

Jan Mróz, Ryszard Rut
Politechnika Rzeszowska, Rzeszów

BADANIA LABORATORYJNE STANÓW PRZEJŚCIOWYCH MODELU SILNIKA INDUKCYJNEGO Z USZKODZONYMI PRĘTAMI UZWOJENIA KLATKOWEGO

LABORATORY TESTS OF TRANSIENT STATES OF THE MODEL OF THE INDUCTION MOTOR WITH BROKEN CAGE'S BARS

Abstract: The damages of the induction motor rotor's squirrel-cage winding in most cases accumulate gradually, so it is possible to detect them early and protect the user effectively from the damages' consequences. When the induction motor with an asymmetrical rotor is operating with the constant power output, various negative effects can occur, the most serious of which are the decrease in the efficiency and the increase of the motor's temperature. The issue of the steady state occurring in such cases has been discussed in numerous articles, but the majority of them confine themselves to the simulations based on the mathematical model. One of the main objectives of this paper is to investigate experimentally the operating of the motor with a damaged squirrel-cage winding in the transient states. In this article the results of the laboratory tests of the transient states (start-up, reversion) of the cage motor's model are presented. The special construction of the physical model allows for intentional liquidation of the galvanic connection between the bar and the end ring. During the start-up and reversion the torque of the motor, the current of the stator and the motor speed have been measured. The results of the tests carried out on the model of the rotor with various degrees of damages to the squirrel-cage winding are presented. Moreover, the case in which the located together bars are broken is compared with the situation in which the number of the broken bars is equal, but the damage has the property of being symmetrical, and also when it is random. Finally, the conclusions presenting the possible means of diagnosing such damages are drawn.

1. Wstęp

Uszkodzenia uzwojeń klatkowych wirników silników indukcyjnych pojawiają się w przeważającej liczbie przypadków jako stopniowo narastające i ich wczesne wykrycie może skutecznie uchronić użytkownika przed ich skutkami. Praca ze stałą mocą silnika indukcyjnego z niesymetrycznym wirnikiem wywołuje różne negatywne efekty, z których na plan pierwszy wysuwają się pogorszenie sprawności i wzrost temperatury silnika. Stany ustalone w takich przypadkach są przedmiotem wielu publikacji, ale większość z nich ogranicza się jedynie do symulacji w oparciu o modele matematyczne [1]. W przedłużających się stanach nieustalonych mogą wystąpić naprężenia mechaniczne pochodzenia termicznego stanowiące zagrożenie dla konstrukcji silnika [4]. Eksperymentalne zbadanie zachowania się silnika z uszkodzonym uzwojeniem klatkowym wirnika w stanach nieustalonych będzie jednym z celów niniejszego artykułu. Dodatkowo autorzy badali wpływ konfiguracji uszkodzenia uzwojenia klatkowego na własności silnika oraz możliwości diagnozowania takich przypadków.

2. Opis modelu fizycznego

W celu realizacji omówionych badań został wykonany model fizyczny silnika indukcyjnego klatkowego przedstawiony na rysunku 1.



Rys. 1. Widok modelu silnika klatkowego

W wirniku modelu znajduje się 40 prętów miedzianych o przekroju kołowym i średnicy 8 mm. Pierścienie zwierające o przekroju prostokątnym wykonano również z miedzi. Nagwintowane końce prętów wsunięte są do izolowanych otworów w pierścieniach zwierających. Galwaniczne połączenie pręta z pierścieniem możliwe jest tylko za pośrednictwem na-

krętki mocującej pręt z pierścieniem. Brak nakrętki oznacza przerwany pręt. Na rysunku 2 widać szczegóły sytuacji gdy uszkodzony jest jeden pręt (brak nakrętki)

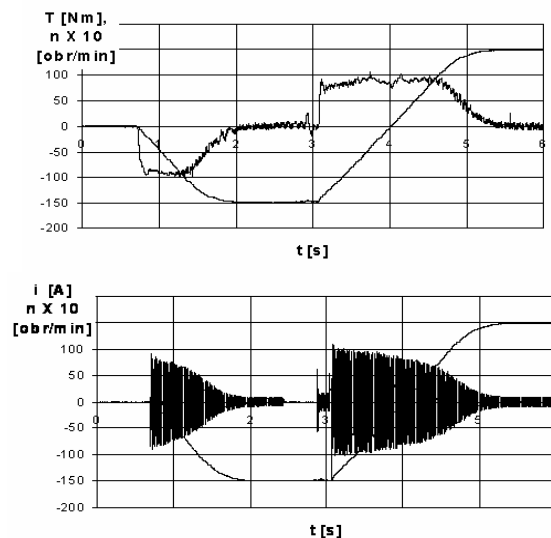


Rys. 2. Zamodelowane uszkodzenie jednego pręta

Model ma w stojanie czterobiegunowe uzwojenie trójfazowe połączone w gwiazdę.

