

Wokół badań diagnostycznych maszyn elektrycznych

About diagnostic testing of electrical machines

Janusz Petryna¹ 

¹Akademia Tarnowska, Wydział Nauk Technicznych, Katedra Automatyki, Robotyki i Inżynierii Elektrycznej, ul. Mickiewicza 8, 33-100 Tarnów, Polska

Artykuł przeglądowy

Abstrakt

W artykule przedstawiono doświadczenia autora dotyczące początkowego etapu rozwoju eksperckich systemów diagnostycznych maszyn elektrycznych w Polsce, obejmującego lata 90. XX wieku oraz pierwsze lata XXI wieku. Artykuł ma charakter przeglądowy i przedstawia wybrane zagadnienia związane z praktyką badań diagnostycznych. Zawarte w tekście przykłady ilustrują specyfikę pomiarów diagnostycznych oraz sytuacje napotykane podczas oceny stanu technicznego maszyn, ukazując przemysłowy kontekst rozwoju metod diagnostycznych w tamtym okresie.

Abstract

The article presents the author's reflections on the early stage of development of expert diagnostic systems for electrical machines in Poland, covering the 1990s and the first years of the 21st century. The study has a review character and discusses selected issues related to diagnostic testing practices. The examples included in the text illustrate the specificity of measurements and situations encountered during the assessment of machine technical condition, highlighting the context in which diagnostic methods evolved during that period.

Słowa kluczowe

- mobilne systemy diagnostyczne
- uszkodzenia silników
- wyladowania niezupełne
- badania profilaktyczne
- niesymetrie magnetyczne

Keywords

- mobile diagnostic systems
- motor damages
- partial discharges
- preventive testing
- magnetic asymmetries

Korespondencja

Janusz Petryna

e-mail: j_petryna@atar.edu.pl

Akademia Tarnowska

Wydział Nauk Technicznych

Katedra Automatyki, Robotyki i Inżynierii Elektrycznej

ul. Mickiewicza 8

33-100 Tarnów, Poland

Informacje o artykule

Historia artykułu (Article history)

- Otrzymano (Received): 2025-12-29
- Zaakceptowano (Accepted): 2026-09-23
- Opublikowano (Published): 2026-09-30

Wydawca (Publisher)

Akademia Tarnowska
University of Applied Sciences in Tarnow
ul. Mickiewicza 8, 33-100 Tarnow, Poland

Licencja (User license)

© by Author. This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License CC-BY-SA.

Finansowanie (Financing)

Badania nie zostały sfinansowane z grantów pochodzących ze środków publicznych, organizacji komercyjnych lub non-profit.

Konflikt interesów (Conflict of interest)

Nie zadeklarowano konfliktu interesów.

Wprowadzenie

Badania i diagnostyka maszyn elektrycznych w przemyśle oraz energetyce stanowią obszar aktywności autora od 1996 roku. Doświadczenie zawodowe w tym zakresie było rozwijane początkowo w ramach działalności firmy ElektroInstal w Krakowie [1], a od początku lat 2000 także we współpracy z przedsiębiorstwami MEGAREM sp. z o.o. (dawniej Wydział Remontów EC Kraków), SENCO sp. z o.o. oraz w strukturach Stowarzyszenia Elektryków Polskich. W ciągu ponad dwóch dekad autor zrealizował liczne badania i ekspertyzy dotyczące stanu technicznego maszyn elektrycznych zarówno samodzielnie, jak i we współpracy z zespołami przemysłowymi.

W tamtym okresie, dzięki szerokiej współpracy z zakładami przemysłowymi oraz ośrodkami naukowymi w kraju i za granicą, w Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie, na Politechnice Krakowskiej im. Tadeusza Kościuszki, Politechnice Opolskiej i Politechnice Śląskiej w Gliwicach prowadzono intensywne prace badawcze w obszarze diagnostyki maszyn elektrycznych. Efektem tych działań było powstanie licznych publikacji naukowych, w tym prac o charakterze pionierskim, korespondujących z osiągnięciami wiodących ośrodków badawczych Europy Zachodniej i Stanów Zjednoczonych. Mimo to do końca lat 80. XX wieku proponowane metody diagnostyczne nie zostały jeszcze wdrożone do szerokiego zastosowania przemysłowego.

