

# Rozproszony system pomiarowy do diagnostyki przemysłowych napędów elektrycznych

Marcin Pawlak, Zdzisław Żarczyński

## 1. Wstęp

W diagnostyce eksploatacyjnej przemysłowych napędów elektrycznych powszechnie stosuje się metody monitorowania podstawowych wielkości elektrycznych i mechanicznych, do których zaliczyć można: napięcie i prąd silnika, moment elektromagnetyczny, prędkość obrotową oraz przyspieszenie drgań korpusu maszyny. Szczegółowa analiza parametryczna tych sygnałów umożliwia rozpoznanie i klasyfikację wszelkich nieprawidłowości występujących w częściach mechanicznych i obwodach elektrycznych badanej maszyny. Do skutecznej analizy diagnostycznej maszyn elektrycznych o różnych mocach niezbędna jest uniwersalna aparatura pomiarowa, wyposażona w odpowiednie czujniki i wielozakresowe przetworniki pomiarowe [5].

Współczesne zakłady przemysłowe posiadają w pełni zautomatyzowane linie technologiczne, wykorzystujące dużą liczbę napędów elektrycznych, zróżnicowanych pod względem budowy, wielkości i mocy. Pomimo że do budowy maszyn przemysłowych stosowane są najwyższej jakości materiały, to jednak z uwagi na ciągły charakter pracy i trudne warunki środowiskowe ulegają one czasem awariom, powodując kosztowne przestoje produkcyjne. W związku z tym pożądane jest ciągle monitorowanie stanu technicznego najbardziej niewralgicznych elementów w celu możliwie wczesnego rozpoznania wszelkich pojawiających się uszkodzeń, co pozwoli zapobiec nagłym, nieplanowanym przestojom produkcyjnym [3]. Z uwagi na rozproszony charakter linii technologicznej niezbędne jest instalowanie czujników i przetworników pomiarowych w odległych punktach od centralnego systemu diagnostycznego. To z kolei powoduje konieczność przesyłania sygnałów analogowych na stosunkowo duże odległości, co może prowadzić do powstawania zakłóceń i utraty jakości informacji diagnostycznej. Rozwiązaniem tego problemu może być zastosowanie kilku lokalnych układów pomiarowych, które zamienią odpowiednie sygnały analogowe na postać cyfrową i prześlą je do nadrzędnego systemu analizy diagnostycznej.

Niniejszy artykuł przedstawia koncepcję oraz prototyp rozproszonego systemu pomiarowego, który może być wykorzystany do monitorowania i diagnostyki napędów elektrycznych praktycznie dowolnego procesu technologicznego.

## 2. Rozproszony system diagnostyczny – ogólna koncepcja

Głównym założeniem projektowym było opracowanie uniwersalnego systemu pomiarowo-diagnostycznego, który mógłby być wykorzystany do kompleksowej diagnostyki dowolnych napędów elektrycznych, zainstalowanych w przemysłowych

