

Paweł Ewert, Tomasz Zawilak
Politechnika Wroclawska

ZASTOSOWANIE MODELU POLOWO-OBWODOWEGO DO MONITOROWANIA EKSCENTRYCZNOŚCI SILNIKÓW INDUKCYJNYCH

APPLICATION OF FIELD-CIRCUIT MODEL TO THE MONITORING OF INDUCTION MOTORS

Abstract: In the paper problems of detection and evaluation of the air-gap eccentricity in induction motor drive are presented. The possibility of monitoring and diagnostic of the non-central mounting rotor in the stator are presented. The application of stator current spectrum analysis to induction motor condition monitoring is discussed. The spectral frequencies typical for eccentricities occurring in the stator current are presented. The field-circuit model are used to simulation the stator current. Fast Fourier Transform analysis of stator current to the eccentricity monitoring are obtained to diagnostic patterns. The simulation results confirm the efficiency of the proposed method to the diagnostic of the induction motor drive.

1. Wprowadzenie

W ostatnim dziesięcioleciu nastąpił gwałtowny rozwój metod monitorowania i diagnostyki napędów elektrycznych. Obecnie w układach napędowych w wielu gałęziach przemysłu najczęściej wykorzystywane są silniki indukcyjne (około 90% wszystkich zainstalowanych silników). Każda awaria powoduje zakłócenia w procesie technologicznym i w konsekwencji prowadzi do wzrostu kosztów produkcji. Dlatego tak ważne jest wczesne wykrywanie uszkodzeń na podstawie monitorowania i oceny stanu technicznego układów napędowych z silnikami indukcyjnymi.

Detekcja i diagnoza ekscentryczności jest bardzo ważnym elementem monitorowania stanu technicznego silników indukcyjnych. Około 80% uszkodzeń mechanicznych prowadzi do ekscentryczności. Należy również zauważyć, że ekscentryczność może powstać w czasie produkcji maszyny lub w procesie montażu.

Występowanie ekscentryczności często nie wyklucza maszyny z dalszej pracy. Jednakże powinna być ona wykryta oraz kontrolowany jej poziom, ponieważ z reguły ma tendencję do pogłębiania się i w konsekwencji prowadzi do uszkodzenia maszyny.

Obecnie w eksploatacji napędów elektrycznych dominują metody monitorowania i badania oparte na analizie sygnałów diagnostycznych w dziedzinie czasu i częstotliwości [8], [11]. W układach napędowych z silnikami indukcyjnymi podstawowymi sygnałami diagnostycznymi są prąd fazowy stojana oraz drgania mechaniczne, w których widoczne są symptomy

uszkodzeń elektrycznych i mechanicznych. Należy zwrócić uwagę na to, że równoczesne wystąpienie kilku awarii może powodować takie same skutki co w konsekwencji utrudnia ocenę ich ilościowego wpływu na stan maszyny. Na przykład równoczesne wystąpienie ekscentryczności statycznej i niesymetrii zasilania lub ekscentryczności dynamicznej i przerwy w obwodzie wirnika dają takie same objawy [8].

Monitorowanie ekscentryczności sprawia wiele trudności ponieważ, pomijając przypadki pokazowe i doświadczalne, musi ono być realizowane w trakcie normalnej pracy silnika (on-line), bezinwazyjnie, aby nie zmieniać układu sił działających na maszynę.

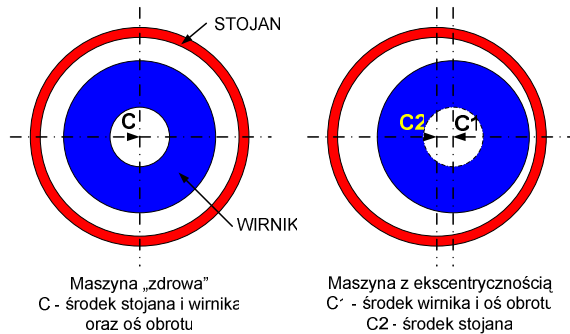
Najczęściej stosowaną metodą jest analiza widmowa prądu stojana (MCSA – Motor Current Signature Analysis) [6], [7], [8], [9], [12] oraz analiza widmowa drgań mechanicznych [2], [3], [4]. Stosunkowo rzadko wykorzystuje się analizę modułu wektora przestrzennego [1], [10].

