

Jarosław Tulicki, Maciej Sułowicz
Politechnika Krakowska, Kraków

ZASTOSOWANIE STRUMIENIA POOSIOWEGO DO OCENY STANU TECHNICZNEGO SILNIKA KLATKOWEGO W TRAKCIE ROZRUCHU. CZĘŚĆ II: ZWARCIA ZWOJOWE, ŁĄCZNA ASYMETRIA OBWODU STOJANA I WIRNIKA

APPLICATION OF THE AXIAL FLUX TO THE ASSESSMENT OF THE INDUCTION MOTOR DURING THE START-UP PROCESS. PART II: TURN-TO- TURN SHORT-CIRCUIT, COMBINED ASYMMETRY OF STATOR AND ROTOR

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 odczepy, 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 zwarćmi 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 wirnika, zwarcia zwojowe*

Keywords: *axial flux, diagnosis induction motor, transient state, rotor cage damage, turn-to-turn short circuits*

1. Wstęp

W części pierwszej artykułu, przedstawiono budowę stanowiska pomiarowego oraz metodę rejestracji strumienia poosiowego w warunkach przemysłowych i laboratoryjnych. Zbadano wpływ asymetrii wirnika na widmo chwilowe napięcia proporcjonalnego do strumienia unipolarnego, przy symetrycznym uzwojeniu stojana. Wskazano również na użyteczność strumienia unipolarnego, do oceny stanu wirnika ze względu na moment mechaniczny oraz wpływ

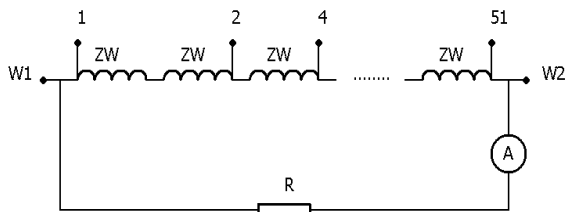
wielkości eksploatacyjnych na przebieg zmian wyżej wymienionego sygnału w dziedzinie czasu. Część druga opracowania, zawiera opis realizacji symulowanych zwarć zwojowych, jak również sygnałów diagnostycznych, związanych z asymetrią obwodu stojana, spowodowanych fazowymi zwarćmi zwojowymi. Dokonano oceny pomiarowej i numerycznej, wzajemnego wpływu przebiegu częstotliwości dia-

gnostycznych na występujące wspólnie uszkodzenia obwodu stojana oraz wirnika.

Osobnej analizie poddano silnik indukcyjny z symetrycznym wirnikiem, przy występującej niesymetrii stojana, wraz z wybraną liczbą zwartych zwojów.

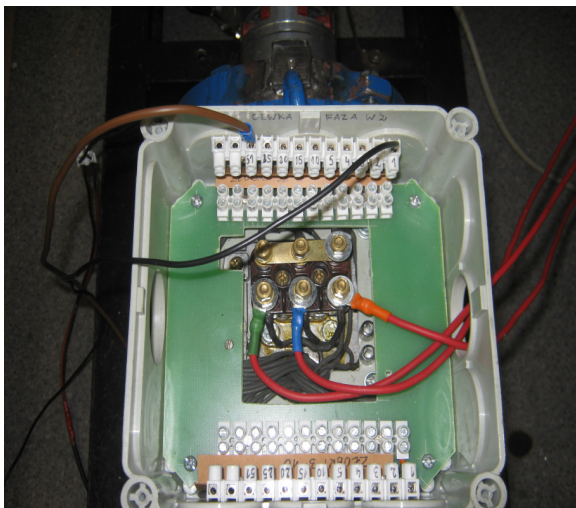
2. Realizacja zwarców zwojowych

Jak wspomniano w pierwszej części artykułu, stojan silnika został zmodyfikowany do postaci z wyprowadzonymi końcami zwojów fazy W i W. Zwarcia zwojowe realizowano poprzez zwieranie początku pierwszego zwoju fazy W, z końcem zwoju o wybranej wyższej liczbie porządkowej. Prąd zwarcia kontrolowano za pomocą szeregowo włączonego amperomierza i regulowanego rezystora - stanowiącego punkt zwarcia z opornością czynną $21,5\Omega$. Na rys.1, przedstawiono schemat ideowy połączeń elektrycznych, w trakcie realizacji symulowanych zwarców zwojowych.



