

Nowoczesne uniwersalne zabezpieczenia cyfrowe wyposażone w algorytmy do diagnostyki stanu klatki silników indukcyjnych

Arkadiusz Duda, Maciej Sułowicz, Jarosław Tulicki, Tomasz Węgiel, Marcin Iwiński

1. Wstęp

Do diagnostyki maszyn elektrycznych istnieje wiele dedykowanych metod diagnostycznych umożliwiających bezinwazyjną ocenę ich stanu podczas normalnej pracy [1–14]. Najczęściej metody diagnostyczne są realizowane przy pomocy dodatkowej specjalistycznej aparatury pomiarowo-diagnostycznej.

Aktualnie w dobie intensywnie rozwijających się układów cyfrowej techniki zabezpieczeniowej zgodnej z filozofią Przemysłu 4.0, moc obliczeniowa nowoczesnych zabezpieczeń maszyn elektrycznych jest bardzo duża. Od kilku lat obserwuje się rozwój funkcjonalności tych zabezpieczeń ukierunkowany na implementację wybranych skutecznych metod diagnostycznych [11–12, 15].

W artykule przedstawiono opis wybranych algorytmów oceny stanu klatki silnika opracowanych dla cyfrowego zabezpieczenia BEL_plus przedstawionego na rys. 1. W urządzeniu tym zaimplementowano algorytmy, które zostały sprawdzone w wieloletniej praktyce diagnostycznej silników w przemyśle.



Rys. 1. Widok urządzenia BEL_plus

Algorytm oceny stanu klatki silników indukcyjnych został dokładnie opisany w artykule [17]. Rozdziały 2, 3 i 4 są powtórzeniem opisu z artykułu [17].

W rozdziale 5 przedstawiono opis działania algorytmu do wykrywania uszkodzeń silników indukcyjnych diagnozowanych podczas rozruchu maszyny.

2. Diagnostyka stanu klatki w stanie ustalonym

Moduł odpowiedzialny za monitorowanie stanu klatki silnika indukcyjnego działa w oparciu o analizę spektralną prądu stojana – metoda MCSA (ang. *Motor Current Signature Analysis*).

Streszczenie: Zabezpieczenia cyfrowe dedykowane dla silników indukcyjnych mogą realizować różne i nawet bardzo złożone algorytmy ochrony silnika przed skutkami nieprzewidzianych zakłóceń jego bezawaryjnej pracy. Moc obliczeniowa aktualnie stosowanych cyfrowych urządzeń zabezpieczeniowych jest bardzo duża, a pamięci do składowania rejestrowanych informacji przez te urządzenia mogą być dowolnie rozszerzane. Pozwala to producentom zabezpieczeń poszerzyć w łatwy sposób ich funkcjonalności o nowe wybrane funkcje np. do diagnostyki stanu silnika. W artykule skupiono się nad opisem algorytmów do diagnostyki stanu klatki wirnika silników indukcyjnych podczas ustalonego stanu pracy i rozruchu zaimplementowanego w zabezpieczeniu cyfrowym silnika BEL_plus. Przedstawiono wyniki testów zabezpieczenia z zastosowanym algorytmem oraz propozycje wskaźnika diagnostycznego świadczącego o uszkodzeniu dla przykładowego silnika małej mocy z różnymi uszkodzeniami wirnika oraz wyniki testów dla silnika dużej mocy. Udowodniono, że zaproponowane algorytmy działają poprawnie i pozwalają na skuteczną ocenę stanu klatki nadzorowanych silników indukcyjnych.

Słowa kluczowe: diagnostyka, monitoring, zabezpieczenie, silnik indukcyjny, uszkodzenie klatki, awaria, analiza widmowa

MODERN UNIVERSAL DIGITAL PROTECTIONS EQUIPPED WITH ALGORITHMS FOR DIAGNOSTICS OF THE CAGE CONDITION OF INDUCTION MOTORS

Abstract: Digital protections dedicated to induction motors can implement various, even very complex, algorithms to protect the motor against the effects of unforeseen disturbances in its failure-free operation. The computational power of the currently used digital protection devices is very high. Also, the recorded information storage space used by these devices can be freely extended. This allows security manufacturers to easily extend their functionality with new diagnostic functions. The article describes the algorithms for diagnostics of the rotor cage condition of induction motors during steady-state and start-up. The tests' results of the implemented algorithms and diagnostic indicators of digital protection BEL_plus for a low-power motor with various rotor damage and test results for a high-power motor are presented. The algorithms work correctly and allows for an effective assessment of the condition of the monitored motors given that the required operating conditions are met.

Keywords: diagnostics, monitoring, protection, induction motor, cage damage, failure, spectral analysis

Proces diagnostyczny w urządzeniu może zostać wyzwolony ręcznie lub odbywać się cyklicznie w zależności od ustawień parametrów wewnętrznych funkcji. Z chwilą wyzwolenia pomiaru urządzenie BEL_plus rejestruje przez 20,48 s prąd stojana jednej z faz z częstotliwością 1,6 kHz, co daje 2^{15} próbek. Spektrum otrzymane z takiego przebiegu posiada zakres częstotliwości do 800 Hz i rozdzielczość ok. 0,05 Hz. Widmo prądu stojana o takich parametrach umożliwia już wstępną diagnostykę stanu klatki wirnika na podstawie analizy charakterystycznych częstotliwości poślizgowych, tzw. wstępnych.

