

Jarosław Tulicki, Maciej Sułowicz
Politechnika Krakowska, Kraków

ZASTOSOWANIE STRUMIENIA POOSIOWEGO DO OCENY STANU TECHNICZNEGO SILNIKA KLATKOWEGO W TRAKCIE ROZRUCHU. CZĘŚĆ I: NIESYMETRIA WIRNIKA

APPLICATION OF THE AXIAL FLUX TO THE ASSESSMENT OF THE INDUCTION MOTOR DURING THE START-UP PROCESS. PART I: ROTOR ASYMMETRY

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki badań nad zastosowaniem strumienia unipolarnego w diagnostyce uzwojeń stojana oraz klatki wirnika silnika indukcyjnego. Analizowano przebiegi sygnałów napięciowych proporcjonalne do strumienia poosiowego zarejestrowane podczas rozruchu. Dokonano szczegółowej oceny skuteczności rozróżniania uszkodzeń dla wybranego sygnału diagnostycznego oraz możliwości zastosowania proponowanych algorytmów na stanowisku laboratoryjnym lub stacji prób. Obiektem analiz diagnostycznych był zmodyfikowany konstrukcyjnie silnik Sg112M-4 z zabudowaną cewką pomiarową i wymiennymi wirnikami o różnym stopniu niesymetrii klatki. Silnik ten miał również wyprowadzone odcepki, z wybranych zwojów dwóch cewek faz stojana, umożliwiające wykonanie symulowanych zwarć międzyzwojowych. Badany silnik klatkowy został obciążony prądnicą obcowzbudną, umożliwiającą zmianę momentu mechanicznego w całym zakresie charakterystyki. Artykuł podzielono na dwie części. Pierwsza część dotyczy wykrywania niesymetrii wirnika. W części drugiej przedstawiono wyniki pomiarów i analiz dla niesymetrii stojana spowodowanej zwarciami zwojowymi oraz uszkodzeń stojana i wirnika występujących łącznie.

Abstract: The article presents the research results of the unipolar flux application in the diagnostic of the stator winding and rotor cage of the induction motor. The waveforms of the voltage signals proportional to the axial flux, registered during the starting process, were analyzed. The detailed assessment of the effectiveness of failure distinction for chosen diagnostic signal is made. The application possibility of this algorithm on the testing station and laboratory test bench is shown. The research object is the Sg112M-4 motor of modified construction with built-in measurement coil and changeable rotors of different degree of the cage asymmetry. This motor contains also the terminal with chosen coil turns of the stator phase used to realize the turn-to-turn short circuit. The investigated squirrel cage motor was loaded by the separately excited DC generator allowing to modify the mechanical torque in the whole range of the motor torque characteristic. The paper consists of two parts. The first concerns the detection process of the rotor asymmetry. The second part presents the measurement results and its analysis for the case of stator asymmetry caused by the turn short circuit and the stator and rotor failure at the same time.

Słowa kluczowe: *strumień poosiowy, diagnostyka silnika indukcyjnego, stan przejściowy, uszkodzenie klatki*
Keywords: *axial flux, diagnosis induction motor, transient state, rotor cage damage*

1. Wstęp

W dotychczasowych rozważaniach [7], [16] nad skutecznym i nieinwazyjnym wykrywaniem uszkodzeń natury elektrycznej w maszynach indukcyjnych na podstawie przebiegu wielkości elektrycznych, dominuje głównie zastosowanie sygnałów prądu oraz napięcia fazowego stojana w stanie ustalonym lub przejściowym [4], [15]. Prócz wielkości wymuszonej w postaci prądu płynącego w uzwojeniach stojana i wirnika, wyróżnia się elektromagnetyczną wielkość wymuszoną w formie strumienia magnetycznego. W maszynie klatkowej w pełni symetrycznej,

strumień główny ma jedynie składową w kierunku promieniowym. Dla przypadku dowolnej niesymetrii wynikającej z tolerancji wykonania maszyny, co ma miejsce w każdym przypadku, strumień główny rozkłada się dodatkowo na składową osiową [5], [7], [14]. Przy braku eksploatacyjnych uszkodzeń wirnika oraz obwodu stojana, składowa osiowa ma znaczny wpływ na powstawanie strat. W czołach uzwojeń oraz na indukowanie napięć wałowych prowadzących m.in. do przyspieszenia procesu zużycia łożysk wału wirnika [3], [5], [7], [12].

Dodatkowo, w przypadku wystąpienia defektu wirnika lub stojana, strumień poosiowy jest nie tylko powodem dodatkowych strat w maszynie, ale również nośnikiem informacji diagnostycznej [1], [3], [5], [6], [7], [9], [13], [17]. Są tu też zawarte informacje na temat asymetrii natury elektrycznej, co jest dobrze zauważalne dla harmonicznych czasowych pola elektromagnetycznego, w szczelinie powietrznej [7], [14].