W warunkach laboratoryjnych stosunkowo trudno jest zamodelować fizycznie wszystkie rodzaje ekscentryczności i określić optymalne metody jej wykrywania i oceny. Dlatego w niniejszej pracy wykorzystano modelowanie polowo-obwodowe do modelowania matematycznego różnych rodzajów ekscentryczności [14]. Pozwoliło to przeprowadzić analizę widmową prądów stojana otrzymanych na drodze symulacyjnej. Dzięki temu udało się uzyskać wzorce diagnostyczne widm z różnymi poziomami ekscentryczności statycznej, dynamicznej i mieszanej. Wzorce te będą przydatne przy

testowaniu metod wykrywania ekscentryczności na obiektach rzeczywistych.

2. Definicja ekscentryczności

Na rys. 1 przedstawiono współosiowe i ekscentryczne usytuowanie wirnika w otworze stojana.



Rys. 1. Współosiowe i ekscentryczne usytuowanie wirnika w otworze stojana

Wg [11] ekscentryczność (mimośrodowość) maszyn jest stanem nierównej szczeliny powietrznej, która istnieje między stojanem i wirnikiem. Mimośrodowość spowodowana jest w dużej mierze tolerancją szczeliny powietrznej między wirnikiem a stojanem, która jest bardzo mała. Niewielkie przekroczenie granic tolerancji może doprowadzić do tarcia wirnika o stojan a w konsekwencji do uszkodzenia stojana lub wirnika, jak również pogłębić stan awaryjny wywołany innymi niekorzystnymi zjawiskami takimi jak niesymetria zasilania, uszkodzenie obwodów wirnika lub stojana, praca z nadmiernym obciążeniem itp. [9].

Ekscentryczność może być uszkodzeniem pierwotnym lub wtórnym. O uszkodzeniu pierwotnym mówi się wówczas, gdy silnik posiada niesymetrię od początku eksploatacji. Natomiast, gdy na skutek długotrwałej eksploatacji w warunkach np. niewyosiowania napędu, zużycia łożysk, wystąpi niesymetria szczeliny powietrznej, wtedy jest tzw. uszkodzenie wtórne. W nowych silnikach dopuszczalna jest ekscentryczność szczeliny powietrznej do 10% [11]. Mimo to, producenci zwykle starają się zapewnić niższy całkowity poziom ekscentryczności, aby zredukować drgania i hałas oraz zmniejszyć niesymetryczną siłę promieniową. Rozróżnia się trzy rodzaje ekscentryczności:

Ekscentryczność statyczna

W przypadku ekscentryczności statycznej, położenie minimalnej długości radialnej szczeliny powietrznej jest stałe w przestrzeni – C1 jest środkiem wirnika i osią wirowania i przesunięta

względem środka otworu stojana C2 (rys. 1). Ekscentryczność statyczna może zostać wywołana przez owalność rdzenia stojana lub przez niepoprawne pozycjonowanie (ustawienie) wirnika lub stojana na etapie przekazania do eksploatacji. Jeżeli blok wirnik-wał jest dostatecznie sztywny, wówczas poziom ekscentryczności statycznej nie ulega zmianie. Ten rodzaj ekscentryczności powoduje generowanie w widmie prądu stojana częstotliwości, które można określić za pomocą wyrażenia:

$$f_{es} = f_s \left[k \frac{N_r}{p_b} (1-s) \pm 1 \right] \quad (1)$$

lub

$$f_{es} = k N_r f_r \pm f_s \quad (2)$$

gdzie:

f_s – częstotliwość sieciowa,

$k=1,2,3,\dots$, każda liczba całkowita,

N_r – liczba zębów wirnika,

s – poślizg,

p_b – liczba par biegunów,

$f_r = f_s \frac{1-s}{p_b}$ – częstotliwość obrotowa.

