

Paweł Dybowski  
AGH, Kraków

## WPŁYW POZIOMU USZKODZENIA PRĘTA KLATKI WIRNIKA SILNIKA INDUKCYJNEGO NA JEGO REZYSTANCJĘ

### INFLUENCE OF BAR DAMAGE LEVEL ON BAR RESISTANCE OF INDUCTION MACHINE SQUIRREL-CAGE

**Abstract:** In calculations of failure state of induction machines damage of squirrel-cage is simulated by magnify of resistance bars or ring segments. In this paper I'm going to answer a questions: in which way resistance of bar or ring segment is changing with level of failure? What level of resistance can I use as damage of bar? Have a precision of production of squirrel-cage an effect on resistance of bars? To answer these questions I made some simulations of this problem.

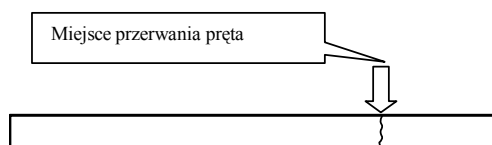
#### 1. Wstęp

W diagnostyce maszyn indukcyjnych bardzo często mówi się o uszkodzeniu klatki wirnika, czyli o naderwaniu lub przerwaniu pręta klatki wirnika bądź o przerwaniu segmentu pierścienia zwierającego klatkę. W obliczeniach symulacyjnych takich stanów awaryjnych stosuje się metodę powiększania rezystancji pręta bądź segmentu pierścienia zwierającego klatki. Powstaje zatem pytanie: jaka wartość rezystancji pręta lub segmentu pierścienia odpowiada jego uszkodzeniu? Jaka krotność rezystancji pręta przyjmować zatem w obliczeniach jako jego uszkodzenie? Chcąc w sposób precyzyjny odpowiedzieć na to często pojawiające się pytanie, postanowiono wykonać kilka obliczeń symulacyjnych takiego uszkodzenia.

#### 2. Model uszkodzenia

Do obliczeń symulacyjnych przyjęto model rezystancyjny pręta klatki wirnika o następujących parametrach:

- długość:  $l=0,1\text{m}$
- przekrój:  $S=10\text{ mm}^2 = 0,00001\text{ m}^2$
- grubość przerwy pręta:  $l_p=0,0001\text{m}=0,1\text{mm}$
- przewodność właściwa Cu:  $\sigma=59,6*10^6\text{ S/m}$



Rys. 1. Sposób uszkodzenia pręta klatki wirnika.

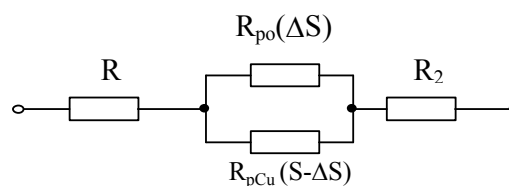
Dla dokładnego modelu rezystancyjnego przyjęto:

$R_1$  – rezystancja fragmentu pręta o długości  $0,0899\text{m}$ ;

$R_2$  – rezystancja fragmentu pręta o długości  $0,01\text{m}$ ;

$R_{po}$  – rezystancja przerwy pręta o długości  $0,0001\text{m}$ ;

$R_{pCu}$  – rezystancja fragmentu pręta o długości  $0,0001\text{m}$ .

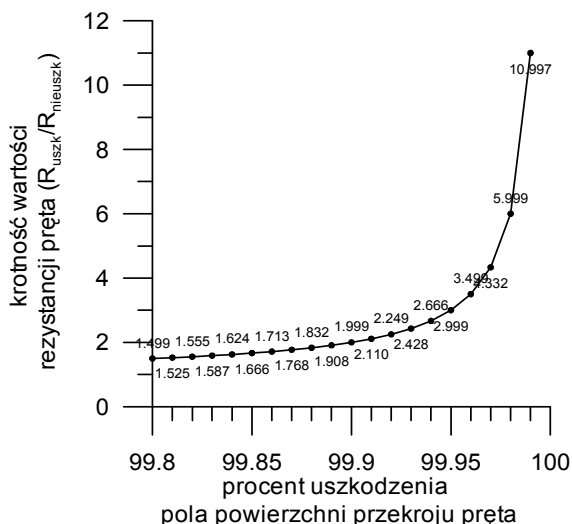


Rys. 2. Model rezystancyjny dokładny uszkodzenia pręta.

