

Roman Miksiewicz
Politechnika Śląska, Gliwice

DIAGNOSTYKA SILNIKÓW INDUKCYJNYCH DWUKŁATKOWYCH Z USZKODZONYMI PRĘTAMI

DIAGNOSTIC OF DOUBLE SQUIRREL CAGE MOTORS WITH BROKEN BARS

Abstract: The paper presents the results of circuit-field calculations of induction motor with broken bars of lower cage and upper cage. Static characteristics of the motor for different cases of rotor asymmetry were compared. Stator current was used as a diagnostic signal to evaluate the degree of rotor damage. Bandpass filters of Mathcad program were used to separate additional components generated in the stator current at the asymmetry of rotor.

1. Wstęp

Z punktu widzenia niezawodności napędów elektrycznych, diagnostyka silników indukcyjnych, zwłaszcza dużej mocy, jest obecnie ważnym zagadnieniem eksploatacyjnym. W związku z tym obserwuje się w ostatnich latach duże zainteresowanie tą tematyką. Powstało wiele publikacji, w których poddaje się analizie dostępne sygnały diagnostyczne (np. przebiegi czasowe prądów stojana, drgania maszyny) i na ich podstawie dokonuje się oceny stopnia uszkodzenia wirnika. Proponuje się zastosowanie filtrów pasmowych, analizę FFT, STFT, analizę falkową, sztuczne sieci neuronowe, filtry Kalmana i inne [1÷10]. Dominująca część publikacji dotyczy silników z wirnikiem jednoklatkowym, niewiele prac poświęcono silnikom z wirnikiem dwuklatkowym [10]. W tym przypadku możliwe są uszkodzenia prętów klatki pracy lub klatki rozruchowej oraz pierścieni zwierających. Rozważyć należałoby również przypadki, w których wirnik ma wspólny lub oddzielny pierścień dla klatki pracy i klatki rozruchowej.

Żadna z wymienionych metod diagnostycznych nie daje jednak informacji o liczbie uszkodzonych prętów, jak i ich rozmieszczeniu. Nie daje również informacji, czy uszkodzenie dotyczy prętów klatki, czy też pierścieni zwierających. W przypadku niektórych uszkodzeń symetrycznych, w prądzie stojana nie powstają dodatkowe składowe i wtedy przebieg ten nie można wykorzystać jako sygnał diagnostyczny.

Celem pracy było zbadanie wpływu uszkodzeń prętów klatki pracy i klatki rozruchowej wirnika na przebiegi czasowe prądów stojana. Porównano quasi-stastyczne charakterystyki me-

chaniczne silnika dla uszkodzonych prętów wirnika.

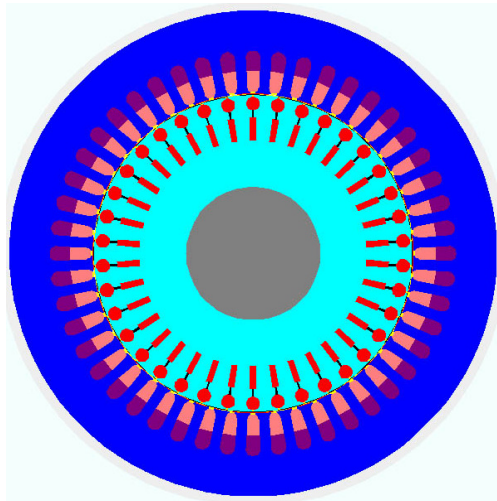
Jako sygnał diagnostyczny do analizy przebiegów czasowych prądów zastosowano filtry pasmowoprzepustowe programu Mathcad. Praca oparta jest na wcześniejszej publikacji autora [6] dotyczącej uszkodzeń wirników silników jednoklatkowych.

Obiektem badań był silnik dwuklatkowy z oddzielnymi pierścieniami zwierającymi klatki, o następujących danych: moc znamionowa $P_N = 120$ kW, napięcie zasilania $U_N = 1000$ V, częstotliwość zasilania $f_N = 50$ Hz, prędkość obrotowa $n_N = 1450$ obr/min, liczba żłobków stojana $Q_s = 48$, liczba żłobków wirnika $Q_r = 38$, układ połączeń w gwiazdę, uzwojenie dwuwarstwowe.