Ze zbioru częstotliwości wyznaczonych z zależności (1), powiązanych przez liczbę par biegunów p_b i liczbę zębów wirnika N_r z konstrukcją maszyny, tylko dwie wartości (w przypadku braku przewodu zerowego w zasilaniu uzwojenia stojana to tylko jedna) są charakterystyczne dla stanu symetrii [5], [9]. Harmoniczne o tych częstotliwościach noszą nazwę tzw. głównych harmonicznych zębokowych (ang. *Principal Slot Harmonics PSH*). W nieuszkodzonym silniku harmoniczne te mogą być wykorzystywane do estymacji prędkości kątowej. Główną harmoniczną zębokową f_{PSH} dla silników indukcyjnych określa się z zależności (2) dla $k=1$.

Ekscentryczność dynamiczna

W przypadku ekscentryczności dynamicznej środek wirnika (punkt C1) nie jest środkiem wirowania (obrotu) i minimalne położenie szczeliny powietrznej obraca się z wirnikiem (rys. 1). Ekscentryczność dynamiczna może być spowodowana kilkoma czynnikami takimi jak: deformacja wału wirnika, zużyte łożyska lub niewspółosiowość, mechaniczny rezonans przy krytycznej prędkości. Występowanie ekscentryczności dynamicznej powoduje przedwczesne zużycie łożysk, grzanie się łożysk i niekontrolowany ubytek smarowania, a w końcu przy dużym jej poziomie powoduje tarcie wirnika o

stojan, co w efekcie może doprowadzić do zniszczenia maszyny [9]. Ten rodzaj ekscentryczności powoduje generowanie w widmie prądu stojana następujących harmonicznych:

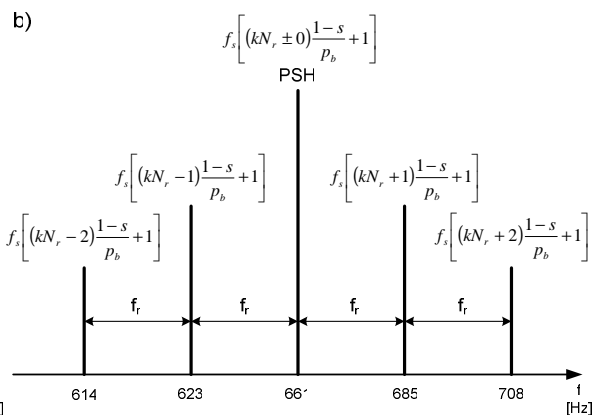
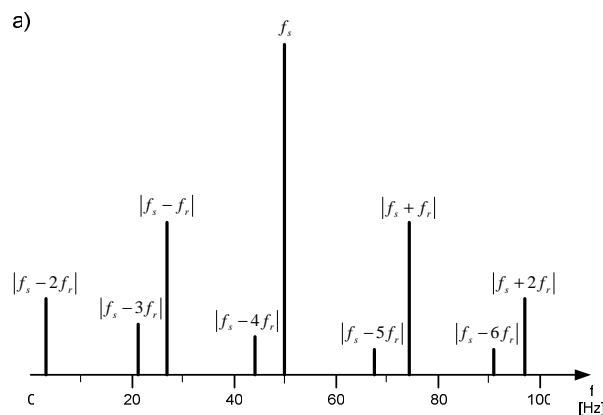
$$f_{ed} = f_s \left[(kN_r \pm n_d) \frac{1-s}{p_b} \pm n_w \right] \quad (3)$$

gdzie:

$n_d=1,2,3,\dots$ – rząd ekscentryczności dynamicznej,

$n_w=\pm 1\pm 3\pm 5\dots$ – rząd harmonicznych czasowych stojana.

Gdy do zależności (3) podstawimy $n_d=0$ i $n_w=1$ otrzymuje się wzór (1) na częstotliwości związane z ekscentrycznością statyczną.



