

Zbigniew Gmyrek, Mirosław Zając
Instytut Mechatroniki i Systemów Informatycznych
Politechnika Łódzka

WYZNACZANIE STRAT W RDZENIU SILNIKA MAŁEJ MOCY, Z UWZGLĘDNIENIEM STREFY MATERIAŁU ZNISZCZONEGO W WYNIKU WYKRAWANIA MECHANICZNEGO

Streszczenie – W tym artykule autorzy szacują i analizują wartości strat w rdzeniu stojana, występujące w silniku indukcyjnym małej mocy. Analizę przeprowadzono przy użyciu metody elementów skończonych (MES), w warunkach sinusoidalnego zasilania. Obliczenia całkowitych strat w rdzeniu zostały przeprowadzone przez sumowanie składników strat pochodzących od składowych indukcji występujących w elementarnych obszarach rdzenia stojana. Przyjęto, że zjawiska, w postaci strat w rdzeniu, pochodzące od tych składowych są niezależne. Straty histerezy obrotowej obliczono, stosując współczynnik korygujący, uzyskany na podstawie zebranych danych doświadczalnych. Stosowany model uwzględnia występowanie uszkodzonych fragmentów ferromagnetyka, będących wynikiem wykrawania.

1 Wprowadzenie

Projektowanie silników indukcyjnych wymaga, między innymi, właściwego oszacowania strat w rdzeniu maszyny. Problem ten jest szczególnie istotny w przypadku silników małej i ułamkowej mocy, w których występuje istotny udział materiału magnetycznego zdeformowanego wskutek przeprowadzonego procesu wykrawania. W rezultacie, wykorzystywanie prostych zależności łączących straty w rdzeniu z częstotliwością oraz maksymalną wartością indukcji, nie spełnia oczekiwań projektanta. Wielu autorów proponuje jednak aby wykorzystać te proste zależności, w połączeniu z dokładną kalibracją danych doświadczalnych [1]. Alternatywnie, istnieje opisywana także w literaturze droga obliczania strat w rdzeniu silnika, realizowana w dziedzinie częstotliwości lub w czasie [2]-[4]. W dziedzinie częstotliwości powszechnie stosowany jest podział strat na następujące składniki: statyczne straty histerezy, klasyczne straty wiropądowe i straty excess. Wówczas składniki strat są obliczane z punktu widzenia

szczytowej wartości indukcji B_m , częstotliwość f i parametrów materiałowych k_h , k_c i k_e , odpowiednio przypisanych do składników strat. Jak wspomniano straty w rdzeniu można także obliczać w dziedzinie czasu. Należy ponadto pamiętać, że wiele statycznych i dynamicznych modeli strat histerezowych zostało zaproponowanych do obliczenia strat całkowitych [5], [6]. Niestety modele te wymagają przeprowadzenia wielu eksperymentów w celu określenia niezbędnych parametrów tych modeli. Brak spełnienia wymienionych wymagań prowadzić może do niepoprawnych wyników obliczeń strat w rdzeniu [7]. Prezentowany artykuł przedstawia metodę obliczenia strat w rdzeniu silnika, zrealizowaną w dziedzinie czasu za pomocą metody elementów skończonych. Metodę zastosowano w stosunku do rdzenia silnika indukcyjnego, zawierającego fragmenty o uszkodzonej strukturze. Uszkodzenie struktury zmienia właściwości ferromagnetyka, co opisano w literaturze [9], [10]. W stosowanym modelu wydzielono obszary reprezentujące te zniszczone fragmenty. Ponadto, straty w rdzeniu podzielono na trzy wspomniane wcześniej składniki. Składniki te obliczono przy wykorzystaniu wartości indukcji w elementarnych fragmentach rdzenia silnika indukcyjnego.