3. Wpływ ilości uszkodzonych prętów uzwojenia klatkowego na pracę silnika w stanach nieustalonych

W celu zbadania wpływu ilości uszkodzonych prętów uzwojenia klatkowego na zachowanie się silnika w stanach nieustalonych przeprowadzono rejestrację prądu, momentu i prędkości silnika w czasie rozruchu i nawrotu. Silnik modelowy był uruchamiany w stanie jałowym z momentem bezwładności $5J_N$. Wymienione wielkości rejestrowano przy pomocy karty wielofunkcyjnej NI6036E z wykorzystaniem pakietu LabView.



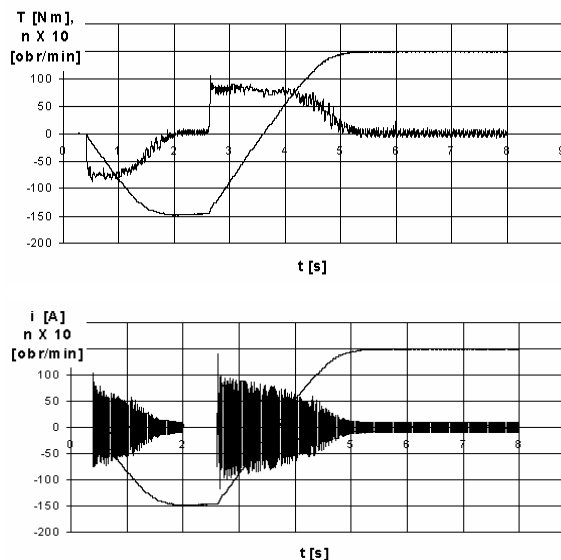
Rys. 3. Przebiegi momentu, prędkości i prądu w czasie rozruchu i nawrotu symetrycznego silnika (przypadek SYM)

Rysunki 3 do 5 obrazują mierzone wielkości dla następujących przypadków uszkodzenia uzwojenia klatkowego:

- uszkodzone 4 pręty leżące obok siebie (przypadek 4P, rys. 4),
- uszkodzonych 8 prętów leżących obok siebie (przypadek 8P, rys. 5).

Na rysunku 3 przedstawiono wyniki pomiarów dla silnika bez uszkodzeń (przypadek SYM).

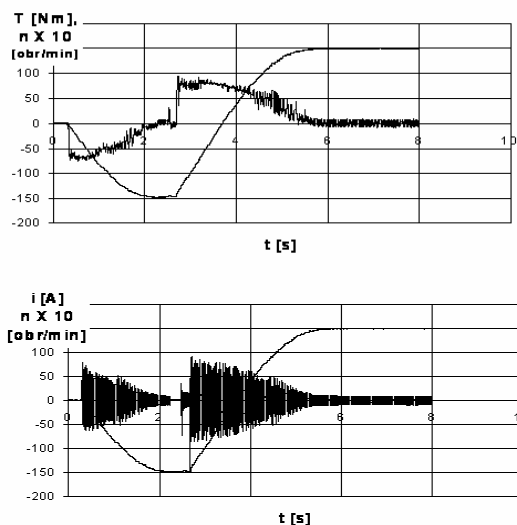
Z rysunków 3, 4 i 5 wynika, że w silniku z uszkodzonymi prętami zarówno rozruch jak i nawrót trwają znacznie dłużej (nawet o kilkadziesiąt procent) niż dla symetrycznego silnika. Szczegółowe wyniki liczbowe przedstawia Tabela 1 (liczby w nawiasach podają procentowe wydłużenie odpowiednich czasów w stosunku do silnika symetrycznego).



Rys. 4. Przebiegi momentu, prędkości i prądu w czasie rozruchu i nawrotu silnika z uszkodzonymi 4 prętami leżącymi obok siebie (przypadek 4P)

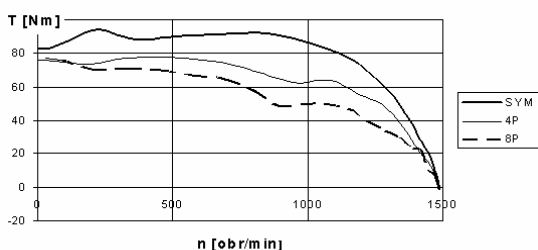
Tabela 1. Wartość czasów trwania stanów nieustalonych dla różnych uszkodzeń uzwojenia klatkowego

