

Jarosław Tulicki, Maciej Sułowicz
Politechnika Krakowska, Kraków

WYKRYWANIE NIESYMETRII KLATKI ROZRUCHOWEJ SILNIKA INDUKCYJNEGO DWUKLATKOWEGO W STANIE USTALONYM

DETECTION OF ASYMMETRY OF STARTING CAGE IN A DOUBLE CAGE INDUCTION MOTOR IN STEADY STATE

Streszczenie: Wykrywanie uszkodzeń wewnętrznych wirnika o charakterze elektrycznym silników indukcyjnych dwuklatkowych jest zadaniem trudnym i wieloetapowym. Szczególnie ważna, w przypadku określenia zakresu remontu wirnika jest informacja, która klatka uległa uszkodzeniu. Celem niniejszego artykułu jest wskazanie skutecznej metody rozróżnienia uszkodzeń obwodów klatki rozruchowej od klatki pracy w stanie ustalonym z niesymetriaми rezystancyjnymi prętów lub pierścieni zwierających. W pracy rozważono silnik z dwoma najczęściej występującymi konstrukcjami wirnika ze wspólnym i osobnymi pierścieniami zwierającymi obwody klatek. Przeprowadzono analizy diagnostyczne dla prototypowego silnika indukcyjnego dwuklatkowego małej mocy, w przypadku którego zarejestrowano sygnały prądów stojana podczas pomiarów w laboratorium. Wyniki pomiarów porównano z obliczeniami uzyskanymi z modelu polowego silnika indukcyjnego dwuklatkowego z niesymetrycznymi obwodami wirnika.

Abstract: Detecting internal damages of an electrical rotor of double cage induction motors is a difficult and multistage task. Particularly important, in the case of determining the scope of repair of the rotor, is the information that would allow one to determine which cage of the rotor has been damaged. The purpose of the article is to indicate an effective method of distinguishing failures of the starting cage from a working cage, with the resistive asymmetries of bars or rings. In the article the authors considered a motor with two most common rotor designs, i.e. with the common and separate rings the circuits of cages, respectively. Diagnostic analysis was performed for a double cage low-power induction motor prototype for which stator current signals were recorded during the measurements in the laboratory. The results of the measurements were compared against the calculations obtained using the finite element model (FEM).

Słowa kluczowe: silnik indukcyjny dwuklatkowy, asymetria klatki, diagnostyka uszkodzeń, model polowy
Keywords: double cage induction motor, rotor cage asymmetry, fault diagnosis, finite element model

1. Wstęp

Problem niezawodności i diagnostyki maszyn indukcyjnych dwuklatkowych pozostaje nadal istotnym zagadnieniem w eksploatacji napędów elektrycznych [2, 11]. Powszechnie stosowane metody analizy niesymetrii elektrycznych wirnika silnika dwuklatkowego, bazują na założeniu braku przepływu prądu w klatce rozruchowej lub klatce pracy [1, 9-18]. Oznacza to, że do diagnostyki obwodu klatki górnej wykorzystuje się przebieg prądu rozruchowego stojana lub w przypadku klatki dolnej przebieg prądu w stanie ustalonym [3-4, 10, 18]. W badaniach z podziałem na rozruch i stan ustalony wymaga się, aby moment obciążenia silnika był zbliżony do co najmniej połowy momentu znamionowego. W przypadku, gdy nie ma możliwości wykonania pomiaru prądu stojana silnika pod obciążeniem lub czas rozruchu jest zbyt krótki, diagnostykę klatek wirnika można przeprowadzić dla silnika pracującego w stanie ustalonym

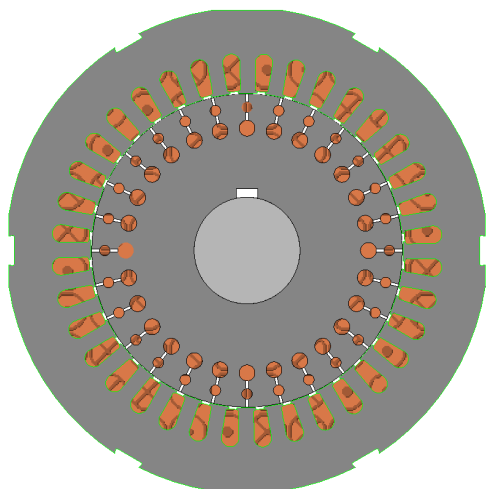
na biegu jałowym i przy niesymetrii układu napięć zasilających [5, 13-16].