Wyniki obliczeń dla dokładnego modelu rezystancyjnego przedstawiono poniżej:

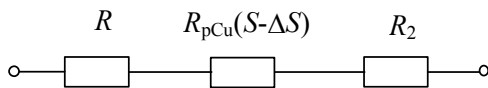


Rys. 3. Wykres zależności rezystancji pręta od stopnia jego uszkodzenia dla modelu rezystancyjnego dokładnego.



Rys.4. Wykres zależności rezystancji pręta od stopnia jego uszkodzenia dla modelu rezystancyjnego dokładnego (powiększenie dla uszkodzeń powyżej 99.8%).

Do obliczeń wykorzystano również uproszczony model rezystancyjny:

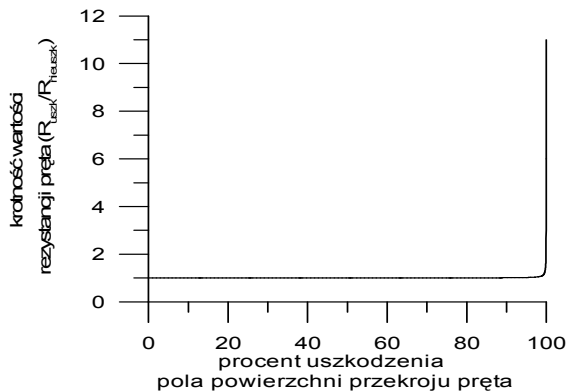


Rys.5. Model rezystancyjny uproszczony uszkodzenia pręta.

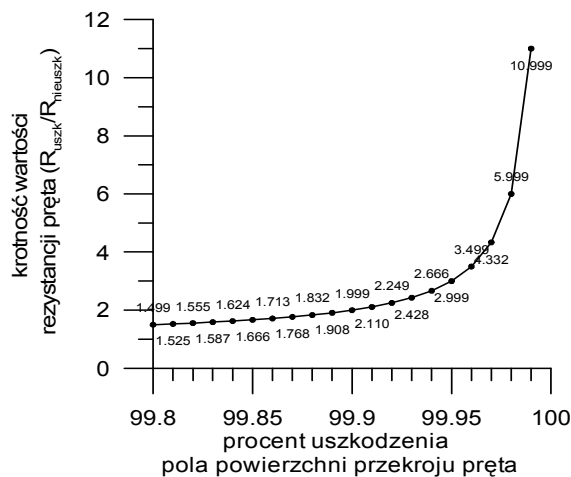
Dla uproszczonego modelu rezystancyjnego przyjęto:

- $R_1$  – rezystancja fragmentu pręta o długości 0,0899m;
- $R_2$  – rezystancja fragmentu pręta o długości 0,01m;
- $R_{pCu}$  – rezystancja fragmentu pręta o długości 0,0001m.

Wyniki obliczeń dla uproszczonego modelu rezystancyjnego przedstawiono poniżej:



Rys. 6. Wykres zależności rezystancji pręta od stopnia jego uszkodzenia dla modelu rezystancyjnego uproszczonego.



Rys. 7. Wykres zależności rezystancji pręta od stopnia jego uszkodzenia dla modelu rezystancyjnego uproszczonego (powiększenie dla uszkodzeń powyżej 99.8%).

### 3. Obliczenia z wykorzystaniem metody elementów skończonych

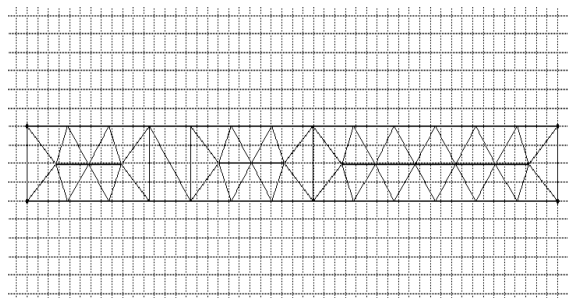
Ponieważ gęstość prądu nie zmienia się w rzeczywistości w sposób skokowy (jak przyjęto w modelach rezystancyjnych) zdecydowano przeprowadzić również symulacje uszkodzenia pręta w oparciu o metodę elementów skończonych. Wykorzystano w tym celu pakiet Quick Field Student Edition firmy Tera Analysis.