Rys. 1. Schemat ideowy realizacji zwarców zwojowych na przykładzie fazy W

Na poniższym rysunku zobrazowano widok skrzynki zaciskowej wraz z wyprowadzonymi końcami zwojów V oraz W.



Rys. 2. Widok zmodyfikowanej skrzynki zaciskowej wraz z wyprowadzonymi końcami zwojów fazy W

3. Składowe widma chwilowego związane z niesymetrią stojana - zwarcia zwojowe

Do podstawowych sygnałów diagnostycznych, związanych z niesymetrią stojana spowodowanej fazowymi zwarciami zwojowymi, zalicza się składowe napięcia o częstotliwościach opisanych wzorem ogólnym [6], [7]:

$$f_z = kf_0 + [n_s(1-s)m]/60 \text{ dla } k = 1,3,5,\dots (1)$$

gdzie:

f_z - częstotliwość zwarcia zwojowego,

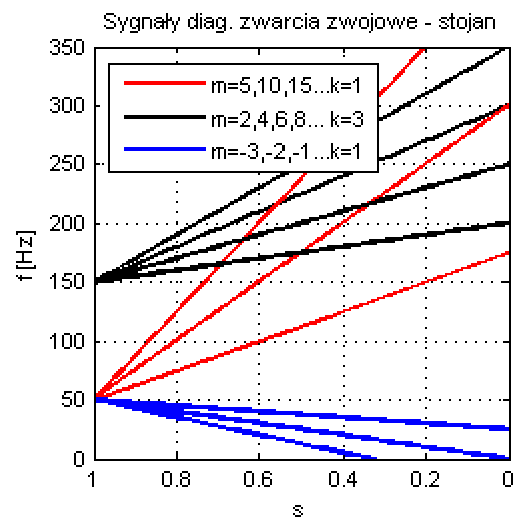
f_0 - częstotliwość sieciowa,

k - rząd harmonicznej czasowej stojana,

n_s - prędkość synchroniczna,

$m = -2, -1, +1, +2, \dots$

Jak można spostrzec, teoretyczny przebieg częstotliwości według wzoru (1), jest zależny od liczby par biegunów, a więc w zależności od parametrów konstrukcyjnych badanej maszyny. Określone składowe dla tego samego rzędu harmonicznej czasowej zajmują inne pasmo częstotliwości widma chwilowego. Na rys.3, przedstawiono teoretyczny przebieg składowych opisanych zależnością (1), z założeniem liniowej zmiany poślizgu w trakcie rozruchu, dla silnika Sg-112M-4, z dwoma parami biegunów.



Rys. 3. Teoretyczny przebieg zmian częstotliwości wybranych składowych napięcia związanych z niesymetrią stojana spowodowanych fazowymi zwarciami zwojowymi w czasie rozruchu

Przy czym wykreślone składowe napięcia w funkcji poślizgu, posiadają indywidualnie wybrane wartości częstotliwości niezależnych od poślizgu. Jak wykazano w dalszej części artykułu, dla badanego silnika składowe napięcia zwią-

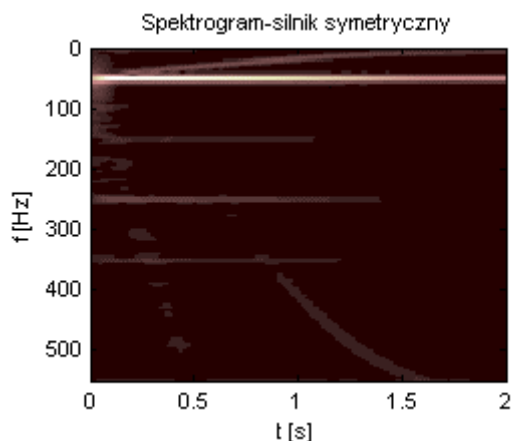
zane ze zwarciami zwojowymi w paśmie 150÷350Hz, posiadają dominujący charakter. Prócz składowych napięcia w paśmie powyżej trzeciej składowej sieciowej, istnieją napięcia śladowe o częstotliwości w przedziale 0÷50Hz, mające wpływ na przebieg i amplitudę podstawowej składowej napięcia wirnika. Należy również zwrócić uwagę na przejście częstotliwości związanych, z uszkodzeniem zwojów przez pasmo 120÷150Hz, które zostało uznane w pierwszej części artykułu za szczególnie dogodny do obserwacji stanu niesymetrii wirnika w trakcie rozruchu.