Algorytm oceny stanu klatki do poprawnego działania wymaga spełnienia odpowiednich warunków. Pierwszy z nich to wprowadzenie z panelu użytkownika danych znamionowych silnika, takich jak:

- n_N – prędkość znamionowa;
- I_N – prąd znamionowy stojana;
- f_N – częstotliwość znamionowa silnika;
- $\cos(\varphi_N)$ – współczynnik mocy (ang. Power Factor – PF).

W drugiej kolejności algorytm sprawdza wartość skuteczną prądu stojana. Jeżeli jest ona mniejsza niż nastawialny dolny próg, to algorytm nie wykona dalszych czynności. Ten warunek jest podyktowany tym, że niesymetria klatki wirnika ujawnia się w sytuacji, gdy przez pręty klatki płynie znaczny prąd. W przypadku analizy prądu stojana dla silnika słabo obciążonego wynik końcowy mógłby być nieadekwatny do rzeczywistego stanu klatki. Standardowo przyjęto w algorytmie, że wartość prądu stojana powinna być większa niż 60% prądu znamionowego silnika.

Jak już wcześniej zostało wspomniane, algorytm bazuje na analizie tzw. wstępnych. Do precyzyjnego ich wyznaczenia jest potrzebna znajomość poślizgu silnika, który uzyskuje się za pomocą tzw. estymatora poślizgu. Estymator poślizgu wyznacza przybliżoną wartość poślizgu na podstawie równania:

$$s = s_N \frac{I_{rms} - k \cdot I_0}{I_N - k \cdot I_0} \quad (1)$$

gdzie:

$$s_N = \frac{n_{0N} - n_N}{n_{0N}}, \quad n_{0N} = \frac{60 f_N}{p} \quad (2)$$

$$I_0 \approx I_N \sqrt{1 - \cos(\varphi_N)^2} \quad (3)$$

k – współczynnik estymatora poślizgu (domyślnie $k = 0,5$);
 I_{rms} – średnia wartość skuteczna zarejestrowanego prądu.

W celu poprawienia parametrów pracy estymatora poślizgu można zmienić wartość współczynnika estymatora poślizgu, który domyślnie jest ustawiony na wartość 0,5. Można tego jedynie dokonać w sytuacji, gdy istnieje możliwość jednoczesnego odczytania aktualnej prędkości obrotowej n silnika i wartości skutecznej prądu stojana I_{rms} przez odpowiednie urządzenia pomiarowe. Taki pomiar najlepiej przeprowadzić, gdy prąd stojana będzie w zakresie $0,6I_N \div 0,8I_N$. Współczynnik ten wylicza się z zależności:

$$k = \frac{s_N \cdot I_{rms} + I_N \left(\frac{p \cdot n}{60 \cdot f_N} - 1 \right)}{I_N \cdot \sqrt{1 - PF^2} \cdot \left(s_N + \frac{p \cdot n}{60 \cdot f_N} - 1 \right)} \quad (4)$$

gdzie:

- n – odczytana prędkość silnika,
- I_{RMS} – odczytana wartość skuteczna prądu stojana.

Najlepiej wykonać oba pomiary (I_{RMS} , n) dla wartości prądu, przy której silnik pracuje najczęściej. Jeżeli silnik pracuje blisko znamionowego punktu pracy, tj. gdy prąd stojana jest bliski prądowi znamionowemu, nie ma konieczności zmieniać wartości współczynnika estymatora poślizgu.

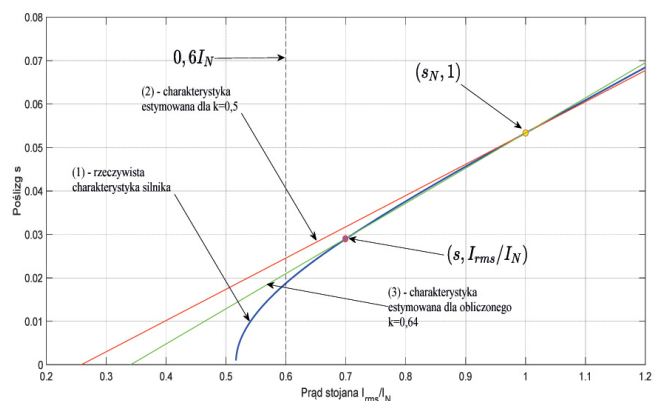
Przykładowa korekcja współczynnika estymatora poślizgu dla silnika o danych znamionowych: $f_N = 50$ Hz, $I_N = 15,54$ A, $n_N = 1420 \text{ min}^{-1}$, $p = 2$, $PF = 0,8565$. Podczas pracy silnika odczytano w tym samym momencie wartości prądu stojana $I_{rms} = 10,8$ A = $0,699 I_N$ i prędkość obrotową wirnika $n = 1456 \text{ min}^{-1}$. Obliczony współczynnik estymatora poślizgu:

$$s_N = \frac{1500 - 1420}{1500} = 0,0533$$

$$k = \frac{0,0533 \cdot 10,8 + 15,54 \left(\frac{2 \cdot 1456}{60 \cdot 50} - 1 \right)}{15,54 \cdot \sqrt{1 - 0,8565^2} \cdot \left(0,0533 + \frac{2 \cdot 1456}{60 \cdot 50} - 1 \right)} = 0,6406$$

Na rysunku 2 zostały przedstawione przykładowe charakterystyki.

