

Zbigniew KRZEMIŃSKI, Patryk STRANKOWSKI,
Jarosław GUZIŃSKI, Marcin MORAWIEC, Arkadiusz LEWICKI,
Grzegorz KOSTRO, Marek ADAMOWICZ*
Politechnika Gdańska - Wydział Elektrotechniki i Automatyki

Bezczujnikowa identyfikacja uszkodzeń w układzie napędowym z pięciofazowym silnikiem indukcyjnym klatkowym

W artykule przedstawiono zakres prac prowadzonych na Politechnice Gdańskiej w zakresie wielofazowych napędów elektrycznych. Pokazano jeden z realizowanych etapów prac - metodę identyfikacji zaburzeń w beczujnikowym układzie napędowym z pięciofazowym silnikiem indukcyjnym. Do identyfikacji uszkodzeń wykorzystano analizę estymowanego momentu obciążenia. W metodzie nie jest potrzebne instalowanie, żadnych dodatkowych czujników poza czujnikami standardowo instalowanymi w falowniku napięcia do pomiarów prądów i napięć. Przedstawiono zastosowany obserwator momentu obciążenia oraz wyniki badań eksperymentalnych.

1. WSTĘP

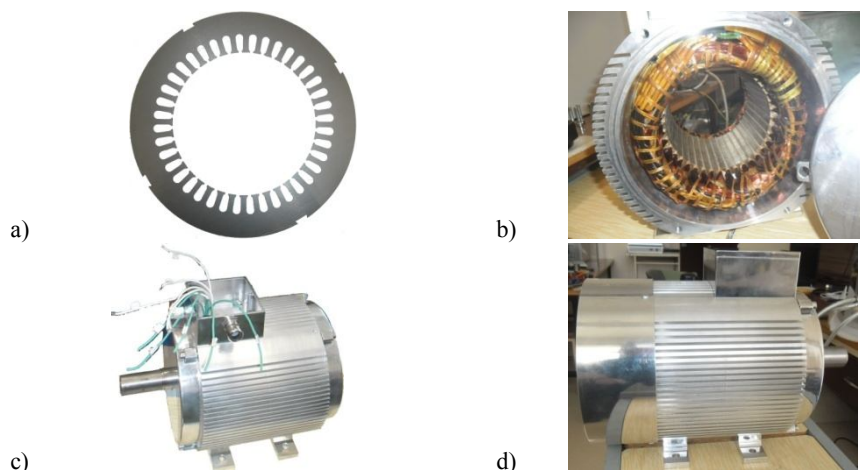
Zespół badawczy Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej zajmuje się od wielu lat napędami elektrycznymi z pięciofazowymi silnikami indukcyjnymi klatkowymi. Prace te prowadzone były i są w trzech projektach badawczych finansowanych przez Narodowe Centrum Nauki, pt. „*Bezczujnikowe sterowanie wielofazowymi silnikami indukcyjnymi z użyciem modeli multiskalarnych*”, „*Algorytmy sterowania, estymacji i diagnostyki dla napędów elektrycznych z wielofazowymi silnikami indukcyjnymi i filtrami wyjściowymi falowników napięcia*” oraz „*Bezczujnikowa identyfikacja uszkodzeń mechanicznych w wielofazowym układzie napędowym z filtrem sinusoidalnym*”. W ramach tych prac, m.in.:

- zaprojektowano i zbudowano kilka prototypów pięciofazowych silników indukcyjnych o mocy 5,5 kW oraz 7,5 kW,
- zbudowano pięciofazowe falowniki napięcia z tranzystorami IGBT ze sterowaniem z procesorem DSP u kładem FPGA,
- przygotowano nowy algorytm modulacji szerokości impulsów pięciofazowego falownika,
- opracowano algorytmy sterowania nieliniowego (multiskalarnego) oraz sterowania polowo zorientowanego pięciofazowymi silnikami indukcyjnymi z wykorzystaniem trzeciej harmonicznej strumienia magnetycznego,

* Prof. dr hab. inż. Zbigniew Krzemiński, prof. zw. PG, mgr inż. Patryk Strankowski, dr hab. inż. Jarosław Guziński, prof. nadzw. PG, dr hab. inż. Marcin Morawiec, dr hab. inż. Arkadiusz Lewicki, prof. nadzw. PG, dr inż. Marek Adamowicz
Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki
ul. Narutowicza 11/12; 80-233 Gdańsk
Email: zbigniew.krzeminski@pg.edu.pl, patryk.strankowski@pg.edu.pl,
jaroslaw.guzinski@pg.edu.pl, marcin.morawiec@pg.edu.pl, grzegorz@kostro@pg.edu.pl,
arkadiusz.lewicki@pg.edu.pl, marek.adamowicz@pg.edu.pl

- przygotowano obserwatory stanu strumienia wirnika, prędkości obrotowej i momentu elektromagnetycznego,
- opracowano algorytmy bezczujnikowej detekcji uszkodzeń mechanicznych w układzie napędowym z pięciofazowym silnikiem indukcyjnym (to zagadnienie opisano szerzej w dalszej części artykułu).

