

Maciej Sułowicz, Jarosław Tulicki, Janusz Petryna, Arkadiusz Duda
Politechnika Krakowska, Kraków

WPLYW USZKODZEŃ SILNIKA INDUKCYJNEGO NA DOKŁADNOŚĆ BEZKONTAKTOWEGO WYZNACZANIA MOMENTU ELEKTROMAGNETYCZNEGO Z SYGNAŁU STRUMIENIA POOSIOWEGO

THE INFLUENCE OF INDUCTION MOTOR DAMAGES ON THE ACCURACY OF NON-CONTACT DETERMINATION OF THE ELECTROMAGNETIC TORQUE FROM THE AXIAL FLUX SIGNAL

Streszczenie: Od kilku lat jednym z głównych kierunków badań autorów są prace związane z wykorzystaniem sygnału strumienia poosiowego do oceny szeroko rozumianego stanu silników indukcyjnych klatkowych. Ostatnio prowadzone badania są ukierunkowane na metodę bezkontaktowego wyznaczenia momentu obciążenia maszyn indukcyjnych bazującą tylko na sygnale strumienia poosiowego. Na drodze obliczeń numerycznych i poprzez eksperyment pomiarowy możliwe jest znalezienie takich składowych sygnału strumienia poosiowego, które są proporcjonalne do zmian momentu elektromagnetycznego lub bezpośrednio do zmian momentu obciążenia na wale maszyny. Celem niniejszego artykułu jest zbadanie, jak wpływają różnego rodzaju uszkodzenia wirnika i stojana na dokładność określania momentu elektromagnetycznego. W oparciu o pomiary laboratoryjne i obliczenia polowe dla wybranych silników zostanie określony wpływ uszkodzeń wewnętrznych i asymetrii zewnętrznych na charakterystyczne cechy sygnału strumienia poosiowego wykorzystywanego do wyznaczenia momentu elektromagnetycznego. Zostanie określona wiarygodność szacowania momentu elektromagnetycznego w przypadku występowania uszkodzeń badanej maszyny. Proponowana metoda pomiarowa wyznaczenia momentu jest prosta i dla silnika indukcyjnego jest możliwe bardzo łatwe wyznaczenie momentu obciążenia w oparciu o pomiar strumienia poosiowego przy użyciu cewki pomiarowej przyłożonej do obudowy silnika np. od strony wentylatora.

Abstract: Since several years, one of the main directions of the authors' research have been works on the use of axial flux signal to assess the widely understood condition of squirrel cage induction motors. Recent research is focused on the non-contact method to determine the load torque of induction machines based on the axial flux signal only. By means of numerical calculations and through a measurement experiment it is possible to find such components of the axial flux signal that are proportional to changes in the electromagnetic torque or directly to changes in the machine shaft load. The purpose of this article is to investigate how various types of rotor and stator faults affect the accuracy of electromagnetic torque determination. Based on laboratory measurements and FEM calculations for selected motors, the influence of internal damages and external asymmetries on the characteristic features of the axial flux signal used to determine the electromagnetic torque, will be specified. The reliability of the electromagnetic torque estimation will be determined in case of damage to the tested machine. The proposed method of the torque determination is simple and it is possible for an induction motor to easy determine the load torque based on the measurement of the axial flux using a measuring coil applied to the motor housing, e.g. from the fan side.

Słowa kluczowe: silnik indukcyjny, uszkodzenie silnika, moment elektromagnetyczny, wyznaczenie momentu, strumień poosiowy, pomiar bezkontaktowy

Keywords: induction motor, motor damage, electromagnetic torque, torque determination, axial flux, non-contact measurement

1. Wstęp

W ostatnich latach wzrasta zainteresowanie bezinwazyjnymi metodami oceny stanu i sprawności maszyn elektrycznych. Metody bezinwazyjne są szczególnie atrakcyjne w eksploatacji dużych napędów w różnych gałęziach przemysłu. Przy eksploatacji maszyn szczególnie cenna jest

znajomość momentu na wale maszyny w stanie ustalonym, jak i w stanach dynamicznych.

