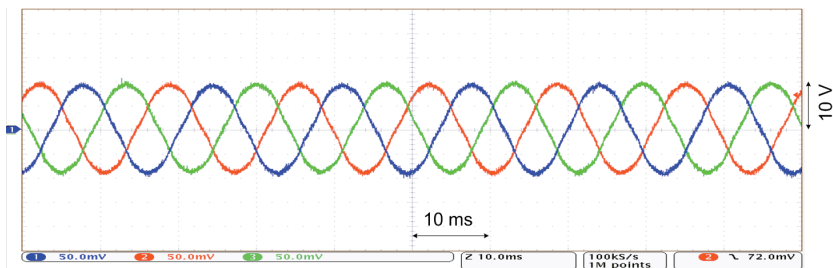


Rys. 7. Schemat ideowy struktury oprogramowania sterującego-diagnostycznego stanowiska badawczego

dowiska Matlab firmy MathWorks), jak i na tworzeniu interfejsu kontrolno-pomiarowego dostępnego dla użytkownika (w środowisku ControlDesk). Wybór języka programowania (tekstowy – C lub graficzny/blokowy – Matlab) należy do programisty. Na rysunku 6 przedstawiono główny fragment interfejsu użytkownika. Aktualne oprogramowanie opracowano w języku C. Umożliwia ono (rys. 7) pracę silnika PM BLDC w otwartym układzie sterowania, w trybie regulacji prędkościowej/momentowej oraz kaskadowej. Ponadto zaimplementowano symulację występowania stanów awaryjnych, takich jak brak sterowania wybranych tranzystorów mocy oraz brak zmian sygnałów z czujników położenia mimo zmiany pozycji wirnika [7]. Opracowano również wybrane metody diagnostyki i identyfikacji uszkodzonych elementów. Oprogramowanie ma charakter elastyczny (modułowy) i może zostać rozbudowane o inne metody diagnostyki i kompensacji wykrytych awarii.

### 3. PRZYKŁADOWE WYNIKI BADAŃ

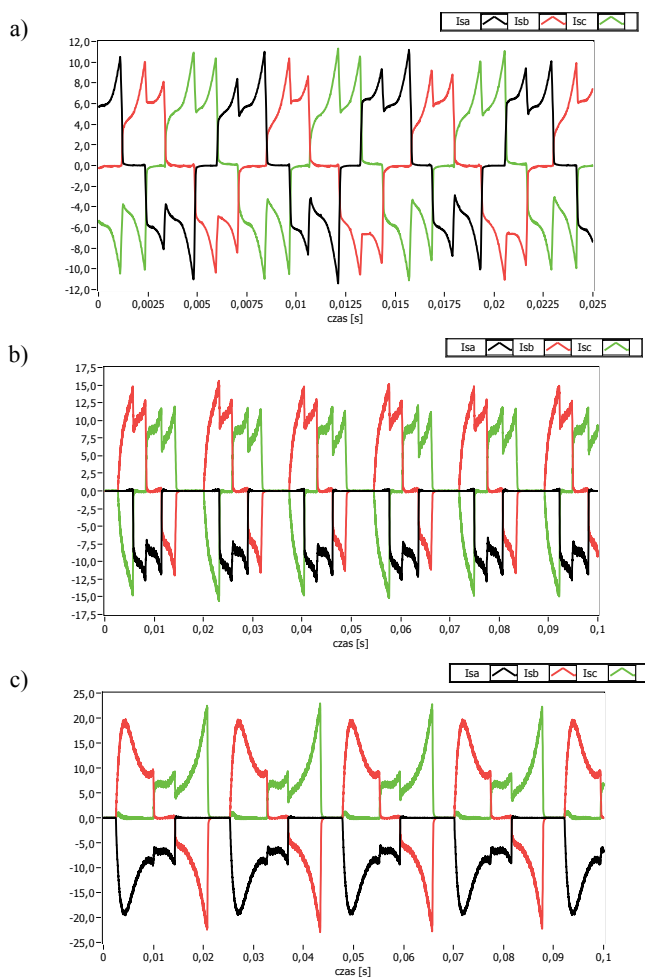
Opracowane stanowisko umożliwia realizację różnego rodzaju badań laboratoryjnych (rys. 7). Poniżej przedstawiono przykłady wyników badań. Między innymi możliwe jest sprawdzenie kształtu indukowanych napięć międzyfazowych podczas napędzania badanego silnika PM BLDC maszyną obciążającą (rys. 8).