2 Opis modelu silnika małej mocy

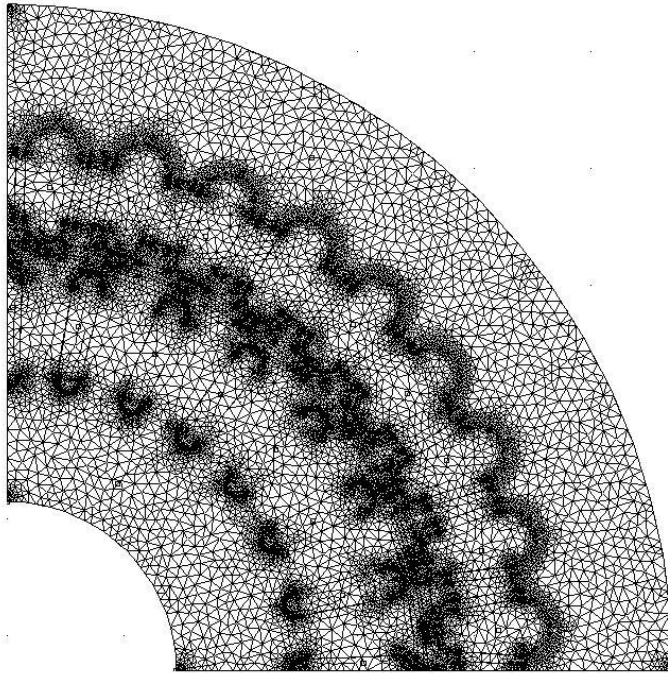
Do modelowania przeznaczono silnik indukcyjny małej mocy o następujących danych:

$P_n = 2.5$ kW, napięcie zasilania 230 V, połączenie uzwojeń stojana w trójkąt, częstotliwość napięcia 50 Hz, znamionowa prędkość obrotowa 1450 obr/min, liczba żłobków stojana 36, liczba żłobków wirnika 28, średnica zewnętrzna pakietu stojana 114 mm, średnica wewnętrzna pakietu stojana 72 mm, średnica zewnętrzna pakietu wirnika, 71.4 mm, średnica wewnętrzna pakietu wirnika 29 mm.

Badany silnik indukcyjny zamodelowano w programie FEMM, wykorzystującym metodę elementów skończonych do realizacji obliczeń elektromagnetycznych. Przyjęto sinusoidalne znamionowe napięcie zasilania silnika. Wirnik silnika obraca się z prędkością synchroniczną i dlatego autorzy pominieli prądy indukowane w klatce wirnika. Skutkowało to następnie rozwiązywaniem problemu magnetostatycznego dla określonych chwil czasowych. W programie FEMM wygenerowano siatkę elementów skończonych dla modelu silnika, przedstawioną na rysunku 1.

Model ten zawiera 35 000 elementów pierwszego rzędu. Podczas przygotowywania modelu zwrócono uwagę na fakt, aby odpowiednio gęsto wygenerować siatkę w miejscach o skomplikowanej geometrii oraz miejscach szczególnie ważnych z punktu widzenia obliczeń np. szczeliny powietrznej. Ponieważ silnik jest maszyną czterobiegową

więc modelowano tylko 1/4 obwodu magnetycznego silnika, przyjmując właściwe warunki periodyczności na granicy modelu. Ponadto przyjęto, że cały strumień magnetyczny zawiera się wewnątrz modelu co uzyskano przyjmując odpowiednie warunki graniczne na łukach reprezentujących zewnętrzną i wewnętrzną średnicę modelu maszyny. Wykonując obliczenia dla wybranych chwil czasowych, wykorzystano wyniki rejestracji prądu pobieranego przez rzeczywisty silnik.