Rys. 2. Teoretyczny rozkład harmonicznych w widmie prądu stojana dla znamionowego obciążenia silnika SSh-90L-4: a) składowe niskoczęstotliwościowe, b) składowe wysokoczęstotliwościowe

W pracy przedstawiono wybrane symulacje dla silnika SSh-90L-4 firmy INDUKTA o parametrach $N_r=26$, $p_b=2$, $n=1410$ [obr/min] i $s=0,060$. Na podstawie zależności (1) i (3) w widmie prądu stojana powinny być widoczne składowe wysokoczęstotliwościowe przedstawione na rys. 2b. Oprócz składowych wysokoczęstotliwościowych, które silnie zależą od rozwiązań konstrukcyjnych maszyny (N_r – liczby zębów wirnika) w każdym silniku występują składowe niskoczęstotliwościowe. To właśnie harmoniczne w paśmie niskich częstotliwości powodują wzrost składowych wysokoczęstotliwościowych. Na rys. 2a przedstawiono teoretyczny rozkład harmonicznych niskoczęstotliwościowych związanych z ekscentrycznością.

Poziom ekscentryczności podaje się w [%]. Na rys. 3 przedstawiono sposób procentowego określenia ekscentryczności dynamicznej. Można to opisać zależnością:

$$e_d = \frac{\bar{a} - a_{\min}}{a} \cdot 100 [\%] \quad (5)$$

gdzie:

Ekscentryczność mieszana

Najczęściej w silnikach występuje zarówno ekscentryczność statyczna jak i dynamiczna – czyli ekscentryczność mieszana. W tym przypadku oś wirowania nie pokrywa się z osią wirnika i przemieszcza się pomiędzy C1 i C2 (rys. 1). Jednoczesne wystąpienie ekscentryczności statycznej i dynamicznej powoduje pojawienie się w widmie prądu stojana składowych wysokoczęstotliwościowych opisanych zależnościami (1) i (3) oraz składowych w paśmie niskich częstotliwości określonych zależnością:

$$f_{em} = |f_s \pm kf_r| \quad (4)$$

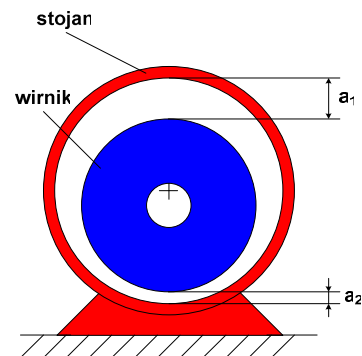
$$\bar{a} = \frac{a_1 + a_2}{2} \text{ – nominalna szczelina powietrzna}$$

$a_{\min} = a_2$ – aktualna minimalna szczelina.

Ostatecznie można zapisać:

$$e_d = \frac{a_1 - a_2}{a_1 + a_2} \cdot 100 [\%] \quad (6)$$

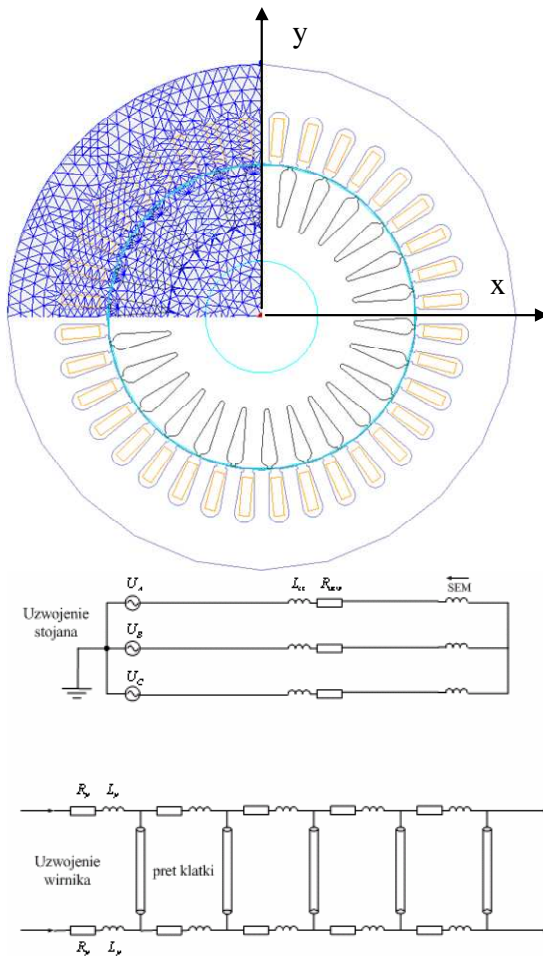
Procent (%) ekscentryczności statycznej opisuje się w analogiczny sposób.



