

Adam Solbut
Politechnika Białostocka, Białystok

DIAGNOSTYKA UKŁADÓW NAPĘDOWYCH Z PRZEKSZTAŁTNIKIEM CZĘSTOTLIWOŚCI I SILNIKIEM KLATKOWYM W OPARCIU O SYGNAŁ MOCY CHWILOWEJ

DIAGNOSTICS OF DRIVE SYSTEMS WITH FREQUENCY CONVERTER AND SQUIRREL CAGE MOTOR BASED ON INSTANTANEOUS POWER SIGNAL

Streszczenie: Ocena stanu silników klatkowych zasilanych z przekształtników częstotliwości jest silnie związana z algorytmami sterowania przekształtnikami. Przy zasilaniu w sieci energetycznej lub z przekształtnika sterowanego metodą skalarną do diagnostyki używa się sygnału wartości chwilowej prądu stojana. W przypadku sterowania metodami wykorzystującymi sprzężenia zwrotne ocena składników występujących w przebiegu prądu jest utrudniona lub nieskuteczna. W artykule wykazano, że diagnostyka oparta na pomiarze mocy chwilowej umożliwi ocenę stanu układu napędowego niezależnie od sposobu sterowania przekształtnikiem. Rozważania teoretyczne potwierdzono badaniami laboratoryjnymi dla różnych algorytmów sterowania, w tym: sterowania skalarnego, metodach opartych na orientacji wektora pola (FOC) oraz bezpośredniego sterowania momentem (DTC).

Abstract: Frequency inverter fed squirrel-cage motors state estimation is strongly connected with inverter's control algorithms. For motors supplied directly with power net or inverter-fed motors using scalar control method instantaneous stator current's values can be used for diagnostics. Usage of inverter's control methods providing control feedbacks, state estimation using only stator currents transient values seems to be either difficult, or even unsuccessful. The paper presents, that in that case, diagnostics based on transient motor power enables motor drive's state estimation independently from inverter's control method. Theoretical deliberations had been supported by laboratory tests for different control algorithms, including: scalar method, field-oriented control (FOC) and direct torque control (DTC).

Słowa kluczowe: diagnostyka, maszyny indukcyjne, przemienniki częstotliwości
Keywords: diagnosis, induction motors, voltage inverters

1. Wstęp

Problemy diagnostyki maszyn klatkowych zasilanych z przekształtników częstotliwości związane są ze stosowaniem różnych algorytmów sterowania przekształtnikami [5]. Wiele z nich wykorzystuje sprzężenia zwrotne, których działanie wymusza przebiegi wartości chwilowych prądów silnika. Układ sterowania pracą przekształtników powoduje, że mimo uszkodzeń silnika, prąd silnika w stanach ustalonych ma przebieg bliski sinusoidzie. Wymuszenie przebiegu prądu powoduje, że skutki uszkodzeń muszą być widoczne w sygnale napięcia zasilającego silnik i w efekcie w przebiegu mocy chwilowej. Pojawia się tu problem pomiaru napięcia na zaciskach silnika. Zwykle napięcie to nie jest mierzone, a jego wartość chwilowa obliczana jest na podstawie pomiaru napięcia w układzie pośredniczącym prądu stałego oraz stanu kluczy przekształtnika. Takie rozwiązanie wymaga dostępu do wielkości w algorytmach sterowania przekształtnikiem.

Innym sposobem uzyskania informacji o przebiegu mocy chwilowej dostarczonej do silnika jest bezpośredni pomiar napięć i prądów przewodowych.