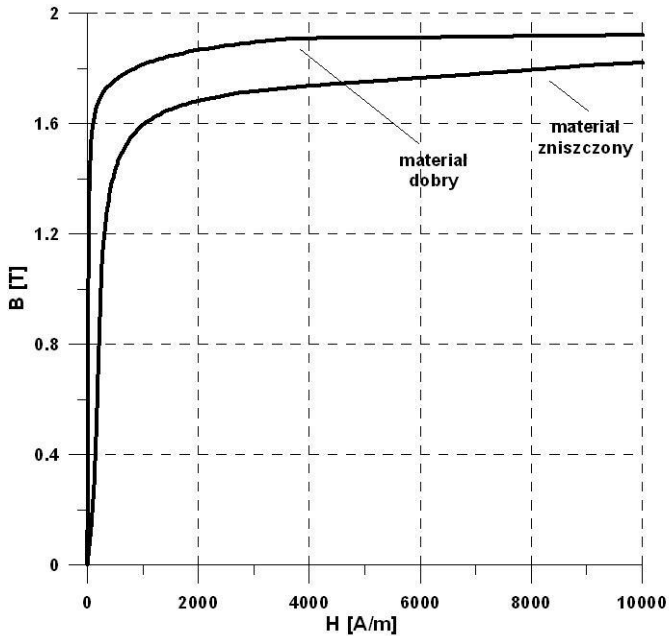


Rys. 1. Siatka modelu silnika

W przedstawionym artykule autorzy skupili się na próbie modelowania strat całkowitych w rdzeniu, z uwzględnieniem uszkodzonych fragmentów ferromagnetyka, wynikających z procesu wykrawania kształtu obwodu magnetycznego. Na podstawie dostępnej literatury stwierdzono, że szerokość strefy, w zależności od rodzaju ferromagnetyka a także sposobu i parametrów cięcia, waha się w przedziale od 0.5 do 1 mm. Autorzy przyjęli dla analizowanego materiału szerokość strefy równą 0.8 mm. Jednocześnie wiadomo, że stopień zniszczenia strefy nie jest jednakowy i parametry materiału zmieniają się wraz z odległością o krawędzi cięcia. Opierając się na szacunkowych obliczeniach parametrów strefy, zaprezentowanych w [8], przyjęto równoważną charakterystykę magnesowania uszkodzonej części materiału. Na rysunku 2 przedstawiono charakterystyki magnesowania

materiału „dobrego” oraz „zniszczonego”. Charakterystyki te wykorzystano następnie w modelu silnika podczas obliczeń.

Aby uwzględnić w modelu występowanie takiej strefy, w miejscach gdzie występują istotne wartości indukcji (czyli w pobliżu żłobków stojana i szczeliny powietrznej), wyznaczono obszaru o szerokości 0.8 mm, w których przyjęto charakterystykę magnesowania zniszczonego materiału.



Rys. 2. Charakterystyki magnesowania „dobrego” i „zniszczonego” materiału magnetycznego

3 Metoda wyznaczania strat w rdzeniu w dziedzinie czasu

Model silnika podzielono na elementarne obszary. Dla tych podstawowych obszarów obliczono poszczególne komponenty strat w rdzeniu. Ponadto założono, że straty w rdzeniu w danym obszarze są sumą strat wywołanych składową normalną oraz styczną wektora indukcji. Straty histerezy P_h wyznaczone w ogólnym przypadku dla przemagnesowania obrotowego obliczono według wzoru (1).

$$P_h = \frac{k_h}{T} \sum_{i=1}^N (B_{mri}^\alpha + B_{mr\Theta}^\alpha) \quad (1)$$

W powyższym wzorze (1) k_h jest współczynnikiem zależnym od parametrów materiału (czyli rodzaju materiału) a także od eliptyczności hodografu wektora indukcji w tym obszarze), B_{mri} , $B_{m\theta}$ są odpowiednio wartościami składowej normalnej i stycznej wektora indukcji magnetycznej i -tym obszarze, N jest liczbą elementarnych obszarów, T okresem przebiegu, α jest wykładnikiem potęgi reprezentującej zależność strat histerezowych od indukcji.

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń i symulacji stwierdzono, że nawet podczas sinusoidalnego zasilania, przebieg składowych indukcji w czasie w poszczególnych elementach modelu, nie jest sinusoidalny. Jest to spowodowane magnetyczną nieliniowością materiału ferromagnetycznego. W ten sposób stwierdzono, że nawet podczas zasilania zredukowaną wartością napięcia, nie można używać formuł wykorzystujących informacje dotyczące tylko podstawowych harmonicznej (czyli sinusoidalnie zmiennego przebiegu).

