

Telemetria w diagnostyce silników asynchronicznych

Adam Decner

1. Wstęp

Badania diagnostyczne maszyn elektrycznych są elementem poprawiającym bezpieczeństwo eksploatacji tych urządzeń w długim okresie czasu. Pozwalają na racjonalne planowanie przeglądów i remontów oraz ich zakresu. Koszty nieuzasadnionej wymiany silnika dobrego na nowy bądź jego remont z wymianą uzwojenia, gdy jest ono dobre, wielokrotnie przewyższają koszty badań diagnostycznych.

Z drugiej strony w przypadku awarii maszyny elektrycznej w czasie eksploatacji występują straty produkcyjne, które zwykle są wielokrotnie wyższe od ceny maszyny. Uzasadnia to prowadzenie monitoringu maszyn, w szczególności tych, które nie mają zainstalowanej rezerwy na stanowisku pracy: generatory w elektrowniach, maszyny wyciągowe w kopalniach, silniki walcownicze w hutach i inne.

Problem diagnostyki i monitoringu maszyn elektrycznych koncentruje się na ocenie stanu technicznego obwodu elektromagnetycznego i układu mechanicznego. Opracowanie algorytmu pozyskiwania informacji dotyczących stanu technicznego maszyny i transmisja tych danych do ośrodka monitorującego umożliwi bieżący zdalny nadzór nad sprawnością techniczną monitorowanych maszyn i pozwoli dostatecznie wcześniej zarejestrować ostrzeżenie o pogarszaniu się parametrów diagnostycznych maszyny.

2. Parametry diagnostyczne do celów monitoringu – przykłady

Celem jest pozyskiwanie informacji o pracy maszyny i selekcjonowanie z tych danych informacji o stanie technicznym maszyny. Ze statystyki uszkodzeń maszyn elektrycznych [10] wynika, iż w silnikach indukcyjnych awarie powodowane są przez uszkodzenie:

- łożysk – około 40%;
- uzwojenia stojana – około 35%;
- wirnika – około 10%;
- inne uszkodzenia – około 15%.

Zatem diagnostykę należy skoncentrować na pierwszych trzech zagadnieniach.

Wszystkie „wskaźniki diagnostyczne” można zbudować, bazując na analizie prądu stojana. Prąd silnika jest parametrem, który można łatwo zarejestrować i przetworzyć. Istnieje szereg publikacji, w których autorzy prezentują metody analizy prądu w celu określenia uszkodzenia poszczególnych elementów maszyny elektrycznej [1, 2, 5, 6, 8, 9, 10, 11].

Na podstawie analizy prądu stojana możliwe jest określenie następujących informacji diagnostycznych:

Streszczenie: Aby poprawić niezawodność działania maszyn elektrycznych w długim okresie eksploatacji, należy systematycznie przeprowadzać testy diagnostyczne. Uzasadnia to monitorowanie maszyn, zwłaszcza tych, które nie mają rezerwy w miejscu pracy: agregatów prądotwórczych, maszyn wyciągowych w kopalniach itp. Problem monitorowania i diagnostyki maszyn elektrycznych koncentruje się na ocenie stanu technicznego układu mechanicznego i obwodu elektromagnetycznego.

W artykule opisano cele zdalnego monitorowania i diagnostyki stanu technicznego maszyn elektrycznych. Opisano również urządzenia stosowane przez pracowników Laboratorium Instytutu Komel do monitorowania i diagnozowania maszyn elektrycznych oraz wyniki badań przeprowadzonych na maszynach elektrycznych w różnych stanach technicznych.

Do monitorowania wykorzystuje się sieć GSM z transmisją danych. Sygnały diagnostyczne i infrastruktura techniczna do przesyłania danych pomiarowych jest również opisana w artykule.

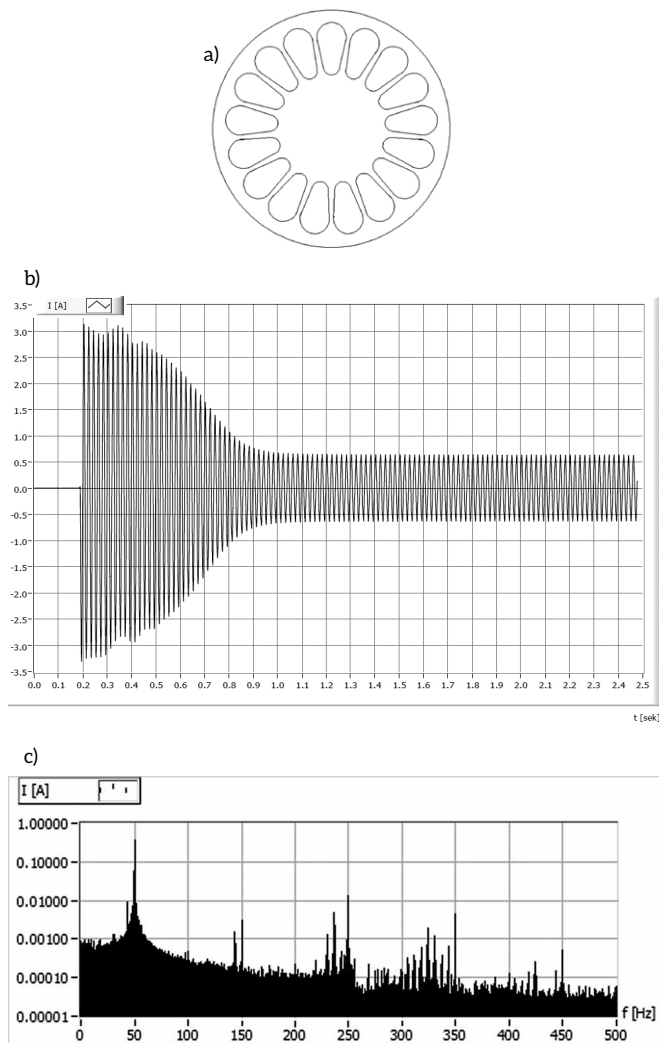
Słowa kluczowe: pomiar prądu, systemy danych, maszyny elektryczne, telemetria, pomiar drgań

Abstract: To improve operational reliability of electrical machines over a long period of time, the diagnostic tests should be performed systematically. This justifies the monitoring of machines, particularly those which do not have the reserve at the workplace: the power generators, hoisting machines in mines, etc. The issue of monitoring and diagnostics of electrical machines is focused on assessing the technical condition of the mechanical system and the electromagnetic circuit.