W obliczeniach przyjęto następujące parametry pręta:

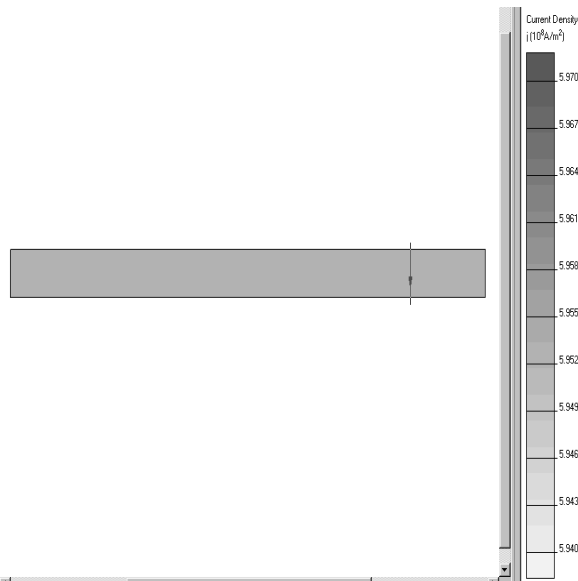
- długość pręta  $l = 0,1m = 100mm$ ,
- oporność właściwa  $\rho = 1,68 \cdot 10^{-8} \Omega m$ ,
- napięcie przyłożone do końców pręta  $U = 1V$ ,
- pole przekroju  $S = 0,00001 m^2$ ,

Rezystancję pręta z uszkodzeniem i bez uszkodzenia wyznaczano poprzez odczyt gęstości prądu obliczonego przy pomocy metody elementów skończonych, wyznaczenie natężenia prądu płynącego przez pręt i obliczeniu rezystancji pręta wg prawa Ohma.

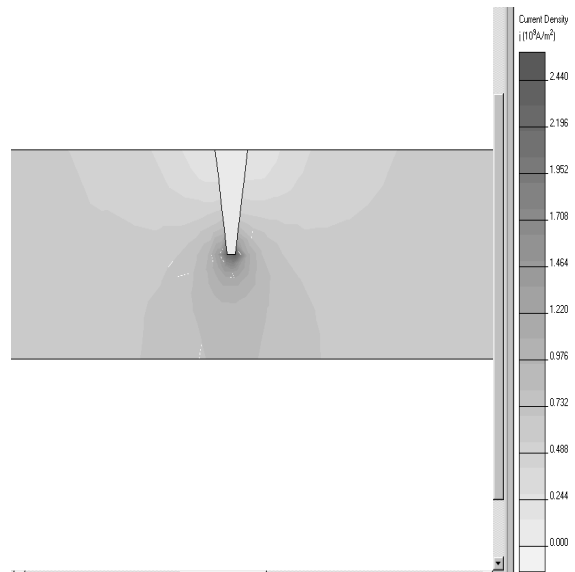
Wyniki obliczeń pokazane są poniżej:



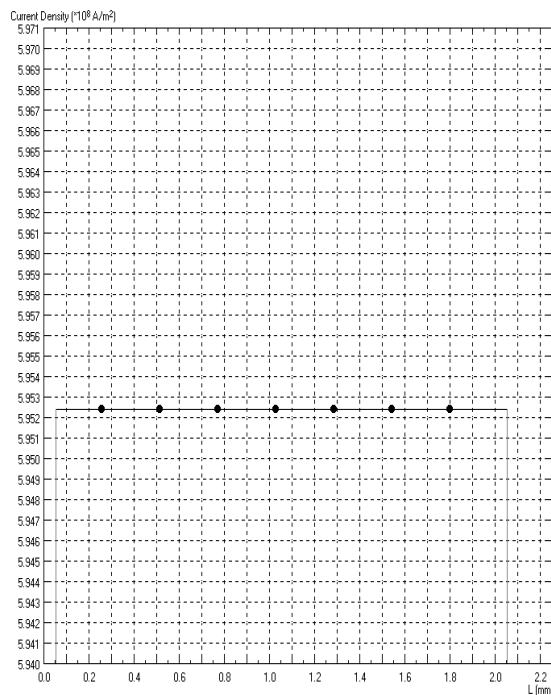
Rys. 8. Siatka elementów zastosowana w obliczeniach pręta nieuszkodzonego.