Rys. 3. Procentowy opis ekscentryczności dynamicznej

3. Model polowo-obwodowy do badania ekscentryczności

Badania symulacyjne zostały zrealizowane dla silnika Sh90l4 o parametrach znamionowych $P_n=1,5\text{kW}$, $n_n=1410\text{obr/min}$, $M_n=10,16\text{Nm}$, $U_n=400\text{V}$, $I_n=3,5\text{A}$, $\cos\phi_n=0,79$. Model polowo-obwodowy został wykonany przy wykorzystaniu komercyjnego programu Maxwell 2D (moduł *transient*). Geometrię części polowej wraz z fragmentem siatki dyskretyzacyjnej pokazano na rys. 4.



Rys. 4. Geometria modelu polowo-obwodowego wraz z fragmentem siatki dyskretyzacyjnej oraz schemat części obwodowej

W części polowej uwzględniono czasową zmienność prądów, nieliniowość magnetowodu oraz ruch wirnika przy wymuszonej znamionowej prędkości obrotowej. Część polowa jest odwzorowana w części obwodowej (rys. 4) w postaci siły elektromotorycznej indukowanej w uzwojeniu stojana oraz litych prętów wirnika.

Ze względu na zastosowanie modelu dwuwymiarowego w części obwodowej znajdują się parametry połączeń czołowych uzwojenia stojana (L_{cz}) oraz pierścienia zwierającego klatki wirnika (R_r , L_r), które wyznaczono z zależności konstrukcyjnych.

W części polowej ekscentryczność statyczna była modelowana przez przesunięcie stojana wzdłuż osi x ($\Delta a_s=0\pm 0,25\text{mm}$) a ekscentryczność dynamiczna przez przesunięcie wirnika wzdłuż osi x ($\Delta a_d=0\pm 0,25\text{mm}$). Ekscentryczność mieszana była modelowana poprzez jednoczesne przesunięcie stojana ($\Delta a_s=0\pm 0,14\text{mm}$) i wirnika ($\Delta a_d=0\pm 0,14\text{mm}$). W każdym przypadku środek obrotu pozostawał w środku nieruchomego układu współrzędnych x - y (rys. 4).

4. Wyniki badań symulacyjnych

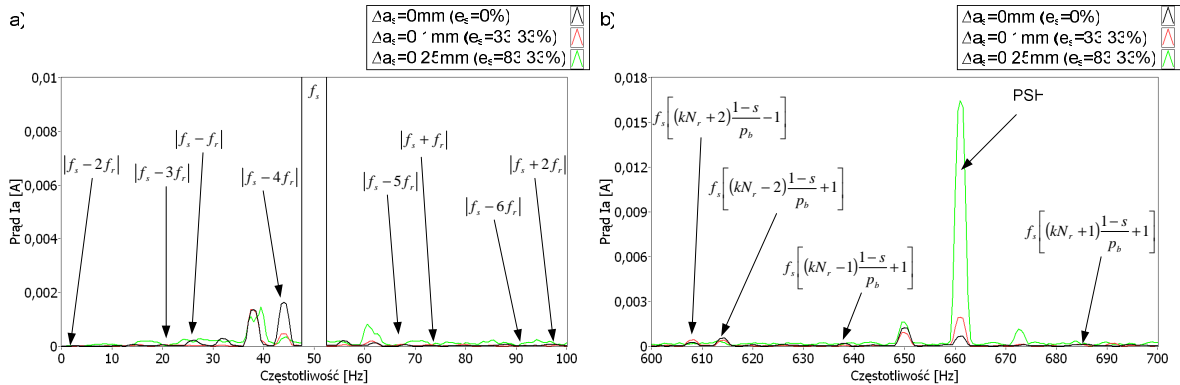
Wygenerowane za pomocą modelu polowo-obwodowego prądy stojana zostały poddane analizie widmowej FFT. Analizator został wykonany w środowisku LabView 8.5. Na poniższych rysunkach zostały przedstawione przykładowe widma prądu stojana dla silnika z ekscentrycznością statyczną (rys. 5), dynamiczną (rys. 6) oraz mieszaną (rys. 7).