W artykule przedstawiono wykonany model polowy silnika dwuklatkowego wraz z niesymetriaми elektrycznymi wirnika. Wyniki obliczeń dla wybranych przypadków uszkodzeń klatek wirnika porównano z pomiarami laboratoryjnymi z rzeczywistego modelu silnika. Podstawą analiz był przebieg ustalonego prądu stojana silnika, pracującego bez obciążenia z niesymetrią napięciową jednej fazy.

2. Model polowy silnika dwuklatkowego

Model polowy badanego silnika opracowano na bazie stojana maszyny indukcyjnej Sg-112M4 o mocy znamionowej 4kW. Oryginalny wirnik jednoklatkowy został zastąpiony wirnikiem dwuklatkowym z prętami prostymi o przekroju kołowym. Przyjęta konstrukcja wirnika (stosunek przekrojów poprzecznych prętów) odwzo-

rowuje maszyny dwuklatkowe średniej i dużej mocy. Do obliczeń przygotowano dwa modele wirników z osobnymi i wspólnym pierścieniem zwierającym klatki wirnika - przy niezmiennych wymiarach geometrycznych blach wirnika. Dodatkową modyfikacją w przypadku wirnika z osobnymi pierścieniami jest wydłużenie prętów klatki rozruchowej w stosunku do prętów klatki pracy. W modelu z wspólnym pierścieniem pręty obu klatek mają taką samą długość. Pręty klatek i pierścienie zwierające zostały wykonane z miedzi. Grubość szczeliny powietrznej pozostała na nie zmienionym poziomie w stosunku do wykonania fabrycznego i wynosi 0.3 mm. Uzwojenie obwodu stojana jest jednowarstwowe o poskoku średnicowym. Liczba żłobków stojana to 36, a liczba prętów dla każdej z klatek wirnika to 28. Pręty klatek są nieizolowane od blach jarzma wirnika. W modelu założono, że obwód magnetyczny jest nieliniowy – jarzma stojana i wirnika zostały wykonane z blach ferromagnetycznych typu M350-65A. Wał wirnika został zamodelowany jako element liniowy o przyjętej względnej przenikalności magnetycznej $\mu_r=1000$. Model silnika uwzględnia żłobkowanie stojana i wirnika – dna żłobków oraz przesmyki są wypełnione powietrzem. Na rys. 1 przedstawiono widok wykonanego modelu polowego 2D silnika.



Rys. 1. Widok wykonanego modelu MES silnika indukcyjnego dwuklatkowego

2.1. Modelowanie niesymetrii elektrycznych wirnika

Asymetrie elektryczne klatek wirnika w postaci wysokorezystancyjnych połączeń prętów, modelowano przez zmianę materiału z miedzi na materiał o 100-krotnie mniejszej przewodności

elektrycznej. Przerwy w segmentach pierścieni zwierających wybranej klatki modelowano przez 200-krotne powiększenie wartości rezystancji wycinka pierścienia w schemacie obwodowym wirnika.

2.2. Parametry przyjęte do obliczeń

W części polowej modelu silnika przyjęto maksymalne odległości między węzłami siatki MES o następujących wartościach: 0.5 mm dla komponent wypełnionych powietrzem i 1.5 mm dla elementów stojana oraz wirnika. Czas obliczeń dla każdego przypadku wynosił 5s (stan ustalony) z krokiem całkowania 0.5 ms. Część obwodowa modelu była zasilana z wieloharmonicznego układu napięć. Przyjęto następujące wartości szczytowe harmonicznych napięć fazowych kolejności zgodnej $U_1=310.5$ V (50Hz), $U_3=0.25$ V (150Hz), $U_7=1.5$ V (350Hz) i przeciwnej $U_5=3.55$ V (250Hz). Obwód stojana został skojarzony w gwiazdę bez przewodu zerowego. W równaniu ruchu założono występowanie strat mechanicznych wyrażonych jako moment oporowy o łącznej wartości 1 Nm. Obliczenia zostały wykonane w oprogramowaniu Magnet 2D.