4. Wyniki pomiarów i analiz

Warunki analizy sygnałów w odniesieniu do pierwszej części artykułu, pozostały niezmiennic, tzn. wszystkie wyniki zestawiono w skali liniowej. Do obliczeń zastosowano krótkoczasową transformatę Fouriera z oknem czasowym Hanninga 0,25 s i przesunięciem o jedną próbkę. Prąd silnika w stanie ustalonym wynosił 7 A. Widmo chwilowe obserwacji spektrogramu rozszerzono do zakresu częstotliwości 0÷550Hz.

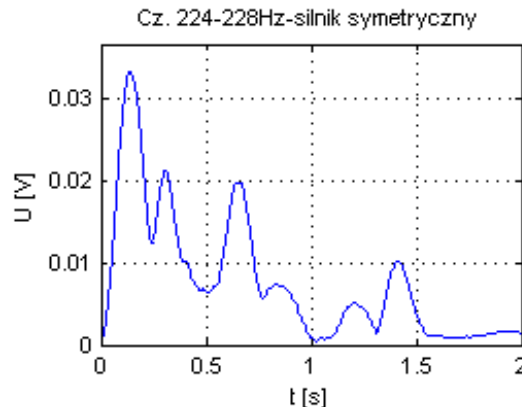
4.1. Silnik z symetrycznym obwodem stojana i wirnika

Pierwszym przypadkiem poddanym analizie był silnik symetryczny, gdzie obserwacji poddano przebieg sygnału z zakresu częstotliwości 224÷228Hz, zgodny ze wstępnym założeniem rozdzielczości widma na poziomie 4Hz.



Rys. 4. Spektrogram napięcia z cewki pomiarowej, silnik symetryczny

Ocena występujących składowych napięcia na spektrogramie (rys.4), w rozszerzonym paśmie częstotliwości pozwala jedynie stwierdzić, że składowe opisane wzorem (1), dla parametrów $m=25$ i $k=1$ oraz $m=12$ i $k=3$, są związane z niesymetrią konstrukcji uzwojeń.

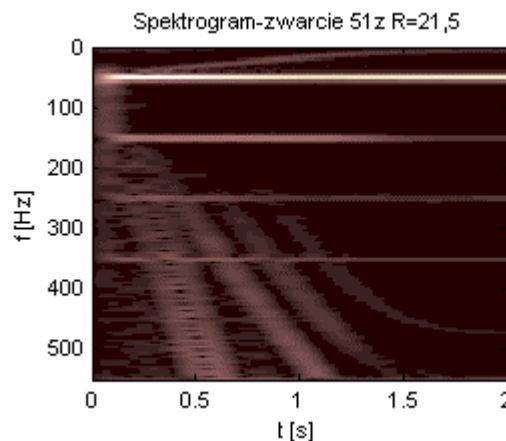


Rys. 5. Obserwacja składowych napięcia o częstotliwości 224÷228Hz, silnik symetryczny

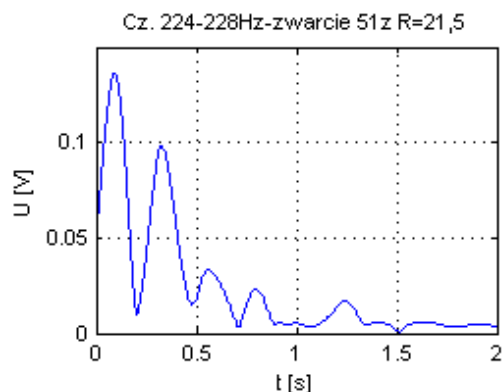
Również przebieg z rys.5, ze względu na niską wartość amplitudy, pozwala przypuszczać, że otrzymane modulacje częstotliwości są wynikiem generacji składowych o małych amplitudach i związanych z poślizgiem oraz przyjętą niesymetrią konstrukcji stojana. Oznacza to, że składowe napięcia o częstotliwości opisanej wzorem (1), powstają bez względu na stan niesymetrii uzwojenia.

4.2. Silnik z symetrycznym wirnikiem, fazowe zwarcie zwojowe obwodu stojana

Zupełnie odmiennie w porównaniu z silnikiem symetrycznym, przedstawia się przypadek fazowego zwarcia 51 zwojów przez rezystancję. Spektrogram dla tego przypadku przedstawiono na rys.6. Wartość prądu w obwodzie zwarciovym wynosił 1,1 A.