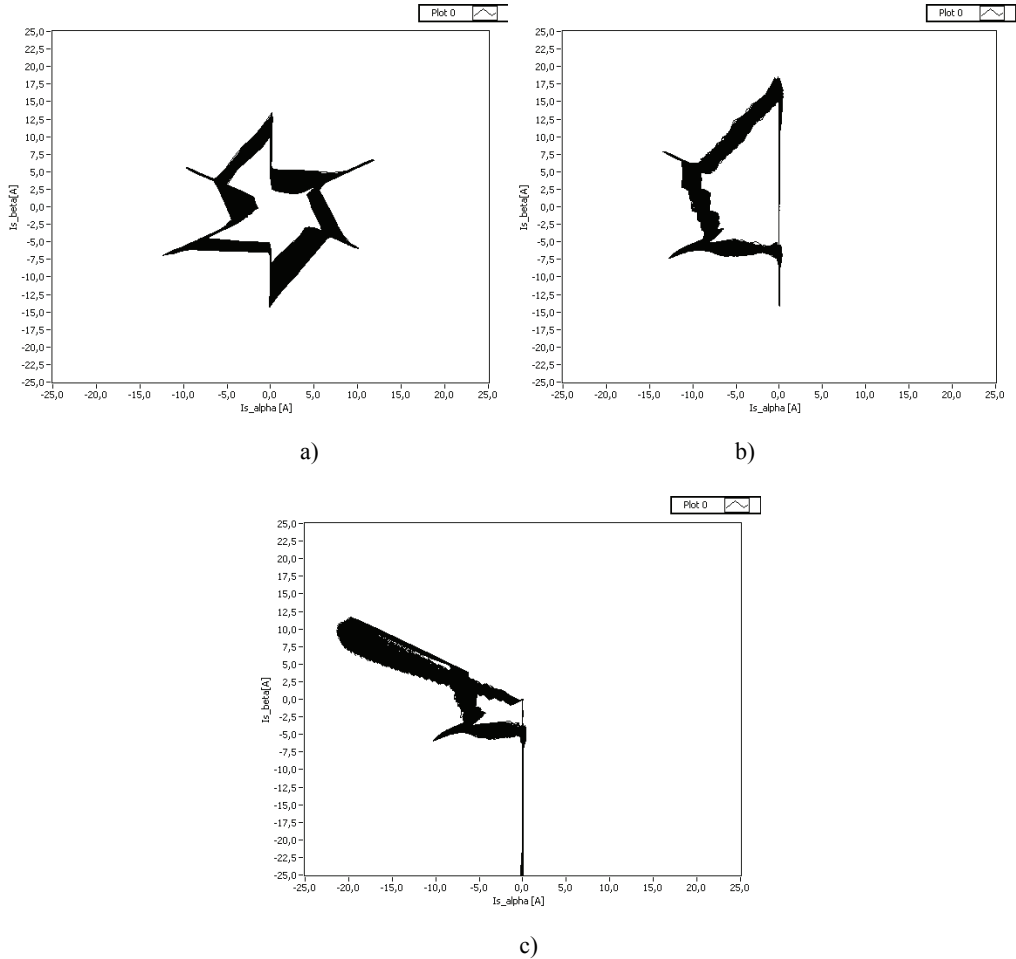
Rys. 8. Przebiegi zarejestrowanych wyindukowanych napięć międzyfazowych podczas napędzania badanego silnika

Na rysunku 9 przedstawiono przebiegi prądów fazowych, natomiast na rysunku 10 hodografy wektora prądów fazowych na płaszczyźnie  $\alpha$ - $\beta$ , w różnych stanach pracy napędu, podczas symulacji różnego rodzaju awarii. Podkreślić należy, że stany awaryjne na stanowisku badawczym generowane są z poziomu oprogramowania, bez niszczenia fizycznego elementu. Uszkodzenia tranzystorów polegające na braku ich przewodzenia symulowane są przez niewysterowanie bramki tranzystora, natomiast uszkodzenia czujnika położenia wirnika – przez przyjęcie ustalonej wartości sygnału wyjściowego czujnika, wykorzystywanej w układzie sterowania. Podejście takie zapewnia nieinwazyjność i elastyczność w wyborze elementu ulegającego symulowanej awarii.

Na rysunkach 9b oraz 9c można wyróżnić część okresu, podczas której następuje zanik prądów fazowych i w konsekwencji momentu obrotowego generowane przez silnik PM BLDC. Z rysunku 9c wynika również, że wykrycie nieprawidłowości w sygnałach czujników położenia wirnika i kompensacja uszkodzenia powinny nastąpić możliwie szybko, zanim prądy fazowe osiągną niebezpiecznie wysokie poziomy amplitud. W przeciwnym wypadku może dojść do awaryjnego zatrzymania napędu, co byłoby niebezpieczne np. dla osoby poruszającej się pojazdem wyposażonym w tego rodzaju napęd.