In this article, the objectives of remote monitoring and diagnostics of technical condition of electrical machines are described. Devices used by staff of Laboratory of Komel to monitor and diagnose electrical machines, results of tests performed on electrical machines in different technical condition are also described.

In order to run monitoring, GSM network is used. Diagnostic signals and technical infrastructure for the transmission of measurement data are described in the article.

- przerwa w uzwojeniu stojana, brak styku na zaciskach;
- uszkodzenia klatki wirnika;
- uszkodzenie elementów łożyska;
- ekscentryczność statyczna;



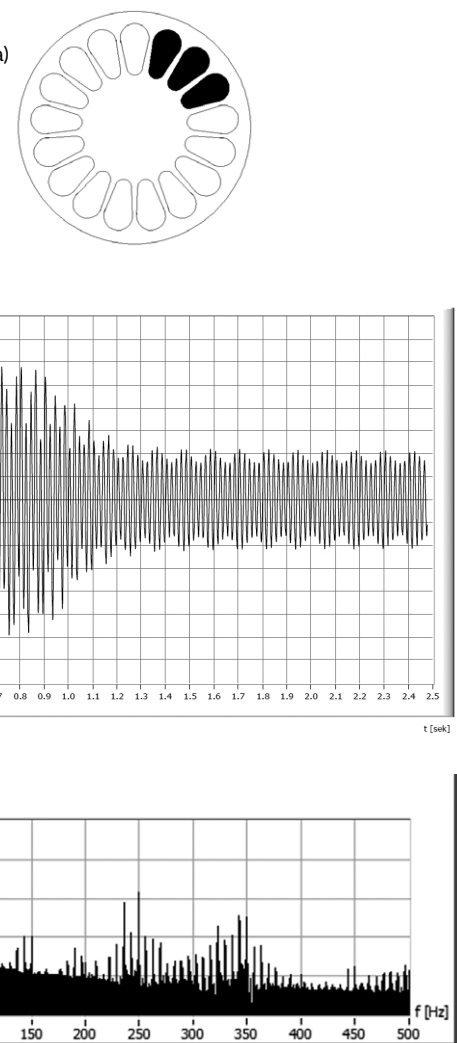
Rys. 1. Wirnik o nieuszkodzonych prętach (a), zarejestrowany przebieg prądu stojana (b) podczas rozruchu na biegu jałowym oraz analiza częstotliwościowa prądu biegu jałowego (c)

- ekscentryczność dynamiczna;
- asymetria zasilania;
- zwarcia międzyzwojowe w stojanie.

Informacje o stanie technicznym łożysk można pozyskiwać z pomiarów: drgań, z pomiaru temperatury oraz z analizy prądu maszyny. Pogarszający się stan techniczny łożysk generuje drgania o powiększającej się amplitudzie. Dokładna analiza przebiegów czasowych prądu stojana i poznanie zależności między drganiami a tymi przebiegami pozwalają zidentyfikować sygnał informujący online o stanie technicznym łożysk maszyny elektrycznej.

Stan techniczny klatki wirnika najtrafniej jest oceniać z analizy prądu rozruchowego [2, 3, 8]. W sygnałach prądów fazowych silnika indukcyjnego zawarte są informacje diagnostyczne wynikające z asymetrii elektrycznej i magnetycznej obwodów stojana i wirnika. Informacje te widoczne są w widmie prądu fazowego.

W przypadku uszkodzenia prętów klatki wirnika w widmie prądu fazowego pojawiają się składowe opisane następującą zależnością:



Rys. 2. Wirnik o uszkodzonych trzech sąsiadujących prętach (a), zarejestrowany przebieg prądu stojana (b) podczas rozruchu na biegu jałowym oraz analiza częstotliwościowa prądu biegu jałowego (c)

$$f_{br} = (1 \pm 2 \cdot s) \cdot f_s \quad (1)$$

gdzie:

f_s – częstotliwość prądu stojana,

s – poślizg.

Na rysunku 1 przedstawiono przekrój wirnika silnika asynchronicznego o nieuszkodzonych prętach, przebieg prądu rozruchowego i analizę częstotliwościową prądu biegu jałowego.

Na rysunku 2 przedstawiono przekrój wirnika silnika asynchronicznego o uszkodzonych trzech sąsiadujących prętach, przebieg prądu rozruchowego i analizę częstotliwościową prądu biegu jałowego.

Na rysunku 3 przedstawiono poglądowo analizę prądu stojana z charakterystycznymi częstotliwościami ujawniającymi się w przypadku asymetrii uzwojenia wirnika.

Na rysunku 4 przedstawiono testowany silnik wraz z wirnikami oraz fragment przekroju wirnika.

Poddając analizie prąd pobierany przez silnik, można w widmie prądu odnaleźć składowe opisane wzorem (1), charakteryzujące stopień uszkodzenia klatki wirnika. Znaną są przyrządy diagnostyczne, określające stopień uszkodzenia klatki wirnika na podstawie analizy prądu rozruchowego.

Innym stanem niepoprawnej pracy silnika jest ekscentryczność. Jest to stan maszyny, w którym szczelina powietrzna pomiędzy stojanem a wirnikiem jest nierówna. Niewspółosiowe usytuowanie wirnika silnika indukcyjnego względem stojana wprowadza asymetrię szczeliny powietrznej.