2. Metoda pomiaru strumienia osiowego

Podstawowym elementem służącym do uchwycenia zmian strumienia unipolarnego w funkcji czasu, jest bezrdzeniowa wielowarstwowa cewka, której kierunek nawinięcia zwojów jest prostopadły do głównej osi maszyny. Cewka pełni funkcję uzwojenia wtórnego, w którym indukowane jest napięcie będące efektem działania zmiennego w czasie strumienia poosiowego, którego wartość chwilowa jest wprost proporcjonalna do powstałego napięcia na końcach uzwojenia. Z powyższego faktu wynika, iż główną cechą metrologiczną cewki powietrznej jest brak zniekształceń nieliniowych oraz posiadanie charakterystyki zbliżonej do filtra pasmowo-przepustowego. W zakresie konstrukcji mechanicznej, najistotniejszym parametrem jest średnica karkasu, która nie może być mniejsza od średnicy klatki wirnika i większa od wewnętrznej średnicy stojana. W praktyce laboratoryjnej i przemysłowej, cewka pomiarowa może być umiejscowiona po stronie napędowej, w formie podwieszonego układu na osłonie wentylatora [6], [11] lub po stronie napędowej od wewnętrznej strony tarczy łożyskowej [9], [11], rzadziej na korpusie stojana [7], [14]. Na poniższym rysunku przedstawiono sposób montażu zastosowanej cewki pomiarowej w tarczy łożyskowej silnika przeznaczony do badań laboratoryjnych.



Rys. 1. Widok montażu cewki pomiarowej wraz z wyprowadzonymi zaciskami od wewnętrznej strony tarczy łożyskowej po stronie napędowej dla silnika Sg112M-4

3. Budowa stanowiska laboratoryjnego

Obiektem badań był silnik typu Sg112M-4. Silnik został sprzęgnięty mechanicznie za pomocą sprzęgła elastycznego Rotex i miernika momentu typu DataFlex 22/50 z wbudowanym układem pomiaru prędkości obrotowej oraz z prądnicą obcowzbudną, mającą charakter regulowanego źródła obciążenia mechanicznego. Moment oporowy ustalano poprzez zmianę prądu wzbudzenia prądnicy, wykorzystując do tego celu autotransformator wraz z niesterowanym prostownikiem. Prądnicę obciążono zestawem grzałek rezystancyjnych o mocy 4 kW.

Do pomiarów zestawiono układ akwizycji oparty o wielofunkcyjną kartę pomiarową NI USB 6259 umożliwiającą pomiar w trybie różnicowym sygnałów analogowych z 16 kanałów i rozdzielczością 16 bitów. Czas rejestracji danych dla pojedynczego pomiaru wynosił 10s, a mierzone sygnały próbkowano z częstotliwością 10 kS/s na kanał.

Oprócz pomiaru napięcia z cewki oraz prędkości i momentu obrotowego na wale, rejestrowano przebiegi napięć i prądów fazowych, odpowiednio z użyciem przetworników LEM, napięciowych LV 25-P i prądowych HY15-P. Symulowane uszkodzenia wirnika, zrealizowano poprzez wymianę wirników o różnym stopniu niesymetrii. Do badań użyto wirnika symetrycznego oraz odpowiednio wirników z uszkodzeniem jednego i dwóch prętów klatki, a także wirnik z zadaną na stałe ekscentrycznością dynamiczną. Na potrzebę badań, dokonano również modyfikacji wewnętrznej uzwojeń stojana oraz skrzynki zaciskowej. Modyfikacja umożliwia zwieranie określonej liczby zwojów w wybranej fazie stojana.



Rys. 2. Widok ogólny stanowiska laboratoryjnego

W trakcie badań uzwojenia stojana silnika zostały skojarzone w gwiazdę. Silnik zasilano bezpośrednio z sieci sztywnej.

Maszyna pracowała bez wentylatora, w celu minimalizacji wpływu składowych tonalnych na widmo napięcia z cewki pomiarowej.

Schemat ideowy realizacji zwarć zwojowych przedstawiono w drugiej części opracowania. Na rys. 2 zobrazowano widok laboratoryjnego stanowiska pomiarowego.

4. Składowe widma chwilowego związane z niesymetrią wirnika

Wśród składowych widma napięcia [1], [6], [7] proporcjonalnego do strumienia poosiowego dla maszyny symetrycznej, prócz częstotliwości sieciowej i jej wielokrotności, można wyróżnić podstawową składową poślizgową związaną z wirnikiem opisaną poniższym równaniem:

$$f_{s1} = f_0 s \quad (1)$$

gdzie:

f_{s1} - podstawowa częstotliwość wirnika,

f_0 - częstotliwość sieciowa,

k - rząd harmonicznej czasowej,

s - poślizg.

Wystąpienie dowolnej niesymetrii obwodu wirnika prowadzi do powstania składowych opisanych następującą zależnością [6], [7]:

$$f_w = f_0 [s + k(1-s)], \text{ dla } k = 3, 5, 7, \dots \quad (2)$$

gdzie:

f_w - częstotliwość poślizgowa,

k - rząd harmonicznej czasowej.

