

Natalia Pragłowska-Ryłko, Maciej Sułowicz
Politechnika Krakowska, Kraków

ZASTOSOWANIE RUCHOMEJ WARTOŚCI SKUTECZNEJ PRĄDU DO DIAGNOSTYKI SILNIKÓW INDUKCYJNYCH KLATKOWYCH

APPLICATION OF MOVING RMS CURRENT VALUE IN DIAGNOSTICS OF SQUIRREL CAGE INDUCTION MOTORS

Streszczenie: W niniejszym artykule autorzy przedstawili metodę diagnostyczną do wykrywania uszkodzeń w silnikach indukcyjnych klatkowych. Metoda ta wykorzystuje pojęcie ruchomej wartości skutecznej z zastosowaniem nowych wskaźników diagnostycznych. Taka forma bezinwazyjnej detekcji uszkodzeń klatki silnika indukcyjnego, pozwala na szybką diagnozę co do stanu maszyny, na podstawie pomiaru prądu w jednej fazie stojana. Umożliwia to dokonywanie szybkiej oceny stanu klatki silnika indukcyjnego, bez dużego nakładu obliczeniowego. Przedstawiony algorytm, może z powodzeniem być implementowany w przenośnych urządzeniach pomiarowych i multimetrach. Rozważania zawarte w niniejszym artykule, stanowią podstawę do dalszych badań nad diagnostyką silników indukcyjnych klatkowych.

Abstract: In this article, authors presented diagnostic method for detecting defects in the squirrel cage induction motors. This method uses the concept of moving RMS value with usage of new diagnostic indicators. This form of non-invasive detection of cage defects in induction motor allows for the rapid diagnosis based on the stator current measurement in only one phase. This fact allows to make a rapid assessment of the cage induction motor without intensive computing. The algorithm can be successfully implemented in a portable measuring devices and multimeters. The considerations included in this article can be the basis for further researches on diagnostics of squirrel cage induction motors.

Słowa kluczowe: diagnostyka silników indukcyjnych klatkowych, ruchoma wartość skuteczna prądu, uszkodzenie klatki

Keywords: diagnostics of squirrel-cage induction motors, moving RMS current value, cage damage

1. Wstęp

Bezinwazyjna, prosta i skuteczna diagnostyka stanu jest niezwykle istotnym zagadnieniem, dotyczącym eksploatacji maszyn elektrycznych. Jednym ze sposobów diagnostyki maszyn indukcyjnych klatkowych, jest rejestracja i analiza przebiegów prądów fazowych stojana [1],[2]. Do powszechnie stosowanych metod można tu zaliczyć analizy widmowe, analizy czasowo-częstotliwościowe, czy inne zaawansowane metody przetwarzania sygnałów. Do oceny stanu maszyny można też wykorzystać prostsze metody analizy umożliwiające ocenę na podstawie łatwych do uzyskania wskaźników oceny. W celu bezinwazyjnej oceny stanu wirnika można wykorzystać metodę opartą na analizie przebiegu ruchomej wartości skutecznej prądów stojana [3-7]. W niniejszym artykule, oprócz ruchomej wartości skutecznej prądu, autorzy wprowadzili wskaźniki diagnostyczne, które przyspieszają ocenę stanu klatki silnika indukcyjnego. Został tutaj przedstawiony prosty algorytm, umożliwiający szybką ocenę stanu klatki, na podstawie pomiaru prądu

tylko w jednej fazie stojana. Artykuł zawiera analizę wpływu różnych, rzeczywistych uszkodzeń silnika, na przebiegi sygnału ruchomej wartości skutecznej prądu i wspomnianych wskaźników oceny stanu klatki maszyny. Całość stanowi metodę diagnostyczną, którą stosunkowo łatwo można zaimplementować w przenośnych lub stacjonarnych urządzeniach kontrolno-diagnostycznych. Przedstawiony algorytm ułatwia wykrywanie uszkodzeń klatki wirnika. Dzięki wykorzystaniu danych pomiarowych z badań przeprowadzonych dla różnych uszkodzeń klatki silnika indukcyjnego, wyniki analiz są wiarygodne i stanowią weryfikację rozważań teoretycznych oraz badań symulacyjnych stosowanych w pracach [3-7].