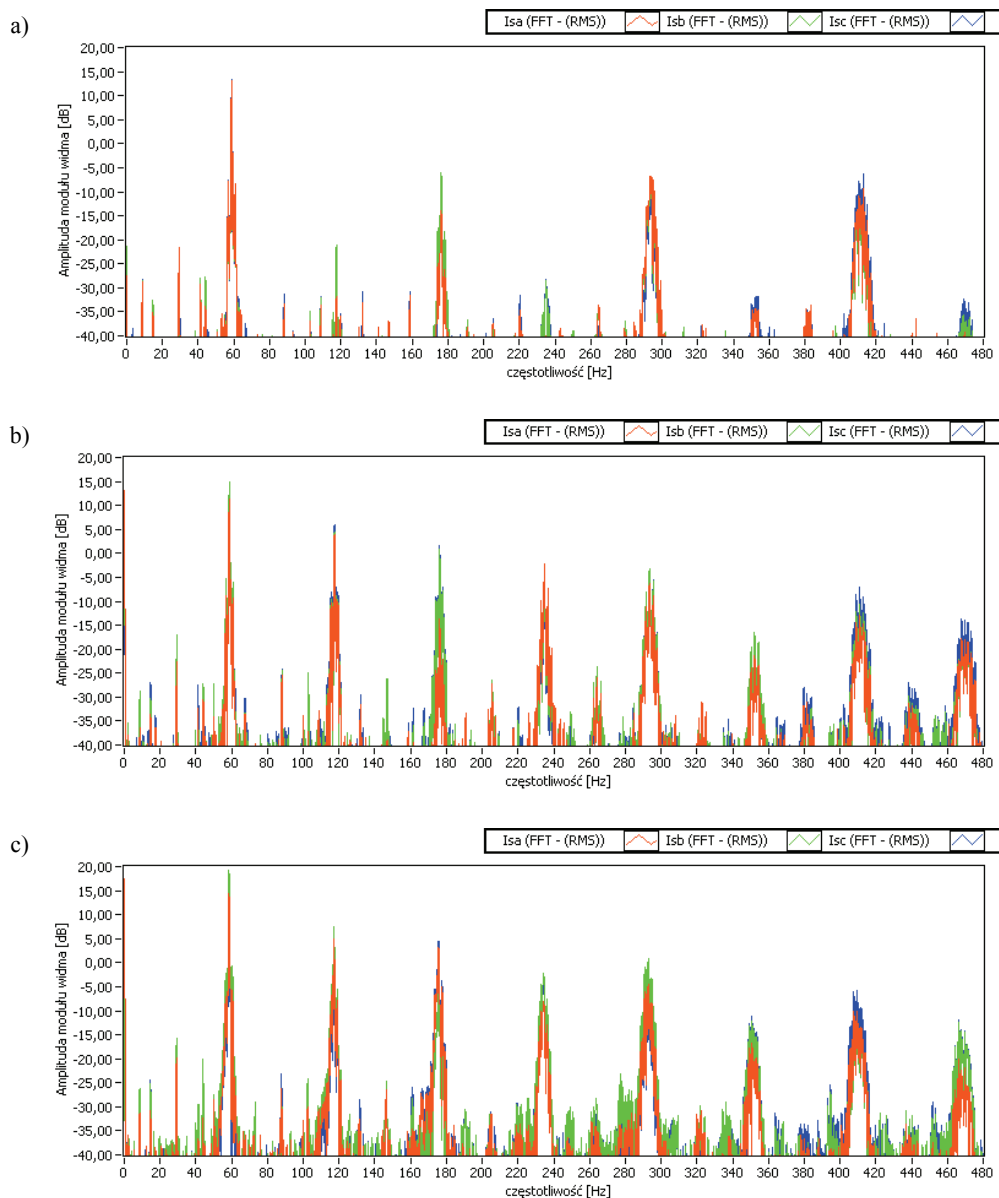
Rys. 9. Przebiegi prądów fazowych w kaskadowym układzie regulacji prędkości obrotowej z podporządkowaną regulacją prądu obwodu pośredniczącego: a) sprawny, obciążony silnik, 70% prędkości znamionowej, b) symulacja awarii (typu brak przewodzenia) tranzystora  $T_1$ , tj. górnego w fazie A, przy 30% prędkości znamionowej, c) symulacja awarii czujnika położenia  $H_A$ , wskazywany stan „0” niezależnie od kąta obrotu wirnika, przy 30% prędkości znamionowej



