

SYMULACYJNE BADANIE PROCESU USZKADZANIA KLATKI WIRNIKA SILNIKA INDUKCYJNEGO PODCZAS JEGO ROZRUCHU**

STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono wyniki polowo-obwodowej symulacji takiego rozruchu silnika indukcyjnego obciążonego stałym momentem znamionowym, podczas którego pękają kolejne pręty klatki wirnika. Badania wykonano przy użyciu zweryfikowanego pomiarowo modelu silnika małej mocy (1,5 kW). W obliczeniach założono, że w czasie trwającego 0,6 s rozruchu pękają kolejne, sąsiadujące ze sobą, pręty wirnika. Pierwszy z nich pęka po czasie 0,1 s od rozpoczęcia rozruchu. W wyniku tego uszkodzenia wzrastają prądy w sąsiednich prętach klatki, co może być przyczyną pęknięcia następnego pręta. Taki założony przebieg zjawiska zamodelowano, przyjmując czasy wyłączenia kolejnych sześciu prętów. W wyniku obliczeń wyznaczono zmiany rozkładu pola magnetycznego i następnie czasowe charakterystyki momentu, prędkości obrotowej, prądów fazowych stojana oraz prądów prętów klatki wirnika.

Słowa kluczowe: silnik indukcyjny, symulacja polowo-obwodowa, uszkodzenie prętów klatki wirnika

SIMULATION TESTING OF DAMAGE PROCESS IN INDUCTION MOTOR ROTOR CAGE DURING MOTOR START-UP

The work presents field-circuit simulation results of squirrel cage, induction motor start-up with constant nominal load. During the start-up consecutive rotor bars are cracking. Computations were realized in the field-circuit model (Fig. 1) of small power (1.5 kW) squirrel cage induction motor, verified by measurements. In computation assumed that during the simulation (0.6 s) consecutive neighboring rotor bars are cracking. The first of them is cracking 0.1 s after start-up. As a result of this failure, currents of the neighboring rotor bars are increasing, which could be a reason of following rotor bar cracks. Assumed course of phenomenon was modeled for next 6 rotor bars that are disconnected in assumed times. Variations of magnetic field distribution (Fig. 2) and transient characteristics of electromagnetic torque (Fig. 3), rotational speed (Fig. 4), stator currents (Fig. 5) and rotor bars currents (Fig. 6) were realized computationally.

Keywords: induction motor, field-circuit simulation, broken rotor bars

1. WSTĘP

Oslabiona w wyniku długotrwałej eksploatacji i akcyden- talnych przeciążeń klatka wirnika silnika indukcyjnego może ulec awarii w czasie bezpośredniego rozruchu silnika. Zdarzenia takie są odnotowywane podczas eksploatacji sil- ników klatkowych. Polowo-obwodowa symulacja pracy silnika indukcyjnego umożliwia badanie dowolnych stan- ów jego pracy. Możliwe jest więc również zamodelowanie takiego rozruchu silnika, obciążonego stałym momentem znamionowym, podczas którego pękają kolejne pręty klatki wirnika. Badania takie wykonano przy użyciu zweryfiko- wanego pomiarowo modelu silnika typu Sh-90L4 o mocy znamionowej 1,5 kW. Weryfikacja pomiarowa obejmowała zarówno charakterystyki statyczne (bieg jałowy, stan za- blokowanego wirnika, obciążenie), jak i dynamiczne (roz- ruch bez obciążenia i rozruch ze stałym momentem obcią- żenia) [1, 2]. Zgodność charakterystyk symulowanych i pomiarowych uzyskano, korygując odpowiednio charak- terystykę magnesowania, rezystywność aluminiowej klatki wirnika i parametry części czołowych stojana i wirnika. W obliczeniach symulacyjnych awaryjnego rozruchu zało- żono, że w czasie trwającego 0,6 s rozruchu pękają kolejne, sąsiadujące ze sobą, pręty wirnika. Pierwszy z nich pęka po czasie 0,1 s od rozpoczęcia rozruchu. W wyniku tego

uszkodzenia wzrastają prądy, przede wszystkim w sąsied- nych prętach klatki, co może spowodować pęknięcie kolej- nego pręta. Taki założony przebieg zjawiska zamodelowa- no, przyjmując czasy odłączenia kolejnych sześciu prętów. Wyłączenie prętów symulowane jest za pomocą sterowa- nych czasowo wyłączników wbudowanych w obwody prę- tów klatki wirnika. W wyniku obliczeń procesów przejści- owych wyznaczono zmiany rozkładu pola magnetycznego, a następnie przebiegi czasowe momentu, prędkości obroto- wej, prądów fazowych stojana, i prądów prętów klatki wir- nika podczas rozruchu.