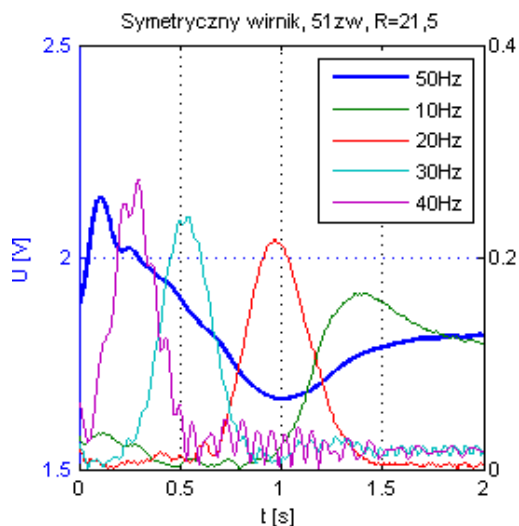


Rys. 6. Spektrogram napięcia z cewki pomiarowej, zwarcie 51 zwojów przez rezystancję



Rys. 7. Obserwacja częstotliwości 224÷228Hz, zwarcie 51 zwojów fazy przez rezystancję

Dla silnika z symulowanymi zwarciami zwojowymi, w sposób jednoznaczny można wyróżnić przedział napięć o częstotliwości o największym zaburzeniu widma chwilowego. Jest on zawarty poniżej trzeciej harmonicznej sieciowej. Obserwacja wybranej składowej napięcia w paśmie 224÷228 Hz, wskazuje na znaczny wzrost amplitudy dla wyróżnionego przedziału, w porównaniu z silnikiem symetrycznym. Prócz powyższego, wyróżniono składowe o parametrach $m=25, 27, 30$ dla $k=1$ i $m=12$ dla $k=3$ wg (1), na podstawie przebiegów teoretycznych z rys.3. Badaniom poddano również przedział częstotliwości 0÷50Hz, dla silnika ze zwartymi zwojami fazy stojana. Wynik analiz przedstawiono na rys.8.



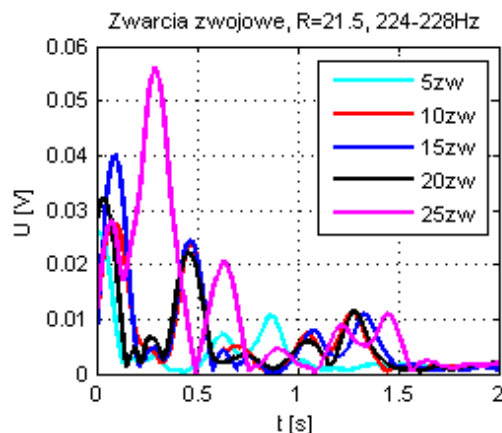
Rys. 8. Przebieg zmian napięcia podstawowej częstotliwości wirnika w czasie, na tle składowej sieciowej, zwarcie 51 zwojów przez rezystancję, rozruch

Z powyższych przebiegów wynika, że niesymetria stojana ma ograniczony wpływ na amplitudę podstawowej częstotliwości napięcia

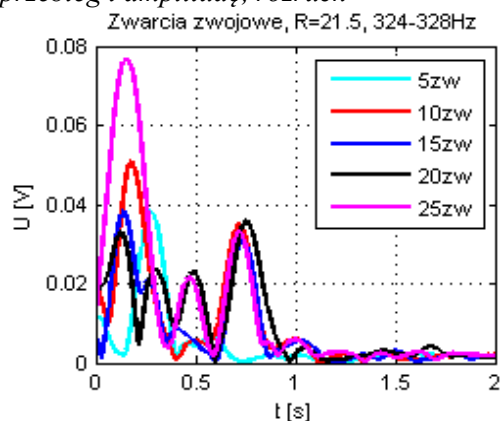
wirnika w trakcie rozruchu. Wraz ze spadkiem wartości poślizgu obserwuje się zaburzenia częstotliwości o nieznacznej amplitudzie dla zakresu widma 25÷45Hz, którym można przyporządkować według wzoru (1), parametry $m=-2,-1$ dla $k=1$. W przypadku harmonicznej sieciowej, nastąpił istotny wzrost amplitudy w początkowej fazie rozruchu i zniekształcenie przebiegu dla chwili wystąpienia poślizgu krytycznego.