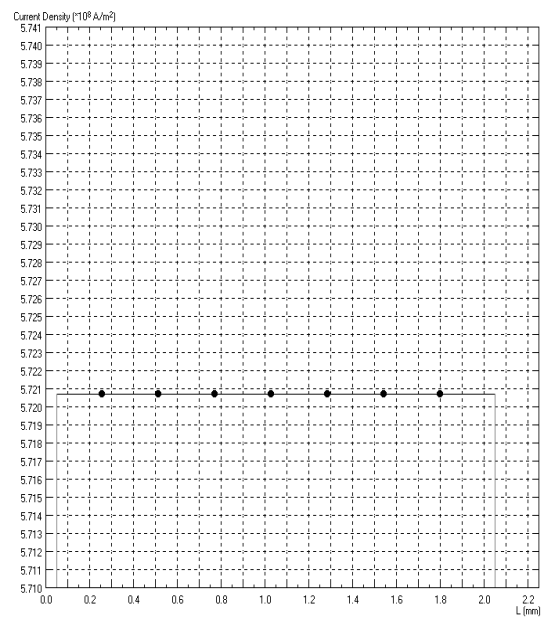
Rys. 9. Wyniki graficzne obliczeń gęstości prądu dla pręta nieuszkodzonego.



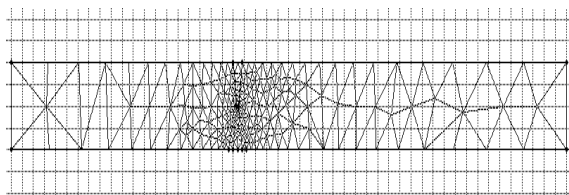
Rys.12. Wyniki graficzne obliczeń gęstości prądu dla pręta uszkodzonego (przerwane 50% pola powierzchni przekroju).



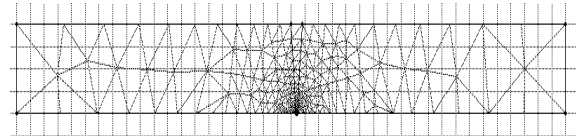
Rys. 10. Wykres gęstości prądu dla pręta nieuszkodzonego



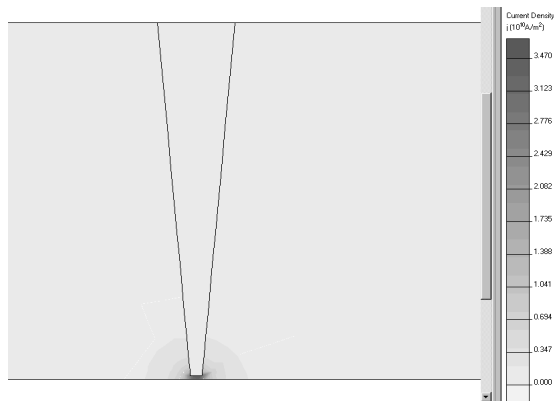
Rys. 13. Wykres gęstości prądu dla pręta uszkodzonego (przerwane 50% pola powierzchni przekroju).



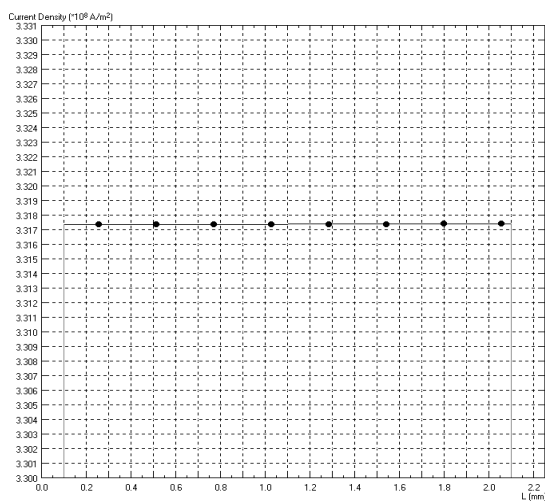
Rys. 11. Siatka elementów zastosowana w obliczeniach pręta uszkodzonego (przerwane 50% pola powierzchni przekroju).