Jak widać na rys. 5 w przypadku ekscentryczności statycznej w widmie FFT prądu stojana pojawiają się jedynie składowe opisane zależnością (2). Ponadto widoczne są składowe f_{es}

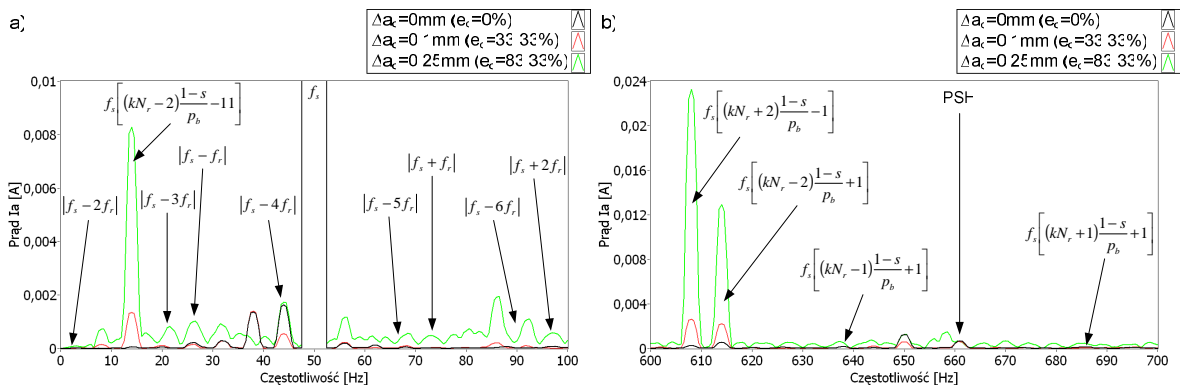
$$\text{opisane zależnością } f_{es} = f_s \left[(kN_r \pm 0) \frac{1-s}{p_b} \pm n_w \right]$$

dla $n_w = \pm 1 \pm 3 \pm 5 \dots$. Z rys. 5b wynika, że wraz ze wzrostem ekscentryczności statycznej amplituda głównej harmonicznej żłobkowej (PSH) rośnie. W paśmie niskich częstotliwości nie zaobserwowano pojawienia się dodatkowych składowych.

