

Bezczujnikowa diagnostyka uszkodzeń mechanicznych w przekształtnikowym napędzie elektrycznym

Patryk Strankowski, Jarosław Guziński

1. Wstęp

Zapewnienie długiej i niezawodnej pracy układów napędowych jest niezbędne do prawidłowego funkcjonowania przemysłu. Praktycznie we wszystkich instalacjach przemysłowych występują układy napędowe, od których pracy zależy całość funkcjonowania systemu. Należy podkreślić, że we współczesnych instalacjach przemysłowych układy napędowe są bardzo liczne – szacuje się że 2/3 energii elektrycznej pochłanianej przez przemysł to energia przetwarzana w elektrycznych układach napędowych [1].

Większość napędów elektrycznych stanowią układy z silnikami indukcyjnymi klatkowymi zasilanymi z falowników napięcia. Maszyny indukcyjne stały się bardzo popularne w przemyśle dzięki ich niezawodności i cenie konkurencyjnej z innymi typami maszyn. Jednak, jak każdy mechanizm, ulegają zużyciu i awariom. Na podstawie badań statystycznych można wyszczególnić cztery kategorie uszkodzeń tych maszyn, tj. uszkodzenia: łożysk (40%), stojana (38%), wirnika (10%) oraz pozostałe (12%) [2]. W grupie uszkodzeń pozostałych zawierają się głównie uszkodzenia związane z awariami układu transmisji momentu napędowego. Są to uszkodzenia wywołane nieodpowiednim (nieosiowym) ustawieniem silnika, błędami montażu sprzęgieł i przekładni, nieprawidłową obsługą (brakiem dosmarowywania łożysk, uzupełniania oleju w przekładniach), jak też wadami fabrycznymi tych elementów [3]. Uszkodzenia układu mechanicznego powodują powstanie wibracji silnika i w dłuższym czasie prowadzą do całkowitej awarii napędu i wywołanych tym nieplanowanych przestoju. Awarie układu mechanicznego mogą mieć też wpływ na bezpieczeństwo użytkowników i obsługi, np. w napędzie elektrycznym pociągu.

Niezbędne jest więc zapewnienie niezawodnej diagnostyki układu. Diagnostyka powinna być zrealizowana, aby ocenić ryzyko wystąpienia ewentualnej awarii i z odpowiednim wyprzedzeniem usunąć usterkę. Diagnostyka musi opierać się na ciągłym monitorowaniu pracy urządzenia i obserwowaniu zmian parametrów układu [4].

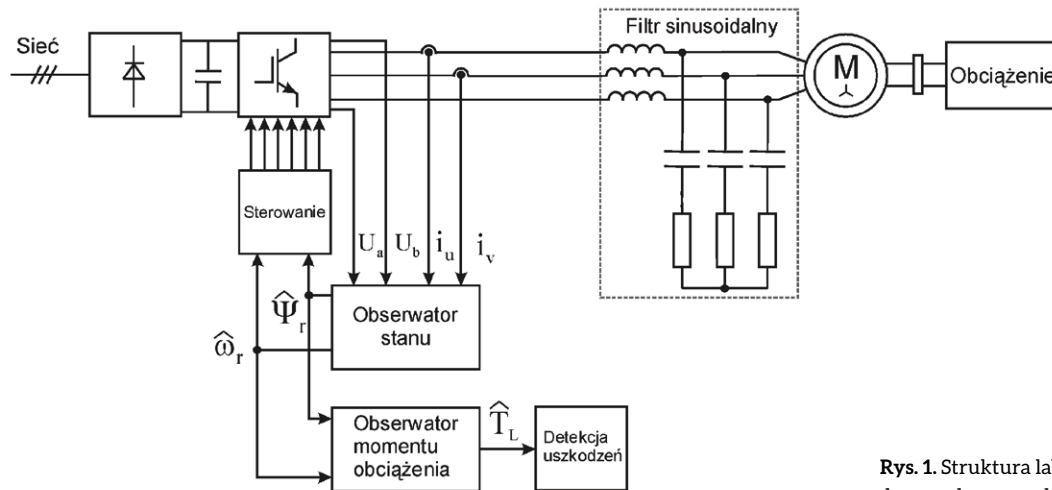
W układach napędowych powszechnie stosowane jest monitorowanie drgań. Stosowane są systemy pomiarowe wykorzystujące analizę sygnałów z czujników drgań (akcelerometrów). W całym okresie eksploatacji mierzy się poziom drgań i obserwuje się ich zmiany. Przed wystąpieniem awarii poziom drgań zaczyna gwałtownie rosnąć. Porównanie aktualnego poziomu drgań z poziomem dopuszczalnym pozwala na wcześniejsze wykrycie awarii i wystawienie alarmu dla użytkownika [2–4].

