

Arkadiusz Duda, Maciej Sułowicz, Jarosław Tulicki, Tomasz Węgiel
Politechnika Krakowska, Kraków
Marcin Iwiński, APATOR ELKOMTECH S.A., Łódź

SKUTECZNE ALGORYTMY DIAGNOSTYKI STANU KLATKI SILNIKÓW INDUKCYJNYCH ZAIMPLEMENTOWANE W NOWOCZESNYM UNIWERSALNYM ZABEZPIECZENIU CYFROWYM

EFFECTIVE ALGORITHMS FOR DIAGNOSTICS OF THE CAGE INDUCTION MOTORS CONDITION IMPLEMENTED IN A MODERN UNIVERSAL DIGITAL PROTECTION

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 może być dowolnie rozszerzana. 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 algorytm do diagnostyki stanu klatki wirnika silników indukcyjnych podczas ustalonego stanu pracy 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 zaproponowany algorytm działa poprawnie i pozwala na skuteczną ocenę stanu klatki nadzorowanych silników indukcyjnych.

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 an algorithm for diagnostics of the rotor cage condition of induction motors during steady-state. The tests' results of the implemented algorithm and diagnostic indicator 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 algorithm works correctly and allows for an effective assessment of the condition of the monitored motors given that the required operating conditions are met.

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

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

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 w przemyśle.



Rys. 1. Widok urządzenia BEL_plus

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). 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 bocznych.

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 co 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 bocznych. Do precyzyjnego ich wyznaczenia jest potrzebna znajomość poślizgu silnika, który to 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:

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

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

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 za 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 wartość prądu, przy której silnik pracuje naj-

częściej. Jeżeli silnik pracuje blisko znamionowego punktu pracy tj., gdy prąd stojana jest bliższy prądowi znamionowemu nie ma konieczności zmieniać wartości współczynnika estymatora poślizgu.

Przykład korekcji współczynnika estymatora poślizgu dla silnika o danych znamionowych:

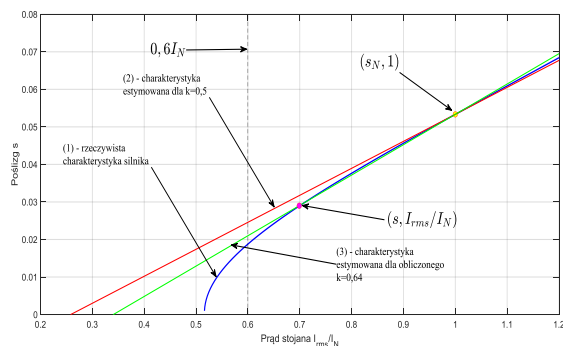
$$f_N = 50\text{Hz}, \quad I_N = 15,45\text{A}, \quad n_N = 1420\text{min}^{-1}, \\ p = 2, \quad PF = 0,8565$$

Podczas pracy silnika odczytano w tym samym momencie wartości prądu stojana $I_{rms} = 10,8\text{A} = 0,699I_N$ i prędkość obrotową wirnika $n = 1456\text{min}^{-1}$

Obliczenia:

$$s_N = \frac{1500 - 1420}{1500} = 0,0533 \\ k = \frac{0,0533 \cdot 10,8 + 15,45 \left(\frac{2 \cdot 1456}{60 \cdot 50} - 1 \right)}{15,45 \cdot \sqrt{1 - 0,8565^2} \cdot \left(0,0533 + \frac{2 \cdot 1456}{60 \cdot 50} - 1 \right)} = 0,6406$$

Na poniższym rysunku zostały przedstawione przykładowe charakterystyki $s = f(I_{rms} / I_N)$



Rys. 2. Przykład charakterystyk $s = f(I_{rms} / I_N)$: kolorem niebieskim – (1) rzeczywista charakterystyka silnika, kolorem czerwonym – (2) standardowa charakterystyka estymatora poślizgu dla $k = 0,5$, kolorem zielonym – (3) zmodyfikowana charakterystyka estymatora poślizgu dla $k = 0,6406$

