

Maciej Sulowicz, Instytut Elektrotechniki, Warszawa

Tomasz Węgiel, Konrad Weinreb, Tomasz Staniszewski, Politechnika Krakowska

SYSTEM AKWIZYCJI SYGNAŁÓW DIAGNOSTYCZNYCH DLA OCENY STANU SILNIKA INDUKCYJNEGO KLATKOWEGO

ACQUISITION SYSTEM OF DIAGNOSTIC SIGNALS FOR STATE ESTIMATION CAGE INDUCTION MOTOR

Abstract: This paper presents a procedure of acquisition of diagnostic signals, needed for a comprehensive diagnostics of squirrel cage motors. The data is obtained from a Data Acquisition Card (DAQ), measuring transducers and a database. The procedure allows the measurements of the required quantities and data transfer to the server via the LAN Network or the Internet. Basic diagnostic signals required to evaluate the condition of the squirrel cage motor are three phase currents and phase voltages feeding the stator of the machine, measured at the same instant. The system delivers data needed to the comprehensive diagnostic of the squirrel cage motors, especially the ones used to detect faults which are difficult to recognize without simultaneous measurements of motor currents and control of a stator voltage symmetry. Simultaneous measurement of the three currents and the three voltages is necessary for the diagnostic methods, based on the analysis of the specific features of the motor currents component's spectrum described by the authors. This paper contains examples of the diagnostic signal analysis collected and stored with the use of the developed data acquisition system.

1. Wstęp

Szybki postęp w rozwoju komputerowych systemów pomiarowych, coraz niższy koszt instalacji różnego rodzaju czujników i przetworników pomiarowych oraz możliwości transmisji danych poprzez różne media komunikacyjne stwarza nowe możliwości budowy i stosowania systemów akwizycji sygnałów diagnostycznych dla silników indukcyjnych.

System akwizycji sygnałów diagnostycznych powinien umożliwiać przeprowadzenie pomiarów oraz wykonanie analizy zebranych danych w celu identyfikacji zjawisk fizycznych zachodzących w maszynie. System akwizycji danych można traktować jako zbiór elementów składający się z oprogramowania oraz sprzętu łączącego osobę przeprowadzającą pomiar z badanym silnikiem.

Stopniowy charakter rozwoju uszkodzeń silnika i potrzeba ich wczesnego wykrywania narzucają okresowe powtarzanie pomiarów diagnostycznych. Przy analizie zebranych sygnałów i ocenie stanu maszyny, należy się odnieść do danych pomiarowych zarejestrowanych w przeszłości. Odniesienie się do danych historycznych pozwala porównywać wielkości charakterystycznych cech występujących w badanych sygnałach. Powstające różnice w analizowanych sygnałach mogą świadczyć o pojawiającej się degradacji stanu maszyny. Dlatego bardzo ważnym aspektem systemu jest gromadzenie

danych historycznych o pomiarach wykonanych na obiekcie.

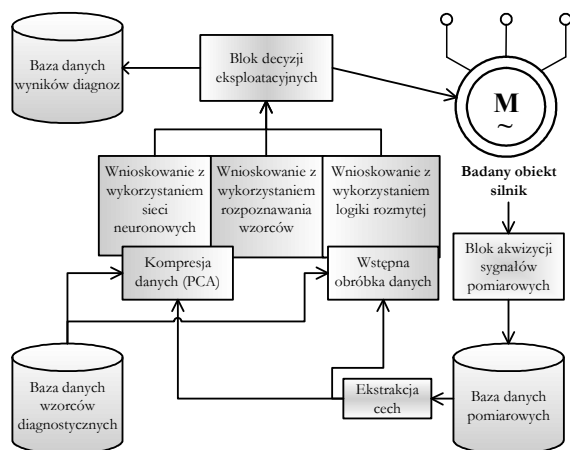
W pracy zostanie zaprezentowany system zbierania i gromadzenia sygnałów diagnostycznych na potrzeby kompleksowej diagnostyki silników indukcyjnych klatkowych oparty o kartę pomiarową DAQ, przetworniki pomiarowe oraz pomiarową bazę danych. System ten umożliwia wykonanie pomiarów oraz przesyłanie danych do głównego serwera pomiarowego poprzez sieć LAN lub Internet.