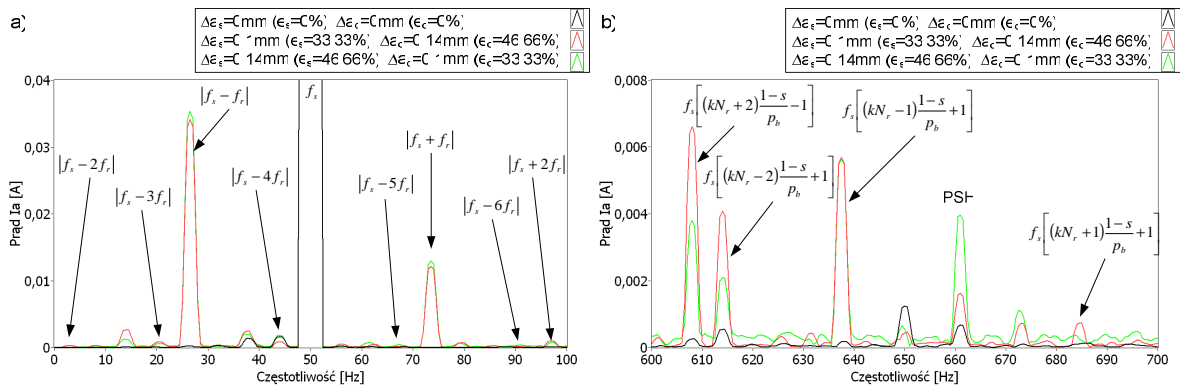
Na rys. 6 zostały przedstawione widma FFT prądu stojana z ekscentrycznością dynamiczną. W paśmie wysokich częstotliwości (rys. 6b) pojawiają się dodatkowe częstotliwości f_{ed} opisane zależnością (3), gdzie $n_d=2$ i $n_w=1,5,7,11,\dots$. W tym przypadku również obserwuje się wzrost amplitudy charakterystycznych częstotliwości wraz ze wzrostem ekscentryczności dynamicznej. Ponadto w paśmie niskich częstotliwości pojawia się dodatkowa harmoniczna o częstotliwości 14Hz, która wynika z zależności (3) dla $n_d=-2$ i $n_w=-11$.



Rys. 5. Widmo FFT prądu stojana dla znamionowego obciążenia silnika SSh-90L-4 z ekscentrycznością statyczną: a) składowe niskoczęstotliwościowe, b) składowe wysokoczęstotliwościowe



Rys. 6. Widmo FFT prądu stojana dla znamionowego obciążenia silnika SSh-90L-4 z ekscentrycznością dynamiczną: a) składowe niskoczęstotliwościowe, b) składowe wysokoczęstotliwościowe



Rys. 7. Widmo FFT prądu stojana dla znamionowego obciążenia silnika SSh-90L-4 z ekscentrycznością mieszaną: a) składowe niskoczęstotliwościowe, b) składowe wysokoczęstotliwościowe

W przypadku ekscentryczności mieszanej (rys. 7a) w paśmie niskich częstotliwości widma prądu stojana pojawiają się dodatkowe składowe f_{em} opisane zależnością (4) dla $k=1$. Ponadto w paśmie wysokich częstotliwości występują harmoniczne opisane wyrażeniem (3) dla: $n_d = -2, -1, 2$ i $n_w = \pm 1, \pm 5, \pm 7, \dots$, $n_d = 1$ i $n_w = -3, -1, 3, 5, \dots$, oraz główna harmoniczna żłobkowa (PSH) i jej wielokrotności (przesunięte o $\pm kf_s$, gdzie $k=2, 4, \dots$).

5. Uwagi końcowe i wnioski

Na podstawie powyższych rozważań i przytoczonych przykładów widm można sformułować następujące uwagi i wnioski:

1. Model połowo-obwodowy jest dobrym sposobem do generowania wzorców diagnostycznych opisujących ekscentryczność statyczną, dynamiczną i mieszaną
2. Różnica w prądzie stojana otrzymanym na drodze symulacji za pomocą modelu połowo-obwodowego i na obiekcie rzeczywistym wynosi ok. 11%, co jest wystarczająco dokładne.

3. Przedstawione przykłady analizy widmowej prądu stojana, otrzymanego na drodze symulacji, wykazały zgodność z analitycznymi wzorami obliczeniowymi na charakterystyczne dla ekscentryczności częstotliwości

4. Na podstawie analizy widmowej prądu stojana rzeczywistego silnika indukcyjnego możliwe jest ciągłe monitorowanie ekscentryczności. Wiarygodność monitorowania można istotnie zwiększyć w przypadku dysponowania wcześniej określonymi na drodze symulacji wzorcami diagnostycznymi.