Przy klasycznym podejściu do pomiaru momentu wymagane jest zainstalowanie na wale maszyny momentomierza lub naklejenie tensometrów, co w większości dużych napędów prze-

mysłowych jest trudne lub wręcz niemożliwe. Stąd istnieje potrzeba opracowania i stosowania bezinwazyjnych metod pomiaru, które równie dokładnie umożliwią oszacowanie momentu na wale maszyny. W pracach [16, 18] zaprezentowano metody wyznaczania momentu na wale maszyny. W pierwszej pracy [16] przedstawiono eksperymentalne podejście do wyznaczania momentu na wale podczas badań dużych maszyn na stacji prób. W drugim [18] artykule przedstawiono model połowy i sposób obliczania strumienia poosiowego proporcjonalnego do momentu na wale maszyny dla modelu 2D. Obliczenia te zostały zweryfikowane eksperymentalnie. Pokazano, że można wyznaczyć zależność pomiędzy wybranymi cechami strumienia poosiowego a momentem na wale badanej maszyny. Obliczenia i analizy w tym przypadku zostały przeprowadzone dla silnika symetrycznego bez uszkodzeń. Pytanie, jakie pojawia się przy stosowaniu bezkontaktowego wyznaczania momentu ze strumienia poosiowego, jest następujące: czy i jak zmieni się wiarygodność proponowanej metody przy występowaniu określonego rodzaju uszkodzenia stojana lub wirnika. W licznych pracach pokazano przydatność strumienia poosiowego do oceny określonych rodzajów uszkodzeń silników indukcyjnych [1-18]. Teraz atrakcyjność i skuteczność metod wykorzystania sygnału strumienia poosiowego do diagnostyki uszkodzeń może stać się utrudnieniem w szacowaniu momentu na wale maszyny. Należy więc znaleźć takie cechy w sygnale strumienia poosiowego, które w jak najmniejszym stopniu będą zależeć od rodzaju i stopnia uszkodzenia maszyny. W tym celu w pierwszej kolejności przeprowadzono obliczenia i analizy strumienia poosiowego oraz dokonano oceny, jak dany rodzaj uszkodzenia wpływa na charakterystyczne cechy wykorzystywane do wyznaczania zależności strumień poosiowy -moment. Przeprowadzone analizy numeryczne zostały zweryfikowane eksperymentalnie w laboratorium na silnikach z możliwymi do zamodelowania określonymi rodzajami uszkodzeń.

2. Obliczenia strumienia poosiowego z modelu połowego 2D

2.1. Parametry konstrukcyjne silnika do modelu MES

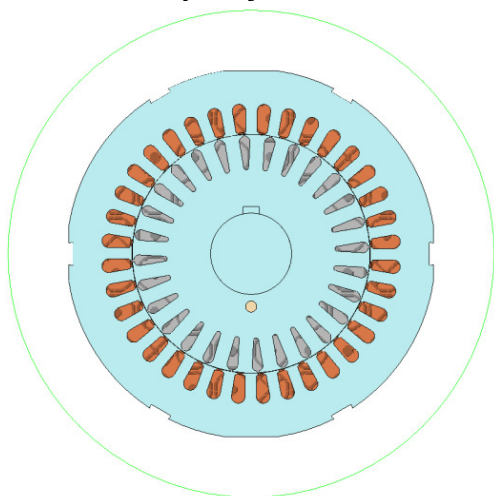
Podstawą do opracowania modelu połowego była konstrukcja niskonapięciowego silnika