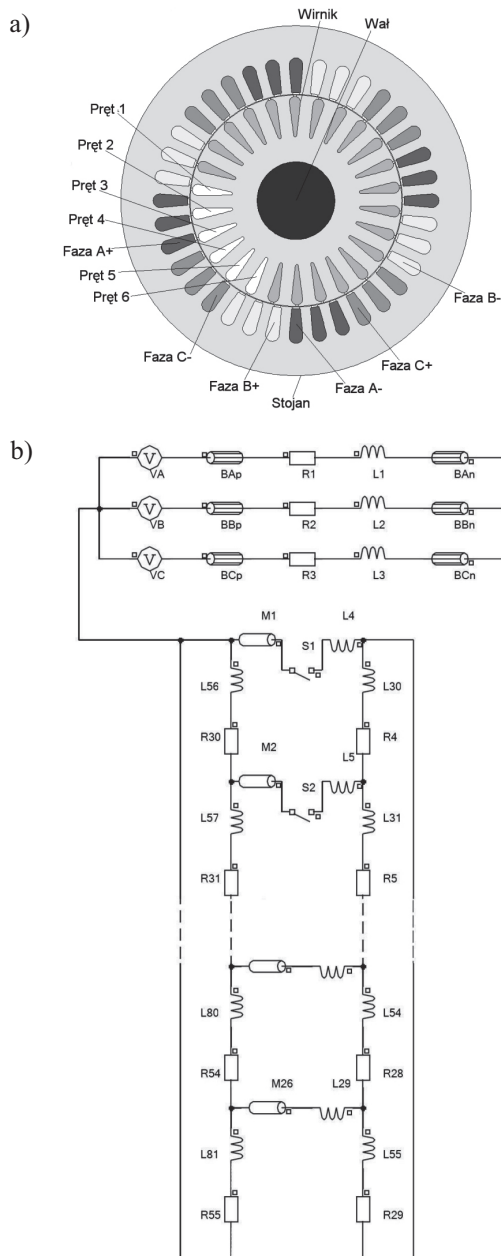
2. POLOWO-OBWODOWY MODEL SILNIKA

W zbudowanym za pomocą pakietu Flux2D [4] i użytym do obliczeń dwuwymiarowym modelu polowo-obwodowym (rys. 1), szczegółowo opisanym w [3], jego część obwodowa zawiera symetryczny układ napięć trójfazowych, uzwojenia fazowe stojana o zmiennej indukcyjności i stałej rezystancji, jak również stałych rezystancji i indukcyjności jego połą- czeń czołowych oraz klatkę wirnika o zmiennych parame- trach prętów i stałych wartościach rezystancji i indukcyjno- ści pierścienia zwierającego. W klatce wirnika uwzględnio- no indukcyjności odpowiadające reaktancji rozproszenia wywołanego skosem prętów wirnika (L4 do L29 na rys. 1).

* Politechnika Wroclawska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych

** Artykuł uzyskał pozytywne recenzje i był prezentowany podczas Międzynarodowego Sympozjum Maszyn Elektrycznych SME 2006 w Krakowie

Dodatkowo wprowadzono do części obwodowej modelu wyłączniki (S1 do S6 – na rys. 1 widoczne są pierwsze dwa wyłączniki), za pomocą których modelowano pęknięcie kolejnych prętów wirnika (zaznaczonych na rys. 1a) w czasie rozruchu maszyny. Model połowy uwzględnia częstotliwość i wartość napięcia zasilającego, nieliniowość elementów obwodu magnetycznego oraz ruch obrotowy wirnika.



