

Maciej Sulowicz, Instytut Elektrotechniki, Warszawa

Konrad Weinreb, Tomasz Węgiel, Marek Masiewicz, Politechnika Krakowska, Kraków

ZASTOSOWANIE SYSTEMU WNIOSKOWANIA ROZMYTEGO DO DIAGNOSTYKI SILNIKA INDUKCYJNEGO KLATKOWEGO

APPLICATION OF FUZZY INFERENCE SYSTEM FOR DIAGNOSTIC CAGE INDUCTION MOTOR

Abstract: This paper presents a diagnostic conclusion block, based on a fuzzy logic approach. It proposes implementation of a decision making, algorithm based diagnostic system, in order to achieve an uninterrupted work cycle of the squirrel cage motor drives. The diagnostic conclusion interface has been designed on the basis of the diagnostic data, obtained from the analysis of the phase currents spectra and symmetrical components of the currents spectra. Indicators for the diagnostic evaluation have been selected on the basis of the solutions of the mathematical model of the motor, which takes into consideration the eccentricity of the rotor. The principle of work of the diagnostic conclusion block designed to evaluate the state of the rotor has been presented for a selected motor. Artificial intelligence, including fuzzy logic, applied in the conclusion systems increases the system's ability to derive characteristic relationships and correlations, which are not recognizable by traditional diagnostic methods, thus giving a higher possibility of forming a correct diagnosis. This is especially important in situations, when the correct interpretation of the measurement data and the diagnostic indicators requires knowledge, coming from the engineering experience.

1. Wstęp

Dla zapewnienie niezawodnej pracy układów napędowych z silnikami indukcyjnymi klatkowymi istotne znaczenie ma stosowanie systemów do diagnozowania ich stanu w czasie normalnej eksploatacji. Istnieje wiele sposobów i algorytmów oceny diagnostycznej, poczynając od systemów opartych o klasyczne reguły wnioskowania a kończąc na metodach sztucznej inteligencji, wśród których najczęściej są stosowane sieci neuronowe i logika rozmyta. Zastosowanie sztucznej inteligencji a w tym sieci neuronowych i logiki rozmytej, stwarza większe możliwości postrzegania przez system diagnostyczny charakterystycznych cech i zależności, które nie są do uchwycenia przy klasycznych rozwiązaniach, a tym samym istnieje możliwość wydania trafnej diagnozy.

Głównymi zadaniami metod diagnostycznych wykorzystujących modele matematyczne jest wyznaczenie wskaźników do oceny stanu elementów składowych układu napędowego a w szczególności wirnika silnika, na drodze analizy dostępnych sygnałów diagnostycznych oraz porównanie ich z wartościami obliczonymi na podstawie modeli matematycznych i w konsekwencji postawienie diagnozy co do aktualnego stanu maszyny.

Często ocena stanu silnika jest utrudniona przez wpływ różnego rodzaju zakłóceń i szumów

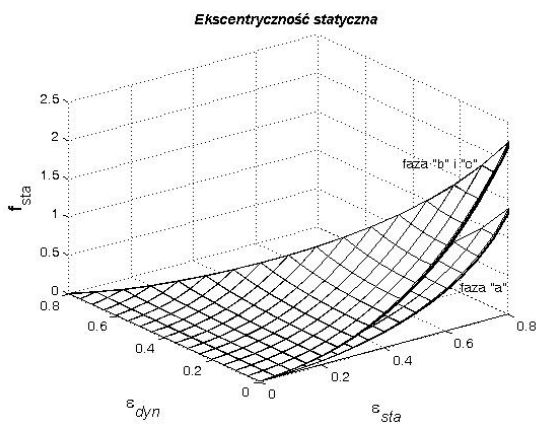
na sygnał niosący informacje diagnostyczne oraz przez błędy pomiarowe, wynikające ze sposobu pomiaru i zastosowanej aparatury pomiarowej. Prawidłowa interpretacja wyników pomiarów i wskaźników oceny diagnostycznej wymaga doświadczenia płynącego z praktyki eksploatacyjnej. Uwzględnienie wieloletniego doświadczenia inżyniera i znajomość relacji pomiędzy zmiennymi świadczącymi o stanie maszyny, można uwzględnić w analizie poprzez zapisanie reguł i procedur wnioskowania w modelu rozmytym podejmowania decyzji. Logika rozmyta jest bardzo skutecznym sposobem przetwarzania informacji niepewnej i nieprecyzyjnej. Przypomina proces ludzkiego myślenia i stwarza możliwość podjęcia decyzji, w przypadku niejasnej informacji.

