

System pomiarowo-diagnostyczny do bezinwazyjnej diagnostyki stanu wirnika i wyznaczania parametrów pracy silników indukcyjnych

Maciej Sułowicz, Arkadiusz Duda, Janusz Petryna, Krzysztof Guziec

1. Wstęp

Ocena stanu maszyn i urządzeń elektrycznych na stanowisku pracy powinna być jak najprostsza i w pełni bezinwazyjna. Aby tym wymaganiom sprostać, należy posiadać odpowiednie narzędzia i przyrządy pomiarowe, które to umożliwią.

Jedną z metod pomiarowych, w pełni bezinwazyjną i łatwą do realizacji nawet w trudnych warunkach pracy maszyn w przemyśle, jest pomiar strumienia poosiowego. W licznych publikacjach pokazano, że sygnał strumienia poosiowego jest dobrym sygnałem diagnostycznym do określenia stanu maszyn prądu przemiennego [1–12], ale także dla określenia ich obciążenia momentem [14–15].

W pracach autorów [7–9; 11–12] kilkakrotnie pokazano różne zastosowania sygnału strumienia poosiowego i udowodniono przydatność tych metod diagnostycznych do postawienia trafnej diagnozy co do stanu badanych maszyn w warunkach laboratoryjnych, jak i w warunkach przemysłowych.

Na bazie tych doświadczeń i pod wpływem obserwacji coraz większego zapotrzebowania na bezinwazyjne pomiary diagnostyczne maszyn elektrycznych podjęto próbę opracowania dwóch wersji urządzeń. Najważniejszym założeniem, jakim kierowano się przy ich konstruowaniu, było maksymalne uproszczenie pomiaru i pełna mobilność w warunkach przemysłowych.

Założono, że urządzenia powinny pozwolić szybko i skutecznie ocenić stan badanej maszyny elektrycznej i jej parametry ruchowe szerszej grupie osób odpowiedzialnych za utrzymanie ruchu w różnych gałęziach przemysłu.

Na podstawie dotychczasowych pozytywnych doświadczeń w diagnozowaniu silników indukcyjnych z zastosowaniem strumienia poosiowego autorzy postanowili w pierwszej kolejności rozwinąć opracowany wcześniej system pomiarowy [12]. W ramach realizacji pomysłu opracowano projekty techniczne, dokumentacje, instrukcje obsługi, metodologię pomiarów, raporty i protokoły z badań oraz wykonano dwa prototypy urządzeń pomiarowych do bezinwazyjnej diagnostyki i wyznaczania obciążenia maszyn elektrycznych prądu przemiennego wykorzystujące sygnał strumienia poosiowego.

Pierwszy z przyrządów w wersji uproszczonej w nowym wykonaniu ma również służyć do szybkiej wstępnej oceny stanu wirnika silnika oraz wyznaczania momentu. Przyrząd ten wyposażony został w cewkę pomiarową, filtr dolnoprzepustowy,

Streszczenie: W artykule przedstawiono zaprojektowany i wykonany przez autorów system pomiarowo-diagnostyczny przeznaczony do diagnozowania stanu uzwojeń wirnika i wyznaczania parametrów pracy takich, jak prędkość obrotowa i moment elektromagnetyczny w oparciu o strumień unipolarny (poosiowy) silnika indukcyjnego, wychwytywany przy użyciu cewki pomiarowej. System składa się z dwóch niezależnych od siebie modułów, z których jeden przeznaczony jest do rejestracji i archiwizacji wartości True RMS pełnych i odfiltrowanych napięć pochodnych strumienia silnika w celach porównawczych stanu wirnika w czasie i wyznaczania momentu. Drugi służy zaś do rejestracji przebiegów czasowych i analizy widmowej w celu określenia aktualnego stanu wirnika i prędkości obrotowej na podstawie amplitud składowych poślizgowych widma i zawiera m.in. kartę pomiarową oraz komputer z oryginalnym oprogramowaniem i jest dodatkowo przystosowany do akwizycji sygnałów wyładowań niezupełnych, drgań i hałasu. W artykule zawarto przykłady analiz silników wykonanych w przemyśle przy użyciu systemu.

Słowa kluczowe: strumień poosiowy, przyrząd pomiarowy, diagnostyka uszkodzeń, silnik indukcyjny

THE MEASURING AND DIAGNOSTIC SYSTEM FOR A NON-INVASIVE DIAGNOSING OF INDUCTION MOTOR ROTOR CONDITION AND DETERMINATION OF ITS OPERATING PARAMETERS

Abstract: The article presents the measuring diagnostic system designed and made by the authors, dedicated to diagnose the condition of the induction motor rotor windings and determination of its operating parameters based on the axial flux captured by the measuring coil. The system consists of 2 independent modules. One of them is dedicated to recording and archiving the True RMS values for full and filtered voltages – the derivatives of the motor flux, for comparative purposes of the rotor condition over time and determination of the torque, while the other one – to recording timelines and spectral analysis to determine the current rotor condition and the motor speed on the basis of the amplitudes of the slip components in the spectrum, and contains among others a measuring card and a computer with original software and is additionally adapted to acquisition of partial discharges signals, vibration and noise. The article contains examples of some motors analyzes performed in industry with use of the designed system.