Charakterystyka (1) z rys. 2 jest charakterystyką rzeczywistą silnika. Standardowo dla $k = 0,5$ algorytm wyznaczył charakterystykę (2) estymatora poślizgu. Po dokonaniu pomiarów prądu i prędkości – fioletowy punkt na rys. 2 – a następnie wykonaniu obliczeń można zmienić współczynnik estymatora poślizgu. W tym przypadku wartość nowego współczynnika wynosi 0,64. Taka korekcja spowoduje lepsze dopasowanie



Rys. 2. Przykład charakterystyk $s = f(I_{rms}/I_N)$:

kolor niebieski – (1) rzeczywista charakterystyka silnika; kolor czerwony – (2) standardowa charakterystyka estymatora poślizgu dla $k = 0,5$; kolor zielony – (3) zmodyfikowana charakterystyka estymatora poślizgu dla $k = 0,6406$

charakterystyki estymatora poślizgu do rzeczywistej charakterystyki silnika – zielona linia (3). W sytuacji, gdy właściwości ruchowe silnika uległy pogorszeniu ze względu na długoletnią eksploatację, zużyte łożyska, zwarcia blach itp. lub napięcie zasilania znacznie odbiega od znamionowego, zaleca się wykonanie pomiaru prądu fazowego stojana I_{rms} i prędkości obrotowej n dla punktu pracy silnika, w którym najczęściej pracuje (w zakresie $0,7I_N \div 1,05I_N$). Następnie zmierzone wartości prądu i prędkości należy wprowadzić w parametrach zabezpieczenia jako wartości znamionowe.

Następnym krokiem działania algorytmu jest znalezienie wstęg bocznych w otoczeniu obliczonych częstotliwości, opartych o estymowany poślizg:

$$f_l = f_0(1 - 2s) \quad f_p = f_0(1 + 2s) \quad (5)$$

gdzie:

f_0 – częstotliwość napięcia zasilania;
 s – estymowany poślizg silnika.

Algorytm poszukuje maksymalnych prążków w otoczeniu o promieniu $0,5sf_0$ od częstotliwości wyznaczonych z (5). Rys. 3 przedstawia przykład takiego wyznaczenia z zaznaczonymi zakresami poszukiwań.

Na rys. 3 zaznaczono wstęgi boczne – lewą i prawą o amplitudach odpowiednio: A_l i A_p . Algorytm do oceny stanu klatki wykorzystuje tzw. wskaźnik RFI (Rotor Fault Index) [14], który wyraża się wzorem:

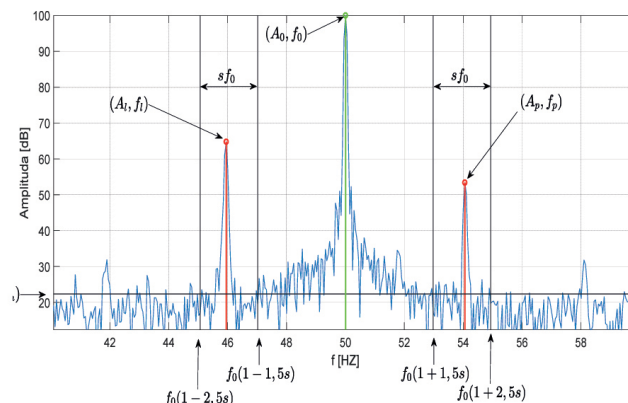
$$RFI = \frac{\max(A_l, A_p) - A_{szum}}{A_0 - A_{szum}} \cdot p \quad (6)$$

Wskaźnik RFI opiera się o stosunek względnej wartości maksymalnej wstęgi do względnej wartości podstawowej harmonicznej pomnożonej przez liczbę par biegunów. Względnej – oznacza mierzonej od poziomu szumu sygnału A_{szum} . Przy podejmowaniu decyzji co do stanu klatki można posłużyć się ideą podejmowania decyzji diagnostycznych w oparciu o tzw. „krzywą życia maszyny”. Ideę tę przedstawiono na rys. 4. Linia niebieska przedstawia zmianę trendu wskaźnika diagnostycznego w czasie. Kolorowe obszary obrazują przedziały wartości wskaźnika, na podstawie których możemy określić z przybliżeniem aktualny stan maszyny.

Wartości progowe R_1 , R_2 standardowo są ustawione odpowiednio na 0,8 i 1,5. Jednak użytkownik zabezpieczenia BEL_plus może za pomocą panelu zmienić te wartości.

