Jarosław Guziński, Patryk Strankowski
Politechnika Gdańska, Gdańsk

DETEKCJA USZKODZEŃ W BEZCZUJNIKOWYM NAPĘDZIE ELEKTRYCZNYM Z WYKORZYSTANIEM OBSERWATORA MOMENTU OBCIĄŻENIA

FAULT DETECTION OF A SENSORLESS CONTROLLED ELECTRIC DRIVE USING LOAD TORQUE OBSERVER

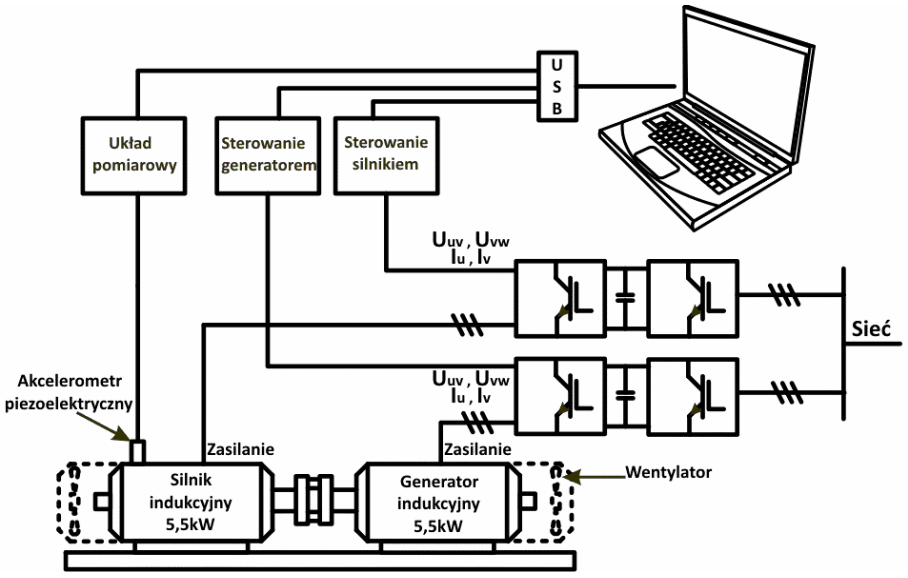
Streszczenie: W artykule przedstawiono metodę monitorowania oraz detekcji uszkodzeń układu transmisji momentu w przekształtnikowym napędzie elektrycznym. Detekcję uszkodzeń oparto na analizie estymowanego momentu obciążenia silnika indukcyjnego pracującego w bezczujnikowym układzie sterowania. Moment obciążenia estymowany jest jako dodatkowa wielkość oprócz innych sygnałów wykorzystywanych przy sterowaniu, tj.: prędkości obrotowej i strumienia wirnika (te wielkości są również estymowane). Układ napędowy wyposażony jest jedynie w czujniki standardowo stosowane w falownikach. Badania zrealizowano w układzie laboratoryjnym składającym się z maszyny badanej i regulowanego obciążenia (generatora indukcyjnego). Przez odpowiednie sterowanie maszyny obciążającej uzyskano możliwość modelowania różnych uszkodzeń układu transmisji momentu elektromagnetycznego. Umożliwia to sztuczne wprowadzanie do układu eksperymentalnego różnych rodzajów uszkodzeń, np. niewyważenia wirnika, nieosiowości, itp. Układ napędowy z obserwatorem momentu wyposażony został w procedurę identyfikacji uszkodzeń. W artykule przedstawiono zależności teoretyczne, strukturę układu napędowego oraz obserwatora stanu. Zamieszczono wyniki badań eksperymentalnych dla napędu elektrycznego 5.5 kW.

Abstract: The paper presents the problem of monitoring and fault detection of a drive torque transmission system which consists of an inverter supplied squirrel cage induction motor. The detection is based on the analysis of the estimated induction motor load torque, which operates in a sensorless control. The load torque is estimated as an additional value between other control values: rotor speed and rotor flux (this values are also estimated). The drive system is only equipped with standard sensors used in inverters. The investigations were done with a laboratory system that consists of the investigated machine and a controlled load (induction generator). An accurate control of the machine and programmed fast generator torque changes make it possible to simulate different types of faults in the drive torque transmission system. The possible simulated drive faults are e.g. rotor unbalances, eccentricities, etc. Moreover, the drive system with observer was expanded with a fault detection procedure. The paper presents the theoretical backgrounds, the drive system structure and the state observer. Results of experimental investigations are included for a 5.5kW drive system.