Keywords: axial flux, measuring device, faults diagnostics, induction motor

reklama

dzielnik napięcia sygnału pomiarowego i dedykowane urządzenie rejestrujące z pamięcią. Do oceny stanu maszyny i oszacowania momentu elektromagnetycznego wykorzystywane są nadal amplitudy sygnału diagnostycznego przed i po odfiltrowaniu, przy użyciu dostrojonego filtra dolnoprzepustowego. W zestawie tym istnieje możliwość przechowywania kilku tysięcy kolejnych pomiarów wykonanych dla różnych maszyn.

Drugie urządzenie w wersji pełnej służy do kompleksowej diagnostyki silników prądu przemiennego. Zostało ono wyposażone w kartę pomiarową i przenośny minikomputer. Takie rozwiązanie umożliwia rejestrację sygnałów strumienia z dużą częstotliwością próbkowania sygnału.

Dla obu urządzeń opracowano dokumentację techniczną wraz z instrukcją obsługi oraz zaproponowano metodykę pomiaru i przedstawiono zasady interpretacji wyników.

W dokumentacji zawarto zasady archiwizacji pomiarów, opracowywania raportów z przeprowadzonych badań oraz sposób śledzenia trendu zmian stanu maszyny w czasie jej eksploatacji przy kolejnych pomiarach diagnostycznych.

Większa część artykułu została opublikowana w [13]. Niniejszy artykuł jest rozszerzeniem tej wersji, uzupełnionym o nowe możliwości zastosowania systemu w szeroko rozumianej ocenie stanu maszyny i jej parametrów pracy.

2. Wersja uproszczona przyrządu

2.1. Budowa przyrządu

Urządzenie w wersji uproszczonej ma służyć do szybkiej wstępnej oceny stanu wirnika silnika oraz oszacowania jego momentu elektromagnetycznego. Zostało ono wyposażone w cewkę pomiarową, filtr dolnoprzepustowy z dzielnikiem napięcia sygnału pomiarowego i dedykowany przyrząd rejestrujący UT71D z pamięcią. Przyrząd UT71D można podłączyć do komputera i zapamiętane dane z pamięci przyrządu rejestrującego można przesłać do komputera. Urządzenie w wersji uproszczonej zostało umieszczone w wodoodpornej walizce pomiarowej Peli Storm im2100 z gąbką. Na rys. 1 widać podłączony kabel zasilający akumulatory filtra. Używa się go jedynie wówczas, kiedy zostanie zasygnalizowany zbyt niski poziom napięcia akumulatorów.



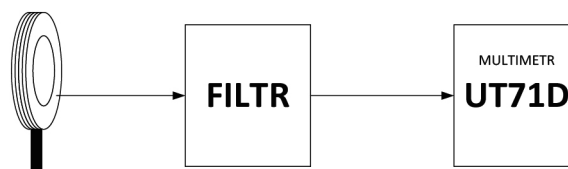
Rys. 1. Widok na zestawione elementy urządzenia pomiarowego w wersji uproszczonej

Metoda pomiaru z wykorzystaniem tego urządzenia opiera się na porównywaniu pomiarów napięcia z wyjścia filtra w ustalonych odstępach czasu przy takich samych lub bardzo zbliżonych warunkach pracy maszyny. Istotną rolę w tej metodzie odgrywa badanie zmian trendu wykresu zmierzzonego napięcia. Widok zestawionych elementów urządzenia przedstawiono na rys. 1.

Najważniejsze elementy składowe urządzenia do diagnostyki silników indukcyjnych w wersji uproszczonej to:

- cewki do pomiaru strumienia poosiowego;
- filtr aktywny dolnoprzepustowy do wyodrębnienia składowej diagnostycznej;
- miernik UT71D z pamięcią do zapisu wyników pomiarów z opcją eksportu mierzonych danych do komputera.

Schemat ideowy połączenia najważniejszych elementów systemu przedstawiono na rys. 2.