Rozróżnia się trzy rodzaje ekscentryczności [4]:

- statyczna;
- dynamiczna;
- mieszana.

Ekscentryczność statyczna występuje wtedy, gdy położenie minimalnej szczeliny powietrznej jest stałe względem stojana.

Ekscentryczność dynamiczna występuje wtedy, gdy środek wirnika nie jest środkiem wirowania i położenie minimalnej szczeliny powietrznej przemieszcza się po obwodzie stojana.

Najczęściej spotykanym przypadkiem jest jednocześnie występowanie zarówno ekscentryczności statycznej, jak i dynamicznej, czyli tzw. ekscentryczność mieszana [4].

Asymetria ta w wyniku wzajemnego oddziaływania pomiędzy uzwojeniami stojana i wirnika wpływa na kształt prądu stojana.

Dla silników indukcyjnych charakterystyczne częstotliwości można opisać równaniami [4]:

- dla ekscentryczności statycznej

$$f_{es} = f_s \cdot \left(1 \pm k \cdot N_r \cdot \frac{1-s}{p} \right) \quad (2)$$

- dla ekscentryczności dynamicznej

$$f_{ed} = f_s \cdot \left(1 \pm k \cdot \frac{1-s}{p} \right) \quad (3)$$

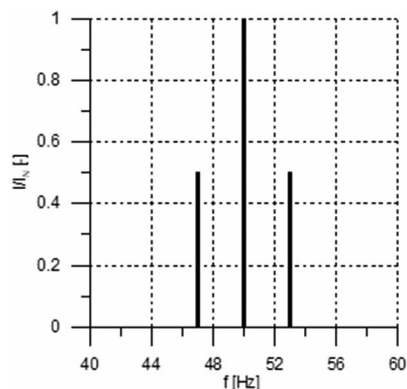
- dla ekscentryczności mieszanej

$$f_e = f_s \cdot \left[\left(k \cdot N_r \pm n_d \right) \cdot \frac{1-s}{p} \pm n_w \right] \quad (4)$$

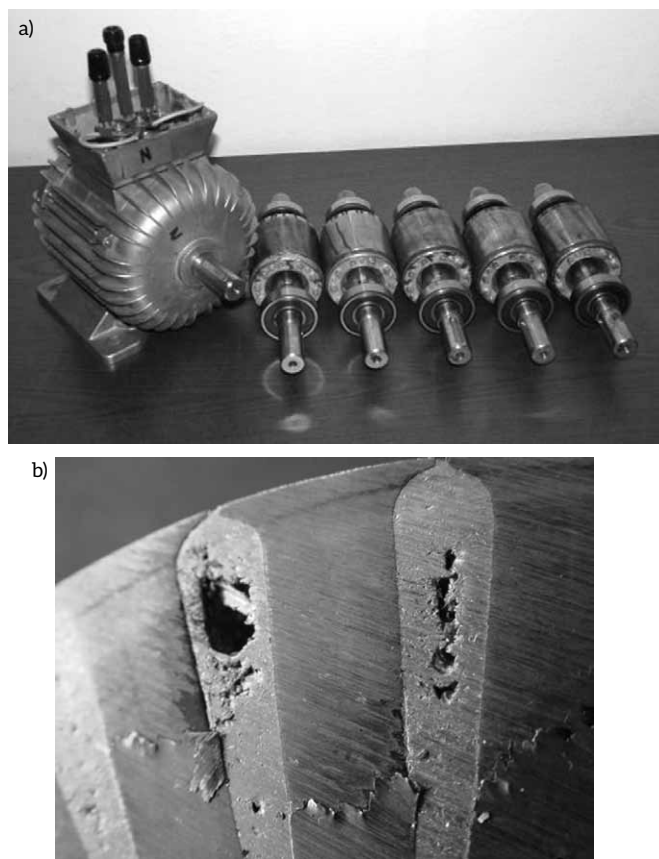
We wzorach 2, 3, 4 oznaczono: f_s – częstotliwość prądu stojana; s – poślizgi; p – liczba par biegunów; $k = 1, 2, 3, \dots$; N_r – liczba żłobków wirnika; $n_d = 1, 2, 3, 4, \dots$, $n_w = 1, 3, 5, 7, \dots$

Prace badawcze prowadzone w ramach projektu powinny stworzyć i zweryfikować kompleksową metodę bieżącej oceny stanu technicznego monitorowanej maszyny.

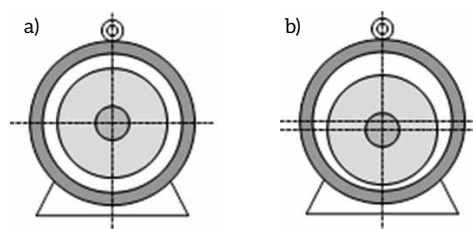
Celem jest opracowanie metody i algorytmu przesyłania pakietu danych pomiarowych oraz informacji o zdarzeniach występujących na monitorowanej maszynie do bazy danych komputera osoby lub instytucji odpowiedzialnej za monitorowanie stanu technicznego maszyny. Zdarzenia, które są istotne



Rys. 3. Harmoniczne prądu stojana podczas pracy z uszkodzoną klatką wirnika



Rys. 4. Testowany silnik wraz z wirnikami (a) oraz fragment przekroju wirnika (b)



Rys. 5. Ustawienie wirnika centryczne (a) i ekscentryczne (b)

z punktu widzenia danych pomiarowych, to: rozruchy, stopniowy lub nagły wzrost „wskaźników diagnostycznych”, przekroczenie wartości alarmowych itp.