Słowa kluczowe: *napęd bezczujnikowy, silnik indukcyjny, detekcja uszkodzeń, estymacja momentu*
Keywords: *sensorless drives, induction motor, fault detection, torque estimation*

1. Wstęp

Współczesny przemysł konsumuje prawie 50% całkowitej energii zużywanej przez naszą cywilizację. Większość energii zużywanej przez przemysł (około 2/3) jest pochłaniania przez napędy elektryczne. Świadczy to o tym, że maszyny elektryczne stanowią jeden z najistotniejszych i kluczowych elementów w przemyśle. Długotrwała i bezawaryjna praca maszyn elektrycznych jest więc nieodzowna do zapewnienia prawidłowej i efektywnej pracy systemów przemysłowych [1]. W przemyśle, wśród maszyn elektrycznych, dominują maszyny indukcyjne. Wiodącą rolę zawdzięczają prostej budowie, braku zużywających się elementów stykowych a tym samym cenie konkurencyjnej w porównaniu z innymi rodzajami maszyn elektrycznych. Tym niemniej uszkodzenia tych maszyn, podobnie jak i innych urządzeń technicznych są nie do uniknięcia, co pokazują statystyki. Dlatego też zapewnienie niezawodnego działania złożonych systemów technicznych wymaga stosowania układów monitorowania i diagnostyki maszyn elektrycznych [2].
Jednym z uszkodzeń układów napędowych są awarie układu mechanicznego transmisji momentu napędowego. Uszkodzenia te wynikają z nieprawidłowego ustawienia (osiowania) i złego montażu maszyny, jak też z uszkodzeń



Rys. 1. System badawczy

wynikających z błędów produkcyjnych. Nieprawidłowości te wywołują wibracje napędu i prowadzą do przyspieszonego zużycia i awarii urządzenia.

W artykule przedstawiono możliwość wykorzystania estymacji momentu obciążenia jako narzędzia do wykrywania uszkodzeń w układzie napędowym. Przedstawiona metoda została zastosowana w napędzie z maszyną indukcyjną, zasilaną z falownika napięcia. Do sterowania i estymacji użyto wyłącznie czujniki prądu i napięcia, które standardowo stosowane są w falowniku.

Badany silnik indukcyjny układu został połączony mechanicznie z generatorem indukcyjnym, którego sterowanie umożliwia symulowanie uszkodzeń mechanicznych (rys. 2). Symulowane mogą być takie uszkodzenia mechaniczne jak, np. nieosiowość lub niewyważenie wirnika. W takim systemie wykonywana jest analiza uszkodzeń. Podobne rozwiązanie przedstawiono w literaturze w [3], [4] jednak tam estymacja nie była prowadzona w czasie rzeczywistym.

Niniejsza praca pokazuje jak można wykrywać uszkodzenia mechaniczne w czasie rzeczywistym, bez konieczności stosowania dodatkowych czujników.

2. Stanowisko badawcze

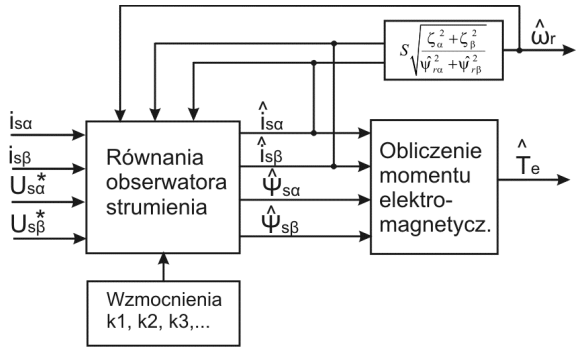
Stanowisko badawcze składa się z dwóch połączonych ze sobą maszyn indukcyjnych typu FSLg 132S-4 o mocy 5.5kW. Dane maszyn podane są w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry maszyny indukcyjnej typu FSLg 132S-4

Moc P_n	5500 W
Napięcie U_n	400 V
Prąd I_n	11 A
Prędkość n_n	1450 obr/min
cos ϕ_n	0,84
Sprawność η_n	0,855

Każda z maszyn współpracuje z osobnym dwukierunkowym przemiennikiem częstotliwości. W obu układach (silnika i generatora) zastosowano zamknięte algorytmy regulacji - algorytmy sterowania nieliniowego (multiskalarnego). Sterowanie multiskalarne jest to sterowanie zamknięte wykorzystujące zależności modelu multiskalarnego silnika indukcyjnego, który po raz pierwszy został przedstawiany w [5]. Sterowanie multiskalarne zapewnia pełną kontrolę nad momentem, prędkością i strumieniem silnika, prowadząc do uzyskania układu napędowego o właściwościach lepszych od popularnego sterowania polowo zorientowanego (wektorowego).