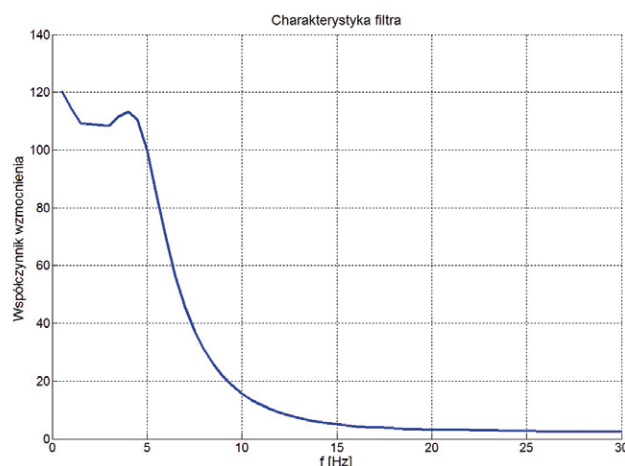


Rys. 2. Schemat ideowy połączenia najważniejszych elementów systemu pomiarowego w wersji uproszczonej

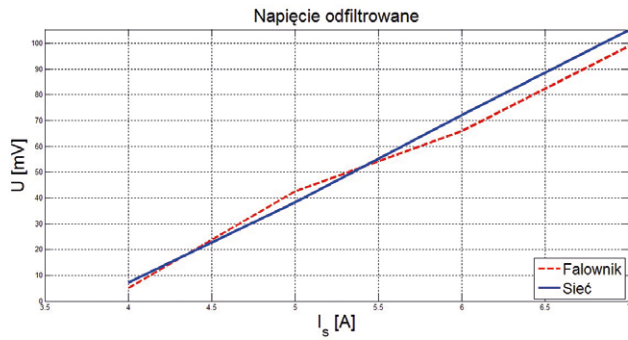
2.2. Filtr sygnału napięciowego z cewki pomiarowej

Filtr aktywny jest integralną częścią urządzenia do bezinwazyjnej diagnostyki wirnika w oparciu o strumień unipolarny (poosiowy). Sygnał napięciowy z cewki pomiarowej rzędu od kilku do kilkuset mV w zależności od mocy silnika i jego obciążenia oraz umiejscowienia cewki jest podawany na moduł filtra aktywnego dolnoprzepustowego 8 rzędu.

Filtr ten ma za zadanie odcinać sygnały o częstotliwości powyżej 5 Hz, natomiast przepuszczać sygnały odpowiadające składowej strumienia unipolarnego silnika właściwej dla prądu wirnika o częstotliwości $f_2 = s f_1$, gdzie: s – poślizg w granicach dopuszczalnych eksploatacyjnie do 10%; f_1 – częstotliwość prądu stojana. Charakterystykę filtra przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Charakterystyka filtra

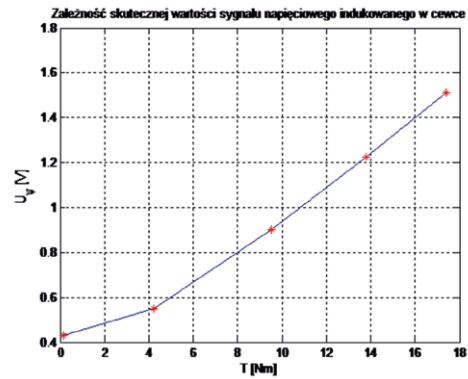


Rys. 4. Charakterystyki obciążeniowe filtra przy dwu rodzajach zasilania silnika

Moduł filtra umożliwia także podawanie sygnału nieprzetworzonego na wejście modułu rejestrującego/analizatora oraz – w przypadku pełnej wersji urządzenia – na wejście karty pomiarowej dla celów analizy stanów nieustalonych oraz analizy widmowej w stanie ustalonym.

2.3. Charakterystyki obciążeniowe w różnych warunkach zasilania

Po wykonaniu modułu sprawdzono jego działanie w warunkach obciążania silnika klatkowego 4 kW, 380 V(Y), 1430 obr./min przy zasilaniu z sieci oraz z falownika.



Rys. 5. Zależność zmierzonego napięcia indukowanego w cewce od momentu na wale maszyny

Celem testu było sprawdzenie reakcji modułu na wzrost składowej strumienia proporcjonalnej do prądu stojana oraz wirnika, ponieważ w warunkach uszkodzenia klatki następuje wzrost składowej strumienia wirnika proporcjonalny do zakresu defektu klatki.

Bazując na funkcjonalności podstawowej wersji systemu, można wyznaczyć zależności pomiędzy momentem obciążenia na wale maszyny a sygnałem napięciowym proporcjonalnym do strumienia poosiowego indukowanego na zaciskach cewki wykorzystywanej do pomiaru. Przykładową taką zależność przedstawiono na rys. 5.

Po skalibrowaniu charakterystyki jak na rys. 5 dla indywidualnego silnika na jego stanowisku pracy lub w stacji prób, w oparciu o dostępne sygnały pomiarowe prądów, napięć, $\cos\phi$ i mocy, można uzyskać charakterystykę odwrotną $T = f(U\psi)$. Dzięki temu można przy jednocześnie wyznaczonych obrotach wyznaczać sprawność silnika w dowolnym jego punkcie pracy oraz w szerszym wymiarze efektywność energetyczną procesu produkcyjnego.