Proces diagnozowania stanu obiektu technicznego, można zautomatyzować przez stosowanie w algorytmach diagnostycznych zapisu relacji pomiędzy uszkodzeniem a stanem obiektu oraz procedur wnioskowania rozmytego

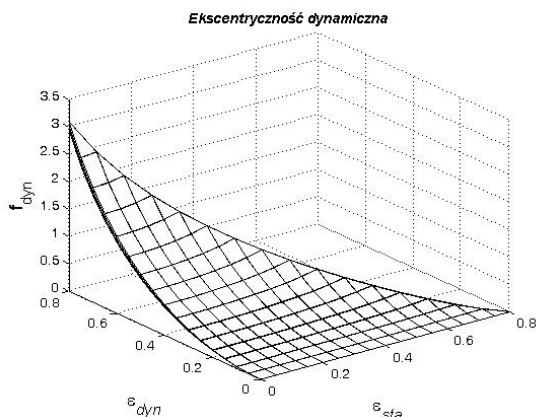
W artykule przedstawiono blok wnioskowania systemu diagnostycznego, oparty o reguły wnioskowania rozmytego dla oceny stanu maszyny indukcyjnej klatkowej w przypadku występowania ekscentryczności wirnika.

2. Przygotowanie wskaźników oceny dla systemu wnioskowania rozmytego

W pracach [6],[7],[8] została zaprezentowana metoda tworzenia wskaźników do oceny diagnostycznej na podstawie rozwiązań modelu matematycznego silnika uwzględniającego ekscentryczność wirnika szczegółowo przedstawionego w pracach [8],[5]. Metoda ta polega na rozdziale amplitud składowych widma Fouriera prądu stojana spełniających określone częstotliwości na cztery charakterystyczne zbiory odpowiadające stanom symetrii, ekscentryczności statycznej, dynamicznej oraz mieszanej. Następnie wszystkie cechy zakwalifikowane do dane zbioru są sumowane według normy $\|I\| = \sum_k |I_k|$.



Rys. 1. Wskaźniki oceny ekscentryczności statycznej



Rys. 2. Wskaźniki oceny ekscentryczności dynamicznej

Na tej podstawie są wyznaczane cztery wskaźniki oceny ilościowej widma, których wartości są odniesione do wartości dla stanu symetrii maszyny. Odniesienie wartości wskaźników do wartości wskaźnika $I_{sym}(\varepsilon_s, \varepsilon_d)$ i zrezygnowanie ze wskaźnika dla ekscentryczności mieszanej

pozwala zredukować ilość wskaźników z czterech do dwóch.

$$f_{sta}(\varepsilon_s, \varepsilon_d) = \frac{\|I_{sta}(\varepsilon_s, \varepsilon_d)\|}{\|I_{sym}(\varepsilon_s, \varepsilon_d)\|}, \quad f_{dyn}(\varepsilon_s, \varepsilon_d) = \frac{\|I_{dyn}(\varepsilon_s, \varepsilon_d)\|}{\|I_{sym}(\varepsilon_s, \varepsilon_d)\|} \quad (1)$$

Powyższa redukcja wynika z niezależności tylko dwóch typów ekscentryczności: statycznej i dynamicznej. Opisane formułą (1) funkcje przynależności przedstawiono na Rys.1 i Rys.2. Taki sposób definicji wskaźników pozwala na prawie całkowite wyeliminowanie wpływu poślizgu na kształt tworzonych przez nie powierzchni. Na Rys. 1 i Rys. 2 przedstawiono powierzchnie dla zmian poślizgu od wartości odpowiadających pracy silnika na biegu jałowym aż do poślizgu znamionowego. Tak zdefiniowane wartości wskaźników oceny, wyznaczone z charakterystycznych cech widma prądu, mogą być danymi wejściowymi do proponowanego układu wnioskowania diagnostycznego.