Podstawowymi sygnałami diagnostycznymi do oceny stanu silnika indukcyjnego klatkowego są trzy prądy fazowe i trzy napięcia fazowe zasilające stojan maszyny, mierzone w tej samej chwili czasowej. Proponowany system dostarcza dane do kompleksowej diagnostyki silników indukcyjnych a w szczególności do wykrywania efektów uszkodzeń, które są trudne do wykrycia bez równoczesnego wykonania pomiarów trzech prądów zasilających oraz kontroli symetrii napięć zasilających badaną maszynę. Równoczesny pomiar trzech prądów i napięć jest konieczny do opracowanych przez autorów metod diagnostycznych opartych o analizę istotnych cech widma składowych symetrycznych prądów zasilających badany silnik indukcyjny klatkowy.

2. Kompleksowy system diagnostyczny

Schemat ideowy systemu diagnostycznego dla silnika indukcyjnego klatkowego przedstawiono na Rys. 1. Oprócz badanego obiektu – silnika indukcyjnego klatkowego oraz układu akwizycji danych, przedstawiony system diagnostyczny silnika składa się z:

- *Bazy danych pomiarowych*, w której przechowywane i udostępniane są wyniki pomiarów wykonanych na badanym obiekcie.
- *Bazy danych wzorców diagnostycznych*, w której składowane są wyniki obliczeń specjalizowanych modeli matematycznych, uwzględniających wpływ stanu maszyny na cechy sygnałów diagnostycznych. Są tu przechowywane wzorce dla przypadków wystąpienia ekscentryczności, uszkodzeń klatki oraz niesymetrii napięć zasilających.
- *Bazy danych wyników diagnoz*, która spełnia zadanie archiwizacji wyników dotychczas przeprowadzonych diagnoz.
- *Bloków wnioskowania diagnostycznego*, w których wykorzystuje się logikę rozmytą, sieci neuronowe oraz rozpoznawania wzorców do oceny aktualnego stanu maszyny.
- *Bloku decyzyjnego*, odpowiedzialnego za wydawanie zaleceń eksploatacyjnych na podstawie wyników przeprowadzonych badań diagnostycznych.



Rys. 1. Schemat ideowy systemu diagnostycznego

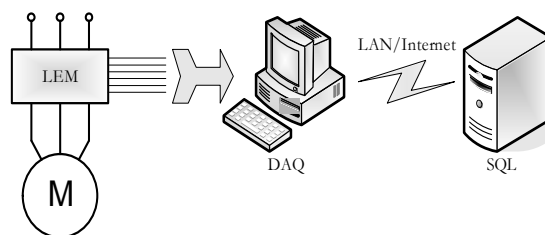
System diagnostyczny silnika indukcyjnego, przedstawiony na Rys.1., działa według następujących zasad:

- Przed rozpoczęciem działania całego systemu diagnostycznego zostaje napełniona baza danych wzorców diagnostycznych, zawierająca wzorcowe widma prądu uwzględniające różne rodzaje uszkodzeń dla badanych typów silników indukcyjnych.

- Za pomocą bloku akwizycji danych następuje zbieranie sygnałów diagnostycznych z badanego obiektu – silnika indukcyjnego. Pobrane dane są przesyłane i gromadzone w pomiarowej bazie danych.
- Dla aktualnie wykonywanego pomiaru dokonywana jest analiza zarejestrowanych sygnałów diagnostycznych. Po precyzyjnym określeniu prędkości obrotowej silnika, w trakcie wykonywania pomiaru, następuje ekstrakcja istotnych cech z analizowanych sygnałów, na podstawie których będzie postawiona diagnoza co do aktualnego stanu maszyny.
- W bloku wnioskowania diagnostycznego odbywa się ocena istotnych cech wybranych z analizowanych sygnałów lub zastępczych wskaźników, utworzonych na podstawie tych cech. Ogólnie ujmując wnioskowanie odbywa się przez porównanie cech lub wskaźników z analogicznie wybranymi i przetworzonymi danymi zgromadzonymi w bazie wzorców diagnostycznych. Ocena stanu może odbywać się z zastosowaniem metod sztucznej inteligencji. W wyniku oceny charakterystycznych cech analizowanych sygnałów zostaje postawiona diagnoza określająca aktualny stan pracy silnika.
- Na podstawie aktualnych oraz poprzednich wyników diagnoz, w bloku decyzyjnym następuje wskazanie zaleceń eksploatacyjnych.