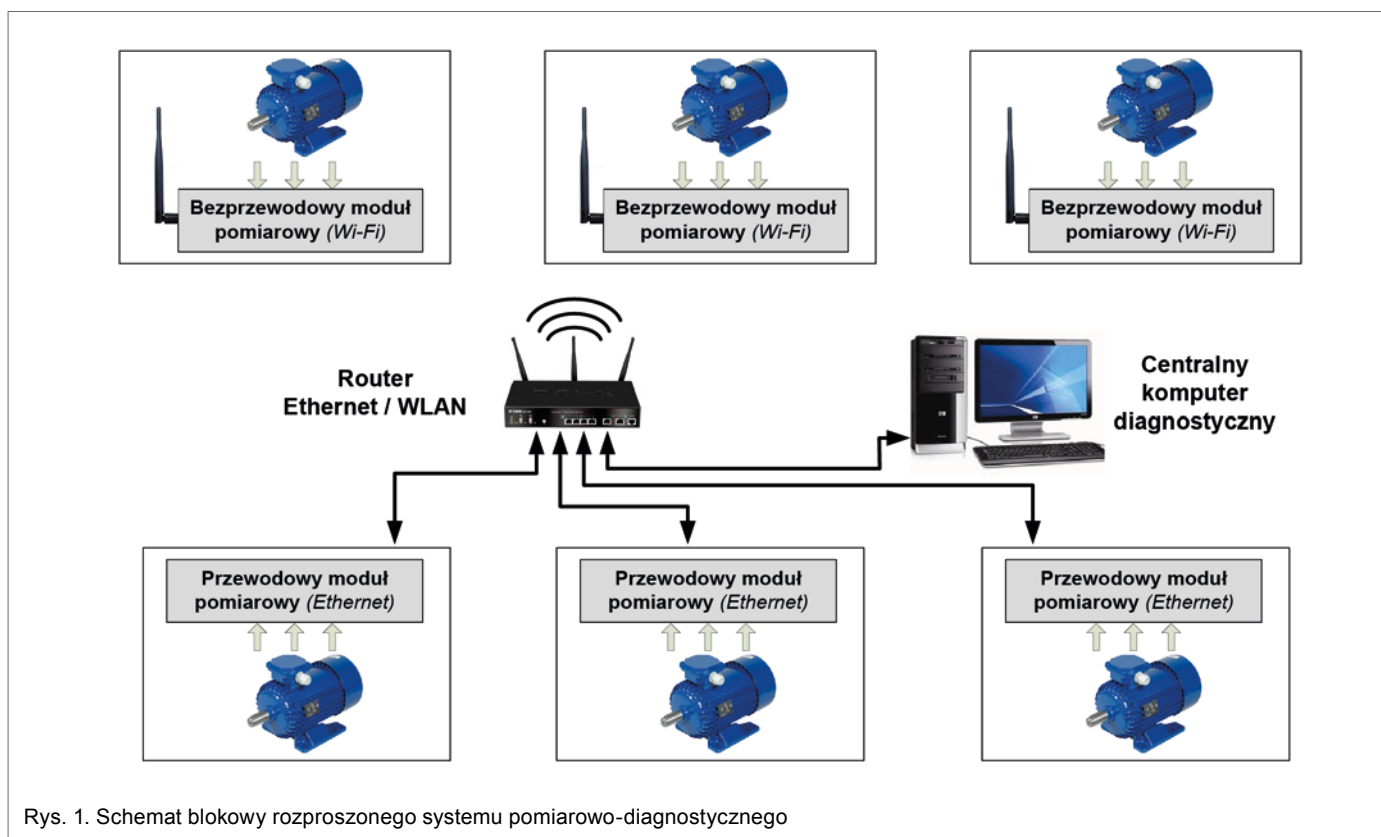
**Streszczenie:** Nowoczesne zakłady przemysłowe bardzo często wyposażone są w zautomatyzowane linie produkcyjne, na których zainstalowanych jest wiele napędów elektrycznych o różnej mocy. W celu zapewnienia właściwego i niezawodnego przebiegu procesu technologicznego stan techniczny poszczególnych napędów powinien być na bieżąco kontrolowany. Do tego celu stosuje się różne systemy diagnostyczne, które na bieżąco monitorują pracę najważniejszych elementów linii technologicznej. W artykule przedstawiono koncepcję oraz prototyp rozproszonego systemu pomiarowego, który składa się z centralnego komputera diagnostycznego oraz lokalnie instalowanych modułów pomiarowych. Poszczególne moduły pomiarowe wyposażone są w zestawy przetworników do pomiaru prądów, napięć i drgań monitorowanych napędów oraz bezprzewodowe karty pomiarowe typu NI-9205. Centralny komputer diagnostyczny obsługuje dwukierunkową wymianę danych pomiędzy rozproszonymi modułami pomiarowymi, przy wykorzystaniu przewodowych sieci komunikacyjnych w standardzie Ethernet oraz bezprzewodowej technologii Wi-Fi. Na komputerze zainstalowane jest oprogramowanie diagnostyczne do analizy danych pomiarowych, opracowane w środowisku LabView.

Słowa kluczowe: napędy elektryczne, rozproszony system pomiarowy, diagnostyka.