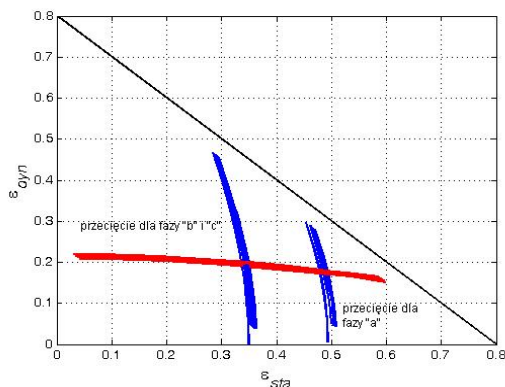
Z porównania powierzchni tworzonych na Rys.1 przez wskaźnik charakteryzujący ekscentryczność statyczną widać znaczące różnice w przebiegu wskaźnika dla fazy „a” i dla pozostałych dwóch faz. Dla ekscentryczności dynamicznej odpowiednie wartości wskaźnika dla każdej fazy są takie same.

Postawienie diagnozy co do stanu wirnika maszyny na podstawie wskaźników prezentowanych na Rys. 1 i Rys. 2 sprowadza się do znalezienia w przestrzeni dopuszczalnych przypadków ekscentryczności aktualnego punktu pracy, określonego przez parę wartości $(\varepsilon_s, \varepsilon_d)$. Poszukiwanie tego punktu w przestrzeni dopuszczalnych stanów może odbywać się na wiele sposobów.

Do ustalenia względnych poziomów ekscentryczności statycznej i dynamicznej zastosowano metodę przecięcia krzywych powstałych po zrzutowaniu na płaszczyznę xy wspólnej krawędzi powierzchni tworzącej wskaźniki oraz odpowiednio płaszczyzn $z=f_{sta}$ i $z=f_{dyn}$. Wartości f_{sta} i f_{dyn} są to konkretne dane liczbowe wskaźników wyznaczone dla badanego przypadku widma prądu silnika, dla którego poszukujemy pary liczb $(\varepsilon_s, \varepsilon_d)$ określających poziom ekscentryczności.

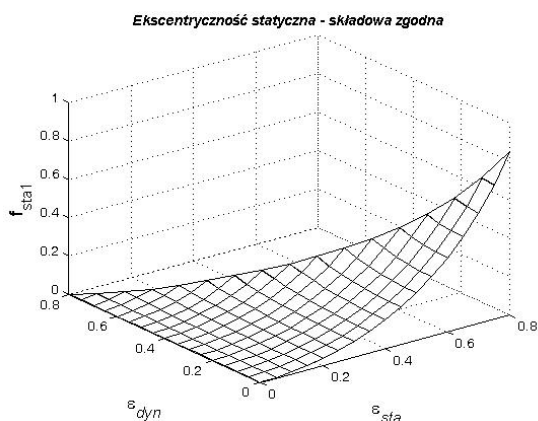
Wpływ występujących różnic w wartości wskaźników dla poszczególnych faz prądu stojana na wynik oceny diagnostycznej poziomów ekscentryczności przedstawiono na Rys.3 – w obszarze dopuszczalnych poziomów ekscentryczności.

tryczności. Założono przy tym, że sumaryczna wartość względnej ekscentryczności statycznej i dynamicznej nie może przekroczyć 0.8 ($0 \leq \varepsilon_s \leq 0.8$, $0 \leq \varepsilon_d \leq 0.8$, $0 \leq \varepsilon_s + \varepsilon_d \leq 0.8$).