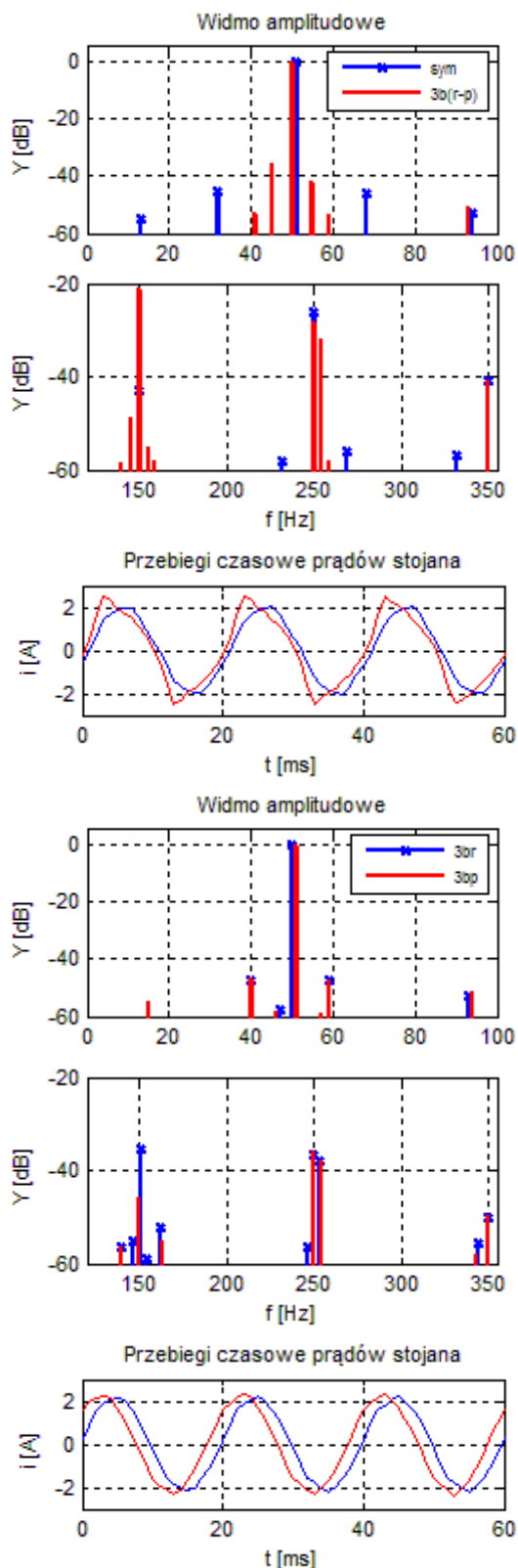
3. Wyniki obliczeń

Rozpatrzono następujące przypadki niesymetrii elektrycznych wirnika: w postaci uszkodzenia prętów lub segmentów pierścieni zwierających. Wyżej wymienione uszkodzenia były modelowane dla silnika ze wspólnym i osobnymi pierścieniami. Dla obu typów silnika dwuklatkowego wykonano obliczenia z przerwą lub 20% niesymetrią napięcia zasilającego fazy „U”.

Modelowany silnik pracował obciążony jedynie momentem wynikającym z strat mechanicznych (punkt 2.2 – bieg jałowy). W obliczeniach założono, że uszkodzenia klatek występują w tych samych sekcjach wirnika – „pod sobą”. W pracy przyjęto następujące oznaczenia na rysunkach: k-segment pierścienia, b-pręt klatki, r-obwód rozruchowy, p-obwód pracy.

3.1. Wirnik z osobnymi pierścieniami

Na rys. 2 przedstawiono wyniki obliczeń dla różnych kombinacji uszkodzeń trzech prętów klatek. Widma prądów stojana silnika pracującego z przerwany prętami zobrazowano na tle maszyny symetrycznej. W każdym przypadku (rys. 2), silnik pracował z przerwą w fazie stojana, wykonaną przez włączenie szeregowo do uzwojenia rezystancji o wartości $10^9 \Omega$.