3. System akwizycji danych

Układ akwizycji danych odpowiada bezpośrednio za dostarczenie aktualnych wyników pomiarów dla etapu oceny diagnostycznej i jest jednym z głównych elementów systemu diagnostycznego układu napędowego z silnikiem indukcyjnym klatkowym. Przy wykorzystaniu komputera ogólnego przeznaczenia klasy PC i karty pomiarowej DAQ, układ można zaliczyć do tzw. komputerowych systemów pomiarowych.

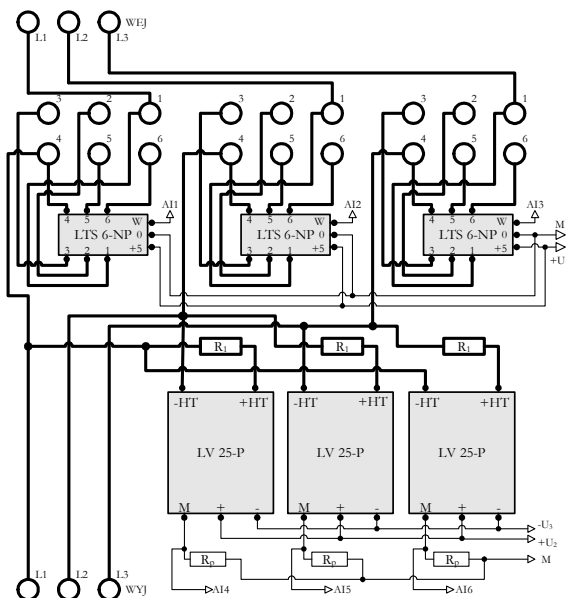


Rys. 2. Schemat blokowy układu akwizycji danych

Jest to zarazem jeden z najprostszych i najczęściej spotykanych modeli, gdzie centralnym elementem systemu jest wirtualny przyrząd pomiarowy – karta pomiarowa wraz z komputerem i specjalistycznym oprogramowaniem. Schemat blokowy systemu akwizycji danych przedstawia Rys. 2.

Konfiguracja systemu obejmuje następujące elementy składowe:

- *LEM* – Przystawka pomiarowa – zestaw przetworników służących do pomiaru 3 prądów fazowych i 3 napięć fazowych zasilających badany silnik. Zestaw przetworników jest indywidualnie dobrany do danych znamionowych badanego silnika.
- *DAQ* – Komputer pomiarowy z zainstalowaną wielofunkcyjną kartą pomiarową – główny element systemu akwizycji. Poprzez wykorzystanie specjalistycznej aplikacji pomiarowej, za pomocą komputera można zmieniać parametry wykonywanych pomiarów oraz przysyłać dane wynikowe do wybranego serwera baz danych.
- *SQL* – Serwer baz danych – komputer udostępniający zasoby w sieci lokalnej lub Internet, umożliwiający przechowywanie wyników pomiarów w relacyjnej bazie danych o specjalnie zaprojektowanej strukturze.



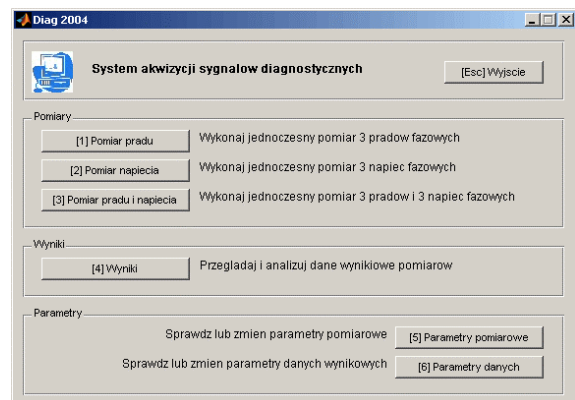
Rys. 3. Schemat ideowy przystawki pomiarowej

Przystawka pomiarowa stanowi układ składający się z kompletu przetworników elektrycznych oraz zasilacza. Zastosowany zestaw przetworników pozwala na jednoczesny pomiar trzech prądów i trzech napięć fazowych zasilających badany silnik indukcyjny. Schemat ide-

owy przystawki pomiarowej przedstawiono na Rys. 3. Prototyp przystawki pomiarowej do układu akwizycji danych zbudowano dla silników niskonapięciowych małej mocy. Podstawowe elementy przystawki to:

- Trzy miniaturowe przetworniki prądowe firmy LEM model LTS 6-NP z wbudowaną izolacją galwaniczną pomiędzy obwodem pierwotny a wtórnym. Dzięki odpowiednio połączonym zwojom można uzyskać 3 zakresy prądowe: $\pm 6A$, $\pm 3A$, $\pm 2A$.
- Trzy przetworniki napięciowe firmy LEM model LV 25-P, pracujące w układzie z zamkniętą pętlą sprzężenia zwrotnego z analogowym wyjściem prądowym, przystosowane do elektronicznego pomiaru napięć: stałych, zmiennych, pulsujących i innych, z wbudowaną izolacją galwaniczną pomiędzy obwodem pierwotny a wtórnym.
- Zasilacz impulsowy o trzech poziomach napięć wyjściowych: $+5V$; $+15V$, $-15V$ do zasilania przetworników LEM.

Aplikacja pomiarowa *Diag 2004* stanowi zestaw funkcji programowych realizujących zadania gromadzenia, przesyłu, przetwarzania i analizy danych pomiarowych. Aplikacja została przygotowana w środowisku programowania *MATLAB 7.0*. Główny okno aplikacji pomiarowej przedstawiono na Rys. 4.

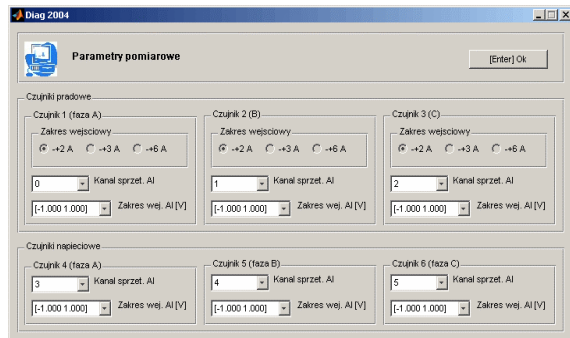


Rys. 4. Główne okno aplikacji pomiarowej

Podstawowe możliwości aplikacji są następujące:

- Wykonywanie jednoczesnego pomiaru trzech prądów i/lub trzech napięć fazowych.
- Przesyłanie oraz składowanie wyników pomiarów w bazie danych.
- Przeglądanie oraz przetwarzanie wyników pomiarów przechowywanych w bazie.

Wykonanie pomiaru następuje w momencie wybrania odpowiedniej funkcji aplikacji pomiarowej zainstalowanej na stanowisku komputerowym. Za pomocą okna dialogowego można dowolnie zmieniać parametry wykonywanych pomiarów. Okno programu z interfejsem do zmiany opcji pomiarów przedstawia Rys. 5.



Rys. 5. Okno aplikacji do zmiany parametrów pomiarowych

Sygnaly pomiarowe, generowane na wyjściach przetworników zamontowanych w przystawce, proporcjonalne do aktualnych wartości prądów i napięć zasilających silnik, zostają poddane próbkowaniu przez podsystem A/C wielofunkcyjnej karty pomiarowej DAQ. Odpowiednio przetworzone dane pomiarowe są następnie, przesyłane do pomiarowej bazy danych. Eksport danych odbywać się może zarówno poprzez sieć lokalną jak i Internet.

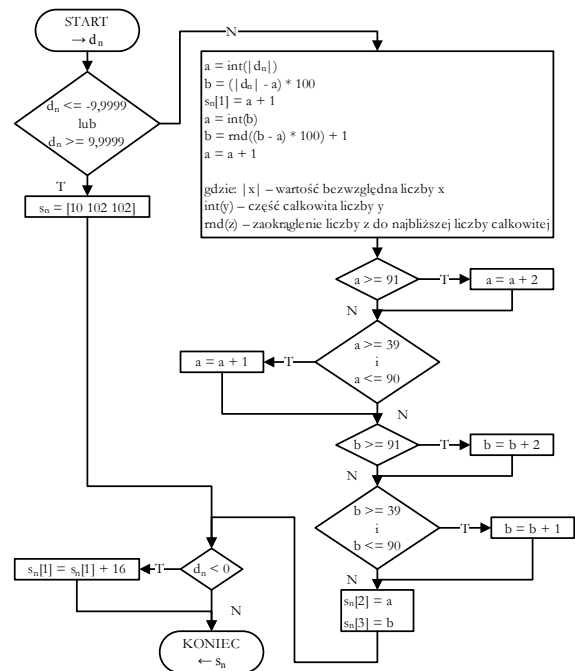
Aplikacja pomiarowa umożliwia obsługę wybranych kart pomiarowych DAQ następujących producentów: *Advantech, Agilent Technologies, Keithley, Measurement Computing Corporation, National Instruments*.