Streszczenie: W artykule przedstawiono zagadnienie detekcji uszkodzeń układu mechanicznego transmisji momentu w układzie bezczujnikowego napędu elektrycznego. Do detekcji uszkodzeń zastosowano analizę momentu obciążenia, który estymowany jest w czasie rzeczywistym. Przedstawiono strukturę układu napędowego, zależności obserwatora momentu oraz przykładowe wyniki badania laboratoryjnego układu napędowego. Uszkodzenia wprowadzono w sposób sztuczny, dodając ciężarki powodujące niewyważenie wirnika. Wyniki estymacji momentu porównano z pomiarami drgań z użyciem akcelerometrów. Uzyskano zadowalające wyniki pozwalające na przygotowanie układu diagnostycznego zintegrowanego z procedurą sterowania falownika.

Abstract: The paper presents the problem of fault detection of torque transmission system for speed sensorless induction motor drive. In order to identify machine faults, a real time load torque estimation was implemented. The drive system structure, the load torque equations and example results of laboratory test are presented. Artificial faults were introduced by an additional weight, which cause an unbalance on the rotor. The estimation results are compared with vibration measurement using accelerometers. The evaluation of the results presents a satisfying possibility to prepare an integrated diagnostic procedure in the inverter control process.

Jednak systemy monitoringu i diagnostyki oparte na pomiarach drgań nie są wygodnym rozwiązaniem w instalacjach przemysłowych. Wymagają montażu czujników, prowadzenia okablowania i są wrażliwe na zakłócenia, wynikające głównie z pracy przekształtników energoelektronicznych. Ponadto w układach napędowych zasilanych przekształtnikowo pojawiają się prądy upływnościowe, których obwód może zamykać się również przez czujniki, zakłócając ich pracę, a nawet prowadząc do uszkodzenia systemu pomiarowego [5–8].

Istnieją jednak rozwiązania diagnostyczne, w których nie jest konieczne stosowanie specjalnych czujników pomiarowych. Są to rozwiązania bazujące na idei obliczania (i analizy) poziomu drgań w czasie rzeczywistym, wykorzystując czujniki standardowo stosowane w przekształtniku podłączonym do silnika oraz znajomość modelu matematycznego systemu. Taki system



Rys. 1. Struktura laboratoryjnego układu napędowego z detekcją uszkodzeń

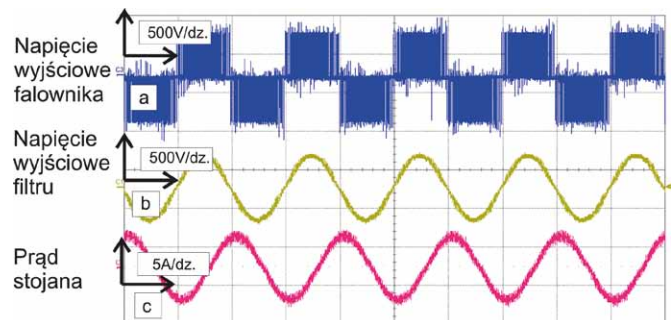
realizowany jest jako program w systemie mikroprocesorowym. W napędach elektrycznych z silnikami indukcyjnymi i falownikami napięcia takimi czujnikami są przetworniki hallotronowe prądów wyjściowych falownika oraz czujniki napięcia. Są one stosowane w każdym falowniku, gdyż są niezbędne do realizacji funkcji sterowania silnikiem, np. sterowania polowo zorientowanego. Przy sterowaniu wektorowym i tak musi być znany model układu, aby obliczać strumień czy też moment, które są wielkościami regulowanymi. Wielkości te obliczane są w obserwatorze stanu, który jest częścią programu realizowanego przez system mikroprocesorowy falownika. Rozszerzenie obserwatora o dodatkowe zależności może pozwolić też na obliczanie momentu obciążenia silnika [9–11, 16].