Przełomowe rozwiązania w zakresie mobilnej diagnostyki online maszyn elektrycznych powstały w latach 80. i 90. XX wieku w Robert Gordon Institute of Technology (obecnie Robert Gordon University) w Aberdeen (Szkocja). Opracowano tam systemy MotorMonitor oraz StatorMonitor, przeznaczone do bezinwazyjnej diagnostyki maszyn w warunkach eksploatacyjnych [2]. Prace rozwojowe były finansowane w dużej mierze przez koncern British Petroleum we współpracy z amerykańską firmą ENTEK, z myślą o zastosowaniu tych systemów na platformach wiertniczych na Morzu Północnym. Testy prowadzono również w elektrowniach i zakładach przemysłowych, m.in. firm ELECO Electrical Project Ltd. oraz ESL Ltd. z Aberdeen. W tamtym czasie były to rozwiązania unikatowe – zminiaturyzowane, przenośne i umożliwiające realizację pełnego procesu diagnostycznego przez jedną osobę.

W 1996 roku system MotorMonitor został sprowadzony do Polski dzięki współpracy firmy MEGAREM sp. z o.o. z ElektroInstal Kraków, przy wsparciu Elektrociepłowni Kraków. W 2003 roku do kraju trafił również system StatorMonitor, co umożliwiło dalszy rozwój krajowych kompetencji w zakresie diagnostyki online maszyn elektrycznych.

Badania w przemyśle – początki

Statystyki uszkodzeń silników indukcyjnych według Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE) oraz Electric Power Research Institute (EPRI) zostały przedstawione w Tabeli 1 [3].

Tabela 1. Statystyka rodzajów uszkodzeń silników indukcyjnych

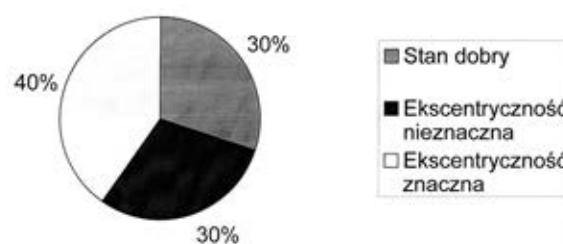
Badania przez	Uszkodzenia łożysk [%]	Awarie stojana [%]	Uszkodzenia wirnika [%]	Pozostałe [%]
IEEE*	42	28	8	22
EPRI**	41	36	9	14

*IEEE – Institute of Electrical and Electronic Engineers;

**EPRI – Electric Power Research Institute.

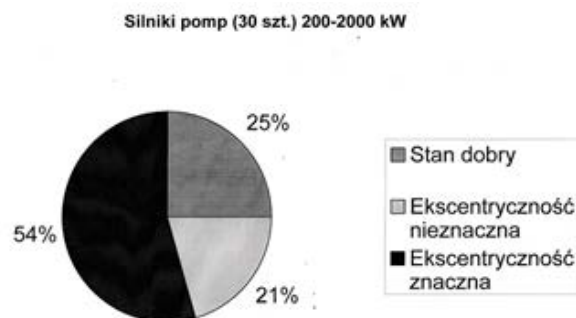
Zainteresowanie nowymi mobilnymi systemami diagnostycznymi online wykazało kilka dużych przedsiębiorstw, głównie z południa Polski. W jednym z nich, w obiekcie określanym umownie jako Siłownia, od lat występował problem przedwczesnego zużycia i uszkodzeń łożysk w silnikach indukcyjnych wysokiego napięcia. Łożyska wymieniano zarówno z powodu faktycznych uszkodzeń i zużycia, jak i po osiągnięciu resursu zalecanego przez producentów – nawet wtedy, gdy ich stan techniczny był jeszcze zadowalający. Poszukiwano więc metody umożliwiającej szybkie określenie, w których maszynach wymiana łożysk jest rzeczywiście konieczna, a w których można ją odłożyć, co pozwoliłoby ograniczyć koszty eksploatacyjne. System MotorMonitor okazał się w tym zakresie szczególnie przydatny.

Silniki 6 kV w Siłowni (90 szt.) 160-2000 kW

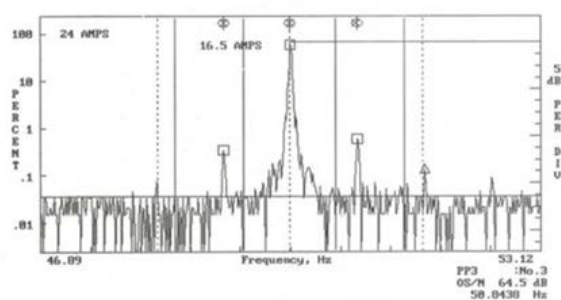


Rysunek 1. Poziom ekscentryczności silników 6 kV (90 szt.) eksploatowanych w Siłowni, określony na podstawie pomiarów systemem MotorMonitor

W tym przedsiębiorstwie w 1996 roku przeprowadzono pomiary ekscentryczności wirników 90 maszyn z wykorzystaniem MotorMonitora, a także analizy ukierunkowane na identyfikację potencjalnych uszkodzeń wirników.