### THE DISTRIBUTED MEASUREMENT SYSTEM FOR THE DIAGNOSIS OF INDUSTRIAL ELECTRIC DRIVES

**Abstract:** Modern industrial plants often have the automated production lines, that consist of many electric drives of various power. In order to ensure proper and reliable technological process, the technical condition of the individual drives should be kept under control. For this purpose, the different diagnostic systems are applied, that continuously monitor key elements of the process line. The paper presents a concept and prototype of a distributed measurement system, which consists of the central computer and a few diagnostic measurement modules installed locally. Individual modules are equipped with sets of transducers for measuring of currents, voltages, and vibration of drives and with wireless data acquisition card NI-9205. Central diagnostic computer supports bi-directional data exchange with distributed measurement modules, using wired Ethernet network and wireless technology Wi-Fi. The central computer has installed diagnostic software for the analysis of measurement data, developed in LabView environment.

Keywords: electrical drives, distributed measurement system, diagnostic.



liniach technologicznych o budowie rozległej. Ogólną strukturę rozproszonego systemu diagnostycznego przedstawiono na rysunku 1.

Składa się on z centralnego komputera diagnostycznego oraz rozproszonych modułów pomiarowych, które są zainstalowane lokalnie, w pobliżu monitorowanych napędów. W zależności od potrzeb poszczególne moduły pomiarowe mogą przysyłać dane pomiarowe w sposób ciągły (funkcja monitorowania) lub na żądanie operatora (szczegółowa analiza diagnostyczna). Wymiana danych pomiędzy głównym komputerem a poszczególnymi modułami może być zrealizowana za pomocą sieci bezprzewodowych Wi-Fi w standardzie IEEE 802.11 (odległości do ok. 100 m) lub za pomocą sieci przewodowych w standardzie Ethernet. Głównym ogniwem systemu jest centralny komputer diagnostyczny z zainstalowanym oprogramowaniem do analizy danych pomiarowych. Analiza diagnostyczna danych pomiarowych odbywa się za pomocą wirtualnych przyrządów diagnostycznych, opracowanych w środowisku LabView. Rozwiązanie to stwarza praktycznie nieograniczone możliwości programowej implementacji dowolnych metod analizy sygnałów, pod kątem wykrywania uszkodzeń monitorowanych napędów i urządzeń.

Modułowa struktura systemu diagnostycznego powoduje, że jest on bardzo elastyczny, co stwarza praktycznie nieograniczone możliwości jego dalszej rozbudowy. Od strony sprzętowej użytkownik może w każdej chwili dostawić kolejne moduły pomiarowe, w zależności od wymagań procesu technologicznego. Również oprogramowanie diagnostyczne może być na bieżąco rozszerzane poprzez instalację dodatkowych funkcji analizy sygnałów pomiarowych, wprowadzających np. nowe metody diagnostyczne.

### 3. Bezprzewodowy moduł pomiarowy – realizacja sprzętowa prototypu

#### 3.1. Założenia projektowe

Moduły pomiarowe współpracujące z rozproszonym systemem diagnostycznym przeznaczone są do instalacji w bezpośrednim sąsiedztwie monitorowanych napędów i powinny umożliwić zdalny pomiar oraz transmisję sygnałów pomiarowych wybranych wielkości elektrycznych i nieelektrycznych. Na potrzeby testów rozproszonego systemu diagnostycznego został wykonany prototyp uniwersalnego, bezprzewodowego modułu pomiarowego, o budowie kompaktowej, wykonanej w formie przenośnej walizki (rys. 5). Do jego opracowania przyjęto następujące założenia:

- możliwość pomiaru i rejestracji wartości chwilowych trzech napięć międzyfazowych, w zakresie do 500 VRMS;
- możliwość pomiaru i rejestracji wartości chwilowych trzech prądów fazowych w dwóch zakresach: 0–8 ARMS oraz 0–25 ARMS;
- jednoczesny pomiar i rejestracja sygnałów przyspieszenia drgań dla czterech przetworników piezoelektrycznych w technologii IEPE;
- obsługa trzech uniwersalnych, dodatkowych kanałów pomiarowych dla przetworników zewnętrznych, o zakresie pomiarowym  $\pm 10$  V;
- jednoczesna rejestracja 16 sygnałów pomiarowych, posiadających różnicowe tory analogowe;
- częstotliwość próbkowania sygnałów do 250 kHz, przy rozdzielczości 16 bitów;



Rys. 2. Fotografia karty pomiarowej NI-9205 oraz modułu komunikacyjnego NI cDAQ-9191

- zdalna komunikacja z centralnym komputerem diagnostycznym przy wykorzystaniu sieci bezprzewodowej w technologii Wi-Fi.