2. Model polowo-obwodowy silnika

Dla analizowanego silnika wykonano obliczenia obwodowo-polowe przy wykorzystaniu MES.

W obliczeniach nie uwzględniono strat w żelazie silnika. W modelu dwuwymiarowym silnika (rys.1) indukcyjności rozprożeń czoł uzwojeń stojana i pierścieni wirnika dołączono do schematu obwodowego programu Maxwell. Schemat obwodu klatek wirnika składa się z dwóch niezależnych obwodów (o liczbie oczek równej liczbie prętów wirnika), oddzielnych dla klatki pracy i klatki rozruchowej. Umożliwia on symulowanie dowolnej liczby pęknięć w kłatkach lub pierścieniach zwierających przez zadanie odpowiednio dużych wartości rezystancji lub indukcyjności.



Rys. 1. Model połowy silnika

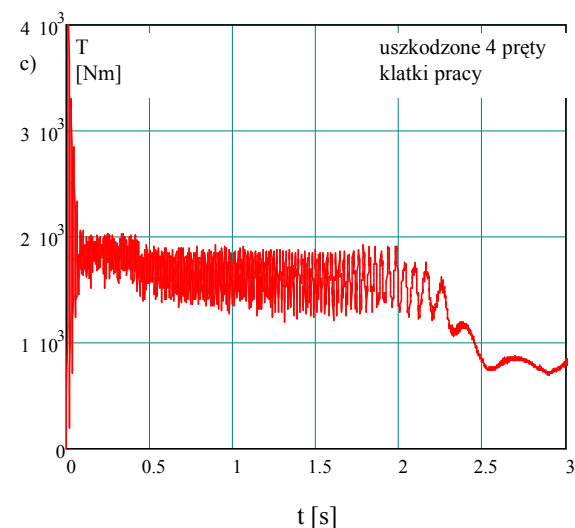
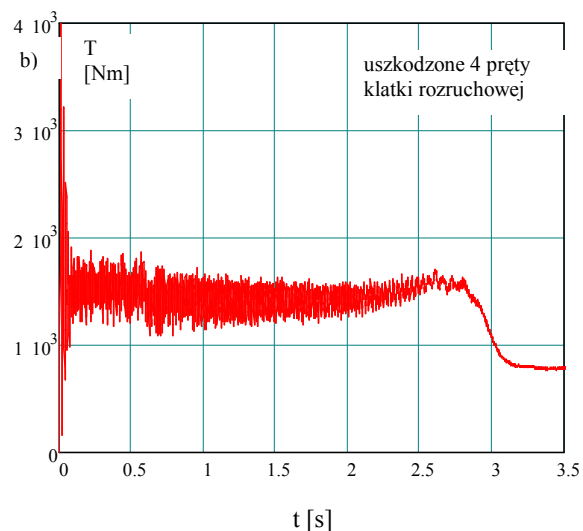
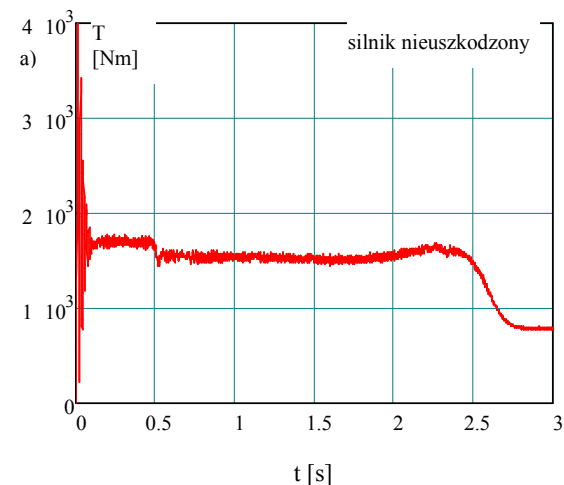
Obliczenia wykonano w module Transient programu Maxwell 2D dla rozruchu silnika od ujemnej prędkości obrotowej. Analizie poddano przebiegi momentu oraz prądy stojana i wirnika. Na podstawie otrzymanych przebiegów podczas rozruchu silnika można wyznaczyć quasi-statyczne charakterystyki silnika. Na rys.2 przedstawiono przebiegi momentu podczas rozruchu silnika nieuszkodzonego (rys.2a), z 4 uszkodzonymi prętami klatki rozruchowej (rys.2b) i z 4 uszkodzonymi prętami klatki pracy (rys.2c). Przebiegi prądów stojana z 4 uszkodzonymi prętami klatki pracy i klatki rozruchowej przedstawiono na rys.3. Na rys. 4÷5 przedstawiono przebiegi prądów w klatce wirnika dla różnych przypadków niesymetrii.