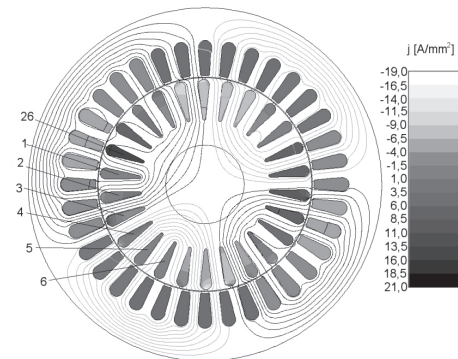
Rys. 1. Model połowo-obwodowy indukcyjnego silnika klatkowego: a) część polowa modelu; b) część obwodowa modelu

Fig. 1. Field-circuit model of squirrel-cage induction motor: a) field part of model; b) circuit part of model

3. WYNIKI OBLICZEŃ

Obliczenia procesu rozruchu bezpośredniego silnika obciążonego stałym momentem znamionowym wykonano zarówno dla rozruchu awaryjnego, jak i rozruchu bez awarii. Czasowy krok obliczeń wynosił 0,1 ms. Obraz rozkładu chwilowych wartości gęstości prądu w uzwojeniach silnika

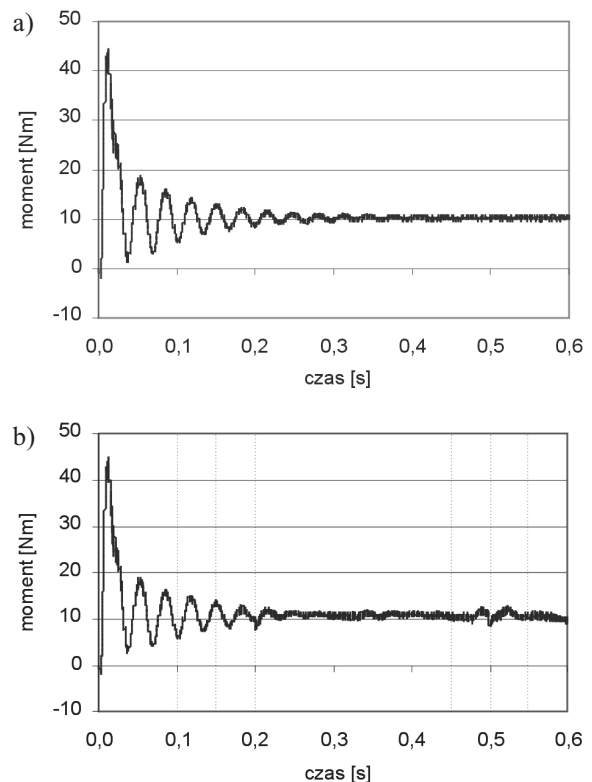
i deformacje linii pola magnetycznego po pęknięciu szóstego pręta ($t = 0,6$ s) przedstawiono na rysunku 2. Gęstość prądu w pręcie 26., sąsiadującym z prętami pękniętymi, przekracza 20 A/mm^2 .



Rys. 2. Chwilowe wartości gęstości prądu w uzwojeniach silnika i deformacje linii pola magnetycznego po pęknięciu szóstego pręta ($t = 0,6$ s)

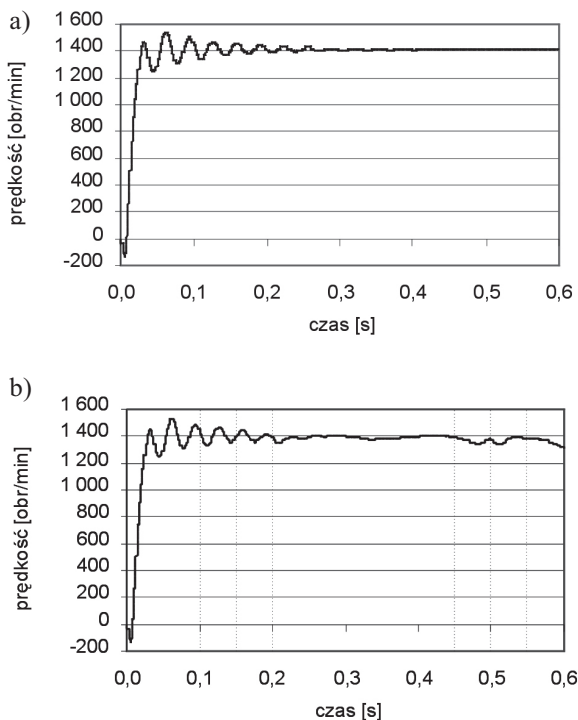
Fig. 2. Actual value of current density in motor windings and magnetic field distortions