Rysunek 2. Poziom ekscentryczności silników pomp 6 kV (30 szt.) w Siłowni, określony na podstawie pomiarów systemem MotorMonitor

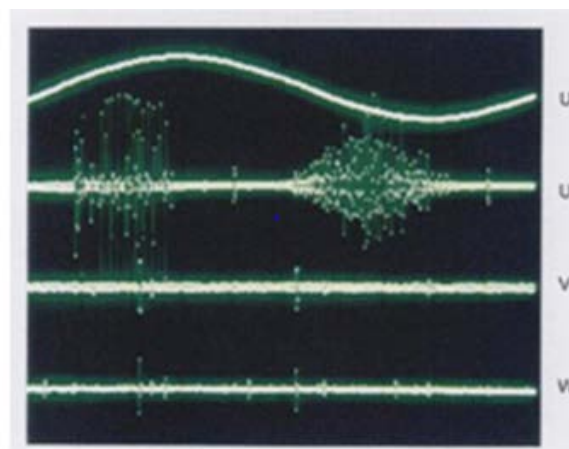


Rysunek 3. Analiza widmowa prądu stojana w stanie ustalonym pracy maszyny napędzającej pompę przewalową wykonana przez system MotorMonitor. Obecność składowych widma prądu zaznaczonych kwadratami świadczy o defekcie klatki wirnika

System MotorMonitor umożliwiał identyfikację uszkodzeń wirników klatkowych i pierścieniowych oraz ocenę poziomu ekscentryczności. Przykład takiej analizy przedstawiono na rysunku 3 prezentującym widmo amplitudowo-częstotliwościowe prądu fazy stojana z charakterystycznymi symptomami uszkodzenia klatki wirnika, obejmującego kilka pękniętych prętów. Do oceny występowania wyładowań niezupełnych w izolacji stojanów zastosowano system StatorMonitor.

Wyniki zachęciły przedsiębiorstwo do przeprowadzania diagnostyki wybranych maszyn w kolejnych latach. Warto tutaj dodać, że dzięki udziałowi w corocznej konferencji organizowanej przez KOMEL – Branżowy Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Maszyn Elektrycznych w Katowicach (obecnie Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych) dla ludzi nauki i przemysłu, udało się

zachęcić różne firmy do badań profilaktycznych maszyn elektrycznych.



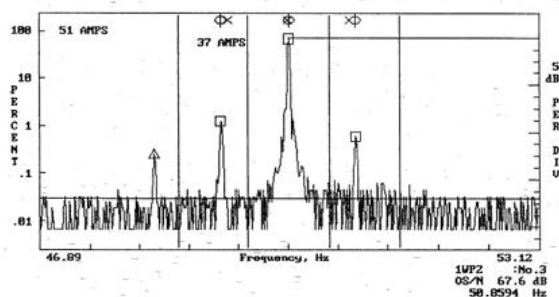
Rysunek 4. Silnik wentylatora ciągu – pomiar StatorMonitorem. Poziomy wyładowań niezupełnych w izolacji: 175 000 pC do masy, uszkodzenie izolacji fazy U; silne wyładowania między fazami V i W: 67 000 pC i 77 000 pC.

Do końca XX wieku przy zastosowaniu systemów MotorMonitor oraz StatorMonitor wykonano pomiary i ekspertyzy w wielu przedsiębiorstwach. Są wśród nich [4, 5]: ABB Huta Katowice Service, Dąbrowa Górnicza, Air Liquide w Dąbrowie Górniczej i Krakowie, Elektrociepłownia Kraków, Elektrociepłownia Katowice, Elektrownia Bełchatów, Elektrownia Szczecin, Elektrociepłownia Nowa Sarzyna, Elektrociepłownia Tychy, Elektrociepłownia Zielona Góra, Zespół Elektrociepłowni Poznań, Zespół Elektrociepłowni Ostrołęka, Elektrociepłownia Białystok, Huta Sendzimira w Krakowie (obecnie Arcelor Mittal), Huta Katowice, Mazowieckie Zakłady Rafineryjne (obecnie PKN Orlen w Płocku), Zakłady Azotowe w Tarnowie, Polfa w Krakowie, Lidingo Energi w Sztokholmie, Szwecja, Uppsala Energi w Uppsali, Szwecja, Stockholm Vatten i Vartan w Sztokholmie, Szwecja.