Do sterowania i estymacji, w obu układach napędowych, wykorzystywane są wyłącznie standardowe czujniki falownika napięcia (dwa czujniki prądów wyjściowych oraz czujnik napięcia stałego obwodu wejściowego falownika). Prędkość wirnika estymowana jest w obserwatorze prędkości, który został zaprezentowany w [6]. Struktura obserwatora zaprezentowana jest na rys. 2.



Rys. 2. Struktura obserwatora prędkości, według [6]

Moment obciążenia silnika estymowany jest w obserwatorze momentu, który szerzej omówiono w punkcie 3 niniejszej pracy.

Generator indukcyjny jest symulatorem uszkodzeń (zaburzeń pracy układu), co uzyskano przez wprowadzenie zadanego, regulowanego momentu obciążenia. Dla generatora zadawany jest stały moment obciążenia ze składową zmienną o częstotliwości (częstotliwościach) i amplitudzie (amplitudach) odpowiadającej symulowanemu uszkodzeniu. Zaletą takiego rozwiązania jest szybka zmiana rodzaju badanego uszkodzenia mechanicznego napędu bez konieczności wprowadzania zmian w rzeczywistym mechanizmie napędowym. Możliwa jest również zmiana wartości szczytowej zaburzenia, co pozwala na symulowanie awarii o różnych stopniach uszkodzeń. W celach porównawczych wykorzystano rzeczywistą diagnostykę wibracji układu z użyciem czujników drgań. Drgania były rejestrowane akcelerometrami piezoelektryczne typu VIS-311A. Czujniki zamontowano w obudowie silnika. Sygnały z akcelerometrów analizowane były w mierniku VIBDAQ 2+. Dane akcelerometru podano w tabeli 2.

Tabela 2. Dane akcelerometru piezoelektrycznego VIS-311A

Zakres	± 490 m/s^2
Pasmo częstotliwości	0.5 Hz to 10 kHz
Częstotliwość rezonansowa	25 kHz

3. Obserwator momentu obciążenia

Obserwatory stanu stosowane są tam, gdzie występują sygnały trudno mierzalne, jak np. strumień wirnika lub moment obciążenia. Ponadto stosowane są też tam, gdzie ze względów ekonomicznych stosowanie dodatkowych czujników (np. prędkości) nie jest uzasadnione.

Do estymacji momentu obciążenia zaimplementowano obserwator bazujący na metodzie Gophinanta [7]. W pracy [8] obserwator ten został zastosowany w pojeździe trakcyjnym do identyfikacji poślizgu kół.

Zastosowany obserwator momentu obciążenia opisany jest następującymi równaniami:

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -k_1 \\ 1 & -k_2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 k_2 J_M \\ \left(k_2^2 - k_1\right) J_M \end{bmatrix}\omega_r + \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix}\hat{T}_e \tag{1}$$

$$\hat{T}_L = z_2 - k_{2L} J_M \hat{\omega}_r \tag{2}$$

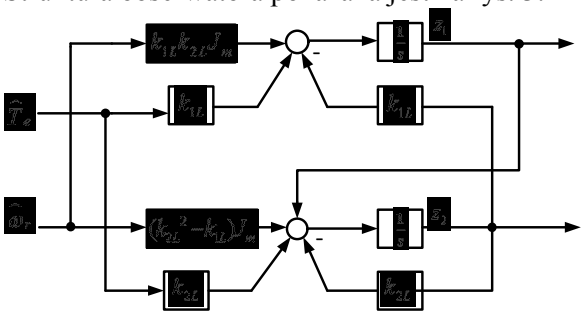
Moment elektromagnetyczny estymowany jest na podstawie zależności obserwatora prędkości pokazanych w [6]. Jest określony zależnością:

$$\hat{T}_e = \hat{\Psi}_{r\alpha}\hat{i}_{s\beta} - \hat{\Psi}_{r\beta}\hat{i}_{s\alpha} \tag{3}$$

gdzie:

z1, z2 – wewnętrzne zmienne stanu obserwatora,
k1, k2 – współczynniki wzmocnień,
Jm – moment bezwładności,
$\hat{\omega}_r$ – estymowana prędkość wirnika,
$\hat{T}_e$ – estymowany moment elektromagnetyczny,
$\hat{T}_L$ – estymowany moment obciążenia,
$\hat{\Psi}_{r\alpha}, \hat{\Psi}_{r\beta}$ – estymowane składowe wektora strumienia,
$\hat{i}_{s\alpha}, \hat{i}_{s\beta}$ – estymowane składowe wektora prądu.

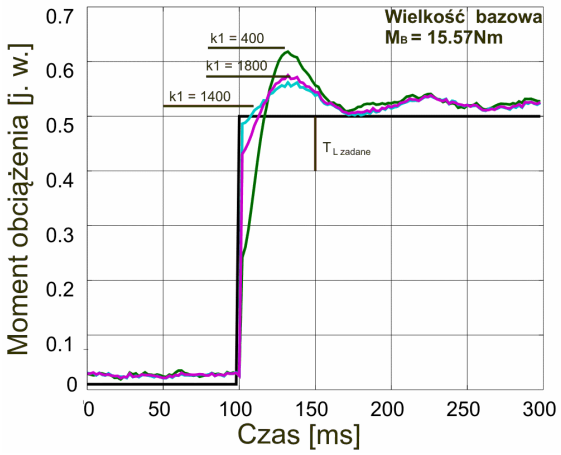
Struktura obserwatora pokazana jest na rys. 3.



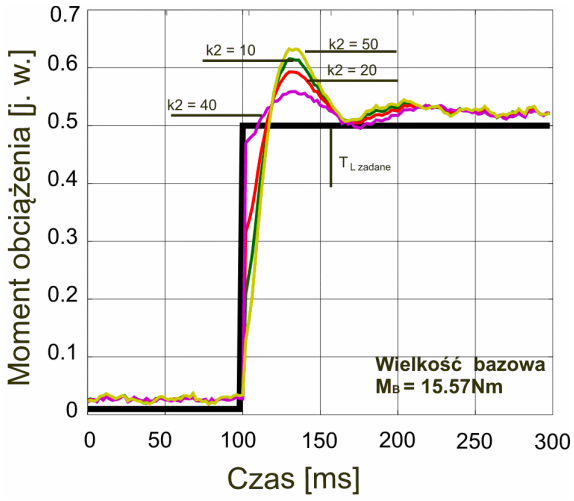
Rys. 3. Struktura obserwatora momentu obciążenia

Do weryfikacji działania oraz pierwszych testów obserwatora przygotowano symulacje

w programie napisanym w języku C. W programie symulacyjnym dobrano współczynniki obserwatora w sposób doświadczalny. Przykładowe wyniki doboru nastaw obserwatora pokazano na rys. 4 i rys. 5, rejestrując odpowiedź układu na skokową zmianę momentu obciążenia.



Rys. 4. Dobór wzmocnienia k_1 w programie symulacyjnym



Rys. 5. Dobór wzmocnienia k_2 w programie symulacyjnym

Obserwator momentu obciążenia przygotowany i dostrojony w programie symulacyjnym wykorzystano do realizacji eksperymentalnej układu detekcji uszkodzeń.

4. Badania eksperymentalne

W układzie eksperymentalnym wprowadzono zaburzenia wprowadzając zmiany momentu obciążenia w układzie sterowania generatorem indukcyjnym. Wprowadzane zaburzenia były monitorowane w silniku przez obserwacje estymowanego momentu obciążenia. Wielkość szczytowa zadanych zmian momentu była tak dobrana, aby praca silnika oraz różnica w hałasie nie zmieniała się znacznie. Tak dobrane zaburzenia mogą stanowić przykład uszkodzeń w początkowym etapie rozwoju, gdyż nie są rozpoznawane przez użytkownika bez dodatkowej, specjalistycznej aparatury pomiarowej.