indukcyjnego typu Sg-112M-4, o mocy 4kW oraz prędkości obrotowej 1435 obr/min. Silnik ten posiada uzwojenie jednowarstwowe o poskoku średnicowym, składające się z sześciu połączonych szeregowo zewojów na fazę. Pojedynczy zewój zawiera 51 zwojów. Łączna liczba żłobków stojana wynosi $N_S=36$, liczba żłobków wirnika $N_R=28$. Ten sam typ silnika został wykorzystany jako obiekt pomiarów laboratoryjnych. W tarczy łożyskowej badanej maszyny została umieszczona bezrdzeniowa cewka pomiarowa. Silnik obciążono prądnicą obcowzbudną prądu stałego, a niesymetrie wirnika zadawano przez wymianę wirników o wybranym typie uszkodzenia. Stojan maszyny został wyposażony w odczepy umożliwiające zwieranie zwojów w jednym zewoju w dwóch fazach uzwojenia. W czasie pomiarów uzwojenia stojana były skojarzone w gwiazdę. Celem sprawdzenia poprawności przyjętych parametrów zagęszczenia siatki MES dokonano również pomiarów wartości chwilowych prądów stojana, których zgodność porównano z przebiegami wyznaczonymi z modelu obliczeniowego.

2.2. Model połowy silnika z niesymetrycznym wirnikiem

Model połowy badanego silnika indukcyjnego został wykonany w oprogramowaniu MagNet. W konstrukcji modelu MES przyjęto liniowe charakterystyki magnesowania obwodu stojana i wirnika. Prócz tego, w modelu pominięto skos żłobków wirnika, połączenia czołowe uzwojeń stojana i geometrię korpusu części nieruchomej silnika. W związku z powyższym, model nie uwzględnia konstrukcyjnej redukcji negatywnego wpływu wyższych momentów synchronicznych i asynchronicznych oraz aury magnetycznej wokół jarzma stojana. Część połowa modelu zakłada występowanie zjawiska wypierania prądu w prętach klatki wirnika. Połączenia czołowe klatki wirnika zostały uwzględnione w schemacie obwodowym przez dodanie szeregowo połączonych elementów RL reprezentujących wycinki pierścieni zwierających. W modelu dokonano podziału uzwojenia stojana na część żłobkową i zamykającą się w powietrzu (połączenia czołowe). Część obwodowa była zasilana monoharmonicznym układem napięć o częstotliwości 50Hz. Do modelu MES rozpatrywanego silnika indukcyjnego wprowadzono asymetrię w postaci uszkodzenia dwóch prętów klatki wirnika. Przerwę w obwodzie wirnika

zamodelowano przez zamianę materiału wypełniającego dwa wybrane żłobki odlewu wirnika z aluminium na zdefiniowany materiał o niskiej przewodności elektrycznej.



Rys. 1. Widok geometrii modelu MES badanego silnika indukcyjnego

Na Rys.1. przedstawiono widok geometrii silnika przyjętej do obliczeń z zadaniem niesymetrii.

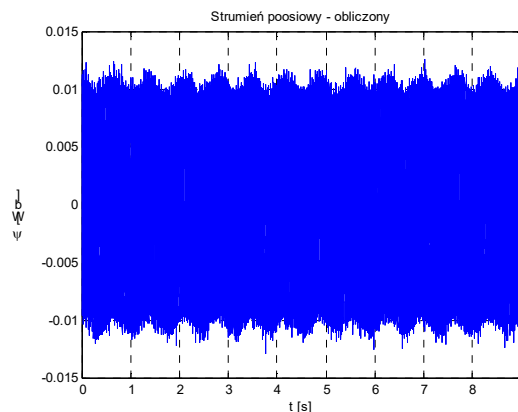
2.3. Obliczanie strumienia poosiowego z modelu 2D