### 3.2. Wybór karty pomiarowej

Dobór odpowiedniej karty pomiarowej do realizacji funkcji pomiarowych jest zadaniem pozornie łatwym. Chociaż na rynku oferowanych jest wiele produktów o podobnych parametrach, jednak nie wszystkie pozwalają na integrację z elastycznym oprogramowaniem, które umożliwia realizację dowolnych funkcji diagnostycznych, programowanych przez użytkownika. W prototypowym module pomiarowym ostatecznie zastosowano kompaktową kartę NI-9205, zainstalowaną w bezprzewodowym module do transmisji danych typu NI cDAQ-9191. Karta umożliwia jednoczesny pomiar w 32 kanałach ze wspólną masą lub w 16 kanałach o różnicowej konfiguracji wejść. Sygnały pomiarowe są próbkowane z maksymalną częstotliwością 250 kHz, z rozdzielczością 16-bitową. Moduł transmisyjny NI cDAQ-9191 zapewnia komunikację z komputerem za pośrednictwem sieci Ethernet lub umożliwia bezprzewodową transmisję strumienia danych pomiarowych w standardzie IEEE 802.11 WiFi. Na rysunku 2 przedstawiono fotografię karty pomiarowej oraz modułu transmisyjnego.

### 3.3. Układ pomiaru prądów i napięć

Do realizacji sprzętowej układu pomiaru prądów fazowych silnika zastosowano przetworniki hallotronowe firmy LEM, które charakteryzują się wysoką dokładnością pomiarową oraz posiadają szerokie pasmo częstotliwości, w zakresie 0–200 kHz. W prototypie modułu pomiarowego zainstalowano dwa trójfazowe torry prądowe, o różnych zakresach pomiarowych: 8 A i 25 A. Rozwiązanie to zwiększa uniwersalność modułu pomiarowego i pozwala na zastosowanie go do analizy diagnostycznej silników różnej mocy.

W układzie pomiaru napięć międzyfazowych silnika zastosowano trzy przetworniki hallotronowe typu AV100-500, które umożliwiają pomiar napięć skutecznych w zakresie 500 V. Przetworniki te z uwagi na ograniczone pasmo częstotliwości (0–13 kHz) przeznaczone są raczej do zastosowań w badaniach silników zasilanych bezpośrednio z sieci. Jeżeli istnieje potrzeba pomiarów napięć w napędach przekształtnikowych,

w prototypie modułu pomiarowego przewidziano możliwość zastosowania dodatkowego układu pomiaru napięć, zbudowanego w oparciu o wysokonapięciowe różnicowe wzmacniacze pomiarowe [4]. Takie rozwiązanie stosowane jest powszechnie w napięciowych sondach oscyloskopowych i zapewnia bardzo wysokie pasmo częstotliwości, dochodzące w zależności od zastosowanych wzmacniaczy do 50 MHz.

Każdy z przetworników pomiarowych (zarówno w torze pomiarowym prądów, jak i napięć) został wyposażony w niezależny wzmacniacz, który zapewnia dopasowanie sygnałów pomiarowych do wejść karty pomiarowej oraz umożliwia precyzyjną kalibrację. Na rysunku 3 przedstawiono fotografię zastosowanych przetworników pomiarowych.