W elementarnych obszarach klasyczne straty wiropądowe obliczono według zależności

$$P_{\text{ecl}} = k_e^* \sum_{i=1}^N \left[\left(\frac{B_{r,i+1} - B_{r,i}}{\Delta t} \right)^2 + \left(\frac{B_{\theta,i+1} - B_{\theta,i}}{\Delta t} \right)^2 \right] \quad (2)$$

gdzie k_e^* jest współczynnikiem zależnym od rodzaju materiału magnetycznego, zaś Δt jest krokiem czasowym obliczeń.

Straty excess obliczono według następującej zależności

$$P_{\text{ex}} = k_{\text{exc}}^* \sum_{i=1}^N \left[\left(\frac{B_{r,i+1} - B_{r,i}}{\Delta t} \right)^{1.5} + \left(\frac{B_{\theta,i+1} - B_{\theta,i}}{\Delta t} \right)^{1.5} \right] \quad (3)$$

gdzie k_{exc}^* jest współczynnikiem dla tego rodzaju strat, zależnym od rodzaju materiału magnetycznego.

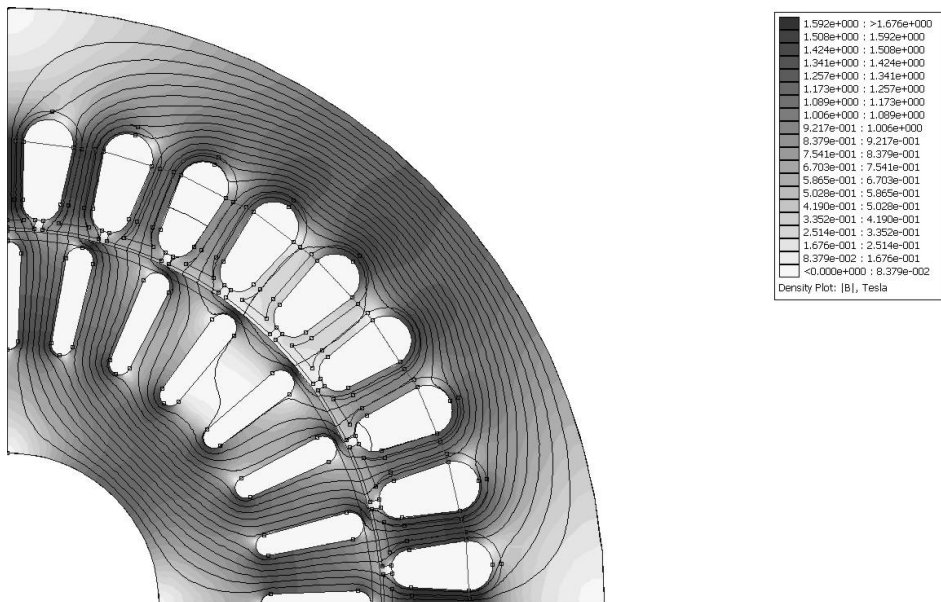
Sumaryczne straty w rdzeniu silnika obliczono za pomocą następującej formuły