3. Wersja pełna przyrządu pomiarowego

3.1. Budowa przyrządu

Drugie urządzenie w wersji pełnej służy do kompleksowej diagnostyki silników prądu przemiennego. Zostało ono wyposażone w kartę pomiarową NI 6366 USB i przenośny minikomputer ThinkPad X260 ze stacją dokującą i akumulatorowym układem zasilania. Takie rozwiązanie umożliwia rejestrację sygnałów strumienia poosiowego w czasie z dużą częstotliwością próbkowania tego sygnału bez konieczności korzystania z zasilania sieciowego. Takie rozwiązania sprzętowe, o bardzo dobrych parametrach rejestracji sygnałów diagnostycznych, jest wersją rozwojową przyrządu. Przy aktualizacji systemu do nowszej wersji wymagana będzie tylko aktualizacja oprogramowania bez konieczności zmian sprzętowych.

Wersja systemu diagnostycznego umożliwi przeprowadzenie zaawansowanych analiz w stanie ustalonym i w stanach dynamicznych badanych maszyn.

Rejestracja sygnału z dużą częstotliwością i analiza odfiltrowanego cyfrowo przebiegu dynamicznego strumienia podczas rozruchu silnika umożliwi wykrycie uszkodzeń klatki rozruchowej (jeśli istnieje) i roboczej maszyny, zaś analiza widmowa w stanie ustalonym daje pogląd na stan klatki pracy i ekscentryczności.

Elementy systemu zostały zabudowane w wodoodpornej walizce ochronnej Peli 1500. Widok na zestawione elementy systemu w walizce pomiarowej przedstawiono na rys. 6 i 7.

Przyrząd w wersji pełnej zaprojektowano jako autonomiczne urządzenie pomiarowe z możliwością jednoczesnej rejestracji kilku sygnałów z dużą częstotliwością próbkowania. Układ rejestracji sygnałów oparto o wspomnianą wyżej wielofunkcyjną kartę pomiarową NI USB 6366 z możliwością równoczesnego próbkowania 8 różnych sygnałów z częstotliwością do 2 Ms/s. Schemat ideowy zaprojektowanego urządzenia w wersji pełnej przedstawiono na rys. 8.

Oprócz wymienionej karty pomiarowej najważniejszym elementem projektowanego systemu jest przenośny minikomputer z dedykowanym oprogramowaniem do zbierania i analizy danych. Do zbierania danych przygotowano program w środowisku NI Signal Express. Natomiast do analizy zarejestrowanych danych wykorzystano środowisko Scilab. Widok zestawionego przyrządu pomiarowego w wersji pełnej podczas pomiarów silnika dużej mocy przedstawiono na rys. 9.

3.2. Dedykowane oprogramowanie do analiz diagnostycznych i generacji raportów

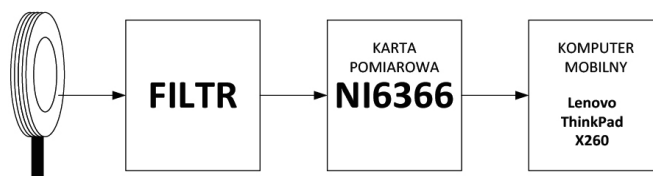
Opracowano i zaimplementowano dwa niezależne moduły oprogramowania użytkowego do rejestracji i szczegółowej analizy zarejestrowanych przebiegów czasowych sygnału



Rys. 6. Waliza ochronna z zabudowanymi elementami systemu w wersji pełnej



Rys. 7. Waliza ochronna z zabudowanymi elementami systemu w wersji pełnej po wyjęciu komputera przenośnego



Rys. 8. Schemat ideowy zaprojektowanego przyrządu pomiarowego w wersji pełnej

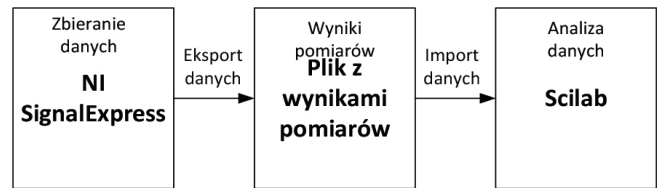
proporcjonalnego do strumienia poosiowego. Przy implementacji oprogramowania użytkowego przyjęto koncepcję przygotowania dwóch niezależnych modułów aplikacji. Oprogramowanie użytkowe podzielono na dwie części: pierwszą związaną ze zbieraniem danych, a drugą z analizą i interpretacją wyników pomiarów. Zbieranie danych przygotowano w środowisku NI Signal Express 2015 LE, natomiast drugą część



Rys. 9. Widok zestawionego układu pomiarowego podczas badań na stanowisku pracy badanych maszyn

oprogramowania napisano w środowisku Scilab 5.5.2. Ideowy schemat blokowy działania oprogramowania przedstawiono na rys. 10.