Wszystkie analizy przeprowadzono dla pracy silnika w stanie ustalonym przy stałym obciążeniu. Do oceny stanu maszyny wystarcza rejestracja jednego prądu stojana w przedziale czasu nie dłuższym niż 2 sekundy.

2. Ruchoma wartość skuteczna prądu

Ruchoma wartość skuteczna prądu definiowana jest, jako [4],[8]:

$$I_{sk} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T}^t i^2(\tau) d\tau} \quad (1)$$

gdzie:

I_{sk} - ruchoma wartość skuteczna prądu

T - okres harmoniczej podstawowej napięcia zasilającego

t - czas

i - wartość chwilowa prądu stojana

Zbiór wartości ze wzoru (1) otrzymuje się dla przesuwającego się okna czasowego [4].

3. Algorytm diagnostyki uszkodzeń dla silnika klatkowego

W niniejszej pracy, w celu szybszego wykrywania uszkodzeń klatki, autorzy rozszerzyli metodę ruchomej wartości skutecznej prądu, o trzy wskaźniki oceny diagnostycznej. Ich równoczesne zastosowanie pozwoliło opracować prosty algorytm do detekcji uszkodzeń klatki.

3.1. Wskaźniki diagnostyczne

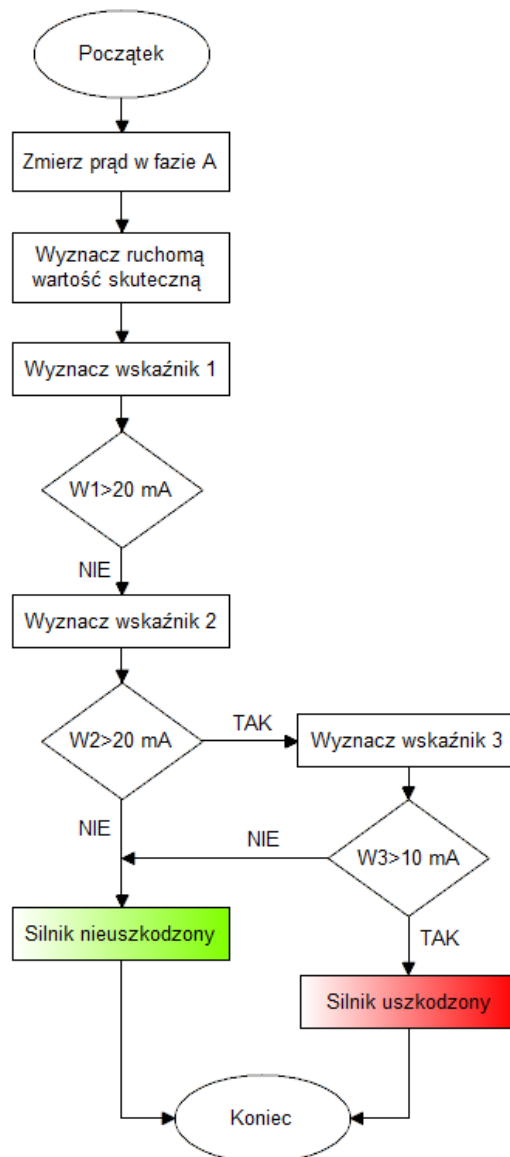
Pierwszy, zaproponowany przez autorów wskaźnik, definiowany jest jako różnica, pomiędzy ruchomą wartością skuteczną, a średnią wartością ruchomej wartości skutecznej całego sygnału. Poprzez eliminację składowej stałej, otrzymuje się sygnał unormowany. Sygnał ten jest łatwiejszy do analizy, ze względu na jego oscylacje wokół zera.

Drugi, użyty w niniejszej pracy wskaźnik diagnostyczny W_2 , bazuje na wartościach bezwzględnych wskaźnika W_1 . W praktyce oznacza to wartości bezwzględne różnicy, pomiędzy ruchomą wartością skuteczną, a średnią wartością ruchomej wartości skutecznej całego sygnału prądu fazowego.

Jako trzeci wskaźnik W_3 , autorzy przyjęli wartość skuteczną, z ruchomej wartości skutecznej sygnału prądu. Jest to wskaźnik, który umożliwia szybką końcową diagnozę silnika, ze względu na potrzebę porównania ze sobą jedynie dwóch wartości – wyznaczonej wartości wskaźnika, z wartością, która określa dopuszczalny poziom wskaźnika dla silnika nieuszkodzonego.