Rys. 2. Widma amplitudowe i przebiegi czasowe prądów stojana silnika: symetrycznego i z kombinacjami uszkodzeń trzech prętów klatek – wirnik z osobnymi pierścieniami

Przedstawione widma amplitudowe prądów stojana wskazują na istotne różnice wokół wyż-

szych harmonicznym sieciowych (3, 5 i 7). Dla silnika z uszkodzonymi prętami klatki górnej i symetrycznym obwodem klatki dolnej, obserwuje się występowanie następujących składowych w porównaniu z silnikiem symetrycznym:

$$f_{sk} = f_0 [k \pm (k-1)s], k=3,5,7... \quad (1)$$

gdzie:

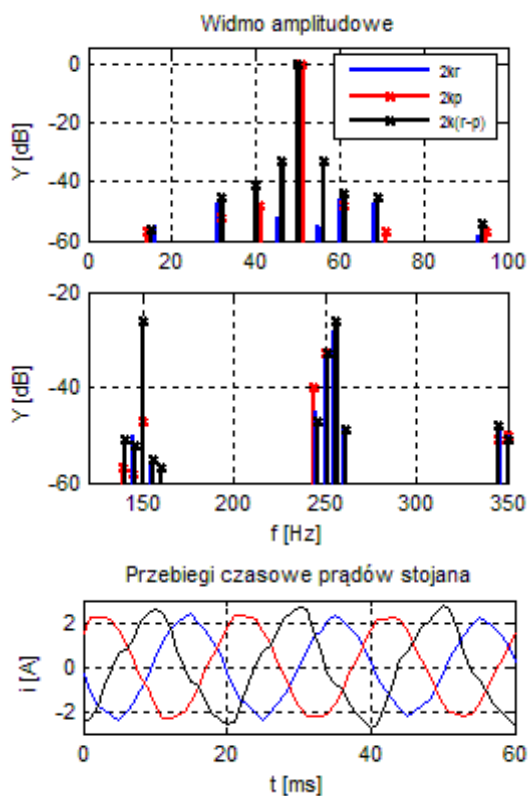
- f_{sk} - częstotliwość związana z niesymetrią rezystancyjną wirnika,
- f_0 - podstawowa częstotliwość sieci,
- k - nieparzysta wielokrotność f_0 ,
- s - poślizg.

W przypadku niesymetrii klatki pracy i nieuszkodzonej klatce rozruchowej, w badanym widmie prądu można wyróżnić częstotliwości opisane równaniem (1) dla $k=5,7$. Brak składowej $f_0(3-2s)$ w widmie pozwala wnioskować, że częstotliwości poślizgowe wokół trzeciej harmonicznej prądu (w zadanych warunkach pracy) są związane z niesymetrią rezystancyjną klatki rozruchowej. Skutkiem przerwy w fazie stojana jest pojawienie się składowej przeciwbieżnej pola w szczelinie. Przy braku obciążenia wskutek pojawienia się w rozkładzie pola harmonicznej zbliżonej do $2f_0$, prąd z klatki dolnej jest wypierany do klatki górnej. W tych warunkach można uznać, że prąd płynie głównie przez obwód klatki rozruchowej. Przy takim rozkładzie prądów w wirniku, podstawowa częstotliwość diagnostyczna $f_0(1-2s)$ nie występuje ze względu na zachowanie symetrii klatki górnej.

Widmo prądu silnika z przerwanyymi prętami obu klatek zawiera w porównaniu do wymienionych wyżej przypadków, częstotliwości diagnostyczne $f_0(1 \pm 2s)$ o wysokich amplitudach. Przyczyną wystąpienia prążków $f_0(1 \pm 2s)$, jest brak tłumienia pola pulsującego przez uszkodzone pręty klatki pracy leżące w tej samej sekcji wirnika co pręty klatki rozruchowej. Tak samo można tłumaczyć zauważalny wzrost amplitud składowych $f_0(3 \pm 2s)$. Z powyższego wynika, że do diagnostyki wirnika dwuklatkowego przy spełnieniu odpowiednich warunków pracy (niesymetria zewnętrzna po stronie zasilania, stan ustalony, uszkodzenie prętów klatek w tej samej sekcji wirnika), podstawą oceny niesymetrii klatki: górnej jest częstotliwość $f_0(3-2s)$, pracy jest składowa $f_0(1-2s)$ – mimo, że wynika głównie z niesymetrii obwodu klatki górnej. Czynnikiem sprzyjającym czytelności składowych diagnostycznych jest wartość poślizgu

w zadanych warunkach ($s \gg 0$) i pobór większego prądu magnesującego w stosunku do silnika z wirnikiem jednoklatkowym tej samej mocy. Porównując wykonania silnika z wirnikiem oryginalnym i badanym obserwuje się 35% wzrost prądu biegu jałowego w silniku z badanym wirnikiem. Powodem tak znaczącej różnicy prądów biegu jałowego jest powiększenie zastępczej szczeliny powietrznej w silniku z wirnikiem dwuklatkowym.

