

Adam Solbut
Politechnika Białostocka, Białystok

MODELOWANIE NUMERYCZNE WYBRANYCH ALGORYTMÓW DIAGNOSTYCZNYCH MASZYN ASYNCHRONICZNYCH

NUMERICAL MODELING OF CHOSEN DIAGNOSTIC ALGORITHMS OF ASYNCHRONOUS MOTORS

Abstract: Results of numerical modeling of squirrel-cage asynchronous motor with rotor circuit damages are presented in the paper. Possibilities of machine state rating in normal exploitation, based on the moving RMS signal and also proposed motor drive state estimation factors are also included. For modeling of the machine and proposed algorithm, the original program solution based on built C++ class library had been used. It had been shown, that the application of currents and voltages symmetry estimation factors and moving RMS currents and voltages diagrams oscillation estimation factors provides the identification of damage location. Analysis of proposed factors values makes the basis for indicating of damage location – either the supply source, or the stator circuit, or the rotor circuit asymmetry. Modeled damages have shown that not only the number of damaged rotor bars, but especially their symmetry in the rotor circuit has relevant meaning. Presented simulation results are being used for testing of proposed algorithms and building of a diagnostic device, based on Analog Devices SHARC 21065L processor.

1. Wstęp

Badania algorytmów diagnostycznych związane są z dużymi trudnościami budowy fizycznych modeli uszkodzeń maszyn asynchronicznych. Sygnały używane do diagnostyki uszkodzeń podlegają zmianom zależnym od czynników takich jak np. jakość sprzęgieł użytych do połączenia z maszyną roboczą. Dużym problemem jest także realizacja modeli uszkodzeń z możliwością ich usunięcia (pęknięcia klatki wirnika, pierścieni zwierających) lub kosztownych rozwiązań sprzętowych (mimośród wirnika). Wielu autorów testuje swoje algorytmy na rzeczywistych maszynach po wykonaniu uszkodzeń nieodwracalnych oraz badań uszkodzeń z możliwością ich usunięcia, lecz jedynie dla wybranych przypadków. Rozwiązania takie nie dają możliwości badania wpływu rozwiązań konstrukcyjnych na jakość pracy napędów z uszkodzeniami, czy też analiz skutków występowania wielu drobnych uszkodzeń. Są to również badania kosztowne, zwykle dotyczą tylko wybranych konstrukcji maszyn. Znacznie większe możliwości niesie wykorzystanie nowoczesnej techniki komputerowej opartej na symulacji zjawisk fizycznych z wykorzystaniem technik programowania obiektowego.

Modelowanie dynamiki maszyn zwykle opiera się na wykorzystaniu różnych przekształceń matematycznych, dzięki którym następuje znaczne uproszczenie postaci równań stanu. Są

one wynikiem przyjęcia założeń związanych np. z symetrią uzwojeń, symetrią obwodu magnetycznego itp. Większe możliwości daje nam modelowanie w naturalnym układzie odniesienia.

Niniejsza praca dotyczy analizy możliwości numerycznego modelowania maszyn asynchronicznych z dowolnymi rodzajami uszkodzeń z jednoczesnym testowaniem algorytmów diagnostycznych. W pracy wykazano, że moc obliczeniowa aktualnie używanych komputerów osobistych wystarcza do modelowania uszkodzonych maszyn w czasie możliwym do praktycznego stosowania. Przedstawione rozwiązanie oparto na oryginalnych autorskich programach wykorzystujących techniki programowania obiektowego.

2. Budowa programu symulacyjnego

Program symulacyjny zbudowano w oparciu o znany z literatury model matematyczny silnika asynchronicznego klatkowego [1, 2, 7] w naturalnym układzie odniesienia. Rozwiązanie takie daje możliwość stosunkowo łatwego i wygodnego modelowania stanów awaryjnych maszyny. Do budowy programu symulacyjnego wykorzystano oryginalne rozwiązanie polegające na zastosowaniu biblioteki klas ułatwiających przygotowanie programów symulacyjnych [5]. Wykorzystano tu techniki programowania obiektowego dostępne w języku C++.

Proponowana technika budowy programów symulacyjnych wymaga dopisania (do już gotowego kodu źródłowego) funkcji obliczającej pochodne zmiennych stanu, algorytmów obliczających wartości skuteczne ruchome prądów stojana oraz współczynników określających stan maszyny. Zastosowanie oryginalnej klasy obliczeń macierzowych umożliwiło zapis tych równań w postaci zbliżonej do notacji matematycznej. Gotowa aplikacja pracuje w wielowątkowym środowisku Win32 dając możliwość pracy interaktywnej z jednoczesną prezentacją graficzną procesu symulacji. Wadą takiego rozwiązania jest konieczność pracy w kodzie źródłowym języka C++.