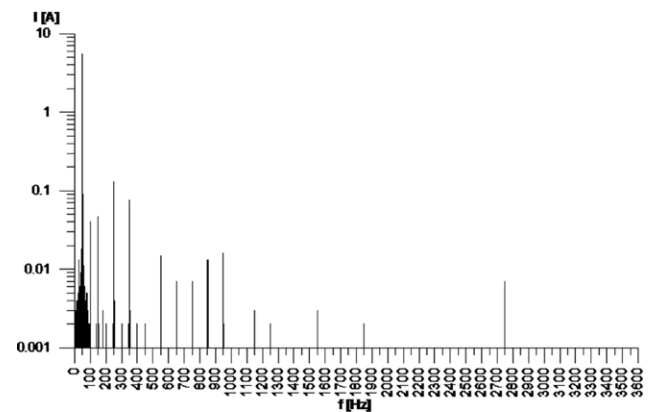
3. Symulacja uszkodzenia łożysk oraz wpływ uszkodzenia na drgania maszyny

Symulacja została przeprowadzona dla łożysk: nowych (rys. 6, 7, 8, 9), z małą ilością smaru, z różną ilością zabrudzeń (rys. 10, 11, 12, 13) oraz kilku przypadków niewyważenia (rys. 14, 15, 16, 17). Wyniki pomiarów prezentowane są dla pomiarów wykonanych od strony przeciwnapędowej.

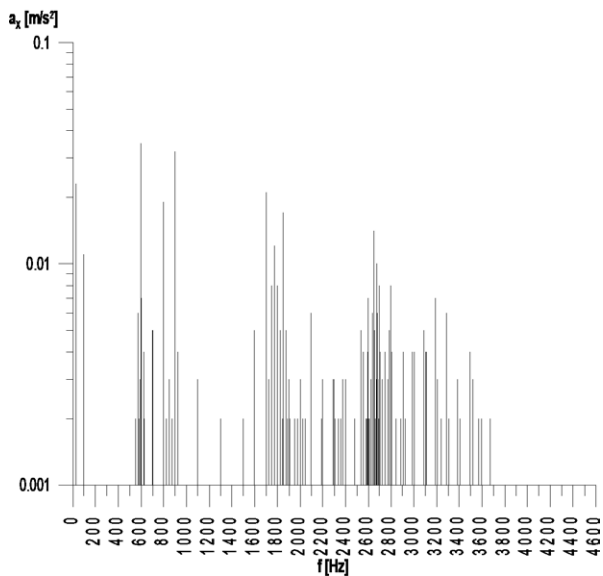
A. Nowe łożysko (rys. 6–9).

B. Średnio zabrudzone łożysko (rys. 10–13).

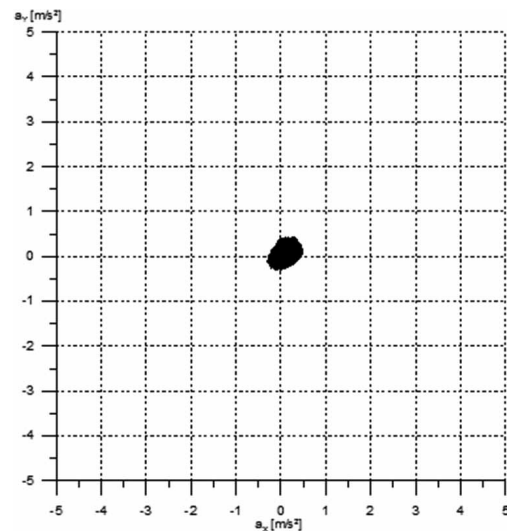
C. Niewywaga (rys. 14–17).



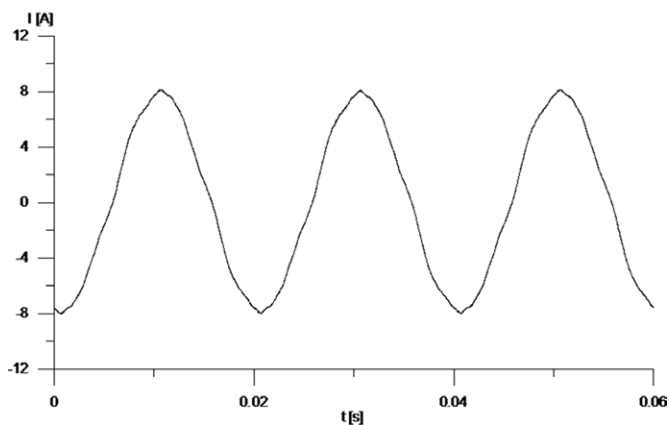
Rys. 8. Analiza częstotliwościowa prądu stojana - 1 harmoniczna 50,01 Hz, I = 5,55 A



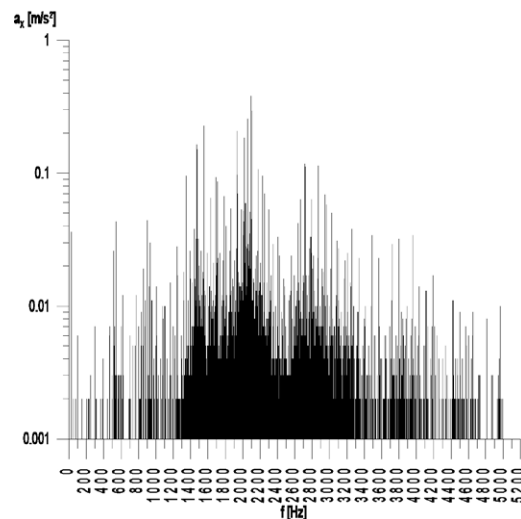
Rys. 6. Analiza częstotliwościowa przyspieszenia drgań - pomiar w osi „X” - 1 harmoniczna: 599,31 Hz (0,047 m/s²)



