

Adam Solbut
Politechnika Białostocka, Białystok

OCENA STANU UKŁADU NAPĘDOWEGO STEROWANEGO METODĄ ORIENTACJI WEKTORA POLA

STATE ESTIMATION OF MOTOR DRIVE USING FIELD-ORIENTED CONTROL METHOD

Abstract: Possibilities of inverter-fed motor damages modeling may radically simplify building of on-line working diagnostic algorithms. Choice of those signals and coefficients, on which real-time working algorithms could estimate motor drive's technical state is an important problem. The way of numerical modeling, based on the original program solution using object C++ programming techniques is presented in the paper. Results of numerical modeling of field-oriented controlled motor drive, including motor damages such as rotor bar braking or rotor eccentricity are included. Effects indicate on the possibility of use of moving RMS current value and flux error signal-based estimation coefficients for on-line diagnostics of a motor drive.

1. Wstęp

Do sterowania współczesnych falowników napięcia wykorzystuje się w praktyce techniki mikroprocesorowe. Istotnymi składnikami algorytmów sterowania są tu estymatory strumienia wirnika, które wykorzystują pomiary wartości chwilowych prądów fazowych silnika i napięcia w układzie pośredniczącym oraz pomiar (lub estymata) wartości chwilowej prędkości kątowej oraz położenia wału wirnika. Układy takie zawierają zwykle regulatory prądu, strumienia, momentu i prędkości obrotowej. Szybki rozwój technik mikroprocesorowych spowodował, że stosowane procesory mają zwykle znacznie większe możliwości obliczeniowe niż wymagają tego algorytmy sterowania. W takiej sytuacji moc obliczeniową procesorów można wykorzystać do oceny stanu układu napędowego w czasie jego normalnej eksploatacji. Do tego celu niezbędne jest opracowanie algorytmów, na podstawie których możliwe byłoby przewidywanie rozwoju awarii maszyny asynchronicznej. Wobec silnego odkształcenia prądów i napięć fazowych problemem jest wybór sygnałów diagnostycznych. Niezbędne jest zdefiniowanie wskaźników jakości, których zmiana w czasie może stanowić podstawę oceny stanu układu napędowego.

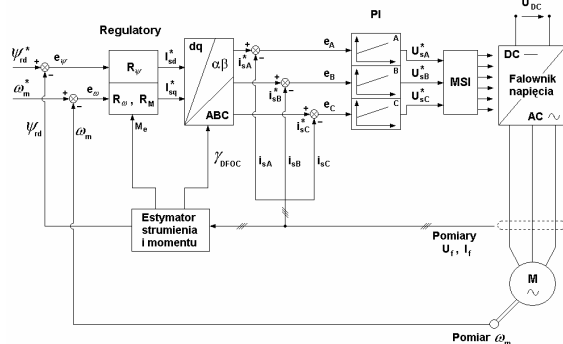
W literaturze diagnostycznej maszyn asynchronicznych zwykle przyjmuje się sinusoidalny kształt napięcia zasilającego, a do diagnostyki używa się analizy harmonicznej przebiegów prądów fazowych silnika. Metody te dają dobre efekty przy założeniu stałej częstotliwości napięcia zasilającego i analizie pracy maszyny

pod obciążeniem w stanie ustalonym. Automatyczna ocena stanu jest tu dyskusyjna i może dać poprawne wyniki jedynie poprzez zastosowanie rozbudowanych algorytmów opartych na metodach sztucznej inteligencji (sieci neuronowe, logika rozmyta). Trudnością jest także ocena spełnienia założeń niezbędnych do interpretacji algorytmów takich jak stałość momentu obciążenia, stan ustalony czy stałość częstotliwości napięcia zasilającego. Analizy harmoniczna stosowana do diagnostyki wymaga wykonywania przekształcenia FFT na dużej liczbie próbek. Wykonanie takich analiz przez procesory używane do sterowania jest problematyczne. Niezbędne jest poszukiwanie sygnałów i współczynników oceny stanu układu pracującego ze sprzężeniami zwrotnymi, gdzie często informacja o częstotliwości napięcia zasilającego nie jest bezpośrednio dostępna. Dotyczy to m.in. układów sterowanych metodą orientacji wektora pola.