Badanie w energetyce

W jednym z obiektów w energetyce stwierdzono niestabilną pracę napędu pompy wentylatora podmuchu. Obroty silnika zmniejszyły się zauważalnie, a wskazówka amperomierza w polu rozdzielni wahała się. Według opinii doświadczanego personelu objawy świadczyły o uszkodzeniu wirnika silnika. W ramach testu systemu MotorMonitor wykonano w rozdzielni 6 kV odpowiednie pomiary na ruchu przy użyciu przekładników cęgowych opiętych wokół przewodów wtórnych fazy silnika. Na podstawie zarejestrowanych przebiegów

czasowych system MotorMonitor za pomocą szybkiej transformaty Fouriera (ang. Fast Fourier Transform – FFT) wykreował widma prądu faz silnika.



Rysunek 5. Wyniki pomiarów silnika wentylatora poddmuchu w jednym z obiektów energetyki

Przedstawiony na rysunku 5 fragment widma prądu fazy silnika wskazywał na poważny defekt klatki (więcej niż przedstawiony na rysunku 3).

Po otwarciu silnika i wysunięciu wirnika ujawniono uszkodzenie – rysunek 6.

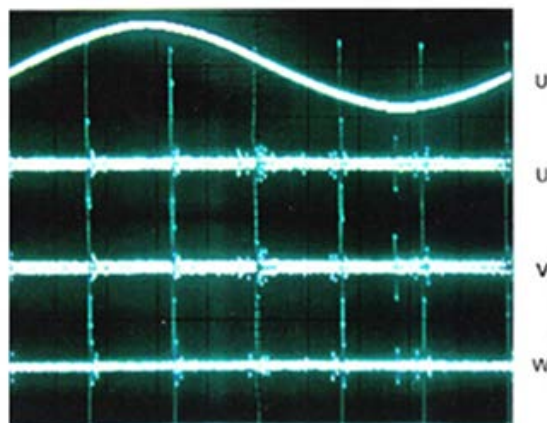


Rysunek 6. Pęknięty pierścień i uszkodzone spawy w klatce wykryte w silniku wentylatora poddmuchu w jednej z elektrociepłowni, w oparciu o wynik pomiaru pokazany na rysunku 5

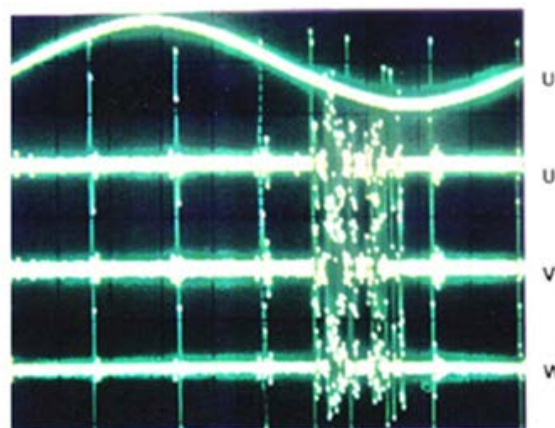
Silnik nie nadawał się do pracy i został odstawiony do remontu wirnika. Dopiero inspekcja silnika po jego demontażu przekonała dyrekcję elektrociepłowni, że warto inwestować w diagnozowanie maszyn.

W tej samej elektrociepłowni zbadano świeżo wyremontowany generator pod kątem wyładowań w izolacji. W trakcie pomiarów zarejestrowano podwyższony poziom wyładowań niepełnych w uzwojeniu generatora, co stanowiło sygnał potencjalnego pogorszenia stanu izolacji. Z uwagi na ten wynik uzyskano zgodę właściciela instalacji na wykonanie kolejnego pomiaru po roku eksploatacji. Analiza wykazała wówczas wzrost

aktywności wyładowań do poziomu przekraczającego 100 000 pC, co jednoznacznie wskazywało na postępującą degradację izolacji. Mimo zaawansowanego uszkodzenia uzwojenie nie uległo awarii w trakcie pracy, co umożliwiło bezpieczne odstawienie generatora i przeprowadzenie ponownego przezwojenia, zrealizowanego na koszt wykonawcy remontu.



Rysunek 7. Obraz wyładowań niepełnych świeżo przezwojonego stojana generatora 120 MW na izolację klasy F. Na zdjęciu widoczne są niewielkie impulsy (ok. 3–4 tys. pC) na tle silnych sygnałów pochodzących od statycznego wzbudzenia generatora (6 impulsów na okres napięcia).



Rysunek 8. Obraz wyładowań niepełnych świeżo przezwojonego stojana generatora 120 MW, na rysunku jest widoczna grupa silnych impulsów (17 000 pC), która pojawia się nieregularnie, co kilkaset okresów.