3.2. Wskaźniki diagnostyczne

Poniżej na rys. 1 przedstawiony został algorytm postępowania, umożliwiający wykrycie uszkodzeń klatki silnika indukcyjnego, z wykorzystaniem ruchomej wartości skutecznej oraz trzech zaproponowanych wskaźników do oceny diagnostycznej. Wartości wskaźników dotyczą pracy silnika przy obciążeniu prądem znamionowym.



Rys. 1. Algorytm wykrywania uszkodzeń klatki wirnika dla obciążenia znamionowego

4. Diagnostyka uszkodzeń klatki z wykorzystaniem ruchomej wartości skutecznej prądu

Analizowane przebiegi prądów fazowych stojana pochodzą z badań, przeprowadzonych na

silniku indukcyjnym klatkowym Sg112M-4 o danych znamionowych dla połączenia uzwojeń stojana w trójkąt: $P_N=4,0$ kW, $U_N=380$ V, $I_N=8,6$ A, $n_N=1445$ obr/min. Podczas badań uzwojenie stojana było skojarzone w gwiazdę bez przewodu zerowego. Przyjęto, że prąd znamionowy dla tego przypadku połączenia i symetrycznego zasilania z sieci 3x400V to 2,867 A. Silnik ten ma 36 żłobków na stojanie i 28 prętów klatki wirnika. Zestaw wymiennych wirników umożliwił badanie kilku przypadków uszkodzeń klatki.

Poniższe analizy zostały przeprowadzone przy prądzie obciążenia średnio około 3,0 A i prędkości obrotowej około 1440 obr/min. Sygnały proporcjonalne do prądów stojana, zbierane z przetworników LEM HY-15 za pomocą karty pomiarowej NI USB 6259, próbkowano z częstotliwością 10kS/s. Analizie poddano przebiegi prądu stojana w pierwszej fazie. Dla sygnałów prądów z pozostałych faz wyniki były bardzo podobne i nie zamieszczono ich w dalszych analizach.

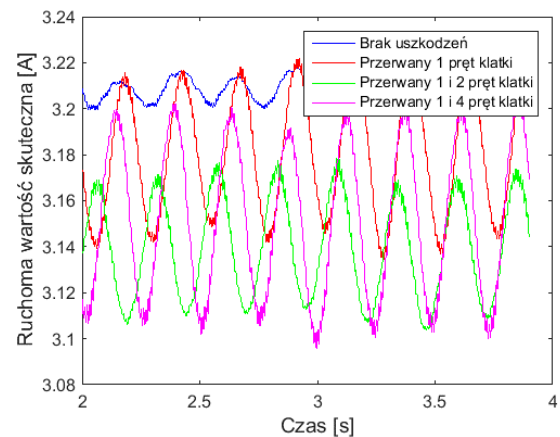
W dalszych analizach badano następujące przypadki uszkodzenia klatki silnika:

- silnik bez uszkodzeń,
- uszkodzony pierwszy pręt klatki wirnika,
- uszkodzony pierwszy i drugi pręt klatki wirnika,
- uszkodzony pierwszy i czwarty pręt klatki wirnika.

Na rys.2 do rys. 4 przedstawiono analizy zarejestrowanych prądów pierwszej fazy stojana przetworzonych na przebiegi czasowe ruchomej wartości skutecznej prądów.

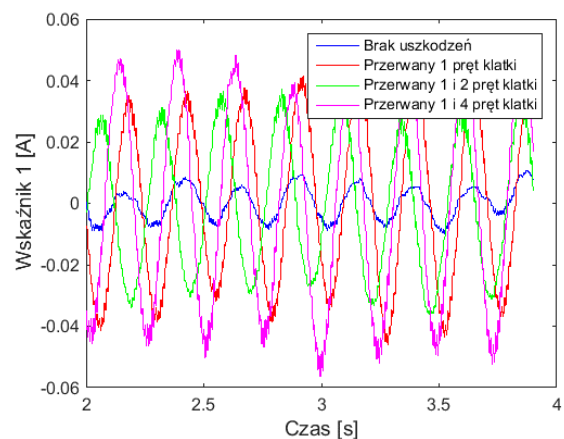
4.1. Porównanie zmian ruchomej wartości skutecznej i wskaźników dla silnika nieuszkodzonego i uszkodzonego