Skutkiem pęknięcia prętów klatki pracy, jak i klatki rozruchowej pojawiają się w momencie składowe pulsujące o większej amplitudzie w przypadku pęknięć klatki pracy, niż pęknięć klatki rozruchowej. Natomiast w przebiegach prądów stojana nie widać istotnych różnic i bez dokładnej analizy numerycznej nie jest możliwa ich bezpośrednia ocena.

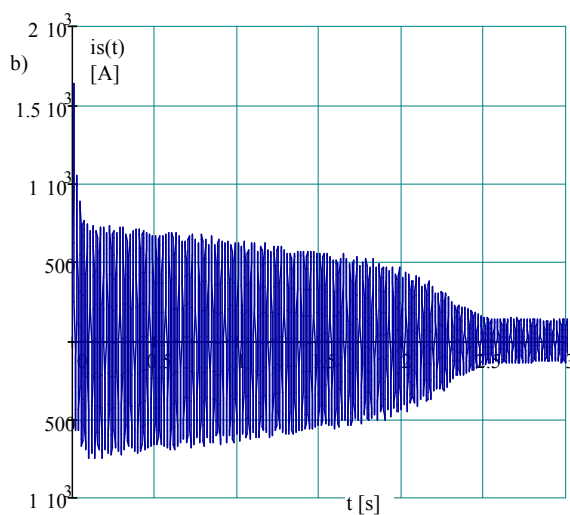
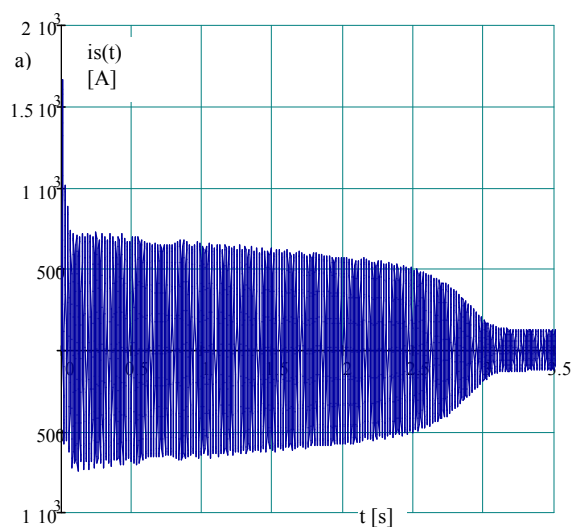
Z porównania przebiegów prądów w klatkach wirnika można stwierdzić, że przerwy w prętach klatki rozruchowej lub klatki pracy powodują wzrost prądów odpowiednio w klatce pracy lub rozruchowej. Pęknięcia klatek powodują również wzrost prądów w prętach sąsiadujących z prętami pękniętymi.

Na podstawie przebiegów momentu podczas rozruchu można wyznaczyć charakterystyki quasi-mechaniczne silnika - uśrednionego momentu w funkcji prędkości obrotowej (rys.6) oraz charakterystyki skutecznej wartości ru-