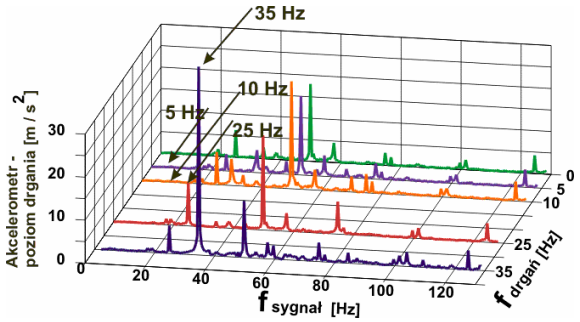
Na rys. 6 przedstawiono przykładowe wyniki badań, na których przedstawiono przyspieszenia drgań zarejestrowane z użyciem akcelerometru, przy prędkości znamionowej silnika i różnych częstotliwości zaburzeń.

Sygnał rejestrowanych drgań został przetworzony do dziedziny częstotliwości. Poszczególne osie wykresu z rys. 6 oznaczają:

Z – Akcelerometr - poziom drgania [m/s2],

X – Akcelerometr - analiza FFT sygnału [Hz],

Y – Generator - wprowadzona częstotliwość drgań, tj. zaburzenie [Hz].

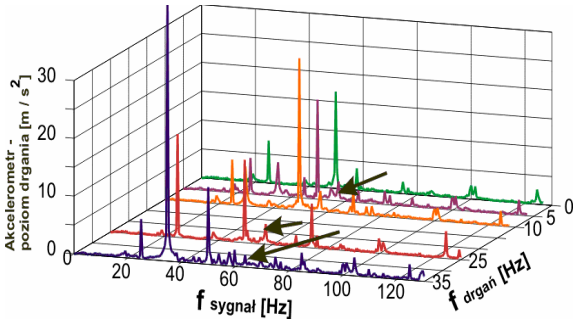


Rys. 6. Przyspieszenia drgań zaburzeń rejestrowane i analizowane w mierniku drgań (oś Z: Akcelerometr – poziom drgania [m/s^2], oś Y: Generator-wprowadzona częstotliwość drgań, tj. zaburzenie [Hz], oraz oś X: Akcelerometr-analiza FFT sygnału [Hz])

Na rys. 6. częstotliwość zaburzeń $f_{drgań}$ o wartości 0 Hz oznacza, że układ nie generuje sztucznych uszkodzeń. Różnice w przebiegu $f_{sygnał}$ (wartościach poszczególnych amplitud) pomiędzy $f_{drgań}>0$ a $f_{drgań}=0$ służą do oceny skuteczności wykrywanego zaburzenia.

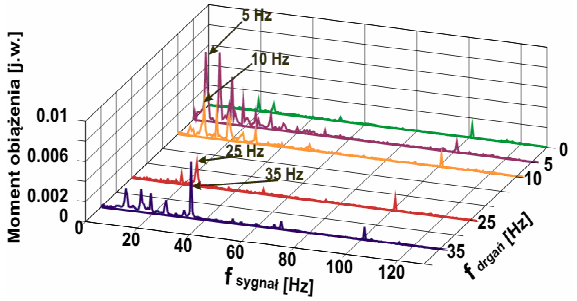
Można zauważyć, iż generowane zaburzenia wpływają w sposób istotny na wartości amplitud drgań. Harmoniczne zaburzenia zaczynają występować wyraźnie od częstotliwości 25 Hz. Zanik niższych częstotliwości jest najprawdopodobniej powodowany przez tłumiące działanie obudowy silnika. Przy częstotliwościach 25 Hz oraz 35 Hz występują znaczne zmiany amplitud, które sygnalizują, że układ jest zaburzony.

Wentylatory chłodzenia maszyn uruchamiane w czasie pracy maszyn mogą wpływać na drgania całego układu. W celu sprawdzenia wpływu wentylatorów na drgania próba pomiarów drgań została ponowie przeprowadzona z wyłączeniem układu chłodzenia (rys. 7).