Wyznaczenia przebiegu ruchomej wartości skutecznej oraz wskaźników W_1 i W_2 (rys. 2-4), dokonywano dla stanu ustalonego, dla pięciu okresów sygnału. Ruchoma wartość skuteczna była wyliczana dla przedziału zawierającego tysiąc próbek, który z każdą iteracją przesuwany był o jedną kolejną próbkę wektora danych z całego okresu rejestracji.



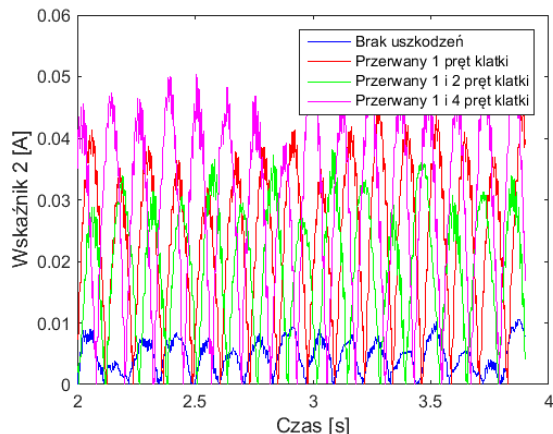
Rys. 2. Przebieg ruchomej wartości skutecznej dla wybranych uszkodzeń klatki silnika Sg112M

Na rys. 3 zamieszczono przebieg wskaźnika diagnostycznego W_1 , który przedstawia różnicę między ruchomą wartością skuteczną wybranego prądu fazowego dla różnych uszkodzeń, a wartością średnią ze wspomnianej ruchomej wartości skutecznej prądu. Przebiegi oscylują wokół zera, co ułatwia ich porównanie. Jest to pierwsza z normalizacji sygnału, który w kolejnym kroku posłuży do wyznaczenia końcowego wskaźnika oceny. Dla tak unormowanego wskaźnika widać już wyraźne różnice pomiędzy przebiegiem ruchomej wartości skutecznej prądu dla silnika zdrowego i silników z różnym stopniem uszkodzenia klatki wirnika.



Rys. 3. Przebieg wskaźnika W_1 ruchomej wartości skutecznej dla wybranych uszkodzeń silnika Sg112M-4

Na rys. 4 przedstawiono zmiany wskaźnika diagnostycznego W_2 , czyli wartości bezwzględnej różnicy, między ruchomą wartością skuteczną prądów fazowych, a wartością średnią ze wspomnianej ruchomej wartości skutecznej.



Rys. 4. Przebieg wskaźnika W_2 ruchomej wartości skutecznej dla wybranych uszkodzeń silnika Sg112M-4

Analizując rys. 2 do rys.4 można zauważyć, że w przypadku sygnałów prądu, pochodzących z uszkodzonej maszyny, występują większe tętnienia ruchomej wartości skutecznej i wskaźników, niż w przypadku silnika nieuszkodzonego. Co więcej, uszkodzenie klatki wpływa na wzrost amplitudy przebiegu ruchomej wartości skutecznej oraz przebiegów wskaźników W_1 i W_2 . W przypadku uszkodzonego pierwszego i czwartego pręta klatki, wahania średniej ruchomej wartości prądu są widocznie większe, niż w przypadku przerwania pierwszego oraz pierwszego i drugiego pręta klatki. Zmiany ruchomej wartości prądu, w przypadku nieuszkodzonego silnika, są porównywalnie niewielkie. Analogiczne zmiany, jeśli chodzi o różnice wartości amplitudy sygnałów dla różnych uszkodzeń, można zauważyć dla przebiegów wskaźnika W_1 i W_2 .