4.3. Wpływ liczby zwartych zwojów na obserwowane częstotliwości napięcia

Równie ważnym zagadnieniem jest wpływ wyboru pasma obserwacji widma na czytelność kształtu i amplitud składowych napięcia, związanych z poziomem asymetrii stojana. Dla przedziałów częstotliwości w zakresie 150÷250Hz, 250÷350Hz i wybranej liczby zwartych zwojów, dokonano obserwacji składowych napięcia 224÷228Hz, 324÷328Hz, w czasie. Wyniki przedstawiono na rys.9 i rys.10.



Rys. 9. Obserwacja napięć o częstotliwości 224÷228Hz, wpływ liczby zwartych zwojów na przebieg i amplitudę, rozruch

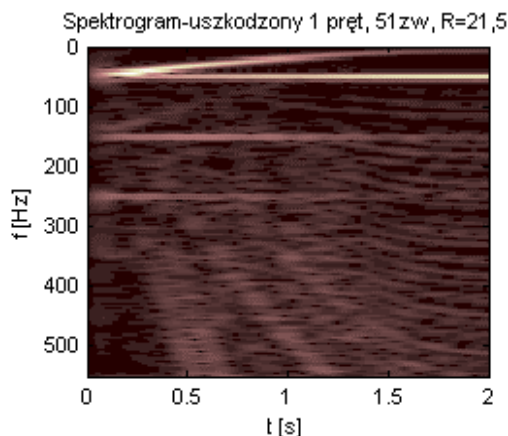


Rys. 10. Obserwacja napięć o częstotliwości 324÷328Hz, wpływ liczby zwartych zwojów na przebieg i amplitudę, rozruch

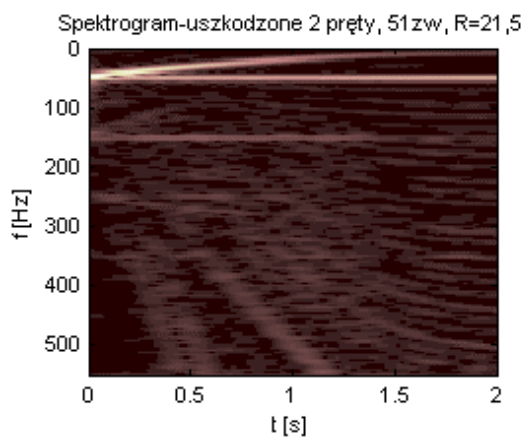
Według zestawionych przebiegów z rys.9 oraz rys.10, wybór pasma częstotliwości nie ma znaczącego wpływu na amplitudy napięć o częstotliwości diagnostycznych. Ma jedynie wpływ na liczbę obserwowanych jednocześnie składowych napięć występujących w danym paśmie, zgodnie z teoretycznymi przebiegami z rys.3. Można więc uznać, że wybór przedziału częstotliwości należy uzależnić od parametrów konstrukcyjnych oraz długości trwania rozruchu. Czas rozruchu ma decydujące znaczenie dla czytelności wybranych sygnałów. Dla krótkiego rozruchu korzystnie jest wybrać przedział, gdzie teoretyczna liczba sygnałów diagnostycznych jest najmniejsza.

4.4. Łączna asymetria stojana i wirnika

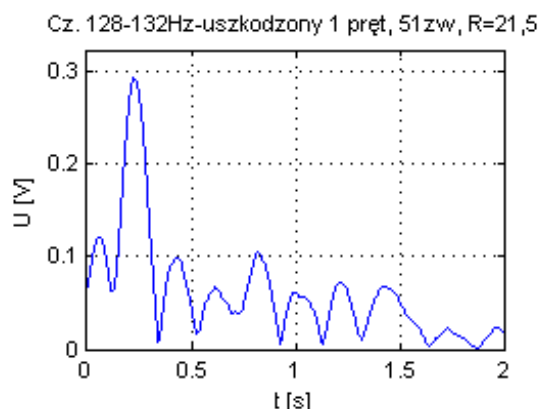
Wystąpienie niesymetrii wirnika i obwodu stojana na skutek zwarcie zwojowych, zgodnie z założeniami teoretycznymi z punktów: 4-I części i 3-II części artykułu, wywołuje łączne wystąpienie składowych.