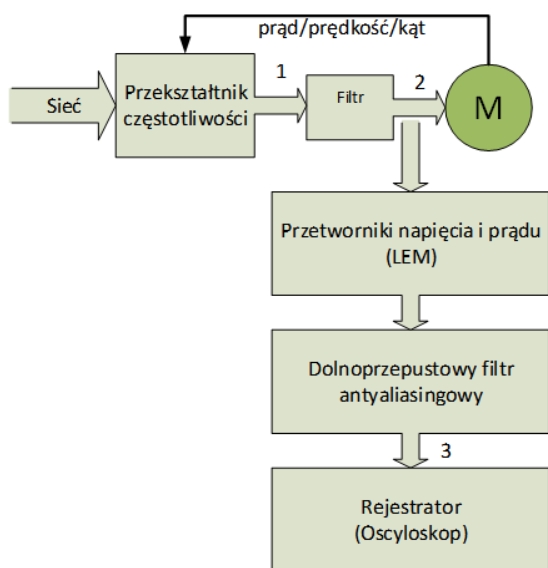
2. Wpływ sposobu sterowania pracą przemiennika częstotliwości na sygnały diagnostyczne

W literaturze dominuje prezentacja algorytmów diagnostycznych dla układów napędowych zasilanych ze źródeł napięcia (sieć lub przemiennik częstotliwości sterowany metodą skalarną) W publikacji [1] wykazano, że w tych przypadkach można stosować algorytmy diagnostyczne oparte na ekstrakcji cech uszkodzeń w oparciu o analizę harmoniczną wartości chwilowej prądu stojana lub mocy chwilowej. Dużym problemem w praktycznych rozwiązaniach jest stosowanie algorytmów, które wykorzystują sprzężenia zwrotne [5]. Metody te opierają się głównie na wykorzystaniu estymatorów strumie-

nia, prędkości i momentu. Problemem, który często ogranicza lub uniemożliwia stosowanie klasycznych metod jest brak informacji o częstotliwości podstawowej harmonicznej w przebiegu napięcia fazowego silnika. Stan kluczy przemiennika częstotliwości często jest uzależniony od wartości chwilowych prądu, prędkości obrotowej, położenia kąтового wału wirnika, zadanej i estymowanej wartości momentu obrotowego itp. Ocena stanu silnika jest silnie zależna od algorytmów sterowania [5].

3. Pomiar mocy chwilowej w układach napędowych zasilanych z przekształtników częstotliwości

Współczesne rozwiązania napędów elektrycznych składają się zwykle z przekształtnika, filtra pomiędzy przekształtnikiem a silnikiem indukcyjnym. Algorytmy sterowania pracą silnika wykorzystują sprzężenia zwrotne od wielu sygnałów mierzonych lub estymowanych.



Rys. 1. Schemat układu napędowego z układem pomiaru napięć i prądów silnika

Część sygnałów jest mierzona bezpośrednio (prąd, napięcie w układzie pośredniczącym, prędkość kątowna lub położenie wału wirnika). Inne sygnały są estymowane na podstawie znajomości modelu matematycznego oraz pomiaru tylko niezbędnych wielkości. Niezależnie od tego, które z wielkości są wynikiem pomiaru bezpośredniego, a które są wynikiem estymacji, algorytmy sterowania wymuszają przebieg wartości chwilowej prądu, który z stanach ustalonych ma przebieg bliski sinusoidzie. Sygnały wykorzystywane w algorytmach sterowania nie są zwykle dostępne. W takim przypadku

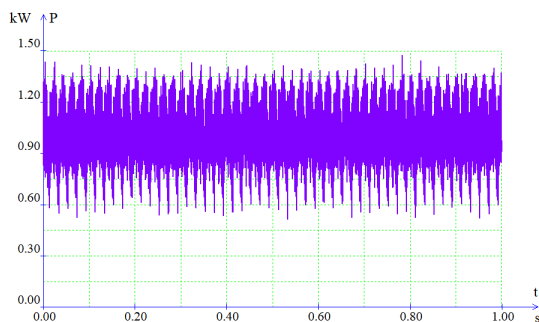
ocena stanu może opierać się na pomiarach niezależnych od użytego przekształtnika. Na rys.1 pokazano niezbędne składniki typowego układu napędowego z przekształtnikiem częstotliwości oraz silnikiem klatkowym. Przebieg napięcia na zaciskach silnika jest skutkiem przełączania kluczy przekształtnika. Skutkiem takiego działania przekształtnika jest duża szybkość narastania napięcia podanego na uzwojenie stojana. Jest to szkodliwe dla układów izolacyjnych, powoduje także pojawienie się stosunkowo dużych wartości prądów łożyskowych. W praktyce konieczne jest ograniczenie szybkości narastania napięcia poprzez stosowanie filtrów dU/dt lub filtrów silnikowych. Pomimo tego wartości chwilowe prądów i napięć zawierają wiele składników o wysokiej częstotliwości, które ograniczają możliwości pomiaru cyfrowego. Konieczne jest tu stosowanie dolnoprzepustowych filtrów antyaliasingowych. Wartość chwilową mocy $p(t)$ uzyskuje się z pomiaru prądów przewodowych w fazach U i W oraz napięć międzyfazowych UV i WV (układ Arona):