3. Testy laboratoryjne

Testy laboratoryjne modułu urządzenia BEL_plus odpowiedzialnego za detekcje uszkodzeń klatki wirnika zostały przeprowadzone dla silnika o danych znamionowych: $U_N = 380$ V, $I_N = 2,83$ A, $f_N = 50$ Hz, $n_N = 1445$ obr./min, $p = 2$, $PF = 0,85$. Silnik podczas pomiaru został obciążony znamionowo. Funkcja detekcji uszkodzenia klatki wirnika była wyzwalana ręcznie z panelu użytkownika. Pomiaru wykonano dla czterech typów wirników:



Rys. 3. Przykładowe widmo prądu stojana silnika z uszkodzoną klatką wirnika



Rys. 4. Ilustracja idei śledzenia stanu maszyny

- symetrycznego;
- z jednym przerwany pręt;
- z dwoma przerwany prętami (nr 1 i 4);
- z dwoma przerwany prętami (nr 1 i 2).

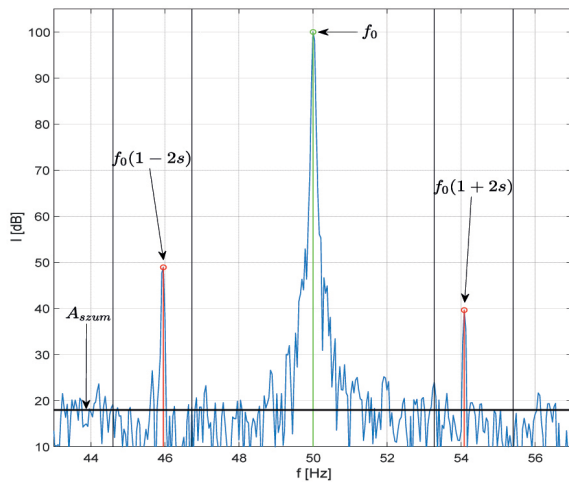
Na rys. 5–8 przedstawiono widma prądów stojana w zakresie od 43 do 57 Hz. Kolorem zielonym została zaznaczona podstawowa harmoniczna prądu stojana, natomiast kolorem czerwonym zaznaczono wstęgi boczne, które zostały wyszukane w obszarze między dwoma pionowymi czarnymi liniami. Grubą czarną poziomą linią zaznaczono poziom szumu, który jest potrzebny do wyznaczenia wskaźnika RFI.

Wyznaczone wskaźniki RFI dla różnych typów wirników umieszczono w tabeli 1 i zgodnie z rys. 4, przedstawiającym idee śledzenia stanu maszyny, zaznaczono odpowiednim kolorem.

Tabela 1. Wskaźnik RFI wyznaczony z testów laboratoryjnych

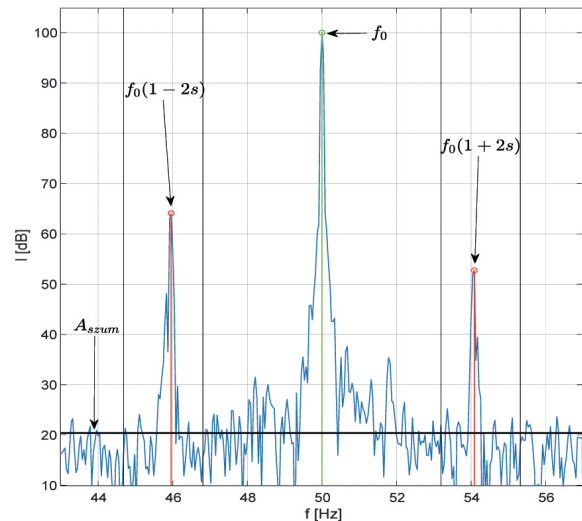
WIRNIK	RFI
Symetryczny	0,755
Z jednym przerwany pręt	1,097
Z dwoma przerwany prętami (nr 1 i 4)	1,110
Z dwoma przerwany prętami (nr 1 i 2)	1,139

Analizując wyniki testów laboratoryjnych umieszczonych w tabeli 1, można zauważyć, że wraz ze wzrostem poziomu



Rys. 5. Widmo prądu stojana silnika z symetrycznym wirnikiem

uszkodzenia klatki wirnika wyznaczonym przez urządzenie BEL_plus wskaźnik *RFI* rośnie. Wartość wskaźnika *RFI* dla silnika symetrycznego jest znaczna, ale mieści się w przyjętej granicy dla „silnika zdrowego”. Jest to spowodowane tym, że wirnik ten był przez lata wykorzystywany w laboratorium do