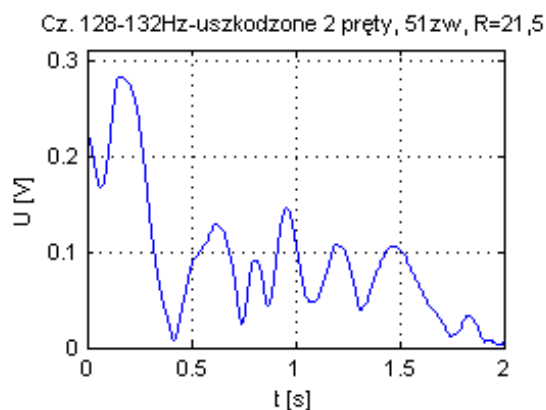
Rys. 11. Spektrogram napięcia z cewki pomiarowej, zwarcie 51 zwojów przez rezystancję, uszkodzony pojedynczy pręt klatki



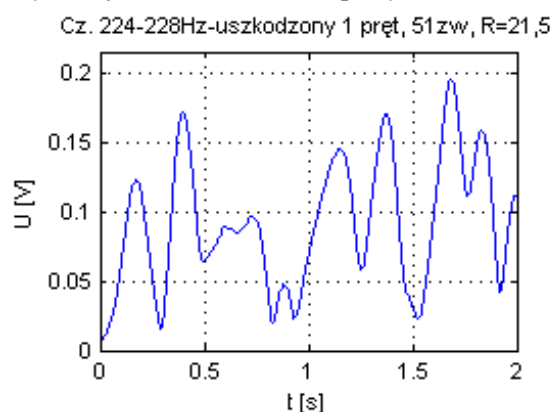
Rys. 12. Spektrogram napięcia z cewki pomiarowej, zwarcie 51 zwojów przez rezystancję, uszkodzone dwa pręty klatki



Rys. 13. Obserwacja napięcia o częstotliwości 128÷132 Hz, zwarcie 51 zwojów fazy przez rezystancję, uszkodzony pojedynczy pręt klatki

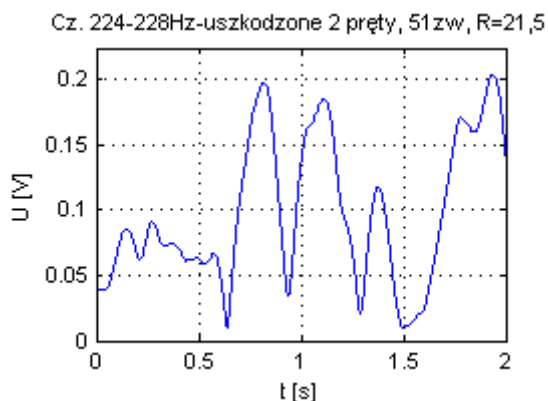


Rys. 14. Obserwacja napięcia o częstotliwości 128÷132 Hz, zwarcie 51 zwojów fazy przez rezystancję, uszkodzone dwa pręty klatki



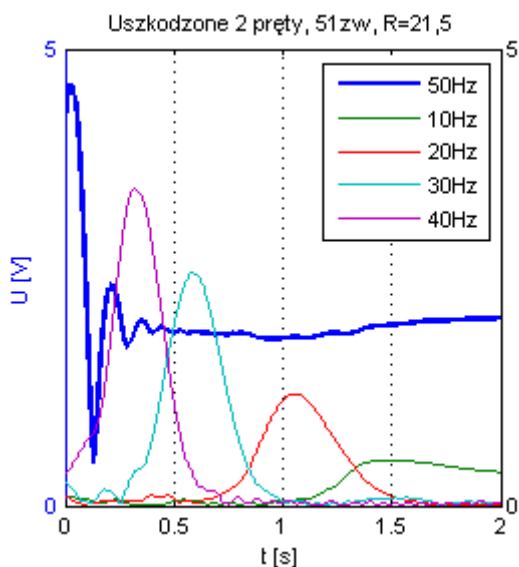
Rys. 15. Obserwacja napięcia o częstotliwości 228÷232 Hz, zwarcie 51 zwojów fazy przez rezystancję, uszkodzony pojedynczy pręt klatki

Są one skojarzone z danym typem uszkodzenia w wybranych przedziałach częstotliwości. Uzyskane wyniki analiz przedstawiono na poniższych rysunkach.