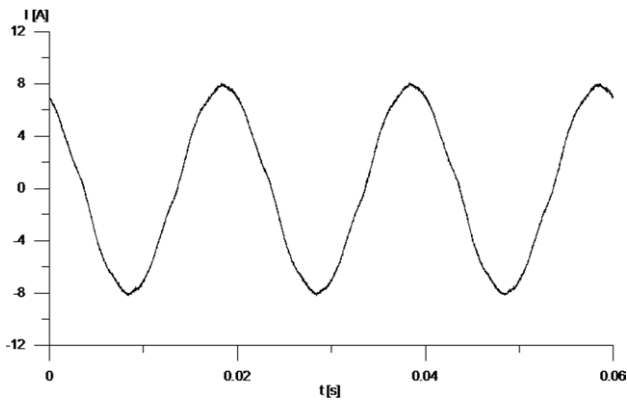
Rys. 9. Wykres przyspieszenia drgań $a_y = f(a_x)$



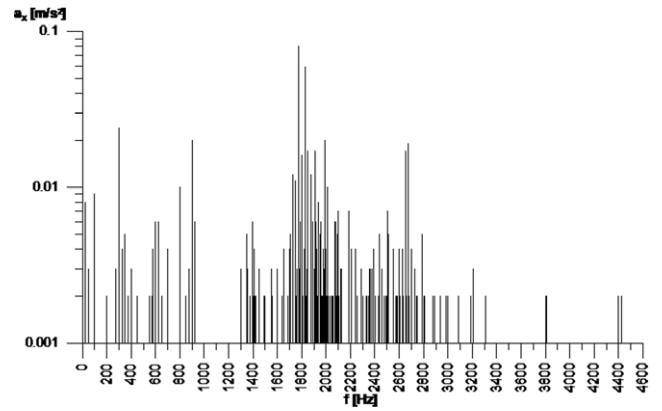
Rys. 7. Przebieg czasowy prądu silnika $I_{RMS} = 5,55$ A; $THD_1 = 3,07\%$



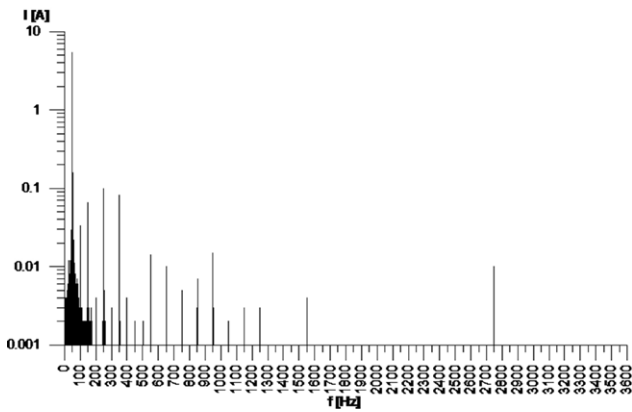
Rys. 10. Analiza częstotliwościowa przyspieszenia drgań - pomiar w osi „X” - 1 harmoniczna - 2095,2 Hz (0,38 m/s²)



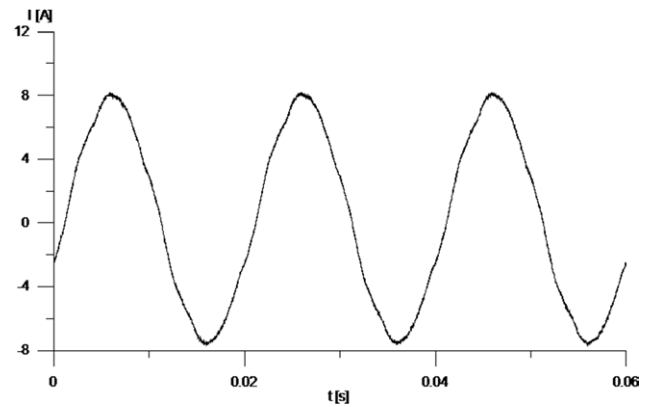
Rys. 11. Przebieg czasowy prądu silnika $I_{RMS} = 5,56$ A; $THD_I = 3,36\%$



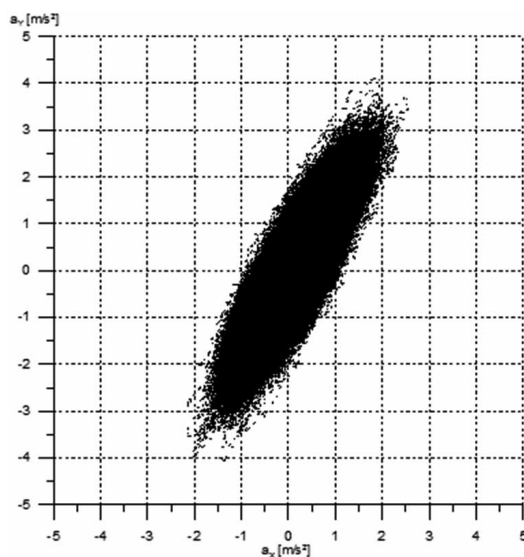
Rys. 14. Analiza częstotliwościowa przyspieszenia drgań - pomiar w osi "X" - 1 harmoniczna - 1775,06 Hz (0,09m/s²)



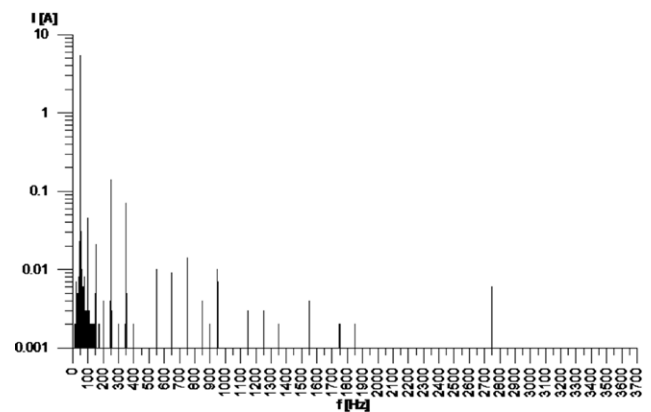
Rys. 12. Analiza częstotliwościowa prądu stojana - 1 harmoniczna 50,02 Hz, $I = 5,55$ A