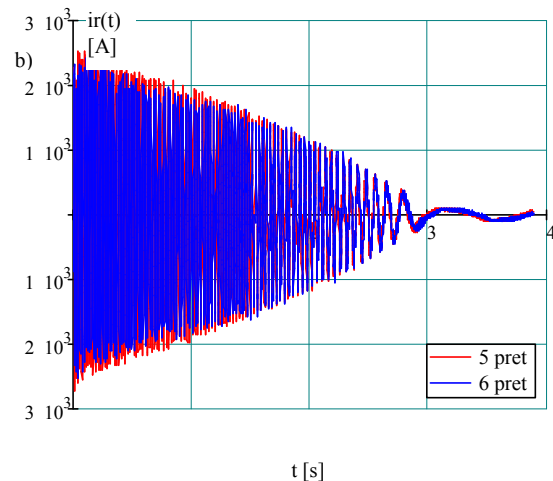
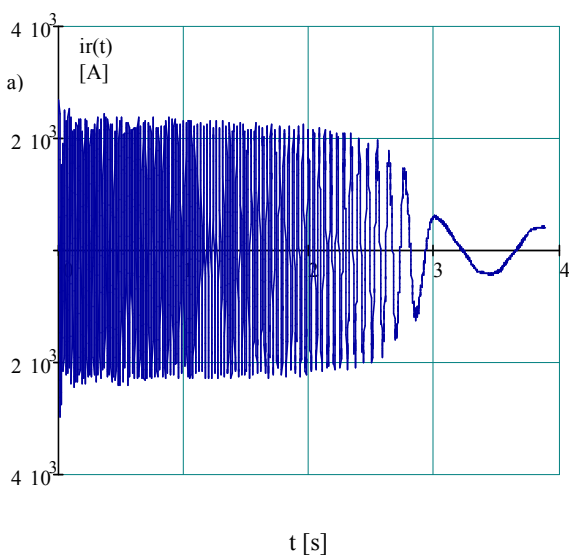
chomej prądu stojana w funkcji prędkości obrotowej (rys.7).



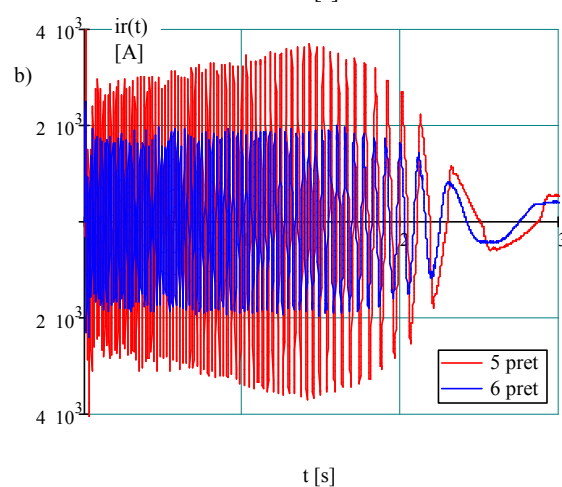
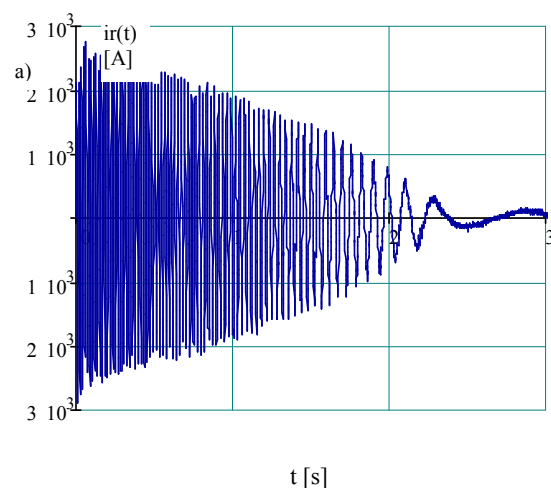
Rys. 2. Przebiegi momentów podczas rozruchu silnika: a) nieuszkodzonego, b) z uszkodzonymi 4 prętami klatki rozruchowej, c) z uszkodzonymi 4 prętami klatki pracy



Rys.3. Przebiegi prądów stojana podczas rozruchu silnika: a) silnika z 4 uszkodzonymi prętami klatki rozruchowej, b) silnika z 4 uszkodzonymi prętami klatki pracy

