

Zbigniew Hilary Żurek, Politechnika Śląska, Gliwice  
 Mariusz Śladowski, BOBRME Komel, Katowice

## WPLYW NAPRĘŻEŃ POWSTAŁYCH W POŁĄCZENIU WCISKOWYM MIĘDZY KADŁUBEM A STOJANEM NA ROZKŁAD INDUKCJI MAGNETYCZNEJ W SZCZELINIE

### INFLUENCE OF STRESS IN INTERFERENCE JOINT BETWEEN FRAME AND STATOR ON FLUX DENSITY DISTRIBUTION IN THE AIR GAP

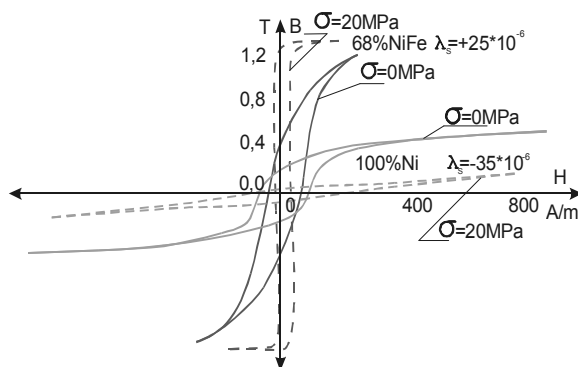
**Abstract:** In the paper it is shown that material's magnetic parameters largely depends on mechanical stresses. The paper discusses these problem and the example of frame of electrical motor and the stator sheet is given. The stress from the interference joint between frame and stator sheet influence on parameters of electric motor.

#### 1. Wstęp

Podczas projektowania urządzeń elektromagnetycznych przyjmuje się stałe dla danego gatunku właściwości magnetyczne blach prądnicowych. Uwzględnia się jedynie wpływ temperatury. Nie bierze się pod uwagę zmian parametrów blach wywołanych stanem naprężeń mechanicznych, powstałych pod wpływem wcisku pakietu blach stojana w kadłub i wcisku blach wirnika na wał.

#### 2. Efekt Villarieg'o

Zjawisko to szerzej znane jest jako efekt Villariego i nosi nazwę magnetostrykcyjności. Podczas trwania tego zjawiska ta sama wartość natężenia pola magnetycznego powoduje zmianę wartości indukcji magnetycznej ferromagnetyku pod wpływem naprężeń.



Rys. 1. Pętla histerezy magnetycznej

Konwersję magnetostrykcyjną opisuje współczynnik magnetostrykcyjności, który charakteryzuje podatność materiału do badań magnetycznych naprężeń. Wpływ naprężeń na związki magnetochemiczne materiału (o magnetostrykcyjności do

datniej lub ujemnej) dla czystego Ni oraz stopu 68%Ni32%Fe pokazano na rysunku 1.

#### 3. Stal transformatorowa jako materiał magnetostrykcyjny

Czułość magnetostrykcyjna stali konstrukcyjnych jest znikoma i może być pomijana. Natomiast krzemowa stal transformatorowa cechuje się wysoką podatnością na magnetostrykcyjność. Spowodowane jest to zwiększoną zawartością krzemu oraz węgla. Obróbka cieplna, obróbka plastyczna również wpływają na współczynnik magnetostrykcyjności. Duże wartości maksymalnej przenikalności magnetycznej osiągnęte przy dostatecznie dużych natężeniach pola magnetycznego, wielokrotny wzrost przenikalności magnetycznej pod wpływem działania naprężeń mechanicznych oraz małe straty na przemagnesowanie i prądy wirowe powodują, że w stali elektrotechnicznej zachodzą zjawiska magnetostrykcyjne. Stal ta podczas ściskania odznacza się dużymi wartościami czułości  $S$ ,  $S_{\mu}$ ,  $S_E$  oraz dobrą liniowością charakterystyk.

–  $S$  – względna zmiana przenikalności magnetycznej na jednostkę wartości naprężenia mechanicznego,

$$S = \frac{\Delta\chi}{\chi} : \frac{\Delta\sigma}{\sigma}$$

gdzie:

$\chi$  - podatność magnetyczna  
 $\sigma$  - naprężenia mechaniczne

–  $S_{\mu}$  – bezwzględna zmiana przenikalności magnetycznej na jednostkę wartości naprężenia mechanicznego,