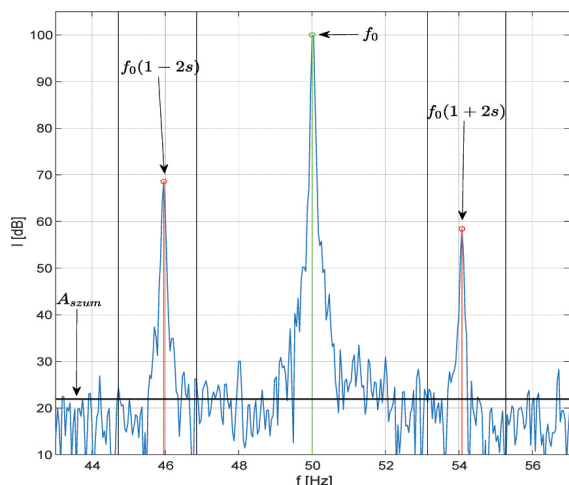


Rys. 6. Widmo prądu stojana silnika z klatką wirnika z jednym przerwanym prętem

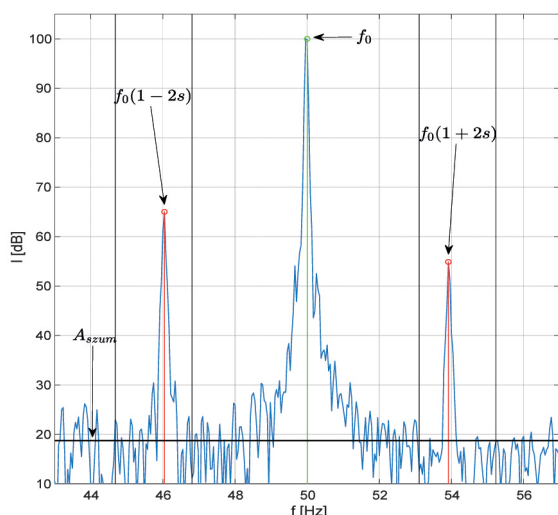
różnych testów, co mogło zaburzyć jego symetryczną budowę. Pozostałe wirniki miały celowo przerwane jeden lub dwa pręty. Przypadek z dwoma przerwanymi obok siebie prętami najbardziej desymetryzuje przepływ wirnika, co z kolei objawia się we wskaźniku *RFI*.

reklama

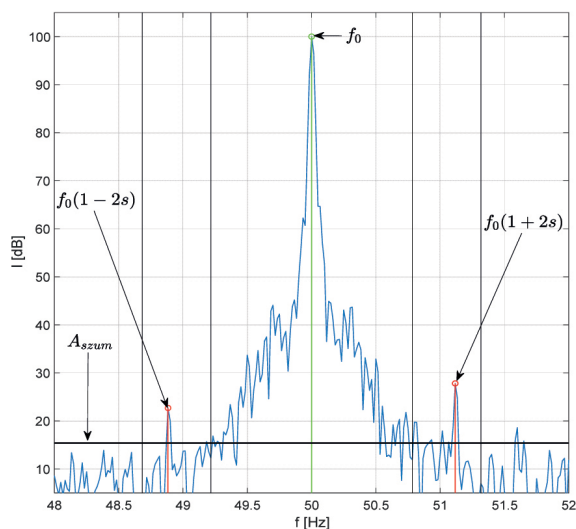
reklama



Rys. 7. Widmo prądu stojana silnika z kłatką wirnika z dwoma przerwanymi prętami (nr 1 i 4)



Rys. 8. Widmo prądu stojana silnika z kłatką wirnika z dwoma przerwanymi prętami (nr 1 i 2)



Rys. 9. Widmo prądu stojana silnika napędzającego kompresor

4. Testy przemysłowe

Kolejne testy zostały przeprowadzone na wysokonapięciowym silniku napędzającym kompresor gazu w jednej z polskich rafinerii. Dane znamionowe silnika: $P_N = 3,1$ MW, $U_N = 6$ kV, $I_N = 380$ A, $f_N = 50$ Hz, $n_N = 297$ obr./min, $p = 10$, $PF = 0,82$.

Współczynnik RFI wyznaczony przez moduł detekcji uszkodzeń klatki wirnika wynosi 1,46 i wskazuje na początkowe uszkodzenia. Porównując rys. 6 i 9, można zaobserwować, że wstęgi boczne dla silnika wykorzystanego w testach laboratoryjnych są dużo większe od wstęg bocznych badanego silnika z przemysłu, co jest przeciwieństwem wartości wskaźników. Jest to spowodowane tym, że wskaźnik RFI (6) jest uzależniony od liczby par biegunów stojana. Silnik użyty w testach laboratoryjnych posiada $p = 2$ pary biegunów, natomiast ten badany w przemyśle $p = 10$.

5. Diagnostyka stanu klatki podczas rozruchu

Diagnostyka silnika indukcyjnego podczas rozruchu jest możliwa m.in. po zarejestrowaniu przebiegu prądu stojana w całym przedziale zmian prędkości obrotowej od momentu załączenia silnika do ustalenia się prędkości wynikającej z poziomu obciążenia.

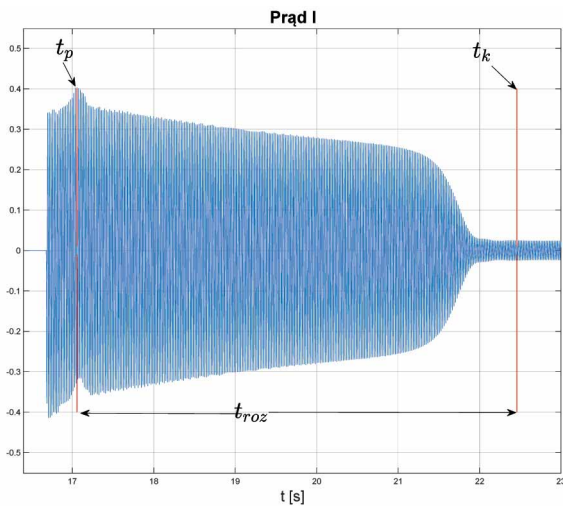
Urządzenie BEL_plus samoczynnie wykrywa rozruch silnika i rozpoczyna rejestrację prądu. Na podstawie przebiegu prądu stojana I algorytm określa czas trwania rozruchu. Przy czym za chwilę t_p załączenia maszyny do sieci przyjmuje maksimum prądu. Następnie algorytm szacuje czas zakończenia stanu dynamicznego. Do tego celu wykorzystuje własności ruchomej wartości skutecznej liczonej za okres składowej podstawowej sieci. Za chwilę zakończenia rozruchu t_k uznaje się przypadek, gdy różnica wartości skutecznej obliczonej w danym przedziale czasu do wartości w przedziale bezpośrednio poprzedzającym jest w przybliżeniu równa zero oraz wartość obliczona skuteczna jest mniejsza od nastawianego prądu I_{Rk} .