W mniejszym artykule przedstawiono możliwość wykorzystania estymacji momentu obciążenia silnika jako narzędzia do wykrywania uszkodzeń w układzie napędowym. Przedstawiona metoda została zaimplementowana w układzie napędowym z silnikiem indukcyjnym zasilanym z falownika, który pracuje bez czujnika prędkości obrotowej. Pokazana procedura estymacji momentu stanowi część oprogramowania systemu mikroprocesorowego sterującego pracą falownika. Do detekcji uszkodzeń nie są potrzebne żadne dodatkowe czujniki poza standardowo stosowanymi w falownikowych napędach elektrycznych. W układzie napędowym zastosowano filtr sinusoidalny do poprawy kształtu napięcia zasilania silnika. Model filtra został uwzględniony w przedstawionej procedurze diagnostycznej.

2. Układ napędowy

Na rys. 1 przedstawiono strukturę laboratoryjnego układu napędowego, który został wykorzystany w badaniach.

Napęd z rys. 1 składa się z przemiennika częstotliwości z falownikiem napięcia oraz silnika indukcyjnego. Układ sterowania przekształtnika realizuje funkcję pętli regulacji prędkości, momentu i strumienia. Jest to metoda sterowania wewnętrzne-go silnika oparta na multiskalarnym modelu silnika indukcyjnego [12]. Regulowane wielkości obliczane są w obserwatorze stanu [13].



Rys. 2. Przebiegi napięcia wyjściowego falownika (a), napięcia zasilającego silnik (b) (napięcie wyjściowe filtra) oraz prądu silnika (c)

Na wyjściu falownika układu z rys. 1 podłączono dolnoprzepustowy filtr LC (filtr sinusoidalny). Filtry sinusoidalne stosowane są w wielu napędach przemysłowych, szczególnie tam, gdzie występują długie połączenia kablowe między falownikiem a silnikiem [8, 14, 15]. Przykładem takich układów są np. napędy dźwigowe. Filtr wpływa korzystnie na poziom zaburzeń elektromagnetycznych, zmniejsza niebezpieczeństwo przepięć na zaciskach silnika (efekt linii długiej), ogranicza drgania i hałas silnika. Zmniejszenie stromości napięcia wyjściowego falownika wpływa też korzystnie na żywotność izolacji stojana. Wszystko to prowadzi w rezultacie do wydłużenia czasu życia maszyny oraz redukcji strat w maszynie (zmniejszenie strat dodatkowych oraz strat w żelazie). Rezultat działania filtra sinusoidalnego przedstawiono na rys. 2.

Porównując napięcie wejściowe filtra (rys. 2 a) z napięciem wejściowym silnika (rys. 2 c), można zauważyć istotną zmianę jakości napięcia. Jakość napięcia opisuje się za pomocą współczynnika zawartości harmonicznych THD (z ang. *Total Harmonic Distortion*):

$$THD_U = \left[\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_n^2}{a_1^2}} \cdot 100\% \right] \quad (1)$$

Zgodnie z (1) w przypadku napięcia wyjściowego falownika wartość THD_U wynosi 83,15%, natomiast wartość po wygładzeniu to 3,07% dla znamionowego obciążenia silnika.