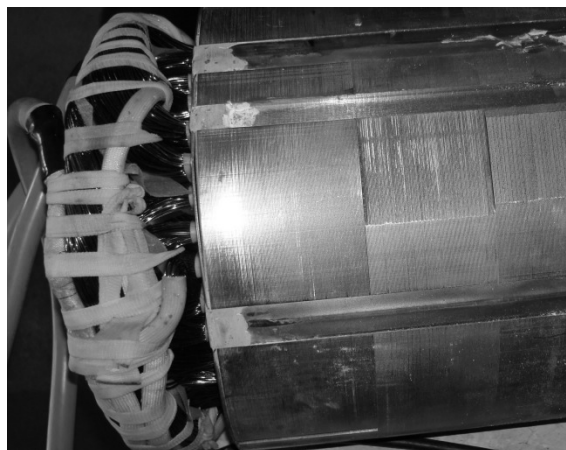
- $S_E$  – bezwzględna zmiana energii magnetycznej na jednostkę wartości naprężenia mechanicznego.

Dzięki temu zjawisku stal transformatorowa znalazła szerokie zastosowanie w budowie czujników magnetosprężystych. Z punktu widzenia budowy maszyn elektrycznych zjawisko magnetosprężystości wpływa na parametry statyczne i dynamiczne obwodu magnetycznego maszyny elektrycznej. Błędy obliczeniowe mocy, momentu, a także dodatkowe nagrzewanie od strat energii wzbudzanych przez pulsacje pola magnetycznego bez uwzględnienia stanu naprężeń, mogą być istotne. Większość błędów obliczeniowych współczesnych maszyn elektrycznych pochodzących od efektów magneto-sprężystości ukryta jest we współczynniku sprawności maszyny elektrycznej.

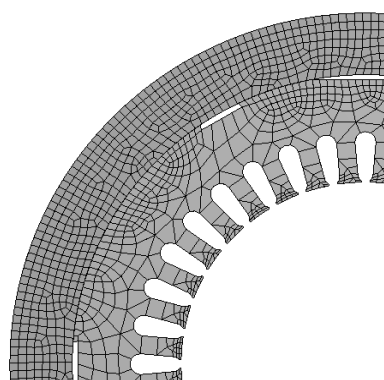
#### 4. Analiza naprężeń blachy stojana

Do rozważań przyjęto blachę stojana silnika elektrycznego (rys. 2) typu PM IPM. Przyjęto typ blachy magnetycznej to M400-50A. Kadłub silnika wykonano z aluminiowego odlewania. Pod wpływem wcisku pakietu blach stojana w kadłub silnika w blachach wystąpiły naprężenia mechaniczne. W obliczeniach zostały uwzględnione naprężenia od wcisku, natomiast pominięte zostały naprężenia pochodzące od oddziaływania magnetycznego stojana z wirnikiem w zębach blachy stojana.

Model został utwierdzony na zewnętrznej powierzchni pierścienia reprezentującego kadłub. Powierzchnią boczną blachy stojana nadano wiązanie podpory przesuwnej. Na powierzchni styku dwóch elementów zamodelowany został kontakt. Wcisk montażowy między blachą stojaną, a kadłubem wynosi 0,1mm. W sześciu symetrycznych szczelinach (rys. 3) na zewnętrznym obwodzie blachy osadzone są klamry mocujące pakiet blach. Wpływ naprężeń pochodzących od klamer i ich rozmieszczenia w modelu (rys. 4) pominięto. Pominięto także wpływ materiału klamer na rozptył strumienia magnetycznego w obwodzie.

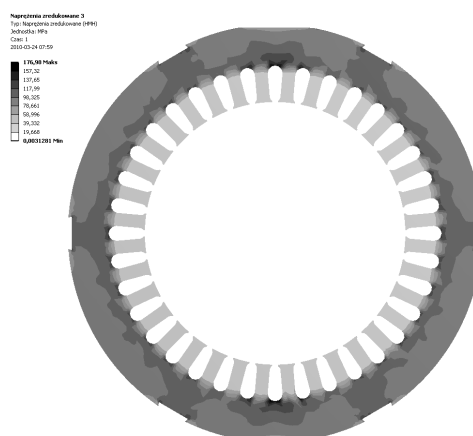


Rys. 2. Stojan uzwojony analizowanego silnika



Rys. 3. Model dyskretny blachy stojana

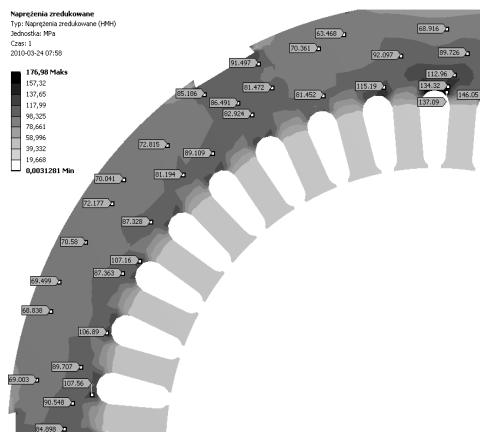
Model dyskretny zawiera 28822 węzłów i 3616 elementów.



