

Marcin Pawlak
Politechnika Wroclawska

PRZENOŚNY ANALIZATOR DIAGNOSTYCZNY DO WYKRYWANIA USZKODZEŃ STOJANA I WIRNIKA W SILNIKACH INDUKCYJNYCH

PORTABLE DIAGNOSTIC ANALYZER TO DETECTION OF THE STATOR AND ROTOR FAULTS IN INDUCTION MOTORS

Streszczenie: W artykule przedstawiono nowatorską konstrukcję przenośnego analizatora diagnostycznego, który jest przeznaczony do wykrywania uszkodzeń uzwojeń stojana i wirnika w silnikach indukcyjnych o różnych mocach. Część pomiarową systemu stanowią dwa wielozakresowe przetworniki cęgowy, które mierzą prąd silnika w dwóch fazach. Sygnały pomiarowe doprowadzone są do mikroprocesorowego rejestratora, który przesyła próbki pomiarowe do komputera przenośnego, wykorzystując bezprzewodową technologię komunikacyjną - Bluetooth. W roli komputera można zastosować dowolne urządzenie z systemem Android (np. tablet), albo zwykły komputer przenośny (laptop) z systemem Windows. Oprogramowanie diagnostyczne zainstalowane na komputerze przenośnym analizuje zarejestrowane sygnały prądu stojana, pod kątem znalezienia diagnostycznych cech, charakterystycznych dla uszkodzeń stojana i wirnika. W tym celu zaimplementowano metody analizy częstotliwościowej wektora przestrzennego prądu stojana oraz metody analizy składowych głównych (PCA).

Abstract: This paper presents a novel design of a portable diagnostic analyzer, which is designed to fault detection of stator windings and the broken rotor bars in the induction motors of different power ratings. The measuring circuit of the system consists of two multi-range current clamps to measure the motor line current in two phases. Measurement signals are fed to the microprocessor-based recorder that transmits data samples to a portable computer using wireless communication technology - Bluetooth. In the role of the computer can be used any Android device (e.g. tablet), or ordinary notebook with Windows OS. Diagnostic software installed on a laptop computer analyzes the recorded signals of stator current, in terms of finding the diagnostic features characteristic of the stator and rotor faults. For this purpose, the current Park's vector modulus analysis and principal component analysis (PCA) were implemented.

Słowa kluczowe: silnik indukcyjny, diagnostyka, analiza częstotliwościowa, analiza składowych głównych.

Keywords: induction motor, diagnostics, spectral analysis, principal component analysis

1. Wstęp

Silniki indukcyjne stanowią najliczniejszą grupę maszyn elektrycznych, stosowanych w napędach przemysłowych. Trudne warunki środowiskowe, jakie panują w przemyśle, sprawiają, że silniki te pomimo swojej stosunkowo dużej niezawodności, ulegają czasem uszkodzeniom, powodując nieplanowane przestoje. Dlatego też, w najbardziej narażonych punktach procesu technologicznego instaluje się specjalistyczną aparaturę diagnostyczną, której zadaniem jest ciągłe monitorowanie podstawowych wielkości elektrycznych i mechanicznych, takich jak: napięcie i prąd silnika, moment elektromagnetyczny, prędkość obrotową oraz przyspieszenie drgań maszyny. Analiza parametryczna tych sygnałów umożliwia rozpoznanie i klasyfikację wszelkich

nieprawidłowości występujących w częściach mechanicznych i obwodach elektrycznych badanej maszyny. Niestety, aparatura diagnostyczna, w skład której wchodzi zestaw odpowiednich czujników oraz specjalistyczny komputer do analizy sygnałów pomiarowych, jest bardzo kosztowna, zatem jej stosowanie ogranicza się praktycznie do dużych maszyn. Z drugiej strony silniki małej mocy stanowią najliczniejszą grupę maszyn, które pełnią często odpowiedzialne funkcje w procesach technologicznych. W sytuacji, gdy nakłady finansowe przedsiębiorstwa są ograniczone, stosuje się najczęściej rozwiązanie kompromisowe, polegające na wykorzystaniu uniwersalnej, przenośnej aparatury diagnostycznej do okresowej kontroli stanu technicznego poszczególnych napędów. Ze względu na duży rozrzut parametrów badanych