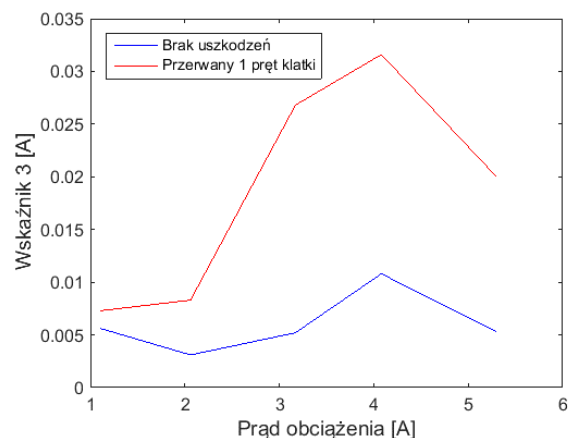
Zmiany wartości trzeciego wskaźnika diagnostycznego W_3 , w zależności od występujących uszkodzeń, zestawione zostały w tab. 1. Wartości wskaźnika zostały wyznaczone dla tych samych warunków pracy silnika, jak wielkości opisane powyżej.

Tab. 1. Zestawienie wartości wskaźnika 3 dla wybranych uszkodzeń klatki silnika Sg112M-4

Rodzaj uszkodzenia	Wartość W_3
Brak uszkodzenia	5,2 mA
Przerwany 1 pręt klatki	26,8 mA
Przerwany 1 i 2 pręta klatki	22,0 mA
Przerwany 1 i 4 pręta klatki	32,9 mA

Podobnie jak w poprzednich przypadkach, powstawanie uszkodzeń klatki wirnika, powoduje wzrost wartości wskaźnika. Dla nieuszkodzonego silnika, wartość wskaźnika jest na poziomie 5 mA, dla prądów każdej z faz. Uszkodzenie pierwszego oraz pierwszego i drugiego, powodują wzrost wartości wskaźnika do poziomu powyżej 20 mA. Przerwanie pierwszego i czwartego pręta, wskaźnik W_3 przyjmuje wartość powyżej 30 mA.

Poniżej przedstawiono porównanie wartości wskaźnika W_3 , dla silnika nieuszkodzonego i z uszkodzonym jednym prętem, dla różnych wartości prądu obciążenia.



Rys. 5. Przebieg wartości wskaźnika 3 dla różnych wartości prądu obciążenia dla silnika Sg112M-4 bez uszkodzeń i z uszkodzonym pierwszym prętem klatki

Porównując wartości wskaźnika W_3 na rys. 5 można zauważyć, iż wskaźnik ten jest zawsze większy w przypadku silnika z uszkodzeniem. Ze względu na nieliniową zmianę wskaźnika, w zależności od prądu obciążenia, wskaźnik ten nie jest jednak dobrą miarą diagnostyczną w przypadku stanu jałowego i silnika słabo obciążonego. Należy więc stosować go przy obciążeniu prądem o wartości bliskiej połowie prądu znamionowego, kiedy to różnica między wskaźnikami dla silnika nieuszkodzonego i uszkodzonego jest największa.

4.2. Przyjęte wartości wskaźników dla stanów awaryjnych

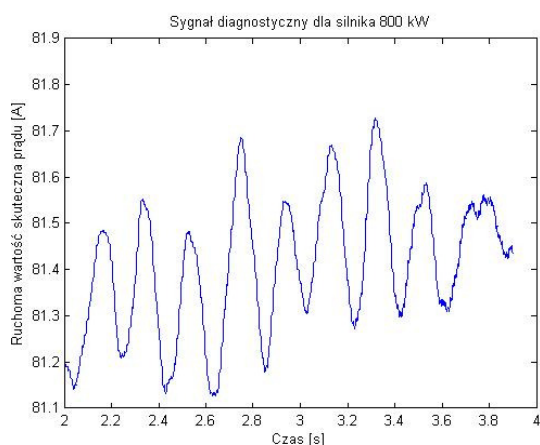
Na podstawie przeprowadzonych badań, jako wartość wskaźników W_1 i W_2 , sygnalizującą pojawienie się uszkodzenia klatki dla prądu obciążenia bliskiego znamionowemu, autorzy przyjęli 20 mA.

W przypadku wskaźnika W_3 , dla prądu znamionowego (2,867 A) autorzy ustalili jego wartość, która wskazuje na uszkodzenie klatki wirnika, na poziomie 10 mA. Jest to blisko dwukrotnie większa wartość, niż w przypadku silnika nieuszkodzonego.