Działanie oprogramowania można opisać w skrócie w następujący sposób. Przy pomocy oprogramowania przygotowanego w środowisku NI Signal Express zostają ustalone podstawowe



Rys. 10. Schemat ideowy działania oprogramowania diagnostycznego

parametry zbierania danych (częstotliwość próbkowania i przedział czasu, w którym zostaną zebrane dane) oraz inne parametry składowania danych na dysku. Po uruchomieniu programu, przez okres czasu zdefiniowany przez użytkownika, odbywa się proces zbierania danych. Następnie wyniki pomiarów są zapisywane w plikach tekstowych i są przechowywane w folderach, które w nazwie zawierają datę i godzinę wykonania pomiarów.

Następnie w drugim module oprogramowania, przygotowanym w środowisku Scilab, odbywa się import plików z danymi pomiarowymi i ich analiza. Po zaimportowaniu danych i ich analizie na ekranie komputera zostają wyświetlone przebiegi czasowe i widma analizowanych sygnałów.

Na potrzebę automatyzacji oceny stanu badanego silnika przygotowano szablon raportów, w których automatycznie są umieszczane przebiegi czasowe i widma sygnałów

reklama

reklama

proporcjonalnych do strumienia poosiowego po przeprowadzeniu szczegółowych analiz w programie Scilab. Przykładowy raport przedstawiono na rys. 11.

Dla serii kolejnych pomiarów diagnostycznych dla badanego silnika istnieje możliwość śledzenia trendu zmian wskaźników uszkodzenia klatki przy kolejnych wykonywanych pomiarach dla tego samego silnika.

W wersji podstawowej raportu na kolejnych rysunkach zostają wyróżnione tzw. częstotliwości poślizgowe według znanego wzoru:

$$f = f_0(1 \pm 2ks) \quad (1)$$

gdzie:

f_0 – częstotliwość napięcia zasilania;

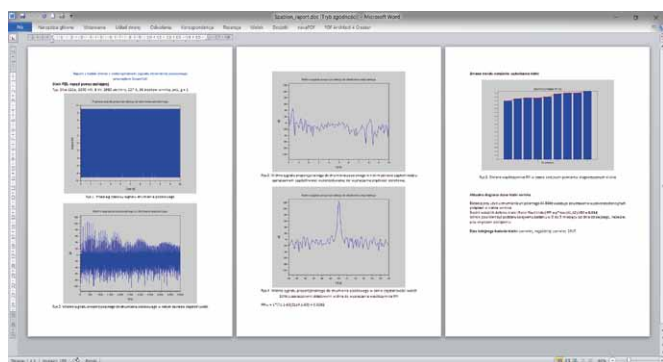
k – numer kolejnej częstotliwości poślizgowej;

s – poślizg.

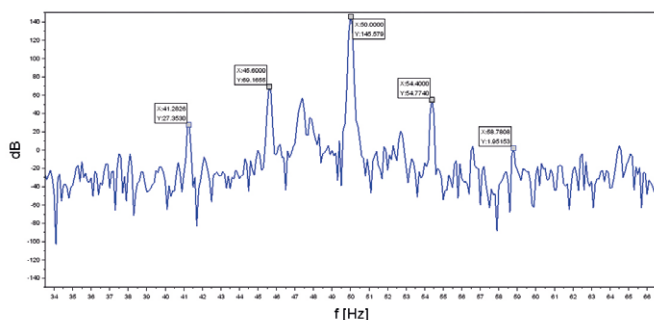
Na rys. 12 przedstawiono widmo strumienia poosiowego wokół podstawowej harmonicznej.

Dla wyróżnionych częstotliwości automatycznie zostaje wyznaczony wskaźnik uszkodzenia klatki RFI (ang. *Rotor Fault Index*). Wskaźnik jest obliczany w następujący sposób:

$$RFI = \frac{\max(A_{s1}, A_{s2})}{A_0} \cdot p \quad (2)$$



Rys. 11. Podgląd szablonu raportu w programie MS Word z wykresem śledzenia trendu zmian wskaźnika stanu maszyny w czasie kolejnych pomiarów



Rys. 12. Widmo strumienia poosiowego dla jednego z badanych silników



Rys. 13. Widok zestawionego urządzenia w wersji uproszczonej przy badanym silniku w laboratorium

gdzie:

A_{s1}, A_{s2} – oznaczają amplitudy składowych poślizgowych $f_0(1 \pm 2s)$;

A_0 – amplituda podstawowej harmonicznej f_0 ;

p – liczba par biegunów.

Wskaźniki uszkodzenia klatki są wyliczane dla harmonicznych o numerach 1, 3, 5 i 7.

4. Testy urządzeń w warunkach laboratoryjnych i przemysłowych

Oba urządzenia przetestowano w warunkach laboratoryjnych. Widok zestawionego urządzenia w wersji uproszczonej podczas testów w laboratorium przedstawiono na rys. 13.

Podczas testów w laboratorium badano silniki, w których można było stwierdzić uszkodzenia uzwojeń wirników, niecentryczne ustawienie wirnika w osi stojana oraz zwarcia w uzwojeniu stojana.

