

**Karol Bielecki**  
FLUKE EUROPE BV, Warszawa

## **KORELACJA POMIARÓW TERMOWIZYJNYCH, WIBRACJI ORAZ OBCIĄŻENIA W PREDYKCYJNEJ DIAGNOSTYCE SILNIKÓW INDUKCYJNYCH KLATKOWYCH**

### **CORRELATE DATA FROM THERMOGRAPHY, VIBRATION AND ELECTRICAL LOAD TO MAKE PREDICTIVE MAINTENANCE FOR SQUIRREL-CAGE INDUCTION MOTORS**

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono metodę diagnostyczną silników indukcyjnych klatkowych polegającą na korelacji danych uzyskanych podczas pomiarów termowizyjnych, pomiarów wibracji oraz obciążenia elektrycznego. Prezentowane podejście wykorzystuje przyrządy pomiarowe współdziałające z urządzeniami mobilnymi umożliwiającymi przesyłanie danych pomiarowych do chmury danych. W dokumencie przedstawiono przykładowe wyniki zaprezentowane w czasie wdrożenia systemu diagnostycznego na linii produkcyjnej w zakładzie lakierniczym. Sformułowano wnioski dotyczące możliwości zastosowania tego rodzaju pomiarów do wspomagania predykcyjnego utrzymania ruchu.

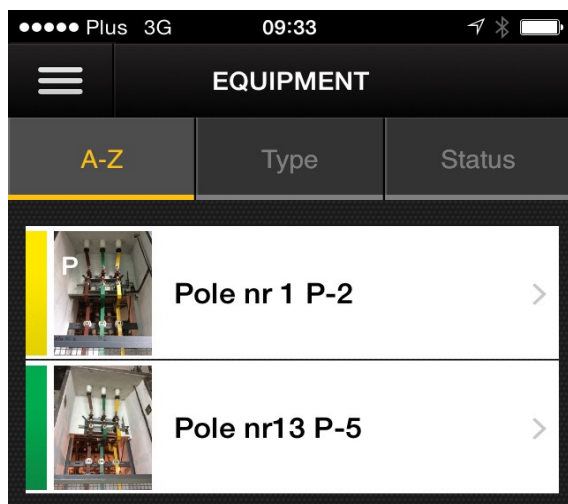
**Abstract:** This paper presents the diagnostic of method cage induction motors consisting correlation of data obtained during measurement of infrared, vibration and electrical load. Presented approach uses measuring devices interact with mobile devices to enable transmission of measurement data to the cloud. This document provides examples of the results presented during the implementation of the diagnostic system on the production line at the painting factory. Conclusions were drawn regarding the applicability of this type of measurement to support predictive maintenance.

**Słowa kluczowe:** *diagnostyka predykcyjna, diagnostyka silników indukcyjnych, pomiary termowizyjne*  
**Keywords:** *predictive maintenance, diagnosing squirrel-cage induction motors, thermal imaging*

#### **1. Wstęp**

Silniki elektryczne stanowią niejednokrotnie infrastrukturę krytyczną, od której zależy ciągłość całego procesu produkcyjnego. Stąd też biorą się daleko idące środki zapobiegawcze mające uchronić przed nieplanowanym i kosztownym remontem, do których należy predykcyjne utrzymanie ruchu. Metoda ta wiąże się z koniecznością przeprowadzania wielu pomiarów wielkości elektrycznych i nieelektrycznych, których wyniki wymagają wzajemnej korelacji i analizy celem wyciągnięcia właściwych wniosków o stanie maszyny. Wzajemna korelacja danych z urządzeń pomiarowych, takich jak kamery termowizyjne, wibrometry lub mierniki wielkości elektrycznych jest rozwiązaniem wymagającym dużego nakładu pracy związanej z transferem danych do komputera, jak i dalszym ich przetwarzaniem. Optymalizacja powyżej wspomnianego procesu jest możliwa z wykorzystaniem najnowszych technologii, takich jak chmura danych czy Internet of Things (IoT). Wyposażane w moduły komunikacyjne urządzenia pomiarowe wykorzystujące bez