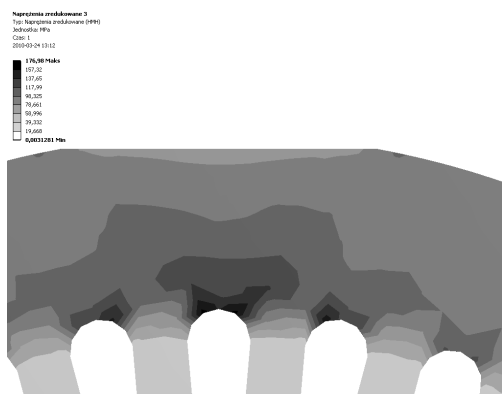
Rys. 4. Rozkład naprężeń w blasze stojana pochodzących od wcisku w kadłub

Cechy konstrukcyjne połączenia kadłub stojan i zadany wcisk powodują nierównomierny rozkład naprężeń w elementach jarzma stojana. Mapa rozkładu naprężeń pokazana na rysunku 5 i 6, z odpowiadającymi izoliniami, została uwzględniona w modelu FEMM (Finie Element Magnetic Method).

Przebieg izolinii naprężeń oraz ich gradacja zostały uproszczone.



Rys. 5. Rozkład naprężeń w blasze stojana pochodzących od wcisku w kadłub

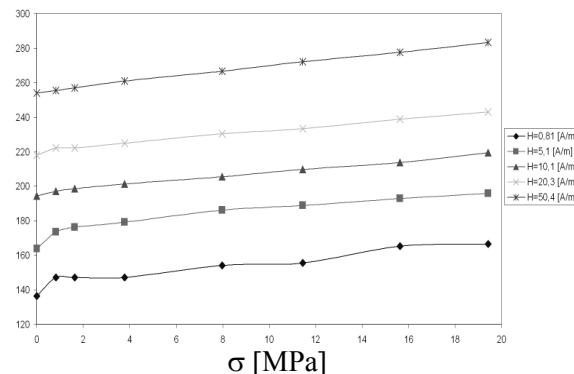


Rys. 6. Rozkład naprężeń w blasze stojana pochodzących od wcisku w kadłub – fragment z największymi naprężeniami

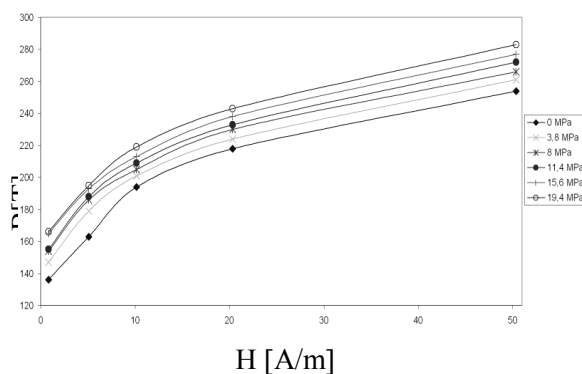
## 5. Badania

Wprowadzenie w obszarach ograniczonych izoliniami naprężeń szczegółowych krzywych magnesowania pierwotnego i wartości natężenia koercji umożliwia badanie rzeczywistego obiektu magnetycznego obciążonego mechanicznie. Badania materiału blachy transformatorowej przeprowadzono na precyzyjnym mostku pomiarowym HP w Zakładzie Materiałów Amorficznych Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach. Próbkę blachy magnetycznej typu M400-50A o wymiarach 200 x 4 x 0.5 mm poddano rozciąganiu. Wyznaczano zmiany przenikalności magnetycznej w funkcji zmian wartości natężenia pola magnetycznego i siły rozciągającej. Na tej podstawie wyznaczono charakterystyki magnesowania w zależności od naprężeń występujących w próbce. Zakres zmian wartości naprężeń na aktualnym etapie badań nie uwzględnia obciążeń złożonych

i całego przedziału naprężeń. Na rysunku 7 i 8 podano wyniki pomiarów przenikalności magnetycznej względnej w zakresach niskich pól magnetycznych i naprężeń.