Przeprowadzono również badania obu prototypów w przemysłowej stacji prób oraz na stanowiskach pracy dużych 6 kV silników indukcyjnych pracujących w elektrociepłowni.

Widok na jeden z badanych silników z przyłożoną cewką pomiarową przedstawiono na rys. 14.

Podczas tych pomiarów zbadano wpływ zakłóceń zewnętrznych na pomiar i analizę sygnałów przez oba opracowane urządzenia. Wykonano testy przemysłowe obu urządzeń i sporządzono raporty z wynikami badań prototypów na silnikach n.n. i w.n. na stacji prób i na stanowiskach roboczych, z uwzględnieniem zakłóceń zewnętrznych.

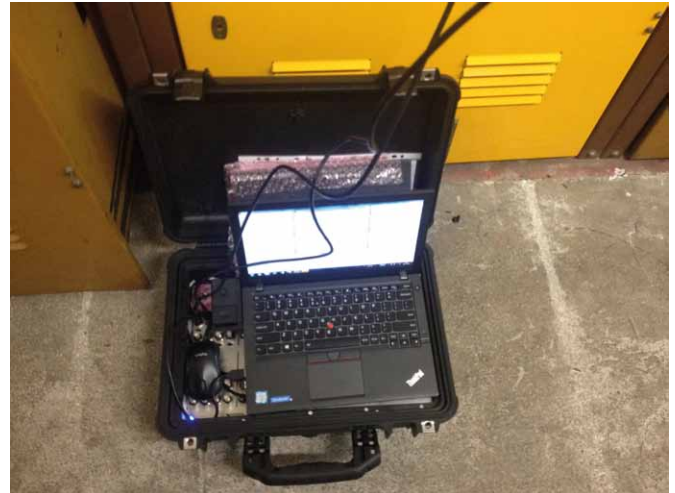
5. Zastosowanie systemu rejestracji sygnałów do badania silników innymi metodami diagnostycznymi

Wyposażając opracowany system w dodatkowe elementy pomiarowe, z wykorzystaniem systemu można prowadzić badania w zakresie:

- oceny stanu silników metodą MCSA (ang. *Motor Current Signature Analysis*) w oparciu o pomiar prądu stojana;



Rys. 14. Widok badanego silnika na stanowisku pracy w elektrociepłowni



Rys. 16. Widok systemu pomiarowego umieszczonego przy polu rozdzielczym badanego silnika



Rys. 15. Widok zamontowanych cęgów do pomiaru prądów w obwodzie wtórnym przekładnika prądowego badanego silnika



Rys. 17. Widok na miejsce zamontowania akcelerometrów i umieszczenia mikrofonu do badań wibroakustycznych silnika

- ocenę stanu drganiowego maszyny w oparciu o sygnały wibroakustyczne;
- ocenę stanu izolacji maszyny w oparciu o sygnały wyładowań niezupełnych.

Dzięki zastosowaniu karty pomiarowej i komputera przenośnego o bardzo dobrych parametrach wymaganych do rejestracji sygnałów diagnostycznych było możliwe łatwe rozbudowanie funkcjonalności systemu, polegające głównie na odpowiedniej modyfikacji dedykowanego oprogramowania do pomiarów i analizy zarejestrowanych sygnałów.

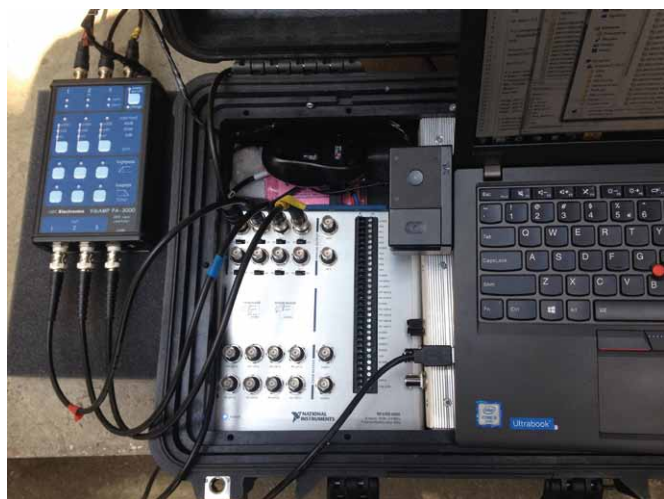
Pierwszym dodatkowym zastosowaniem systemu pomiarowo-diagnostycznego był pomiar i analiza prądu stojana zgodnie z metodą MCSA. Widok zamontowanych cęgów prądowych w obwodzie wtórnym przekładników prądowych przedstawiono na rys. 15. Natomiast widok zestawu pomiarowego przy dolnej części szafy pola silnikowego przedstawiono na rys. 16.

Kolejnym zastosowaniem systemu było wykorzystanie go do pomiaru i analizy drgań na obudowie węzłów łożyskowych oraz hałasu emitowanego przez badany silnik. Na tę potrzebę rozbudowano system o dwa akcelerometry piezoelektryczne, kierunkowy mikrofon piezoelektryczny i kondycjoner sygnałów IEPE.