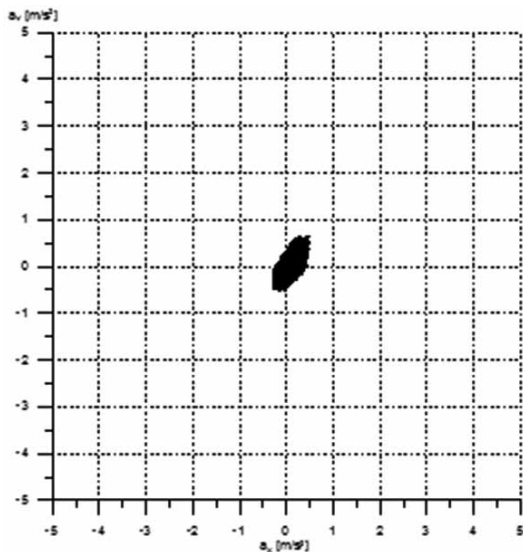
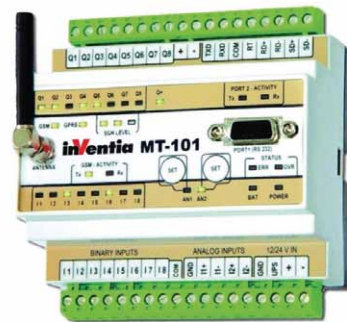
Rys. 15. Przebieg czasowy prądu silnika $I_{RMS} = 5,40$ A; $THD_I = 3,67\%$



Rys. 13. Wykres przyspieszenia drgań $a_y = f(a_x)$



Rys. 16. Analiza częstotliwościowa prądu stojana - 1 harmoniczna 50,01 Hz, $I = 5,39$ A

Rys. 17. Wykres przyspieszenia drgań $a_y = f(a_x)$ 

Rys. 18. Moduł telemetryczny

4. System telemetryczny

Dynamiczny rozwój sieci telefonii komórkowych i ich cyfrowej transmisji sygnałów, poprzez wprowadzenie przez operatorów GSM możliwości transmisji danych w standardzie GPRS (*General Packet Radio Services*) oraz coraz częściej rozpowszechnianymi technologiami EDGE (*Enhanced Data Rates for GSM Evolution*), UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*), HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*), przyczynił się do powstania łatwo osiągalnych możliwości sprzyjających rozbudowie systemów pomiarowych. Aby system zdalnego monitoringu działał zgodnie z założonymi wymaganiami, niezbędne jest odpowiednie wyposażenie umożliwiające logowanie się i transmisję danych do sieci GSM. Urządzeniami takimi są np. moduły telemetryczne (rys. 18).

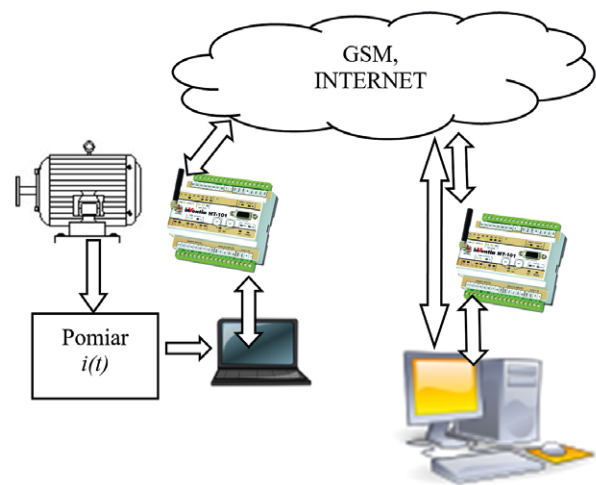
Aby moduł telemetryczny funkcjonował poprawnie, konieczne jest umieszczenie w nim odpowiednio skonfigurowanej karty SIM dostarczonej przez operatora GSM, który oferuje usługi w zakresie transmisji danych [12].

Poza możliwością pracy w trybie GPRS konieczne jest również skonfigurowanie posiadanej karty w APN (*Access Point Name*) w celu otrzymania statycznego adresu IP. Przypisany do karty adres IP umożliwia transmisję do innych modułów telemetrycznych oraz serwerów pracujących w tym samym APN.

Warunkiem bezwzględnie koniecznym do prawidłowej pracy systemu pomiarowego jest wystarczająca siła sygnału GSM w miejscu umieszczenia anteny modułu telemetrycznego. Używanie modułu w miejscach o bardzo słabym sygnale może prowadzić do zrywania transmisji oraz w skrajnych przypadkach do utraty danych, a także do powstawania dodatkowych kosztów.

Technologia GSM/GPRS wydaje się idealną technologią dla systemów monitoringu i telemetrii. Do jej zalet można zaliczyć:

- możliwość korzystania z istniejącej struktury sieci transmisyjnej;



Rys. 19. Schemat telemetrycznego systemu pomiarowego

- duży zasięg sieci;
- niskie koszty budowy i eksploatacji systemu;
- brak konieczności stosowania specjalnych anten;
- możliwość tworzenia systemów sieciowych;
- pełna ochrona dostępu;
- koszt utrzymania struktury umożliwiającej transmisję przeniesiony na operatora;
- duża dostępność różnorodnych terminali nadawczych i odbiorczych;
- opłata za rzeczywistą ilość przesłanych danych.