W prototypach pięciofazowych silników zaprojektowano nowe pakiety blach stojana o różnej liczbie i kształcie żłobków. Nowe uzwojenia pięciofazowe przygotowano dla różnych napięć i częstotliwości znamionowej silnika. W dotychczas zbudowanych modelach konstrukcję klatki wirnika pozostawiono taką jak dla silnika trójfazowego. Opracowywany jest też wirnik specjalnie zaprojektowany do pięciofazowego silnika. Do budowy maszyn użyto standardowe korpusy trójfazowych maszyn a dla jednego z prototypów przygotowano całkowicie nową obudowę aluminiową – rys. 1.



Rys. 1. Prototyp pięciofazowego silnika indukcyjnego klatkowego: a) widok blachy stojana, b) uzwojony pakiet stojana, c) silnik z widocznymi wyprowadzeniami uzwojeń, d) gotowy prototyp pięciofazowego silnika indukcyjnego

Efektem prowadzonych prac jest publikacja książkowa [1] oraz artykuły naukowe opublikowane na konferencjach krajowych i zagranicznych oraz w czasopiśmie [2-11] i zgłoszenie patentowe [12]. Nawiązano też współpracę z przemysłem z jedną z dużych firm krajowych, aby opracować napęd autobusu elektrycznego z pięciofazowym silnikiem indukcyjnym. Ponadto w ramach współpracy zespołu projektowego studentów i pracowników naukowych Politechniki Gdańskiej z Grupą Energa S.A. oraz firmą MMB Drives realizowany jest projekt samochodu elektrycznego Mercedes Benz klasy ML z napędem na 4 koła z pięciofazowymi silnikami indukcyjnymi o łącznej mocy szczytowej ponad 60 kW i czterema falownikami napięcia.

2. BEZCZUJNIKOWA DETEKCJA ZABURZEŃ

Wiele obecnie prowadzonych prac naukowych poświęconych jest problemom monitorowania oraz detekcji uszkodzeń maszyn i napędów elektrycznych, m.in. uszkodzeń układu transmisji momentu napędowego [13]. Metody te w większości przypadków wymagają dodatkowych czujników, np. tensometrów. Powoduje to wzrost kosztów układów napędowych i większe prawdopodobieństwo występowania zakłóceń w wyniku rozbudowy okablowania układu. Poszukiwane są więc inne rozwiązania diagnostyczne, niewymagające dodatkowych czujników i dodatkowego okablowania [13, 16]. Rozwiązaniem takim może być użycie czujników prądu i napięcia standardowo instalowanych w falownikach. W wielu algorytmach sterowania silnikami indukcyjnymi stosowane są obserwatory stanu, w których na podstawie mierzonych prądów i napięć, estymowane są zmienne używane w algorytmach regulacji momentu elektromagnetycznego, strumienia magnetycznego i prędkości. Jeśli pozwalają na to możliwości obliczeniowe układu sterującego to możliwe jest wykorzystanie takiego obserwatora, z ewentualną jego rozbudową, w celach diagnostycznych. Obserwator może obliczać moment obciążenia, a przez analizę tego momentu można diagnozować uszkodzenia mechaniczne napędu elektrycznego [13].