Widok fragmentów silnika z zainstalowanymi akcelerometrami i mikrofonem przedstawiono na rys. 17. Natomiast zdjęcie walizy z systemem rejestrującym przedstawiono na rys. 18.

Kolejnym zastosowaniem omawianego systemu pomiarowo-diagnostycznego po przygotowaniu nowych modułów oprogramowania była rejestracja sygnałów wyładowań niezupełnych.

Po wyposażeniu zestawu pomiarowego w trzy elastyczne, specjalnie zmodyfikowane cewki Rogowskiego CWT i zestaw kabli możliwe było również rejestrowanie impulsów wyładowań oraz przeprowadzenie zaawansowanych analiz statystyk intensywności i rozkładów wyładowań niezupełnych w układzie izolacyjnym badanej maszyny.



Rys. 18. Widok zestawu pomiarowego wraz z kondycjonerem sygnałów

Widok miejsca i sposobu zamontowania cewek Rogowskiego na kablach zasilających SN w polu silnikowym przedstawiono na rys. 19. Natomiast rys. 20 przedstawia zestawiony system rejestrujący i cewki Rogowskiego.

Opracowany system pomiarowo-diagnostyczny łatwo można rozbudować o kolejne funkcje i nowe czujniki pomiarowe oraz nowe metody diagnostyczne.

6. Podsumowanie

Główną zaletą użytkową opracowanych urządzeń jest możliwość wykonania pomiarów przy samej maszynie, bez konieczności wspinania się wokół obwodów wtórnych na rozdzielni, bez konieczności nieraz długiego oczekiwania na wydanie poleceń i zezwoleń przez służby utrzymania ruchu. Pomiar strumienia daje możliwość uzyskania wszystkich informacji diagnostycznych, jakie można uzyskać metodą pomiaru prądów plus dodatkowo kilka innych bardzo ważnych, niemożliwych do uzyskania poprzez pomiar prądów. Ponadto, według doświadczeń autorów, sam pomiar 10 silników na rozdzielni elektrowni lub siłowni przemysłowej trwa co najmniej 1 godzinę, zaś pomiar tych samych silników na miejscu zainstalowania najwyżej 30 minut razem z przechodzeniem od maszyny do maszyny.

Niewątpliwą kolejną zaletą obu wersji urządzenia jest natychmiastowa gotowość do pomiarów i rejestracji, stanowiąca o ich funkcjonalności. W przypadku pracy z filtrem i przyrządem UT71D, po uprzednim skalibrowaniu zestawu i umieszczeniu cewki w pobliżu silnika, pomiar można rozpocząć natychmiast. Pomiar połączony z rejestracją co 1 sekundę powinien trwać maksymalnie kilkanaście sekund. W przypadku wersji pełnej urządzenia pomiar można rozpocząć w kilkanaście sekund od otwarcia walizy, włączenia komputera i po uruchomieniu programów do rejestracji i przetwarzania danych. Czas trwania sesji pomiarowej to maksymalnie 1 minuta.

Obie wersje prototypu systemu spełniają wymagania co do eksploatacji w trudnych warunkach przemysłowych. Dzięki wyposażeniu urządzenia w zasilanie bateryjne udało się uniknąć wpływu zakłóceń pochodzących od zasilania sieciowego. Użyto przewodów ekranowanych, które pozwalają ograniczyć



Rys. 19. Widok miejsca zamocowania cewek Rogowskiego na poszczególnych fazach zasilania badanego silnika



Rys. 20. Widok zestawionego układu pomiarowego do rejestracji sygnałów

wpływ zakłóceń mogących powstać na drodze przesyłu sygnału diagnostycznego między cewką przyłożoną do maszyny od strony wentylatora a wejściem analogowym karty pomiarowej.

Mobilna wersja systemu pozwala sprawnie przeprowadzać badania diagnostyczne silników na stanowisku ich pracy lub podczas badań na stacji prób w zakładach remontujących maszyny elektryczne. Dotychczasowe badania potwierdzają słuszność wybranej technologii wykonania urządzeń pomiarowych w obu wersjach.


Zaprezentowane tu różne możliwości rozszerzenia opracowanego systemu pozwalają stwierdzić, że jest on uniwersalny i przydatny do wielu zastosowań pomiarowo-diagnostycznych w każdym przedsiębiorstwie eksploatującym silniki elektryczne.