Formuła opisana równaniem (2), w sposób jednoznaczny nie pozwala na rozróżnienie typu uszkodzenia wirnika. Jak wykazano w dalszej części artykułu, znaczący wkład do widma chwilowego w przypadku uszkodzenia prętów klatki, wnosi następująca częstotliwość:

$$f_{s3} = 3f_0 s \quad (3)$$

gdzie:

f_{s3} - trzecia częstotliwość wirnika.

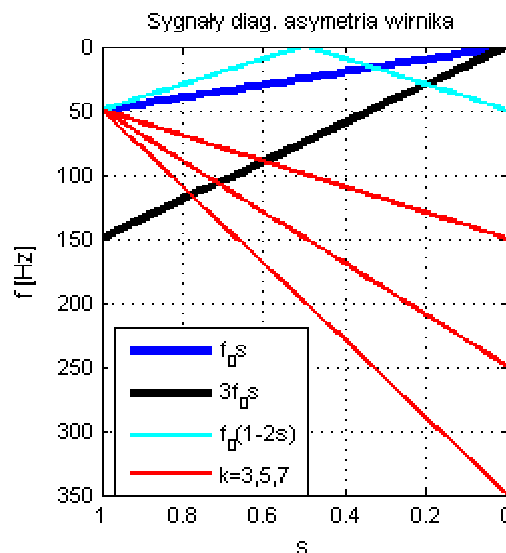
W uzupełnieniu przedstawionych składowych związanych z niesymetrią wirnika, przeanalizowano także wpływ częstotliwości opisanej wzorem (4). Posiadającej szczególne znaczenie w przypadku uszkodzenia prętów, pierścienia zwierającego oraz ekscentryczności dynamicznej w widmie prądu stojana [4], [7], [15], [16], jak również strumienia poosiowego [17]:

$$f_b = f_0(1-2s) \quad (4)$$

gdzie:

f_b - częstotliwość poślizgowa.

Teoretyczny przebieg zmian składowych związanych z uszkodzeniem wirnika (1), (2), (3) oraz (4), w czasie trwania rozruchu z założeniem liniowej zmiany poślizgu, przedstawiono na rys.3.



Rys. 3. Przebieg zmian składowych związanych z niesymetrią wirnika w trakcie rozruchu

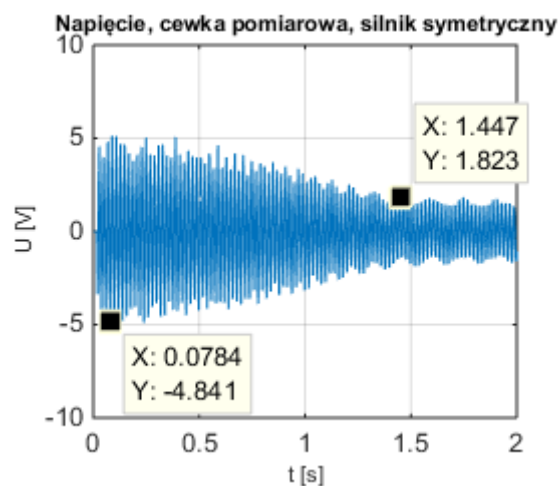
5. Realizacja obliczeń na potrzebę analiz

Ze względu na mnogość przedstawionych sygnałów diagnostycznych oraz ich przyjętą liniową zmienność w całym zakresie poślizgu, podczas trwania stanu przejściowego istnieje możliwość nakładania się sygnałów różnego pochodzenia i zbliżonej częstotliwości. Dla wymienionego przypadku, istnieje ryzyko zaburzenia prawidłowej obserwacji wybranej składowej widma chwilowego, w oknie czasowym. Ze względu na powyższe, wymaga się wyboru specyficznych przedziałów częstotliwości, gdzie wzajemne oddziaływanie poszczególnych sygnałów diagnostycznych, w zależności od aktualnej wartości poślizgu jest minimalne. W spektrum napięcia cewki pomiarowej występują stosunkowo nieznaczne różnice w wartościach między podstawową harmoniczną sieciową, a pozostałymi składowymi o charakterze diagnostycznym w spektrum napięcia cewki pomiarowej. Jako podstawowy przedział analizy zmienności sygnałów dla niesymetrii wirnika w dziedzinie czasu, wybrano zakres 120÷150 Hz. Zgodnie z przebiegami przedsta-

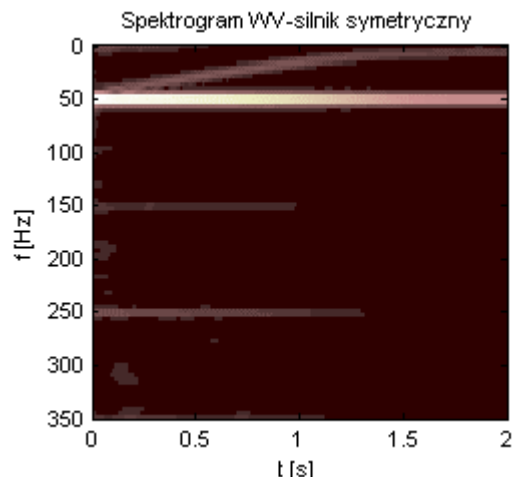
wionymi na rys. 3, wymieniony wyżej przedział częstotliwości pozwala na jednoczesną obserwację czterech sygnałów diagnostycznych, generujących modulacje częstotliwości o charakterystycznym kształcie. W celu określenia użyteczności sygnałów określonych wzorami (1) i (4) oraz zmienności składowej sieciowej, badaniom poddano także przedział częstotliwości $0 \div 50\text{Hz}$. Przebiegi napięcia analizowano za pomocą krótkoczasowego przekształcenia Fouriera [18]. Do obliczeń wykorzystano okno czasowe Hanninga, o długości $0,25\text{s}$, z rozdzielczością 4 Hz i przesunięciem o jedną próbkę. Wyniki obliczeń przedstawiono w skali liniowej. Skalę obciążenia badanego silnika w czasie rozruchu, odniesiono do wartości prądu w stanie ustalonym.