W artykule zaproponowano stosowanie do oceny stanu układu współczynników opartych na dostępnych sygnałach takich jak uchyb strumienia wirnika czy wartość skuteczna ruchoma prądów silnika. Rozważania poparto wynikami modelowania numerycznego układu napędowego sterowanego metodą FOC z uwzględnieniem awarii klatki wirnika i mimośrodowego osadzenia wału wirnika.

2. Model matematyczny układu napędowego

Modelowanie numeryczne uszkodzeń silnika należy do zagadnień stosunkowo trudnych. Wygodną i przejrzystą metodą modelowania jest wykorzystanie równań maszyny asynchronicznej w składowych w naturalnym układzie odniesienia [2]. Stosowane w teorii maszyn elektrycznych transformacje upraszczają postać równań przy założeniu symetrii macierzy opisujących równania dynamiki maszyny. Stosowanie transformacji w znacznym stopniu ułatwia numeryczne rozwiązywanie równań maszyny. Modelowanie dowolnych uszkodzeń maszyny powoduje, że postać macierzy rezystancji i odpowiednich indukcyjności nie zachowuje warunków symetrii. W takiej sytuacji transformacja równań nie musi prowadzić do uproszczenia opisu. W aktualnym stanie rozwoju procesorów wygodnym i możliwym do stosowania w praktyce technicznej jest stosowanie opisu we współrzędnych naturalnych.



Rys. 1. Układ sterowania **DFOC** z liniowymi regulatorami prądu w każdej fazie

Aktualny stan rozwoju technik komputerowych umożliwia wykonywanie obliczeń numerycznych opisujących zachowanie układu napędowego z uwzględnieniem modelowania algorytmów sterowania wykorzystywanych w praktycznych napędach wraz modelem silnika w naturalnym układzie odniesienia. Wykorzystanie technik programowania obiektowego [1] umożliwiło rozdzielanie kodu odpowiedzialnego za wykonywanie skomplikowanych obliczeń na oddzielne klasy opisujące poszczególne składniki układu napędowego i algorytmów obliczeniowych. Prezentowane wyniki modelowania numerycznego uzyskano dzięki wykorzystaniu autorskiego, oryginalnego modułu symulacyjnego, w którym kod został rozdzielony na następujące składniki [5]:

- metody numeryczne rozwiązywania równań różniczkowych
- model maszyny asynchronicznej klatkowej
- modelowanie pracy falownika wraz z estymatorem strumienia i algorytmem FOC
- interfejs graficzny z możliwością pracy interaktywnej w czasie modelowania

Rozwiązanie takie dało możliwość niezależnej kontroli nad poszczególnymi elementami wchodzącymi w skład układu napędowego. Fragmenty kodu testowane były niezależnie, przy czym powiązanie pomiędzy składnikami polega na zapewnieniu interfejsu podobnego do rzeczywistych składników układu napędowego. Wybór języka C++, jako narzędzia, które wykorzystano do budowy aplikacji, umożliwiło implementację kodu algorytmów sterujących z rzeczywistego układu napędowego zbudowanego na potrzeby laboratorium dydaktycznego (rys.1) [7].