Przykładowy przebieg prądu rozruchowego przedstawiono na rys. 10.

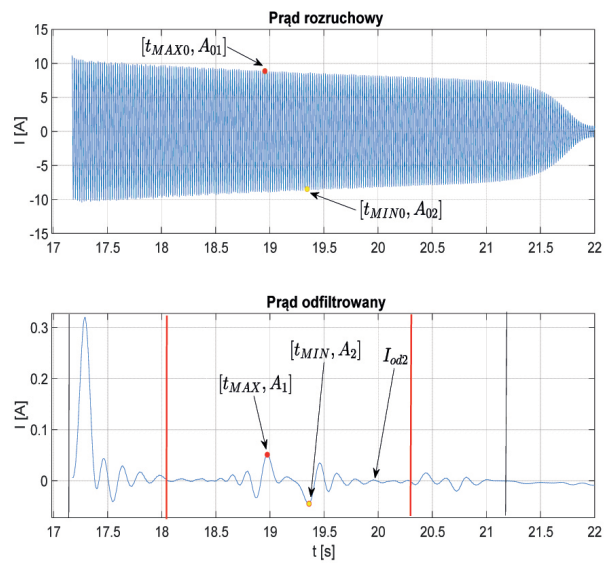
Na rys. 10 przedstawiono przykład wyznaczenia momentu rozpoczęcia i końca rozruchu w zarejestrowanym sygnale prądu stojana. Dalsze przetwarzanie sygnału jest możliwe, jeżeli wyznaczony czas rozruchu t_{roz} jest większy niż nastawialny minimalny czas rozruchu $t_{min,roz}$. Warunek ten jest konieczny, gdyż w przypadku krótkich rozruchów bardzo ciężko jest uchwycić składową prądu wskazującą na uszkodzenie klatki wirnika.

Po spełnieniu warunku związanego z czasem trwania rozruchu wycina się z całości zarejestrowanego sygnału prądu tylko tę część przebiegu – I_{roz} na podstawie wcześniej wyznaczonego przedziału czasowego, w którym wystąpił stan dynamiczny. Następnie prąd I_{roz} zostaje poddany filtracji dolnoprzepustowej w celu poszukiwania symptomów odpowiadających uszkodzeniu klatki wirnika.

Odfiltrowany prąd rozruchowy razem z prądem rozruchowym zostaje podany na blok, którego zadaniem jest wyznaczenie maksymalnej amplitudy w odfiltrowanym prądzie I_{od} i odpowiadającej jej amplitudy w prądzie I_{roz} . Z odfiltrowanego przebiegu sygnału prądu rozruchowego I_{od} algorytm wydziela do dalszej analizy środkową jego część – I_{od2} tak, jak to zostało przedstawione na rys. 11.



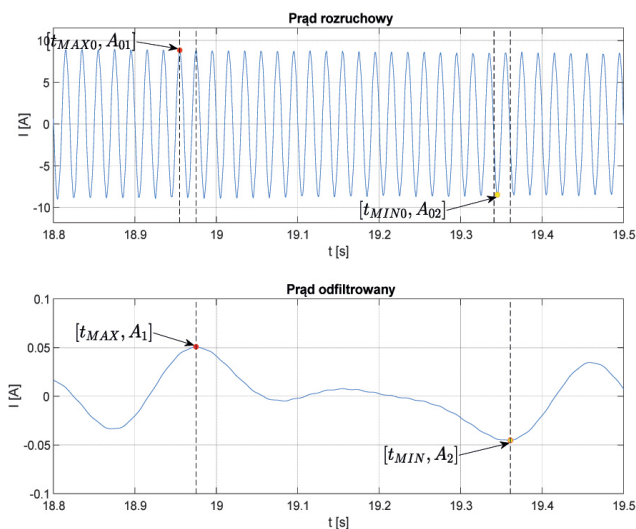
Rys. 10. Prąd stojana podczas rozpoczęcia rozruchu, gdzie:
 t_p – wyznaczony początek rozruchu; t_k – wyznaczony koniec rozruchu;
 t_{roz} – czas rozruchu



Rys. 11. Wizualizacja wyznaczania współczynników A_1 i A_2

Algorytm umożliwia wydzielenie czerwonymi liniami prądu I_{od2} z przebiegu I_{od} i następnie wyznaczenie największego odchylenia w sygnale I_{od2} . W przypadku przedstawionym na rys. 11 są to punkty $[t_{MAX}, A_1]$ dla dodatniego odchylenia i $[t_{MIN}, A_2]$ dla ujemnego odchylenia. Do wyznaczenia ostatecznego wskaźnika

potrzebna jest jeszcze znajomość wartości amplitud w nieodfiltrowanym prądzie rozruchowym I_{roz} odpowiadającym wcześniej wyznaczonym punktom $[t_{MAX}, A_1]$ i $[t_{MIN}, A_2]$. W przykładzie przedstawionym na rys. 11 są to punkty $[t_{MAX0}, A_{01}]$ i $[t_{MIN0}, A_{02}]$.