Propozycję takiego rozwiązania przedstawiono w niniejszej pracy dla układu napędowego z pięciofazowym silnikiem indukcyjnym. W układzie napędowym wszystkie zmienne stanu, niezbędne do sterowania silnikiem, są obliczone w obserwatorze stanu na podstawie pomiarów prądów fazowych silnika i napięcia obwodu pośredniczącego przekształtnika. Jako układ regulacji silnikiem zastosowano metodę regulacji nieliniowej - multiskalarnej bez pomiaru prędkości [1, 4, 6]. W układzie sterowania zastosowany został obserwator prędkości Krzemińskiego [1, 14] pozwalający na estymację strumienia magnetycznego wirnika oraz prędkości wirnika, które są wielkościami regulowanymi. Dodatkowo wprowadzono obserwator momentu obciążenia, aby przez analizę tego momentu diagnozować ewentualne uszkodzenia układu transmisji momentu napędowego. Obserwator momentu obciążenia opisany jest zależnościami [10, 15, 16]:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -k_1 \\ 1 & -k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 k_2 J_M \\ (k_2^2 - k_1) J_M \end{bmatrix} \widehat{\omega}_r + \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} \widehat{T}_e \quad (1)$$

$$\widehat{T}_e = \widehat{\Psi}_{r\alpha} \widehat{i}_{s\beta} - \widehat{\Psi}_{r\beta} \widehat{i}_{s\alpha} \quad (2)$$

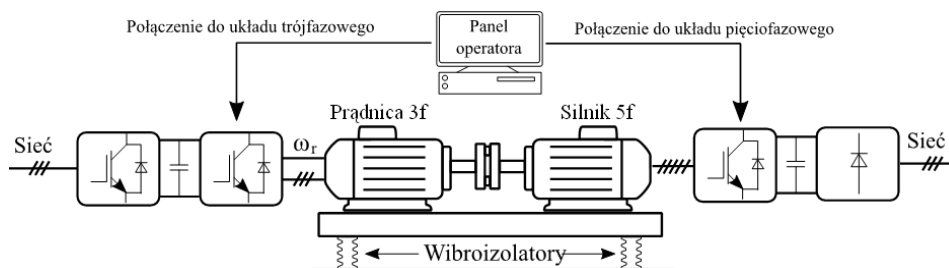
$$\widehat{T}_L = z_2 - k_{2L} J_M \widehat{\omega}_r \quad (3)$$

gdzie: z_1, z_2 - wewnętrzne zmienne stanu obserwatora, k_1, k_2 - współczynniki wzmacnienia, J_M - moment bezwładności silnika, $\widehat{\omega}_r$ - prędkość wirnika

obliczana w obserwatorze Krzezińskiego, \hat{T}_e – estymowany moment elektromagnetyczny, \hat{T}_L – estymowany moment obciążenia.

3. BADANIA EKSPERYMENTALNE

Badanie eksperymentalne zostały przeprowadzone na stanowisku badawczym składającym się z dwóch maszyn indukcyjnych o mocy 5.5 kW – maszyny pięciofazowej i maszyny trójfazowej. Struktura układu badawczego pokazana została na rys. 2



Rys. 2. Struktura układu badawczego

Maszyna pięciofazowa pracuje jako silnik z multiskalarnym układem sterowania bez pomiaru prędkości z obserwatorami prędkości i strumienia magnetycznego oraz obserwatorem momentu obciążenia (1)-(3). Druga maszyna pracuje jako trójfazowy generator indukcyjny ze sterowaniem multiskalarnym z pomiarem prędkości.

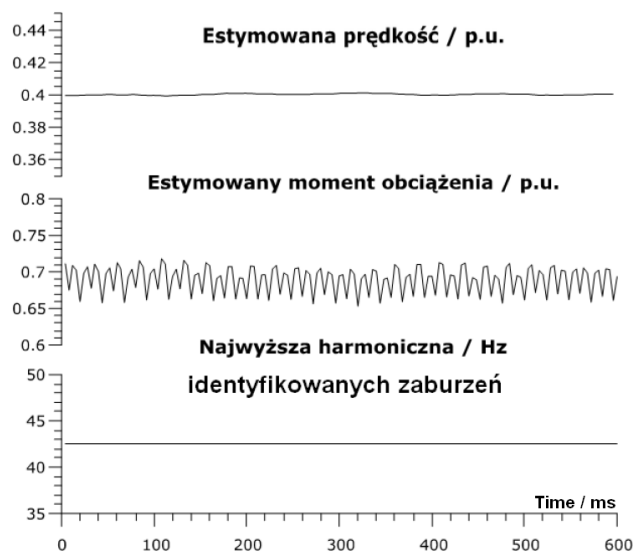
Zaburzenia w pracy układu napędowego, odpowiadające rzeczywistym uszkodzeniom układu mechanicznego, wprowadzane są w sposób sztuczny przez zmianę zadanego przebiegu momentu obciążenia prądnicy. Zadany moment obciążenia prądnicy zawiera składową stałą oraz składową zmienną o zadanej częstotliwości i amplitudzie odpowiadający charakterowi uszkodzeń układu mechanicznego napędu. Dzięki temu możliwe są badania właściwości diagnostycznych obserwatorów bez konieczności kłopotliwego wprowadzenia rzeczywistych uszkodzeń co znacznie ułatwia prowadzenie badań i umożliwia ich powtarzalność.