6. Wyniki pomiarów i ich analiza

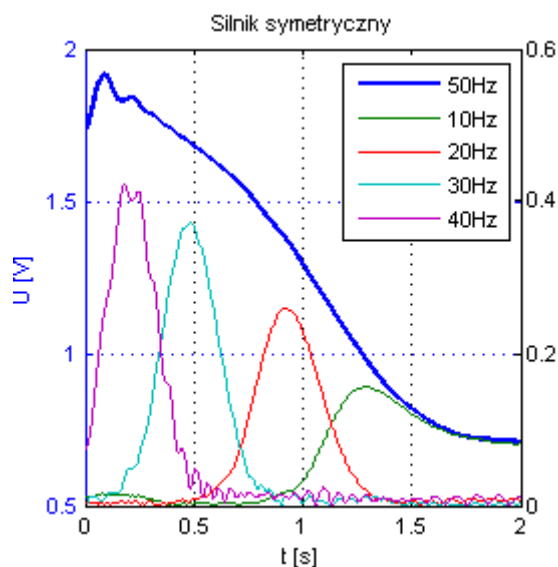
Przykładowe wyniki obliczeń dla wyróżnionych typów niesymetrii, uzyskano dla silnika o wartości prądu w stanie ustalonym na poziomie 7 A . Symulując tym samym ciężki rozruch ze znacznym momentem obciążenia, a także długim czasem trwania stanu przejściowego. W pierwszej kolejności, zbadano wpływ napięcia z cewki pomiarowej na rozkład składowych widma chwilowego, w założonych przedziałach częstotliwości dla silnika z symetrią obwodu stojana oraz wirnika. Uzyskane wyniki pomiarów i obliczeń dla tego przypadku, zestawiono na poniższych rysunkach od rys.4. do rys.7.



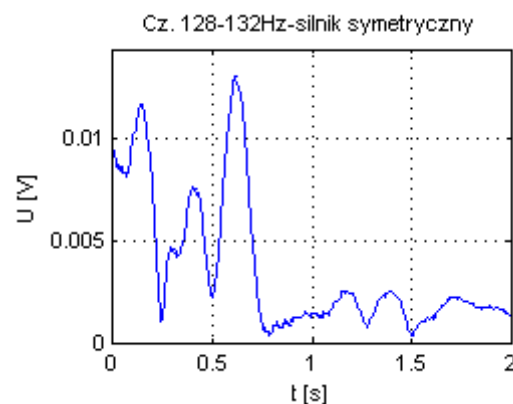
Rys. 4. Przebiegi, napięcia z cewki pomiarowej, silnik symetryczny, rozruch



Rys. 5. Spektrogram napięcia z cewki pomiarowej, silnik symetryczny



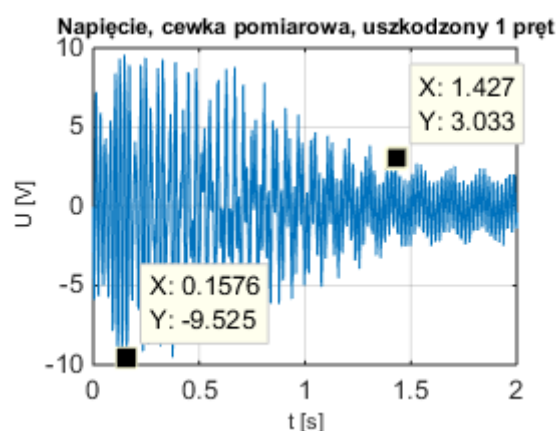
Rys. 6. Przebieg zmian podstawowej częstotliwości wirnika w czasie, na tle składowej sieciowej, silnik symetryczny, rozruch



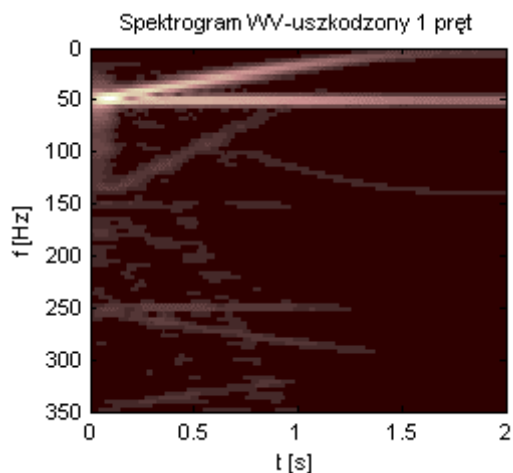
Rys. 7. Obserwowana częstotliwość spektrum $128 \div 132\text{Hz}$, silnik symetryczny