Praca realizowana w ramach projektu POKL „Młoda Kadra” współfinansowana przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego

Literatura

- [1] Cardoso A.J.M., Saraiva E.S., *Computer aided detection of airgap eccentricity in operating three-phase induction motors, by Park's vector approach*, Industry Applications Society Annual Meeting, 1991., Conference Record of the 1991 IEEE, Vol. 1, 28 Sep-4 Oct 1991, pp.94–98
- [2] Don-Ha Hwang, Jeong-Woo Jeon, Dong-Sik Kang, Byong-Kuk Kim, Yun-Hyun Cho, Dong-Hee Kim, *A Method for Rotor Vibration Monitoring of Induction Motor by Air-gap Flux Detection*, Power Electronics Specialists Conference, 2006. PESC '06. 37th IEEE, 18-22 June 2006, pp. 1–5
- [3] 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 airgap eccentricity in 3-phase induction motors*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 33, No. 1, Jan/Feb 1997, pp. 24–34
- [4] 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 airgap eccentricity in 3-phase induction motors*, IAS Annual Meeting, IAS '95, Conference Record of the 1995 IEEE Vol. 1; 8-12 Oct 1995; pp. 563–570
- [5] Drozdowski P., Petryna J., Weinreb K., *Interakcja efektów elektrycznych, magnetycznych oraz mechanicznych w silnikach indukcyjnych w aspekcie diagnostyki*, Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne, nr 54, 1997, BOBRME Komel, s. 109-116.
- [6] Faiz J., Ebrahimi B.M., Akin B., Toliyat H.A., *Comprehensive Eccentricity Fault Diagnosis in Induction Motors Using Finite Element Method*, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 45, No. 3, March 2009, pp. 1764-1767
- [7] Faiz J., Ebrahimi B.M., Toliyat H.A., *Effect of Magnetic Saturation on Static and Mixed Eccentricity Fault Diagnosis in Induction Motor*, IEEE Tran. on Magn., Vol. 45, No. 8, Aug. 2009, pp. 3137-3144
- [8] Kowalski CZ. T., *Monitorowanie i diagnostyka uszkodzeń silników indukcyjnych z wykorzystaniem sieci neuronowych*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej nr 57, seria Monografie nr 18, Wrocław 2005
- [9] Kowalski Cz. T., Ewert P., *Zastosowanie analizy widmowej prądu stojana do monitorowania ekscentryczności silników indukcyjnych*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej nr 60, seria Studia i Materiały nr 27, Wrocław 2007, s. 260-270
- [10] Marques Cardoso A.J., Saraiva E.S., Sousa Mateus M.L., Ramalho A.L., *On-line detection of airgap eccentricity in 3-phase induction motors by Park's Vector approach*, Fifth International Conference on Electrical Machines and Drives, 11-13 Sep 1991, pp. 61–66
- [11] Nandi S., Toliyat H. A., Li X., *Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors – a review*, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 20, No. 4, December 2005, pp. 719-729.
- [12] Puche-Panadero R., Pons-Llinares J., Roger-Folch J., Pineda-Sanchez M., *Diagnosis of eccentricity based on the Hilbert transform of the startup transient current*, SDEMPED 2009, IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, 31 Aug. 2009-3 Sept. 2009, pp. 1-6
- [13] Thomson W. T., Fenger M., *Current signature analysis of detect induction motor faults*, Industry Applications Magazine, IEEE, Vol. 7, No. 4, July-Aug 2001, pp. 26-34.
- [14] Thomson W.T., Barbour A., *On-line current monitoring and application of a finite element method to predict the level of static airgap eccentricity in three-phase induction motors*, IEEE Trans. En. Conv., Vol. 13, No. 4, Dec 1998, pp. 347-357

Autorzy

Mgr inż. Paweł Ewert

E-mail:pawel.ewert@pwr.wroc.pl

Dr inż. Tomasz Zawilak

E-mail: tomasz.zawilak@pwr.wroc.pl

Politechnika Wroclawska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, 50-370 Wrocław, ul. Smoluchowskiego 19

Recenzent

Prof. dr hab. inż. Jan Rusek