Jeśli chcemy poprawnie i z najwyższą starannością, a przy tym z dużą szybkością i łatwością odebrać i wyświetlić dane pomiarowe w celu dalszej analizy, urządzenie przeznaczone do wykonania zadania pomiarowego musi spełniać pewne uniwersalne wymagania:

- montaż na szynie DIN;
- zasilanie akumulatorowe + zewnętrzny zasilacz;
- zegar czasu rzeczywistego;
- co najmniej 2 kanały wejściowe z możliwością zmiany zakresu pomiarowego;
- zakres napięć wejściowych ± 10 V;
- możliwość analizy FFT do 1 kHz;
- częstotliwość próbkowania co najmniej 10 kHz/kanał;
- zapis do pamięci zewnętrznej typu flash;

- możliwość definiowania co i w jakich sytuacjach ma być zapisywane (wartości chwilowe przebiegu, analiza FFT, wartości skuteczne lub średnie);
- zapis na kartę ma następować po przekroczeniu przez mierzony sygnał wartości progowej ze zdefiniowanym przez użytkownika czasem zarówno przed wystąpieniem zdarzenia, jak i po jego wystąpieniu;
- komunikacja z PC (USB lub Ethernet);
- wysyłanie SMS na zdefiniowany numer z informacją dotyczącą wystąpienia zdarzenia;
- wysyłanie zarejestrowanych plików przez Internet na adres e-mail.

Wiele sprzedawanych na rynku urządzeń telemetrycznych spełnia jedynie część z postawionych wymagań ze względu na bardzo szeroki zakres czynności, jakie dane urządzenie musi wykonać. W celu przybliżenia zasady działania oraz części składowych urządzenia na rysunku 20 przedstawiony jest schemat blokowy urządzenia rejestrującego. Sercem całego układu jest procesor sygnałowy (DSP). Jest to wyspecjalizowany układ do obróbki sygnałów cyfrowych. W jednym układzie zawarte są:

- układ kontroli;
- jednostka arytmetyczno-logiczna;
- pamięć ROM i RAM;
- układy wyjściowe.

Dlaczego procesor sygnałowy?

Tego typu procesory posiadają cechy, które nie są spotykane w innych rodzajach procesorów [7]:

- rozdzielona pamięć programu i danych;
- filtry sygnałów pomiarowych, transformacja Fouriera;
- potokowe przetwarzanie instrukcji.

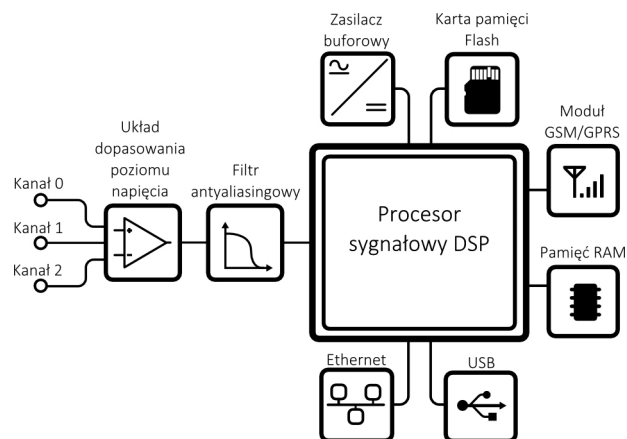
Na rysunku 20 przedstawiono schemat blokowy urządzenia spełniającego wszystkie założenia (dotyczące pomiarów i przetwarzania danych).

5. Opis urządzenia rejestrującego

Urządzenie rejestrujące wyposażone jest w szereg funkcji pozwalających na wykonanie pomiaru, rejestrację, zapamiętanie wyników oraz poinformowanie laboratorium badawczego o istniejącej sytuacji na obiekcie badań. Oprogramowanie tego analizatora pozwala na ustawienie kilku wartości progowych sygnałów na wejściach do urządzenia. Po przekroczeniu nastawionego progu może wykonać następujące czynności:

- zapisać informacje o wystąpieniu zdarzenia na karcie pamięci;
- zapisać przebieg na karcie pamięci – również ze zdefiniowanym czasem przed wystąpieniem zdarzenia;
- poinformować zespół badawczy poprzez krótką wiadomość tekstową (SMS);
- poinformować zespół badawczy poprzez wiadomość e-mail;
- przesłać na żądanie zarejestrowane wyniki.

Konfigurowalność urządzenia jest duża (zmiana zakresów pomiarowych, zmiana progów zadziałania, zmiana częstotliwości próbkowania, zmiana definicji wyznaczania wartości przebiegów itd.) i możliwa do przeprowadzenia poprzez aplikację pracującą na komputerze klasy PC. Żądanie wygenerowania raportu o stanie urządzenia oraz obiektu badanego można przesłać za pomocą odpowiednio sformatowanej wiadomości SMS.



Rys. 20. Schemat blokowy urządzenia do rejestracji, przetwarzania i przesyłu wyników pomiarów

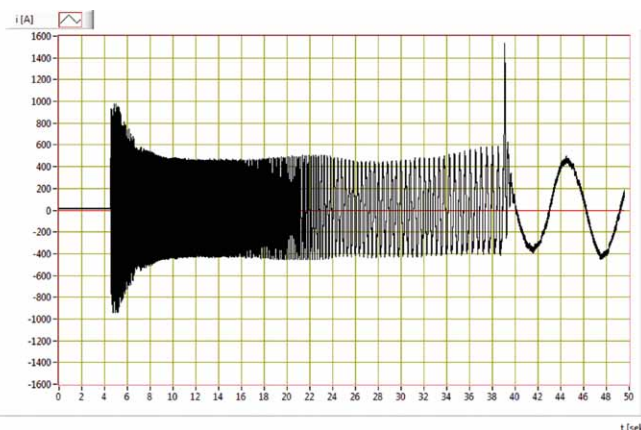
Wszystkie powyższe cechy dają użytkownikowi możliwości zdalnego kontrolowania zarówno urządzenia pomiarowego, jak i samych pomiarów.

Wygląd modułu telemetrycznego przedstawiono na rysunku 21.

Moduł telemetryczny, jaki przedstawiono na rysunku 21, może być używany do ciągłego monitorowania najważniejszych napędów. Dla przykładu rejestrator ten został użyty do rejestracji parametrów pracy oraz prądów płynących w uzwojeniu wirnika silnika o mocy znamionowej 2000 kW i napięciu zasilania 6 kV. Przebieg zarejestrowanego prądu przedstawiono na rysunku 22.