Silnik	Czas rozruchu [s], (Wydłużenie czasu rozruchu [%])	Czas nawrotu [s], (Wydłużenie czasu nawrotu [%])
SYM	1,47	2,35
4P	2,00 (36)	2,92 (24,2)
8P	2,10 (43)	3,38 (43,8)
4NS	1,61 (9,5)	2,53 (7,6)



Rys. 5. Przebiegi momentu, prędkości i prądu w czasie rozruchu i nawrotu silnika z uszkodzonymi 8 prętami leżącymi obok siebie (przypadek 8P)

To zjawisko jest spowodowane znacznymi zmianami wartości momentu elektro-magnetycznego silnika, wywołanymi niesymetrią uszkodzonego uzwojenia klatkowego. Ilustruje to rysunek 6, na którym przedstawiono przebiegi uśrednione momentu w funkcji prędkości dla silnika symetrycznego oraz przy uszkodzeniu 4 i 8 prętów leżących obok siebie. Na rysunku 6 zwraca uwagę fakt, że wartość początkowego momentu rozruchowego praktycznie nie zależy od wielkości uszkodzenia (w zakresie badanych uszkodzeń). Jest to zapewne związane z pojawieniem się prądów poprzecznych płynących w pakiecie blach wirnika. O ich istotnej obecności świadczy fakt zaobserwowania znacznego iskrzenia w strefie wyjścia prętów z pakietu, w czasie nawrotu silnika z uszkodzonymi prętami (rys. 7)



Rys. 6. Średni moment silnika w funkcji prędkości dla różnej ilości uszkodzonych, leżących obok siebie prętów



Rys. 7. Iskrzenie w strefie wyjścia prętów z pakietu

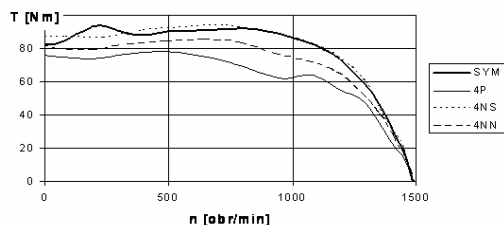
4. Wpływ konfiguracji uszkodzenia prętów na pracę silnika w stanach nieustalonych

Uszkodzenie pręta uzwojenia klatkowego sprawia, że pręty sąsiednie obciążają się bardziej niż w stanie symetrii [2], i są teraz bardziej narażone na przegrzanie. Uszkodzenie klatki rozwija się więc lokalnie powodując przerwania sąsiednich prętów. W przypadku silników zalanych taki mechanizm nie musi obowiązywać, gdyż obecność pęcherzy powietrznych w odlanych prętach jest zupełnie przypadkowa. Autorom znany jest przypadek uszkodzenia prętowanego uzwojenia klatkowego silnika średniej mocy, które miało cechy symetrii biegunowej. W celu zbadania wpływu konfiguracji uszkodzenia na pracę silnika wykonano badania silnika, w którym uszkodzenie klatki polega na przerwaniu 10 % ogólnej ilości prętów. Zbadano 3 warianty takiego uszkodzenia:

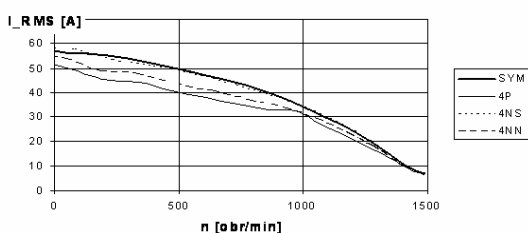
- uszkodzenie 4 prętów leżących obok siebie - przypadek 4P (uszkodzone pręty: 1, 2, 3, 4),
- uszkodzenie 4 prętów leżących pod sąsiednimi biegunami – przypadek 4NS (uszkodzone pręty: 1, 11, 21, 31, czyli po jednym pręcie pod każdym biegunem),
- uszkodzenie 4 prętów leżących pod jednoimiennymi biegunami – przypadek 4NN (uszkodzone pręty: 1, 2, 21, 22, czyli po dwa pręty pod jednoimiennymi biegunami).

Rysunek 8 przedstawia przebiegi uśrednione momentu w funkcji prędkości dla silnika symetrycznego oraz przy uszkodzeniu 4 prętów dla wymienionych konfiguracji uszkodzenia, a rysunek 9 odpowiadający im przebieg skutecznej wartości prądu stojana. Z obu rysunków wynika, że największe deformacje przedstawionych charakterystyk mają miejsce przy uszkodzeniu 4 sąsiednich prętów (przypadek

4P). Najmniejsza deformacja dotyczy przypadku uszkodzenia 4 prętów umieszczonych pod kolejnymi biegunami maszyny (przypadek 4NS).