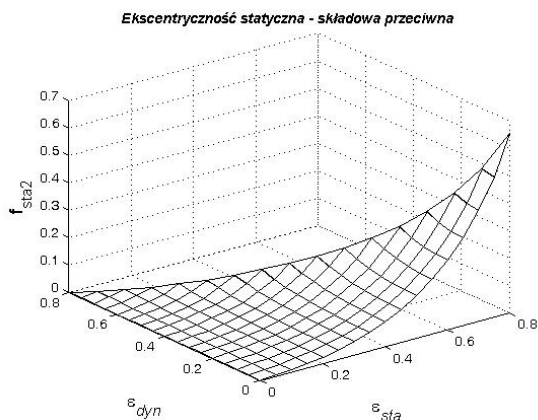


Rys. 3. Dopuszczalny obszar analizy i wyznaczenie poziomów ekscentryczności

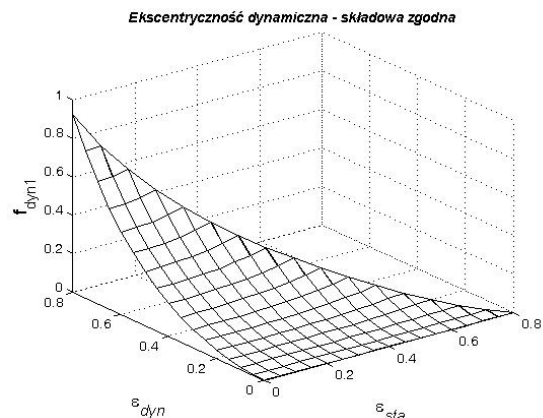
Jednym ze sposobów, pozwalającym na uniknięcie niejednoznaczności w podejmowaniu decyzji jest wprowadzenie analogicznych wskaźników dla widm składowych symetrycznych prądu stojana.



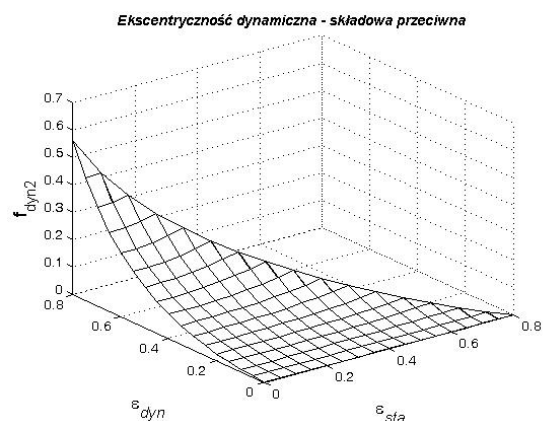
Rys. 4. Wskaźniki oceny ekscentryczności statycznej dla składowej zgodnej



Rys. 5. Wskaźniki oceny ekscentryczności statycznej dla składowej przeciwnej



Rys. 6. Wskaźniki oceny ekscentryczności dynamicznej dla składowej zgodnej

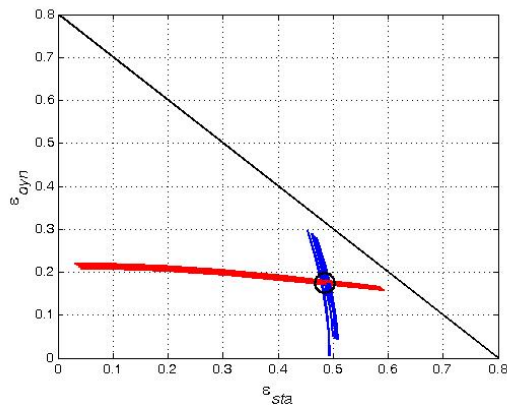


Rys. 7. Wskaźniki oceny ekscentryczności dynamicznej dla składowej przeciwnej

Sposób tworzenia takich wskaźników został podany w pracy [6]. Na Rys.4 do Rys.7 przedstawiono wskaźniki oceny z podziałem na wskaźnik dla składowej zgodnej i składowej przeciwnej.