3. Propozycje współczynników oceny stanu maszyny asynchronicznej

Proponowany sygnał diagnostyczny, jakim jest wartość skuteczna ruchoma prądu stojana, nie ma cech wystarczających do automatycznej oceny stanu. Do tego celu niezbędne jest opracowanie algorytmów oceny zmian takiego sygnału w czasie. W przypadku idealnego stanu maszyny (w stanach pracy ustalonej) wartość ta ma jedynie składową stałą. Awaria silnika polegająca na niesymetrycznej pracy wirnika (pęknięte pręty klatki, mimośrodowe osadzenie wału itp.) wprowadza składowe zmienne o częstotliwościach zależnych od poślizgu. Takie cechy sygnału umożliwiają wprowadzenie współczynników oceny zmian sygnału w czasie testowania (TT- Test Time) w postaci współczynnika „oscylacyjności” prądu (OCF Oscillation Current Factor) zdefiniowanego jako:

$$OCF = \frac{I_{RMS_MIN}^2}{I_{RMS_MAX}^2} \quad (1)$$

gdzie:

I_{RMS_MAX} – największa wartość skuteczna modułu wektora prądu stojana w czasie TT

I_{RMS_MIN} – najmniejsza wartość skuteczna modułu wektora prądu stojana w czasie TT

Okres czasu TT jest zależny od poślizgu oraz częstotliwości podstawowej harmonicznej napięcia zasilającego. Optymalna jego wartość powinna być nie mniejsza niż okres oscylacji prądu. W praktyce wartość poślizgu w czasie normalnej pracy maszyny nie przekracza kilku procent, stąd przyjęcie czasu TT równego wielokrotności okresu podstawowej harmoni-

cznej napięcia zasilającego (50-100)T powinno zapewnić prawidłową ocenę stanu. Istotnym problemem wymagającym oceny jest także identyfikacja stanu ustalonego. W stanach przejściowych (rozruch, hamowanie, zmiana momentu obciążenia) wartość tak zdefiniowanego współczynnika może przyjmować wartości mniejsze od jedności. Jedną z możliwości oceny stanu maszyny, uwzględniającą możliwość występowania stanów dynamicznych, jest poszukiwanie wartości maksymalnej wskaźnika w czasie DT (Diagnostic Time) wymaganym dla oceny stanu. Oczywiście jest, że DT musi być wielokrotnie dłuższy od TT. Czas ten zależy od trybu pracy układu napędowego wyznaczonego przez częstotliwość występowania stanów dynamicznych (częstotliwość rozruchu, szybkość zmian momentu obciążenia).

Proponowany sygnał może być także przydatny do oceny stanu symetrii prądów stojana. Ocenę taką może określać wartość współczynnika zdefiniowanego jako SCF (Symmetrical Current Factor):

$$SCF = \frac{\min(I_{RMS_α}^2, I_{RMS_β}^2)}{\max(I_{RMS_α}^2, I_{RMS_β}^2)} \quad (2)$$

gdzie:

$I_{RMS_α}$, $I_{RMS_β}$ - wartości skuteczne ruchome prądów stojana dla wartości chwilowych prądów obliczonych z transformacji Parka:

$$i_α = \frac{3}{2} \left(i_A - \frac{1}{2} i_B - \frac{1}{2} i_C \right) \quad (3)$$

$$i_β = \frac{3}{2} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} i_B - \frac{\sqrt{3}}{2} i_C \right) \quad (4)$$

gdzie:

i_A , i_B , i_C , - wartości chwilowe prądów fazowych silnika

Wartość tego współczynnika jest równa jedności w przypadku stanu ustalonego i pełnej symetrii uzwojenia stojana (przy założeniu symetrii napięć zasilających), w stanach przejściowych przyjmuje wartości mniejsze od jedności. Stosowanie proponowanych współczynników umożliwia wskazanie przyczyny istnienia niesymetrii prądowej. W tym celu należy wykorzystać podobne współczynniki liczone dla wartości odpowiednich napięć (OVF Oscillation Voltage Factor, SVF Symmetrical Voltage Factor):

$$OVF = \frac{U^2_{RMS_MIN}}{U^2_{RMS_MAX}} \quad (5)$$

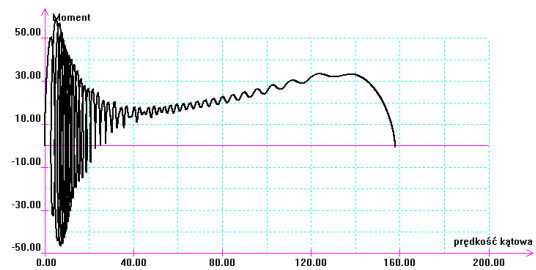
$$SCF = \frac{\min(U^2_{RMS_α}, U^2_{RMS_β})}{\max(U^2_{RMS_α}, U^2_{RMS_β})} \quad (6)$$