Obliczenia układu regulacji, obu obserwatorów oraz analiza harmoniczna estymowanego momentu obciążenia wykonywane są w czasie rzeczywistym przez procesor DSP. Przykładowe wyniki działania układu pokazano na rys.3.

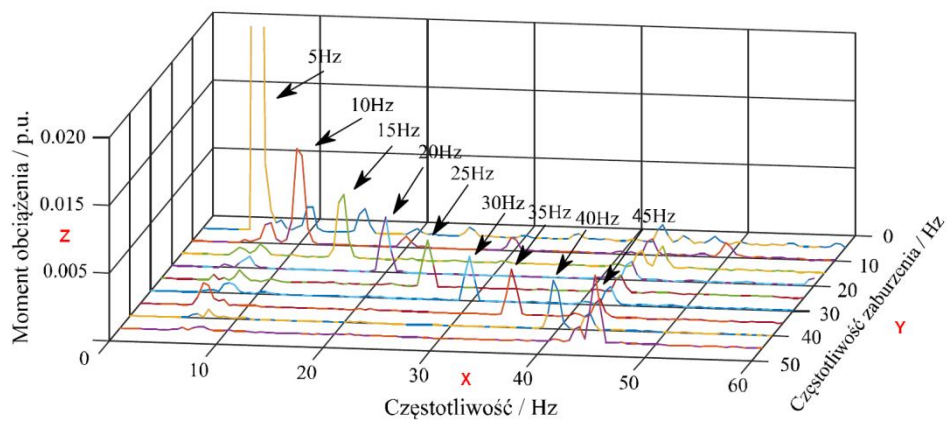
Dla przypadku, którego wyniki pokazano na rys. 3, wprowadzone zostało sztuczne zaburzenie o częstotliwości 42,5 Hz. Drgania te nie są widoczne w przebiegu estymowanej prędkości obrotowej wirnika. Pojawiają się jednak w estymowanym momencie obciążenia. Dolny przebieg przedstawia wynik obliczeń najwyższej zidentyfikowanej harmonicznej estymowanego momentu

obciążenia. Zidentyfikowana częstotliwość zaburzeń odpowiada częstotliwości zaburzenia wprowadzonej sztucznie przez generator indukcyjny.

Przykładowe wyniki badania układu polegające na identyfikacji zaburzeń dla różnych częstotliwości drgań pokazano na rys. 4.



Rys. 3. Przykładowe wyniki działania obserwatorów prędkości, momentu i detekcji częstotliwości drgań dla układu sterowania multiskalarnego bez pomiaru prędkości (p.u. – jednostki względne)



Rys.4 Wyniki analizy FFT estymowanego momentu obciążenia

Na wykresie z rys. 4 na osi Y oznaczone są częstotliwości sztucznie wprowadzonych zaburzeń, natomiast na osiach X i Z identyfikowane częstotliwości i amplitudy zaburzeń. Można zauważyć, że wszystkie

prowadzone zaburzenia zostały wykryte przy użyciu zastosowanych obserwatorów prędkości kątowej i momentu obciążenia.

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W artykule przedstawiono wybrane rezultaty jednej z prac nad układami napędowymi z pięciofazowym silnikiem indukcyjnym realizowanymi w projektach badawczych. Przedstawiona została możliwość identyfikacji zaburzeń w takim układzie napędowym przy sterowaniu multiskalarnym bez pomiaru prędkości obrotowej. Zaburzenia były generowane sztucznie przez zmiany amplitudy i częstotliwości składowej zmiennej zadanego momentu obciążenia. Dzięki analizie FFT estymowanego momentu obciążenia można wykryć wprowadzone zaburzenia. Znając charakter rzeczywistych uszkodzeń układu mechanicznego transmisji momentu napędowego można tę informację użyć do wykrycia stanu awaryjnego pracy napędu, np. niewspółosiowego ustawienia wałów.

Wszystkie obliczenia przeprowadzane są w czasie rzeczywistym w procesorze sygnałowym sterującym pracą układu napędowego. Zaprezentowana metoda nie wymaga dodatkowych czujników poza tymi, które są standardowo zainstalowane w falowniku do pomiarów prądów i napięć. Pokazana procedura diagnostyki może być, bez dodatkowych kosztów, dodana do istniejących układów sterowania napędami elektrycznymi.