Analogiczne zmiany wskaźników dla składowej zgodnej i składowej przeciwnej zarówno w przypadku ekscentryczności statycznej jak i ekscentryczności dynamicznej pozwalają na ostateczne przyjęcie wskaźników oceny ekscentryczności jako sumy dla obu składowych. W tym przypadku otrzymamy tylko dwa wskaźniki odzwierciedlające cechy trzech prądów fazowych, przy jednoznacznym określeniu poziomów każdej z ekscentryczności.

Przedstawione w postaci graficznej metody poszukiwania poziomów ekscentryczności dla danego obciążenia silnika przyjęto za podstawę do budowy bazy reguł wnioskowania określającego stan maszyny na podstawie wartości wskaźników oceny.



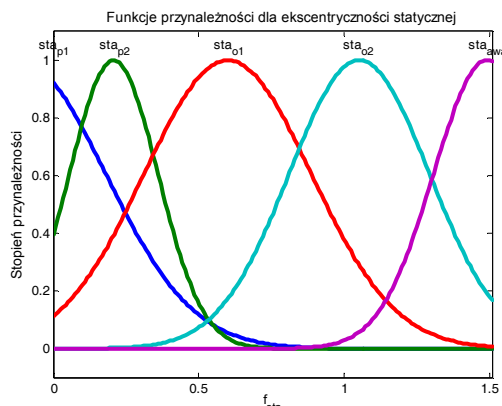
Rys. 8. Jednoznaczne określenie poziomów ekscentryczności statycznej i dynamicznej

3. Budowa systemu wnioskowania

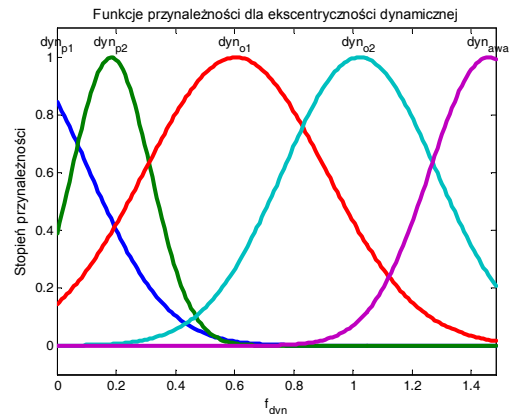
System wnioskowania został zbudowany przy pomocy Fuzzy Logic Toolbox, dostępnym w programie MATLAB. W eksperymentach numerycznych zastosowano systemy wnioskowania rozmytego typu Mamdaniego – Zadeha, Takagi – Sugeno – Kanga (TSK) oraz system oparty o strukturę neuropodobną typu ANFIS (ang. *Adaptive-Network-based Fuzzy Inference System*) [1].

Danymi wejściowymi do systemu wnioskowania są wartości zmian wskaźników dla ekscentryczności statycznej i dynamicznej. Na wyjściu systemu uzyskuje się informację o sumie względnych poziomów ekscentryczności statycznej i dynamicznej.

Wartości wejściowe zostały podzielone na pięć obszarów w celu dokładnego odwzorowania stanu maszyny. Każdemu z obszarów została przypisana funkcja przynależności określająca stopień przynależności do danego przedziału. Przykładowe funkcje przynależności zostały przedstawione na Rys.9 i Rys.10.



Rys. 9. Funkcje przynależności opisujące wejście 1 - ekscentryczność statyczną



Rys. 10. Funkcje przynależności opisujące wejście 2 - ekscentryczność dynamiczną

Każdą ze zmiennych wejściowych charakteryzuje pięć stanów pracy maszyny:

- pierwszy – oznaczony „p1” – stan silnika dobry,
- drugi – oznaczony „p2” – stan silnika zadawalający,
- trzeci – oznaczony „o1” – stan silnika niezadawalający,
- czwarty – oznaczony „o2” – stan silnika zły,
- piąty – oznaczony „awa” – awaria silnika.