W warunkach laboratoryjnych przeprowadzono badania diagnostyczne dla systemu akwizycji danych z zastosowaniem 12-bitowej karty *PCL-818L* umożliwiającej współpracę z komputerem stacjonarnym oraz dla 16-bitowej karty *DAQCard-6036E*, umożliwiającej wykonanie pomiarów za pomocą komputera przenośnego typu notebook.

4. Przesył i składowanie danych pomiarowych

Specjalistyczna funkcja programu pozwala na wykorzystanie połączenia sieciowego (lokalnego lub internetowego) w celu przesłania zebranych wyników do zdalnego serwera baz danych. Wszystkie dane, odpowiednio przetworzone przez aplikację, trafiają do serwera i są zapisywane w bazie danych o specjalnie zaprojektowanej strukturze.

W trakcie wykonywania pomiaru, dane – wartości kolejnych pobranych próbek – gromadzone są w pamięci komputera, w postaci tablicy liczb rzeczywistych. Natychmiast po zakończeniu pomiaru, aplikacja dokonuje konwersji wyników do formatu umożliwiającego przesłanie wyników do bazy danych. Schemat blokowy działania algorytmu konwersji próbek pomiarowych przedstawiono na Rys.6.



Rys. 6. Algorytm konwersji próbek pomiarowych

Daną wejściową stanowi próbka zapisana w postaci liczby rzeczywistej – d_n . Jako wynik działania algorytmu otrzymujemy trzybajtowy wektor s_n . Przykładowo dla próbki o wartości $d_n=1,234567$ otrzymujemy $s_n=[02\ 24\ 47]$. Konwersję całej tablicy D próbek pomiarowych można zapisać w następującej postaci:

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{21} & \dots & d_{m1} \\ d_{12} & d_{22} & \dots & d_{m2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ d_{1n} & d_{2n} & \dots & d_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

gdzie:

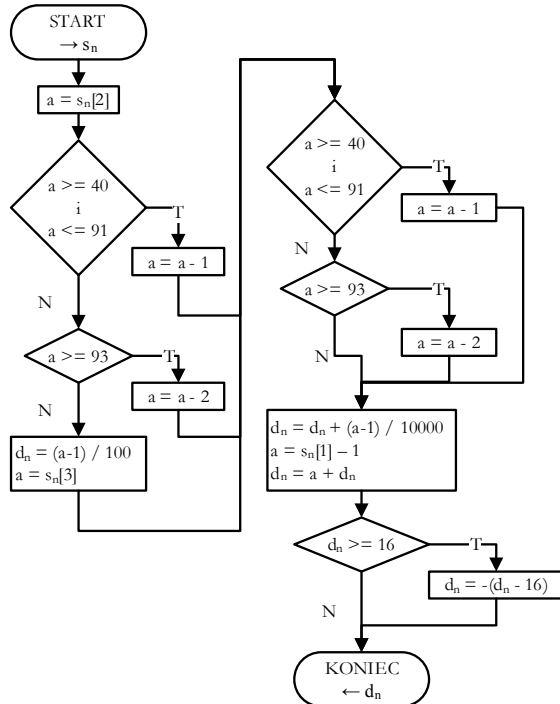
$d_{m1}, d_{m2}, \dots, d_{mn}$ – próbki zgromadzone dla m -tego kanału pomiarowego.

W wyniku konwersji tablicy próbek otrzymujemy wektor $(m*n*3)$ -bajtowy.

$$S = [[s_{11} \ s_{12} \ \dots \ s_{1n}] \ \dots \ [s_{m1} \ s_{m2} \ \dots \ s_{mn}]] \quad (2)$$

gdzie: s_{mn} – trzybajtowy wektor odpowiadający próbce d_{mn} ;

Proces konwersji odwrotnej wykonywany jest podczas odczytu wyników z bazy danych po wybraniu funkcji analizy danych pomiarowych. Algorytm działania przedstawiono na Rys. 7. W tym przypadku daną wejściową stanowi wektor trzech bajtów s_n , w wyniku otrzymywana jest liczba rzeczywista d_n .