Stosowanie filtrów sinusoidalnych utrudnia jednak realizację zaawansowanych metod sterowania silnikami, gdyż filtr wprowadza niepożądany spadek napięcia oraz przesunięcie fazowe napięć i prądów przed i za filtrem [8]. Dlatego, aby zapewnić poprawną pracę napędu, obecność filtra sinusoidalnego musi być uwzględniona w procedurze sterowania i estymacji, jak też dalej pokazanej metodzie identyfikacji uszkodzeń.

3. Obserwator momentu obciążenia

W przekształtnikowych napędach elektrycznych stosowane są obserwatory stanu w przypadku trudnych do mierzenia sygnałów (strumień wirnika, moment obciążenia) oraz sygnałów, których czujniki należy eliminować ze względów ekonomicznych (czujnik prędkości obrotowej). Obserwator jest procedurą obliczeniową, w której na podstawie znanego modelu matematycznego układu estymowane są sygnały, wykorzystując sygnały mierzone przez czujniki. W układzie z falownikami napięcia stosuje się powszechnie czujniki hallotronowe prądów wyjściowych oraz napięcia zasilania DC. Zastosowanie obserwatora zamiast dodatkowego czujnika jest rozwiązaniem pożądanym, ponieważ obniża koszty oraz zwiększa niezawodność całego układu.

Na rys. 1 pokazano wykorzystane sygnały wejściowe zastosowanego obserwatora momentu obciążenia silnika. Obliczony moment obciążenia jest analizowany i na tej podstawie podejmowane są decyzje diagnostyczne.

Do zastosowanej procedury obliczania momentu obciążenia konieczna jest informacja o aktualnej prędkości wirnika oraz momencie elektromagnetycznym silnika. Obie wielkości estymowane są w obserwatorze stanu, który jest wykorzystany w układzie sterowania maszyny do obliczeń regulowanego momentu elektromagnetycznego, prędkości i strumienia. Opis obserwatora zamieszczony został w [12]. Obserwator z [12] musiał być jednak rozszerzony o zależności modelu filtra, tak jak pokazano to w [8].

Moment obciążenia silnika jest obliczany w celach diagnostycznych przy zastosowaniu obserwatora momentu pokazanego w [10] i [11]. W pracy [11] obserwator ten był wykorzystany do detekcji poślizgu kół w pojeździe trakcyjnym, natomiast w [10] do detekcji uszkodzeń przekładni i nieosiowości wałów maszyn. Równania obserwatora momentu obciążenia mają postać:

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

$$\hat{T}_e = \hat{\Psi}_{ra} \hat{I}_{sp} - \hat{\Psi}_{rp} \hat{I}_{sa} \quad (3)$$

$$\hat{T}_L = z_2 - k_{2L} J_m \hat{\omega}_r \quad (4)$$

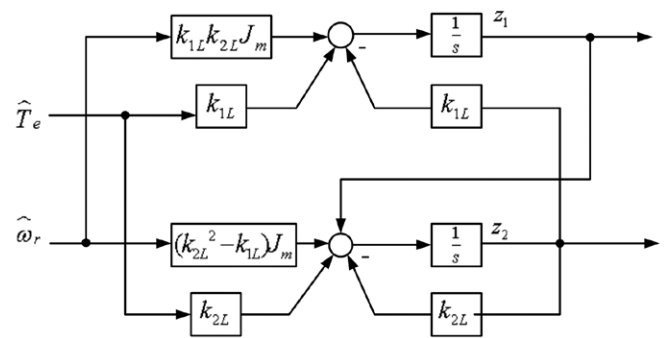
gdzie:

z_1, z_2 – wewnętrzne zmienne stanu obserwatora;

k_1, k_2 – współczynniki obserwatora;

J_m – moment bezwładności silnika;

$\hat{\omega}_r$ – estymowana prędkość wirnika;



Rys. 3. Struktura obserwatora momentu obciążenia.