Z przeprowadzonych analiz można sformułować wnioski, że wzrost bezwzględnej wartości wskaźnika powyżej 0,4% prądu znamionowego może z bardzo dużym prawdopodobieństwem świadczyć o uszkodzeniu klatki wirnika.

5. Badania dla silników pracujących w napędach przemysłowych

Dla weryfikacji opracowanego algorytmu oceny stanu klatki przeprowadzono analizy dla dwu dużych silników wysokonapięciowych dużej mocy pracujących w układach napędowych ciągów technologicznych w zakładach przemysłowych. Pierwszym silnikiem, dla którego przeprowadzono analizy był silnik pionowy SZDVR136t o mocy 800 kW.



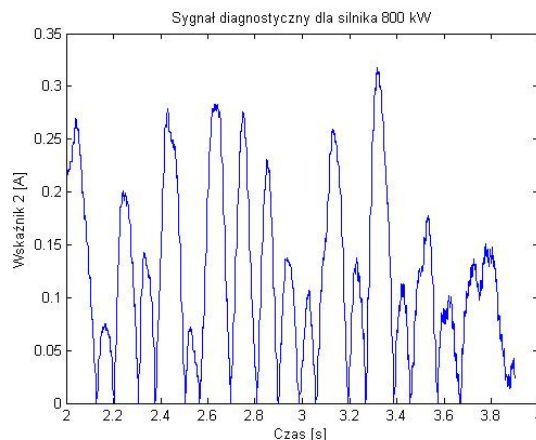
Rys. 6. Przebieg ruchomej wartości skutecznej dla silnika 800 kW

Dane silnika SZDVR136t: $P_N=800$ kW, $U_N=6000$ V, $I_N=95$ A, $n_N=985$ obr/min. Na rys.6 przedstawiono przebieg ruchomej wartości skutecznej prądu stojana. Na rys.7 przedstawiono znormalizowaną wartość wskaźnika. Wartość wskaźnika $W_3=0,145$, $0,15\%$ I_N .

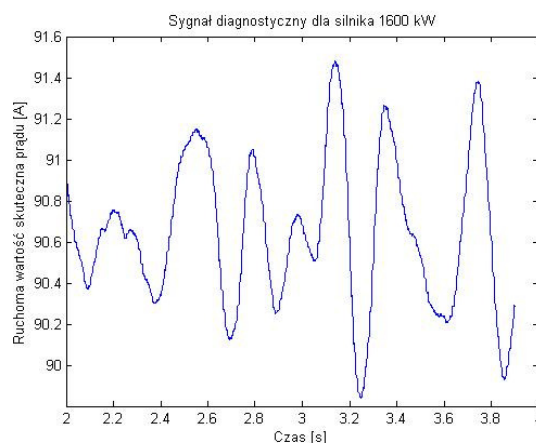
Drugim silnikiem, dla którego przeprowadzono analizy był silnik wysokonapięciowy o danych znamionowych: $P_N=1600$ kW, $U_N=6000$ V, $I_N=180$ A, $n_N=1483$ obr/min.

Na rys. 8 przedstawiono przebieg ruchomej wartości skutecznej prądu stojana dla silnika 1600 kW. Natomiast na rys.9 przedstawiono znormalizowaną wartość wskaźnika dla tego silnika. Z badań przeprowadzonych innymi me-

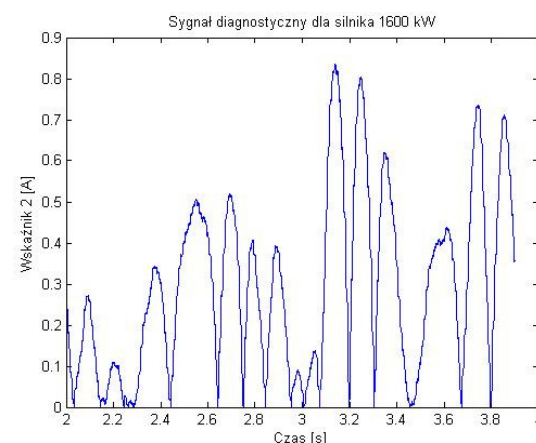
todami stwierdzono dla tego silnika wczesny rozwój uszkodzenia klatki wirnika.