Dla dwuwymiarowego modelu MES silnika indukcyjnego strumień poosiowy można obliczyć jako superpozycję strumieni połączeń czołowych uzwojenia stojana i wirnika (strumienie związane z segmentami pierścienia zwierającego). Wypadkowy strumień rozproszenia można również interpretować jako składową zerową lub pulsacyjną. Taka interpretacja strumienia poosiowego jest jedynie słuszna dla przyjętej liniowej charakterystyki magnesowania silnika. W postaci funkcji ciągłej wypadkowy strumień rozproszenia można zapisać jako funkcję strumienia zależną od czasu [18]:

$$\Psi^0(t) = \sum_{n=1}^{m_s} \Psi_n^s(t) + \sum_{k=1}^{N_r} \Psi_k^r(t), \quad (1)$$

gdzie: Ψ^0 – strumień poosiowy, Ψ^s – strumień rozproszenia uzwojenia stojana, Ψ^r – strumień rozproszenia segmentu pierścienia zwierającego kłatkę wirnika, m_s – liczba faz stojana; N_r – liczba prętów wirnika.

Przykładowy przebieg strumienia poosiowego obliczonego z modelu 2D przedstawiono na Rys.2.

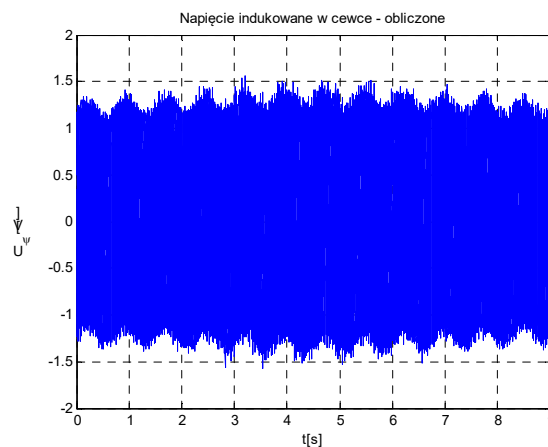


Rys. 2. Przebieg obliczonego strumienia poosiowego

Wartość chwilowa indukowanego napięcia w cewce pomiarowej jest wyrażona jako pochodna strumienia poosiowego po czasie [18]:

$$e(t) = -N \frac{d}{dt} \phi^0 = -\frac{d}{dt} \Psi^0(t), \quad (2)$$

gdzie: $e(t)$ – napięcie indukowane w cewce pomiarowej, N – współczynnik proporcjonalności (liczba zwojów cewki pomiarowej).



Rys. 3. Przebieg obliczonego napięcia indukowanego w cewce

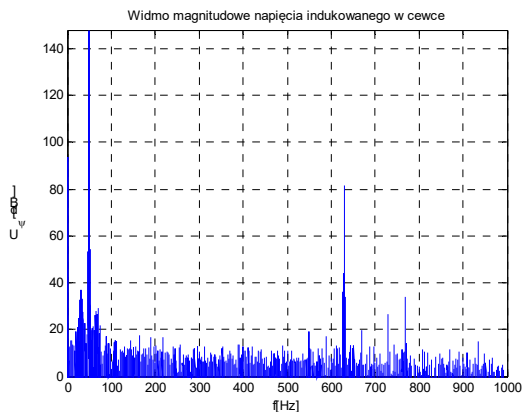
Przykładowy przebieg napięcia indukowanego w cewce obliczonego zgodnie z zależnością (2) przedstawiono na Rys.3.

Dla tak wyznaczonego obliczeniowo strumienia poosiowego i mierzonego bezpośrednio napięcia na wyjściu cewki pomiarowej przeprowadzono analizy mające na celu wyznaczenie zależności strumień - moment dla silnika symetrycznego i silnika z uszkodzeniem dwóch prętów kłatkę wirnika.

3. Wyznaczanie momentu elektromagnetycznego w oparciu o sygnał strumienia poosiowego

Istotne przy poszukiwaniu charakterystycznej relacji pomiędzy strumieniem poosiowym, a momentem elektromagnetycznym lub momentem na wale maszyny jest znalezienie charakterystycznych cech, które nie reagują w zasadniczy sposób na uszkodzenie, a zmieniają się według określonej zależności ze zmianą poziomu obciążenia badanego silnika.