Rys. 7. Przyspieszenia drgań bez chłodzenia maszyn (oś Z: Akcelerometr – poziom drgania [m/s^2], oś Y: Generator-wprowadzona częstotliwość drgań, tj. zaburzenie [Hz], oraz oś X: Akcelerometr-analiza FFT sygnału [Hz])

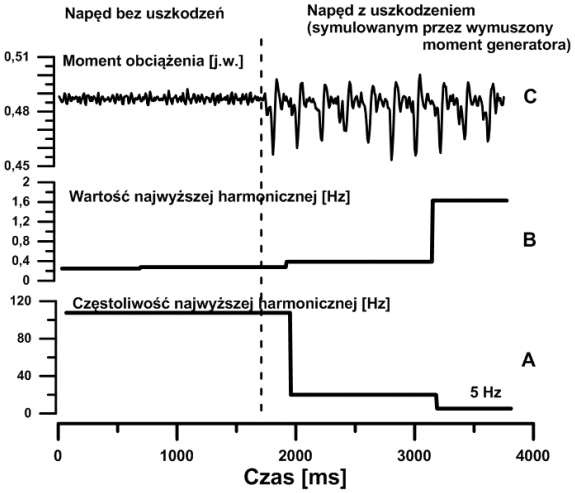
Porównując rys. 6 i rys. 7 można zauważyć, że praca dwóch wentylatorów jedynie nieznacznie zmienia przebieg harmonicznych. Wynika z tego, że do detekcji uszkodzeń nie jest konieczne wyłączanie wentylatorów a więc detekcja może być przeprowadzana przy normalnej pracy układu napędowego.



Rys. 8. Analiza FFT estymowanego momentu obciążenia (oś Z: Estymowany moment obciążenia [j.w.], oś Y: Generator-wprowadzona częstotliwość drgań - zaburzenie [Hz] oraz oś X: Analiza FFT momentu obciążenia [Hz]. Wielkość bazowa momentu M_B = 48,52Nm.)

Kolejne badania wykonano analizując jedynie estymowany moment obciążenia, z użyciem obserwatora opisanego zależnościami (1)-(3). Obliczenia obserwatora momentu wykonywane były synchronicznie z procedurą regulacji oraz estymacji prędkości, strumienia i momentu elektromagnetycznego, jak i modulatora szerokości impulsów (PWM). Przyjęta była rozdzielczość obliczeń zgodna z okresem modulatora PWM wynoszącym T_{imp}=150 μs. Na podstawie analizy w dziedzinie częstotliwości estymowanego momentu obciążenia (rys. 8), można zauważyć znaczne zmiany amplitud dla niższych (5 Hz i 10 Hz) jak i wyższych (25 Hz i 35 Hz) częstotliwości zaburzeń. Świadczy to o przydatności analizy estymowanego momentu obciążenia do ciągłej identyfikacji zaburzeń w układzie napędowym. Należy podkreślić, ze układ pomiarowy z akcelerometrami nie identyfikował harmonicznych zaburzeń niższych niż 25 Hz.

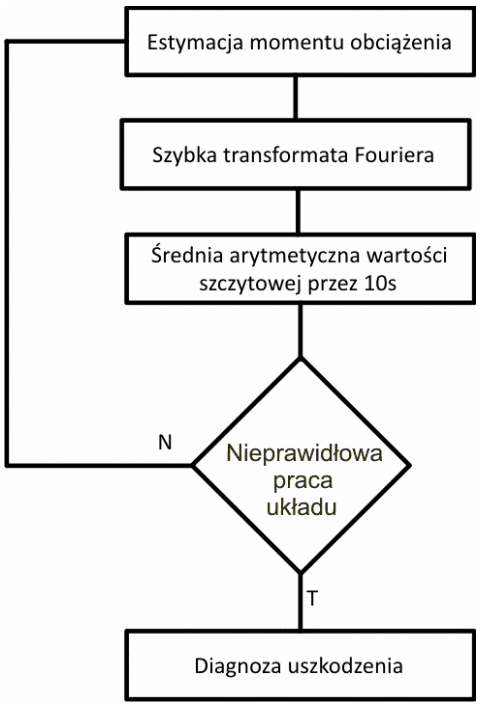
Przygotowana procedura identyfikacji uszkodzeń wymagała zaimplementowana procedury szybkiej transformaty Fouriera FFT. Obliczenia FFT dla estymowanego momentu obciążenia wykonywane były asynchronicznie w pętli głównej programu sterownika DSP układu napędowego. Przykładowy wynik analizy FFT w układzie rzeczywistym pokazany został na rys.8.