$$p_k = \frac{I}{NV_k} \sum_{i=1}^N p_i \quad (4)$$

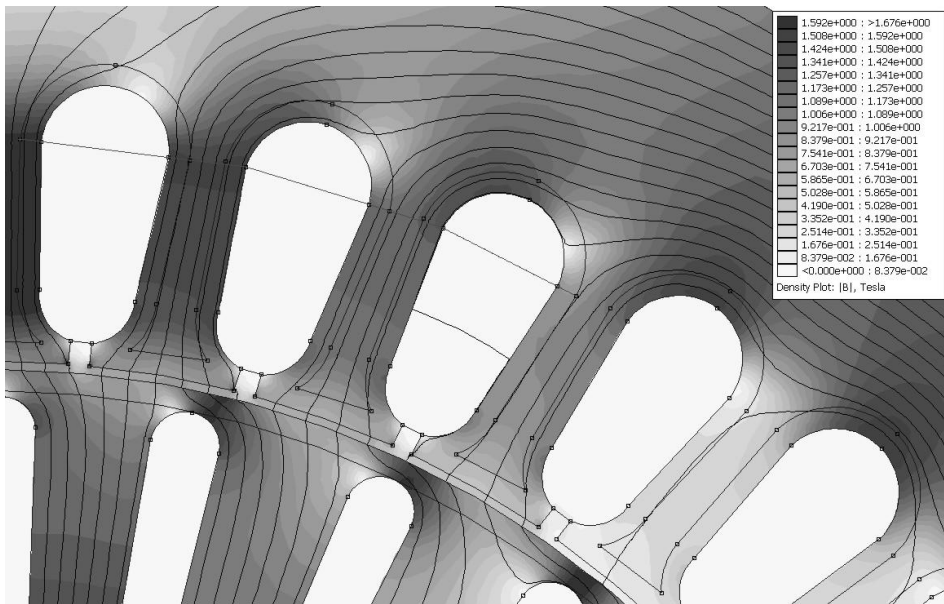
gdzie N jest liczbą wszystkich analizowanych obszarów, p_i straty w elementarnych obszarze zaś V_k jest objętością całego rdzenia.

4 Wyniki obliczeń rozkładu pola magnetycznego i strat w rdzeniu modelu silnika

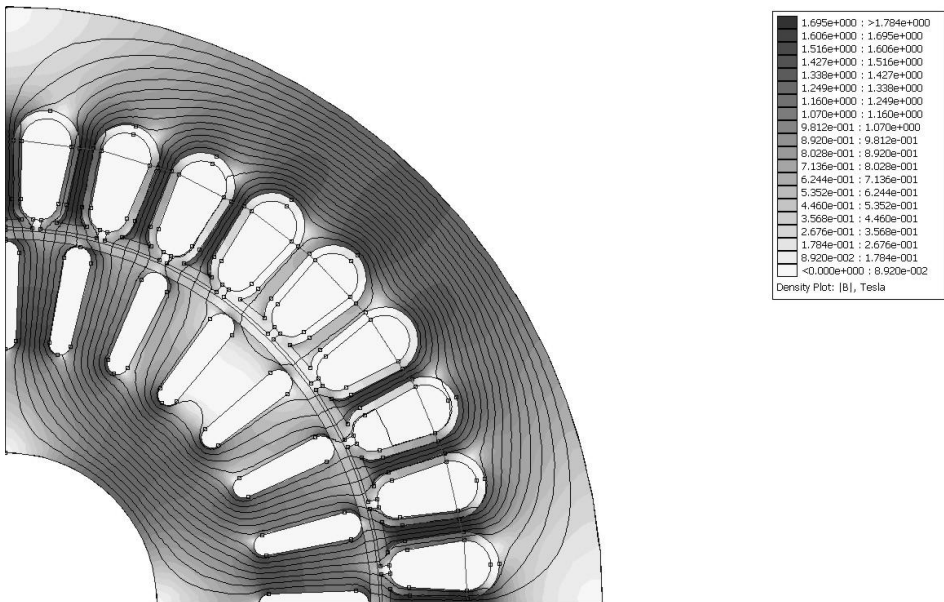
Autorzy zrealizowali kilka serii obliczeń elektromagnetycznych, rozwiązując problem magnetostacyjny. Przyjęcie rozwiązywania takiego problemu, skutkowało pominięciem prądów indukowanych w klatce wirnika. Jest to usprawiedliwione tym, że podczas pracy silnika w stanie jałowym, w klatce wirnika indukowane są tylko prądy wirowe wynikające z istnienia harmonicznych przestrzennych rozkładu pola magnetycznego w szczelinie powietrznej. Prądy te pominięto, gdyż nie mają one istotnego wpływu na rozkłady pola magnetycznego w rdzeniu silnika. Ponadto autorzy ograniczają obszar analizy do rdzenia stojana gdyż częstotliwość zmian strumienia magnetycznego w rdzeniu wirnika, podczas biegu jałowego silnika, jest bliska zeru. Tak więc strat mocy w rdzeniu wirnika są pomijalne. Przebiegi prądu uzwojeń stojana, zmierzone na rzeczywistym silniku, wykorzystano jako wymuszenia w modelu. Obliczenia wykonano w dwóch turach. W pierwszej założono, że nie ma zniszczonych fragmentów struktury rdzenia stojana. W drugiej przyjęto, że takie zniszczone strefy istnieją. Przyjęto ich szerokość oraz założono, że zniszczenie w tych strefach jest równomierne i możliwe jest zastosowanie jednej charakterystyki magnesowania reprezentującej tą strefę. Charakterystyki magnesowania przedstawiono na rys.2. Przykładowe rozkłady pola magnetycznego przedstawiono na rys.3-6.