Obserwacja wartości maksymalnych wymienionych współczynników w czasie DT stanowi podstawę oceny stanu układu napędowego. Ich analiza umożliwia zarówno ocenę stanu jak i wskazanie lokalizacji występujących uszkodzeń. Jeśli wartości współczynników OVF i SVF mają wartości zbliżone do jedności a OCF lub SCF mają wartości mniejsze to awaria występuje po stronie maszyny asynchronicznej. Jednoczesna zmiana współczynników napięcia i prądu daje wskazanie na nieprawidłową pracę źródła zasilania.

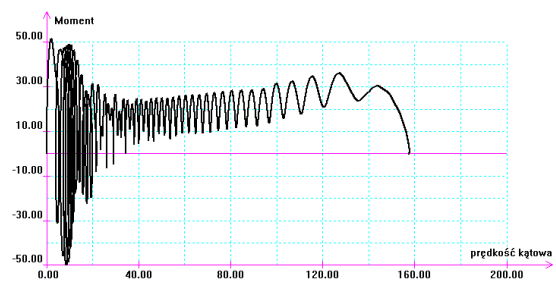
4. Badania symulacyjne uszkodzeń wirnika maszyny asynchronicznej klatkowej

Symulacje dynamiki maszyny uszkodzonej przeprowadzono dla 4-biegunowego silnika klatkowego połączonego w gwiazdę z 25 żłobkami wirnika. Modelowanie uszkodzonych prętów polegało na zwiększeniu rezystancji wybranych prętów wirnika. Program umożliwia łatwy i szybki dostęp do parametrów modelowanej maszyny. Celem modelowania maszyny jest testowanie diagnostycznych algorytmów numerycznych. Istotną funkcją programu jest możliwość generowania przebiegów prądu, momentu, prędkości obrotowej oraz innych wielkości opisujących pracę maszyny, przy różnym stopniu uszkodzenia. Ważnym jest także możliwość badania wrażliwości wartości algorytmów diagnostycznych na zmiany parametrów modelu maszyny.

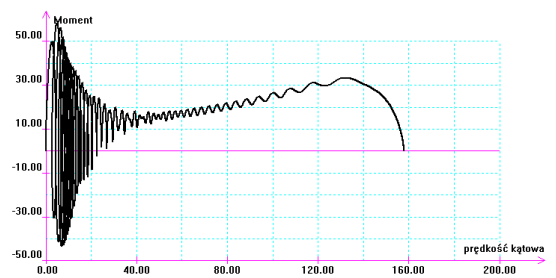
Przeprowadzone symulacje wykazują, że zachowanie się maszyny uszkodzonej zależy nie tylko od liczby pękniętych prętów, lecz także od lokalizacji uszkodzeń na obwodzie wirnika. Na rysunku 2 przedstawiono rozruch silnika przy uszkodzonych trzech kolejnych prętach. Rysunki 1 i 3 różnią się nieznacznie, lecz rys. 1 prezentuje rozruch z uszkodzonym jednym prętem, natomiast na rys.3 uszkodzone są trzy pręty 1, 7 i 17.



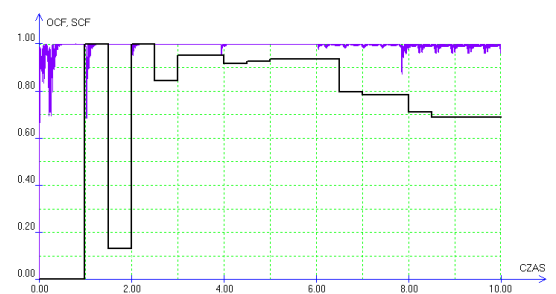
Rys. 1. Rozruch silnika – uszkodzony jeden pręt



Rys. 2. Rozruch silnika – uszkodzone trzy kolejne pręty (1,2,3)



Rys. 3. Rozruch silnika – uszkodzone trzy pręty (1,6,17)



Rys. 4. Przebiegi wartości współczynników diagnostycznych OCF i SCF

Na rysunku 4 zaprezentowano zmiany wartości współczynników OCF i SCF oceny stanu maszyny. Po rozruchu maszyny (pierwsza sekunda) nastąpiło obciążenie maszyny momentem znamionowym. Po 2 sekundach nastąpiło pęknięcie jednego pręta, po 4 drugiego i co dwie kolejne sekundy następnych prętów (wszystkie obok siebie). Zgodnie

z przewidywaniami, wartości współczynników oceny stanu zmieniają się w czasie, lecz ich wartości maksymalne zależą od stanu maszyny. W modelowanym przypadku wartość maksymalna współczynnika SCF w okresie każdej sekundy była równa jedności, natomiast OCF ma wartość maksymalną zależną od stanu wirnika. Automatyczna detekcja stanu może polegać na wyznaczaniu wartości maksymalnych w dłuższym okresie czasu (DT). Czasy TT i DT zależą od czasu trwania stanów przejściowych dla badanego układu napędowego.