### 3.4. Układ pomiaru drgań

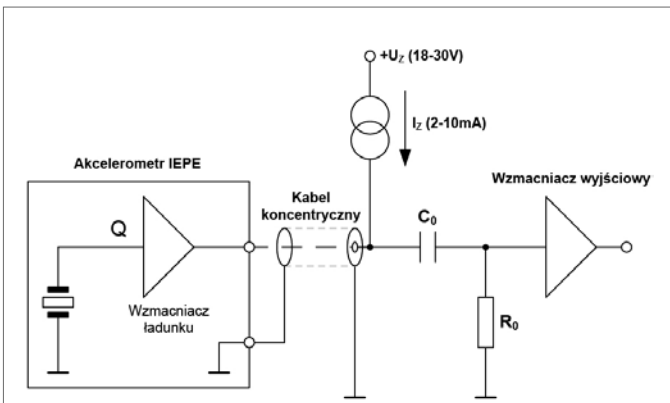
Układ pomiarowy drgań przystosowany jest do współpracy z popularnymi akcelerometrami piezoelektrycznymi, powszechnie stosowanymi w roli czujników przyspieszenia drgań różnych podzespołów mechanicznych, w tym silników. Większość z tych przetworników wyposażona jest w interfejs w standardzie IEPE (*Integrated Electronics Piezo Electric*), który wymusza stosowanie specjalnych obwodów wejściowych w układach pomiarowych. Ze względu na fakt, że przetworniki pomiarowe nie mają własnego źródła zasilania, tor pomiarowy musi posiadać na wejściu specjalny obwód źródła prądowego, który zasili podłączony przetwornik. Ponieważ zastosowana



Rys. 3. Fotografia zastosowanych przetworników do pomiaru prądów i napięć

DIAGNOSTYKA





Rys. 4. Schemat ideowy obwodu zasilania przetworników w standardzie IEPE



Rys. 5. Fotografia prototypu bezprzewodowego modułu pomiarowego

karta pomiarowa nie posiadała obwodów zasilania akcelerometrów, niezbędne było zastosowanie specjalnego układu dopasowującego, zbudowanego według schematu przedstawionego na rysunku 4 [4].

Prototyp modułu pomiarowego został wyposażony w cztery kanały wejściowe z interfejsem IEPE. Taka konfiguracja umożliwia podłączenie czterech niezależnych akcelerometrów piezoelektrycznych albo zastosowanie wieloosiowych czujników drgań.

#### 4. Przykładowa realizacja systemu diagnostycznego do wykrywania uszkodzeń wirnika

Przedstawiony system pomiarowy umożliwia zdalną rejestrację oraz analizę w czasie rzeczywistym sygnałów prądów fazowych, napięć międzyfazowych i drgań badanego silnika. Na podstawie analizy tych sygnałów możliwe jest rozpoznanie różnych uszkodzeń silnika, natury elektrycznej i mechanicznej. W diagnostyce eksploatacyjnej silników indukcyjnych najczęściej stosowane są metody analizy częstotliwościowej przebiegów prądów fazowych oraz przyspieszenia drgań, które polegają na ekstrakcji charakterystycznych składowych spektralnych, pojawiających się w widmach mierzonych sygnałów pod wpływem uszkodzenia.

Analiza częstotliwościowa prądów stojana jest znaną i powszechnie stosowaną metodą diagnostyczną, która umożliwia wykrycie:

- asymetrii elektrycznej i magnetycznej wirnika;
- asymetrii elektrycznej uzwojeń stojana;
- asymetrii napięć zasilających;
- uszkodzeń w łożyskach [1].

Przykładowo: przerwane pręty wirnika skutkują pojawieniem się prązków o częstotliwościach  $f_{sk1}$  i  $f_{sk2}$ , których wartości można wyznaczyć na podstawie poniższej zależności [2]:

$$f_{sk1} = (1 \pm 2ks)f_s \quad (1)$$

gdzie:

$f_s$  – harmoniczna podstawowa prądu stojana;