W kolejnych pracach będą prowadzone badania nad identyfikacją uszkodzeń w układzie napędowym z pięciofazowym silnikiem indukcyjnym zasilanym z falownika przez filtr sinusoidalny co wymagało uwzględnienia modelu filtru w obserwatorze stanu układu.

LITERATURA

- [1] Krzeminski Z.: Sensorless Control of Polyphase Induction Machines. In: Advanced Control of Electrical Drives and Power Electronic Converters. Studies in Systems, Decision and Control, vol. 75. Springer International Publishing AG, 2017.
- [2] Adamowicz M., Guzinski J., Stec P.: "Five-phase EV drive with switched-autotransformer (LCCAt) inverter", Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2014, 27-30 X 2014, Coimbra, Portugal.
- [3] Adamowicz M., Guziński J., Krzemiński Z.: "Nonlinear control of five phase induction motor with synchronized third harmonic flux injection," First Workshop on Smart Grid and Renewable Energy (SGRE2015), 22-23 III 2015, Doha, Katar.
- [4] Adamowicz M., Strankowski P., Morawiec M., Guziński J., Krzemiński Z.: "Sterowanie multiskalarnie pięciofazowym silnikiem indukcyjnym", XII Konferencja Naukowa Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym, SENE 2015, 18-20 IX 2015, Łódź.



- [5] Lewicki A., Strankowski P., Guziński J.: "Wektorowa modulacja szerokości impulsów w pięciofazowych falownikach napięcia", XII Konferencja Naukowa Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym, SENE 2015, 18-20 IX 2015, Łódź.
- [6] Adamowicz M., Strankowski P., Morawiec M., Guziński J., Krzemiński Z.: "Sterowanie multiskalarne pięciofazową maszyną indukcyjną", Przegląd Elektrotechniczny, nr. 5, 2016.
- [7] Lewicki A., Strankowski P., Guziński J.: "Metoda wektorowej modulacji szerokości impulsów pięciofazowego falownika napięcia", Przegląd Elektrotechniczny, nr. 5, 2016.
- [8] Morawiec M., Strankowski P., Lewicki A., Guziński J.: "Sensorless control of five-phase induction machine supplied by the VSI with output filter", 10th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG 2016), 29 VI – 1 VII 2016, Bydgoszcz.
- [9] Guziński J., Kostro G., Strankowski P., Morawiec M., Iqbal A. "Five-phase squirrel-cage motor. Construction and drive properties". Automatyka-Pomiary-Zakłócenia, vol. 7, nr 4(26) 2016, grudzień, , pp. 110-122.
- [10] Strankowski P., Guziński J., Morawiec M., Lewicki A., Wilczynski F.: "Sensorless Disturbance Detection for Five Phase Induction Motor with Third Harmonic Injection", 11th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering, CPE-POWERENG 2017, pp. 387-391.
- [11] Wilczyński F., Morawiec M., Strankowski P., Guziński J., Lewicki A.: "Sensorless Field Oriented Control of Five Phase Induction Motor with Third Harmonic Injection", 11th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering, CPE-POWERENG 2017, pp. 392-397.
- [12] Guziński J., Strankowski P.: Pięciofazowy zintegrowany filtr sinusoidalny i składowej wspólnej falownika napięcia. Zgłoszenie patentowe, UP RP numer P.409952.
- [13] Kowalski T. C.: Diagnostyka układów napędowych z silnikiem indukcyjnym z zastosowaniem metod sztucznej inteligencji. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2013.
- [14] Krzemiński Z.: Obserwatory prędkości dla bezczujnikowego sterowania maszynami prądu przemiennego. Przegląd Elektrotechniczny Nr 5 2014.
- [15] K. Ohishi, K. Nakano, I. Miyashita, S. Yasukawa: „Anti-slip control of electric motor coach based on disturbance observer” AMC'98, Coimbra 1998.
- [16] Strankowski P., Guziński J.: "Bezczujnikowa diagnostyka uszkodzeń mechanicznych w przekształtnikowym napędzie elektrycznym," Miesięcznik techniczno - informacyjny Napędy i Sterowanie. Nr 5 - Maj 2015.

Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji numer 2015/19/N/ST7/03078 oraz DEC-2013/09/B/ST7/01642 oraz 2011/01/B/ST7/06593.