$$\begin{aligned}
 p(t) &= i_u u_{uv} + i_w u_{vw} \\
 p(t) &= i_u (u_u - u_v) + i_w (u_w - u_v) \\
 p(t) &= i_u u_u + i_w u_w - (i_u + i_w) u_v \\
 p(t) &= i_u u_u + i_v u_v + i_w u_w
 \end{aligned} \tag{1}$$

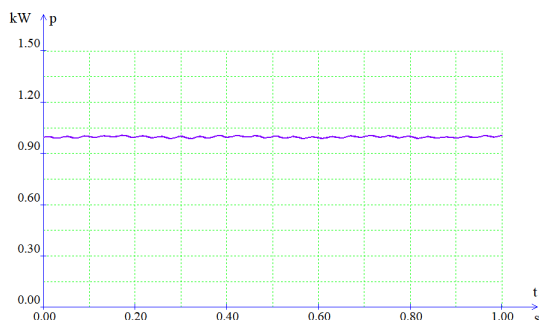
W przypadku maszyny sprawnej przy sinusoidalnym napięciu zasilającym i pełnej symetrii wartość tak obliczonej mocy jest równa mocy czynnej. W stanie ustalonym jest to wartość stała. Uszkodzenia maszyny powodują powstanie w przebiegu prądu i mocy [1, 2, 3, 7] składników zależnych od typu uszkodzenia i wartości prędkości kątownej wirnika. Efekt ten może być wykorzystany do oceny stanu silnika niezależnie od sposobu zasilania silnika.

4. Badania laboratoryjne

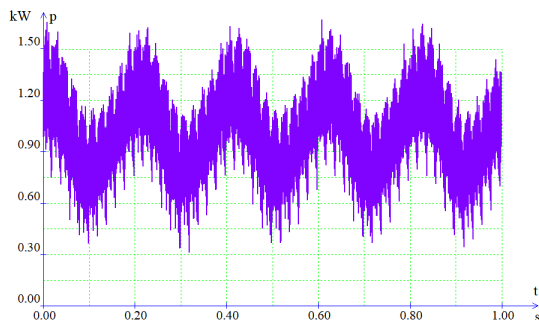
W celu sprawdzenia skuteczności analizy sygnału mocy chwilowej do wnioskowania o stanie silnika przeprowadzono szereg badań laboratoryjnych wykonanych przy wykorzystaniu układu pokazanego na rys.1. Badania wykonano dla różnych algorytmów sterowania pracą przekształtnika częstotliwości (sterowanie skalarnie, sterowanie metodą orientacji wektora pola (FOC) oraz bezpośredniego sterowania momentem.



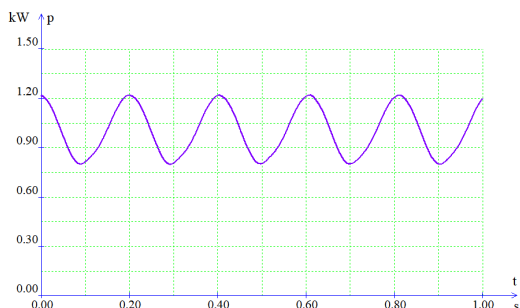
Rys. 2. Wartość chwilowa mocy dla silnika sprawnego przy sterowaniu metodą skalarną $f=50\text{Hz}$



Rys. 3. Ruchoma wartość średnia mocy dla silnika sprawnego przy sterowaniu metodą skalarną; $f=50\text{Hz}$