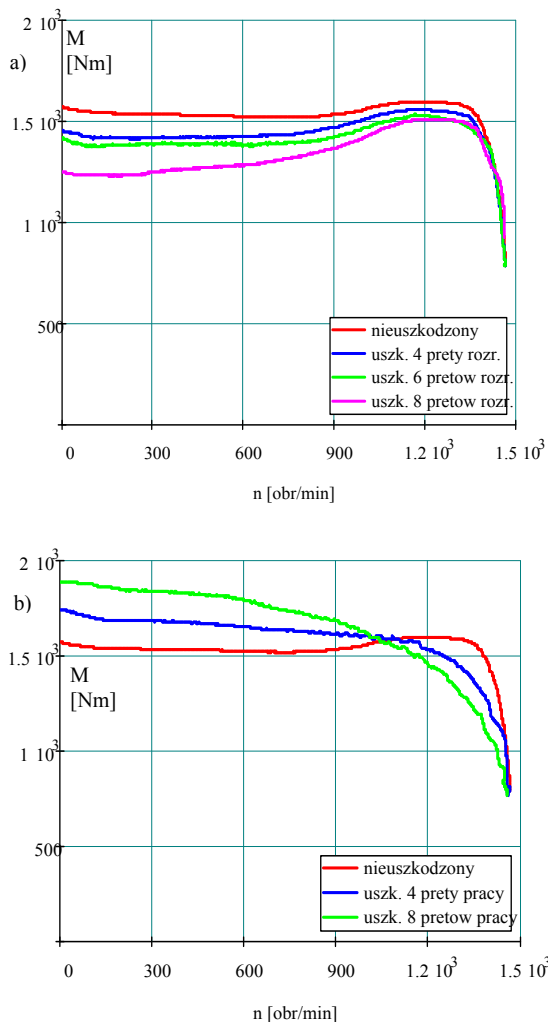


Rys.4. Przebiegi prądów w klatkach wirnika podczas rozruchu silnika z 4 pękniętymi prętami klatki rozruchowej: a) w 1 pręcie klatki pracy, b) w 5 i 6 pręcie klatki rozruchowej wirnika

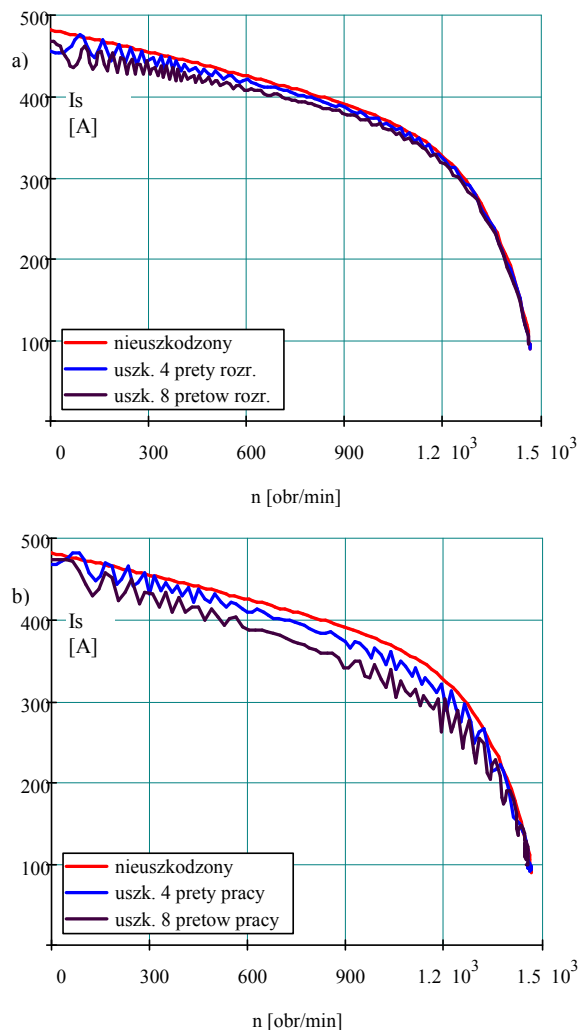


Rys.5. Przebiegi prądów w klatkach wirnika podczas rozruchu silnika z 4 pękniętymi prętami klatki pracy: a) w 1 pręcie klatki rozruchowej, b) w 5 i 6 pręcie klatki pracy wirnika

Z charakterystyk mechanicznych wynika, że pęknięcia prętów w klatce rozruchowej powodują zmniejszenie uśrednionego momentu dla małych prędkości obrotowych, natomiast w mniejszym stopniu ulega zmniejszeniu przeciążalność silnika. Pęknięcie prętów klatki pracy powoduje wzrost momentu w początkowym okresie rozruchu ale równocześnie występuje znaczne zmniejszenie przeciążalności silnika. Pewnym wskaźnikiem uszkodzeń prętów klatki może być obliczona ruchoma wartość skuteczna prądu stojana podczas rozruchu (rys.7). W charakterystyce tego prądu w funkcji prędkości obrotowej widoczne są składowe pulsacyjne, tym większe im prędkość bardziej różni się od połowy prędkości synchronicznej.