silników, czujniki i przetworniki stosowane w torach pomiarowych powinny obejmować szeroki zakres mierzonych wielkości. W związku z tym, coraz częściej dąży się do eliminacji trudnomierzalnych sygnałów diagnostycznych i zastąpienia ich sygnałami łatwymi do zmierzenia, przy wykorzystaniu tanich i powszechnie dostępnych przetworników pomiarowych. Jednym z takich sygnałów diagnostycznych jest prąd stojana, który można w prosty sposób zmierzyć, na przykład za pomocą cęgowych przetworników prądu. Przyrządy te produkowane są na różne zakresy pomiarowe oraz posiadają dodatkową zaletę – umożliwiają wykonanie pomiaru w sposób bezinwazyjny, bez potrzeby rozłączania obwodu elektrycznego badanego silnika. Dlatego też, metody diagnostyczne wykorzystujące analizę prądów fazowych silnika są chętnie stosowane, a w ostatnim czasie nieustannie poszukuje się skutecznych rozwiązań, umożliwiających trafne rozpoznanie rodzaju i stopnia uszkodzenia silnika, we wczesnej fazie jego występowania.

Niniejszy artykuł przedstawia konstrukcję taniego, przenośnego analizatora diagnostycznego, który umożliwia detekcję uszkodzeń stojana i wirnika silnika indukcyjnego, na podstawie pomiaru prądu w dwóch fazach, wykorzystując w roli czujników prądu wielozakresowe przetworniki cęgowe.

2. Zastosowanie analizy wektora przestrzennego prądu stojana do wykrywania uszkodzeń stojana i wirnika

Uszkodzenia obwodów stojana i wirnika silnika indukcyjnego powodują powstanie asymetrii elektrycznej i magnetycznej, która sprawia, że sinusoidalny kształt przebiegów prądów ulega odkształceniu. Zjawisko to jest często wykorzystywane w diagnostyce silników indukcyjnych, polegającej na analizie wektora przestrzennego prądu stojana. Składowe ortogonalne tego wektora można wyznaczyć w wyniku transformacji sygnałów prądów fazowych silnika, na podstawie poniższych zależności [1],[4]:

$$i_{\alpha} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}i_A - \frac{1}{\sqrt{6}}i_B - \frac{1}{\sqrt{6}}i_C \quad (1)$$

$$i_{\beta} = \frac{1}{\sqrt{2}}i_B - \frac{1}{\sqrt{2}}i_C \quad (2)$$

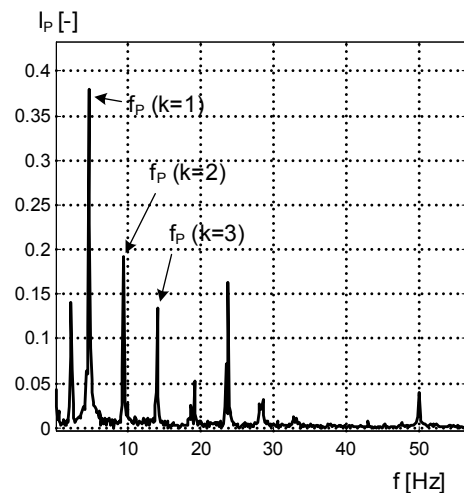
2.1. Analiza częstotliwościowa modułu wektora przestrzennego prądu

Do wykrywania uszkodzeń stojana i wirnika często stosuje się metodę analizy częstotliwościowej modułu wektora przestrzennego prądu stojana (I_P), obliczonego na podstawie składowych ortogonalnych i_{α} i i_{β} (1),(2). Metoda ta polega na ekstrakcji charakterystycznych składowych spektralnych, powiązanych z występującym uszkodzeniem. W przypadku wystąpienia uszkodzeń prętów klatki wirnika, w widmie modułu wektora przestrzennego pojawią się prążki o częstotliwościach f_{Pk} , które można wyznaczyć na podstawie zależności (3) [2]:

$$f_{Pk} = 2ksf_s \quad (3)$$

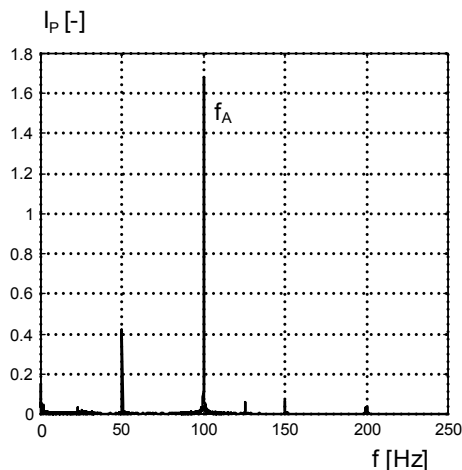
gdzie: f_s – harmoniczna podstawowa prądu stojana, s – poślizg, $k=1, 2, 3, \dots$

Na rysunku 1 przedstawiono przykładowe widmo modułu wektora przestrzennego prądu stojana, dla silnika z uszkodzonym wirnikiem.



Rys.1. Przykładowe widmo modułu wektora przestrzennego prądu stojana dla silnika z uszkodzonym wirnikiem.

W przypadku, gdy w obwodach stojana wystąpi asymetria, w widmie modułu wektora przestrzennego pojawi się składowa f_A , o częstotliwości równej podwójnej harmonicznej podstawowej prądu f_s . Asymetria ta może być wywołana nierównością napięć zasilających w poszczególnych fazach, brakiem jednej fazy lub zwarciami w uzwojeniach stojana. Na rysunku 2 przedstawiono przykładowe widmo modułu wektora przestrzennego prądu stojana, przy zwarcu 5 zwojów w obwodzie stojana.



Rys.2. Przykładowe widmo modułu wektora przestrzennego prądu stojana przy zwarcu 5 zwojów stojana.

2.2. Analiza składowych głównych (PCA)

W idealnych warunkach i przy założeniu sinusoidalnego zasilania oraz prawidłowej pracy napędu, wektor prądu stojana zakreśla równomierny okrąg, w układzie współrzędnych i_{α} - i_{β} . Pojawienie się asymetrii stojana, wywołanej np. zwarciami kilku zwojów, powoduje odkształcenie hodografu prądu, który przyjmuje kształt elipsy. Deformacja hodografu jest tym większa, im większy jest stopień uszkodzenia stojana. Dlatego też, do określenia stopnia uszkodzenia stojana można wykorzystać statystyczną metodę analizy danych, zwaną analizą składowych głównych PCA (ang. *Principal Component Analysis*) [3]. Metoda ta polega na znalezieniu wzajemnych relacji pomiędzy składowymi wektora przestrzennego prądu stojana \mathbf{I}_s :

$$\mathbf{I}_s = \begin{bmatrix} i_{s\alpha}(0) & i_{s\alpha}(1) & \dots & i_{s\alpha}(n) \\ i_{s\beta}(0) & i_{s\beta}(1) & \dots & i_{s\beta}(n) \end{bmatrix} \quad (4)$$

gdzie: n – liczba próbek.

Wyznaczenie składowych głównych wektora prądu polega na znalezieniu wartości własnych i wektorów własnych macierzy kowariancji wektora prądu stojana \mathbf{I}_s , którą opisuje zależność (5):

$$\text{cov}(\mathbf{I}_s) = \mathbf{\Gamma} \mathbf{\Lambda} \mathbf{\Gamma}^T \quad (5)$$

gdzie: $\mathbf{\Gamma}$ - macierz wektorów własnych,
 $\mathbf{\Lambda}$ - macierz wartości własnych.

Macierz wektorów własnych:

$$\mathbf{\Gamma} = \begin{bmatrix} \gamma_1^1 & \gamma_2^1 \\ \gamma_1^2 & \gamma_2^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

gdzie: γ - wektory własne.

$$\mathbf{\Lambda} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

gdzie: λ - wartości własne.