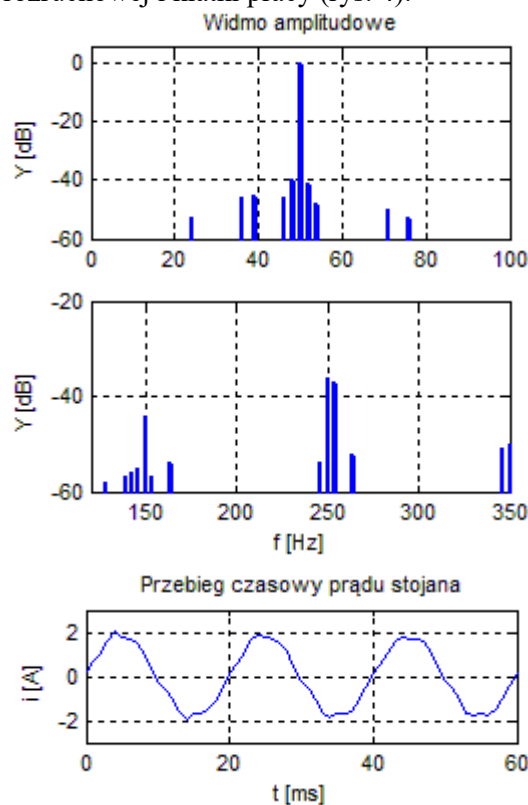
W silnikach wieloklatkowych prócz uszkodzeń prętów klatek, przyczyną niesymetrii elektrycznej wirnika mogą być pęknięcia segmentów pierścieni zwierających. Efekty wywołane niesymetrią rezystancyjną wycinków pierścieni, zbadano na podstawie obliczeń MES silnika z kombinacjami uszkodzeń dwóch segmentów pierścienia klatki górnej i klatki dolnej (rys. 3).



Rys. 3. Widma amplitudowe i przebiegi czasowe prądów stojana silnika z kombinacjami uszkodzeń dwóch segmentów pierścieni zwierających - wirnik z osobnymi pierścieniami

Przypadki przerw rezystancyjnych w segmentach pierścieni pod względem jakościowym są tożsame z wynikami obliczeń przedstawionymi na rys. 2. Pomimo, że pierścienie klatek nie są sprzężone magnetycznie ze sobą i uzwojeniami stojana, a pręty klatek nieuszkodzone, to o rozkładzie prądów w wirniku decydują różnice

prądów w wycinkach pierścienia, między którymi leżą pręty danej klatki. Przepływ prądów stojana, będących wynikiem niesymetrii elektrycznej wirnika, zależy od możliwości przepływu prądu przez pręty, które są sprzężone magnetycznie ze stojanem. Dlatego też rozróżnienie uszkodzeń prętów od pierścieni jest niemożliwe. W wielu przypadkach wykonanie przerwy prądowej w fazie zasilania może być utrudnione lub niemożliwe ze względów eksploatacyjnych. Wówczas desymetryzacja napięcia w układzie jest możliwa przez włączenie do jednej z faz dodatkowej indukcyjności. Wpływ obniżenia napięcia na jakość widma prądu stojana przedstawiono na bazie modelu wirnika z przerwanymi łącznie trzema prętami klatki rozruchowej i klatki pracy (rys. 4).



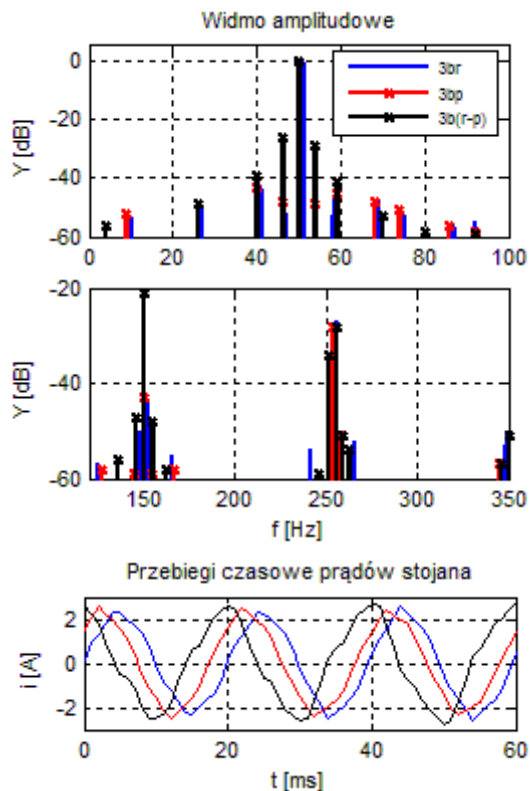
Rys. 4. Widmo amplitudowe i przebieg czasowy prądu stojana silnika z przerwanymi łącznie trzema prętami klatek - wirnik z osobnymi pierścieniami