\hat{T}_e – estymowany moment elektromagnetyczny;
 \hat{T}_L – estymowany moment obciążenia.

Struktura obserwatora momentu obciążenia przedstawiona jest na rys. 3.

Przed badaniami eksperymentalnymi przeprowadzono symulacje układu. Przygotowano program symulacyjny, w którym całość napędu zamodelowano w języku C. Symulacje umożliwiły weryfikację koncepcji detekcji drgań oraz dobór wzmacnień regulatorów i wzmacnień obserwatorów.

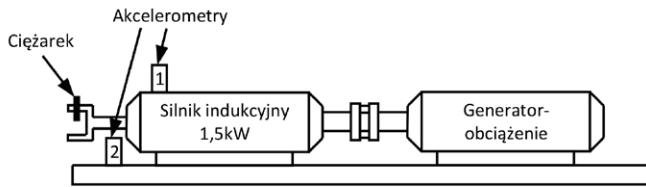
Obserwator momentu obciążenia wraz z procedurą diagnostyczną zaimplementowany został w programie realizowanym przez procesor DSP, realizujący równocześnie zadanie sterowania silnikiem i estymacji regulowanych zmiennych.

4. Diagnostyka uszkodzeń – wyniki badań

Badania detekcji uszkodzeń zostały przeprowadzone dla laboratoryjnego układu napędowego z silnikiem indukcyjnym o mocy 1,5 kW. Silnik połączony był z prądnicą prądu stałego. Do sterowania falownikiem wykorzystano układ sterowania składający się z procesora ADSP SHARC, układu logiki programowalnej FPGA i pozostałych elementów peryferyjnych. Program sterowania, estymacji i diagnostyki opracowany był w języku C. Układ sterowania miał możliwość komunikacji z komputerem nadrzędnym, który wykorzystano do zadawania parametrów i gromadzenia danych.

W badanym układzie napędowym zamodelowano uszkodzenie polegające na niewyważeniu wirnika przez montowanie na wale silnika ciężarków. Równocześnie z estymacją mikroprocesorową momentu rejestrowano drgania maszyny, wykorzystując dwa akcelerometry piezoelektryczne typu VIS-311A (zakres pomiarowy: ±490 m/s², pasmo przenoszenia: 0,5 Hz–10 kHz). Pomiar drgań miały potwierdzić porównawczo prawidłowość układu estymacji momentu obciążenia. Strukturę układu laboratoryjnego pokazano na rys. 4.

Analiza wyników z obserwatora momentu obciążenia oraz z akcelerometrów została przeprowadzona za pomocą transformaty Fouriera – FFT (z ang. *Fast Fourier Transformation*) – dla różnych warunków pracy. W mikroprocesorowym systemie diagnostycznym procedura FFT realizowana była w czasie rzeczywistym, nie kolidując z działaniem algorytmu sterowania. Próbkę pomiarowe dla FFT rejestrowane były synchronicznie



Rys. 4. Struktura układu laboratoryjnego do badań identyfikacji uszkodzeń na podstawie analizy estymowanego momentu obciążenia (akcelermetry podłączono w celach porównawczych)

w przerwaniu DSP, w którym obliczany był też algorytm modulacji szerokości impulsów PWM.

W początkowym etapie badań laboratoryjnych analizowano mierzone sygnały drgań. Na rys. 5 przedstawiono wyniki pomiarów drgań akcelermetrów sprawnego układu, natomiast na rys. 6 pokazano wyniki dla układu z uszkodzeniem.