5. Wnioski

Przeprowadzone badania symulacyjne miały za cel sprawdzenie możliwości modelowania silnika klatkowego w naturalnym układzie odniesienia wraz z jednoczesną analizą wartości współczynników opisujących stan układu napędowego. Modelowanie maszyny w naturalnym układzie odniesienia daje możliwość testowania pracy przy różnorodnych uszkodzeniach. W niniejszej pracy testowano jedynie uszkodzenia prętów klatki wirnika. Uwzględnienie innych stanów awaryjnych wymaga opracowania procedur obliczania macierzy indukcyjności i rezystancji występujących w równaniach stanu maszyny.

Duża dynamika przyrostu mocy obliczeniowej współczesnych procesorów daje możliwość wykonywania takich symulacji w stosunkowo krótkim czasie. Badania przeprowadzone (rys.2-4) na komputerze typu PC z procesorem Intel Pentium III taktowanym częstotliwością 800 MHz wykazały, że rozruch maszyny z uszkodzeniami prętami wirnika, trwający w rzeczywistości ok. 2s, wymaga ok. 30 minut czasu pracy procesora. Krytycznym zagadnieniem wydłużającym obliczenia jest czas niezbędny na odwracanie macierzy indukcyjności w każdym kroku całkowania numerycznego.

Jednym z wniosków wynikających z przeprowadzonych dotychczas symulacji jest znaczenie wpływu sposobu rozłożenia pęknięć prętów na obwodzie maszyny. Najgorszy efekt występuje przy przerwanych kolejno na obwodzie prętach, natomiast taka sama ilość uszkodzeń, ale rozłożonych na obwodzie wirnika, nie daje widocznych efektów (rys.1, 3). Ważnym wnioskiem wynikającym z przeprowadzonych badań symulacyjnych jest stwierdzenie, iż możliwe jest określenie stanu układu napędowego w czasie jego normalnej eksploatacji. Jednym z

przyczyn stosowania oryginalnych rozwiązań programowych było stworzenie możliwości stosowania identycznego kodu źródłowego w procesie symulacji oraz w badaniach laboratoryjnych. Testy na rzeczywistym układach napędowych są wykonywane, na bazie opisanych algorytmów, z wykorzystaniem zestawu z procesorem sygnałowym SHARC 21065 firmy Analog Devices.

6. Literatura

- [1]. Houdouin G., Barakat G., Dakyo B., Destobbeleer E., *A Method the Simulation of Inter-Turn Short Circuits in Squirrel Cage Induction Machines*, EPE-PEMC, Dubrownik & Cavtat, 2002 (on CD)
- [2]. Pawlak M., *Modelowanie uszkodzeń wirnika silnika klatkowego przy wykorzystaniu uproszczonego modelu dwuosowego*, XLI International Symposium on Electrical Machines, Polska, Opole-Jarnołówek, 14-17 June 2005, p.88-95
- [3]. Sołbut A., *Modeling of electromechanical converters using object oriented programming techniques*, XV International Symposium Micro-machines & Servosystems, Białowieża - Soplicowo 2006, str. 164-169
- [4]. Sołbut A., *Możliwości automatycznej oceny stanu układu napędowego z maszyną asynchroniczną*, Diagnostyka nr 35 (2005), str.13-16
- [5]. Sołbut A., *Simulations module on needs of modeling driving systems supplied by inverters*, Warsaw, European Simulation Multiconference ESM'99, 1-4 June 1999, p.502-504
- [6]. Spalek D., Tokarz M., *Moment elektromagnetyczny silnika indukcyjnego zasilanego przez sterownik napięcia przemiennego o przewodzeniu wielokrotnym*, XLI International Symposium on Electrical Machines, Polska, Opole-Jarnołówek, 14-17 June 2005, p. 43-48
- [7]. Sobczyk T. J., *Metodyczne aspekty modelowania matematycznego maszyn indukcyjnych*, WNT, Warszawa 2004

Autorzy

Adam Sołbut
 Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny
 15-351 Białystok, Wiejska 45d
 tel: 085 7469439
 e-mail: asolbut@pb.edu.pl