Dla takiego samego rodzaju i stopnia niesymetrii elektrycznej wirnika z rys. 2, widmo prądu stojana (rys. 4) pod względem zawartości harmonicznych nie wykazuje istotnych różnic w stosunku do silnika z przerwą w jednej z faz zasilania. Ze względu na konstrukcję badanego silnika i obniżone napięcie w fazie stojana, wartość poślizgu $s > 0$ umożliwia odseparowanie

częstotliwości sieciowych od składowych diagnostycznych. W przypadku gdy poślizg $s \approx 0$, identyfikacja składowej $f_0(1-2s)$ w widmie prądu jest praktycznie niemożliwa. Wówczas jedynym rozróżnialnym sygnałem jest $f_0(3-2s)$, diagnostyka klatki dolnej w takim stanie pracy jest niemożliwa.

3.2. Wirnik ze wspólnym pierścieniem

W obliczeniach dla silnika ze wspólnym pierścieniem przyjęto, że pręty klatek zostały zwarte przez pierścień o parametrach elektrycznych klatki pracy z punktu 3.1. Analizę prądu stojana ograniczono do uszkodzeń prętów klatek wirnika z zadaną przerwą w fazie stojana (rys. 5).



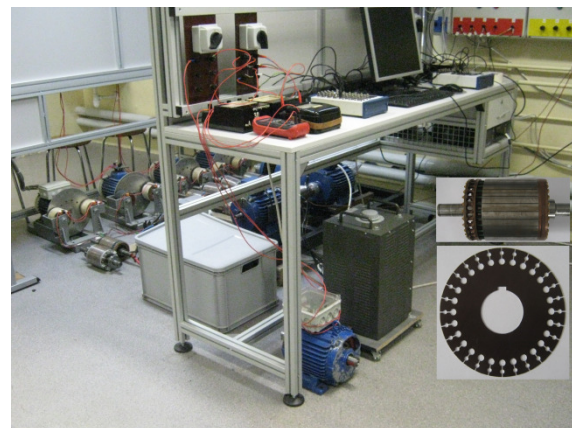
Rys. 5. Widma amplitudowe i przebiegi czasowe prądów stojana silnika z kombinacjami uszkodzeń trzech prętów klatek – wirnik z wspólnym pierścieniem

Analiza porównawcza widm prądu z rys.2 do rys.5, dla takich samych niesymetrii klatek wirnika, wskazuje na istnienie zbieżnych cech jakościowych z silnikiem z osobnymi pierścieniami. Występujące różnice mają charakter ilościowy i są wynikiem zmiany topologii wirnika - parametrów obwodowych klatki rozruchowej (skrócenie długości prętów, zwiększenie przekroju poprzecznego pierścienia).

W maszynie z wspólnym pierścieniem zwierającym, przerwy w segmentach generują harmoniczne (w zależności od wartości poślizgu na biegu jałowym i zasad podanych w punkcie 3.1) $f_0(1-2s)$ i $f_0(3-2s)$ desymetryzując jednocześnie obwody klatki rozruchowej i klatki pracy.

4. Badania laboratoryjne

Prototypowy wirnik dwuklatkowy silnika został wykonany jako konstrukcja umożliwiająca konfigurację topologii obwodów klatek wirnika do pracy ze wspólnym pierścieniem lub z osobnymi pierścieniami zwierającymi. Pręty wirnika zostały zwarte do pierścienia za pomocą połączeń śrubowych. Wykonanie przerwy w wybranej klatce jest możliwa przez wstawienie podkładki izolacyjnej między segment pierścienia i nakrętkę pręta. Po wykonaniu przerwy, pręt pozostaje w jarzmie ze względu na konieczność zachowania odpowiedniego poziomu wyważenia wirnika. Przy niesymetrii dowolnej klatki, pręty wyłączone z obwodów należy traktować jako bierne. Zmiana topologii obwodów elektrycznych wirnika odbywa się przez dodanie lub usunięcie dodatkowego (czołowego) pierścienia zwierającego pręty klatki górnej. Parametry geometryczne i elektryczne silnika są takie same jak dla modelu połowego z punktu drugiego.