Wektory własne macierzy $\mathbf{\Gamma}$ określają kierunki osi głównych hodografu wektora prądu stojana, natomiast wartości własne macierzy $\mathbf{\Lambda}$ określają wariancję jego składowych.

Do określenia kierunku odkształcenia hodografu prądu, można wyznaczyć składowe główne wektora prądu stojana γ_1 i γ_2 , na podstawie poniższych zależności:

$$\gamma^1 = [\lambda_1 \gamma_1^1 \quad \lambda_2 \gamma_2^1] \quad (8)$$

$$\gamma^2 = [\lambda_1 \gamma_1^2 \quad \lambda_2 \gamma_2^2] \quad (9)$$

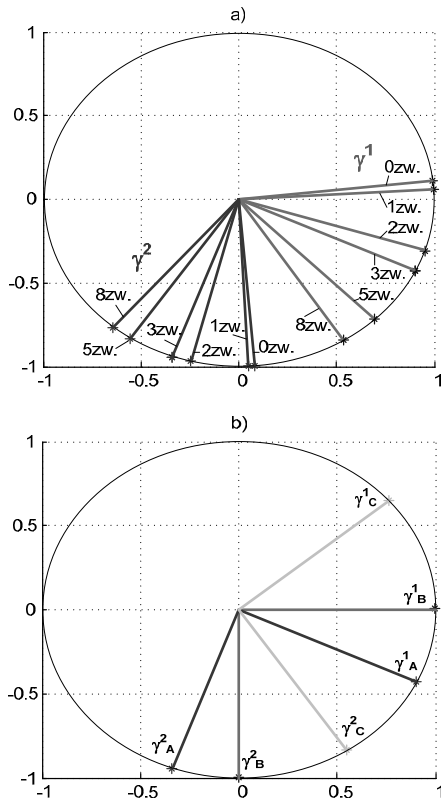
Z kolei do określenia stopnia deformacji hodografu prądu stojana można wyznaczyć wskaźnik λ_{PCA} , obliczony na podstawie zależności (10) [7]:

$$\lambda_{PCA} = \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_2} \quad (10)$$

Wartość wskaźnika λ_{PCA} rośnie ze stopniem deformacji hodografu prądu, zatem może być on wykorzystany do oceny stopnia uszkodzenia stojana (np. liczby zwartych zwojów). Natomiast analiza położenia składowych głównych wektora prądu stojana na płaszczyźnie i_{α} - i_{β} pozwala na określenie, w której fazie występuje zwarcie zwojów.

Na rysunku 3a przedstawiono wykres położenia składowych głównych wektora prądu stojana, w zależności od stopnia uszkodzenia stojana (liczby zwartych zwojów). Przedstawione wyniki zostały opracowane na podstawie badań eksperymentalnych silnika indukcyjnego o mocy 1,1kW, z odpowiednio przygotowanym uzwojeniem stojana, umożliwiającym fizyczne modelowanie zwarć.

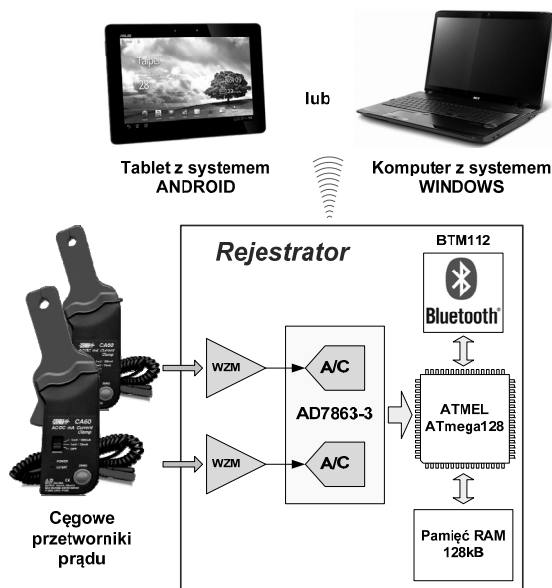
Na rysunku 3b przedstawiono położenie składowych głównych prądu stojana, w zależności od fazy, w której wystąpiło zwarcie. Wyniki odnoszą się dla przypadku zwarcia 3 zwojów stojana, co stanowi ok. 1% wszystkich zwojów.