Obserwując przebieg zmian częstotliwości uzyskany w wyniku transformaty STFT dla silnika

symetrycznego, zauważalnymi składowymi są nieparzyste wielokrotności składowej sieciowej oraz podstawowa częstotliwość wirnika. Warto zauważyć, że podstawowa składowa wirnika pokrywa się co do kształtu w czasie z przebiegiem prędkości obrotowej. Dając tym samym, możliwość precyzyjnego odtworzenia wymienionej wielkości w czasie [9], i dalej momentu obrotowego na podstawie mocy chwilowej. Otrzymane wyniki stanowią w dalszej kolejności punkt odniesienia wobec maszyny z niesymetrią wirnika. Na rys.8 przedstawiono przebieg napięcia z cewki pomiarowej dla silnika z uszkodzonym pojedynczym prętem klatki.



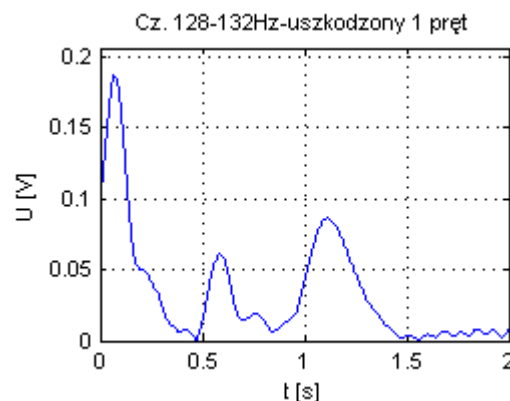
Rys. 8. Przebieg napięcia z cewki pomiarowej, uszkodzony pojedynczy pręt klatki, rozruch



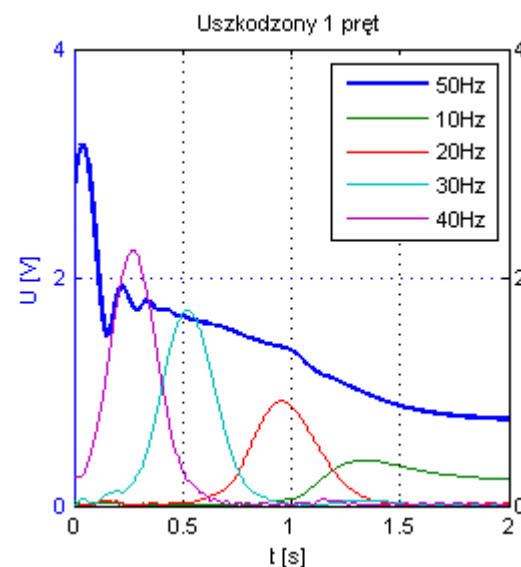
Rys. 9. Spektrogram napięcia z cewki pomiarowej, uszkodzony pojedynczy pręt klatki

Porównując sygnały napięcia dla maszyny z niesymetrycznym wirnikiem do silnika uznanego za symetryczny, istotne różnice objawiają się wyłącznie na etapie oceny wartości amplitudy, jak również kształtu przebiegu, które nie wskazują w sposób jednoznaczny na rodzaj asymetrii. Odmienne wygląda sytuacja dla

przypadku analizy porównawczej, z zastosowaniem metody czasowo-częstotliwościowej.



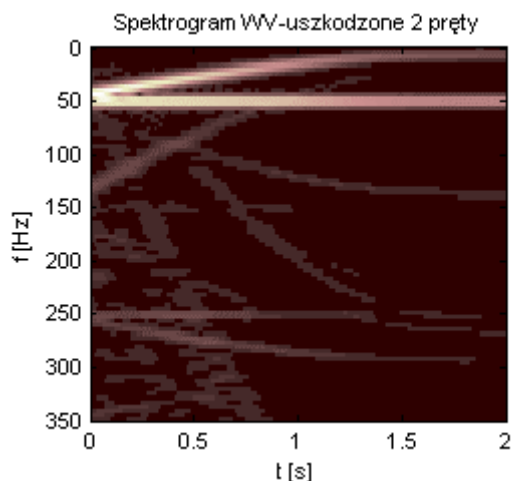
Rys. 10. Obserwowana częstotliwość spektrum 128÷132Hz, uszkodzony pojedynczy pręt klatki