Rys. 6. Charakterystyki mechaniczne silnika: a) z uszkodzonymi prętami klatki rozruchowej, b) z uszkodzonymi prętami klatki pracy



Rys. 7. Charakterystyki skutecznej wartości prądu stojana w funkcji prędkości obrotowej: a) z uszkodzonymi prętami klatki rozruchowej, b) z uszkodzonymi prętami klatki pracy

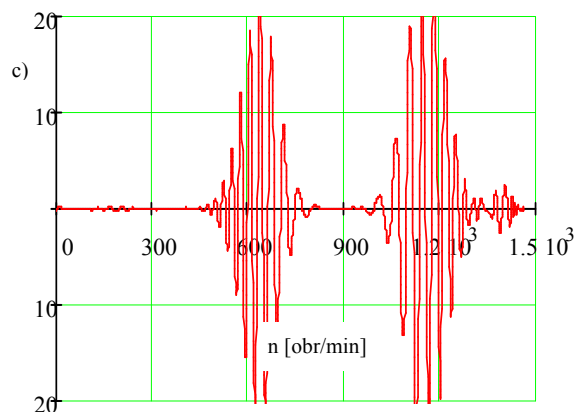
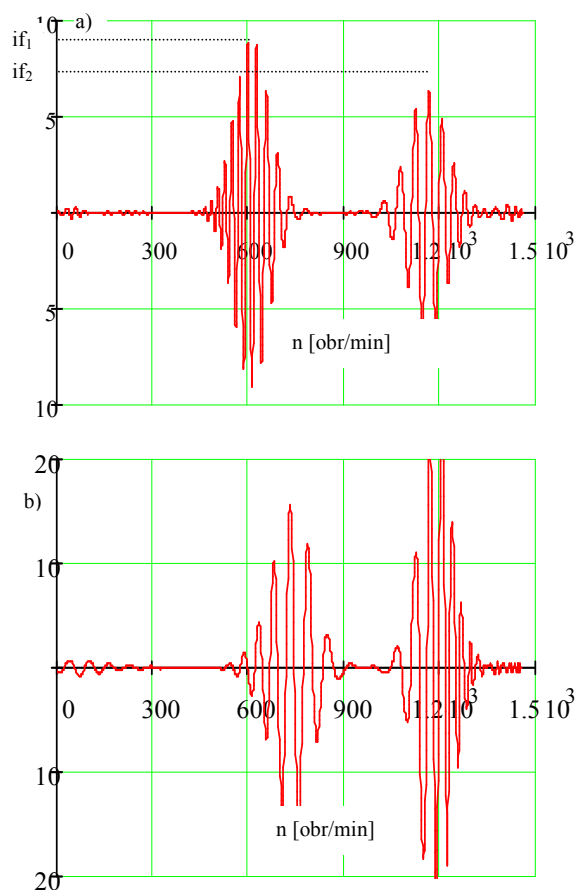
Jako sygnał diagnostyczny najłatwiej dostępny jest pomiar prądu stojana. W widmie prądu stojana przy niesymetrii wirnika pojawiają się składowe o zmiennej częstotliwości f_p zależnej od poślizgu:

$$f_p = (1 \pm 2k s) f_s \quad (1)$$

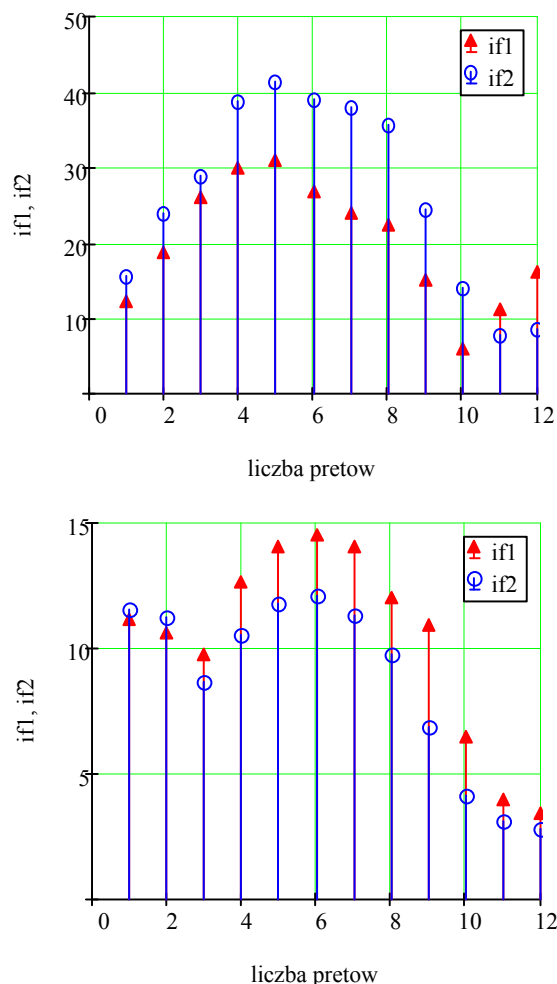
Składowe te, wyodrębnione z przebiegu wypadkowego prądu stojana, mogą być również użyte jako sygnał diagnostyczny. W celu wyodrębnienia składowych pulsacyjnych zastosowano filtr pasmowoprzepustowy z oknem czasowym Hamminga. Uzyskane odfiltrowane sygnały prądów stojana dla różnych przypadków niesymetrii przedstawiono na rys.8. Analizując amplitudy odfiltrowanych przebiegów i_{f_1} oraz i_{f_2} (opis na rys.8a) widać różnice w wartościach maksymalnych tych sygnałów, które pozwalają

na stwierdzenie, czy pęknięty jest pręt klatki pracy, czy też klatki rozruchowej.

Na rys. 9 przedstawiono wartości amplitud odfiltrowanych składowych if_1 oraz if_2 w zależności od liczby uszkodzonych prętów pracy lub prętów rozruchowych w zakresie do 12 uszkodzonych sąsiednich prętów (co stanowi 31,6% wszystkich prętów wirnika). Z wykresów tych wynika, że przy niewielkiej liczbie uszkodzonych prętów wartości amplitud odfiltrowanych składowych rosną wraz ze wzrostem liczby uszkodzonych prętów. Przy dalszym powiększaniu liczby uszkodzonych prętów wartości odfiltrowanych składowych maleją. W przypadku analizowanego silnika maksymalna wartość sygnału odfiltrowanego występuje przy 5 uszkodzonych prętach, co stanowi 13% wszystkich prętów. Wartości amplitud sygnałów odfiltrowanych są większe w przypadku uszkodzeń klatki pracy, niż uszkodzeń klatki rozruchowej.



Rys. 8. Odfiltrowane sygnały prądów stojana w zależności od prędkości obrotowej: a) z uszkodzonymi 8 prętami klatki rozruchowej, b) z uszkodzonymi 8 prętami klatki pracy, c) z uszkodzonymi 4 prętami klatki rozruchowej i 4 prętami klatki pracy



Rys. 9. Wartości amplitud odfiltrowanych składowych prądu stojana w zależności od liczby uszkodzonych prętów: a) klatki pracy, b) klatki rozruchowej

W pracy pokazano przypadki pęknięć prętów sąsiadujących ze sobą i takie przypadki występują w praktyce najczęściej. Jeżeli pęknięcia występują w dowolnych prętach, to sygnały diagnostyczne są o wiele mniejsze i nie można ocenić stopnia uszkodzeń klatek. W niektórych przypadkach niesymetrii w prądzie stojana nie powstają dodatkowe składowe i wtedy wykrycie uszkodzenia jest niemożliwe.