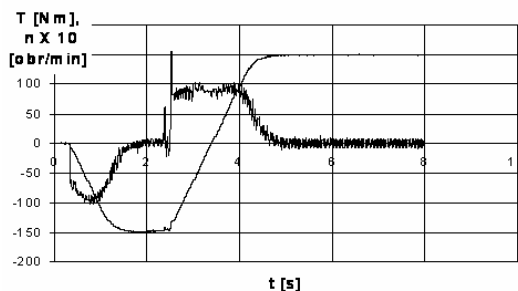


Rys. 8. Średni moment silnika w funkcji prędkości dla różnych konfiguracji uszkodzenia 4 prętów



Rys. 9. Skuteczna wartość prądu silnika w funkcji prędkości dla różnych konfiguracji uszkodzenia 4 prętów

Dla tego przypadku na rysunku 10 przedstawiono przebiegi momentu, prędkości i prądu silnika w czasie rozruchu i nawrotu. Czasy rozruchu i nawrotu dla tego przypadku różnią się tylko o kilka procent od czasów dla silnika symetrycznego (Tabela 1.). Uszkodzenie 10 % ogólnej ilości prętów, ale posiadające specyficzną symetrię nie daje istotnych objawów w stanach przejściowych, podczas gdy uszkodzenie 10 % ogólnej ilości prętów, ale występujące lokalnie (pręty obok siebie) jest w tych stanach istotnie odczuwalne i objawia się kilkudziesięcioprocentowym wzrostem czasu rozruchu i nawrotu.



Rys. 10. Przebiegi momentu i prędkości w czasie rozruchu i nawrotu silnika z uszkodzonymi 4 prętami leżącymi pod sąsiednimi biegunami (przypadek 4NS)

5. Badania diagnostyczne

Powyższe wyniki wskazują, że dla użytkownika silnika nie tyle istotna jest procentowa liczba uszkodzonych prętów ile towarzyszący jej stopień desymetryzacji uzwojenia i na tym powinno polegać diagnozowanie stanu uzwojenia klatkowego.

Wykorzystując metodę wartości skutecznej ruchomej $\sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T}^t i^2(\tau) d\tau}$ obliczonej z czasowego

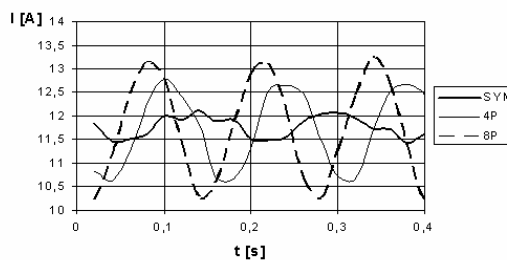
przebiegu ustalonego prądu obciążenia o okresie T , zostało przeprowadzone badanie silnika modelowego z uszkodzonymi prętami dla przypadków:

- uszkodzone 4 pręty leżące obok siebie (przypadek 4P),
- uszkodzonych 8 prętów leżących obok siebie (przypadek 8P).

We wszystkich przypadkach silnik pracował ze stałym prądem obciążenia.

Wyniki tego badania ilustruje rysunek 11.

Widać, że ze wzrostem ilości uszkodzonych prętów rośnie wartość sygnału diagnostycznego, a to dla użytkownika oznacza, że silnik staje się coraz bardziej niesymetryczny. Oznacza to w stanach nieustalonych wydłużenie czasów trwania stanów przejściowych, a w stanie ustalonym przy stałej mocy obciążenia pracę z powiększonym poślizgiem, prądem silnika, z obecnością składowej przeciwbieżnej pola, co prowadzi do podwyższenia temperatury silnika i zmniejszenia sprawności.

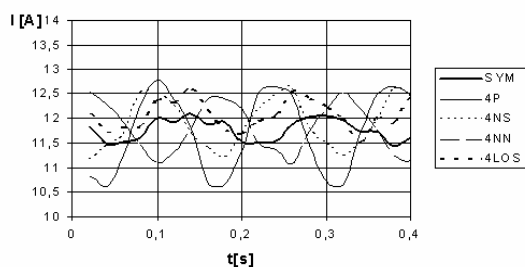


Rys. 11. Wynik diagnozowania metodą wartości skutecznej ruchomej dla przypadku rosnącej ilości uszkodzonych prętów