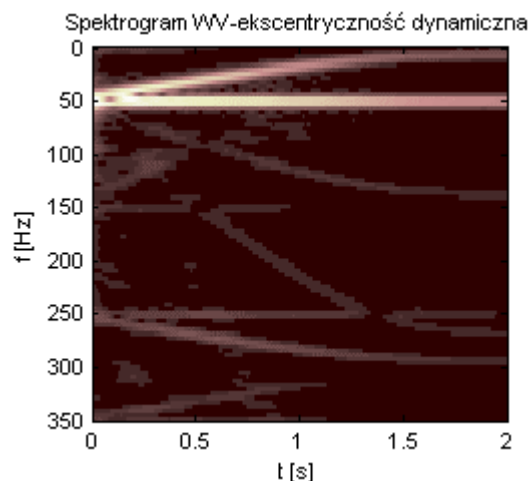
Rys. 11. Przebieg zmian podstawowej częstotliwości wirnika w czasie, na tle składowej sieciowej, uszkodzony pojedynczy pręt klatki, rozruch

Pierwszym spostrzeżeniem, wynikającym z oceny spektrogramu napięcia dla silnika z uszkodzonym pojedynczym prętem klatki, jest wystąpienie składowych opisanych równaniami (2) i (3). Obserwacja amplitudy i kształtu składowych w wybranym paśmie częstotliwości, wykazuje znaczny wzrost wartości napięcia, przy jednoczesnym wystąpieniu charakterystycznej modulacji w kształcie litery „W”. Również w paśmie 0÷50Hz, nastąpił istotny wzrost wartości amplitud podstawowych częstotliwości wirnika i stojana.

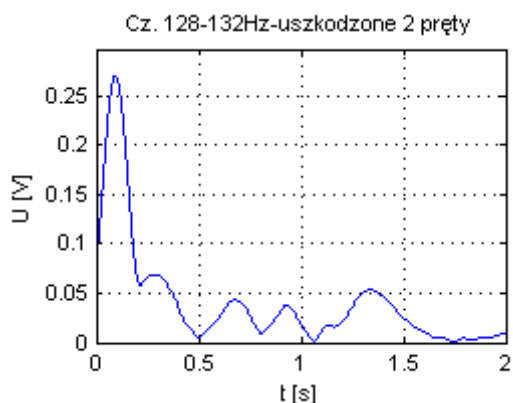
Potwierdzeniem sformułowanych wniosków są uzyskane wyniki dla silnika z zerwanymi dwoma prętami klatki oraz ekscentrycznością dynamiczną – rys.12 do rys.17.



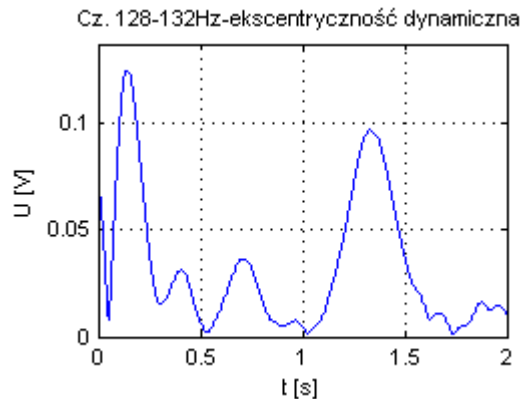
Rys. 12. Spektrogram napięcia z cewki pomiarowej, uszkodzone dwa pręty klatki



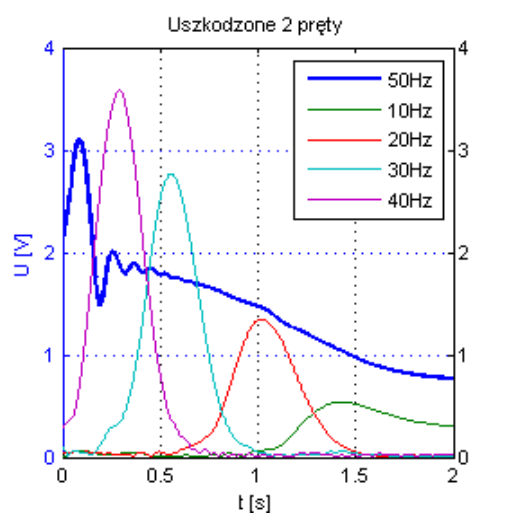
Rys. 15. Spektrogram napięcia z cewki pomiarowej, ekscentryczność dynamiczna



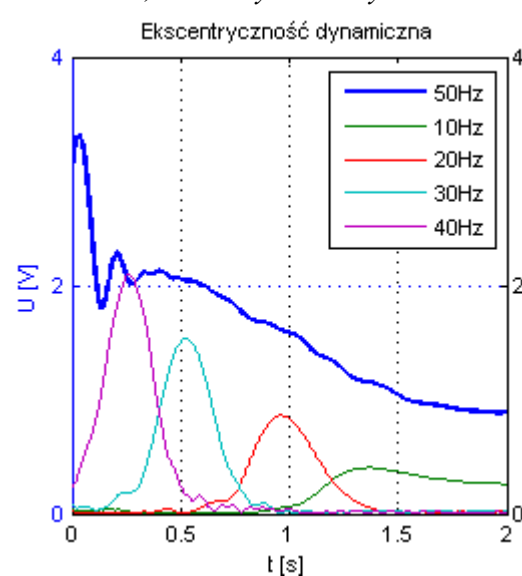
Rys. 13. Obserwowana częstotliwość 128÷132 Hz, uszkodzone dwa pręty klatki