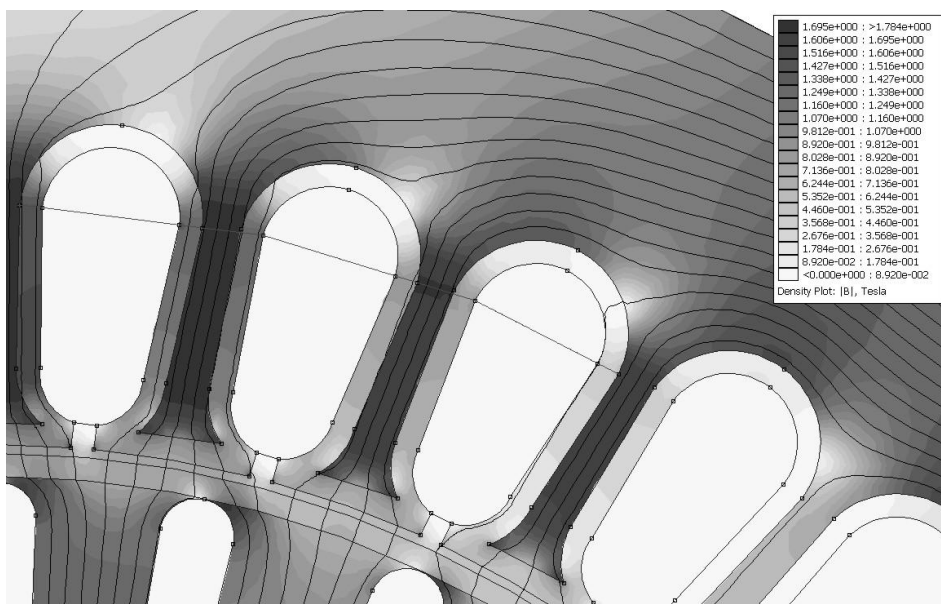
Rys. 3. Rozkład pola magnetycznego we fragmencie rdzenia silnika – brak obszarów o zniszczonej strukturze



Rys. 4. Rozkład pola magnetycznego w powiększonym fragmencie rdzenia – brak obszarów o zniszczonej strukturze

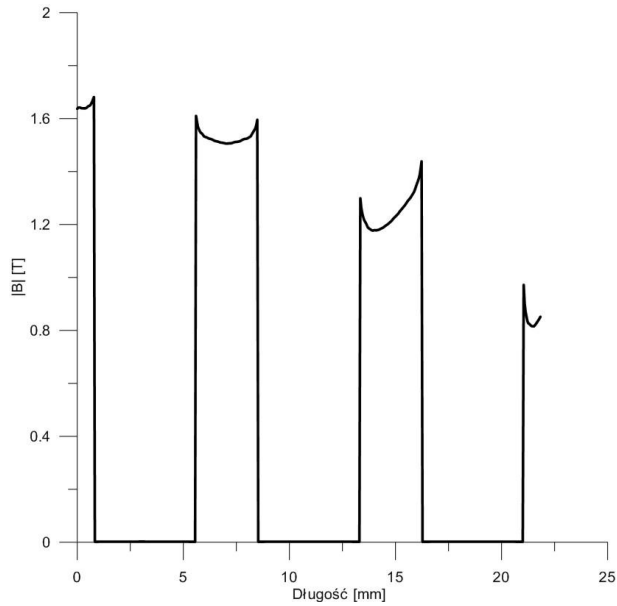


Rys. 5. Rozkład pola magnetycznego we fragmencie rdzenia silnika – występują obszary o zniszczonej strukturze