Na podstawie wyników pokazanych na rys. 5 można stwierdzić, że w sprawnym układzie pojawiają się harmoniczne zgodnie z zależnością:

$$f_{\text{indikator}} = \frac{s}{p} \cdot f_s \cdot k \quad (5)$$

gdzie:

$f_{\text{indikator}}$ – charakterystyczna częstotliwość przyjęta do diagnostyki napędu;

s – poślizg silnika;

p – liczba par biegunów;

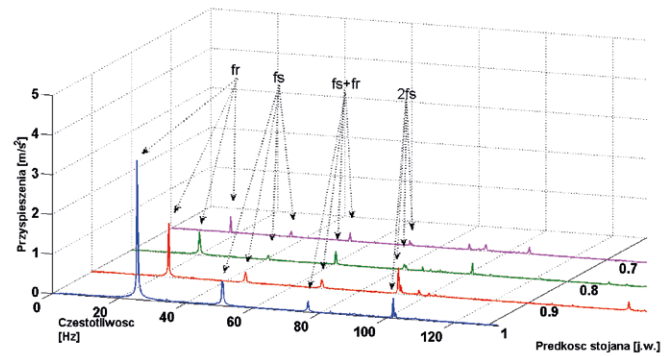
f_s – częstotliwość stojana;

k – krotność poszukiwanych częstotliwości ($k = 1, 2, 3, \dots$).

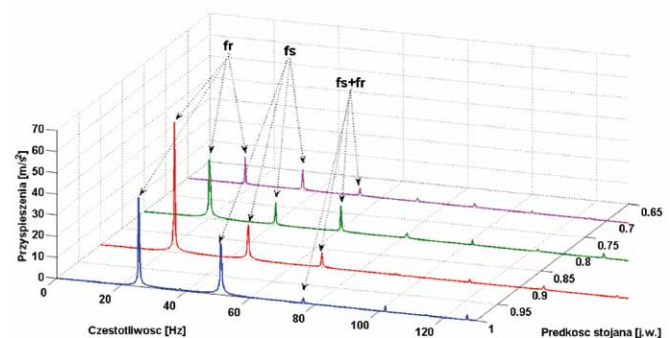
Harmoniczne pojawiające się na rys. 5 odpowiadają częstotliwości mechanicznej wirnika f_R , elektrycznej stojana f_s oraz ich wielokrotnościom. Obserwowane amplitudy harmonicznych wzrastają razem z prędkością obrotową wirnika. Maksymalna amplituda drgań (ok. 3 m/s²) występuje przy częstotliwości 25 Hz. Na rys. 6, pokazującym wyniki uzyskane w układzie z uszkodzeniem, można zauważyć znaczny wzrost amplitud harmonicznych. Nastąpił ich około 10–20-krotny wzrost. Najwyższa amplituda występuje dla częstotliwości stojana $f_s = 45$ Hz. Jest to częstotliwość odpowiadająca częstotliwości rezonansowej układu napędowego.

Kolejnym etapem prac była analiza estymowanego momentu obciążenia, której przykładowe wyniki pokazano na rys. 7 i rys. 8. Estymowane amplitudy drgań mają rozkład zbliżony do amplitud uzyskanych przy pomiarach z użyciem akcelermetrów. W przebiegach z rys. 7 widoczny jest rozkład harmonicznych estymowanego momentu obciążenia sprawnego układu. Estymowane harmoniczne występują dla harmonicznej podstawowej częstotliwości stojana oraz drugiej harmonicznej. Pozostałe pojawiające się harmoniczne mają bardzo małe amplitudy i są wynikiem zakłóceń pomiarowych prądu stojana oraz właściwości obserwatorów prędkości i momentu.

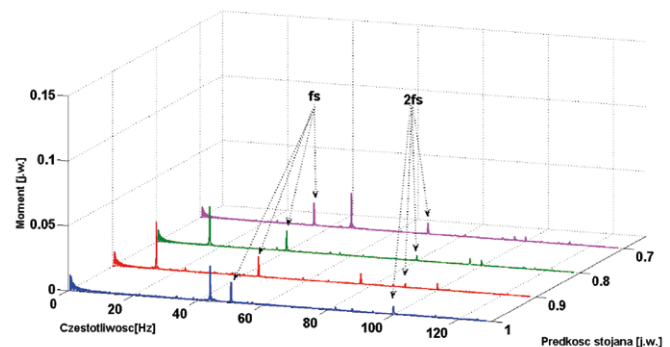
Analizę obliczonego momentu obciążenia dla uszkodzonego układu napędowego przedstawiono na rys. 8.