Rejestracja wyładowań niepełnych stanowi cenne narzędzie diagnostyczne, zapewniające bezpośredni wgląd w procesy zachodzące w systemie izolacyjnym maszyn elektrycznych. Metoda ta umożliwia nie tylko ocenę aktualnego stanu technicznego, lecz także weryfikację jakości przeprowadzonych prac remontowych,

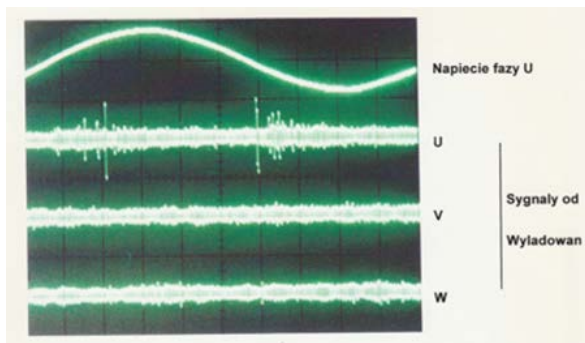
pozwalając na identyfikację defektów niewidocznych przy zastosowaniu innych technik pomiarowych [6].

Pod koniec lat 90. XX wieku w sektorze energetycznym, ciepłowniczym oraz w wybranych gałęziach przemysłu doszło do szeroko zakrojonych zmian własnościowych. Wiele przedsiębiorstw zostało przejętych przez duże koncerny międzynarodowe, takie jak ABB, EDF, RWE czy Westinghouse. Podobne procesy objęły hutnictwo (m.in. zakłady w Krakowie i Dąbrowie Górniczej przejęte przez ArcelorMittal) oraz przemysł cementowy, w którym część zakładów została zlikwidowana. Znaczące zmiany dotknęły również duże krajowe przedsiębiorstwa produkujące maszyny elektryczne, takie jak: DOLMEL Wrocław czy ZAMECH Elbląg, które po przejęciu przez ABB zostały częściowo odsprzedane lub zamknięte.

Zmiany właścicielskie wiązały się z redukcją zatrudnienia oraz reorganizacją procesów utrzymania ruchu. Przykładowo, w EDF Kraków liczba pracowników zmniejszyła się z ponad 2000 do około 700, co odpowiadało standardom organizacyjnym stosowanym w przedsiębiorstwach zachodnich. Konsekwencją tych przekształceń było istotne ograniczenie finansowania profilaktycznych badań diagnostycznych w wielu zakładach przemysłowych i energetycznych. Budżety przeznaczone na regularne pomiary zostały zredukowane do zera, a diagnostów zapraszano jedynie w sytuacjach wymagających analizy konkretnych problemów eksploatacyjnych lub wyjaśnienia przyczyn awarii.

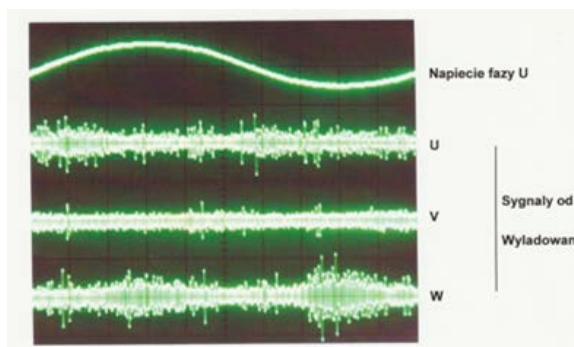
Przypadek awarii izolacji stojana po remoncie – analiza diagnostyczna

W jednej z dużych instalacji przemysłowych w lipcu 2000 roku doszło do awarii silnika indukcyjnego klatkowego dużej mocy ($P_N = 11$ MW, $U_N = 6300$ V, $n_N = 1483$ obr/min). W uzwojeniu stojana wystąpiło zwarcie, w wyniku czego maszynę skierowano do przewożenia.



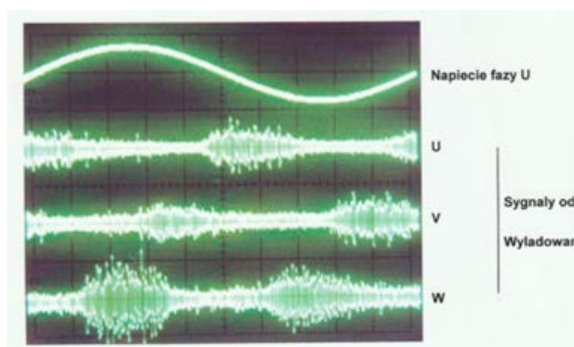
Rysunek 9. Przebiegi czasowe sygnałów od wyładowań niezupełnych w fazach silnika na tle napięcia odniesienia w fazie U przed awarią, luty 2000

Według dostępnych informacji koszt remontu przekroczył 500 000 zł. Po zakończeniu prac wykonano pomiary on-line wyładowań niezupełnych, które wykazały amplitudy istotnie wyższe od wartości oczekiwanych dla nowego uzwojenia.