Modelowanie pęknięć prętów klatki lub pierścieni zwierających zamodelowano poprzez zwiększenie odpowiednich wartości w macierzy rezystancji. Uwzględnienie mimośrodowego ustawienia osi wału wirnika wymaga istotnych zmian macierzy indukcyjności. Algorytmy obliczania indukcyjności podano w [4]. W niniejszej pracy przyjęto uproszczony opis zmian przewodności magnetycznej szczeliny opisanej wzorem [3]:

$$\lambda(x, \varphi_d) = \frac{1}{\delta_0} [\lambda_0 + \lambda_1 \cos(x - \varphi_d)] \quad (1)$$

gdzie:

δ_0 - średnia grubość szczeliny powietrznej

x - kąt mechaniczny

$\varphi_d = \varphi_0 = \text{const}$ - dla ekscentryczności statycznej

$\varphi_d = \varphi_0 + \varphi$ - dla ekscentryczności dynamicznej

φ - kąt obrotu wirnika

φ_0 - wartość kąta wyznaczającego miejsce początkowe przesunięcia wału wirnika

$$\lambda_0 = \frac{1}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}} \quad (2)$$

$$\lambda_1 = 2 \frac{1 - \sqrt{1 - \varepsilon^2}}{\varepsilon \sqrt{1 - \varepsilon^2}} \quad (3)$$

$$\varepsilon = \frac{\delta_e}{\delta_0} \quad (4)$$

gdzie δ_e jest bezwzględna wartością ekscentryczności a ε jest wartością względną

Wartości składników macierzy indukcyjności wyznaczono na podstawie szacowanego rozkładu pola magnetycznego wzbudzonego przez poszczególne uzwojenia w maszynie oraz obliczenie na tej podstawie strumieni skojarzonych. Rozkład pola magnetycznego wzbudzonego przez uzwojenia wyznaczono na podstawie zależności [4]:

$$B_n = \mu_0 \lambda(x, \varphi, t) \left(\Theta_n(x, \varphi, t) - \frac{\int_x^{x+2\pi} \lambda(x, \varphi, t) \Theta_n(x, \varphi, t) dx}{\int_x^{x+2\pi} \lambda(x, \varphi, t) dx} \right) \quad (5)$$

W przypadku pola wzbudzonego przez uzwojenia stojana, analizę pola przeprowadzono na podstawie analizy harmonicznej przepływu, co ułatwia zapis rozkładu pola w postaci sumy:

$$B_n = \sum_{\nu=1}^{\infty} B_{n\nu} \quad (6)$$

Wartości poszczególnych indukcyjności wzajemnych pomiędzy uzwojeniami stojana i wirnika wyznaczono na podstawie obliczenia odpowiednich strumieni skojarzonych:

$$\psi_{n,k} = \frac{l_e D}{2} \int_{\alpha_k - \frac{\beta}{2}}^{\alpha_k + \frac{\beta}{2}} B_n dx = \sum_{\nu=1}^{\infty} \psi_{n,k,\nu} \quad (7)$$

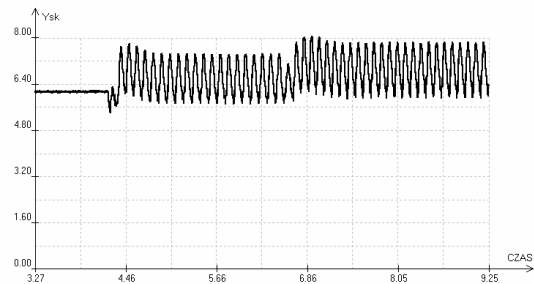
gdzie wartość pola jest wzbudzana przez n-te uzwojenie stojana, a granice całkowania wyznacza położenie sąsiednich prętów klatki wirnika.

Wartości składników macierzy w obrębie wirnika obliczono w sposób podobny, przy czym wykorzystano tu szczególne cechy równania (5) i obliczenia wykonano w postaci analitycznej przy pominięciu otwarcia żłobka i skosu prętów wirnika. Skos uwzględniono poprzez wprowadzenie współczynnika skosu do odpowiednich składowych równań. Do obliczeń indukcyjności pomiędzy uzwojeniami stojana wykorzystano metodę sinusoidalnych uzwojeń zastępczych [4].