Rys. 16. Obserwowana częstotliwość 128÷132 Hz, ekscentryczność dynamiczna



Rys. 14. Przebieg zmian podstawowej częstotliwości wirnika w czasie, na tle składowej sieciowej, uszkodzone dwa pręty klatki, rozruch

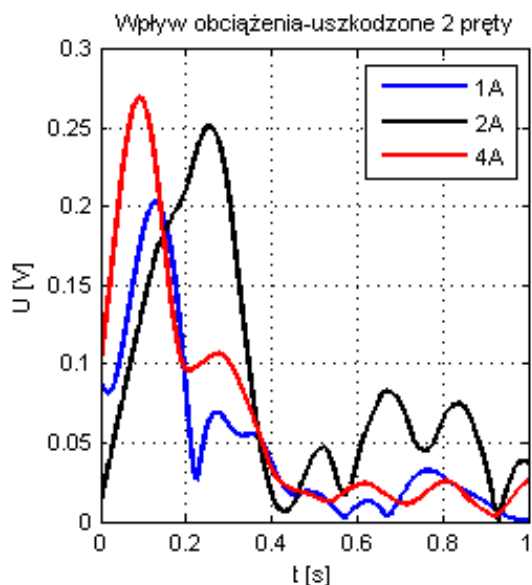


Rys. 17. Przebieg zmian podstawowej częstotliwości wirnika w czasie, na tle składowej sieciowej, ekscentryczność dynamiczna, rozruch

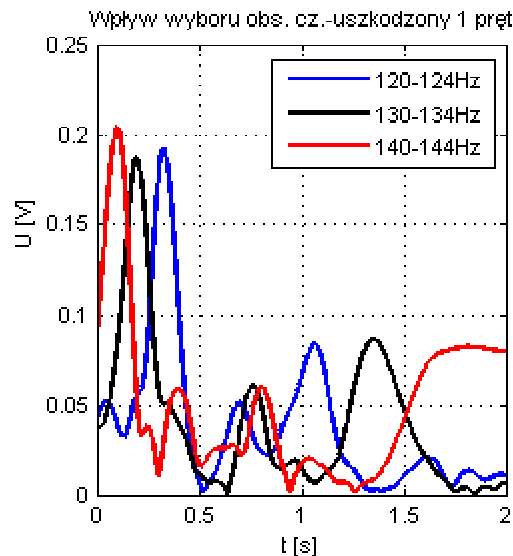
Zgodnie z przedstawionymi wynikami analiz dla różnych niesymetrii wirnika, wyodrębnienie sygnału opisanego wzorem (4), z tła podsta-

wowej częstotliwości wirnika oraz sieci w trakcie rozruchu jest znacznie ograniczone. Jedną z przyczyn powyższego, jest ograniczone pasmo indukowania się napięcia cewki o częstotliwości bliskich zeru. Według rys.3, można wyróżnić teoretyczny przedział częstotliwości $0 \div 15\text{Hz}$, w którym zachodzi najmniejsze zaburzenie wspomnianej składowej przez podstawową częstotliwość wirnika. Przy jednoczesnym położeniu tego pasma na charakterystyce przejściowej, wskazanej jako przedział tłumienia składowych o niskiej częstotliwości, zmniejszając tym samym efektywność zastosowania dolnoprzepustowej analizy pasmowej.

Niemniej istotnym aspektem, jest wpływ momentu obciążenia na przebieg oraz amplitudę sygnałów diagnostycznych. Według rys.18, moment obciążenia ma ograniczony wpływ na ogólny poziom amplitud sygnałów, opisanych równaniem (2) i (3). Decyduje on o czytelności widma chwilowego. Dla obciążeń bliskich biegowi jałowemu, pewne wyodrębnienie częstotliwości według wzoru (2), jest utrudnione ze względu na niedostateczny czas rozwoju częstotliwości w funkcji poślizgu. Powodem tego jest przybliżona prędkość zmian wielkości elektrodynamicznych do elektromechanicznych dla momentu ograniczonego do sumacyjnego momentu bezwładności na wale.



Rys. 18. Przykład wpływu momentu obciążenia na amplitudy obserwowanej częstotliwości $128 \div 132\text{Hz}$, uszkodzone dwa pręty klatki



Rys. 19. Wpływ wyboru częstotliwości obserwowanych składowych diagnostycznych w paśmie $120 \div 150\text{Hz}$, na wartość amplitudy, uszkodzony pojedynczy pręt klatki

Warto również zwrócić uwagę na charakterystyczną cechę przedziału częstotliwości $120 \div 150\text{Hz}$ (rys.19), dla momentów bliskich i większych od momentu znamionowego. Wybór obserwowanej częstotliwości nie ma wpływu na wartość amplitudy, lecz wyłącznie na czas wystąpienia modulacji związanych z niesymetrią obwodu wirnika.