Rysunek 10. Przebiegi czasowe sygnałów od wyładowań niezupełnych w fazach silnika po przewożeniu po awarii, pierwszy pomiar, sierpień 2000

Kolejny pomiar, przeprowadzony po kilku tygodniach, potwierdził tendencję wzrostową aktywności wyładowań niezupełnych (Rysunek 11, Tabela 2).



Rysunek 11. Przebiegi czasowe sygnałów od wyładowań niezupełnych w fazach silnika po przewożeniu po awarii, drugi pomiar, wrzesień 2000

Analiza wskazywała, że źródła wyładowań niezupełnych zlokalizowane były w sekcji żłobkowej uzwojenia. Potencjalne przyczyny obserwowanego zjawiska obejmowały m.in. uszkodzenie powierzchni izolacji cewki podczas procesu wprowadzania jej do żłobków oraz niepełne pokrycie długości pakietu stojana przez ekrany koronowe, co potwierdzili wykonawcy remontu. Rejestrowane wyładowania koncentrowały się w rejonie jednego z końców żłobka, co mogło prowadzić do lokalnej erozji powierzchni izolacji i przyspieszonej degradacji materiału.

Tabela 2. Maksymalne Powtarzalne Amplitudy Wyładowań

			Data pomiaru		
			Wrzesień 2000	Sierpień 2000	Luty 2000
Maksymalne Powtarzalne Amplitudy Wyładowań (pC)	Faza U	Impulsy dodatnie	14 000	10 500	4500
		Impulsy ujemne	17 000	13 500	4500
	Faza V	Impulsy dodatnie	14 500	12 000	4500
		Impulsy ujemne	20 000	15 000	5000
	Faza W	Impulsy dodatnie	17 000	15 000	9000
		Impulsy ujemne	23 000	27 000	9500

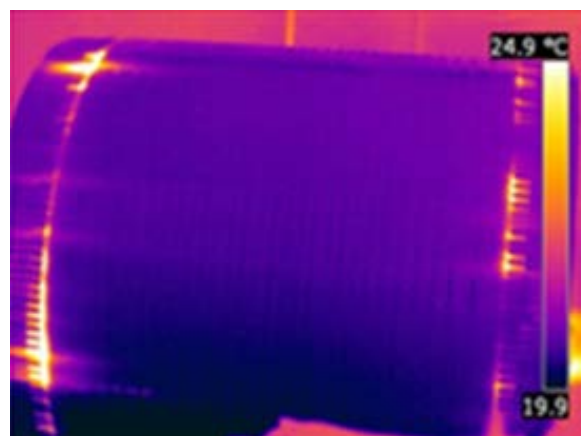
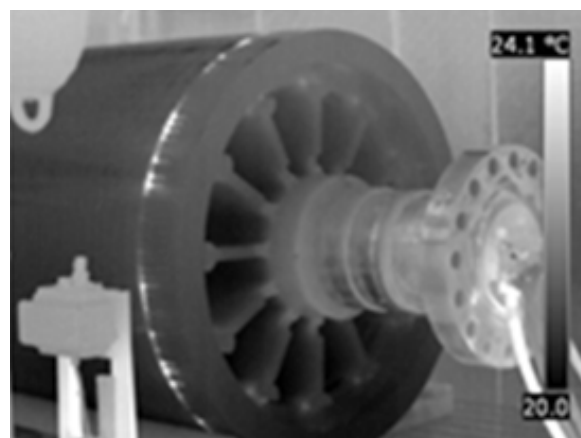
We wrześniu tego samego roku doszło do kolejnego uszkodzenia, o charakterze zwarcia doziemnego. W związku z rozbieżnymi stanowiskami użytkownika i wykonawcy remontu, dotyczącymi przyczyn awarii, zlecono przeprowadzenie niezależnej ekspertyzy w wyspecjalizowanym ośrodku zagranicznym. Analiza potwierdziła wystąpienie błędów w procesie przezwójowania, które doprowadziły do uszkodzenia izolacji i kolejnego zwarcia. Dlatego koszty ponownej naprawy silnika poniosła firma remontowa.

Analiza przypadku asymetrii elektromagnetycznej wirnika

W jednym z zakładów branży petrochemicznej zgłoszono problem nadmiernego hałasu generowanego przez silnik indukcyjny dużej mocy, występującego także przy pracy z niepełnym obciążeniem. Analiza strumienia poosiowego oraz widma prądów wskazywała na istotną asymetrię elektromagnetyczną, o charakterze typowym dla uszkodzeń wirnika [7]. Na podstawie wyników pomiarów diagnostycznych sformułowano wnioski o konieczności przeprowadzenia remontu lub wymiany wirnika.