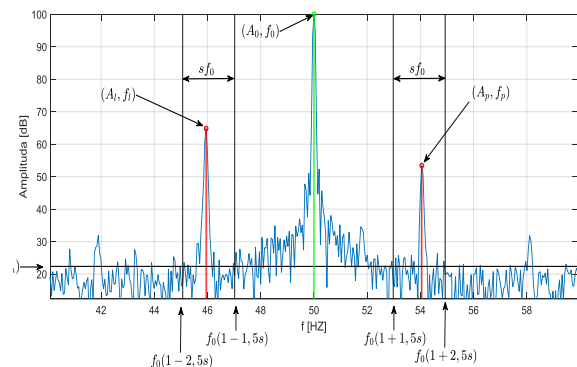
Charakterystyka (1) z Rys. 2. jest charakterystyką rzeczywistą silnika. Standardowo dla $k = 0,5$ algorytm wyznaczył charakterystykę (2) estymatora poślizgu. Po dokonaniu pomiarów prądu i prędkości – fioletowy punkt na rys. 2, a następnie wykonaniu obliczeń można zmienić współczynnik estymatora poślizgu.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

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

gdzie: f_0 - częstotliwość napięcia zasilania, s - estymowany poślizg silnika.

Algorytm poszukuje maksymalnych prążków w otoczeniu o promieniu $0,5s f_0$ od częstotliwości wyznaczonych z (5) Na rys.3. przedstawiono przykład takiego wyznaczenia z zaznaczonymi zakresami poszukiwań.



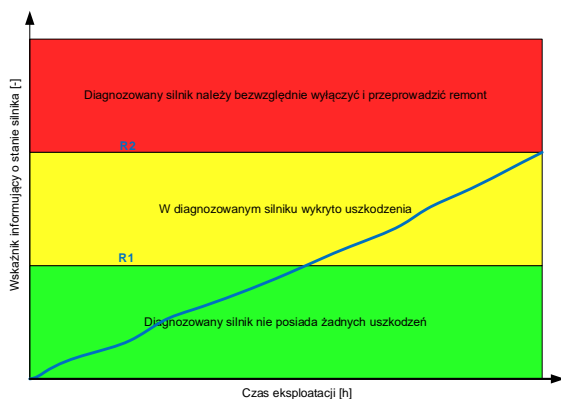
Rys. 3. Przykładowe widmo prądu stojana silnika z uszkodzoną klatką wirnika

Na rysunku 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 rysunku 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.



Rys. 4. Ilustracja idei śledzenia stanu maszyny

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

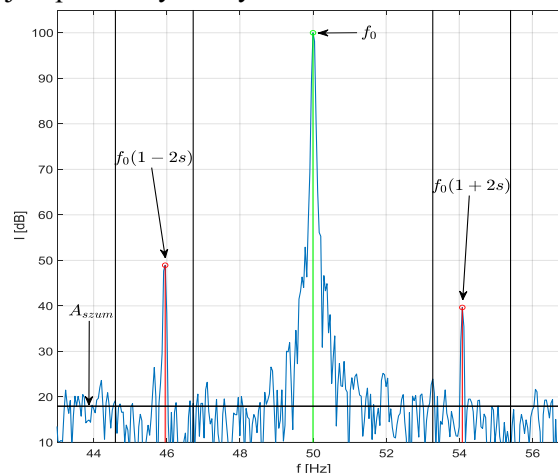
3. Testy laboratoryjne

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

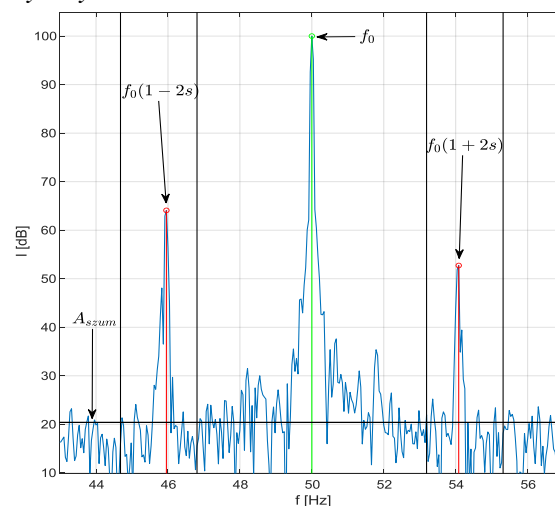
- symetrycznego,
- z jednym przerwanym prętem,
- z dwoma przerwanymi prętami (nr 1 i 4),
- z dwoma przerwanymi prętami (nr 1 i 2).