Rys. 7. Przebieg wskaźnika W_2 dla silnika 800kW



Rys. 8. Przebieg ruchomej wartości skutecznej dla silnika 1600 kW



Rys. 9. Przebieg wskaźnika W_2 dla silnika 1600kW

Wartość wskaźnika $W_3=0,366$, $0,2\%$ I_N . Na podstawie analiz danych dla dwóch silników wysokonapięciowych dużej mocy można stwierdzić, że opracowaną metodą można w sposób

szybki ocenić stan tych maszyn. Po przeprowadzeniu pomiarów i analiz dla większej grupy maszyn można będzie ustalić przedziały wartości wskaźników diagnostycznych, przy których można jednoznacznie stwierdzić uszkodzenie klatek wirników maszyn dużej mocy.

6. Podsumowanie

Odpowiednia diagnostyka maszyn elektrycznych pozwala na uniknięcie awarii i przerw w pracy silników. W niniejszej pracy autorzy przedstawili wyniki, uzyskane po zastosowaniu metody, bazującej na wyliczaniu ruchomej wartości skutecznej prądów stojana, z dodatkowym zastosowaniem nowych wskaźników diagnostycznych. Przedstawione badania, bazujące na rzeczywistych pomiarach prądów fazowych stojana dla różnie uszkodzonych wirników silników, potwierdzają skuteczność metody diagnostycznej, opartej o metodę ruchomej wartości skutecznej i zaproponowanych przez autorów wskaźników diagnostycznych. Rezultaty otrzymane dla stanu ustalonego, umożliwiają skuteczne wykrywanie uszkodzeń silników indukcyjnych, w oparciu o pomiar prądu tylko w jednej fazie, co dodatkowo przyspiesza wykrywanie awarii maszyny. Brak konieczności wykonywania analizy widmowej, w celu diagnostyki uszkodzeń, pozwala na szybką diagnozę, z wykorzystaniem prostych urządzeń pomiarowych. Dla pomiarów laboratoryjnych przyjęto graniczne wartości wskaźników świadczące o wystąpieniu uszkodzenia klatki. Zastosowana metoda, wraz z użytymi wskaźnikami, może być w prosty sposób zaimplementowana na przenośnych lub stacjonarnych urządzeniach pomiarowych, a nawet w specjalizowanych multimetrach. Opracowany algorytm może też być łatwo zaimplementowany w systemach monitoringu, czy prostych systemach kontrolno-diagnostycznych.

7. Literatura

- [1]. Glinka T.: *Badania diagnostyczne maszyn elektrycznych w przemyśle*, KOMEL, Katowice 2002.
- [2]. Drozdowski P., Petryna J., Weinreb K.: *Ocena skuteczności diagnozowania silników indukcyjnych poprzez analizę spektralną prądu stojana*, XXXII International Symposium on Electrical Machines, Cracow 1996.
- [3]. Sołbut A.: *Możliwości automatycznej oceny stanu układu napędowego z maszyną indukcyjną*, Diagnostyka nr 35 (2005), s. 13–16.
- [4]. Sołbut A.: *Zalety zastosowania sygnału skutecznej wartości ruchomej prądu w diagnostyce maszyny*

indukcyjnej zasilanej z falownika napięcia, Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe KOMEL nr 74/2006, Ustroń 2006, s. 109-114.

[5]. Dybowski P.: *Diagnostyka silnika indukcyjnego z zastosowaniem sygnału skutecznej wartości ruchomej prądu*, Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe KOMEL nr 77/2007, Ustroń 2007, s. 27-32.

[6]. Dybowski P.: *Zastosowanie sygnału skutecznej wartości ruchomej prądu stojana w diagnostyce silnika indukcyjnego podczas rozruchu*, Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe KOMEL nr 82/2009, Ustroń 2009, s. 123-127.

[7]. Świędrowski L.: *Pomiary w diagnostyce silników indukcyjnych klatkowych*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2013.

[8]. Brandt S.: *Analiza danych*, PWN, Warszawa, 1999.

Autorzy

mgr inż. Natalia Pragłowska-Ryłko
Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej, Instytut Elektrotechniki i Informatyki
ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków
e-mail: npragłowska-rylko@pk.edu.pl

dr inż. Maciej Sułowicz
Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej, Instytut Elektromechanicznych Przemian Energii
ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków
e-mail: msulowicz@pk.edu.pl