3. Wnioski

- Uszkodzenia prętów wirnika prowadzi do zmiany charakterystyk elektromechanicznych silnika, w różnym stopniu przy uszkodzeniach klatki pracy i klatki rozruchowej.
- Powiększenie liczby uszkodzeń prętów powoduje powiększenie składowej przemiennej momentu elektromagnetycznego.
- Pęknięcia prętów klatki powodują wzrost prądów w sąsiednich prętach, co w praktyce spowoduje wzrost ich temperatury, wzrost naprężeń mechanicznych i kolejne pęknięcia.
- Zastosowanie cyfrowych filtrów pasmowych pozwala na wyodrębnienie dodatkowej składowej prądu stojana, która może być użyta jako sygnał diagnostyczny. Nie daje ona jednak dokładnych informacji o liczbie uszkodzonych prętów.
- W praktyce, wykorzystując w diagnostyce metodę filtracji prądu stojana podczas rozruchu silnika, należy okresowo wykonywać takie pomiary i przez porównanie stwierdzić, czy następuje zmiana składowej dodatkowej prądu stojana.

4. Literatura

- [1]. Da Silva A.M, Povinelli R.J., Demerdash N.A.: *Induction Machine Broken Bar and Stator Short-Circuit Fault Diagnostics Based on Three-Phase Stator Current Envelopes*. IEEE Transactions On Industrial Electronics, Vol. 55, No. 3, March 2008, pp.1310-1318.
- [2]. Dybowski P.: *Diagnostyka silnika indukcyjnego z zastosowaniem sygnału skutecznej wartości ruchomej prądu*. Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne, 2007, Nr 77, str.27-32.
- [3]. Faiz J., Ebrahimi B.-M.: *A New Pattern for Detecting Broken Rotor Bars in Induction Motors*

During Start-Up. IEEE Transactions On Magnetics, Vol. 44, No. 12, December 2008, pp.4673-4683

- [4]. Janik. T., Różycki A.: *Urządzenie diagnostyczne do wykrywania asymetrii elektrycznej klatek silników indukcyjnych*. Przegląd Elektrotechniczny. 1988, z.4, str.106-108.
- [5]. Kowalski Cz., Kanior W.: *Ocena skuteczności analiz FFT, STFT i falkowej w wykrywaniu uszkodzeń wirnika silnika indukcyjnego*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, 2007, Nr 60.
- [6]. Miksiewicz R.: *Analysis of Squirrel Cage Motor with Broken Bars and Rings*. XIX International Symposium on Electric Machinery ISEM 2011, Prague September 2011, pp.69-78.
- [7]. Miksiewicz R.: *Diagnostic of Double Squirrel Cage Motor with Broken Bars*. Proceedings XI. International Conference on Low Voltage Electrical Machines. Brno, Czech Republic. November 2011, pp.113-118.
- [8]. Sanchez M.P., Guasp M.R., Daviu J.A.A., Folch J.R., Cruz J.P., Panadero R.P.: *Instantaneous Frequency of the Left Sideband Harmonic During the Start-Up Transient: A New Method for Diagnosis of Broken Bars*. IEEE Transactions On Industrial Electronics, Vol. 56, No. 11, November 2009, pp. 4557-4570.
- [9]. Xie Y.: *Characteristic Performance Analysis of Squirrel Cage Induction Motor With Broken Bars*. IEEE Transactions On Magnetics, Vol. 45, No. 2, February 2009, pp.759-766.
- [10]. Park J., Kim B., Yang J., Lee S.B., Wiedenbrug E.J., Teska M., Han S.: *Evaluation of the Detectability of Broken Rotor Bars for Double Squirrel Cage Rotor Induction Motors*. Energy Conversion Congress and Exposition ECCE 2010, September 2010, Atlanta USA, pp..2493-2500.

Autor

Dr inż. Roman Miksiewicz
 Politechnika Śląska
 Instytut Elektrotechniki i Informatyki
 Zakład Maszyn Elektrycznych i Inżynierii
 Elektrycznej w Transporcie
 Gliwice, ul. Akademicka 10a, tel.322372844
 e-mail: Roman.Miksiewicz@polsl.pl

Artykuł opracowano w ramach projektu badawczego Narodowego Centrum Nauki nr 6025/B/T02/2011/40.