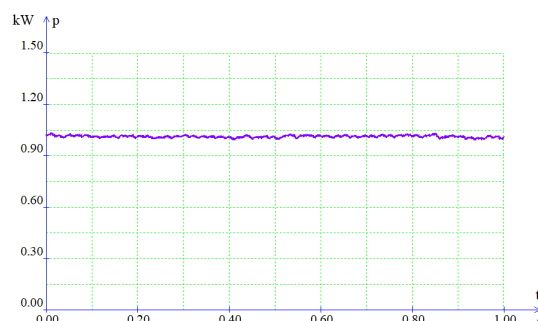


Rys. 4. Wartość chwilowa mocy dla silnika z uszkodzonymi 6 kolejnymi prętami klatki wirnika przy sterowaniu metodą skalarną $f=50\text{Hz}$

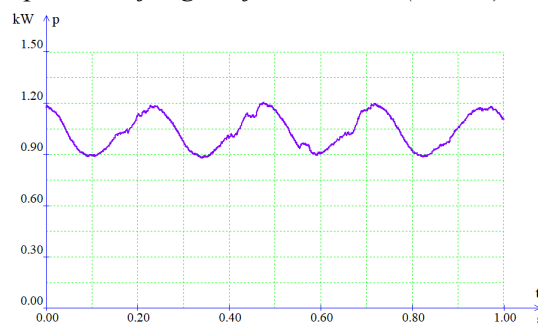


Rys. 4. Ruchoma wartość średnia mocy dla silnika z uszkodzonymi 6 kolejnymi prętami klatki wirnika przy sterowaniu metodą skalarną

Na rys. 1 przedstawiono przebieg mocy chwilowej silnika sprawnego w przypadku zasilania z przekształtnika sterowanego metodą skalarną. Widoczne są składniki wynikające z faktu stosowania modulatora PWM. Podobnie jak w [1] znacznym ułatwieniem analizy jest filtracja sygnałów wynikających z modulacji. Rys. 3 przedstawia przebieg ruchomej wartości średniej mocy chwilowej sygnału prezentowanego na rys.2. Oscylacje sygnału są tu niewielkie i wynikają z faktu badania realnej maszyny. W przypadku idealnej maszyny przebieg powinien zawierać tylko składową stałą. Rys. 4 i 5 prezentują ten sam przebieg, lecz dla silnika z uszkodzonymi 6 kolejnymi prętami klatki wirnika.

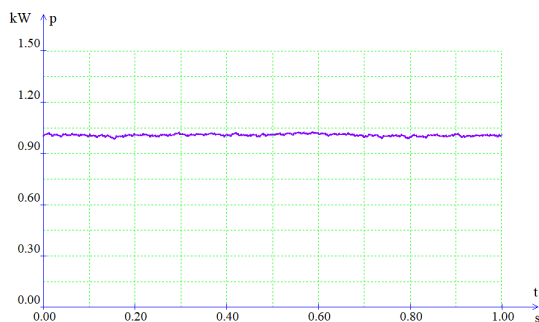


Rys. 6. Ruchoma wartość średnia mocy dla silnika sprawnego przy sterowaniu metodą bezpośredniej regulacji momentem (DTC- δ)

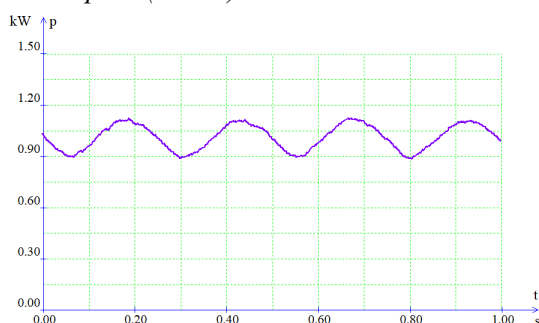


Rys. 7. Ruchoma wartość średnia mocy dla silnika z uszkodzonymi 6 kolejnymi prętami klatki wirnika przy sterowaniu metodą bezpośredniej regulacji momentem (DTC- δ)

Rys. 6 przedstawia przebieg ruchomej wartości średniej mocy silnika sprawnego sterowanego metodą bezpośredniej regulacji momentem (DTC- δ) przy zadanej prędkości wirnika równej 1500 obr/min i obciążonej momentem znamionowym, natomiast na rys. 7 widać oscylacje mocy wynikające z uszkodzenia 6 kolejnych prętów wirnika.