Rys.14. Siatka elementów zastosowana w obliczeniach pręta uszkodzonego (przerwane 99% pola powierzchni przekroju).

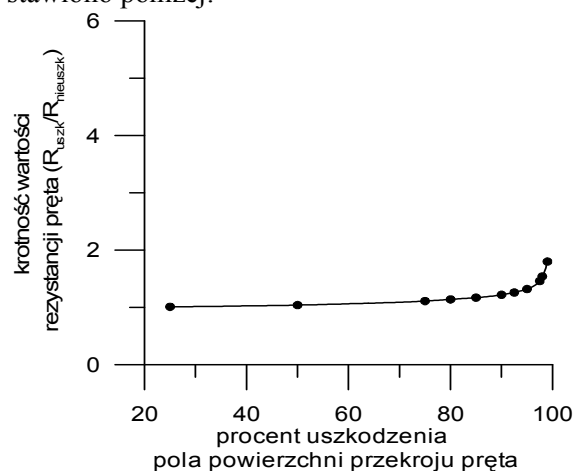


Rys. 15. Wyniki graficzne obliczeń gęstości prądu dla pręta uszkodzonego (przerwane 99% pola powierzchni przekroju).



Rys. 15. Wykres gęstości prądu dla pręta uszkodzonego (przerwane 99% pola powierzchni przekroju).

Zestawienie wyników obliczeń z wykorzystaniem metody elementów skończonych przedstawiono poniżej:



Rys. 16. Wykres zależności rezystancji pręta od stopnia jego uszkodzenia dla obliczeń metodą elementów skończonych.

#### 4. Podsumowanie

W przedstawionych przykładach obliczeń można zaobserwować, że dwukrotny wzrost rezystancji pręta jest praktycznie jednoznaczny z jego uszkodzeniem. Wyniki uzyskane w obliczeniach z wykorzystaniem modelu rezystancyjnego (zakładającego skokową zmianę gęstości prądu w uszkodzonym przecię) oraz przy pomocy metody elementów skończonych potwierdzają fakt, że po przekroczeniu 99% uszkodzenia powierzchni pręta następuje dwukrotny wzrost jego rezystancji. Wykrywanie niedokładności wykonania prętów poprzez pomiar rezystancji jest praktycznie niemożliwe. Założenie w obliczeniach uszkodzeń klatki wirnika maszyny indukcyjnej już dziesięciokrotnego wzrostu rezystancji uszkodzonych prętów lub segmentów pierścienia zwierającego jest wystarczające do odzwierciedlenia jego uszkodzenia. Wykrywanie małych uszkodzeń prętów wirnika (do 50%) przy pomocy pomiaru rezystancji jest praktycznie niemożliwe. Jak wykazano w obliczeniach uszkodzenie pręta wirnika do 50% powierzchni nie powoduje znaczącej zmiany jego rezystancji. Istnieją metody detekcji tego typu uszkodzeń poprzez wykrywanie zmiany pola magnetycznego wokół przewodnika, poprzez który przepływa prąd. Wymaga to jednak wymontowania wirnika z maszyny.

#### 5. Literatura

- [1]. Dybowski P.: *Pomiary i modelowanie prądowych symptomów uszkodzeń maszyn indukcyjnych*. Rozprawa doktorska, AGH Kraków 2001
- [2]. Dybowski P.: *Wpływ stopnia uszkodzenia wirnika na widmo prądów stojana silników klatkowych niesymetrycznych*. Zeszyty Problemowe nr 64/2002 BOBRME Komel, XI seminarium techniczne, maj 2002, Ustroń, 111-116
- [3]. Bolkowski S., Kaczorek T., Korytkowski J., Matusiak R.: *Podstawy elektrotechniki cz.1*. Redakcja Skryptów Politechniki Warszawskiej, 1966
- [4]. *Quick Field™ Finite Element Analysis System Version 5.2 User's Guide*, Tera Analysis, 2004

#### Autor

Dr inż. Paweł Dybowski,  
Katedra Maszyn Elektrycznych, AGH  
Al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków  
tel. 012/ 617-28-97;  
e-mail: dybowski@agh.edu.pl

Publikację opracowano w ramach pracy statutowej nr 11.11.120.06