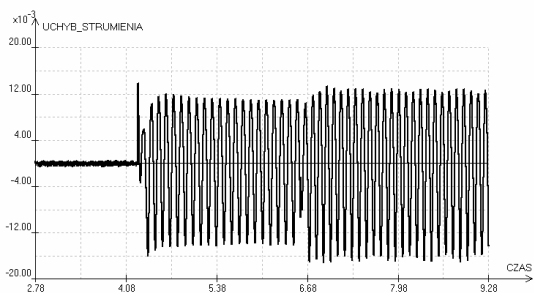
3. Badania symulacyjne układu napędowego

Modelowanie numeryczne układu napędowego przeprowadzono dla sterowania opartego na metodzie orientacji wektora pola (FOC) o strukturze podanej na rys.1. Zastosowano tu regulatory prądu, strumienia i prędkości typu PI. W stanie ustalonym uchyb poszczególnych składników dąży do zera. Uwzględnienie uszkodzeń wprowadza dodatkowe składniki, które uwydatniają się w postaci oscylacji uchy-

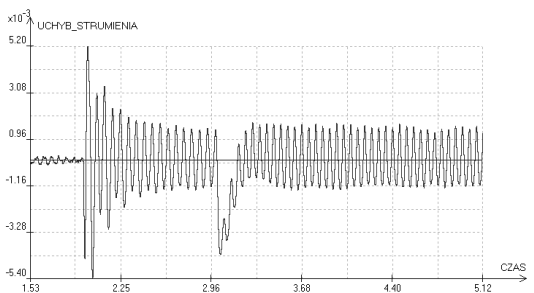
bów oraz innych wielkości występujących algorytmie sterowania. Wartość średniego odchylenia uchybów w czasie pracy można wykorzystać do oceny stanu układu napędowego. W teorii diagnostyki technicznej często wykorzystuje się porównanie modelu maszyny z rzeczywistym pomiarem wybranych wielkości fizycznych. Uzyskuje się w ten sposób residua stanowiące podstawę do oceny stanu.



Rys. 2. Wartość skuteczna ruchoma prądu fazowego silnika obciążonego w momencie wystąpienia uszkodzeń kolejno dwóch i trzech prętów klatki wirnika



Rys. 3. Przebieg uchybu strumienia wirnika obciążonego w momencie wystąpienia uszkodzeń kolejno dwóch i trzech prętów klatki wirnika

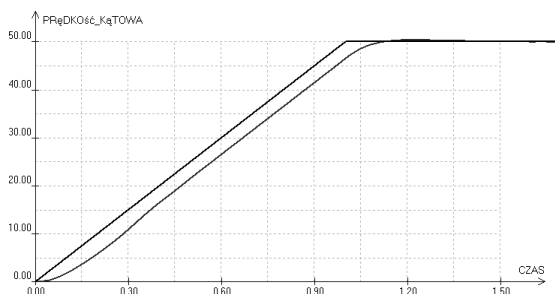


Rys. 4. Przebieg uchybu strumienia wirnika silnika w momencie wystąpienia mimośrodowo wirnika oraz obciążeniu połową momentu znamionowego

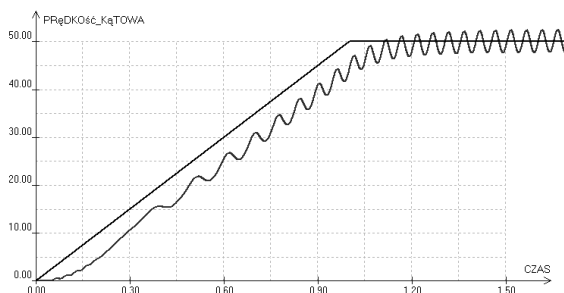
W badanym przypadku strumień wirnika uzyskuje się na podstawie estymatorów opartych na liniowym modelu maszyny. Nie ma potrzeby budowy niezależnego modelu dla potrzeb diagnostycznych. Uchyb strumienia staje się tu w

sposób bezpośredni wskaźnikiem oceny stanu. Badanie wpływu różnych uszkodzeń na wartość takiego residuum daje możliwość identyfikacji awarii maszyny.