Rys. 16. Obserwacja napięcia o częstotliwości 228÷232 Hz, zwarcie 51 zwojów fazy przez rezystancję, uszkodzone dwa pręty klatki

Jak wynika z przytoczonych wyników analiz z rys.11 i rys.12, przy zwarciu dużej liczby zwojów i niesymetrii wirnika, widmo chwilowe wykazuje zaburzenia uniemożliwiające jednoznaczne wizualne wyróżnienie składowych napięcia wskazanych jako sygnały diagnostyczne.



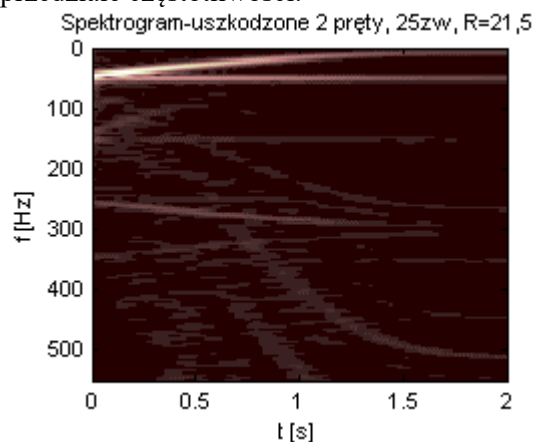
Rys. 17. Przebieg zmian podstawowej częstotliwości wirnika w czasie, na tle składowej sieciowej, zwarcie 51 zwojów przez rezystancję, uszkodzone dwa pręty klatki, rozruch

Z rys.13 do rys.16 wynika, że łączne wystąpienie asymetrii wirnika i stojana, ma wzajemny wpływ na wartość amplitud oraz kształt sygnałów diagnostycznych. Jest to naturalną konsekwencją rozwoju częstotliwości, związanych funkcyjnie ze zmienną wartością poślizgu w czasie rozruchu. Istotnym spostrzeżeniem jest także znaczny rozwój amplitud napięcia o częstotliwościach, opisanych zależnością (1), z parametrami $m=2,4,6$ dla $k=3$, na widmo chwilowe. Nie miało to miejsca dla

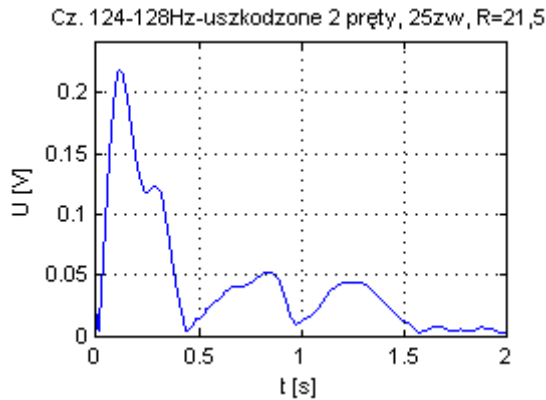
przypadków niesymetrii stojana przy symetrycznym wirniku i asymetrii wirnika przy symetrycznym stojanie. Można więc uznać, że wyróżnione składowe są wyłącznie efektem wystąpienia łącznej asymetrii wirnika i stojana. Zgodnie z rys.17 oraz przebiegami dla asymetrii wirnika zestawionymi w pierwszej części artykułu (rys.11 i rys.14), wspólne wystąpienie uszkodzenia stojana i wirnika nie ma wpływu na amplitudę napięcia o podstawowej częstotliwości wirnika. Zmianie ulega podstawowa częstotać sieciowa oraz jej nieparzyste wielokrotności. Bez względu na rodzaj występującej niesymetrii silnika, następuje wzrost wartości amplitudy napięcia. Wyżej wspomniana zmiana jest odwrotnie proporcjonalna do momentu, w porównaniu z maszyną symetryczną, przy tym samym momencie obciążenia.