Rys. 6. Widok stanowiska pomiarowego

Badania przeprowadzono na stanowisku pomiarowym, którego widok przedstawiono na rys.6.

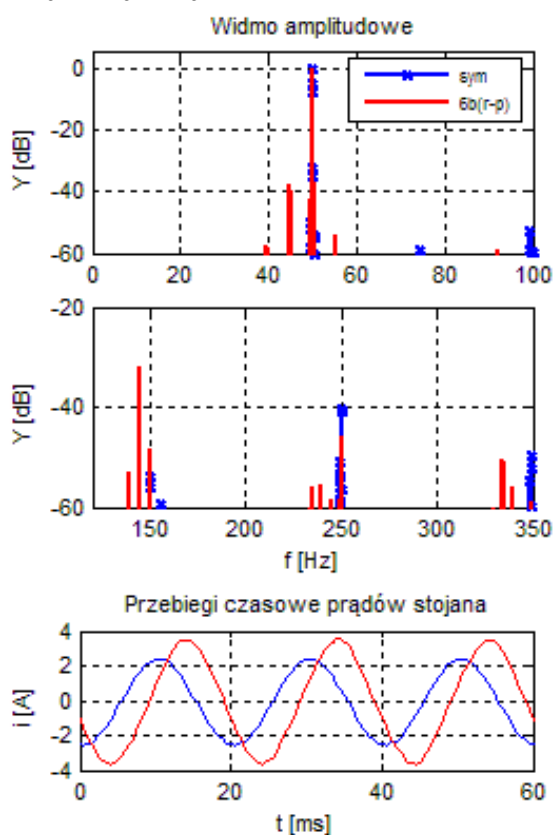
4.1. Układ pomiarowy

Do pomiaru prądów stojana zastosowano sondy cęgowe Tektronix A622. Pomiary prędkości obrotowej na wale były wykonane tachometrem optycznym. Sygnały napięciowe z przetworników mierzono za pomocą karty pomiarowej NI-6259. Silnik zasilano z autotransformatora, po czasie rozruchu i ustaleniu się prędkości obro-

towej układ zasilania desymetryzowano przez włączenie dodatkowego dławika lub wykonanie przerwy w jednej fazie stojana.

4.2. Wybrane wyniki pomiarów

W laboratorium wykonano serię pomiarów dla różnych wariantów: uszkodzeń klatek wirnika i wartości napięć zasilających. Poniżej (rys. 7) przedstawiono wyniki pomiarów dla silnika z osobnymi pierścieniami zwierającymi: symetrycznego i z uszkodzonymi sześcioma prętami klatki rozruchowej i klatki pracy. Prezentowany przypadek dotyczy silnika, który pracował z przerwana fazą stojana i niesymetrią prądów w tej samej sekcji wirnika.



Rys. 7. Widma amplitudowe i przebiegi czasowe prądów stojana silnika z symetrycznym wirnikiem i uszkodzonymi sześcioma prętami klatek – wirnik z osobnymi pierścieniami

Uzyskane wyniki pomiarów laboratoryjnych, potwierdzają skuteczność opisaną w artykule metody oceny niesymetrii rezystancyjnych wirnika dwuklatkowego. Różnice ilościowe między wynikami pomiarów a obliczeniami, mogą wynikać z: przyjętego rozkładu harmonicznego napięcia zasilającego, danych materiałowych, izolowania lub braku izolacji prętów w jarzmie.

5. Wnioski

Przedstawiona metoda diagnostyki może zostać wykorzystana na stacji prób lub w warunkach przemysłowych, gdy nie ma możliwości obciążenia silnika. Ze względu na konieczność desymetryzacji układu napięć zasilających, przedstawiony sposób oceny symetrii wirnika może być ograniczony do maszyn niskonapięciowych. Opisana metoda może również znaleźć zastosowanie w przypadku silników jednoklatkowych o budowie głębokożłobkowej.