Na rys.2 pokazano przebieg wartości skutecznej ruchomej prądu stojana dla obciążonego silnika w momencie wystąpienia pęknięć kolejno 2 i 3 prętów wirnika. Rys.3 prezentuje zmiany uchybu strumienia wirnika w takim samym przypadku. Wyraźnie pojawiają się oscylacje wartości skutecznej ruchomej jak i uchybu strumienia wirnika. Rys.4 przedstawia uchyb strumienia dla przypadku awarii polegającej na 20% mimośrodzie statycznym wirnika. Widoczne oscylacje występują tu bez obciążenia silnika. Po obciążeniu amplituda oscylacji nieznacznie maleje.



Rys. 5. Prędkość kątowna zadana i rzeczywista przy rozruchu maszyny klatkowej bez uszkodzeń



Rys. 6. Prędkość kątowna zadana i rzeczywista przy rozruchu maszyny klatkowej z 20% mimośrodem statycznym

Na rys. 5 i 6 pokazano rozruch silnika do wartości prędkości kątowej 50rad/s przy liniowej zmianie sygnału prędkości zadanej. Rys.5. prezentuje przebieg rozruchu dla maszyny dobrej, natomiast rys.6 przedstawia rozruch maszyny przy 20% mimośrodku statycznym wirnika. W przypadku uszkodzenia wyraźne są oscylacje prędkości w czasie rozruchu. Pęknięcia klatki lub pierścieni zwierających powodują powstanie oscylacji dopiero w przypadku obciążenia maszyny. Mimośród statyczny powoduje, że

oscylacje występują także przy biegu jałowym, a ich amplituda nieznacznie maleje ze wzrostem momentu obciążenia. Dla pęknięć prętów klatki wzrost momentu zwiększa amplitudę oscylacji. Taki związek może być wykorzystany do wstępnej lokalizacji uszkodzenia.

4. Wnioski

Prezentowane badania symulacyjne wykazały, że możliwa jest ocena stanu układu napędowego w czasie jego eksploatacji. W przypadku sterowania metodą orientacji wektora pola (FOC) sygnałem umożliwiającym stosunkowo łatwą ocenę stanu jest sygnał uchybu strumienia. Sprawdzenie korelacji pomiędzy wskaźnikiem oceny a zmianą momentu obciążenia może wskazywać na miejsce awarii typu pęknięcia klatki czy uszkodzenia łożysk.

5. Literatura

- [1]. Dattatri K., Język C++. *Efektywne programowanie obiektowe*, Helion, Gliwice 2005.
- [2]. Houdouin G., Barakat G., Dakyo B., *Destobbelee E., A Method the Simulation of Inter-Turn Short Circuits in Squirrel Cage Induction Machines*, EPE-PEMC, Dubrownik & Cavtat, 2002 (on CD)
- [3]. Kwaśnicki S., *Halas magnetyczny silników indukcyjnych trójfazowych klatkowych*, Komel, Katowice 1998
- [4]. Sobczyk T. J. *Metodyczne aspekty modelowania matematycznego maszyn indukcyjnych*, WNT, Warszawa 2004
- [5]. Sołbut A., *Modeling of electromechanical converters using object oriented programming techniques*, XV International Symposium Micromachines & Servosystems, Białowieża - Soplicowo 2006, str. 164-169.
- [6]. Sołbut A., *Możliwości automatycznej oceny stanu układu napędowego z maszyną asynchroniczną*, Diagnostyka nr 35 (2005), str.13-16.
- [7]. Sołbut T., *Stanowisko laboratoryjne z mikroprocesorem ADSP21061 do badania właściwości metody sterowania FOC w falowniku napędowym*, Praca dyplomowa magisterska, Politechnika Białostocka, Białystok 2007.

Autorzy

Sołbut Adam,
Politechnika Białostocka
asolbut@pb.edu.pl

Artykuł został opracowany w ramach pracy własnej W/WE/7/06