Wirnik o masie około 15 ton był konstrukcją z całkowicie zamkniętymi żłobkami, a dokumentacja techniczna nie zawierała informacji dotyczących materiału prętów klatki. Z tego względu żadna z krajowych firm remontowych nie podjęła się wykonania naprawy, zwłaszcza że uszkodzenie nie było możliwe do potwier-

dzenia metodami wizualnymi. Wobec presji czasu, użytkownik zdecydował się na zakup nowego wirnika u zagranicznego producenta, pomimo bardzo wysokich kosztów oraz braku jednoznacznych dowodów potwierdzających wstępną diagnozę.

**Rysunek 12.** Zdemonтовany wirnik w zakładzie remontowym**Rysunek 13.** Termogramy nagranego wirnika

Nowy wirnik został dostarczony w krótkim czasie, a po jego zainstalowaniu silnik pracował prawidłowo w pełnym zakresie obciążenia, co pośrednio potwierdziło trafność wstępnej diagnozy. W celu weryfikacji przyczyn uszkodzenia postanowiono poddać stary wirnik dodatkowym badaniom. W przemysłowej stacji prób przeprowadzono jego nagrzewanie prądem o wartości 4 kA przez 24 h, a następnie wykonano pomiary termograficzne.

Uzyskane termogramy ujawniły liczne zwarcia blach pakietu w rejonach połączeń prętów z pierścieniami, występujące po obu stronach wirnika i rozmieszczone niesymetrycznie na jego obwodzie. Zwarcia te powodowały mostkowanie połączeń klatki, prowadząc do zaburzeń symetrii elektrycznej i magnetycznej wirnika, co było zgodne z wcześniejszymi obserwacjami diagnostycznymi.

Aktualny stan diagnostyki silników dużej mocy w Polsce oraz kierunki rozwoju

W ostatnich latach obserwuje się stopniowy wzrost zainteresowania zaawansowanymi metodami diagnostycznymi w obszarze eksploatacji silników elektrycznych dużej mocy [8]. Mimo to poziom wdrożenia nowoczesnych technik monitoringu w Polsce pozostaje zróżnicowany i w wielu przedsiębiorstwach nadal dominuje podejście reaktywne, polegające na wykonywaniu pomiarów dopiero po wystąpieniu nieprawidłowości [9]. Regularne badania profilaktyczne, obejmujące m.in. pomiary on-line wyładowań niepełnych, analizę widma prądów (MCSA), analizę strumienia poosiowego czy badania termograficzne, są stosowane głównie w dużych zakładach przemysłowych oraz w jednostkach posiadających własne zaplecze diagnostyczne [6,10,11].

Do najważniejszych wyzwań w obszarze diagnostyki należą: ograniczona dostępność specjalistycznych usług, brak standaryzacji procedur pomiarowych, niewystarczająca dokumentacja techniczna starszych maszyn oraz niedostateczne trendowanie parametrów diagnostycznych. W wielu przypadkach pojedyncze pomiary nie pozwalają na jednoznaczną ocenę stanu technicznego, co zwiększa ryzyko błędnych decyzji remontowych [12].

Kierunki rozwoju diagnostyki silników dużej mocy obejmują przede wszystkim wdrażanie systemów monitoringu ciągłego, integrację danych diagnostycznych z systemami zarządzania utrzymaniem ruchu (CMMS), rozwój metod analizy sygnałów opartych na uczeniu maszynowym oraz szersze wykorzystanie norm IEC, PN-EN [13] i IEEE w procesie oceny stanu technicznego.

Istotnym elementem jest również podnoszenie kompetencji personelu odpowiedzialnego za eksploatację i remonty maszyn, co pozwala na właściwą interpretację wyników pomiarów oraz podejmowanie decyzji opartych na danych.

W kontekście przedstawionych w artykule studiów przypadków widać wyraźnie, że rozwój diagnostyki predykcyjnej oraz systematyczne monitorowanie parametrów pracy maszyn mogą znacząco ograniczyć ryzyko awarii, skrócić czas przestojów oraz poprawić jakość wykonywanych remontów.

Podsumowanie i wnioski końcowe

Przedstawione w artykule studia przypadków potwierdzają kluczową rolę zaawansowanych metod diagnostycznych w ocenie stanu technicznego silników elektrycznych dużej mocy. Pomiary on-line wyładowań niepełnych, analiza widma prądów, analiza strumienia poosiowego oraz badania termograficzne umożliwiają wykrycie defektów na wczesnym etapie, często niewidocznych przy zastosowaniu tradycyjnych metod pomiarowych. Trendowanie parametrów diagnostycznych pozwala na identyfikację zmian o charakterze progresywnym, co znacząco zwiększa skuteczność podejmowanych działań utrzymaniowych.