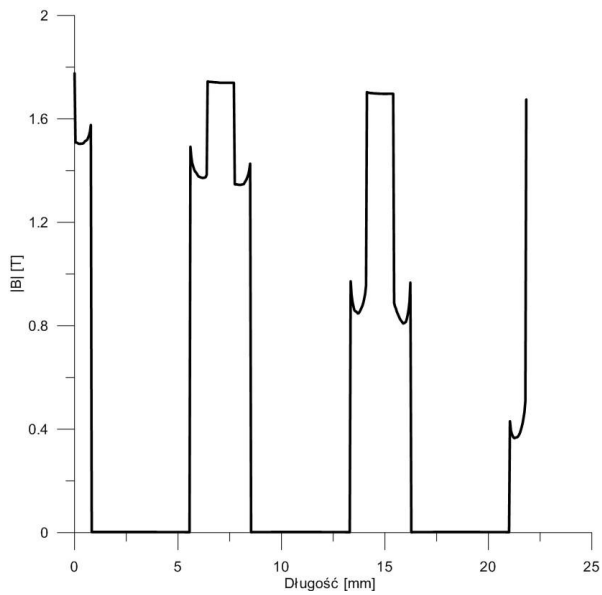


Rys. 6. Rozkład pola magnetycznego w powiększonym fragmencie rdzenia – występują obszary o zniszczonej strukturze

W przedstawionych rozkładach pola magnetycznego wyraźnie widoczne są obszary w których występuje materiał o zniszczonej strukturze. Strumień magnetyczny niechętnie wnika do wnętrza tych obszarów. Należy podkreślić, że obszary zniszczonego materiału występują nie tylko wokół żłobków stojana ale także przy szczelinie powietrznej. Aby dokładnie przeanalizować wpływ zniszczonej struktury materiału na rozkład pola magnetycznego, zdecydowano wykreślić łuk na którym wyznaczono wartości indukcji magnetycznej. Położenie łuku widoczne jest na rys.3 oraz 5 (łuk rozpoczyna się na lewej krawędzi lewego skrajnego żłobka stojana i kończy na prawej krawędzi prawego skrajnego żłobka stojana). Łuk został podzielony na 500 elementarnych fragmentów. W każdym fragmencie wyznaczono wartość indukcji magnetycznej, odpowiadającej wybranej chwili czasowej dla której wykonano obliczenia – rys.7-8. Przedstawione rozkłady pola magnetycznego oraz rozkłady indukcji wzdłuż łuku wyznaczono dla chwili czasowej w której w fazie R płynął prąd o maksymalnej wartości zaś w fazach S i T płynęły prądy równe połowie wartości maksymalnej. Wyraźnie widać, że w zniszczonych fragmentach rdzenia wartość indukcji istotnie zmalała (zmniejszenie o 12%). Fakt ten spowodował także wzrost indukcji w niezniszczonej części zęba (wzrost o około 10%). Wzrost i spadek nie są równe gdyż wynikają z proporcji udziału materiału dobrego i zniszczonego.