Określone stany maszyny zostały wyznaczone dla następujących poziomów ekscentryczności:

- „p1” – dla $uds=0.1$ i $udd=0.1$
- „p2” – dla $uds=0.2$ i $udd=0.2$
- „o1” – dla $uds=0.3$ i $udd=0.3$
- „o2” – dla $uds=0.4$ i $udd=0.4$
- „awa” – dla $uds>0.4$ i $udd>0.4$

Na wyjściu układu dokonano podziału zakresu sumarycznych poziomów ekscentryczności na trzy przedziały, odpowiadające następującym stanom pracy:

- „zielone” – dla $uds+udd < 0.25$ – poprawna praca silnika,
- „żółte” – dla $0.25 < uds+udd < 0.55$ – praca silnika wymaga stałego monitorowania,
- „czerwone” – dla $uds+udd > 0.55$ – awaryjny stan pracy silnika.

Ustalony poziom pracy maszyny jak i wszystkie przedstawione wcześniej funkcje przynależności można dowolnie zmieniać i dostosować do potrzeb w zależności od warunków eksploatacyjnych maszyny.

Dla tak zdefiniowanych zmiennych określono bazę reguł. Reguły zostały stworzone dla wszystkich możliwych przypadków wystąpienia ekscentryczności, wynikających z przyjętych w rozważaniach stanach pracy maszyny.

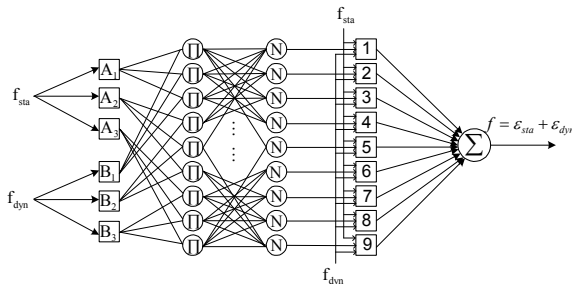
Dla zbudowanego systemu wnioskowania w ogólnym przypadku reguły przyjmują postać:

If wej1 is p1 and wej2 is p1, Then wyj is zielone
 If wej1 is p1 and wej2 is p2, Then wyj is zielone
 If wej1 is p1 and wej2 is o1, Then wyj is żółte

 If wej1 is o2 and wej2 is awa, Then wyj is czerwone

Przy tworzeniu bazy reguł wykorzystano przedstawiony w rozdziale 2 algorytm poszukiwania poziomów ekscentryczności.

Najlepsze wyniki oceny diagnostycznej aktualnego stanu silnika, na podstawie dwóch charakterystycznych wskaźników, uzyskano przy zastosowaniu struktury neuronowej ANFIS [1]. Strukturę tego systemu wnioskowania o poziomie ekscentryczności, przy podziale wejść na trzy przedziały, przedstawiono na Rys. 11.



Rys. 11. Schemat systemu wnioskowania oparty o strukturę ANFIS

Systemy wnioskowania oparte o rozmyte sieci neuronowe stanowią połączenie techniki modelowania rozmytego oraz metod uczenia sieci neuronowych. Dla tego układu wnioskowania wiedzę eksperta wykorzystuje się do ustalenia reguł i wstępnego rozmieszczenia funkcji przynależności, które podlegają modyfikacji w procesie uczenia sieci na danych pomiarowych.

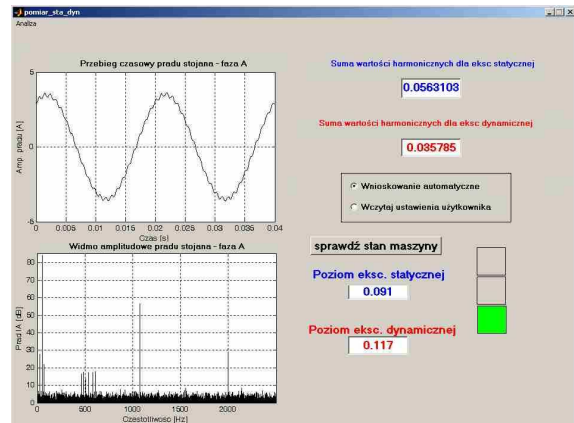
4. Przykładowe wyniki badań

Obiektem badań był trójfazowy silnik indukcyjny SzJe14b o liczbie par biegunów $p=2$ i liczbie żłobków wirnika $N=22$, zasilany symetrycznie w układzie gwiazda bez przewodu zerowego o danych znamionowych: $P_N=1.1$ kW, $U_N=380$ V (Y), $I_N=2.8$ A, $n_N=1390$ rpm, $\cos\varphi_N=0.77$, $\eta_N=0.765$.