Rys. 9. Detekcja uszkodzeń w układzie rzeczywistym z użyciem obserwatora momentu obciążenia i analizy FFT w czasie rzeczywistym

Obliczona częstotliwość harmonicznej o najwyższej amplitudzie pokazana jest na rys. 9A, natomiast wartość amplitudy o zidentyfikowanej częstotliwości 5 Hz pokazano na rys. 9B. Rysunek 9C przedstawia estymowany moment obciążenia. W początkowej części przebiegu z rys. 9C widoczna jest niezaburzona praca silnika (układ pracuje bez uszkodzeń). Następnie wprowadzane jest zaburzenie. Można zauważyć, że algorytm oblicza na bieżąco harmoniczne estymowanego momentu obciążenia. Po upływu ok. 1,5 s osiąga stałą wartość harmonicznej o najwyższej amplitudzie, która wska-

zuje na prawdopodobne uszkodzenie układu napędowego.
Wartość wykrytej harmonicznej jest następnie uśredniana arytmetycznie przez kolejne 10 s. Gdy wartość ta nie zmienia się układ identyfikuje uszkodzenie.
Algorytm wykrywania uszkodzeń pokazano na rys. 10.



Rys. 10. Algorytm wykrywania uszkodzeń z użyciem obserwatora momentu obciążenia

5. Wnioski

Wyniki przestawione w niniejszej pracy pokazują, że istnieje możliwość detekcji uszkodzeń w układzie napędowym przy wykorzystaniu estymacji momentu obciążenia.
Moment obciążenia obliczony w obserwatorze, i dalej przetworzony z użyciem szybkiej transformaty Fouriera pozwala na wykrycie zaburzeń w układzie napędowym. Właściwości obserwatora momentu okazały się lepsze niż miernika drgań wykorzystującego akcelerometry. Zaburzenia o niskich częstotliwościach nie były identyfikowane w układzie pomiarowym z akcelerometrami a były identyfikowane przez obserwator momentu obciążenia.
Zaletą pokazanej metody identyfikacji uszkodzeń jest możliwość jej implementacji w układzie sterowania przekształtnikiem jako dodatkowej procedury w programie mikroprocesora. Implementacja tej metody nie wymaga stosowania żadnych dodatkowych czujników poza czujnikami, które i tak są standardowo stosowane w przemienniku częstotliwości. Jest to więc metoda, która może być stosowana bez ponoszenia dodatkowych nakładów finansowych. Niewielkiej rozbudowy wymaga jedynie program sterownika mikroprocesorowego układu napędowego.

6. Literatura

[1]. Slobodan Mirchevski: „*Energy Efficiency in Electric Drives*", Electronics, Vol. 16, No. 1, June 2012.
[2]. Kowalski Cz.: „*Diagnostyka układów napędowych z silnikiem indukcyjnym z zastosowaniem metod sztucznej inteligencji*", Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2013.
[3]. Kontantinos N. Gyftakis, Dionysios V. Spyropoulos: „*A Novel Approach for Broken Bar Fault Diagnosis in Induction Motors Through Torque Monitoring*" IEEE Transactions on Energy Conversion Vol.28 No.2, 2013.
[4]. Concari C., Franceschini G., Tassoni C.: „*Induction machine current space vector features to effectively discern and quantify rotor fault and external torque ripple*" IET Electric Power Applications 2012.
[5]. Krzemiński Z.: „*Nonlinear control of induction motor*", 10th World Congress on Automatic Control, IFAC'87, 27–31 July 1987, Monachium, Niemcy.
[6]. Krzeminski Z.: „*Sensorless Control of the Induction Motor Based on New Observer*". PCIM. Nürnberg, Niemcy 2000.
[7]. Gopinath B.: „*On the control of linear multiple input–output systems*", American Telephone and Telegraph Company, The Bell Technical Journal, Vo1. 50, No. 3, 1971, USA.
[8]. Ohishi K., Nakano K., Miyashita I., Yasukawa S.: „*Anti-slip control of electric motor coach based on disturbance observer*" AMC'98, Coimbra 1998.

Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji numer DEC-2013/09/ B/ST7/ 01642.

Autorzy

dr hab. inż. Jarosław Guziński[(1)]
mgr inż. Patryk Strankowski[(2)]
Politechnika Gdańska
Wydział Elektrotechniki i Automatyki
Katedra Automatyki Napędu Elektrycznego
ul. Narutowicza 11/12; 80-233 Gdańsk
[(1)] tel.: +58 347-29-60
[(1)] email: jaroslaw.guzinski@pg.gda.pl
[(2)] email: strankowski.p@gmail.com