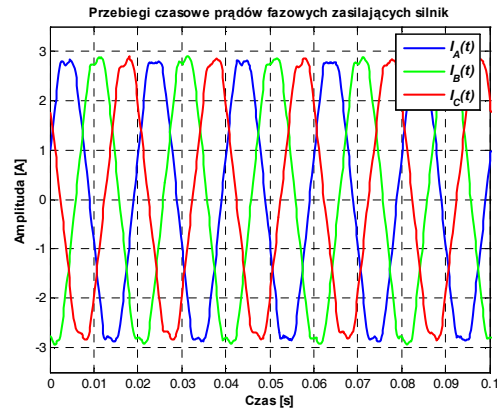
Rys. 7. Algorytm konwersji odwrotnej próbek pomiarowych

Algorytmy konwertujące zaprojektowane zostały w celu minimalizacji objętości danych pomiarowych zapisywanych w bazie danych. Minimalizację objętości danych pomiarowych osiągnięto dzięki zastosowaniu w bazie danych pojedynczego pola typu tekst. Pole to służy do przechowywania całego ciągu danych pomiarowych. Poszczególne próbki ciągu są zapisywane w postaci trzech znaków - bajtów.

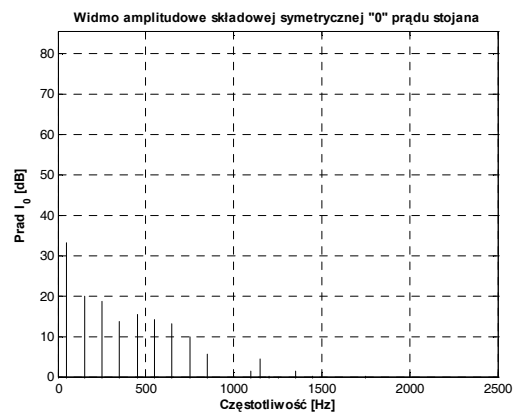
5. Przykład zastosowania systemu akwizycji danych

Przy pomocy opracowanego systemu akwizycji danych przeprowadzono badania diagnostyczne kilku silników indukcyjnych klatkowych z różnymi typami uszkodzeń. Proponowany system umożliwił przetworzenie zebranych sygnałów fazowych do ich składowych symetrycznych co znacznie poszerzyło możliwości oceny diagnostycznej, jak to zostało wykazane poprzez analizę numeryczną w pracach [3],[4]. Dane znamionowe silników testowych: $P_N = 0,8$ kW, $U_N = 380$ V, $I_N = 2,2$ A, $\cos\phi_N = 0,74$,

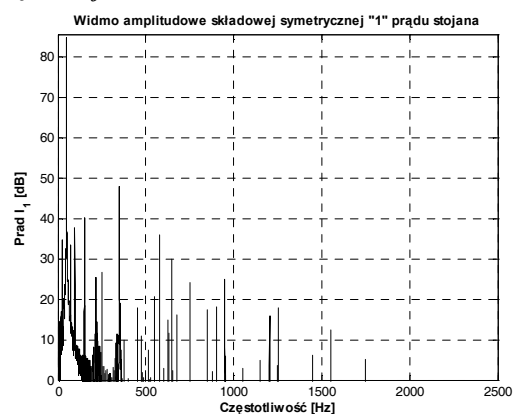
$n_N = 1400$ obr/min, skojarzenie uzwojeń stojana w gwiazdę. Silniki zasilono 3-fazowym układem napięć przemiennych, z miejskiej sieci energetycznej, o niesymetrii napięć zasilających nie przekraczającej 1.5 % wartości napięcia znamionowego. Przykładowe przebiegi prądów i ich widma składowych symetrycznych przedstawiono na Rys. 8. do Rys. 11.