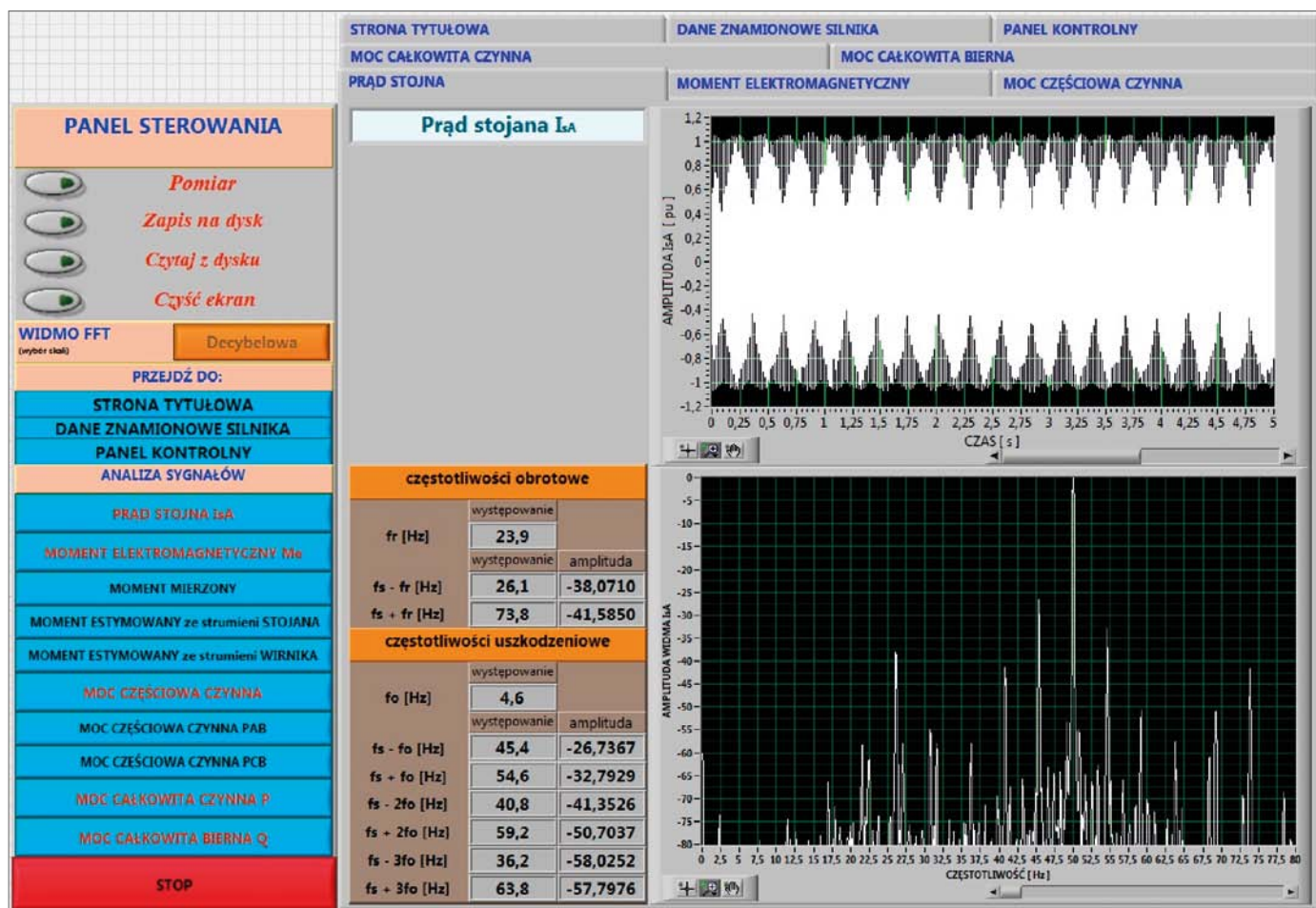
$s$  – poślizg,  $k = 1, 2, 3, \dots$

Prototyp modułu pomiarowego został przetestowany w warunkach rzeczywistych, na stanowisku laboratoryjnym z uszkodzonym silnikiem indukcyjnym. W tym celu zarejestrowano przebiegi prądów fazowych badanego silnika, których próbki zostały w czasie rzeczywistym przesłane za pomocą bezprzewodowej sieci Wi-Fi do komputera PC, oddalonego o ok. 10 metrów. Na komputerze uruchomiono wirtualny przyrząd diagnostyczny, opracowany w środowisku LabView, który umożliwia m.in. analizę sygnałów prądów fazowych silnika pod kątem wykrywania uszkodzeń wirnika [6]. Na rysunku 6 przedstawiono zrzut ekranu aplikacji analizatora diagnostycznego, na którym widać okno z narzędziami do analizy częstotliwościowej prądu. Program wykreśla przebieg czasowy oraz widmo sygnału prądu stojana, zarejestrowanego dla silnika z uszkodzonym wirnikiem. Na podstawie analizy fourierowskiej zostały automatycznie wyznaczone amplitudy poszczególnych składowych poślizgowych  $f_{sk1}$  i  $f_{sk2}$  (1) dla współczynnika  $k = 1, 2$  i  $3$ .