Przypadki opisane w artykule pokazują, że błędy wykonawcze podczas remontów – takie jak nieprawidłowe ekranowanie koronowe, uszkodzenia izolacji podczas montażu czy niejednorodne połączenia prętów z pierścieniami – mogą prowadzić do szybkiej degradacji maszyn, a ich wykrycie jest możliwe jedynie przy zastosowaniu metod o wysokiej czułości diagnostycznej. Jednocześnie analiza sytuacji w Polsce wskazuje, że pomimo rosnącej świadomości znaczenia diagnostyki predykcyjnej, w wielu przedsiębiorstwach nadal brakuje systematycznego monitoringu oraz jednolitych standardów oceny stanu technicznego.

W świetle przedstawionych danych można sformułować następujące wnioski:

- zaawansowane metody diagnostyczne stanowią niezbędne narzędzie oceny stanu technicznego maszyn dużej mocy;
- regularne trendowanie parametrów diagnostycznych znacząco zwiększa skuteczność wykrywania defektów;
- weryfikacja jakości remontów powinna obejmować pomiary PD oraz analizy elektromagnetyczne;

- rozwój diagnostyki w Polsce wymaga standaryzacji procedur, szerszego wdrożenia monitoringu ciągłego oraz podnoszenia kompetencji personelu;
- integracja danych diagnostycznych z systemami utrzymania ruchu oraz wykorzystanie metod analitycznych opartych na uczeniu maszynowym stanowią kluczowy kierunek rozwoju.

Podsumowując, należy stwierdzić, że wdrożenie nowoczesnych metod diagnostycznych oraz systematyczne monitorowanie stanu technicznego maszyn pozwala na zwiększenie niezawodności eksploatacji, ograniczenie kosztów awarii oraz poprawę jakości procesów remontowych. Przedstawione przypadki jednoznacznie wskazują, że diagnostyka predykcyjna powinna stanowić integralny element strategii utrzymania ruchu w przedsiębiorstwach przemysłowych.

Bibliografia

- [1] Raporty z badań i ekspertyz w latach 1996–2003 udostępnione przez firmę ElektroInstal Kraków.
- [2] Dorrell DG, Thomson WT, 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):24–34.
- [3] Szymaniec S. Diagnostyka stanu izolacji uzwojeń i stanu łożysk silników indukcyjnych klatkowych w warunkach przemysłowej eksploatacji. Opole: Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej; 2006.
- [4] Petryna J, Guziec K, Weinreb K. Diagnostyka on-line wirujących maszyn elektrycznych prądu przemiennego przy użyciu systemów Stator- oraz Motor-Monitor. Materiały IV Konferencji Naukowo-Technicznej „Awaryjność i Diagnostyka w Energetyce”, Solina „Jawor”, październik 1998.
- [5] Petryna J. Diagnostyczna baza danych napędów elektrycznych w energetyce dla potrzeb remontowych. Materiały IV Konferencji Naukowo-Technicznej „Problemy i innowacje w remontach energetycznych”, Łądek Zdrój 28–30 listopada 2001.
- [6] Szymaniec S. Analiza wyników pomiarów wyładowań niepełnych w silnikach elektrycznych. *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne*. 2007;76:95–100.
- [7] Petryna J, Ławrowski Z, Sułowicz M, Guziec K. Diagnostowanie i weryfikacja termowizyjna silników indukcyjnych z asymetrią elektromagnetyczną. *Napędy i Sterowanie*. 2017;19(7–8):144–153.
- [8] Singh GK, Al Kazzaz SAS. Induction machine drive condition monitoring and diagnostic research – a survey. *Electric Power System Research*. 2003;64(2):145–158. [https://doi.org/10.1016/S0378-7796\(02\)00172-4](https://doi.org/10.1016/S0378-7796(02)00172-4).
- [9] Glinka T. Badania diagnostyczne maszyn elektrycznych w przemyśle. Katowice: BOBRME Komel; 2002.
- [10] Zając M, Sułowicz M, Petryna J. Partial discharges emission testing in the generator winding insulation in the time-frequency domain. In: 2018 International Symposium on Electrical Machines (SME). IEEE; 2018. <https://doi.org/10.1109/ISEM.2018.8442976>.
- [11] Stone GC, Boulter EA, Culbert I, Dhirani H. *Electrical Insulation for Rotating Machines*. Hoboken: IEEE Press; Wiley Interscience; 2004.
- [12] Glinka T. *Maszyny elektryczne i transformatory: podstawy teoretyczne, eksploatacja i diagnostyka*. Katowice: Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL; 2015.
- [13] PN-EN 60270:2003 (wersja polska) Wysokonapięciowa technika probiercza. Pomiary wyładowań niepełnych (IEC 270).