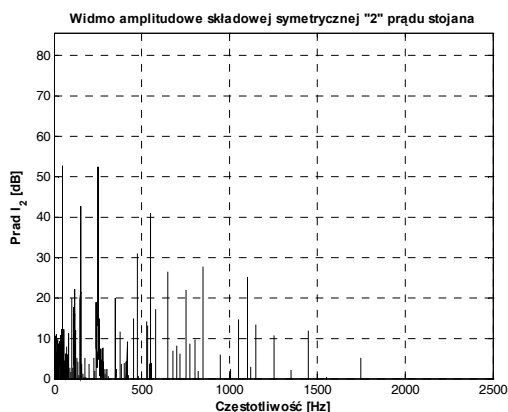
Rys. 8. Przebiegi czasowe prądów stojana



Rys. 9. Widmo składowej symetrycznej „0” prądu stojana



Rys. 10. Widmo składowej symetrycznej „1” prądu stojana



Rys. 11. Widmo składowej symetrycznej „2” prądu stojana

6. Wnioski

W celu osiągnięcia pożądanego jakości pracy danego obiektu technicznego, wymagane jest podejmowanie odpowiednich i trafnych decyzji eksploatacyjnych. Podejmowane decyzje eksploatacyjne będą mało wiarygodne do momentu, gdy wyniki diagnozy stanu nie będą oparte na rzetelnych danych pomiarowych niosących informacje o faktycznym stanie badanego urządzenia. Uzyskanie wiarygodnych danych pomiarowych jest możliwe tylko w trakcie wykonywania pomiarów przy pomocy poprawnie skalibrowanych urządzeń pomiarowych o odpowiednio dobranych parametrach.

Zaprezentowany w niniejszym artykule system akwizycji sygnałów diagnostycznych odpowiada za dostarczenie poprawnych danych pomiarowych, na których oparte są dalsze etapy diagnozy stanu i podejmowania decyzji eksploatacyjnych zapewniających optymalną pracę wybranego układu napędowego z silnikiem indukcyjnym klatkowym.

Wspomniane decyzje ułatwia zwiększenie liczby równocześnie mierzonych sygnałów diagnostycznych, gdyż możliwym staje się użycie wielu różnych algorytmów przetwarzania i oceny sygnałów.

Zarówno elementy składowe systemu akwizycji danych jak i komputerowa aplikacja pomiarowa zostały zaprojektowane i przygotowane z uwzględnieniem charakterystyk mierzonych sygnałów. Wzięto pod uwagę możliwość szybkiej i nieskomplikowanej wymiany na inny model takich elementów jak karta pomiarowa czy przetworniki pomiarowe. Priorytetowe znaczenie ma przy tym minimalizacja kosztów systemu, co osiągnięto między innymi dzięki wykorzystaniu powszechnie stosowanego kom-

putera klasy PC jako urządzenia sterującego wielofunkcyjną kartą pomiarową oraz jednocześnie gromadzącego i przetwarzającego zbierane dane pomiarowe.

Przedstawione w artykule przykładowe wyniki potwierdzają zgodność przyjętych założeń konstrukcji i funkcjonowania bloku akwizycji danych pomiarowych jako elementu składowego systemu diagnostycznego.

7. Literatura

- [1]. Mielnik R., Sułowicz M., Weinreb K., Węgiel T.: *Koncepcja systemu telediagnostycznego dla urządzeń napędowych*. Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne, Nr 66, Wydawnictwo BOBRME Komel, Katowice 2003, str. 85-90.
- [2]. Nawrocki W.: *Komputerowe systemy pomiarowe*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2002.
- [3]. Sobczyk T.J., Weinreb K., Sułowicz M.: *Diagnostyka silników klatkowych bazująca na składowych symetrycznych prądach stojana*. SME 2000, Prace Naukowe IMNiPE Politechniki Wrocławskiej, Nr 49, Seria: Studia i Materiały Nr 21, Diagnostyka maszyn elektrycznych, str.28-36.
- [4]. Weinreb K., Sułowicz M., Węgiel T.: *Nieinwazyjna diagnostyka wirnika maszyny asynchronicznej*. Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne, Nr 69, Wydawnictwo BOBRME Komel, Katowice 2004, str. 35-40.
- [5]. 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, Wydawnictwo BOBRME Komel, Katowice 2000, str. 233-238.

Autorzy

mgr inż. M. Sułowicz¹⁾ pesulowi@cyf-kr.edu.pl
 dr inż. T. Węgiel²⁾ pewegiel@cyf-kr.edu.pl
 dr inż. K. Weinreb²⁾ peweinre@cyf-kr.edu.pl
 mgr inż. T. Staniszewski²⁾ tost@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