przewodową komunikację Bluetooth lub Wi-Fi umożliwiające połączenie z urządzeniem mobilnym, takim jak smartphone lub tablet, który pełni funkcję Hub-a pomiędzy urządzeniami pomiarowymi a chmurą danych. W momencie dostępu do sieci GSM lub Wi-Fi w urządzeniu mobilnym następuje synchronizacja danych pomiędzy chmurą danych. Dedykowana urządzeniom mobilnym aplikacja umożliwia paszportyzację maszyn i urządzeń w obrębie zakładu przemysłowego, dając tym samym możliwość przypisania pomiaru w danym czasie do odpowiedniej maszyny, co zostało przedstawione na Rysunku nr 1. Aplikacja daje również możliwość zdefiniowania stanu maszyny poprzez przypisanie czterech możliwych stanów dodatkowo symbolizowanych różnymi kolorami. Dostęp do danych zgromadzonych w chmurze możliwy jest również z komputera osobistego poprzez przeglądarkę internetową, z której istnieje możliwość eksportu danych na dysk komputera.



Rys. 1. Paszportyzacja maszyn i urządzeń w obrębie zakładu przemysłowego w aplikacji mobilnej

W niniejszej publikacji zostaną przedstawione wyniki oraz wnioski z wdrożenia systemu predykcynego utrzymania ruchu z wykorzystaniem korelacji danych termowizyjnych, wibracji oraz obciążenia w jednym z zakładów nakładania powłok galwanicznych.

## 2. Pomiary w predykcynnej diagnostyce indukcyjnych silników klatkowych

### 2.1. Pomiary termowizyjne

Pomiary termowizyjne umożliwiają bezkontaktową metodę zobrazowania temperatur na powierzchni silnika elektrycznego. Z punktu widzenia diagnostyki predykcynnej pomiary termowizyjne pozwalają na wychwycenie pierwszych symptomów zużycia elementów tocznych, problemów z wentylacją, mogą także wskazywać na przeciążenie powodujące zwiększoną temperaturę silnika. Pomiar temperatury silnika istotny jest również z punktu widzenia stanu izolacji, bowiem zwiększenie temperatury pracy o 10°C w stosunku do temperatury znamionowej powoduje aż dwukrotne skrócenie żywotności izolacji. W przemyśle stosowane są dwie metody pomiarów termowizyjnych, które nazywane są odpowiednio inspekcją jakościową i ilościową. W Tabeli nr 1 przedstawiono porównanie dwóch powyższych metod. Ważnym parametrem podczas wykonywania pomiarów termowizyjnych jest obciążenie badanego urządzenia. W przypadku aparatów i urządzeń elektrycznych obciążenie obiektu powinno wynosić co najmniej 40% obciążenia znamionowego. W celu korelacji wartości obciążania elektrycznego diagnozowanych urządzeń, w zakładzie

opisywanym przez autora wykorzystano możliwość bezpośredniego połączenia poprzez protokół komunikacyjny Bluetooth kamery termowizyjnej oraz modułów pomiarowych z cęgamii Rogowskiego.

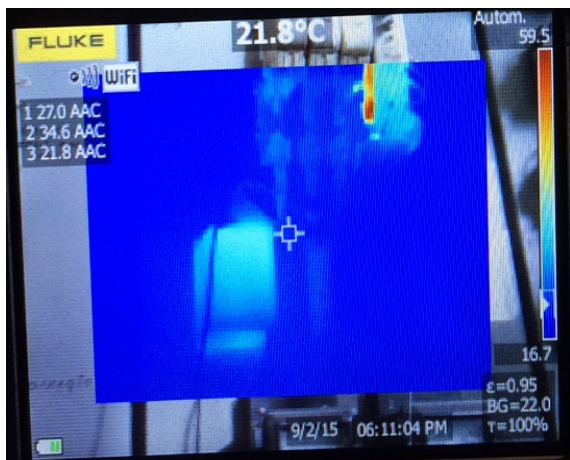
Tab. 1. Porównanie metody jakościowej i ilościowej.

Metoda pomiaru	
Jakościowa	Ilościowa
Nie ma konieczności wyznaczenia temperatury, aby określić występowanie problemu	Wymaga dokładnego odczytu temperatury
Nie ma konieczności regulacji emisyjności	Konieczność porównania z normami
Duża intuicyjność pomiaru	Konieczność śledzenia nawet niewielkich odchyłek

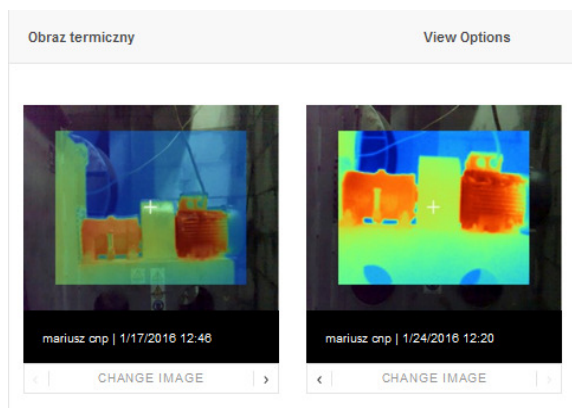
W ten sposób wartości natężenia prądu z poszczególnych faz zostały wyświetlone bezpośrednio na ekranie kamery termowizyjnej, co zostało pokazane na Rysunku nr 2. Tego typu podejście umożliwia dokładną analizę termogramu i jednoznaczne wskazanie przyczyny podwyższonej temperatury na danym elemencie urządzenia, do których należeć mogą: problemy z podwyższoną rezystancją przejścia, przeciążeniem lub asymetrią obciążenia. Podczas wykonywania pomiarów termowizyjnych, które wykonywane są w otwartej przestrzeni, należy zwrócić uwagę na kilka czynników zewnętrznych, mających wpływ na pomiar, a są to: oddziaływanie wiatru, oddziaływanie słońca, oddziaływanie nieba. Wiatr o prędkości 5m/s będzie powodował dwukrotne schładzanie się średnio rozwiniętej powierzchni.

W przypadku wykonywania pomiarów jakościowych diagnosta bazuje głównie na gradientach temperatur bez konieczności odczytywania dokładnej wartości temperatury. W opisywanej przez autora aplikacji pomiary termowizyjne wykonywane były w sposób regularny, a następnie przypisywane do odpowiedniego urządzenia w aplikacji mobilnej. Metoda ta pozwoliła na stworzenie bazy danych termogramów (Rysunek nr 3), analizę oraz wyznaczenie trendu zmian temperatury na poszczególnych elementach zespołu napędowego bezpośrednio w chmurze danych. Podejście to pozwoliło znacząco usprawnić i obniżyć czasochłonność pro-

cesu transferu i obróbki danych z wielu urządzeń pomiarowych.



Rys. 2. Bezprzewodowe połączenie kamery termowizyjnej z modułami pomiarowymi z cęgą Rogowskiego



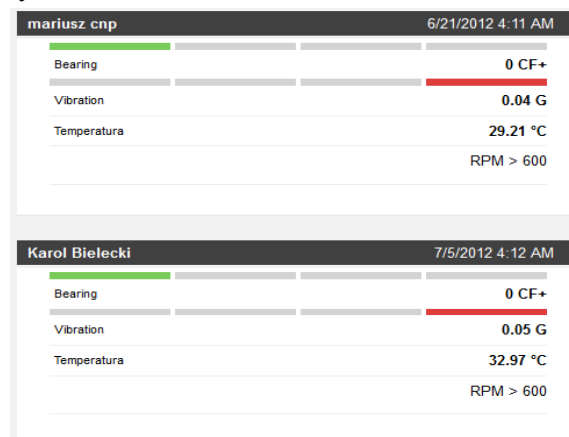
Rys. 3. Zgromadzone termogramy z wielu pomiarów w chmurze danych.

## 2.2. Pomiary ogólnego poziomu wibracji

Pomiar wibracji maszyn wirujących należy do jednych z narzędzi diagnostycznych, które są w stanie wskazać na pogorszenie kondycji maszyny w przedziale czasu od 1 do nawet 9 miesięcy przed wystąpieniem awarii. Drgania mogą być wynikiem dynamicznych skutków tolerancji wykonania, luzów, tarć tocznych. Często drgania o bardzo małej amplitudzie są w stanie wzbudzić drgania elementu maszyny o częstotliwości rezonansowej. Poza wyżej wymienionymi zjawiskami poziom drgań może być wywołany następującymi przyczynami:

- niewyważenie,
- nieosiowość,
- luzy mechaniczne,
- uszkodzenia łożysk.

W opisywanej przez autora aplikacji wykorzystano miernik ogólnego poziomu wibracji w przedziale 10Hz-10kHz, jak i współczynnika szczytu (CF ang. Crest Factor) zawartego w przedziale 4-20kHz. Zastosowany wibrometr posiadał również funkcjonalność komunikacyjną umożliwiającą połączenie z aplikacją mobilną oraz chmurą danych, co zostało zaprezentowane na Rysunku nr 4. Pomiary przeprowadzane były w trzech punktach testowych, które zdefiniowano w aplikacji mobilnej: na tarczy łożyskowej silnika od strony napędowej oraz na dwóch tarczach łożyskowych zamontowanych na wale pomiędzy silnikiem a wentylatorem.



Rys. 4. Dane ogólnego poziomu wibracji oraz współczynnika szczytu po przesłaniu do chmury danych

Zarejestrowane wibrometrem dane następnie były porównywane z ogólnym poziomem wibracji podanych w normach ISO 10816-1, 10816-3, 10816-7, co zostało zaprezentowane w Tabeli nr 2.

Tab. 2. Przedział prędkości drgań maszyn na podstawie normy ISO 10816

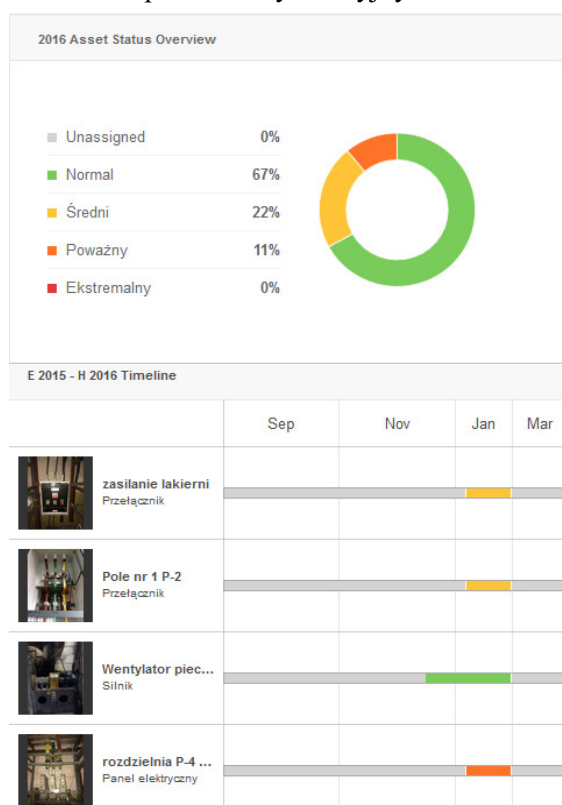
Urządzenie	mm/s	Klasa I	Klasa II	Klasa III	Klasa IV
		0,28	Green	Green	Green
0,45	Green	Green	Green	Green	
0,71	Green	Green	Green	Green	
1,12	Yellow	Green	Green	Green	
1,8	Yellow	Yellow	Green	Green	
2,8	Orange	Yellow	Yellow	Green	
4,5	Orange	Orange	Yellow	Yellow	
7,1	Red	Orange	Orange	Yellow	
11,2	Red	Red	Orange	Yellow	
18	Red	Red	Red	Yellow	
28	Red	Red	Red	Red	
45,9	Red	Red	Red	Red	

Porównanie zarejestrowanej wibrometrem wartości z normą umożliwiło przypisanie odpowiedniego stanu maszyny w aplikacji. Rejestrowane w dłuższym czasie pomiary pozwalają na automatyczne wygenerowanie trendu drgań w chmurze danych.

### 3. Wnioski

Aplikacja mobilna i technologia transferu danych z urządzeń pomiarowych do chmury pozwoliły na wsparcie systemu prewencyjnego utrzymania ruchu. Przypisywanie odpowiedniego stanu urządzenia na podstawie analizy i korelacji wielu pomiarów wielkości elektrycznych i nieelektrycznych pozwoliło na dokładne zaplanowanie czynności wykonywanych podczas przestojów remontowych. Zoptymalizowano równocześnie proces diagnostyki krytycznych maszyn i aparatów w obrębie zakładu nakładania powłok antykorozyjnych.

Obecnie system podlega rozbudowaniu o kolejne urządzenia, takie jak mierniki rezystancji izolacji oraz analizatory sieci, które umożliwią połączenie z aplikacją, a tym samym z chmurą danych.



Rys. 5. Graficzne przedstawienie stanu urządzeń w dziedzinie czasu