Wyniki obliczeń momentu, prędkości oraz prądów stojana i wirnika dla obu przypadków zestawiono na rysunkach 3–6. Trzy pierwsze pręty pękają po czasie 0,1; 0,15; 0,2 s. Przez następne 0,25 s moment i prądy ustalają się na wartościach znamionowych.



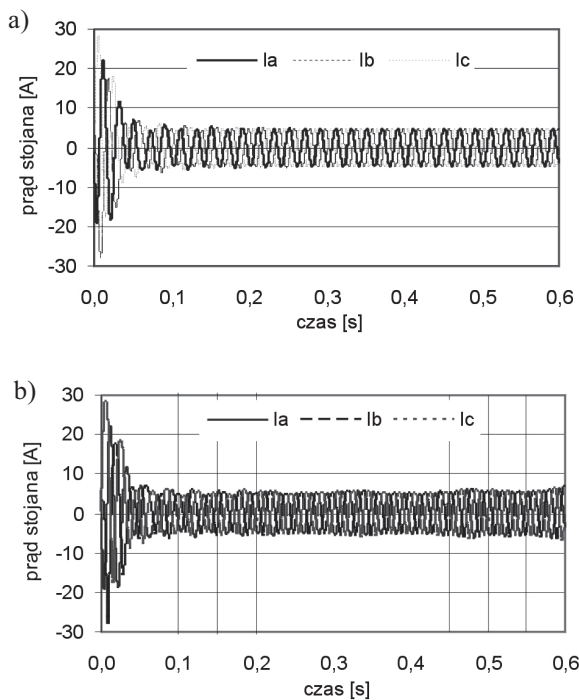
Rys. 3. Przebiegi czasowe momentu elektromagnetycznego silnika indukcyjnego: a) rozruch bez awarii; b) awaria w trakcie rozruchu

Fig. 3. Electromagnetic torque of induction motor: a) start-up without failure; b) start-up with failure



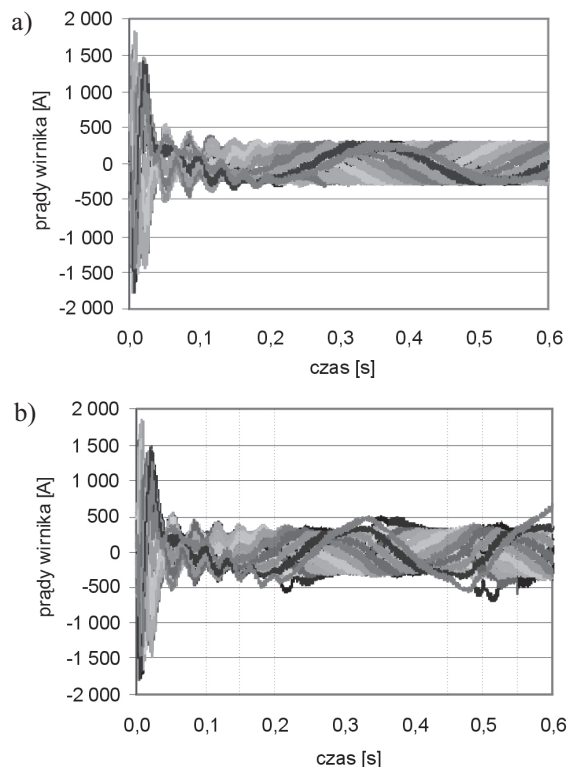
Rys. 4. Przebiegi czasowe prędkości obrotowej silnika indukcyjnego: a) rozruch bez awarii; b) awaria w trakcie rozruchu

Fig. 4. Rotational speed of induction motor: a) start-up without failure; b) start-up with failure



Rys. 5. Przebiegi czasowe prądów stojana silnika indukcyjnego: a) rozruch bez awarii; b) awaria w trakcie rozruchu