Na Rys.4. przedstawiono przykładowe widmo napięcia indukowanego w cewce pomiarowej. Szczegółowa analiza poszczególnych przypadków pozwoliła na wybranie charakterystycznych cech widma, w oparciu o które można wiarygodnie dokonać oceny wielkości (wartości liczbowej) momentu obciążenia badanego silnika.



Rys. 4. Widmo napięcia indukowanego w cewce pomiarowej

Przeprowadzone analizy pozwoliły na opracowanie metodologii wyznaczania relacji pomiędzy charakterystycznymi cechami strumienia poosiowego a wielkością momentu obciążenia. W dalszej części pracy zamieszczono wyniki analiz dla poszczególnych rozważanych przypadków.

3.1. Silnik symetryczny

Analizy do wyznaczenia charakterystycznych cech strumienia poosiowego przeprowadzono dla 5 punktów, w których obliczono wartości strumienia dla założonego obciążenia bliskiego: 7, 8, 9, 10, 11 Nm. Te charakterystyczne cechy zestawiono w Tabeli.1.

Charakterystyczne punkty obliczeniowe zestawione w Tabeli 1 zilustrowano na Rys 5. Wykonana w oparciu o nie charakterystyka obra-

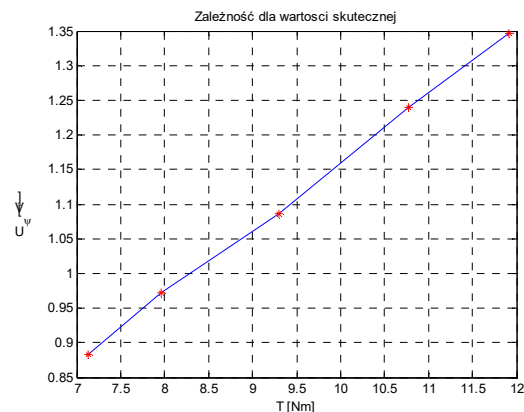
zuje poszukiwaną zależność napięcia indukowanego w cewce od momentu obciążenia.

Tabela.1. Zestawienie charakterystycznych cech strumienia i momentu elektromagnetycznego – przypadek symetrii [18]

T [Nm]	Amp $s \cdot f_0$ [V]	Amp f_0 [V]	Amp f_{psh} [V]	RMS [V]	T / Amp f_0 [-]
7.14	0.043	0.62	0.023	0.8826	11.52
7.96	0.032	0.68	0.029	0.9715	11.67
9.30	0.047	0.76	0.030	1.0866	12.19
10.77	0.041	0.87	0.020	1.2391	12.40
11.91	0.049	0.94	0.036	1.3465	12.60

W Tabeli 1 wprowadzono następujące oznaczenia:

T – moment elektromagnetyczny odczytany z widma, s – poślizg, f_0 – częstotliwość napięcia zasilania, f_{psh} – podstawowa harmoniczna żłobkowa.



Rys. 5. Zależność obliczonego napięcia indukowanego w cewce od momentu obciążenia – silnik symetryczny

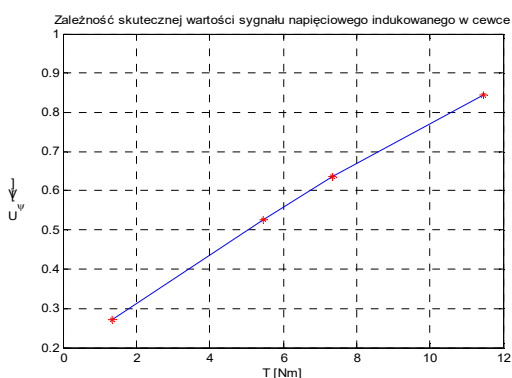
3.2. Uszkodzenie dwóch prętów klatki wirnika

Podobnie jak dla silnika symetrycznego przeprowadzono analizę wyników obliczeń uzyskanych z modelu połowego. Wybrano te same charakterystyczne cechy. Wyniki analizy zestawiono w Tabeli.2.

Charakterystyczne punkty obliczeniowe zestawione w Tabeli.2 zilustrowano na rys 6. Charakterystyka ta obrazuje poszukiwaną zależność napięcia indukowanego w cewce od momentu obciążenia w przypadku występowania asymetrii klatki wirnika.

Tabela.2. Zestawienie charakterystycznych cech strumienia i momentu elektromagnetycznego - przypadek uszkodzenia 2 prętów klatki wirnika

T [Nm]	Amp $s \cdot f_0$ [V]	Amp f_0 [V]	Amp f_{psh} [V]	RMS [V]	T / Amp f_0 [-]
1.33	0.014	0.361	0.007	0.476	3.17
5.46	0.052	0.422	0.019	0.922	12.94
7.35	0.079	0.562	0.027	1.113	13.08
11.45	0.112	0.832	0.041	1.476	13.79



Rys. 6. Zależność obliczonego napięcia indukowanego w cewce od momentu – silnik z uszkodzonymi dwoma prętami klatki wirnika

W tym przypadku na podstawie wykonanych obliczeń uzyskano krzywą o podobnym jak na Rys.5 charakterze zmian napięcia na wyjściu cewki pomiarowej w funkcji momentu obciążenia.

4. Pomiary laboratoryjne

Przeprowadzono badania laboratoryjne dla silnika symetrycznego i silnika z uszkodzonymi dwoma prętami klatki wirnika. Zarejestrowano sygnał napięciowy proporcjonalny do strumienia poosiowego. Sygnał ten uzyskano z cewki pomiarowej przyłożonej do silnika od strony przeciwnapędnej. Widok zestawionego stanowiska przedstawiono w pracy [15, 18].

Obciążenie silnika stanowiła prądnicą obcowzbudna. Silnik i prądnicę połączono przy pomocy sprzęgieł elastycznych ROTEX. Na wale pomiędzy badanym silnikiem a maszyną stanowiącą obciążenie silnika zamontowano momentomierz Data FLEX 22/50 umożliwiający precyzyjny pomiar momentu elektromagnetycznego. Zarejestrowane sygnały poddano analizie. Charakterystyczne wartości amplitud uzyskane z analizy widmowej zmierzonego sygnału proporcjonalnego do pochodnej strumienia poosiowego i zmierzonego momentu elektroma-

gnetycznego zestawiono dla każdego przypadku w tabelach 3 i 4.

4.1. Silnik symetryczny

W tabeli 3. zestawiono wartości amplitud uzyskane z analiz danych pomiarowych.

Tabela.3. Zestawienie charakterystycznych cech strumienia i momentu elektromagnetycznego – silnik symetryczny [18]

T [Nm]	Amp $s \cdot f_0$ [V]	Amp f_0 [V]	Amp f_{psh} [V]	RMS [V]	T / Amp f_0 [-]
0.16	0.001	0.371	0.003	0.431	0.43
4.22	0.007	0.518	0.004	0.550	8.15
9.50	0.029	0.864	0.013	0.902	11.00
13.81	0.042	1.197	0.017	1.226	11.54
17.40	0.073	1.445	0.019	1.511	12.04

Charakterystyczne punkty obliczeniowe zestawione w Tabeli 3 zilustrowano na Rys 7.



Rys. 7. Zależność zmierzonego napięcia indukowanego w cewce od momentu – silnik symetryczny

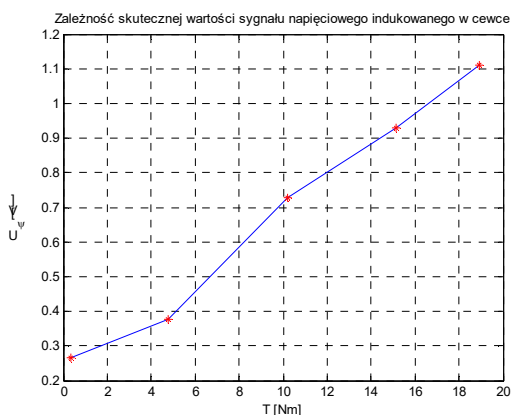
4.2. Uszkodzenie dwóch prętów klatki wirnika

W Tabeli 4. zestawiono wartości amplitud uzyskane z analiz danych pomiarowych.

Tabela.4. Zestawienie charakterystycznych cech strumienia i momentu elektromagnetycznego – silnik z uszkodzonymi dwoma prętami klatki

T [Nm]	Amp $s \cdot f_0$ [V]	Amp f_0 [V]	Amp f_{psh} [V]	RMS [V]	T / Amp f_0 [-]
0.34	0.004	0.353	0.002	0.463	0.96
4.77	0.016	0.434	0.006	0.659	10.99
10.22	0.074	0.799	0.019	1.273	12.79
15.12	0.132	1.012	0.027	1.626	14.94
18.92	0.172	1.113	0.029	1.943	16.98

Charakterystyczne punkty obliczeniowe zestawione w Tabeli 4 zilustrowano na Rys 8.



Rys. 8. Zależność zmierzonego napięcia indukowanego w cewce od momentu – silnik z uszkodzonymi dwoma prętami klatki wirnika

5. Wnioski

W oparciu o pozytywne wyniki kilkuletnich badań nad wykorzystaniem strumienia poosiowego do bezinwazyjnej diagnostyki maszyn indukcyjnych autorzy podjęli się [16] znalezienia relacji pomiędzy wielkością strumienia, a momentem obciążenia. Obliczenia numeryczne w oparciu o metodę elementów skończonych, a następnie pomiary laboratoryjne potwierdziły słuszność koncepcji bezkontaktowego wyznaczania momentu elektromagnetycznego generowanego przez silnik oraz momentu na wale [18]. Jednak znając wrażliwość strumienia na niesymetrię wewnątrz maszyny, należało zbadać wpływ tych niesymetrii na dokładność, a nawet wiarygodność szacowania momentu. Zaprezentowane w niniejszej pracy wyniki obliczeń z uwzględnieniem defektów klatki wirnika potwierdzone przez pomiary laboratoryjne rozwiąły obawy co do możliwości błędnego odczytu momentu wskutek występującego uszkodzenia maszyny, ponieważ wyselekcjonowano takie składowe strumienia, które są proporcjonalne do zmian momentu elektromagnetycznego lub bezpośrednio do zmian momentu obciążenia, a nie są wrażliwe na zakłócenia symetrii magnetycznej wskutek uszkodzeń. O dobrej zbieżności obliczeń i pomiarów można się przekonać poprzez nałożenie na siebie fragmentów charakterystyk obliczeniowych i pomiarowych w tym samym zakresie zmian momentu.

Logiczną konsekwencją uzyskanych wyników będą analogiczne badania maszyn w.n. dużej

mocy w przemyśle i energetyce. Jednym z ważnych elementów metodyki badań na dużych obiektach jest kalibracja sygnału napięciowego od strumienia i wyznaczanie charakterystyk tego napięcia w funkcji momentu obciążenia silnika na stanowisku pracy.

Dzięki temu możliwe jest nie tylko dokładne oszacowanie momentu obciążenia maszyny, ale przy jednoczesnym wyznaczeniu ze strumienia prędkości obrotowej można określić aktualną sprawność silnika, a co za tym idzie – efektywność energetyczną procesu. W miarę upływu lat silniki podlegają bowiem procesowi starzenia, degradacji izolacji i pakietu. Dzięki tej metodzie można ocenić dalszą przydatność silnika do pracy poprzez prosty, tani i wiarygodny pomiar jego sprawności.