Na rys 5 do rys 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

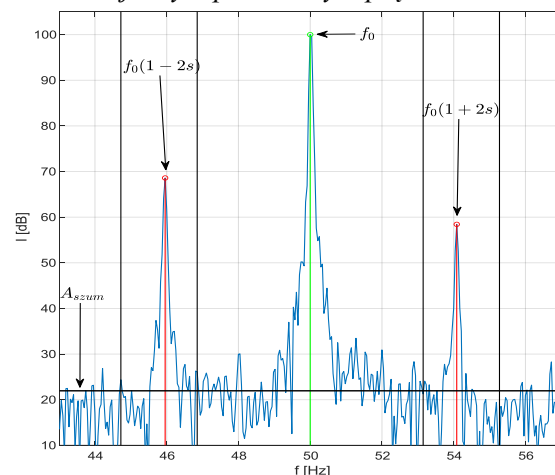
pionowymi czarnymi liniami. Grubą czarną poziomą linią zaznaczono poziom szumu, który jest potrzebny do wyznaczenia wskaźnika RFI .



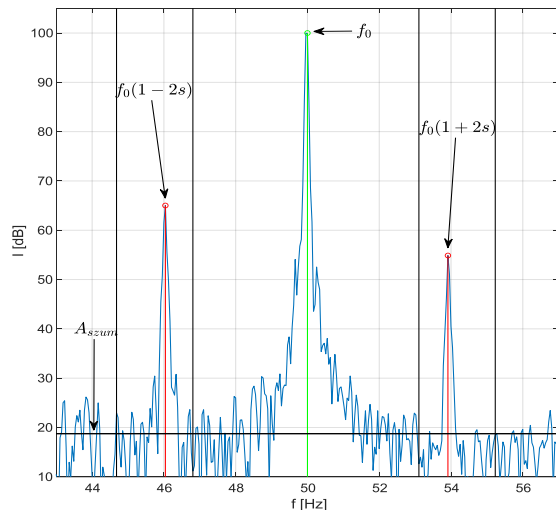
Rys. 5. Widmo prądu stojana silnika z symetrycznym wirnikiem



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



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



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

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

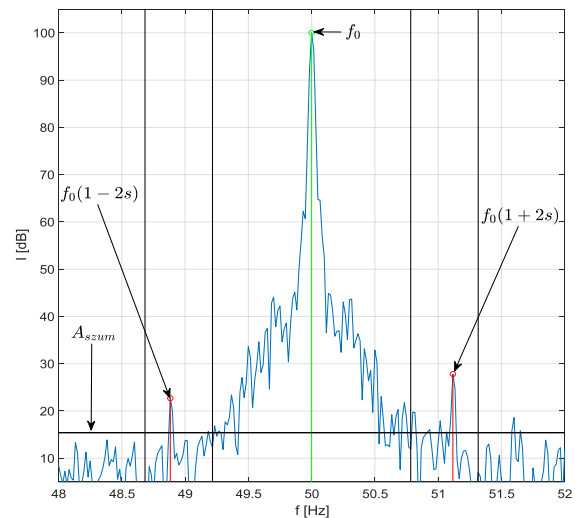
WIRNIK	RFI
Symetryczny	0,755
z jednym przerwanym prętym	1,097
z dwoma przerwanymi prętami (nr 1 i 4)	1,110
z dwoma przerwanymi prętami (nr 1 i 2)	1,139

Analizując wyniki testów laboratoryjnych umieszczonych w Tabeli 1 można zauważyć, że wraz ze wzrostem poziomu uszkodzenia klatki wirnika wyznaczony 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 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.

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, $p = 10$, $PF = 0,82$.