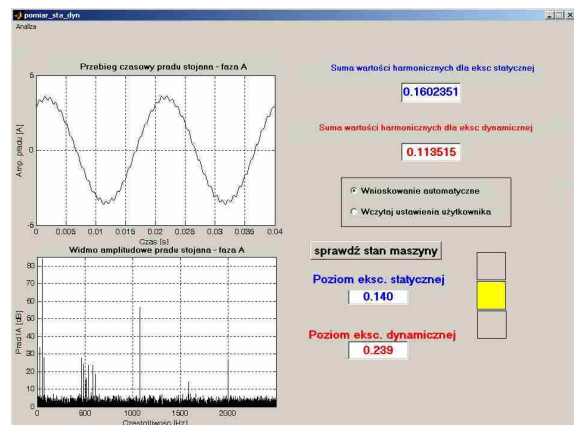
Testy oceny diagnostycznej przeprowadzono dla kilkuset różnych przypadków wystąpienia ekscentryczności statycznej i dynamicznej.

Najmniejszy błąd oceny diagnostycznej został uzyskany przy zastosowaniu systemu ANFIS i gaussowskich funkcji przynależności. Błąd oceny w najgorszym przypadku nie przekroczył

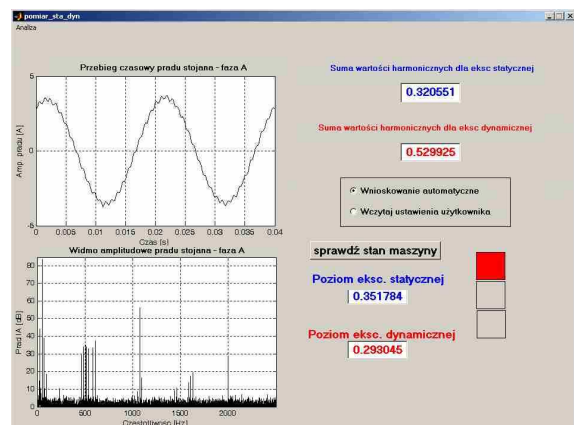
kilka procent. Poprawność działania systemu sprawdzono na danych będących symulacją pomiaru tzn. dla wartości harmonicznych wyliczonych z modelu matematycznego utworzono przebiegi czasowe prądu. Następnie te przebiegi czasowe poddawano transformacji do składowych symetrycznych oraz analizie FFT otrzymanych w ten sposób sygnałów.



Rys. 12. Przykład diagnozy ekscentryczności dla poprawnej pracy silnika



Rys. 13. Przykład diagnozy ekscentryczności dla dopuszczalnej pracy silnika



Rys. 14. Przykład diagnozy ekscentryczności dla awaryjnej pracy silnika

Interfejs programowy systemu wnioskowania i przykładowe wyniki diagnozy przedstawiono na Rys.12 do Rys.14. Na rysunkach przedstawiono wyniki diagnoz dla wybranych poziomów ekscentryczności odpowiadającym trzem wyróżnionym stanom pracy, którym przypisane są odpowiednio sygnalizatory w kolorze: zielonym, żółtym i czerwonym.

Na Rys.12 przedstawiono wynik diagnozy dla silnika, w którym występują niewielkie poziomy ekscentryczności na poziomie 10 procent. Na Rys.13 przedstawiono wynik diagnozy dla silnika, w którym występują niewielkie poziomy ekscentryczności statycznej oraz średni poziom ekscentryczności dynamicznej.

Natomiast na Rys. 14. przedstawiono wynik diagnozy dla dużych poziomów ekscentryczności zarówno statycznej jak i dynamicznej.

