

# Diagnostyka silników wykorzystująca wielkości pomiarowe aparatury zabezpieczeniowej

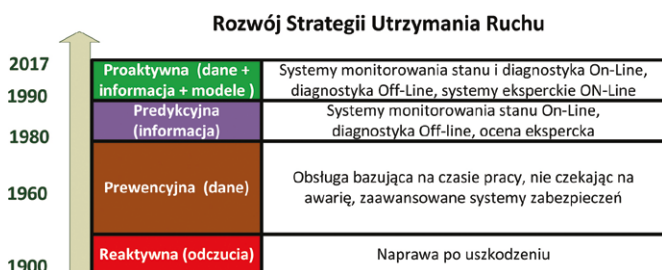
Andrzej Juszczak

## Wprowadzenie

Silniki stanowią ważny element systemu produkcyjnego, dlatego sposób podejścia do ich eksploatacji zwykle odbiega od tego, który jest stosowany dla pozostałych elementów systemu el-en. Uszkodzenie silnika może doprowadzać do ogromnych strat produkcyjnych, znacznie przewyższających koszty jego naprawy. Największe straty występują w przemyśle chemicznym i petrochemicznym. Dlatego w tych obszarach zauważa się bardzo duże zainteresowanie wykryciem anormalnego stanu, który zagraża przerwami w produkcji. Literatura [1] podaje, że uszkodzenie silnika średniej mocy generuje straty produkcyjne na poziomie ok. 220 000 zł, przy koszcie jego naprawy wynoszącym ok. 18 000 zł. Nawet jeśli ten stosunek w innych branżach nie jest aż tak duży, to i tak jest on znaczący. Służby utrzymania ruchu elektrycznego (UR) są z takiego zdarzenia rozliczane. Biorąc to pod uwagę, kierując się polityką obniżania kosztów, firmy zwiększają nakłady na utrzymanie ruchu. W publikacji [2] wykazano, że wzrost tych nakładów w ciągu 30 lat był ok. dziesięciokrotny. W 30% wynikało to z przestarzałej strategii UR, np. zbytecznych przeglądów silnika. A zatem wprowadzenie bardziej nowoczesnych metod eksploatacji przyczyniłoby się do redukcji tych nakładów i ograniczenia szeroko rozumianych kosztów.

W ostatnim stuleciu można zauważyć zmianę strategii służb utrzymania ruchu (UR). Przyczynia się do tego rozwój możliwości technicznych i wspomaganie ich decyzji. Zmiany w strategii w czasie przedstawiono na rys. 1.

Firmy, które optymalizują koszty i wdrożyły już nowoczesne strategie utrzymania ruchu, stawiają sobie za cel wcześniejsze wykrywanie awarii lub czynników, które do awarii mogą doprowadzić, tak, aby najpóźniej w momencie planowanego przestoju instalacji technologicznej móc zainterweniować i w ten sposób rozwiązać problem.

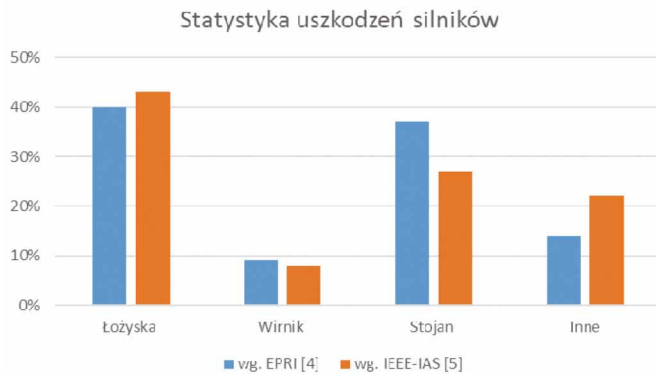


Rys. 1. Rozwój strategii Utrzymania Ruchu zachodzący pod wpływem rozwoju możliwości technicznych

**Streszczenie:** Silniki stanowią ważny element systemu produkcyjnego, a brak ich dostępności może wiązać się z poważnymi stratami dla przedsiębiorstwa. W ostatnim stuleciu widoczne jest przesunięcie strategii Utrzymania Ruchu z oczekiwania na awarię silnika (strategia reaktywna – początek XX wieku) na proaktywną. Obecnie dostępne są bardzo złożone systemy monitoringu wykrywające anomalie w silnikach. Poprzez porównywanie różnych przetworzonych informacji, zebranych w czasie pracy silnika, pozwalają wykrywać pogarszanie się jego stanu technicznego i sygnalizować obsłudze konieczność interwencji w dogodnym momencie dla procesu produkcyjnego. Okazuje się, że takie zadania diagnostyczne może również realizować przełącznik zabezpieczeniowy silnika, w oparciu o analizę mierzonych przez niego parametrów elektrycznych. Przykładem takiej diagnostyki jest wykrywanie uszkodzenia prętów wirnika, wykrywanie zwarć zwojowych stojana czy też kompleksowa diagnostyka ESA, bazująca na MCSA, zaimplementowana w zabezpieczeniu silnika Multilin 869 firmy General Electric (GE).

Obecnie w proaktywnej strategii UR stosuje się zarówno diagnostykę opartą na pomiarach statycznych, jak i dynamicznych, tzn. realizowanych w trakcie pracy silnika. Prawidłową ochronę silnika w sytuacji zjawisk szybkozmiennych realizują przełączniki zabezpieczeniowe. Skutkiem ich działania może być wyłączenie silnika. Natomiast zjawiska wolnozmiennne są obejmowane zarówno przez zabezpieczenia (sygnalizacja przeciążenia, asymetrii itp.), jak i diagnostyczne pomiary specjalistyczne nadzoru stanu technicznego silnika. Zwykle ocenę stanu technicznego online realizuje się poprzez pomiar temperatury oraz drgań. Wraz z rozwojem techniki pomiarowej niektóre techniki wykonywane wcześniej typowo offline, np. stan izolacji, są możliwe do realizacji w trybie online (tzn. przy pracującym silniku) [3].

Na rys. 2 przedstawiono statystykę uszkodzeń silników z ruchem bezpośrednim, wykonaną przez EPRI [4] na próbie 6312 silników WN oraz przez IEEE-IAS [5] na próbie 1141 silników WN. Badania te nie brały pod uwagę konstrukcji silników oraz ich przeznaczenia. Dają więc tylko ogólny statystyczny pogląd. Wyniki są bardziej reprezentatywne dla silników



Rys. 2. Statystyka uszkodzeń silników opracowana przez EPRI [4] oraz IEEE-IAS [5]

z łożyskami tocznymi. Dla silników z łożyskami ślizgowymi poziom uszkodzeń łożysk obniża się do kilkunastu procent, a przyczyny „Inne” do kilku procent. Dominują uszkodzenia stojana i wirnika. Natomiast poziom uszkodzeń prętów wirnika w silnikach klatkowych zależy od rodzaju rozruchu oraz od momentu obciążenia. Jeśli podczas rozruchu występuje moment pulsacyjny (np. kompresory), wówczas ilość awarii klatki wirnika znacznie wzrasta.

Rozwój techniki cyfrowej pozwolił na zwiększenie mocy obliczeniowej oraz rozmiaru pamięci urządzeń, co z kolei przyczyniło się do rozwoju i wdrożeń zaawansowanych funkcji diagnostycznych silnika. Wprowadzenie systemów nadzoru umożliwiło powstanie systemów eksperckich wspomagających prowadzenie ruchu. Systemy te rejestrują przetworzone dane i porównują je w czasie. W wielu systemach najpierw przechodzą one przez okres uczenia się charakterystycznych parametrów, tzn. zanotowania ich naturalnych, typowych wartości. Alarmy pojawiają się, jeśli dochodzi do odchylenia parametrów kryterialnych od ich właściwych poziomów. Zauważono, że dla diagnostyki bardzo przydatne są niektóre parametry elektryczne silnika, a źródłem do ich analizy są prądy i napięcia. Wiele zjawisk groźnych dla silnika jest widocznych w przebiegach tych wielkości. Jednak aby część z nich wychwycić, trzeba dysponować urządzeniami o bardzo dużej częstotliwości próbkowania i dużej dynamice pomiaru. W związku z tym dotychczas przekaźniki zabezpieczeniowe nie mogły wspierać takich funkcji diagnostycznych. Jednak rozwój elektroniki sprawia, że staje się to już możliwe do realizacji. Przykładem może być General Electric, która umieściła w zabezpieczeniu silnika Multilin 869 zaawansowane funkcje diagnostyczne. Gromadzą one w pamięci parametry związane z silnikiem, uczą się ich, a jeśli dochodzi do ich odchylenia, sygnalizują to obsłudze. W połowie 2017 roku firma GE wprowadziła w tym typie urządzenia firmware z opcjonalnym modułem diagnostyki ESA, z językiem polskim w menu urządzenia oraz oprogramowaniu narzędziowym. Nacisk ze strony GE w Polsce, aby w tym produkcie był zaimplementowany także język polski, wynika ze świadomości ogromnej użyteczności tego urządzenia w polskim przemyśle. Obejmuje ona detekcję uszkodzenia łożysk, uszkodzeń mechanicznych (niewspółosiowość wału,

łuzna podstawa, brak centryczności statycznej lub dynamicznej) oraz uszkodzeń uzwojenia stojana, które zwykle wnoszą do układu elektrycznego asymetrię, zauważalną przez diagnostykę ESA. Skuteczność ESA jest na podobnym poziomie jak systemów eksperckich MCSA, bazujących na sygnałach elektrycznych, a zwykle analizujących silnik podczas przeglądu silnika. W przypadku ESA w Multilin 869 diagnostyka jest ciągła, realizowana w trakcie pracy silnika i niewprowadzająca żadnej dodatkowej aparatury poza tą, która jest typowo używana przez przekaźniki zabezpieczeniowe.

## 2. Możliwości realizacji diagnostyki silnika podczas jego pracy

Możliwość realizacji diagnostyki silnika, która opierałaby się na monitoringu zmian wielkości charakterystycznych dla niego, zaistniała dopiero po wprowadzeniu techniki mikroprocesorowej. Jednak można zauważyć, że producenci zabezpieczeń nie byli mocno zainteresowani wejściem w ten obszar. Koncentrowano się głównie na funkcjach zabezpieczeniowych, a jeśli jakieś parametry były zapamiętywane (np. prąd rozruchu, czas rozruchu itp.), były to zwykle zapamiętane wartości dotyczące ostatniego rozruchu, pomocne do weryfikacji nastawień funkcji zabezpieczeniowych. Najbardziej zaawansowaną funkcją związaną z monitoringiem stanu silnika była rejestracja prądu rozruchowego. Wszystkie pomiary były realizowane w wąskim paśmie częstotliwości, wynikającym z potrzeb techniki zabezpieczeniowej (tzn. próbkowanie zwykle 1–1,6 kHz, zakres pomiaru składowej podstawowej: 40–70 Hz). Nie zauważało się kompleksowego podejścia do zagadnienia prewencji. Może dlatego, że ich konstrukcje opracowywali inżynierowie związani z zabezpieczeniami a nie z procesami technologicznymi. Dlatego widoczny był brak zrozumienia takich potrzeb.

Przykładem znaczącego przełomu w tym obszarze jest zabezpieczenie silnika typu Multilin 869 firmy GE (rys. 3). Przyglądając się mu bliżej, od razu zauważa się, że diagnostyka silnika nie jest jakimś dodatkiem, ale istotną funkcją przez niego realizowaną. Przetwarzanie sygnałów pomiarowych jest dostosowane do jej potrzeb, tzn. częstotliwość próbkowania przetwornika analogowo-cyfrowego wynosi 6,4 kHz, a zakres pomiaru składowej podstawowej: 3–72 Hz. Cechuje go też wymagana ogromna dynamika pomiaru, niezbędna przy tego typu metodach.



Rys. 3. Zabezpieczenie silnika Multilin 869, wyposażone w zaawansowane funkcje diagnostyczne silnika

Wg standardu ISO 17359 [6] do prawidłowej oceny stanu silnika wykorzystuje się:

- prąd, napięcie, moc pobieraną i oddawaną;
- temperaturę;
- prędkość obrotową;
- drgania;
- moment;
- opór;
- hałas i techniki akustyczne;
- ciśnienie oleju, jego zużycie i skład (trybologia).

Pierwsze dwa mogą być dostępne w przekaźniku zabezpieczeniowym poprzez wejścia analogowe i czujniki temperaturowe PT100 (lub innego typu).

Obecnie w zaawansowanej diagnostyce silnika najczęściej korzysta się z [7]:

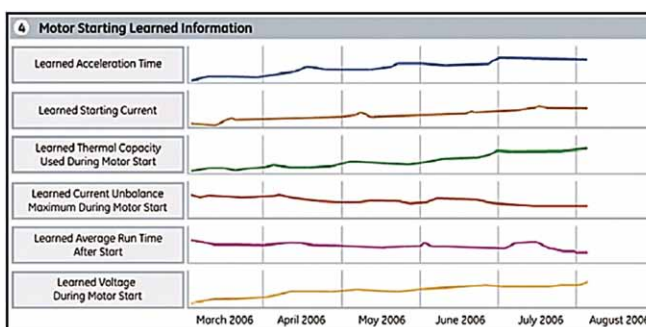
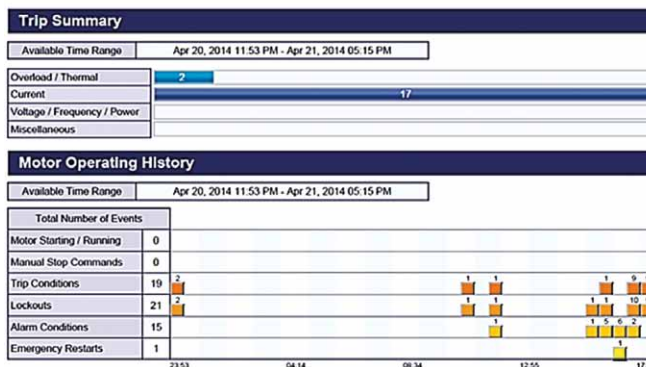
- analizy prądów i napięć silnika;
- pomiaru temperatury i otoczenia;
- pomiaru i analizy drgań;
- analizy oleju i trybologii;
- technik ultradźwiękowych;
- analizy strumienia magnetycznego.

Multilin 869 korzysta z pierwszych dwóch technik. Należy zauważyć, że sama możliwość pomiaru prądów napięć i temperatury nie jest w pełni tego słowa znaczeniu diagnostyką. Dopiero ich rejestracja w długich okresach czasu, monitoring z możliwością prezentacji zmian w postaci raportów trendu/anomalii oraz sygnalizacji zmiany wartości parametrów, właściwych dla danego silnika, można nazwać funkcją diagnostyki silnika. Tylko wówczas tak zrealizowana funkcja staje się użyteczna dla służb eksploatacji (UR). Aby się tak stało, konieczny jest dostęp do automatycznie tworzonych raportów z monitoringu diagnostycznego. Jeśli raporty nie tworzą się automatycznie i trzeba sięgać po zarchiwizowane gdzieś dane, to mało kto po nie sięgnie. Multilin 869 tworzy automatycznie pakiet raportów określających sprawność silnika pod nazwą „Health Report”.

Pakiet pogrupowany jest w siedem kategorii (rys. 4):

- dane silnika – prezentuje wcześniej wpisane do 869 podstawowe dane charakteryzujące silnik (prąd znamionowy, napięcie znamionowe) oraz jego czas pracy;
- przegląd stanu – podsumowuje zgromadzone dane historyczne w 250 zapisanych rekordach. Każdy rekord jest tworzony w momencie rozruchu silnika. W raporcie prezentowane są informacje z najstarszego rekordu (lub innego wybranego) i ostatniego z podaną procentową zmianą, tak aby móc ocenić, jak bardzo zmieniły się parametry podczas eksploatacji silnika. Rekord zawiera:
  - prąd maksymalny oraz czas rozruchu,
  - przyrost cieplny podczas rozruchu, średni prąd, moc czynną i bierną, współczynnik mocy,
  - średni czas pracy oraz wartość prądu obciążenia w tym czasie (prąd rozruchu jest z tej rejestracji wyłączony);
- zapamiętane wartości podczas rozruchu – dane historyczne zapisane w 250 rekordach – szczegóły powyżej. W każdej chwili można wybrać dowolne dwa rekordy (znacznik czasu) i porównać zmianę w wybranym okresie;

Status	Parameter	% Change	Oldest Record (Apr 20, 2014)	Latest Record (Apr 21, 2014)
Green	Acceleration Time	Increased	0.0 s	4.9 s
Green	Starting Current	Increased	0.0 A	499.9 A
Green	Starting Capacity		0 %	0 %
Red	Average Motor Load	Increased 16200.0 %	0.01 xFLA	1.63 xFLA



Record Number	Date	Item Name	Value	Value
3	Aug 21 2014	Learned Acceleration Time	0.0 s	0.0 s
2	Aug 18 2014	Learned Start Current	0.0 xFLA	0.0 xFLA
1	Aug 14 2014	Learned Start TCU	0 %	0 %
		Last Acceleration Time	0.0 s	0.0 s
		Last Starting Current	0.0 xFLA	0.0 xFLA
		Last Start TCU	0 %	0 %
		Learned Average Load	0.00 xFLA	0.00 xFLA
		Learned Average KW	0.00 KW	0.00 KW
		Learned Average Kvar	0.00 Kvar	0.00 Kvar
		Learned Average PF	0.00	0.00
		Average Run Time (Days)	1 days	0 days
		Average Run Time (hr/min)	03:10 hr/min	00:00 hr/min

Rys. 4. Multilin 869 – wybrane okna z raportów diagnostycznych

- statystyka wyłączeń silnika – podsumowuje wszystkie wyłączenia silnika z podaniem przyczyny wyłączenia (np. przeciążenie, kryteria nadprądowe, napięciowe itd.);
  - historia operacji sterowania przez obsługę, z rozróżnieniem sterowania z technologii, w polu, czy też wyłączeń awaryjnych;
  - 59-sekundowy rejestrator rozruchu (pierwszy po uruchomieniu pola lub wcześniejszym skasowaniu, jako referencyjny, oraz 5 ostatnich) – zapisuje:
    - średnią wartość RMS prądów fazowych i doziemnego, napięć, mocy czynnej, biernej, współczynnika mocy,
    - częstotliwość oraz stanu pracy silnika.
- Celem gromadzenia powyższych danych jest wizualizowanie trendu w oparciu o zapisane dane historyczne oraz

reklama

prezentowanie szybkiego podglądu stanu i danych diagnostycznych. Pozwala to na szybką identyfikację problemów związanych z procesem i poinformowanie o koniecznych działaniach eksploatacyjnych, niezbędnych, aby uniknąć awarii.

59-sekundowy rejestrator rozruchu pozwala na:

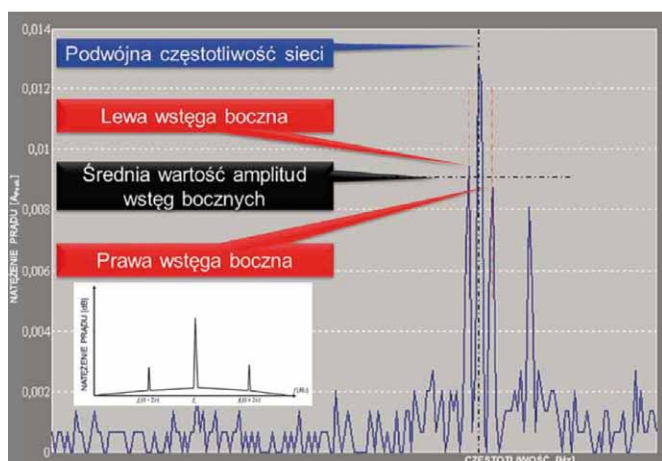
- zrozumienie procesu rozruchu;
- wykrycie powodu nieudanego rozruchu;
- przeprowadzenie analizy wpływu rozruchu dużych silników na źródło zasilania;
- koordynację sekwencji rozruchu wielu dużych silników.

### 3. Metody diagnostyki stanu prętów w klatce wirnika

Klasycznym sposobem monitorowania stanu technicznego silników WN jest nadzór drgań instalowanych w węzłach łożyskowych oraz nadzór temperatury łożysk i uzwojeń. Dane te są dostarczane do specjalistycznych systemów eksperckich, które wychwytyją anomalie w pozyskanych danych. W oparciu o czujniki drgań można wykryć charakterystyczne drgania silnika, które są związane z uszkodzeniem klatki wirnika. Znane są też metody analizy strumienia magnetycznego w szczeliny powietrznej, poprzez zamontowany w silniku czujnik, analizę pola magnetycznego w kierunku osiowym silnika, analizę prędkości obrotowej wirnika, analizę wektorową prądu za pomocą transformaty Parka [8].

Innym sposobem wykrycia uszkodzeń w klatce wirnika jest analiza widma prądu silnika. Metoda ta jest od wielu lat stosowana w ramach badań diagnostycznych offline, pod nazwą MCSA [9]. Ostatnio zaczynają się pojawiać takie systemy do badań online (podczas pracy maszyny). Przykład takiej analizy widmowej przedstawiono na rys. 5.

Algorytm działania polega na wykryciu charakterystycznych dla uszkodzenia klatki wstęg bocznych. Ich poziom świadczy o stopniu uszkodzenia klatki wirnika. W zależności od ich poziomu utrzymanie ruchu (UR) będzie poinformowane, czy dalej można używać silnika, czy należy śledzić dalsze zmiany, zwiększyć częstotliwość śledzenia, włączyć analizę drgań mechanicznych, zaplanować naprawę lub wymianę wirnika, lub jest już tak bardzo źle, że trzeba to zrobić natychmiast. Pewnym ograniczeniem klasycznej metody, podawanym



Rys. 5. Klasyczna metoda (MCSA) wykrywania uszkodzenia połączenia w klatce wirnika w oparciu o analizę widma prądu silnika [8]

przez literaturę, jest wymagany poziom obciążenia: więcej niż 70% znamionowego. W literaturze można znaleźć zależność analityczną estymacji wzrostu wstęg modulacyjnych od liczby uszkodzonych prętów klatki:  $n = f(R, N, p)$ , gdzie  $n$  – estymowana liczba uszkodzonych prętów;  $R$  – liczba żłobków wirnika;  $N$  – obniżenie średniej wartości wstęg bocznych w stosunku do poziomu składowej częstotliwości sieci;  $p$  – liczba par biegunów.

### 4. Zaawansowana diagnostyka stanu klatki wirnika w Multilin 869

Wczesne wykrycie degradacji klatki jest bardzo ważne, gdyż tego typu uszkodzenie może doprowadzić silnik do poważnej i kosztownej naprawy na skutek zwiększonych drgań przyspieszających zużycie łożysk, przegrzania silnika lub mechanicznego uszkodzenia. Na tego typu uszkodzenia podatne są szczególnie silniki z rozruchem ciężkim, pulsacyjnym obciążeniem (np. kompresory) lub posiadające defekt fabryczny.

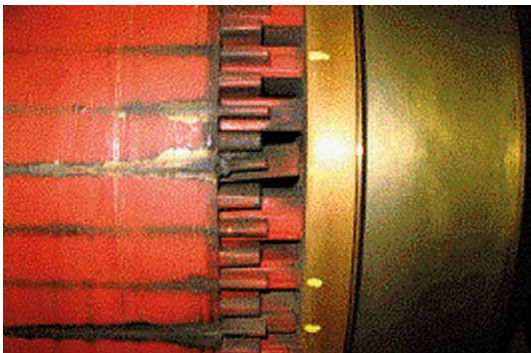
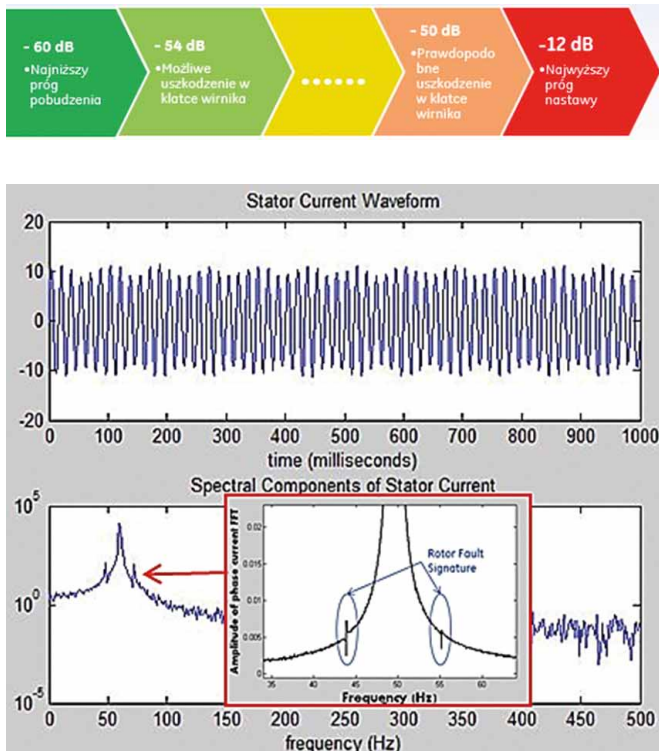
Diagnostyka opiera się na analizie zbliżonej do MCSA (widma prądu). Aby przebieg mógł ją realizować, musi cechować się bardzo dużą częstotliwością próbkowania. Jak wspomniano wcześniej, 869 dysponuje 128 próbkami na okres oraz ogromnym zakresem pomiarowym. Umożliwia mu to wykrycie wstęg bocznych o niskim poziomie sygnału, charakterystycznych dla tego typu uszkodzenia. Znajdują się one blisko częstotliwości sieciowej, jednak ich miejsce w dziedzinie częstotliwości zależy między innymi od bieżącego poślizgu silnika.

W normalnych warunkach pracy w wirniku jest obecny tylko prąd będący iloczynem poślizgu ( $s$ ) oraz częstotliwości sieciowej ( $f_s$ ). Już nawet częściowo uszkodzony pręt wirnika (zawężony przekrój) powoduje asymetrię w uzwojeniu wirnika (klatki), wytwarzając pole magnetyczne o częstotliwości  $(-s \cdot f_s)$ . Pole o ujemnym poślizgu częstotliwości wytwarza w stojanie komponent  $f_s \cdot (1 - 2 \cdot s)$ . Powoduje to powstanie momentu elektromagnetycznego, oscylacji prędkości obrotowej o amplitudzie dwóch częstotliwości poślizgu oraz składowych prądu stojana:  $f_s \cdot (1 \pm 2 \cdot n \cdot s)$ , gdzie  $n$  – kolejna liczba całkowita licząc od 1, która przedstawia kolejne harmoniczne. Największą amplitudę osiąga przy  $n = 1$ . Ten komponent w rozdziale poprzednim został nazwany wstęgą boczną prądu (rys. 5). W 869 metoda ta jest nazwana metodą klasyczną.

W Multilin 869 zrealizowano aż dwie metody wykrycia uszkodzenia prętów klatki:

- klasyczny algorytm MCSA bazujący na FFT, pozwalający wykryć wstęgi boczne oraz zmierzyć w dB ich amplitudę (metoda widma prądu – opis powyżej, rys. 6);
- opatentowana przez GE zmodyfikowana metoda demodulacji, bazująca na analizie FFT mocy chwilowej uzyskanej ze splotu wartości chwilowych prądu i napięcia (rys. 7).

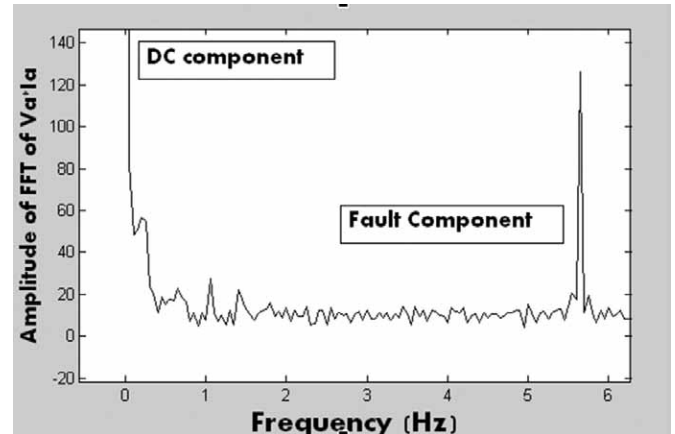
Słaba strona metody klasycznej wynika z zależności częstotliwości i amplitudy wstęg bocznych od poślizgu znamionowego, napięcia oraz częstotliwości sieciowej. Wymaga wprowadzenia większej ilości nastaw. Algorytm musi być poinformowany o zakresie potencjalnych odchyłek częstotliwości wstęg bocznych, na skutek np. innej wartości poślizgu niż znamionowy, co jest związane z różnym poziomem obciążenia. Do określenia zakresu zmian podano wzory na obszar, w którym algorytm musi poszukiwać wstęgi. Początek



Rys. 6. Multilin 869 – klasyczna metoda wykrywania uszkodzenia połączenia w klatce wirnika w oparciu o analizę widma prądu silnika

zakresu to  $2 \cdot s \cdot f_s - \max(0,3; \min(2 \cdot s \cdot f_s - 0,4; 1))$ . Koniec zakresu to  $2 \cdot s \cdot f_s + \max(0,3; \min(2 \cdot s \cdot f_s - 0,4; 1))$ . Próg alarmowy nastawia się w decybelach amplitudy wstęgi, odniesionej do amplitudy podstawowej. Przykładowo dla maszyny 50 Hz o poślizgu znamionowym 2%, zgodnie ze wzorami podanymi powyżej, wstęga boczna znajdzie się w zakresie przy częstotliwości 50 Hz: 47–49 Hz – po lewej stronie 50 Hz oraz 51–53 Hz – po prawej stronie 50 Hz. Przy mniejszych uszkodzeniach klatki asymetria jest na tyle mała, że trudno wyłowić ją w szumie, dlatego ogromna dynamika pomiaru jest kluczowa dla tego typu rozwiązań.

Czulszą i dokładniejszą metodą jest metoda demodulacji mocy FFT. Po demodulacji uzyskuje się składową stałą, która reprezentuje komponent o częstotliwości sieciowej oraz wstęgę boczną (*Fault component* na rys. 7) o częstotliwości  $2 \cdot s \cdot f_s$  (dla podanego przykładu silnika: 2 Hz). Dodatkowe przetworzenie sygnału poprzez splot z napięciem zmniejsza poziom szumów harmoniczných (porównanie rys. 6 i rys. 7), zwiększa kontrast



Rys. 7. Multilin 869 – zmodyfikowana metoda demodulacji FFT mocy

pomiędzy wstęgą boczną a składową podstawową, zwiększa dokładność algorytmu oraz czułość i pewność działania. Zmniejsza się też podatność detekcji na zmiany obciążenia lub częstotliwości.

Jeśli zmodyfikowana metoda (patent GE) jest lepsza od konwencjonalnej, to rodzi się pytanie: dlaczego w 869 dostępne są aż dwie metody? Wynika to z faktu, że do metody z demodulacją niezbędne jest podłączenie do Multilin 869 przekładników

reklama



napięciowych, co nie zawsze może mieć miejsce. Drugim powodem jest fakt, że aby metoda ta była dokładna, poziom napięcia musi być większy niż 0,5 Un. Jeśli ten poziom jest mniejszy (np. nie podłączono napięcia), to 869 korzysta z algorytmu klasycznego. A jeśli jest powyżej tego progu napięcia, wówczas metoda klasyczna jest deaktywowana, a uaktywnia się algorytm z demodulacją. Jak potwierdziły liczne przeprowadzane testy metody z demodulacją oraz wdrożenia, algorytm jest w stanie wykryć pojedyncze uszkodzenie pręta. Przykładowo dla silnika o 22 prętach i wysokości pręta 18 mm nawiercenie otworu o głębokości 12 mm w jednym pręcie stwarza warunki do wykrycia takiego stanu przez algorytm z demodulacją (rys. 8).

### 5. Diagnostyka stanu uzwojenia stojana w Multilin 869

Uproszczony schemat uzwojenia stojana dla układu trójfazowego z uszkodzeniem w uzwojeniu fazy A pokazano na rys. 9.

W układzie symetrycznym wszystkie fazy posiadają taką samą liczbę uzwojeń. Wielkości fazowe można zamienić na składowe symetryczne, gdzie  $V_1$  oraz  $I_1$  oznaczają składową zgodną napięcia oraz prądu,  $V_2$  oraz  $I_2$  oznaczają składową przeciwną napięcia oraz prądu. Taki układ stojana można przedstawić za pomocą poniższej macierzy.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

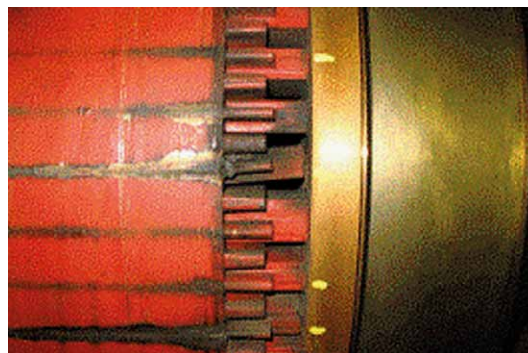
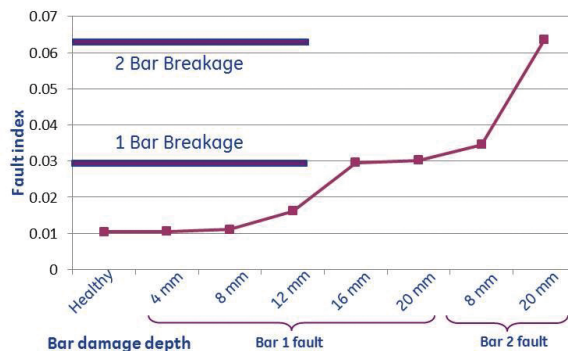
Gdy uzwojenia są symetryczne, impedancje skrośne  $Z_{21}$  oraz  $Z_{12}$  są zbliżone do zera.

Po podstawieniu parametrów elektrycznych silnika do macierzy i wyliczeniu stosunku  $Z_{21}$  do  $Z_{11}$ , przy założeniu, że  $Z_{12} \ll Z_{11}$  równanie przyjmuje postać:

$$\frac{Z_{21}}{Z_{11}} = \frac{V_2 - Z_{22} \cdot I_2}{V_1}$$

gdzie:  $\frac{Z_{21}}{Z_{11}}$  jest wartością kryterialną.

W rzeczywistości uzwojenie nigdy nie jest symetryczne, stąd algorytm po załączeniu uczy się wartości tego stosunku tak, aby



Rys. 8. Multilin 869 – czułość działania zmodyfikowanej metody demodulacji FFT mocy

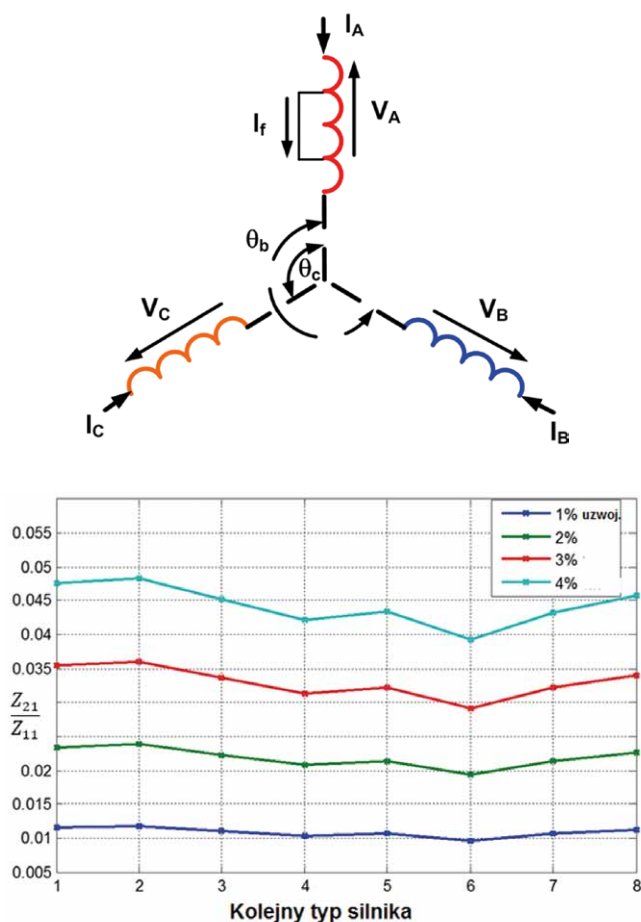
następnie odejmować go od wartości zmierzonej przed porównaniem z nastawą. W ten sposób uzyskuje się zwiększenie czułości działania. Jedynym istotnym parametrem, który należy wprowadzić do algorytmu, jest składowa przeciwna impedancji, reprezentowana przez  $Z_{22}$ . Wartość tę można wyliczyć w oparciu o dane maszyny, wg wzoru podanego w dokumentacji, lub ją zmierzyć podczas uruchomienia silnika, wprowadzając do obwodu asymetrię. Innym sposobem jest skorzystanie z rejestratora zakłóceń. Można go wyzwolić od asymetrii tak, aby zarejestrował przebieg podczas dowolnego zwarcia asymetrycznego w sieci. Następnie odczytać rejestrację i obliczyć pożądaną wartość. Algorytm jest niezależny od obciążenia, asymetrii powodowanej przez źródło zasilania. Jest w niewielkim stopniu zależny od konstrukcji maszyny (także jej mocy), co pokazano na rys. 9 po prawej stronie.

### 6. Kompleksowa diagnostyka uszkodzeń silnika ESA dostępna w Multilin 869 firmy GE

Implementacja złożonych systemów diagnostycznych silnika nie jest pionierskim efektem pracy działu rozwoju opracowującego Multilin 869. Tymi zagadnieniami General Electric zajmuje się od wielu dziesiątek lat, tyle że w innej dywizji – przemysłowo-technologicznej (GE POWER CONTROLS).

reklama

reklama



Rys. 9. Schemat uzwojenia stojana silnika trójfazowego oraz – poniżej – zmierzona wartość kryterialna funkcji typu silnika dla zwarć międzyzwojowych, obejmujących 1%, 2%, 3%, 4% uzwojenia stojana

Implementacja ESA jest więc ukoronowaniem wieloletnich doświadczeń inżynierów zajmujących się diagnostyką elementów procesu technologicznego w przemyśle, w których silnik jest jednym z ważniejszych elementów wpływających na ciągłość jego pracy. Przed pojawieniem się ESA w Multilin, dział zajmujący się w GE technologią przemysłową wdrożył ESA w dedykowanym do tego celu urządzeniu AnomAlert, służącym do monitorowania i kompleksowej diagnostyki silnika podczas jego pracy. Doświadczenia zebrane z instalacji tych urządzeń w przemyśle przełożyły się bezpośrednio na opracowanie ESA w Multilin 869. Jest to więc dojrzała metoda z potwierdzoną i zweryfikowaną skutecznością działania. Innowacją jest to, że udało się te funkcje umieścić w przekaźniku zabezpieczeniowym bez potrzeby instalacji dodatkowego specjalnego oprzyrządowania.

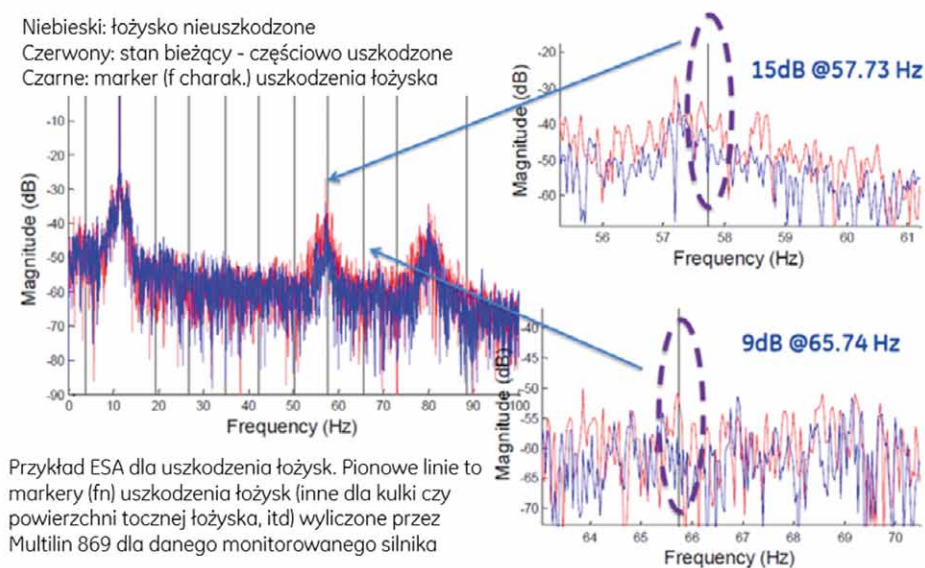
ESA (*Electrical Signature Analysis*) – analiza sygnatury prądu stojana w silniku, algorytm opatentowany przez General Electric, to

obserwacja anomalii wartości prądu (mocy) w dziedzinie częstotliwości, odniesiona do naturalnego tła wynikającego z asymetrii konstrukcyjnej lub zasilania. Przeznaczona jest do wykrywania następujących typów uszkodzeń silnika:

- uszkodzenia łożysk, w tym defektu zewnętrznej oraz wewnętrznej powierzchni łożyska, po której toczą się kulki lub uszkodzenie samych kulek łożyska;
- uszkodzeń mechanicznych silnika, związanych z przemieszczaniem się wirnika w odniesieniu do osi centralnej stojana;
- uszkodzeń uzwojeń stojana lub wirnika (asymetria elektryczna i magnetyczna układu).

Degradacja silnika, przejawiająca się wszelkimi anomaliami lub niesymetrami, powoduje jego niestabilną pracę. Zauważa się wówczas drgania, hałas, nagrzewanie itp. Silnik nie jest w pełni symetryczny, a jego zasilanie też może cechować asymetria. Jak czule odróżnić asymetrię wynikającą z degradacji silnika od asymetrii zasilania czy konstrukcyjnej? ESA jest





**Rys. 10.** ESA – wykres i tabela amplitud sygnatur w dziedzinie częstotliwości z naniesionymi markerami (linie pionowe); kryterium działania ESA monitoruje zmianę amplitud markerów danego typu uszkodzenia

metodą zbliżoną do metody MCSA – używanej przez specjalistyczne systemy eksperckie diagnostyki offline silników, a bazującej na złożonej aparaturze oraz doświadczeniach ekspertów. ESA stanowi rozwinięcie MCSA, przy założeniu detekcji niesprawności podczas pracy silnika i braku instalacji dodatkowej aparatury w polu. Sygnały będące przedmiotem analizy pochodzą z tego samego przetwarzania, które wykonywane są na potrzeby zabezpieczenia silnika.

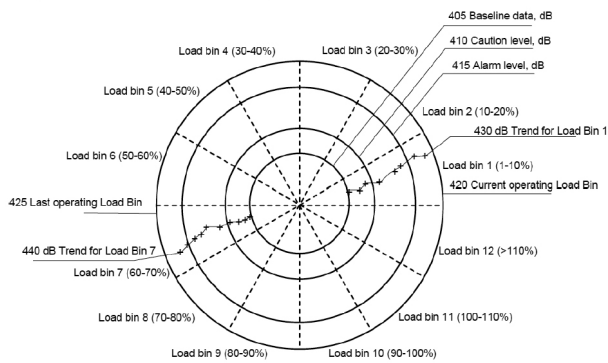
Aby uzyskać wysoką wiarygodność otrzymywanych wyników, ESA analizuje i weryfikuje, czy jakość parametrów elektrycznych wpływających na jej działanie jest wystarczająca dla uzyskania należytej selektywności (tzn. u, i, f, THD). Jeśli ocena jest pozytywna, następuje jej uaktywnienie. W sposób ciągły przeprowadza pomiar FFT prądu i mocy w odpowiednim paśmie częstotliwości, budując w swojej pamięci macierz charakterystyk amplitud FFT funkcji częstotliwości odniesionych do składowej podstawowej prądu silnika. Dla danego typu uszkodzeń, asymetrii lub nienormalnego stanu pracy silnika, w oparciu o podstawowe informacje dotyczące silnika, ESA wyznacza charakterystyczne dla danego typu uszkodzenia częstotliwości (markery) funkcji prądu obciążenia (rys. 10). Po wprowadzeniu do ruchu silnika oraz przejściu do stanu jego normalnej pracy uruchamiany jest automatycznie proces uczenia się monitorowanych markerów (charakterystycznych parametrów ESA) oraz zarejestrowanych charakterystyk amplitud funkcji częstotliwości. Wartości te są wyznaczone i zapisywane indywidualnie dla poszczególnych przedziałów prądów (Load bin – procent  $I_n$ , rys. 11) z rozdzielczością 10%  $I_n$  silnika. Taki sposób analizy czyni ESA niewrażliwym na zmiany obciążenia, a zatem zmiany poślizgu. Zarejestrowane wartości tworzą macierzę z danymi, stanowiącą odniesienie algorytmu analizy ESA. Uczenie się charakterystyk prądowych i mocowych służy do zwiększenia czułości detekcji – wyeliminowania asymetrii konstrukcyjnej lub zasilania. ESA obserwuje zmiany i właśnie to one stanowią

kryterium działania. Dane są prezentowane w postaci różnych, łatwych do interpretacji wykresów.

Co jest istotne, nawet jeśli moduł ESA nie wypełnił jeszcze całej matrycy, jest aktywny i gotowy do działania. Jeśli pojawi się obciążenie silnika, które jeszcze nie występowało, a więc parametry charakterystyczne nie zostały jeszcze zapamiętane, układ przechodzi w tryb uczenia się i wartości te zapisuje w matrycy pamięci. Dane historyczne zapisanego rejestru są dostępne w Multilin 869 lub są możliwe do odczytu zdalnego przez oprogramowanie EnerVista. Możliwa jest więc w dowolnym momencie obserwacja śladu zmian dla charakterystycznych parametrów.

Podczas pracy silnika ciągle wyliczane i zapisywane są w dB wartości amplitud prądów i energii dla markerów (tabela, rys. 12). Jeśli przekraczają one dwustopniowy próg alarmowy, wówczas użytkownik jest o tym powiadamiany. Może zapoznać się z szybkością tych zmian i prawidłowo ocenić, jak szybko należy zareagować, aby nie doszło do awarii skutkującej wyłączeniem. Dalsze śledzenie wartości dla charakterystycznych markerów pozwala zaobserwować szybkość degradacji, a więc spokojnie, w pełni świadomie można planować i uzgodnić z technologami postój silnika w celu jego przeglądu czy potencjalnej naprawy. Jeśli dojdzie do przekroczenia drugiego poziomu alarmu, użytkownik ma wiedzę, że postój instalacji jest pilny, w więc wymaga się szybkiej reakcji, aby nie doszło do trwałego uszkodzenia, skutkującego zadziałaniem kryteriów zabezpieczeniowych, a więc nagłym niezaplanowanym przestojem procesu technologicznego, który wiąże się często z dużymi stratami.

Co ważne, przy aktywnej ESA użytkownik jest informowany o rodzaju degradacji prowadzącej do uszkodzenia silnika. Jeśli np. podwyższy się poziom amplitudy markera odpowiedzialnego za uszkodzenie łożyska, użytkownik może się do tego przygotować, zamawiając daną część przed postojem.



Rys. 11. Wykres kołowy historii zmian amplitudy danego markera ESA przy różnym obciążeniu silnika. Jeśli przekroczony zostanie próg alarmu ustawiony przez użytkownika, generowany jest sygnał ostrzeżenia

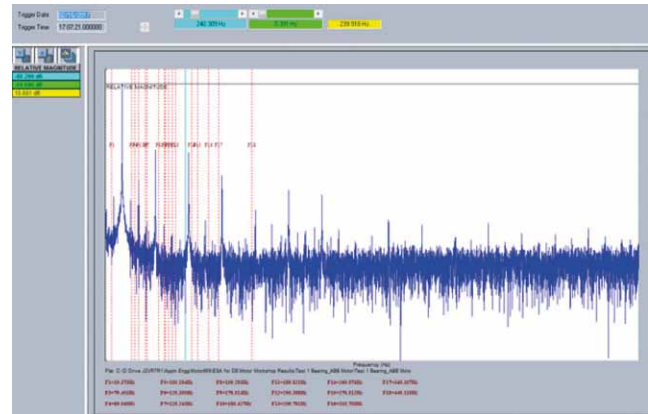
Wartości markerów wyskalowane w dB są wyświetlane między innymi w postaci wykresu kołowego (rys. 11), na którym widać dokonujące się w czasie zmiany. Można też obserwować te zmiany w postaci tabeli ze znacznikiem czasu (rys. 12). Daje to możliwość porównania wartości dla wybranych momentów czasu. Dane mogą być odczytane z 869 w formie pliku comtrade i przetwarzane przez inne specjalistyczne programy, np. technologiczne.

Kluczowe dla ESA jest wyznaczenie charakterystycznych częstotliwości dla potencjalnych typów uszkodzeń silnika. Inne będą dla łożysk, np. uszkodzenie powierzchni zewnętrznej łożyska czy też uszkodzenia kulek łożyska. Inne dla uszkodzeń mechanicznych czy też uzwojeń. Jednak nie wymaga to od użytkownika jakiegokolwiek wiedzy na ten temat. Pomimo że cały algorytm jest bardzo złożony, a jego implementacja wymagała ogromnej wiedzy, doświadczenia i licznych pomiarów przeprowadzanych przez ekspertów przez wiele lat, użytkownik nie musi mieć specjalistycznej wiedzy z tego zakresu. To oprogramowanie Multilin 869 samo wyznacza markery na podstawie podstawowych parametrów dostępnych na tabliczce znamionowej silnika oraz jego danych katalogowych. Samo uczy się diagnozowanego obiektu, sygnalizuje poprzez alarmy nieprawidłowości w działaniu silnika i prezentuje dane w taki sposób, aby były przyjazne i zrozumiałe dla elektryków prowadzących eksploatację.

Dla potrzeb ESA w Multilin 869 niezbędne jest wprowadzenie następujących danych:

- parametry znamionowe silnika: liczba par biegunów, moc czynna znamionowa na wale silnika, sprawność silnika, częstotliwość i prędkość znamionowa silnika oraz znamionowy poślizg;
- parametry katalogowe:
  - dla monitoringu łożysk: liczba kulek w łożysku, średnica kulek, średnice klatki kulek,
  - dla monitoringu uzwojenia stojana: liczba żłobków stojana;
- nastawy użytkownika: dwa progi alarmów w dB oraz czasy opóźnień.

Dzięki ESA pracownicy utrzymania ruchu są w pełni świadomi stanu technicznego silnika w zakresie wykrywanych przez



Record Number	Date	Item Name	Value	Value
1433	May 24 2017 12:3:53	Load Bin	9	9
1432	May 24 2017 12:1:54	Load(s)FLA	0.88	0.88
1431	May 24 2017 11:59:55	Norm Peak Magnitude (gk=1)(Bearing Mon)	-44.4	-44.4
1430	May 24 2017 11:57:57	Norm Peak Freq (gk=1)(Bearing Mon)	18.984	18.984
1429	May 24 2017 11:55:58	Norm Peak Magnitude (gk=2)(Bearing Mon)	-85.2	-74.3
1428	May 24 2017 11:53:59	Norm Peak Freq (gk=2)(Bearing Mon)	174.138	98.670
1427	May 24 2017 11:52:0	Norm Peak Magnitude (gk=3)(Bearing Mon)	-86.6	-90.9
1426	May 24 2017 11:50:1	Norm Peak Freq (gk=3)(Bearing Mon)	177.185	304.443
1425	May 24 2017 11:48:2	Energy at Peak Mag (gk=1)(Bearing Mon)	-47.2	-47.2
1424	May 24 2017 11:46:4	Energy at Peak Mag (gk=2)(Bearing Mon)	-85.1	-74.2
1423	May 24 2017 11:44:5	Energy at Peak Mag (gk=3)(Bearing Mon)	-86.6	-91.7
1422	May 24 2017 11:42:6	Max Change in Mag (gk=1)(Bearing Mon)	33.1	33.1
1421	May 24 2017 11:40:7	Max Change in Freq (gk=1)(Bearing Mon)	18.984	18.984
1420	May 24 2017 11:38:8	Max Change in Mag (gk=2)(Bearing Mon)	2.8	3.5
1419	May 24 2017 11:36:9	Max Change in Freq (gk=2)(Bearing Mon)	293.901	98.670
1418	May 24 2017 11:34:10	Max Change in Mag (gk=3)(Bearing Mon)	2.7	-1.4
1417	May 24 2017 11:32:6	Max Change in Freq (gk=3)(Bearing Mon)	424.915	411.790
1416	May 24 2017 11:30:7	Max Change in Energy (gk=1)(Bearing Mon)	30.2	30.2
1415	May 24 2017 11:28:9	Max Change in Energy (gk=2)(Bearing Mon)	3.0	2.7
1414	May 24 2017 11:26:9	Max Change in Energy (gk=3)(Bearing Mon)	2.4	-2.9
1413	May 24 2017 11:24:11	Norm Peak Magnitude (gk=1)(Mech Mon)	-100.0	-100.0
1412	May 24 2017 11:22:11	Norm Peak Freq (gk=1)(Mech Mon)	48.984	48.984
1411	May 24 2017 11:20:12	Norm Peak Magnitude (gk=2)(Mech Mon)	-100.0	-100.0
1410	May 24 2017 11:18:14	Norm Peak Freq (gk=2)(Mech Mon)	82.733	82.733
1409	May 24 2017 11:16:14	Norm Peak Magnitude (gk=3)(Mech Mon)	-100.0	-100.0

Rys. 12. Rejestracja zdarzeń ESA. Na górze: amplitudy FFT funkcji częstotliwości. Linie pionowe to kolejne markery dla danego typu uszkodzenia. Poniżej: przedstawienie tabelaryczne z informacją w wierszu: marker - typ uszkodzenia, amplituda w dB dla wybranego momentu czasu oraz amplituda w dB dla następnego wybranego momentu czasu. Porównanie obu prezentuje zmianę w markerze w zadanym odcinku czasu

ESA uszkodzeń. Co więcej, podczas obserwacji zmian amplitud funkcji częstotliwości rejestrowanych w czasie mogą wychwycić anomalie w pracy silnika. Co to oznacza? Nawet jeśli 869 nie ma wyznaczonego markera dla tego uszkodzenia, zachodzące zmiany w FFT sugerują konieczność przeglądu silnika i znalezienia przyczyny występującej anomalii. Wprawdzie użytkownik nie będzie wiedział, co jest przyczyną pogłębiającego się uszkodzenia, ale rejestrowane zmiany wartości FFT będą poświadczały konieczność przeprowadzenia jego przeglądu. Znacznik czasu tych informacji oraz zaawansowane rejestracje opisane powyżej, w rozdziale drugim, pozwalają na skojarzenie nieznanego uszkodzenia pojawiającego się w FFT z danym zdarzeniem związanym ze stanem pracy silnika.

## Podsumowanie

Uszkodzenia silników w przemyśle powodują koszty, które są związane nie tylko z jego naprawą, ale także z przerwaniem procesu produkcyjnego. Szczególnie duże straty powstają w przemyśle chemicznym, rafineryjnym oraz petrochemicznym.

Mogą one nawet dziesięciokrotnie przewyższać koszty naprawy samego silnika. Dlatego wiodące firmy przemysłowe kładą nacisk na zmianę strategii Utrzymania Ruchu na proaktywną. Wiąże się to z wykorzystaniem zaawansowanych układów diagnostyki silników podczas ich pracy. Układy takie informują o stopniu degradacji silników, a więc potencjalnie zbliżającej się awarii. Kiedy już ona wystąpi, to jest eliminowana poprzez zadziałanie zabezpieczeń, ze skutkiem nagłego wyłączenia silnika. Dlatego korzystniej jest stosować diagnostykę, niż czekać na skutki awarii, zwłaszcza że koszty naprawy w fazie degradacji mogą być znacznie niższe. Funkcje diagnostyczne dostarczają gotowe przejrzyste raporty, na których widoczne są pogorszenia parametrów w odniesieniu do tych, jakie były na początku, podczas instalowania urządzenia, lub w momencie wybranym przez użytkownika. Taka funkcjonalność pozwala firmie obniżyć koszty związane z przerwaniem procesu produkcji oraz naprawy silnika, a jednocześnie spokojnie monitorować zmiany, zdobywając świadomość sytuacyjną.

Obecne możliwości obliczeniowe oraz rozmiary pamięci pozwalają zabezpieczeniom silników na realizację funkcji diagnostycznych ochraniającego obiektu. Musi to być jednak przewidziane już na etapie opracowywania danego urządzenia. Przykładem takiej konstrukcji jest zespół zabezpieczeń silników Multilin 869. Funkcje diagnostyczne, zapisując wartości różnych wielkości charakterystycznych dla silnika, pozwalają wykryć jego anomalie, czyli odchylenia od wartości normalnych. Szczególnie użyteczne jest porównywanie historycznych parametrów zapisanych podczas rozruchów silnika. Odchylenia w czasie są prezentowane w automatycznie tworzonym raporcie stanu technicznego silnika. Jeśli są znaczące, służby utrzymania ruchu otrzymują komunikat ostrzeżenia (Up). Wykrycie anomalii pozwala na właściwą reakcję służb utrzymania ruchu, tzn. wyeliminowanie przyczyny doprowadzającej do degradacji silnika lub zaplanowanie przeglądu związanego z jego naprawą, w czasie dogodnym dla procesu produkcji.

Inną korzyścią z tak bogatej rejestracji jest możliwość wypracowania decyzji o konieczności przeglądu silnika nie w oparciu o jego czas pracy, ale na podstawie zdarzeń z nim związanych (np. przeciążenia, asymetria, częste rozruchy itd.). Silnik, który nie był poddany częstym stresom, może mieć wydłużony okres między przeglądami.

Analiza szerokiego pasma mierzonych prądów i napięć pozwala Multilin 869 na wczesne wykrywanie degradacji połączeń w klatce wirnika. Jest to o tyle ważne, że uszkodzenie klatki może spowodować bardzo kosztowną naprawę na skutek mechanicznego uszkodzenia pozostałych elementów silnika. Jeśli szybko będzie następowała dalsza jego degradacja, będzie to widoczne, a obsługa będzie świadoma konieczności bezzwłocznej naprawy.

Za pomocą algorytmów diagnostycznych można również wykrywać zwarcia międzyzwojowe, obejmujące niewielką ilość zwojów (rys. 9). Tego typu uszkodzenie nie wymusza natychmiastowej reakcji, pozwala na dalszą pracę maszyny, dając obsłudze czas na przygotowanie się do jego naprawy.

Opatentowany przez GE zaawansowany, samouczący się algorytm ESA, korzystający z sygnałów prądowych i napięciowych, dostępny w zabezpieczeniu silnika Multilin 869, wprowadza

przełom w diagnostyce silnika. Przede wszystkim diagnostyka jest ciągłym procesem podczas jego pracy. Przekaznik zabezpieczeniowy jest w stanie wykrywać – oprócz uszkodzeń elektrycznych – także uszkodzenia mechaniczne silnika, w tym częstą przyczynę awarii silnika: uszkodzenie jego łożysk. Jest w stanie nawet wykryć uszkodzenie mocowania silnika do podstawy (potwierdzone zdarzenie!). Co ważne, eksploatacja i parametryzacja ESA nie wymaga od użytkownika specjalistycznej wiedzy. Parametry nastawcze to głównie dane katalogowe silnika. Przebieg degradacji, z podaniem typu pogłębiającego się uszkodzenia, jest prezentowany w postaci graficznej oraz tabelarycznej, czyli w formie przyjaznej i zrozumiałej dla użytkownika. Co ciekawe, nawet jeśli ESA nie została nauczona i zaprogramowana na detekcję specyficznego uszkodzenia, to jest ono widoczne (zmiany) na wykresach lub tablicach, stając się podstawą do decyzji o koniecznym przeglądzie silnika. Ważne, że obsługa ma czas na zaplanowanie postoju instalacji, a nie następuje to nagle, generując straty produkcyjne, jako efekt działania kryteriów zabezpieczeniowych.

### Literatura

- [1] NOWICKI R.: *Nadzór stanu technicznego agregatów z napędami elektrycznymi: wprowadzenie do tematyki*. „Napędy i Sterowanie” 10/2013.
- [2] RING P.: *Applying Lean and RCM Principles to Implement a Cost Effective Preventive Maintenance Program*. IFMA Industrial Forum, April 2008, Denver, Colorado.
- [3] NOWICKI R.: *Monitorowanie online stanu technicznego izolacji silników indukcyjnych*. „Napędy i Sterowanie” 5/2014.
- [4] ALBRECHT P.F., APP IAR IUS J.C., SHAR MA D.K.: *Assesment of the reliability of motors in utility applications – Updated*. IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 1, pp. 29–46, 1986.
- [5] REPORT I.C.: *Report of large motor reliability survey of industrial and commercial installations*. Part I and Part II, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 21, pp. 853–872, 1985.
- [6] *Condition monitoring and diagnostics of machines – General guideline*, ISO 17359, edition 2011.
- [7] DUNN S.: *Condition Monitoring in the 21st Century*. The Plant Maintenance Resource Center, AUG 2009.
- [8] KISS A., NOWICKI R.: *Monitorowanie i diagnostyka stanu technicznego pomp krytycznych napędzanych silnikami elektrycznymi*. „Napędy i Sterowanie” 5/2015.
- [9] KLIMAN G., KOEGL R., STEIN J., ENDICOTT R., MADDEN M.: *Noninvasive detection of broken rotor bars in operating induction Motors*. IEEE Transaction on Energy Conversion, vol. 3, p. 873, 1988.