Literatura

- [1] DORRELL D.G., THOMSON W.T., ROACH S.: *Analysis of airgap flux, current, and vibration signals as a function of the combination of static and dynamic air-gap eccentricity in 3-phase induction motors*. IEEE Transactions on Industry Applications, 1997, 33(1), pp. 24–34.
- [2] KOKKO V.: *Condition monitoring of squirrel-cage motors by axial magnetic flux measurements*. Academic Dissertation, University of Oulu, 2003, Finland.
- [3] GOŁĘBIEWSKI L., GOŁĘBIEWSKI M., NOGA M., SKWARCZYŃSKI J.: *Strumień osiowy w modelu 3D MES maszyny indukcyjnej*. „Elektrotechnika i Elektronika”, Tom 25, Zeszyt 2, 2006.
- [4] CHMELÍK K., FOLDYNA J., MIŠÁK S.: *Magnetické pole v okolí asynchronního stroje, jeho zjišťování a využití*, *Electroscope*, 2007, č. 2. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická.
- [5] FROSINI L., BORIN A., GIROMETTA, L., VENCHI G.: *Development of a leakage flux measurement system for condition monitoring of electrical drives*. 2011 IEEE International Symposium on SDEMPED, 5–8 Sept. 2011, pp. 356–363.
- [6] FROSINI L., BORIN A., GIROMETTA L., VENCHI G.: *A novel approach to detect short circuits in low voltage induction motor by stray flux measurement*. Electrical Machines (ICEM), 2012, XXth International Conference on Marseille.
- [7] PETRYNA J., SUŁOWICZ M., DUDA A., GUZIEC K.: *Wykorzystanie strumienia unipolarnego w diagnostyce maszyn prądu przemiennego*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 2/2013 (99), wyd. BOBRME Komel, s. 85–90.
- [8] PETRYNA J., SUŁOWICZ M., DUDA A., GUZIEC K.: *Diagnozowanie silników indukcyjnych w oparciu o pomiar strumienia osiowego*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 1/2014 (101), wyd. BOBRME Komel, s. 185–191.
- [9] PETRYNA J., SUŁOWICZ M., DUDA A.: *Wykorzystanie strumienia poosiowego do badania stanów dynamicznych maszyn indukcyjnych małej i dużej mocy*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 2/2014 (102), wyd. BOBRME Komel, s. 165–171.
- [10] BIERNAT A., GÓRALSKI P.: *Zastosowanie pomiaru strumienia osiowego do okresowej diagnostyki silników indukcyjnych w zakładach przemysłowych*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 4/2014 (104), wyd. BOBRME Komel, s. 247–252.
- [11] WEINREB K., DUDA A., PETRYNA J., SUŁOWICZ M.: *Diagnostyka ekscentryczności silnika indukcyjnego w oparciu o pomiar strumienia poosiowego*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 2/2015 (106), wyd. BOBRME Komel, s. 13–20.
- [12] DUDA A., PETRYNA J., SUŁOWICZ M., GUZIEC K.: *Metoda wstępnej oceny stanu wirnika silnika indukcyjnego przy pomocy dedykowanego przyrządu opartego na pomiarze strumienia poosiowego*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 2/2015 (106), wyd. BOBRME Komel, s. 59–63.
- [13] SUŁOWICZ M., DUDA A., PETRYNA J., GUZIEC K.: *System pomiarowo-diagnostyczny do bezinwazyjnej diagnostyki stanu wirnika silników indukcyjnych*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” nr 2/2017 (114), wyd. BOBRME Komel, s. 169–175.
- [14] ŁAWROWSKI Z., DUDA A., PETRYNA J., SUŁOWICZ M.: *Wyznaczanie momentu obciążenia silnika indukcyjnego w oparciu o pomiar strumienia poosiowego*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” Nr 2/2016 (110), wyd. BOBRME Komel, s. 1–8.
- [15] PETRYNA J., TULICKI J., SUŁOWICZ M.: *Calculating an electromechanical torque of a squirrel cage motor based on an axial flux obtained by the FEM*. II International Conference of Computational Methods in Engineering Science (CMES'17), 2017, ITM Web Conf., Volume 15, pp. 1–8, 2017.

Praca powstała za zgodą i we współpracy z firmą SENCO Sp. z o.o. w wyniku realizacji przez firmę projektu „Zakup usług badawczo-rozwojowych w zakresie opracowania nowego innowacyjnego przyrządu do bezinwazyjnej diagnostyki stanu wirnika silników indukcyjnych – SmartCoil”, finansowanego z Programu Regionalnego Funduszy Europejskich w ramach Poddziałania 1.2.3 „Bony na innowacje”.

Badania w zakresie oceny momentu obciążenia badanych maszyn zrealizowano w ramach tematów badawczych nr E-2/664/2017/DS, E-2/650/2017/DS, finansowanych z dotacji na naukę przyznanej przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

 dr inż. M. Sułowicz – e-mail: msulowicz@pk.edu.pl,
mgr inż. A. Duda – e-mail: aduda@pk.edu.pl,
dr inż. J. Petryna – e-mail: jpetryna@pk.edu.pl,
Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej, Instytut Elektromechanicznych Przemian Energii;
mgr inż. K. Guziec – e-mail: office@senco.krakow.pl,
SENCO Sp. z o.o.