Rys. 21. Wygląd modułu telemetrycznego



Rys. 22. Prąd rozruchowy wirnika silnika 2000 kW

6. Inne przykłady urządzeń telemetrycznych do badania maszyn elektrycznych

Systemy telemetryczne umożliwiają równie proste wykonywanie pomiarów momentu mechanicznego na wirującym wale silnika elektrycznego lub spalinowego – w czasie jego normalnej eksploatacji. Energia do zasilania systemu może być dostarczana w sposób bezkontaktowy, wykorzystując zjawisko indukcji elektromagnetycznej lub z baterii. Sygnał pomiarowy przekazywany jest z systemu również w sposób bezkontaktowy do głowicy pomiarowej [13]. System taki jest prosty w obsłudze i niezbyt skomplikowany w montażu. Kompletny system, zamontowany na wale maszyny, został przedstawiony na rysunku 23, a zarejestrowany za jego pomocą moment przedstawiono na rysunku 24.



Rys. 23. System telemetryczny do pomiaru momentu na wale maszyny

7. Podsumowanie

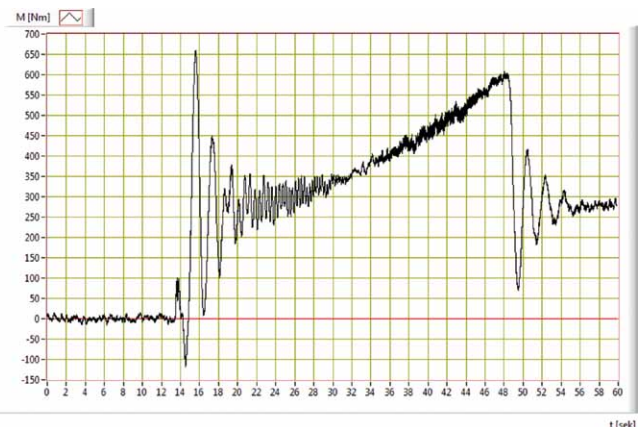
Opracowanie metody, która pozwoli na ocenę online stanu technicznego w oparciu o pomiar i analizę parametrów pracy, daje gwarancję niezawodnej eksploatacji maszyny elektrycznej. Szereg publikacji [3, 8, 9, 11] wskazuje, że informacje o stanie technicznym maszyn elektrycznych (synchronicznych, indukcyjnych, prądu stałego) są zakodowane w przebiegach prądu i napięcia, należy je pozyskać, przetworzyć i przesłać do centrali monitoringu.

Dzięki zastosowaniu łączności przez sieć Internet lub GSM realizowane systemy będą posiadały następujące zalety:

- zdalna kontrola systemu i obserwacja wyników przy niewielkich nakładach czasowych oraz finansowych na przygotowanie systemu;
- możliwość uzupełniania parametrów pomiarowych pozyskiwanych z czujników;
- powiadamianie służb odpowiedzialnych za eksploatację maszyn o pojawiających się sytuacjach alarmowych;
- możliwość obserwacji wyników pomiarowych równolegle przez wiele osób.

Literatura

- [1] DRAK B., ZIENTEK P.: *Uszkodzenia łożysk tocznych silników indukcyjnych dużej mocy*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne”, 64/2002, BOBRME Komel.
- [2] GLINKA T.: *Badania diagnostyczne maszyn elektrycznych w przemyśle*. Wyd. BOBRME Komel, Katowice 2002.
- [3] KLIMAN G., KOEGL R., STEIN J., ENDICOTT R., MADDEN M.: *Noninvasive detection of broken rotor bars in operating induction motors*. IEEE Trans. on Energy Conv. vol. 3, no. 4, 1988.
- [4] KOWALSKI CZ., EWERT P.: *Zastosowanie analizy widmowej prądu stojana do monitorowania ekscentryczności silników indukcyjnych*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn i Napędów Elektrycznych Nr 60 Politechniki Wrocławskiej, Studia i Materiały Nr 27/2007.
- [5] KOWALSKI CZ.: *Mikrokomputerowy system monitorowania i diagnostyki napędów elektrycznych z silnikami indukcyjnymi*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn i Napędów Elektrycznych Nr 44 Politechniki Wrocławskiej, Studia i Materiały Nr 19/1996.
- [6] KOWALSKI CZ.: *Stan obecny i tendencje rozwojowe metod monitorowania i diagnostyki napędów z silnikami indukcyjnymi*. „Wiadomości Elektrotechniczne” 4/2003.



Rys. 24. Przebieg momentu podczas rozruchu

- [7] ŁOBACZ J., FYK M.: *Przegląd komputerowych systemów diagnostycznych*. „Energetyka” 8/2003.
- [8] PAWLAK M., ŻARCZYŃSKI Z.: *Przenośny system pomiarowy do diagnostyki silników indukcyjnych*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Nr 62 Politechniki Wrocławskiej, Studia i Materiały Nr 28/2008.
- [9] RAD M.: *Automatyczna diagnostyka klatki wirnika na podstawie prądu rozruchu silnika indukcyjnego*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne”, 79/2008, BOBRME Komel.
- [10] SUŁOWICZ M.: *Diagnostyka silników indukcyjnych metodami sztucznej inteligencji*. Rozprawa doktorska, Instytut Elektrotechniki w Warszawie, Samodzielna Pracownia Diagnostyki Układów Elektromechanicznych w Krakowie, Kraków 2005.
- [11] SZYMANIEC S.: *Diagnostyka stanu izolacji uzwojeń i stanu łożysk silników indukcyjnych klatkowych w warunkach przemysłowej eksploatacji*. Studia i Monografie z. 193, Wyd. Politechniki Opolskiej, Opole 2006.
- [12] Instrukcja obsługi modułu telemetrycznego MT-101.
- [13] Instrukcja obsługi modułu telemetrycznego TEL1-PCM-BATT.

Adam Decner
Łukasiewicz – KOMEL

artykuł recenzowany