Rys. 12. Wizualizacja wyznaczania współczynników – powiększony rysunek 11

Ostatecznie do obliczenia końcowego wskaźnika potrzebne są wartości, dla których amplituda w wydzielonym odfiltrowanym prądzie rozruchowym jest większa. Dla przypadku przedstawionego na rysunkach 11 i 12 jest to punkt $A_1 = 0,05$ A, który jest większy niż punkt $A_2 = 0,045$ A.

Po ostatecznym wyselekcjonowaniu amplitud w sygnałach wydzielonego odfiltrowanego prądu rozruchowego (A) i prądu rozruchowego (A_0) wskaźnik uszkodzenia klatki DRFI (Dynamic Rotor Fault Index) jest obliczany na podstawie wyrażenia:

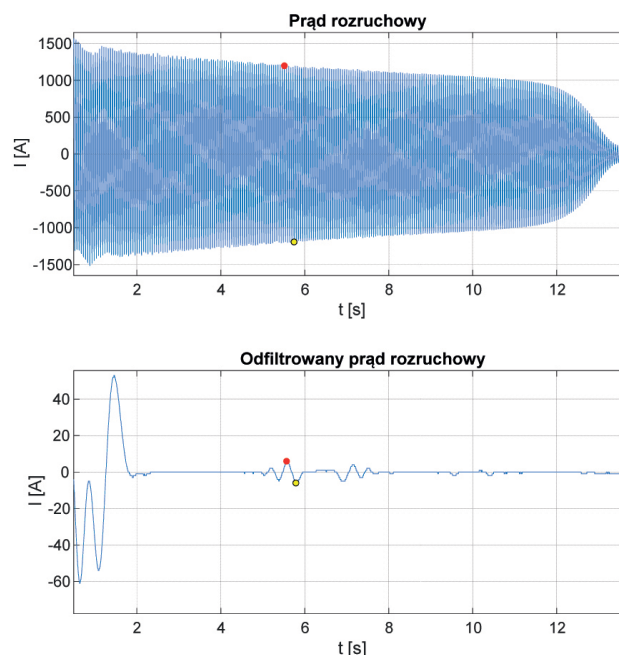
$$DRFI = -20 \cdot \left[\log_{10} \left(\frac{A}{A_0} \right) - \log_{10} \left(\frac{A_0}{A_0} \right) \right] \quad (7)$$

Wskaźnik DRFI można odnieść do normy MCSA i na podstawie tabeli 2 wstępnie określić stan klatki wirnika.

Tabela 2. Wartości graniczne zgodne z normą MCSA [18]

Wartość wskaźnika diagnostycznego [dB]	Stan wirnika - alarm
60	Bardzo dobry
54 do 60	Dobry
48 do 54	Zadawalający
42 do 48	Wystąpienie połączeń wysokorezystancyjnych, początek uszkodzenia klatki wirnika
36 do 42	Uszkodzenie prętów klatki wirnika
30 do 36	Łączne uszkodzenie prętów i pierścieni zwierających

Testy laboratoryjne modułu urządzenia BEL_plus odpowiedzialnego za detekcje uszkodzeń klatki wirnika podczas



Rys. 13. Prąd rozruchowy oraz odfiltrowany prąd rozruchowy silnika z uszkodzoną klatką wirnika

rozruchu zostały przeprowadzone na przebiegach prądu stojana zarejestrowanych podczas rozruchów silników w jednej z polskich rafinerii. Dane znamionowe silnika: moc $P_N = 3,1$ MW, $U_N = 6$ kV, $I_N = 380$ A, $f_N = 50$ Hz, $n_N = 297$ obr./min, $p = 10$, $PF = 0,82$. Na rys. 13 przedstawiono analizę dla silnika ze zdiagnozowanym uszkodzeniem klatki.

Na rys. 13 zaznaczono czerwonymi i żółtymi kropkami charakterystyczne punkty w odfiltrowanym prądzie rozruchowym i odpowiadające im amplitudy w prądzie rozruchowym. Algorytm na ich podstawie obliczył wskaźnik DRFI, który dla tego silnika wynosi 45,57, i wartość ta zgodnie z tabelą 2 wskazuje na występowanie połączeń wysokorezystancyjnych, jest to początkowa faza uszkodzenia klatki wirnika.