Rys. 7. Rozkład indukcji we fragmencie łuku – brak obszarów rdzenia o zniszczonej strukturze



Rys. 8. Rozkład indukcji we fragmencie łuku – występują obszary rdzenia o zniszczonej strukturze

5 Podsumowanie

Autorzy zajmowali się problemem uwzględnienia obecności zniszczonych obszarów rdzenia stojana silnika indukcyjnego małej mocy. Zniszczenia obszarów nastąpiło w wyniku przeprowadzenia procesu wykrawania blach ferromagnetycznych z których zbudowany jest rdzeń silnika. Wyniku przeprowadzonej symulacji wykazano, że uszkodzenie struktury materiału skutkuje w pogorszeniu właściwości magnetycznych i energetycznych tego obszaru. Rozwiązując problem magnetostacyjny wyznaczono chwilowe rozkłady indukcji w elementarnych fragmentach rdzenia stojana. Rozkłady te stały się podstawą do wyznaczenia składników strat mocy w rdzeniu stojana dla dwóch przypadków: przypadek pierwszy w którym rdzeń silnika wykonano w całości z niezniszczonego materiału oraz przypadek drugi w którym rdzeń silnika wykonano z materiału posiadającego zniszczone fragmenty, bliskie krawędzi cięcia materiału. Efektem przeprowadzonych obliczeń było wyznaczenia strat mocy w rdzeniu. W pierwszym przypadku straty te wyniosły 125 W (brak obszarów o uszkodzonej strukturze) zaś w drugim przypadku 129 W (rdzeń posiada obszary o zniszczonej strukturze). Wydawać by się mogło, że różnica 4 W jest do pominięcia. Jednakże występujące powiększenie indukcji w części rdzenia stojana spowoduje wzrost temperatury całego rdzenia. W analizowanym przypadku wzrost ten wyniesie około 7% dla strefy zębów i około 4 % dla strefy jarzma. Wzrost ten jest bardzo niekorzystnym dodatkowym zjawiskiem, które powinno być uwzględnione w procesie projektowania silników małej mocy.

Literatura

- [1] Hendershot J. R., Miller T. J. E., *Design of brushless permanent magnet motors*, Mentor, OH, Magna Physics, 1994.
- [2] Bertotti G., General properties of power losses in soft ferromagnetic materials, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 24, no. 1, pp. 621-630, 1988.
- [3] Boglietti A., Cavagnino A., Lazzeri M., Pastorelli M., *Predicting iron losses in soft magnetic materials with arbitrary voltage supply*, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 39, no 2, pp. 981-989, 2003.
- [4] Fiorillo F., Novikow A., *An improved approach to power losses in magnetic laminations under nonsinusoidal induction waveform*, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 26, no. 5, pp. 2904-2910, 1990.
- [5] Mayergoyz I. D., *Mathematical models of hysteresis*, New York: Springer, 1991.

- [6] Jiles D. C., Atherton D. L., *Theory of ferromagnetic hysteresis*, Journal Magn. Magn. Mater., vol.61, pp.48-60,1986.
- [7] Dupre L. R., Bottauscio O., Chiampi M., Repetto M., Melkebeek J. A. A., *Modeling of electromagnetic phenomena in soft magnetic materials under unidirectional time periodic flux excitations*, IEEE Trans. Magn., vol. 35, no 5, pp. 4171-4183, 1999.
- [8] Gmyrek Z., *Modeling of damaged material zone resulting from the punching process*, Proceedings of SMC Conference, 2011
- [9] Schoppa A., Schneider J., Wuppermann C.-D., *Influence of the manufacturing process on the magnetic properties of non-oriented electrical steels*, Journal Magn. Magn. Mater., 215-216, 2000, pp.74-78
- [10] Belgrand T., Eple S., *Tell us about your punch, we'll tell you about your electrical steel magnetic properties*, Journal de Physique, vol.8, 1998, pp.611-614

DETERMINATION OF LOSS IN THE CORE OF THE LOW POWER INDUCTION MOTOR, TAKING INTO ACCOUNT THE MATERIAL AREA DAMAGED IN RESULT OF A MECHANICAL PUNCHING

Summary - In this paper the iron losses in low power induction motor are estimated and analysed using time-stepping Finite Element Method (FEM) under sinusoidal supply. The iron losses calculation has been carried out by add up the iron losses produced by orthogonal components of the flux density, as if the iron losses produced by these components were independent phenomena. The rotational hysteresis loss has been calculated applying a correction factor based on experimental data. Applied model takes into account the presence of damaged zones of the ferromagnetic, as a result of punching.