Wpływ konfiguracji uszkodzenia na wartość sygnału diagnostycznego w tej metodzie zbadał dla następujących przypadków uszkodzenia 4 prętów silnika (10 % ogólnej ilości):

- uszkodzenie 4 prętów leżących obok siebie (przypadek 4P),

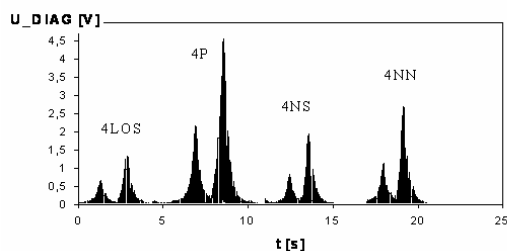
- uszkodzenie 4 prętów leżących pod sąsiednimi biegunami (przypadek 4NS),
 - uszkodzenie 4 prętów leżących pod jednolitymi biegunami (przypadek 4NN),
 - losowe uszkodzenie 4 prętów (przypadek 4LOS: uszkodzone pręty: 1, 39, 35, 14).
- Wyniki powyżej opisanego badania przedstawia rysunek 12.



Rys. 12. Wynik diagnozowania metodą wartości skutecznej ruchomej dla przypadku różnej konfiguracji 4 uszkodzonych prętów

Tutaj również użytkownik uzyskuje informację, że w przypadku 4P stopień desymetryzacji silnika jest największy i praca silnika najbardziej odbiega od normalnej. Jednak rozróżnienie pomiędzy przypadkami 4NS, 4 NN i 4 LOS nie jest już tak oczywiste.

Inna metoda diagnozowania stanu klatki, oparta na pomiarze składowej prądu wirnika o częstotliwości $f_1(1-2s)$, zastosowana w czasie rozruchu modelu silnika [3], dała w omawianych przypadkach uszkodzeń, wyniki przedstawione na rysunku 13.



Rys.13. Informacja diagnostyczna dla różnej konfiguracji uszkodzonych 4 prętów

Powyższe wyniki wskazują, że podobnie jak przy zastosowaniu poprzedniej metody, najbardziej niekorzystnym przypadkiem jest uszkodzenie prętów leżących obok siebie. W odróżnieniu jednak od poprzedniej metody wyraźnie można określić, że przypadek 4NN bardziej desymetryzuje silnik niż przypadek 4NS, co potwierdzają zniekształcenia momentu przedstawione na rysunku 6.

6. Wnioski

Na podstawie przedstawionych wyników badań można stwierdzić, że uszkodzenie uzwojenia klatkowego w sposób znaczący wpływa na zachowanie się silnika w stanach przejściowych i na ogół objawia się zmniejszeniem dynamiki silnika. Ilościowe skutki uszkodzenia określonej ilości prętów uzwojenia klatkowego zależą od konfiguracji uszkodzenia. Najbardziej niekorzystny przypadek ma miejsce, gdy uszkodzone pręty leżą obok siebie. Wpływ na efekty pracy silnika z uszkodzonymi prętami mają prądy poprzeczne. Wybór metody diagnozowania stanu uzwojenia klatkowego dla użytkownika silnika jest w zasadzie ograniczony jedynie możliwościami technicznymi i finansowymi, gdyż wszystkie znane metody dają informację o istnieniu niesymetrii. uzwojenia oraz przy systematycznym stosowaniu, pozwalają na śledzenie jego trendu, co jest podstawą prawidłowej diagnozy.

7. Literatura

- [1]. Drozdowski P, Weinreb K.: *Metody matematyczne diagnozowania silników indukcyjnych*. Wiadomości Elektrotechniczne nr 12, 1996, s. 522-525
- [2]. Fiser R., Ferkolj S.: *Determination of severity and location of induction motor rotor cage faults with finite element method*. ISEF99- 9 International Symposium on Electromagnetic Fields in Electrical Engineering, Pavia, Italy, September 23-25, 1999, s. 177-180
- [3]. Glinka T.: *Badania diagnostyczne maszyn elektrycznych w przemyśle*. Katowice 1998, wyd. BOBRME Komel
- [4]. Mróz J., Rut R.: *Skutki mechaniczne niesymetrycznego przejmowania ciepła z uzwojeń klatkowych wirników silników indukcyjnych*. Przegląd Elektrotechniczny nr 10, 1997, s. 261-265

Autorzy

dr hab. inż. Ryszard Rut prof. PRZ
 rrut@prz.rzeszow.pl
 dr inż. Jan Mróz
 jamroz@prz.rzeszow.pl

Politechnika Rzeszowska
 Wydział Elektrotechniki i Informatyki
 Katedra Elektrodynamiki
 i Układów Elektromaszynowych