6. Podsumowanie

Zadaniem nadrzędnym zabezpieczenia cyfrowego BEL_plus jest zapewnienie kompleksowej ochrony silnika indukcyjnego podczas jego pracy. Jest to realizowane przez ciągły monitoring prądów i napięć fazowych w czasie rzeczywistym. Moc obliczeniowa oraz zainstalowane przetworniki analogowo-cyfrowe pozwalają w urządzeniu BEL_plus, oprócz podstawowych funkcji zabezpieczeniowych, na przeprowadzanie cyklicznie diagnostyki klatki wirnika w stanie ustalonym, jak i podczas rozruchu maszyny. Zaimplementowana nowa funkcjonalność jest uzupełnieniem sporego wachlarza zabezpieczeń oferowanych w BEL_plus przez producenta tych urządzeń, firmę Aparator Elkomtech. Algorytmy są proste i wielokrotnie sprawdzili się podczas pomiarów diagnostycznych prowadzonych przez pracowników Wydziału Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechniki Krakowskiej w obiektach przemysłowych na terenie całej Polski. Algorytmy można dostosować do każdego silnika indukcyjnego zasilanego z sieci. Zmiany dokonujemy

za pomocą zmiany parametrów wejściowych. Dzięki tej funkcji BEL_plus ma możliwość informowania użytkownika o pogłębiającej się degradacji klatki wirnika, która bez podjęcia działań naprawczych może doprowadzić do trwałego uszkodzenia silnika.

Literatura

- [1] KLIMANET G.B. ET AL.: *Methods of motor current signature analysis*. Elect. Mach. Power Syst., Vol. 20, No. 5, 1992.
- [2] 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, 33(1), pp. 24–34, 1997.
- [3] BENBOUZID M.E.H.: *A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 47, No. 5, pp. 987–991, 2000.
- [4] RAMS W., RUSEK J.: *Praktyczna diagnostyka maszyn indukcyjnych klatkowych*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 68/2004.
- [5] KOWALSKI C.T., KANIOR W.: *Ocena skuteczności analiz FFT, STFT i falkowej w wykrywaniu uszkodzeń wirnika silnika indukcyjnego*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 60, str. 202–211, 2007.
- [6] BELLINI A., FILIPETTI F., TASSONI C., CAPOLINO G.A.: *Advances in Diagnostic Techniques for Induction Machines*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.55, No.12, str. 4109–4126, Dec. 2008.
- [7] DRĄK B.: *Typowe uszkodzenia silników indukcyjnych dużej mocy*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe” 89/2011.
- [8] SZYMANIEC S.: *„Diagnostyka eksploatacyjna uszkodzeń napędów elektrycznych w przemyśle*. „Napędy i Sterowanie” 6/2011.
- [9] SUŁOWICZ M., PETRYNA J., WEINREB K., GUZIEC K.: *Porównawcze pomiary defektów klatek rozruchowych silników indukcyjnych pod kątem wykorzystania w diagnostyce*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe” 99/2013.
- [10] SWĘDROWSKI L.: *Pomiary w diagnostyce silników indukcyjnych klatkowych*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 2013.
- [11] OSTOJIC P., BANERJEE A., PATEL D.C., BASU W., ALI S.: *Advanced Motor Monitoring and Diagnostics*. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 50, no. 5, pp. 3120–3127, Sept.–Oct. 2014.
- [12] RAD M.: *Diagnostyka klatki we współczesnych zabezpieczeniach silników indukcyjnych*. „Napędy i Sterowanie” 5/2016.
- [13] CHOQUEUSE V., ELBOUCHIKHI E., OUBRAHIM Z., BENBOUZID M.: *On the use of phase diversity for spectral estimation in current signature analysis*. IECON 2017 – 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Beijing, pp. 8093–8098, 2017.
- [14] PETRYNA J., ŁAWROWSKI Z., SUŁOWICZ M., GUZIEC K.: *Diagnozowanie i weryfikacja termowizyjna silników indukcyjnych z asymetrią elektromagnetyczną*. „Napędy i Sterowanie” 7–8/2017.
- [15] JUSZCZYK A.: *Diagnostyka silników wykorzystująca wielkości pomiarowe aparatury zabezpieczeniowej*. „Napędy i Sterowanie” 9/2018.
- [16] GLINKA T., SZYMANIEC S.: *Diagnostyka maszyn i urządzeń – uwagi ogólne*. „Napędy i Sterowanie” 5/2020.
- [17] DUDA A., SUŁOWICZ M., TULICKI J., WĘGIEL T., IWIŃSKI M.: *Skuteczne algorytmy diagnostyki stanu klatki silników indukcyjnych zaimplementowane w nowoczesnym uniwersalnym zabezpieczeniu cyfrowym*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe” 2/2021.
- [18] <http://www.equipmenthealth.com/mcsa.htm>.

 dr inż. Arkadiusz Duda, e-mail: arkadiusz.duda@pk.edu.pl
 dr hab. inż. Maciej Sułowicz, prof. PK, e-mail: maciej.sulowicz@pk.edu.pl
 mgr inż. Jarosław Tulicki, e-mail: jaroslaw.tulicki@pk.edu.pl
 dr hab. inż. Tomasz Węgiel, prof. PK, e-mail: tomasz.wegiel@pk.edu.pl
 Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej, Katedra Inżynierii Elektrycznej
 mgr inż. Marcin Iwiński, e-mail: marcin.iwinski@apator.com
 Apator Elkomtech SA

artykuł recenzowany