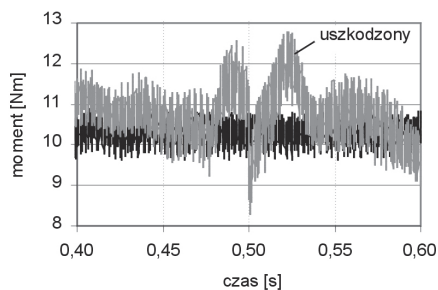
Fig. 5. Stator currents of induction motor: a) start-up without failure; b) start-up with failure



Rys. 6. Przebiegi czasowe prądów wirnika silnika indukcyjnego: a) rozruch bez awarii; b) awaria w trakcie rozruchu

Fig. 6. Rotor currents of induction motor: a) start-up without failure; b) start-up with failure

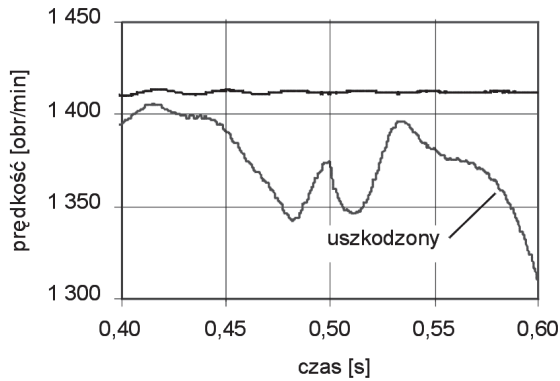
Po czasie 0,45 s od rozpoczęcia rozruchu, w odstępach co 0,05 s pękają trzy kolejne pręty. Taką możliwość sugeruje znaczny wzrost wartości prądów w prętach wirnika sąsiadujących z prętami wcześniej uszkodzonymi.



Rys. 7. Przebiegi czasowe momentu elektromagnetycznego silników nieuszkodzonego i uszkodzonego (pęknięcie prętów 4, 5 i 6)

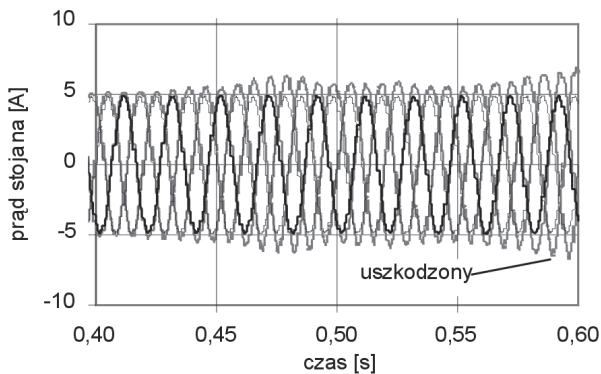
Fig. 7. Electromagnetic torque of undamaged and damaged motors (cracking of bars No. 4, 5, 6)

Po pęknięciu sześciu prętów rosną pulsacje momentu (rys. 7), prędkość maleje, a jej pulsacje sięgają 7% prędkości znamionowej (rys. 8). Ponadto bardzo wyraźne są już charakterystyczne dla uszkodzenia klatki pulsacje prądów stojana (rys. 9). Odształcone i większe są też prądy prętów wirnika. Prąd w pręcie sąsiadującym z prętami uszkodzonymi osiąga wartość ponad dwukrotnie większą niż w maszynie nieuszkodzonej (rys. 10).



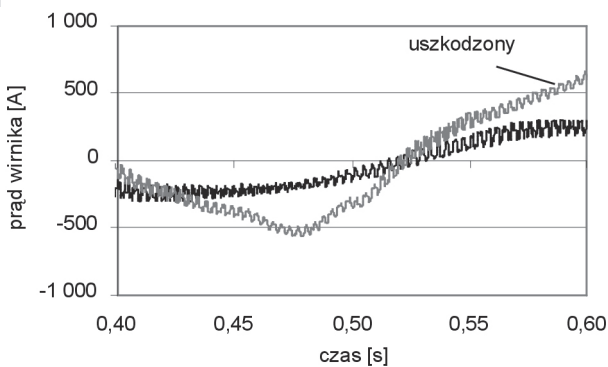
Rys. 8. Przebiegi czasowe prędkości obrotowej silników nieuszkodzonego i uszkodzonego (pęknięcie prętów 4, 5, 6)