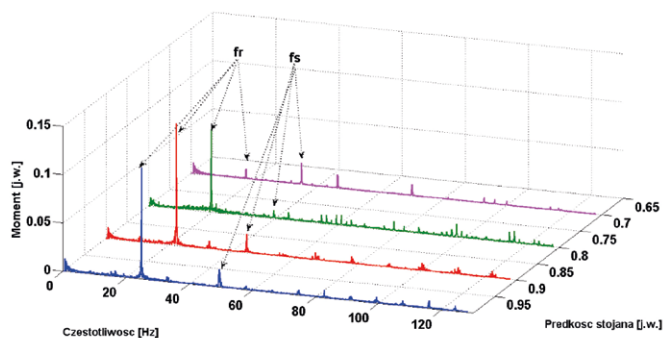
Rys. 5. Pomiary drgań sprawnego układu



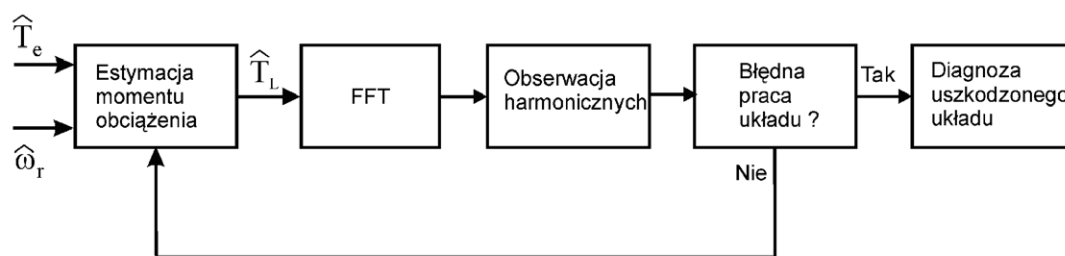
Rys. 6. Pomiary drgań układu z uszkodzeniem



Rys. 7. Wyniki analizy harmonicznej estymowanego momentu obciążenia dla sprawnego układu napędowego (wartość bazowa momentu $T_b = 15,57$ Nm)



Rys. 8. Wyniki analizy harmonicznej estymowanego momentu obciążenia dla uszkodzonego układu napędowego (wartość bazowa momentu $T_b = 15,57$ Nm)



Rys. 9. Schemat blokowy procedury wykrywania uszkodzeń

Na wykresach z rys. 8 można zauważyć, że dla estymowanego momentu obciążenia obserwowany jest znaczny wzrost amplitud harmonicznych w zakresie częstotliwości mechanicznej wirnika f_r . Podobnie jak w rys. 6 szczytowa wartość amplitudy pojawia się przy $f_s = 45$ Hz. Na podstawie obserwacji zmian (wzrostu) amplitud harmonicznych można więc z dużym prawdopodobieństwem zdiagnozować możliwość wystąpienia uszkodzenia układu. Procedura wykrywania uszkodzeń została pokazana na rys. 9.

5. Podsumowanie i wnioski

Uzyskane wyniki badań pozwalają stwierdzić, że do monitorowania i detekcji uszkodzeń mechanicznych układu napędowego (np. niewyważenia) pomocnym narzędziem może być obserwator momentu obciążenia. Przedstawiony obserwator ma prostą strukturę możliwą do implementacji w układzie sterującym pracą falownika, bez konieczności stosowania dodatkowych czujników poza standardowo wykorzystywanymi w przekształtniku. Możliwości obliczeniowe współcześnie stosowanych mikrokontrolerów pozwalają równocześnie na implementację analizy FFT w układzie sterującym i wykonywanie obliczeń w czasie rzeczywistym. Obserwacja wyników analizy FFT umożliwia ciągłą diagnostykę napędu.