#### 5. Podsumowanie

Przedstawiony w artykule rozproszony system pomiarowy może być wykorzystany w roli kompleksowego systemu monitorującego pracę przemysłowych napędów elektrycznych, stanowiących wyposażenie zautomatyzowanych linii produkcyjnych. Topologia połączeń systemu pomiarowego jest bardzo elastyczna i w pełni konfigurowalna przez użytkownika. Sprzętową część systemu stanowią autonomiczne moduły pomiarowe, które umożliwiają zarejestrowanie przebiegów napięć, prądów i drgań monitorowanych napędów oraz przesłanie ich w czasie rzeczywistym do głównego komputera diagnostycznego, przy wykorzystaniu przewodowych lub bezprzewodowych interfejsów komunikacyjnych. Wybór bezprzewodowych modułów pomiarowych pozwala na zdalną diagnostykę urządzeń, zainstalowanych w niekorzystnych warunkach środowiskowych, gdzie tradycyjne okablowanie jest utrudnione.

Wykonany prototyp modułu pomiarowego został przetestowany na rzeczywistym stanowisku laboratoryjnym podczas badań eksperymentalnych silnika indukcyjnego z zamodelowanym uszkodzeniem wirnika. Na podstawie badań stwierdzono, że wszystkie podzespoły funkcjonalne układu pomiarowego pracują poprawnie i nie występują żadne zakłócenia ani opóźnienia podczas bezprzewodowej transmisji strumienia danych. W roli aplikacji testującej na komputerze PC wykorzystano opracowaną wcześniej w środowisku LabView prosty wirtualny przyrząd



Rys. 6. Zrzut ekranu wirtualnego analizatora uszkodzeń wirnika silnika indukcyjnego

diagnostyczny, który bezbłędnie rozpoznawał rodzaj i stopień uszkodzenia wirnika badanego silnika.

Zastosowanie otwartego środowiska projektowego LabView oferuje niemalże nieograniczone możliwości wykorzystania zaawansowanych metod przetwarzania sygnałów pomiarowych, co umożliwi realizację złożonych, innowacyjnych algorytmów diagnostycznych. W zależności od wymagań użytkownika oprogramowanie monitorujące może być wykonane w formie systemu typu SCADA, oferując bogate funkcje, do których zaliczyć można m.in.:

- wizualizację graficzną procesu technologicznego;
- archiwizację danych pomiarowych;
- monitorowanie stanu technicznego urządzeń;
- alarmowanie i ostrzeganie o sytuacjach awaryjnych;
- tworzenie zestawień, raportów i analiz danych.

## 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, pp. 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), no. 1, 107–121.

- [3] NANDI S., TOLIYAT H.A., XIAODONG LI: *Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors – a review*. IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 20, pp. 719–729, no. 4, 2005.
- [4] PAWLAK M.: *Zdalny system pomiarowy do monitorowania i diagnostyki napędów elektrycznych w oczyszczalni ścieków*. „Przeгляд Elektrotechniczny”. 2/2010, R. 86, s. 329–334.
- [5] PAWLAK M., ŻARCZYŃSKI Z.: *Przenośny system pomiarowy do diagnostyki silników indukcyjnych*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. „Studia i Materiały”. 28/2008, s. 528–535.
- [6] WÓLKIEWICZ M.: *Analiza możliwości zastosowania sygnałów mocy chwilowej i momentu elektromagnetycznego do diagnostyki silników indukcyjnych*. Praca magisterska, Politechnika Wrocławska 2007.

Praca naukowa finansowana ze środków Narodowego Centrum Nauki w ramach projektu N N510 637 740.

dr inż. Marcin Pawlak, e-mail: marcin.pawlak@pwr.wroc.pl;  
mgr inż. Zdzisław Żarczyński,  
e-mail: zdzislaw.zarczynski@pwr.wroc.pl.  
Politechnika Wrocławska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych