

Janusz Petryna, Maciej Sułowicz, Arkadiusz Duda, Politechnika Krakowska, Kraków
Krzysztof Guziec, SENCO Sp. z o.o., Kraków

WYKORZYSTANIE STRUMIENIA UNIPOLARNEGO W DIAGNOSTYCE MASZYN PRĄDU PRZEMIENNEGO

APPLICATION OF UNIPOLAR FLUX IN DIAGNOSING AC MACHINES

Streszczenie: Artykuł zawiera wyniki badań w ramach projektu wykorzystania cewki do pomiaru strumienia unipolarnego dla uzyskania sygnału diagnostycznego niosącego informacje: o niesymetriach elektrycznych maszyny (zwarcia zwojowe, defekty klatki); o prędkości obrotowej wirnika. Zwarcia zwojowe mogą być wykrywane zarówno w czasie rozruchu (kiedy to ujawniają się najczęściej), jak i w stanie ustalonym. Wykrywanie defektów klatki w stanie ustalonym ma charakter badania porównawczego oraz w miarę rozwoju defektu klatki. Dla napędów standardowych, które są zasilane z sieci i pracują w układach otwartych można poprzez pomiar napięcia odwzorowującego strumień unipolarny dokonywać w razie potrzeby pomiaru i rejestracji prędkości obrotowej, co przeważnie prawie nigdy nie jest zapewniane w warunkach przemysłowych, również dla potrzeb pomiaru stanów dynamicznych i zmienności obrotów. W pracy pokazano, że prosta w swej konstrukcji, tania cewka może być bardzo przydatnym narzędziem diagnostycznym. Diagnostowanie maszyn tą metodą stanowić może cenne uzupełnienie, jak również potwierdzenie wyników badań zrealizowanych przy użyciu innych środków.

Abstract: The article contains the results of research within the project to use unipolar (axial) flux coil to obtain diagnostic signal carrying the information of: electrical asymmetries of machinery (inter-turn stator short-circuits, cage damages); rotational speed of the rotor. Inter-turn stator short-circuits can be detected both at starting process time (when they appear most often), as well as in steady states. Detection of rotor cage defects in steady states has a character of a comparative study, and over time, as the defects develop. For standard drives that are powered from the network and work in open systems, by measuring the voltage following a unipolar flux, it is possible as necessary to make measurement and recording of motor speed, which usually is almost never provided under industrial conditions, also for the purpose of measurement of dynamic states and variability of rotation. The study shows that a simple in its construction, cheap coil can be a very useful diagnostic tool. Diagnosing machines using this method can be a valuable supplement, as well as confirmation of the results of studies carried out by other means.

Słowa kluczowe: strumień unipolarny, zwarcia zwojowe, uszkodzenie klatki

Keywords: unipolar flux, short circuits, cage damage

1. Wstęp

Dla potrzeb skutecznego i bezinwazyjnego diagnozowania stanu maszyn elektrycznych poszukuje się coraz bardziej dokładnych i wyrafinowanych metod. Jedną z metod skutecznego diagnozowania stanu maszyn indukcyjnych klatkowych jest metoda pomiaru i analizy strumienia unipolarnego czyli poosiowego.

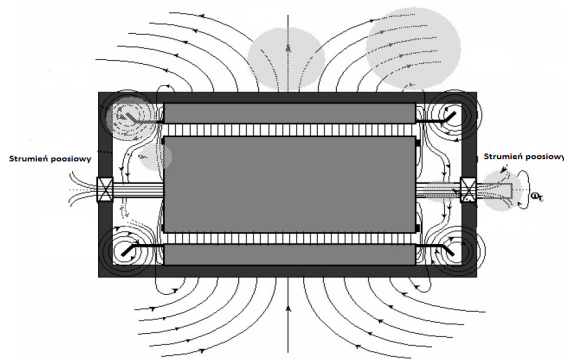
Próby zastosowania strumienia poosiowego do wykrywania uszkodzeń maszyn indukcyjnych zostały podjęte przez wielu badaczy już dawno. W pracach [1], [2] przedstawiono również badania autorów w tym zakresie. Nieprzerwanie prowadzone są badania skuteczności tej metody [1]-[8]. Najczęściej metoda pomiaru strumienia poosiowego jest wykorzystywana do wykrywania zwarć zwojowych. Przy pomocy tej metody

można również wykryć uszkodzenie klatki wirnika. Artykuł zawiera wyniki badań w ramach projektu wykorzystania cewki do pomiaru strumienia unipolarnego dla uzyskania sygnału diagnostycznego niosącego informacje o niesymetriach elektrycznych maszyny (zwarcia zwojowe, defekty klatki) i prędkości obrotowej wirnika.

2. Metoda analizy strumienia poosiowego

W idealnej maszynie indukcyjnej strumień poosiowy nie powinien występować. W praktyce, zarówno w obwodach stojana jak i wirnika, występują różnego rodzaju asymetrie wynikające z niedokładności geometrycznych w rozmieszczeniu uzwojeń lub niejednorodności materiałów. Na skutek tego typu niedokładności w ma-

szynie powstaje niewielki, ale zauważalny strumień poosiowy. Właśnie ten sygnał strumienia poosiowego może być wykorzystany w diagnozowaniu uszkodzeń zarówno stojana, jak i wirnika maszyny indukcyjnej. Zaburzenia wynikające ze zwarcia zwojowych stojana mają swoje odzwierciedlenie w prądzie wirnika. Uzwojenie wirnika w tej metodzie analizy pełni rolę pewnego rodzaju cewki pomiarowej, bo właśnie za sprawą zmian w jego prądzie powstaje strumień poosiowy. Na Rys.1 przedstawiono rozptył strumienia w silniku indukcyjnym z uwzględnieniem strumienia poosiowego zamykającego się wzdłuż wału silnika [3], [4], [8].



Rys. 1. Rozptył strumienia w silniku indukcyjnym [8]

Zwarcia zwojowe powodują zmianę rozkładu harmonicznym przestrzennych indukcji w szczelinie powietrznej. W strumieniu poosiowym można wykryć harmoniczne czasowe, które występują z harmonicznymi przestrzennymi polami. W zwartych zwojach indukują się napięcia, które jest powodem przepływu prądu ograniczanego jedynie impedancją własną zwartych zwojów. Prąd płynący przez zwarte uzwojenia jest źródłem pulsacji sił magnetycznych, które wpływają na harmoniczne przestrzenne pola [8].

Zwarcia zwojowe powodują zmiany harmonicznym o częstotliwościach [4], [5], [8]:

$$f_{ax\ sc} = kf_s \pm n(1-s)f_s/p_b \quad (1)$$

lub:

$$f_{ax\ sc} = kf_s \pm nf_r \quad (2)$$

gdzie:

f_s - częstotliwość napięcia zasilającego.

f_r - częstotliwość obrotowa wirnika w Hz.

k - rząd harmonicznym czasowej źródła zasilania,

$n=1,2,3,\dots,2p_b-1$; $n \neq 2p_b m$; $m=1,2,\dots$,

W przypadku uszkodzenia klatki wirnika w widmie sygnału występują charakterystyczne częstotliwości [4], [5]:

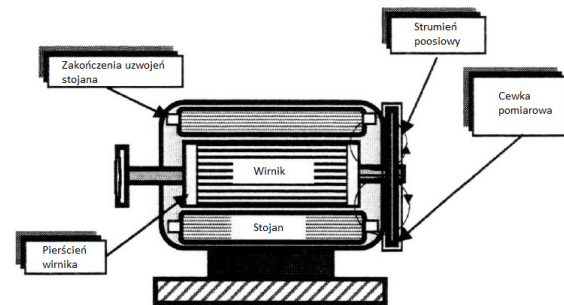
$$f_{ax\ bar} = sf_s \quad (3)$$

Można też spotkać się ze wzorami z prawą stroną w postaci [4]:

$$f_{ax\ bar} = (3-2s)f_s \quad (4)$$

$$f_{ax\ bar} = (5-4s)f_s \quad (5)$$

Do badania strumienia poosiowego wykorzystujemy cewkę pomiarową umieszczoną na wale silnika jak najbliżej uzwojenia stojana. Jeśli pozwala na to budowa silnika, cewkę mocujemy do dekla silnika w jego wnętrzu, jeśli nie pozwala na to ilość miejsca - umieszczamy ją na zewnątrz. Na Rys. 2 przedstawiono miejsce zamontowania cewki pomiarowej.



Rys. 2. Rozptył strumienia w silniku indukcyjnym [3],[8]

Cewka może być montowana na zewnątrz silnika zarówno od strony wentylatora, jak i od strony wału.

W artykule oba te przypadki będą zilustrowane i zostaną przedstawione wyniki badań na silnikach, w których stwierdzono uszkodzenie stojana i klatki wirnika.

3. Badanie uszkodzeń stojana

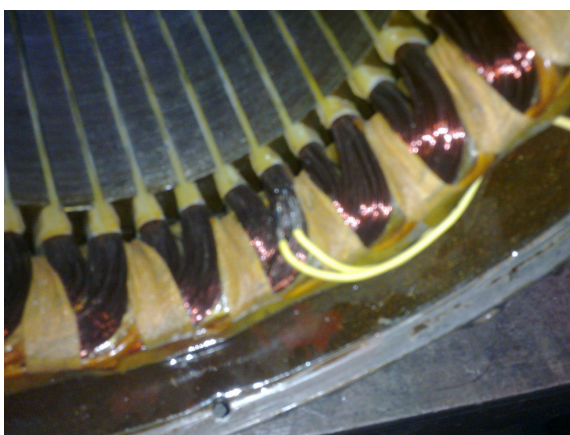
Do prób przeznaczono silnik indukcyjny 4 kW, 380 V(Y), w którym umożliwiono kontrolowane zwarcie 2 zwojów w fazie stojana.

Do wychwytywania i pomiaru strumienia poosiowego użyto cewki bezrdzeniowej o około 500 zwojach nawiniętych cienkim drutem, którą przykładano na przemian w 2 miejscach silnika: wokół wału (od strony napędnej) i od strony wentylatora (przeciwnapędnej).

Po uruchomieniu silnika, w ustalonym stanie pracy silnika przy pomocy wyłącznika na przemian zwierano i rozwierano pętlę zwarciową obejmującą 2 sąsiednie zwoje.



Rys.3. Cewka zamontowana na badanym silniku

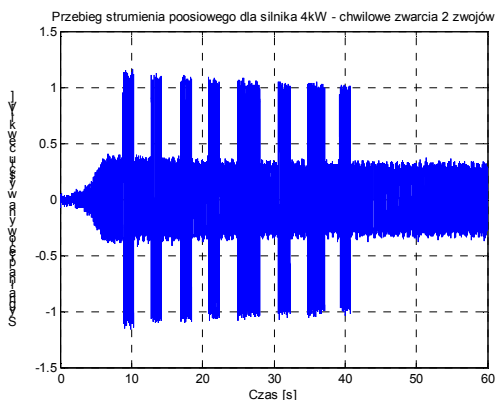


Rys. 4. Uzwojenie silnika przygotowanego do realizacji zwarcia zwojowego

Prąd fazy zwieranej oraz sygnał z cewki w postaci napięciowej zostały zarejestrowane przy pomocy karty pomiarowej DAQ.

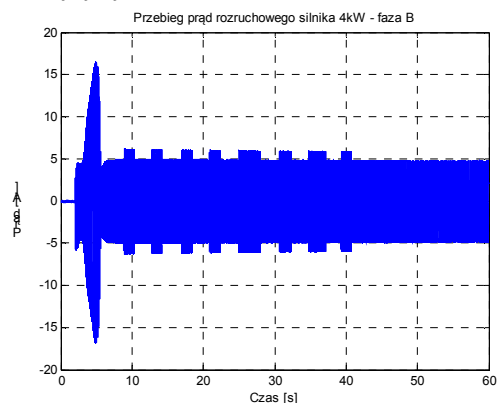
3.1. Cewka przyłożona od strony wału

Na Rys.5 widać znaczne, średnio 3-krotne skoki amplitudy strumienia w chwilach zwierania zwojów.



Rys. 5. Przebieg napięcia w cewce pomiarowej wychwytyjącej strumień poosiowy podczas zwierania i rozwierania 2 zwojów fazy stojana

Zmiany te w niewielkim stopniu przenosiły się na prąd fazowy (Rys.6), którego amplituda wzrastała ok. 1.22 razy, czyli o 22%. Należy dodać, że silnik pracował na biegu jałowym. W warunkach obciążenia silnika zmiany w prądzie byłyby niezauważalne.

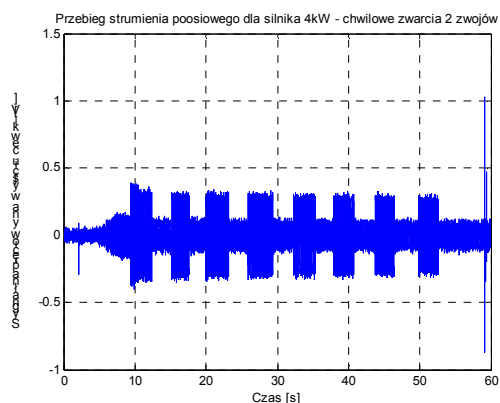


Rys. 6. Przebieg prądu w fazie, w której realizowano zwarcia 2 zwojów fazy stojana

Zamontowanie cewki od strony napędnej przy zesprężonym silniku jest kłopotliwe i zabieg taki wymaga chwilowego odsprężenia, chyba, że cewka ma być umocowana na stałe i wówczas jest uzasadniony. Jeśli jednak pomiar ma być dokonany szybko, bez demontażu, podczas pracy silnika – można cewkę przyłożyć do obudowy wentylatora (Rys.7 i Rys.8).

3.2. Cewka przyłożona od strony wentylatora

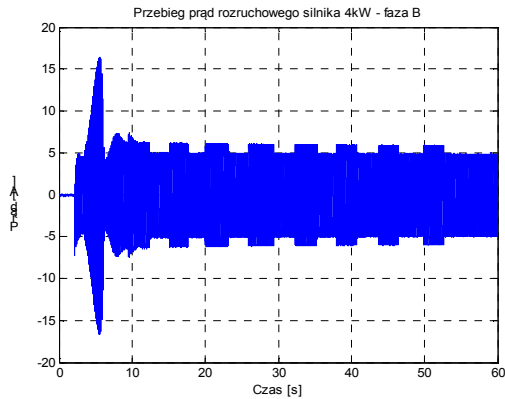
Rys.7 pokazuje także bardzo wyraźne skokowe zmiany amplitudy strumienia: również 3-krotne w stosunku do poziomu przed zwarciem.



Rys. 7. Przebieg napięcia w cewce pomiarowej podczas realizacji zwarcie

Amplituda prądu wzrosła podobnie, jak poprzednio – o 20%. Wnioski z obu pomiarów są takie, że cewka pomiarowa zapewnia silny, dobrej jakości sygnał, który świadczy o zwarciu małej liczby zwojów, praktycznie niewykry-

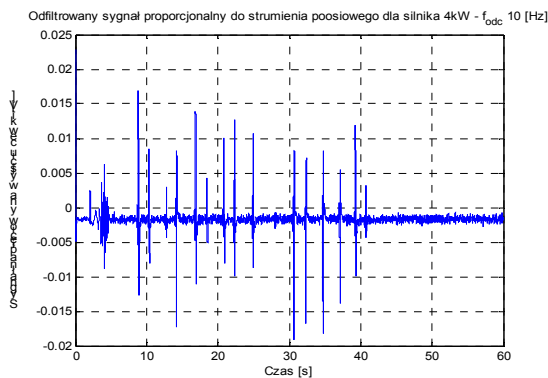
walnym przez zabezpieczenia prądowe oraz, że pomiar od strony wentylatora (na pierwszy rzut oka trudniejszy, bo potencjalnie zakłócony przez wirujące łopatki) równie dobrze spełnia swe zadanie.



Rys. 8. Przebieg prądu fazowego podczas realizacji zwarcia

Interesujące będzie stwierdzić, która ze składowych strumienia: pochodząca od stojana czy ta od wirnika, podlega zmianom wywołanym zwarciami. W tym celu dokonano filtracji, uzyskując przebiegi:

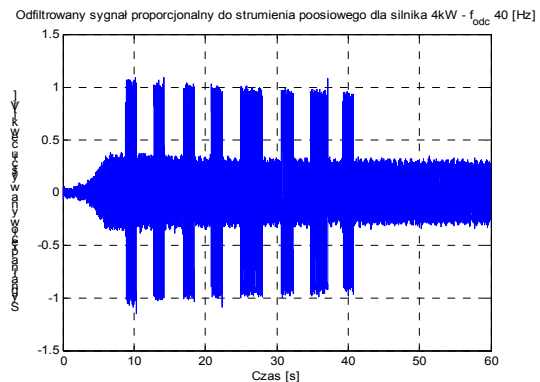
- pozbawione składowej 50 Hz pochodzącej od stojana,
- pozbawione składowych pochodzących od wirnika, w tym $f_r = sf_s$



Rys. 9. Przebieg napięcia z cewki pomiarowej po odfiltrowaniu częstotliwości stojana

Wniosek jest następujący: zmianom wywołanym zwarciami podlega składowa strumienia, pochodząca od wirnika. Nasuwa się zatem oczywisty pomysł wykorzystania zmian strumienia do układów zabezpieczeń przed zwarciami międzyzwojowymi i sygnalizacji zaistnienia takiego zwarcia w systemie. Na podstawie Rys.10 można stwierdzić, że sygnał pochodzący od stojana jest bardzo dobrym i stosunkowo pewnym sygnałem do wyzwolenia zabezpiecze-

nia reagującego na zwarcie zwojowe w maszynie indukcyjnej.

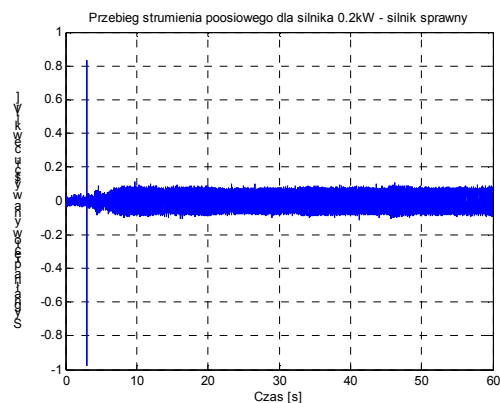


Rys. 10. Przebieg napięcia z cewki pomiarowej po odfiltrowaniu składowych od wirnika

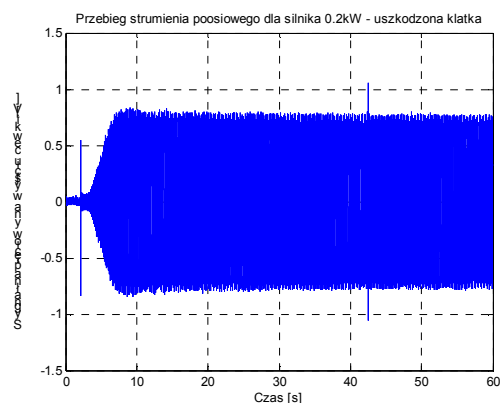
4. Badanie uszkodzeń klatki wirnika

Badaniom poddano dwa trójfazowe silniki klatkowe 0.2 kW, 380 V, z których jeden był sprawny, a drugi miał kilka pękniętych prętów w wirniku. Cewkę pomiarową przykładano od strony wentylatora oraz od strony napędnej.

4.1. Cewka przyłożona od strony wentylatora



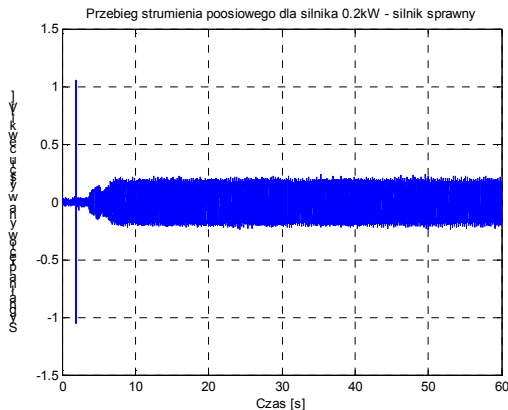
Rys. 11. Strumień poosiowy silnika sprawnego mierzony od strony wentylatora



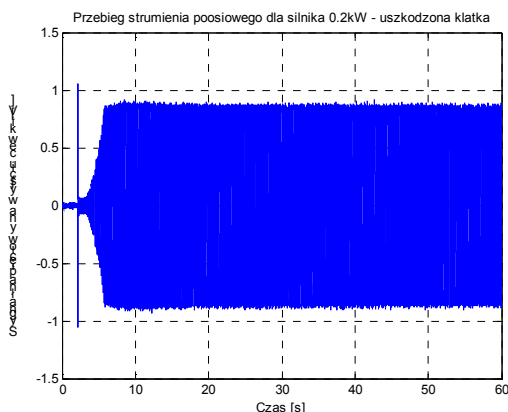
Rys. 12. Strumień poosiowy silnika uszkodzonego klatką mierzony od strony wentylatora

Rys. 11 i Rys.12 pokazują różnice w poziomie strumienia poosiowego obu silników w stanie ustalonym: sprawnego i z defektem klatki przy usytuowaniu cewki od strony wentylatora. Tu silnik z uszkodzoną klatką wykazuje poziom sygnału 4.5 razy większy od silnika sprawnego.

4.2. Cewka przyłożona od strony wału



Rys. 13. Strumień poosiowy silnika sprawnego mierzony od strony napędnej

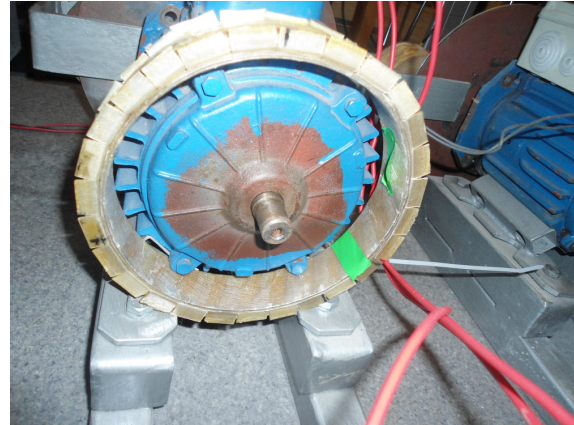


Rys. 14. Strumień poosiowy silnika uszkodzonego mierzony od strony napędnej

I w tym przypadku widać znaczną różnicę w poziomach strumieni. W tym przypadku poziom sygnału silnika uszkodzonego jest prawie 4-krotnie większy od sygnału silnika sprawnego.

4.3. Różna liczba uszkodzonych prętów klatki

W laboratorium Politechniki Krakowskiej przeprowadzono badania na silnikach 0.8 kW. Badano cztery identyczne silniki SZJKe14a: jeden silnik zdrowy, trzy z uszkodzeniami prętów klatki - odpowiednio 1, 2 i 3 pęknięte pręty. Widok cewki zamontowanej na obudowie badanych silników przedstawiono na rysunku 15.



Rys. 15. Badany silnik z uszkodzonymi prętami klatki wirnika i przyłożoną cewką pomiarową

Zarejestrowany sygnał bezpośrednio z cewki odfiltrowano filtrem dolnoprasmowym o częstotliwości odcięcia 10 Hz. W Tabeli.1 zestawiono wartości skuteczne sygnału z cewki i sygnału odfiltrowanego. Dla sygnału odfiltrowanego widać wyraźną zależność poziomu sygnału od liczby uszkodzonych prętów.

Tabela 1. Zestawienie wartości skutecznej sygnału diagnostycznego

Silnik/Sygnał	Z cewki [mV]	Odfiltrowany [mV]
Symetryczny	42.7	1.3
Uszk. 1 pręt	299.5	8.4
Uszk. 2 pręt	301.5	9.7
Uszk. 3 pręt	262.1	13.6

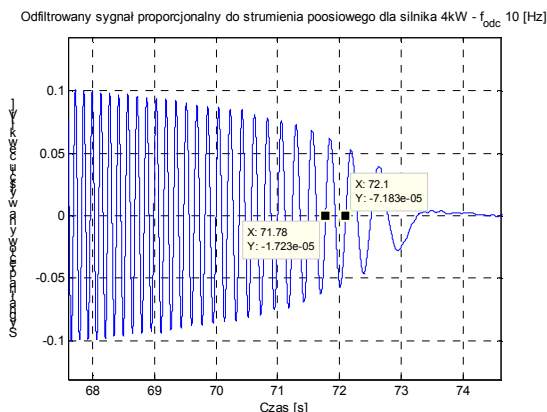
5. Możliwości zastosowania metody w diagnostyce napędów przemysłowych

W warunkach przemysłowych prawie nigdy nie rejestruje się prędkości obrotowej maszyn elektrycznych, zasilanych z sieci. Jednak dla celów diagnostycznych pomiar prędkości nieraz jest niezbędny. Podobnie dla potrzeb rejestracji zmian momentu na wale silnika, na przykład podczas zabiegów gwarancyjnych, konieczna jest rejestracja lub ewaluacja prędkości. Jeśli maszyna nie posiada prądnicy tachometrycznej czy obrotomierza impulsowego, zadanie to spełni analiza sygnału z cewki pomiarowej, przyłożonej od strony przeciwnapędnej lub uprzednio zamontowanej wewnątrz maszyny wokół wału lub czół.

Poniżej przedstawiono odfiltrowany przebieg napięcia z cewki, umieszczonej pod deklek wokół łożyska od strony przeciwnapędnej silnika 630 kW, 6 kV.



Rys. 15. Silnik, w którym zabudowano cewkę



Rys. 16. Odfiltrowany przebieg napięcia z cewki odpowiadającego strumieniowi wirnika

Częstotliwość przebiegu równa jest zmieniającej się częstotliwości prądu wirnika:

$$f_2 = sf_1 \quad (6)$$

$$\text{stąd} \quad s = f_2 / f_1 = T_1 / T_2(t) \quad (7)$$

$T_1 = 1/f_1$, f_1 – częstotliwość prądu stojana

$T_2 = 1/f_2$, f_2 – częstotliwość prądu wirnika.

Zatem obroty silnika można wyrazić wzorem:

$$n(t) = (60f_1/p)[1-s(t)] = (60/p)[f_1 - 1/T_2(t)] \quad (8)$$

Dla napędów standardowych (zasilanych z sieci, pracujących w układach otwartych, bez nagłych zmian obrotów) pomiar prędkości na podstawie strumienia unipolarnego wydaje się być wystarczająco dokładny.

6. Podsumowanie

W artykule przedstawiono zastosowania sygnału strumienia unipolarnego w diagnostyce maszyn prądu przemiennego. Pokazano, że prosta w swej konstrukcji, tania cewka może być bardzo przydatnym narzędziem diagnostycznym. Może służyć jako czujnik wykrywający bez zwłoki zwarcia zwojowe, lub też jako urządzenie do pomiaru i porównywania poziomów degradacji klatki w czasie, wreszcie jako ele-

ment układu do pomiaru bądź rejestracji prędkości obrotowej oraz momentu dynamicznego na wale silnika.

7. Literatura

[1]. Petryna J.: *Zjawiska drganiowe w maszynach indukcyjnych ze zvarciami zwojowymi stojana*. Kwartalnik „Elektrotechnika” ZN AGH, t.5, z.2, 1986 Kraków.

[2]. Noga M., Petryna J.: *Dynamic states in induction machines with internal asymmetries*. TH Ilmenau Wiss. Zeitschr. 4/90.

[3]. Assaf T., Henao H., Capolino G.-A.: *Simplified axial flux spectrum method to detect incipient stator inter-turn short-circuits in induction machine*. 2004 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Volume 2, 4-7 May 2004, pp. 815-819

[4]. Kowalski Cz.: *Monitorowanie i diagnostyka uszkodzeń silników indukcyjnych z wykorzystaniem sieci neuronowych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2005.

[5]. Keysan O., Ertan H.B.: *Higher Order Rotor Slot Harmonics for Rotor Speed & Position Estimation*. 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, OPTIM 2010, pp. 416-421.

[6]. Sinervo A., Laiho A., Arkkio A.: *Low-Frequency Oscillation in Rotor Vibration of a Two-Pole Induction Machine With Extra Four-Pole Stator Winding*. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 47, No. 9, September 2011, pp. 2292-2302.

[7]. Frosini L., Borin A., Girometta, L., Venchi G.: *Development of a leakage flux measurement system for condition monitoring of electrical drives*. 2011 IEEE International Symposium on SDEMPED, 5-8 Sept. 2011, pp.356 - 363.

[8]. Nowak P.: *Diagnostyka zwarć w uzwojeniach stojana trójfazowych silników indukcyjnych*. Praca dyplomowa, Politechnika Krakowska, 2012.

Autorzy

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

dr inż. M. Sułowicz, pesulowi@cyf-kr.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

mgr inż. K. Guziec, office@senco.krakow.pl

SENCO Sp. z o.o., 30-716 Kraków

ul. Albatrosów 10a

Informacje dodatkowe

Praca została wykonana w ramach badań własnych autorów dzięki uprzejmości firmy EKO-ENERGIA z Krakowa, która udostępniła silniki do badań na swojej Stacji Prób.