Rys. 10. Hodografy wektora prądów fazowych w stacjonarnym układzie  $\alpha$ - $\beta$ .  
Oznaczenia jak na rysunku 9

Korzystając z dodatkowego wyposażenia stanowiska (rys. 1) możliwa jest rejestracja wybranych sygnałów z wysoką rozdzielczością, dla potrzeb późniejszych obliczeń np. dla celów diagnostycznych. Na rysunku 11 przedstawiono wyniki analizy widmowej prądów fazowych w kaskadowym układzie regulacji prędkości obrotowej w przypadkach, gdy silnik pracował w układzie sprawnym i z uszkodzonym tranzystorem bądź czujnikiem położenia wirnika. Jak wynika z porównania rysunków 11a oraz 11b i 11c, po wystąpieniu tych uszkodzeń, w widmie prądów fazowych pojawiają się parzyste wielokrotności podstawowej częstotliwości prądów (tutaj: 60 Hz), wynikającej z prędkości obrotowej wirnika.





Rys. 11. Porównanie amplitud modułów widm prądów fazowych

w kaskadowym układzie regulacji prędkości obrotowej z podporządkowaną regulacją prądu

obwodu pośredniczącego, przy zadanej prędkości równej 30% prędkości znamionowej, w przypadku:

- a) sprawnego silnika, b) symulacji awarii (typu brak przewodzenia) tranzystora  $T_1$ , tj. górnego w fazie A,  
c) symulacji awarii czujnika położenia  $H_A$ , wskazujący stan „0” niezależnie od kąta obrotu wirnika

#### 4. PODSUMOWANIE

Przedstawione w pracy stanowisko umożliwia badanie metod sterowania silnikami PM BLDC, ze szczególnym uwzględnieniem stanów awaryjnych łączników tranzystorowych i czujników położenia wirnika. Modułowa budowa stanowiska pozwala na prowadzenie badań z wykorzystaniem innego (kompatybilnego) modułu mocy lub na innym zestawie maszynowym. Zastosowanie procesora DSP zapewnia swobodę w badaniach algorytmów sterowania, a wykorzystanie środowiska ControlDesk do wizualizacji wartości zmiennych programowych ułatwia analizę przebiegów i opracowywanie algorytmów detekcji, identyfikacji i kompensacji emulowanych uszkodzeń.

#### LITERATURA

- [1] BOGUSZ P., *Projekt i realizacja stanowiska do badań napędów dla lekkich pojazdów elektrycznych*, Przegląd Elektrotechniczny, 2014, nr 1, 16–19.
- [2] BYOUNG-KUK L., TAE-HYUNG K., EHSANI M., *On the feasibility of four-switch three-phase BLDC motor drives for low cost commercial applications: topology and control*, IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, Vol. 18, 164–172.
- [3] ERRABELLI R.R., MUTSCHLER P., *Fault-Tolerant Voltage Source Inverter for Permanent Magnet Drives*, IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, Vol. 27, No. 2, 500–508.
- [4] FAŚCISZEWSKI M., DYRCZ K.P., *Stanowisko do badania metod sterowania silnikami z magnesami trwałymi wykorzystujące mikrokontroler ARM*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 64, Seria: Studia i Materiały, Nr 30, 2010, 355–366.
- [5] KOWOL M., MYNAREK P., KOŁODZIEJ J., *Zastosowanie środowiska LABVIEW w badaniach silników z magnesami trwałymi*, Poznań University of Technology Academic Journals: Electrical Engineering, 2013, nr 75, 49–56.
- [6] SIKORA A., ZIELONKA A., *Układ zasilania silnika BLDC z uwzględnieniem, specyfiki napędu pojazdu drogowego*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, 2012, nr 3, 7–11.
- [7] SKÓRA M., KOWALSKI C.T., *Analiza wpływu uszkodzeń czujników na pracę napędu z silnikiem PM BLDC*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, 2014, nr 104, 37–42.

#### LABORATORY STAND TO INVESTIGATION OF PM BLDC MOTOR DRIVE

The paper presents the structure and capabilities of the laboratory stand prepared to investigation permanent magnet DC brushless motor drive (PM BLDC), in various operation conditions. The laboratory stand allows testing selected faults in PM BLDC motor drive, in particular testing methods for detection and identification of defects and their compensation. Laboratory stand uses a powerful DSP processor DS1103, working together with a control software on the PC. The article discusses the construction of hardware setup of laboratory stand and control-diagnostic software, and provides samples of results.