7. Wnioski końcowe – część I

Zgodnie z wynikami, wyróżnione pasmo częstotliwości wraz ze wskazanymi składowymi widma, zależnymi od asymetrii wirnika, pozwalają na jednoznaczne rozróżnienie wirnika symetrycznego od uszkodzonego. Wskazano, że wpływ momentu obciążenia na czytelność widma chwilowego, należy uznać za minimalny dla obciążeń większych od połowy momentu znamionowego, co oznacza, że skuteczna ocena stanu wirnika jest również możliwa dla stosunkowo krótkich rozruchów.

Jak wykazano, sygnał opisany równaniem (4), nie znajduje praktycznego zastosowania w ocenie stanu wirnika na podstawie przebiegu napięcia proporcjonalnego do strumienia unipolarnego w czasie rozruchu. Natomiast częstotliwość (3) jest widoczna w widmie chwilowym, wyłącznie w przypadku dowolnej niesymetrii wirnika.

Zastosowanie sygnału strumienia unipolarnego w diagnostyce wirnika, należy traktować jako dodatkowe narzędzie w uzupełnieniu do analizy prądu rozruchowego stojana. Z czym związana

jest wynikowa postać analizy dolnoprzepustowej prądu, wskazująca wyłącznie na asymetrię klatki wirnika, dając tym samym możliwość rozróżnienia podstawowych typów uszkodzeń między sobą.

8. Literatura

- [1]. Biernat A., Góralski P.: *Zastosowanie pomiaru strumienia osiowego do okresowej diagnostyki silników indukcyjnych w zakładach przemysłowych*. Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, nr 4/2014 (104), wyd. KOMEL, s. 247-252.
- [2]. Duda A., Petryna J., Sułowicz M., Guziczek K.: *Metoda wstępnej oceny stanu wirnika silnika indukcyjnego przy pomocy dedykowanego przyrządu opartego na pomiarze strumienia poosiowego*. Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe nr 2/2015 (106), wyd. KOMEL, s. 59-63.
- [3]. Frosini L., Borin A., Girometta L., Venchi G.: *A novel approach to detect short circuits in low voltage induction motor by stray flux measurement*. Electrical Machines (ICEM), 2012 XXth International Conference on Marseille.
- [4]. Glinka T.: *Maszyny elektryczne i transformatory. Podstawy teoretyczne, eksploatacja i diagnostyka*. Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL 2015.
- [5]. Gołębiowski L., Gołębiowski M., Noga M., Skwarczyński J.: *Strumień osiowy w modelu 3D MES maszyny indukcyjnej*. Elektrotechnika i Elektronika, Tom 25, Zeszyt 2, 2006.
- [6]. Kokko V.: *Condition Monitoring of Squirrel-Cage Motors by Axial Magnetic Flux Measurements*. Department of Electrical Engineering, Optoelectronics and Measurement Techniques Laboratory, University of Oulu, Oulu 2003.
- [7]. Kowalski Cz. T.: *Diagnostyka układów napędowych z silnikiem indukcyjnym z zastosowaniem metod sztucznej inteligencji*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2013.
- [8]. Paszek W.: *Stany nieustalone maszyn elektrycznych prądu przemiennego*. WNT, Warszawa 1986.
- [9]. Petryna J., Sułowicz M., Duda A.: *Wykorzystanie strumienia poosiowego do badania stanów dynamicznych maszyn indukcyjnych małej i dużej mocy*. Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe nr 2/2014 (102), wyd. KOMEL, s. 165-171.
- [10]. Petryna J., Sułowicz M., Puzio Ł., Dziechciarz A.: *Wykrywanie zwarć zwojowych w maszynach elektrycznych na stacji prób z wykorzystaniem cewki do pomiaru strumienia poosiowego*. Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe nr 2/2015 (106), wyd. KOMEL, s. 185-190.
- [11]. Petryna J., Sułowicz M., Duda A., Guziczek K.: *Wykorzystanie strumienia unipolarnego w diagnostyce maszyn prądu przemiennego*. Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe nr 2/2013 (99), wyd. KOMEL, s. 85-90.

[12]. Pietrowski W.: *Zastosowanie radialnej sieci neuronowej w diagnostyce uszkodzeń uzwojenia stojana maszyny indukcyjnej klatkowej*. Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe nr 88/2012, wyd. KOMEL, s. 93-96.

[13]. Pole G. O.: *Application of Magnetic Fields To Aid The Detection and Diagnosis of Induction Motor Drive Faults*. University of Wales Institute Cardiff, January 2009.

[14]. Pusca R., Romary R., Fireteanu V., Ceban A.: *Finite Element Analysis and Experimental Study of The Near-Magnetic Field for Detection of Rotor Faults in Induction Motors*. Progress in Electromagnetics Research B, Vol. 50, 37-59, 2013.

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

[16]. Szymaniec S.: *Badania, eksploatacja i diagnostyka zespołów maszynowych z silnikami indukcyjnymi*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole 2013.

[17]. Weinreb K., Duda A., Petryna J., Sułowicz M.: *Diagnostyka ekscentryczności silnika indukcyjnego w oparciu o pomiar strumienia poosiowego*. Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe nr 2/2015 (106), wyd. KOMEL, s. 13-20.

[18]. Zieliński T.J.: *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów. Od teorii do zastosowań*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności 2007.

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