Rys. 9. Widmo prądu stojana silnika napędzającego kompresor

Współczynnik RFI wyznaczony przez moduł detekcji uszkodzeń klatki wirnika wynosi 1,46 i wskazuje na początkowe uszkodzenia. Porównując rys. 6 i rys. 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. 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. Zaimplementowana nowa funkcja jest uzupełnieniem szeregu wachlarza zabezpieczeń oferowanych w BEL_plus przez firmę Apator Elkomtech. Algorytm jest prosty i wielokrotnie sprawdzał się podczas pomiarów diagnostycznych przez pracowników Wydziału Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechniki Krakowskiej w obiektach

przemysłowych na terenie całej Polski. Algorytm można za pomocą zmiany parametrów wejściowych z łatwością dostosować do każdego silnika indukcyjnego zasilanego z sieci. 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.

6. Literatura

- [1]. G.B. Klimanet, et al. „Methods of motor current signature analysis”, *Elect. Mach. Power Syst.*, Vol. 20, No. 5, 1992.
- [2]. D.G. Dorrell, W.T. Thomson, S. Roach „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]. M.E.H. Benbouzid, „A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 47, No. 5, page 987-991, 2000.
- [4]. W. Rams, J. Rusek, „Praktyczna diagnostyka maszyn indukcyjnych klatkowych”, *Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne*, nr 68, str. 1-5, 2004.
- [5]. C.T. Kowalski, W. Kanior, „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]. A. Bellini, F. Filipetti, C. Tassoni, G.A. Capolino, „Advances in Diagnostic Techniques for Induction Machines”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol.55, No.12, str. 4109-4126, Dec. 2008.
- [7]. B. Drak, „Typowe uszkodzenia silników indukcyjnych dużej mocy”, *Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe*, nr 89, 2011.
- [8]. S. Szymaniec, „Diagnostyka eksploatacyjna uszkodzeń napędów elektrycznych w przemyśle”, *Napędy i Sterowanie*, R. 13, nr 6, s. 84-89, 2011.
- [9]. M. Sułowicz, J. Petryna, K. Weinreb, K. Guziec, „Porównawcze pomiary defektów klatek rozruchowych silników indukcyjnych pod kątem wykorzystania w diagnostyce”, *Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe*, nr 99, str. 77-83, 2013.
- [10]. L. Swędrowski, „Pomiary w diagnostyce silników indukcyjnych klatkowych”, *Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej*, 2013.
- [11]. P. Ostojic, A. Banerjee, D. C. Patel, W. Basu and S. Ali, „Advanced Motor Monitoring and Diagnostics,” in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, no. 5, pp. 3120-3127, Sept.-Oct. 2014.
- [12]. M. Rad, „Diagnostyka klatki we współczesnych zabezpieczeniach silników indukcyjnych”, *Napędy i Sterowanie*, R18, nr 5, str. 68-70, 2016.
- [13]. V. Choqueuse, E. Elbouchikhi, Z. Oubrahim and M. Benbouzid, „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, str. 8093-8098, 2017.
- [14]. J. Petryna, Z. Ławrowski, M. Sułowicz, K. Guziec, „Diagnozowanie i weryfikacja termowizyjna silników indukcyjnych z asymetrią elektromagnetyczną”, *Napędy i Sterowanie*, R19, nr 7/8, str. 144-153, 2017.
- [15]. A. Juszczyk, „Diagnostyka silników wykorzystująca wielkości pomiarowe aparatury zabezpieczeniowej”, *Napędy i Sterowanie*, R20, nr 9, str. 100-110, 2018.
- [16]. T. Glinka, S. Szymaniec, „Diagnostyka maszyn i urządzeń – uwagi ogólne”, *Napędy i Sterowanie*, nr 5, str. 36-49, 2020.

Autorzy

dr inż. Arkadiusz Duda, arka-
dusz.duda@pk.edu.pl
dr hab. inż. Maciej Sułowicz, prof. PK, ma-
ciej.sulowicz@pk.edu.pl
mgr inż. Jarosław Tulicki, ja-
roslaw.tulicki@pk.edu.pl
dr hab. inż. Tomasz Węgiel, prof. PK, to-
masz.wegiel@pk.edu.pl
Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii
Elektrycznej i Komputerowej,
Katedra Inżynierii Elektrycznej,
31-155 Kraków, ul. Warszawska 24
mgr inż. Marcin Iwiński,
marcin.iwinski@apator.com
Apator Elkomtech S.A.
ul. Wołowa 2C
93-569 Łódź