5. Wnioski końcowe – część II

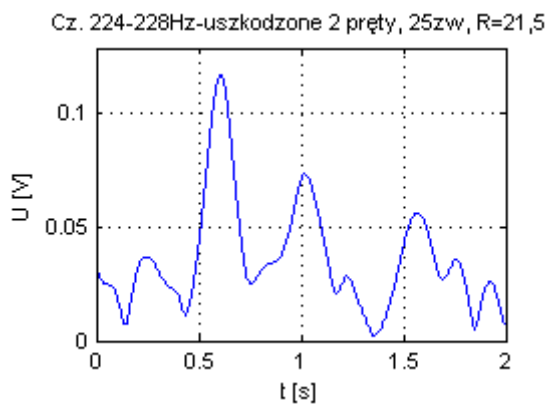
Uzyskane wyniki potwierdzają dotychczas zgromadzoną wiedzę na temat wykorzystania strumienia poosiowego w diagnostyce. Wartością dodaną artykułu jest dokładne rozpoznanie możliwości wykrywania zwarc zwojowych już na etapie nieznacznej liczby połączeń niskorezystancyjnych, w pojedynczej fazie uzwojenia. W odróżnieniu od analizy stanu ustalonego w przypadku rozruchu, prawidłowe odróżnienie składowych napięcia związanych z niesymetrią stojana dla dużej liczby zwartych zwojów od niesymetrii wirnika, jest utrudnione. Co jak wskazano, wynika z ograniczeń przyjętej analizy czasowo-częstotliwościowej oraz dużej liczby sygnałów, związanych z wirnikiem i obwodem stojana, występujących w tym samym przedziale częstotliwości.



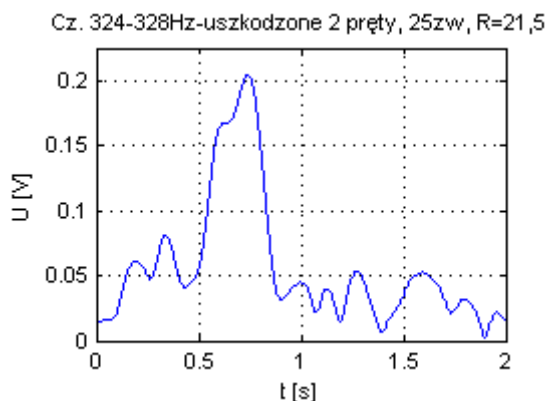
Rys. 18. Spektrogram napięcia z cewki pomiarowej, zwarcie 25 zwojów przez rezystancję, uszkodzone dwa pręty klatki



Rys. 19. Obserwacja napięcia o częstotliwości 124÷128 Hz, zwarcie 25 zwojów fazy przez rezystancję, uszkodzone dwa pręty klatki



Rys. 20. Obserwacja napięcia o częstotliwości 224÷228 Hz, zwarcie 25 zwojów fazy przez rezystancję, uszkodzone dwa pręty klatki



Rys. 21. Obserwacja napięcia o częstotliwości 324÷328 Hz, zwarcie 25 zwojów fazy przez rezystancję, uszkodzone dwa pręty klatki

Odmienne prezentują się wyniki dla silnika z niesymetrią wirnika oraz fazowym zwarcie 25 zwojów przez rezystancję, przedstawiane na rys.18 do rys.21.

W tym przypadku, ocena wizualna spektrogramów, jak również obserwacja wybranych częstotliwości diagnostycznych, daje możliwość, na jednoznaczne wyróżnienie typu asymetrii.

Jest to możliwe wyłącznie na wstępnym etapie rozwoju uszkodzenia stojana i wirnika występujących łącznie.

6. Podsumowanie I i II części artykułu

Wśród najważniejszych zalet zastosowania sygnału strumienia poosiowego w czasie rozruchu, należy wymienić brak znaczącego wpływu na czytelność widma chwilowego w zależności od momentu mechanicznego, co oznacza, że nawet dla maszyny o niskiej wartości obciążenia, prawidłowe rozróżnienie składowych napięcia w spektrum harmonicznych jest uproszczone w porównaniu z analogicznym stanem przejściowym dla sygnału prądu stojana. Jak wykazano, już na wstępnym etapie rozwoju zwarc zwojowych, istnieje możliwość skutecznego uchwycenia powyższej niesymetrii obwodu stojana. Podobnie kształtuje się przypadek uszkodzenia wirnika, gdzie pomimo stosunkowo krótkiego czasu rozruchu, wyróżnienie i obserwacja napięcia o częstotliwości diagnostycznej w czasie, wykazuje ograniczony wpływ przebiegów elektromagnetycznych na zmienne siły elektrodynamiczne.

Do wad wykorzystania strumienia poosiowego, zalicza się głównie brak pomiaru eksploatacyjnej wielkości fizycznej, takiej jak prąd lub napięcie. Jak również konieczność stosowania cewki o zmiennych wymiarach karkasu, dostosowanej do wielkości mechanicznej silnika, przypadku umiejscowienia od strony wewnętrznej lub zewnętrznej kołnierza.

7. 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., Guzic 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, pp. 1538 – 1544.
- [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., Guziec 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