6. Literatura

- [1]. J. Antonino-Daviu, M. Riera-Guasp, J. Pons-Llinares, J. Park, S. Bin Lee, J. Yoo, C. Kral "Detection of Broken Outer-Cage Bars for Double-Cage Induction Motors Under the Startup Transient", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 48, no. 5, str. 1541-1548, 2012.
- [2]. M. Bernatt, R. Rut, J. Mróz "Rotor cage failures", *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 78, str. 7-12, 2008.
- [3]. K. Boughrara, R. Ibtouen "Analytical Modeling of Double Cage Rotor Induction Motors in Healthy and Broken Bars Conditions", *2014 International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM)*, str. 302-308, 2014.
- [4]. B. Drak "Start-Up cages failures of induction motor double-cage rotors", *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 97, str. 63-66, 2012.
- [5]. K. N. Gyftakis, D. K. Athanasopoulos, J. Kappatou "Broken Bar Fault Diagnosis in Single and Double Cage Induction Motors Fed by Asymmetrical Voltage Supply", *2013 9th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*, str. 402-406, 2013.
- [6]. A. Głowacz, Z. Głowacz, "Diagnosis of the three-phase induction motor using thermal imaging", *Infrared Physics & Technology*, Vol. 81, str. 7-16, 2017.
- [7]. A. Głowacz, W. Głowacz, Z. Głowacz, J. Kozik, M. Gutten, D. Korenciak, Z. F. Khan, M. Irfan, E. Carletti "Fault Diagnosis of Three Phase Induction Motor Using Current Signal, MSAF-Ratio15 and Selected Classifiers", *Archives of Metallurgy and Materials*, Vol. 62(4), str. 2413-2419, 2017.
- [8]. A. Głowacz, Z. Głowacz "Wykrywanie uszkodzeń w silnikach elektrycznych z zastosowaniem metody analizy harmonicznej", *Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa*, Tom 45(12), str. 5-9.
- [9]. R. Miksiewicz "Diagnostic of double squirrel cage motors with broken bars", XI. International Conference on Low Voltage Electrical Machines, *LVEM2011*, 7-8 Nov. 2011, Brno-Slapanice, str. 401-407.

- [10]. R. Miksiewicz "Diagnostyka silników indukcyjnych dwuklatkowych z uszkodzonymi prętami", *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 95, str. 83-85, 2012.
- [11]. R. Miksiewicz "Diagnostyka silników indukcyjnych dwuklatkowych z uszkodzonymi prętami", *Napędy i Sterowanie*, Nr 5, str. 66-70, 2013.
- [12]. J. Park, B. Kim, J. Yang, S. Bin Lee, E. J. Wiedenbrug, M. Teska, S. Han "Evaluation of the Detectability of Broken Rotor Bars for Double Squirrel Cage Rotor Induction Motors", *2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Atlanta, GA, str. 2493-2500, 2010.
- [13]. W. Rams, J. Rusek "Induction – machine cage state diagnosis by supply from two phases", *XXX Sympozjum Maszyn Elektrycznych*, Kazimierz Dolny, Mat. Konf., str. 395-401, 1994.
- [14]. W. Rams, J. Rusek, M. Wierzcholski "Kontrola symetrii klatki w silnikach indukcyjnych przy zasilaniu dwufazowym", *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 50, str. 100-103, 1995.
- [15]. W. Rams, J. Rusek, M. Wierzcholski "Diagnostics of cage asymmetry of induction machine by two-phase supply", 40. Int. Wiss. Kolloquium, Ilmenau 18-21.09.1995, Mat. Konf., str. 649-654.
- [16]. J. Rusek "Komputerowa analiza maszyny indukcyjnej z wykorzystaniem bilansu harmonicznych", Wydawnictwa AGH, Kraków 2000.
- [17]. 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 2, str. 77-83, 2013.
- [18]. J. Tulicki, K. Weinreb, M. Sułowicz "The Possibility of distinguishing rotor cage bar faults in double squirrel cage induction motors on the basis of the stator current signal", *2017 International Symposium on Electrical Machines (SME)*, Naleczow, 2017, pp. 1-6.

Autorzy

mgr inż. J. Tulicki, jtulicki@pk.edu.pl
dr inż. M. Sułowicz, msulowicz@pk.edu.pl
Politechnika Krakowska,
Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej,
Instytut Elektromechanicznych Przemian
Energii, 31-155 Kraków, ul. Warszawska 24

Informacje dodatkowe

Przedstawione wyniki badań, zrealizowano w ramach tematu nr E-2/644/2017/DS sfinansowanego z dotacji na naukę przyznanej przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.