Fig. 8. Rotational speed of undamaged and damaged motors (cracking of bars No. 4, 5, 6)



Rys. 9. Przebiegi czasowe prądów stojana silników nieuszkodzonego i uszkodzonego (pęknięcie prętów 4, 5 i 6)

Fig. 9. Stator currents of undamaged and damaged motors (cracking of bars No. 4, 5, 6)



Rys. 10. Prąd w pręcie 26. bezpośrednio sąsiadującym z prętami pękniętymi silnika nieuszkodzonego i uszkodzonego

Fig. 10. Current of the rotor bar no. 26 of undamaged and damaged motors

4. WNIOSKI

Rozruch silnika indukcyjnego, podczas którego dochodzi do pęknięcia pręta klatki wirnika, stwarza warunki do uszkodzenia kolejnych prętów. Pojawiają się znaczne pulsacje momentu, prędkości i prądów twornika, ale przede wszystkim wzrasta wartość (nawet dwukrotnie) prądów w prętach wirnika sąsiadujących z prętami uszkodzonymi. Uzyskane wyniki symulacji pozwalają przypuszczać, że założony przebieg uszkodzenia jest prawdopodobny.

Literatura

- [1] Antal L., Antal M.: *Weryfikacja eksperymentalna obwodowo-polowego modelu silnika indukcyjnego*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 54, Studia i Mat., Nr 23, Wrocław 2003, 39–48
- [2] Antal L., Antal M., Zawilak J.: *Weryfikacja modelu obliczeniowego silnika klatkowego pomiarami statycznych i dynamicznych stanów pracy*. Problemy eksploatacji maszyn i napędów elektrycznych. PEMINE. Ustroń, 19–21 maja 2004, Zeszyty Problemowe BOBRME Komel, nr 69, 2004, 99–104
- [3] Zawilak J., Antal M.: *Obwodowo-polowy model silnika indukcyjnego klatkowego z uszkodzonym prętym wirnika*. 39th International Symposium on Electrical Machines SME 2003. Conference proceedings, Gdańsk-Jurata, June 9–11, 2003, P103, 6 s
- [4] CEDRAT, FLUX® 9.20 *User's guide*, November 2005

Wpłynęło: 26.09.2006



Maciej ANTAL

Maciej Antal ukończył studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Wrocławskiej w roku 2002, uzyskując stopień magistra. Obecnie kończy studia doktoranckie w Instytucie Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. Pracował w zespole realizującym projekt badawczy *Opracowanie metody projektowania dwubiegowych silników synchronicznych do ekonomicznych napędów głównych wentylatorów kopalnianych*. Za udział w tej pracy uzyskał zespołową nagrodę Prezesa Rady Ministrów RP. Aktualnie zajmuje się polowo-obwodowym modelowaniem uszkodzonych silników indukcyjnych będących przedmiotem jego rozprawy doktorskiej. Autor lub współautor czternastu publikacji.

e-mail: maciej.antal@pwr.wroc.pl



Jan ZAWILAK

Jan Zawilak stopnie magistra, doktora, doktora habilitowanego, stanowisko docenta i profesora uzyskał odpowiednio w latach 1973, 1977, 1987, 1989 i 1991 na Wydziale Elektrycznym Politechniki Wrocławskiej. W latach 1967–68 praco-

wał również w DZWME DolMel we Wrocławiu na stanowisku konstruktora. Od roku 1973 jest pracownikiem Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. Głównym nurtem jego pracy jest projektowanie i badanie wielobiegowych maszyn prądu przemiennego o przełączalnych uzwojeniach i zmienianych liczbach biegunów pola magnetycznego. Dwubiegowe sil-

niki synchroniczne dużej mocy stanowiące oryginalną konstrukcję, zostały wdrożone do eksploatacji w kopalniach węgla i miedzi jako ekonomiczny napęd wentylatorów głównego przewietrzania, a rozwiązanie to zostało nagrodzone przez Prezesa Rady Ministrów RP.

e-mail: jan.zawilak@pwr.wroc.pl