Rys.3. Położenie składowych głównych wektora prądu stojana w zależności od liczby zwartych zwojów (a) oraz fazy wystąpienia zwarcia (b)

3. Analizator diagnostyczny – budowa sprzętowa

Część sprzętową analizatora diagnostycznego stanowi specjalnie zaprojektowany bezprzewodowy rejestrator pomiarowy, którego schemat blokowy przedstawiono na rysunku 4.



Rys.4. Schemat blokowy rejestratora

Głównym zadaniem rejestratora jest akwizycja sygnałów pomiarowych prądów stojana silnika, mierzonych w dwóch fazach, a następnie przesłanie ich drogą radiową z wykorzystaniem technologii Bluetooth® do komputera PC lub tabletu z systemem Android. W roli czujników prądów zastosowano niedrogie przystawki cęgowe typu CA60, które umożliwiają pomiar prądów fazowych silnika bez potrzeby rozłączania układu zasilania. Przetworniki te posiadają dwa zakresy pomiarowe (15A i 60A), co pozwala na zastosowanie ich do diagnostyki większości silników małej i średniej mocy.

Tor pomiarowy rejestratora zawiera odpowiednio dobrane wzmacniacze sygnałowe oraz szybkie przetworniki A/C o rozdzielczości 14 bitów. Ze względów praktycznych, maksymalna częstotliwość próbkowania rejestratora została ograniczona do 50 kHz. Głównym elementem sterującym układu pomiarowego jest 8-bitowy mikrokontroler z rodziny Atmel AVR®, który zarządza pracą przetwornika analogowo-cyfrowego i zapisuje zmierzone próbki sygnałów w zewnętrznej pamięci RAM o pojemności 128kB. Do zadań mikrokontrolera należy również dwukierunkowa komunikacja z komputerem (tabletem), przy wykorzystaniu bezprzewodowej technologii Bluetooth. Szczegóły budowy technicznej zostały szerzej omówione w [5],[6].

Rejestrator pomiarowy został wykonany w formie przenośnej, w obudowie kompaktowej o niewielkich rozmiarach (Rys.5). Urządzenie wyposażone jest we własne źródło zasilania, w postaci akumulatora Li-Po, co zapewnia wygodę użytkowania i długi czas ciągłej pracy pomiędzy doładowaniami - ponad 12 godzin.



Rys.5. Fotografia rejestratora

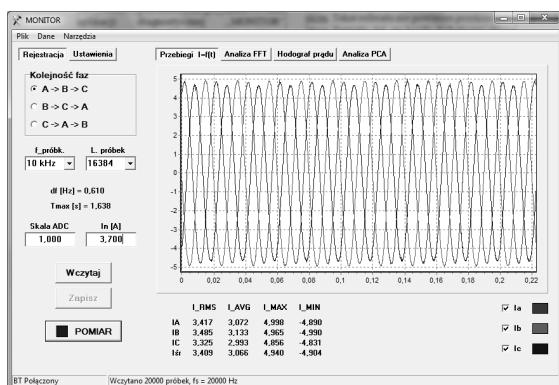
Obsługa systemu pomiarowego jest bardzo prosta i sprowadza się do włączenia zasilania rejestratora i przetworników cęgowych oraz wybrania zakresów pomiarowych. Sterowanie układem pomiarowym oraz ustawienie parametrów rejestracji odbywa się z poziomu aplikacji MONITOR, zainstalowanej na komputerze albo na tablecie.

4. Oprogramowanie diagnostyczne

Integralną częścią analizatora diagnostycznego jest specjalistyczne oprogramowanie sterująco-diagnostyczne, zainstalowane na zdalnym komputerze PC lub tablecie z systemem Android. Do głównych zadań programu należą:

- parametryzacja układu pomiarowego i sterowanie pracą rejestratora;
- zarządzanie zestawem danych (pomiar, zapis, odczyt);
- wykonanie analiz diagnostycznych pod kątem wykrywania uszkodzeń stojana i wirnika.