Rys. 8. Ruchoma wartość średnia mocy dla sprawnego przy sterowaniu metodą orientacji wektora pola (dFOC)



Rys. 9. Ruchoma wartość średnia mocy dla silnika z uszkodzonymi 6 kolejnymi prętami klatki wirnika przy sterowaniu metodą orientacji wektora pola (dFOC)

Rysunki 8 i 9 prezentują te same przebiegi, lecz przy sterowaniu metodą orientacji wektora pola. We wszystkich prezentowanych przypadkach widoczne są duże podobieństwa w przebiegach mocy przy tym samym stopniu uszkodzenia maszyny oraz podobnych warunkach pracy. Drobne różnice są efektem wynikającym z innych wartości częstotliwości podstawowej harmonicznej napięcia zasilającego. W przypadku sterowania skalarnego zadawana jest wartość częstotliwości napięcia. Układ pracuje bez sprzężenia zwrotnego od prędkości. Przy metodach DTC- δ oraz dFOC zadawana jest wartość prędkości wirowania wału wirnika, a częstotliwość napięcia w stanie ustalonym jest efektem zadanej prędkości oraz momentu obciążenia.

5. Podsumowanie

Diagnostyka silników klatkowych w oparciu o przebiegi wartości chwilowych prądu jest skuteczna jedynie w przypadku zasilania silników z sieci energetycznej lub skalarnej metody sterowania przekształtnikiem. Przy pracy układów napędowych sterowanych metodami wektorowymi (FOC) lub bezpośredniej

regulacji momentem (DTC) konieczne jest badanie przebiegu prądów i napięć silnika lub analiza sygnału mocy chwilowej dostarczonej do silnika. Rozwiązanie oparte na analizie mocy umożliwia ocenę stanu niezależnie od sposobu zasilania silnika klatkowego.

6. Literatura

- [1]. Al-Mashakbeh A. S., Mamchur D., Kalinov A., Zagirnyak M.: A diagnostic of induction motors supplied using frequency converter basing on current and power signal analysis, *Przegląd Elektrotechniczny*, Nr 12/2016.
- [2]. Didier G. Razik H., Caspary O., Ternisien E.: Rotor Cage Fault Detection in Induction Motor using global modulation index on the Instantaneous Power Spectrum. SDEMPED 2003 Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives Atlanta, GA, USA, 24-26 August 2003.
- [3]. Drif M., Benouzza N., Bendiabdellah A., Dente J. A.: The use of instantaneous power spectrum in the detection of rotor cage faults on 3-phase induction motors. ELECO'99 International Conference on Electrical and Electronics Engineering, 1-5 December 1999, Bursa, Turkey.
- [4]. Dybowski P.: Wpływ zasilania napięciem odkształconym na widmo prądów stojana cz.2, XIII Seminarium Techniczne: Problemy eksploatacji maszyn i napędów elektrycznych, Eksploatacja, diagnostyka i modernizacja silników elektrycznych, maj, Ustroń Jaszowiec, 2004, s.84-92.
- [5]. Sołbut A.: Ocena stanu układów napędowych z maszyną asynchroniczną, *Rozprawy naukowe nr 239*, Wydawnictwa Politechniki Białostockiej, Białystok 2013.
- [6]. Zagirnyak M. V., Mamchur D.G., Kalinov A. P., Chumachowa A. V.: Induction motors diagnostics based on the power consumption signal analysis, IPublisher PE Sherbatykh A. V., Kremenchuk 2013.

Autorzy

dr hab. inż. Adam Sołbut, Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, ul. Wiejska 45d 15-351 Białystok, E-mail: a.solbut@pb.edu.pl.

Badania zostały zrealizowane w ramach pracy nr S/WE/1/2018 i sfinansowane ze środków na naukę MNiSW.