5. Wnioski

W artykule został zaprezentowany blok wnioskowania systemu diagnostycznego oparty o reguły wnioskowania rozmytego. Jest to propozycja rozwiązania układu podejmowania decyzji diagnostycznych dla zapewnienie niezawodnej pracy układów napędowych z silnikami indukcyjnymi klatkowymi. W oparciu o wskaźniki oceny diagnostycznej, wyznaczone za pomocą metody rozdziału widma prądów fazowych i widma składowych symetrycznych prądów, został skonstruowany interfejs wnioskowania diagnostycznego. Wskaźniki do oceny diagnostycznej zostały wyznaczone na podstawie rozwiązań modelu matematycznego silnika uwzględniającego ekscentryczność wirnika. Dla wybranego silnika został przedstawiony sposób działania bloku wnioskowania diagnostycznego do oceny stanu wirnika oraz podano przykładowe wyniki diagnozy stanu przez opracowany układ wnioskowania diagnostycznego.

Podsumowując można stwierdzić, iż wykonany program diagnostyczny spełnił stawiane przed nim zadania oraz uzyskane wyniki badań są zadowalające i stwarzają możliwość praktycznej realizacji takiego systemu wnioskowania dla konkretnego silnika pracującego w układzie napędowym.

6. Literatura

- [1]. Jang J.S.R.: *ANFIS: Adaptive-Network-based Fuzzy Inference System*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 23, No. 3, 1993, pp. 665-685.
- [2]. Korbicz J., Kościelny J.M., Kowalczyk Z., Cholewa W.: *Diagnostyka Procesów. Modele.*

Metody sztucznej inteligencji. Zastosowania. WNT, Warszawa 2002.

- [3]. Lachwa A.: *Rozmyty świat zbiorów, liczb, relacji, faktów, reguł i decyzji*. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2001.
- [4]. Osowski S.: *Sieci neuronowe do przetwarzania informacji*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2000.
- [5]. Piegat A.: *Modelowanie i sterowanie rozmyte*. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 1999.
- [6]. Sobczyk T.J., Weinreb K., Sułowicz M.: *Diagnostyka silników klatkowych bazująca na składowych symetrycznych prądów stojana*. SME 2000, Prace Naukowe IMNiPE Politechniki Wrocławskiej, Nr 49, Seria: Studia i Materiały Nr 21, Diagnostyka maszyn elektrycznych, str.28-36.
- [7]. Sobczyk T.J., Weinreb K., Węgiel T., Sułowicz M.: *Influence of stator and rotor slotting on quantitative prediction of induction motor rotor eccentricity*. Proceedings of the IEEE Int. Symp. on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives, IEEE SDEMPED'2001, Grado, 2001, pp. 429-434.
- [8]. Sobczyk T.J., Weinreb K., Węgiel T., Sułowicz M.: *Theoretical study of effects due to rotor eccentricities in induction motors*. Proc. of IEEE International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives SDEMPED'99, Gijon, 1999, pp. 289-295.
- [9]. Weinreb K., Sułowicz M., Petryna J.: *Kompleksowa analiza uszkodzeń wirnika w maszynach indukcyjnych metodą rozdziału widma prądu stojana – studia numeryczne oraz wyniki badań*. Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne, Nr 61, 2000, BOBRME, str. 233-238.

Autorzy

mgr inż. M.Sułowicz¹ pesulowi@cyf-kr.edu.pl
 dr inż. K. Weinreb² peweinre@cyf-kr.edu.pl
 dr inż. T. Węgiel² pewegiel@cyf-kr.edu.pl
 mgr inż. M. Masiewicz³ masiewicz@o2.pl

¹ Instytut Elektrotechniki w Warszawie, Samodzielna Pracownia Diagnostyki Układów Elektromechanicznych w Krakowie, ul. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków

² Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej, Instytut Elektromechanicznych Przemian Energii, Katedra Maszyn i Napędów Elektrycznych 31-155 Kraków, ul. Warszawska 24

³ Zespół Szkół Technicznych, ul. Graniczna 2, 22 - 100 Chełm