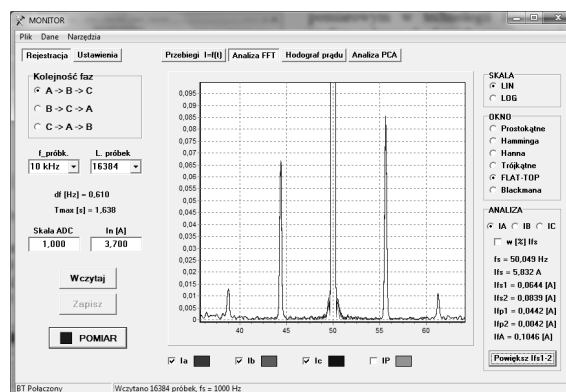
Na rysunku 6 przedstawiono przykładowe okno aplikacji diagnostycznej MONITOR, wyświetlającej przebiegi czasowe prądów w poszczególnych fazach. Oprócz graficznej prezentacji sygnałów program oblicza ich podstawowe parametry, takie jak wartości skuteczne, średnie, maksymalne itp.



Rys.6. Główne okno programu „MONITOR”

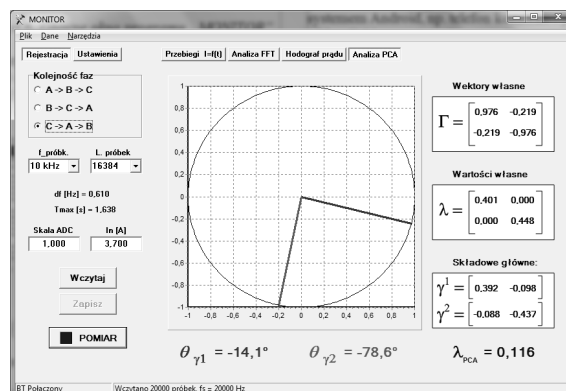
W trybie analizy częstotliwościowej (Rys.7), program MONITOR wyświetla widma prądów stojana w trzech fazach oraz widmo modułu wektora przestrzennego. Użytkownik może wybrać dodatkowe funkcje przetwarzania wstępnego sygnałów, takie jak skalowanie, filtrowanie, odcięcie składowej stałej czy też wymnożenie próbek sygnału przez wybraną funkcję okna. Oprócz tego program automatycznie wyszukuje i wyznacza amplitudy wybranych charakterystycznych

składowych spektralnych, których pojawienie się może być związane z wystąpieniem uszkodzeń stojana czy wirnika.



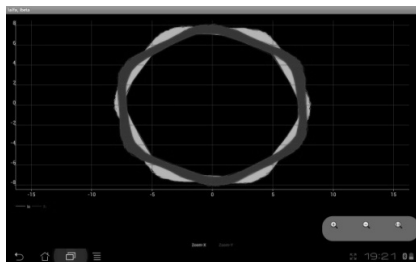
Rys.7. Okno programu „MONITOR” w trybie analizy częstotliwościowej

Kolejną funkcją oprogramowania diagnostycznego jest analiza składowych głównych wektora prądu stojana. Zarejestrowane przebiegi prądów fazowych zostają poddane przekształceniom (1-5), w wyniku których zostaje wyznaczona macierz kowariancji składowych wektora prądu stojana. Program automatycznie oblicza wektory (Γ) i wartości własne (λ) tej macierzy oraz wyznacza współrzędne składowych głównych wektora prądu stojana (γ_1 i γ_2). Na zakończenie zostaje obliczony wskaźnik λ_{PCA} , którego wartość jest proporcjonalna do wielkości odkształcenia hodografu prądu, czyli pośrednio zależy od stopnia uszkodzenia stojana [7]. Wszystkie wyniki powyższych analiz prezentowane są w postaci tekstowej i graficznej, co zdecydowanie ułatwia ocenę stanu technicznego badanego silnika. Na rysunku 8 przedstawiono przykładowe okno programu w trybie analizy PCA.