Przedstawione wyniki badań obserwatora momentu są zgodne z wynikami pomiarów drgań. Zaprezentowana metoda detekcji uszkodzeń może być zastosowana we współczesnych przekształtnikowych napędach elektrycznych niezależnie od zastosowanej metody sterowania. Stosowanie metody detekcji jest możliwe zarówno dla napędów z filtrami sinusoidalnymi, jak i bez, tj. przy bezpośrednim zasilaniu silnika z falownika. W tym drugim wypadku prostsza i mniej czasochłonna będzie procedura obliczeniowa prędkości i momentu elektromagnetycznego.

Literatura

- [1] MIRCHEVSKI S.: *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] MAJKA K., MAJKA W.: *Poprawnie smarować i diagnozować czy przedwcześnie remontować?* „Napędy i Sterowanie” 9/2009.
- [4] HANC A.: *Eksploracja maszyn według stanu rzeczywistego – wibrodagnostyka*, „Napędy i Sterowanie” 5/2010.
- [5] GUZIŃSKI J.: *Zastosowanie dławika składowej zerowej w falownikowym napędzie silnika indukcyjnego*. „Napędy i Sterowanie” 3/2011.

- [6] GUZIŃSKI J.: *Narażenia napięciowe silników indukcyjnych zasilanych z falowników napięcia*. „Napędy i Sterowanie” 1/2013.
- [7] GUZIŃSKI J., STRANKOWSKI P.: *Sterowanie falownikami napięcia ograniczające prądy łożyskowe*. „Napędy i Sterowanie” 2/2014.
- [8] GUZIŃSKI J.: *Układy napędowe z silnikami indukcyjnymi i filtrami wyjściowymi falowników napięcia. Zagadnienia wybrane*. Seria Monografie nr 115, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2011.
- [9] DĘBOWSKI A., CHUDZIK P., LEWANDOWSKI D.: *Napęd asynchroniczny ze sterowaniem momentu*. „Napędy i Sterowanie” 4/2009.
- [10] GUZIŃSKI J., DIGUET M., KRZEMIŃSKI Z., LEWICKI A., ABU-RUB H.: *Application of Speed and Load Torque Observers in High Speed Train*. 13th International Power Electronics and Motion Conference EPE-PEMC 2008. 1–3 September 2008 r., Poznań.
- [11] OHISHI K., NAKANO K., MIYASHITA I., YASUKAWA S.: *Anti-slip control of electric motor coach based on disturbance observer*. AMC'98, Coimbra 1998.
- [12] KRZEMIŃSKI Z.: *Cyfrowe sterowanie maszynami asynchronicznymi*. Seria Postępy Napędu Elektrycznego PAN, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2001.
- [13] KRZEMIŃSKI Z.: *Obserwatory prędkości dla bezczujnikowego sterowania maszynami prądu przemiennego*. „Przegląd Elektrotechniczny” 5/2014.
- [14] GUZIŃSKI J., KRZEMIŃSKI Z.: *Filtr wyjściowy falownika napięcia*. „Napędy i Sterowanie” 4/2005.
- [15] AKAGI H., HASEGAWA H., DOUMOTO T.: *Design and performance of a passive EMI filter for use with a voltage-source PWM inverter having sinusoidal output voltage and zero common-mode voltage*. IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 19, No. 4, July 2004.
- [16] DU T., BRDYS, M.A.: *Shaft speed, load torque and rotor flux estimation of induction motor drive using an extended Luenberger observer*. Sixth International Conference on Electrical Machines and Drives, 8–10 Sep 1993, Oxford UK, s. 179–184.

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

mgr inż. Patryk Strankowski – Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Katedra Automatyki Napędu Elektrycznego, e-mail: strankowski.p@gmail.com

dr hab. inż. Jarosław Guziński – Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Katedra Automatyki Napędu Elektrycznego, e-mail: jaroslaw.guzinski@pg.gda.pl

artykuł recenzowany