6. Literatura

- [1]. W. Jarzyna "Diagnostic characteristics of Axial Flux in an Induction Motor", *Seventh International Conference on Electrical Machines and Drives*, 1995 (Conf. Publ. No. 412), str.141-146.
- [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*, 1997, 33(1), str. 24-34.
- [3]. Kokko V. "Condition monitoring of squirrel-cage motors by axial magnetic flux measurements", Academic Dissertation, University of Oulu, 2003, Finland.
- [4]. H. Heno, C. Demian, G. A. Capolino "A Frequency-Domain Detection of Stator Winding Faults in Induction Machines Using an External Flux Sensor", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 39, No. 2, str. 1272-1279, September/October 2003.
- [5]. J. Siau, A. Graff, W. Soong and N. Ertugrul "Broken bar detection in induction motors using current and flux spectral analysis", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 51, str.107-121, 2004.
- [6]. L. Golebiowski, M. Golebiowski, M. Noga, J. Skwarczynski "Axial flow in 3D FEM model of induction machine", *Elektrotechnika i Elektronika*, Vol. 25, No. 2, str. 147-152, 2006.
- [7]. Chmelík K., Foldyna J., Mišák S. "Magnetické pole v okolí asynchronního stroje, jeho zjišťování a využití", *Electroscope*, č. 2. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, 2007.
- [8]. A. Bellini, F. Filippetti, 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.

- [9]. Frosini L., Borin A., Girometta, L., Venchi G. "Development of a leakage flux measurement system for condition monitoring of electrical drives", *IEEE International Symposium on SDEMPED*, 2011, str. 356 – 363, 5-8 Sept. 2011.
- [10]. A. Bobon "3D Finite Element Computation of Axial Flux in Induction Motor", *Transactions on Electrical Engineering*, vol. 1 (2012), No. 3 A247, str. 72-75.
- [11]. W. Pietrowski "Wavelet analysis of axial flux in an induction machine on no-load test", *Electrical Review*, Vol. 88, No. 7b/2012, str. 20-23, 2012.
- [12]. A. Ceban, R. Pusca, R. Romary "Study of Rotor Faults in Induction Motors Using External Magnetic Field Analysis", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 59, No. 5, str. 2082-2093, May 2012.
- [13]. R. Pusca, R. Romary, V. Fireteanu and A. Ceban "Finite Element Analysis and Experimental Study of the Near-Magnetic Field for Detection of Rotor Faults in Induction Motors", *Progress In Electromagnetics Research*, Vol. 50, 37-59, 2013.
- [14]. Petryna J., Sułowicz M. Duda A., Guzic K. "Wykorzystanie strumienia unipolarnego w diagnostyce maszyn prądu przemiennego", *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 99, wyd. BOBRME Komel, str. 85-90, 2013.
- [15]. J. Tulicki, J. Petryna, M. Sułowicz "Fault diagnosis of induction motors in selected working conditions based on axial flux signals", *Technical Transactions*, Issue: 13. Electrical Engineering, Issue: 3-E, str. 99-113, 2016.
- [16]. Ławrowski Z., Duda A., Petryna J., Sułowicz M. "Wyznaczanie momentu obciążenia silnika in-

dukcyjnego w oparciu o pomiar strumienia poosiowego", *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 110, wyd. BOBRME Komel, str. 1-8, 2016.

[17]. P. Ewert "Use of Axial Flux in the Detection of Electrical Faults in Induction Motors", *IEEE International Symposium on Electrical Machines (SME)*, 2017, str. 1-6.

[18]. J. Petryna, J. Tulicki, M. Sułowicz "Calculating an electromechanical torque of a squirrel cage motor based on an axial flux obtained by the FEM", *II International Conference of Computational Methods in Engineering Science (CMES'17)*, 2017, ITM Web Conf., Volume 15, str. 1-8, 2017.

Autorzy

dr inż. M. Sułowicz, msulowicz@pk.edu.pl

mgr inż. J. Tulicki, jtulicki@pk.edu.pl

dr inż. J. Petryna, jpetryna@pk.edu.pl

mgr inż. A. Duda, aduda@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 tematów badawczych nr E-2/644/2017/DS, E-2/650/2017/DS. finansowanych z dotacji na naukę przyznanej przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.