Rys.8. Okno programu „MONITOR” w trybie analizy składowych głównych prądu (PCA)

Oprogramowanie diagnostyczne MONITOR zostało również napisane w wersji dla urządzeń przenośnych z systemem Android. Od strony funkcjonalnej nie różni się od wersji komputerowej, natomiast posiada nieco zmienioną grafikę, przystosowaną do obsługi za pomocą ekranów dotykowych. Na rysunku 9 przedstawiono zrzut ekranu tabletu, z uruchomionym programem MONITOR, w trybie analizy kształtu hodografu prądu stojana.



Rys.9. Hodograf prądu stojana wykreślony na ekranie tabletu w programie MONITOR

5. Podsumowanie

Przedstawiony w referacie przenośny analizator diagnostyczny jest praktycznym, nieinwazyjnym systemem pomiarowym, który może być wykorzystany do okresowej i dorywczej kontroli stanu technicznego silników indukcyjnych. Kompaktowa budowa rejestratora, bezprzewodowy interfejs komunikacji oraz zastosowanie przetworników cęgowych w roli czujników prądu, pozwala na wygodne zrejestrowanie sygnałów prądów fazowych silnika w jego naturalnym układzie pracy, bez potrzeby rozłączania obwodów zasilania. Niewątpliwie najważniejszym elementem systemu diagnostycznego jest oprogramowanie zainstalowane na komputerze lub tablecie, które obsługuje bezprzewodową komunikację z rejestratorem używając technologii Bluetooth oraz umożliwia analizę zebranych danych pomiarowych pod kątem wykrywania różnych uszkodzeń silnika.

Aktualnie w programie diagnostycznym zaimplementowano algorytmy analizy częstotliwościowej oraz analizy składowych głównych wektora prądu stojana. Na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych stwierdzono, że zastosowanie tych metod diagnostycznych umożliwia wykonanie podstawowej oceny stanu technicznego silnika oraz pozwala na rozpoznanie klasycznych uszkodzeń, takich jak: asymetria zasilania,

zwarcie pojedynczych zwojów stojana, czy przerwanie prętów klatki wirnika. Elastyczna struktura oprogramowania pozwala na łatwą jego rozbudowę i umożliwia dodanie nowych funkcji diagnostycznych, wykorzystujących w roli sygnałów diagnostycznych prąd stojana.

6. Literatura

- [1]. Benbouzid M.E.H.: *A Review of Induction Motors Signature Analysis as a Medium for Faults Detection*. IEEE Trans. on Ind. Electronics, vol.47, no.5, Oct. 2000, p. 984-993
- [2]. Eltabach M., Charara A., Zein I.: *A comparison of External and Internal Methods of Signal Spectral Analysis for Broken Rotor Bars Detection in Induction Motors*. IEEE Trans. Ind. Electronics, 51 (2004), n.1, 107-121
- [3]. Martins J.F., Pires V.F., Pires A.J.: *PCA-Based On-Line Diagnosis of Induction Motor Stator Fault Feed by PWM Inverter*. IEEE ISIE 2006, vol. 3, pp. 2401-2405
- [4]. S. Nandi, H. A. Toliyat, Li Xiaodong: *Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors – a review*. IEEE Trans. Energy Conversion, vol.20, pp.719-729, no.4, 2005
- [5]. Pawlak M.: *Application of mobile devices with the Android system for the induction motors faults diagnosis*. Przegląd Elektrotechniczny. 2013, R. 89, nr 2b, s. 150-153
- [6]. Pawlak M.: *Zdalny system pomiarowy silnika indukcyjnego dla urządzeń przenośnych z systemem Android*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały. 2012, nr 32, s. 333-338
- [7]. Wolkiewicz M., Kowalski C.T.: *Neuronowy detektor zwarc zwojowych stojana silnika indukcyjnego wykorzystujący analizę PCA wektora prądu*. Przegląd Elektrotechniczny, 2012, R. 88, nr 4b, s. 288-293

Autor

dr inż. Marcin Pawlak, Politechnika Wroclawska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, tel. (71) 3203253, e-mail: marcin.pawlak@pwr.wroc.pl.

Praca naukowa finansowana ze środków Narodowego Centrum Nauki w ramach projektu N N510 637 340.

Recenzent

Prof. dr hab. inż. Sławomir Szymaniec