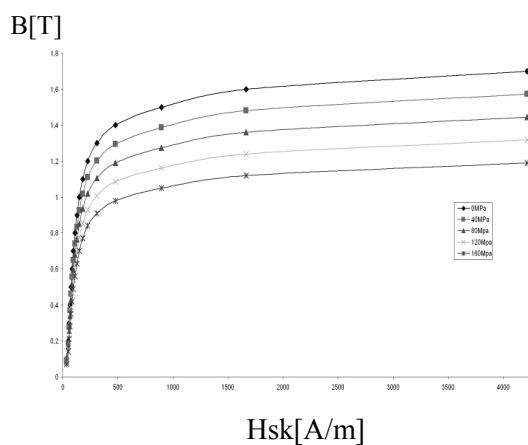


Rys. 7. Przebieg współczynnika przenikalności magnetycznej w funkcji naprężeń



Rys. 8. Przebieg współczynnika przenikalności magnetycznej w funkcji natężenia pola

Założona do dalszych obliczeń i pokazana na rysunku 9 zmienność parametrów magnetycznych jest uśrednioną wartością dla materiału blach transformatorowych i będzie w dalszym etapie badań korygowana.

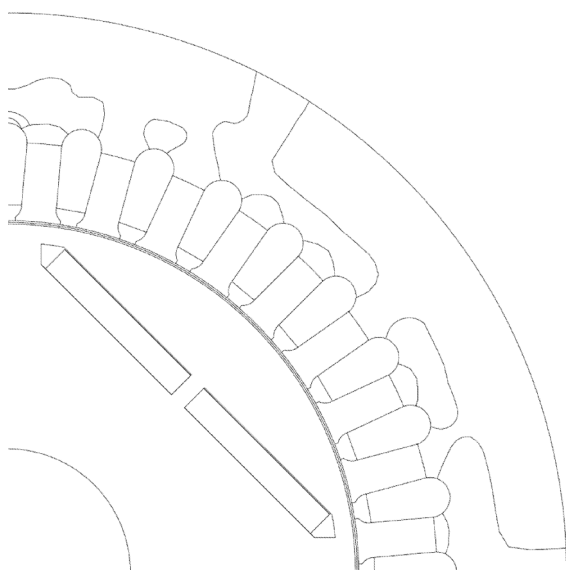


Rys. 9. Charakterystyki magnesowania obciążonej mechanicznie blachy magnetycznej  $B_m=f(H_m)$  przy 50Hz

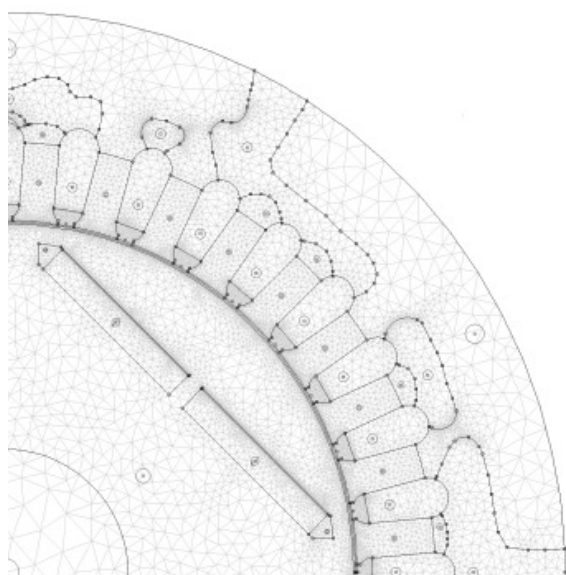
## 6. Analiza obwodu magnetycznego silnika z uwzględnieniem naprężeń mechanicznych

Obliczenia magnetyczne przeprowadzono w programie symulacyjnym 2D FEMM 4.2.

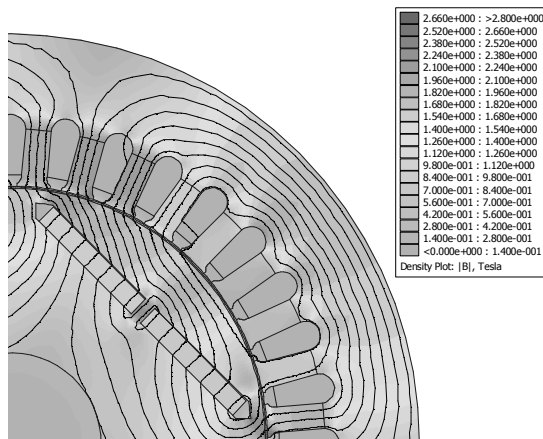
Przeniesienie mapy naprężeń z modelu mechanicznego do modelu magnetycznego odbywa się w sposób uproszczony i obarczone jest pewnym błędem (rys. 10 i rys. 11). W programach użytych do obliczeń jest to jedyna możliwa procedura. W chwili obecnej brak programów umożliwiających automatyzację obliczeń magnetosprężystych.



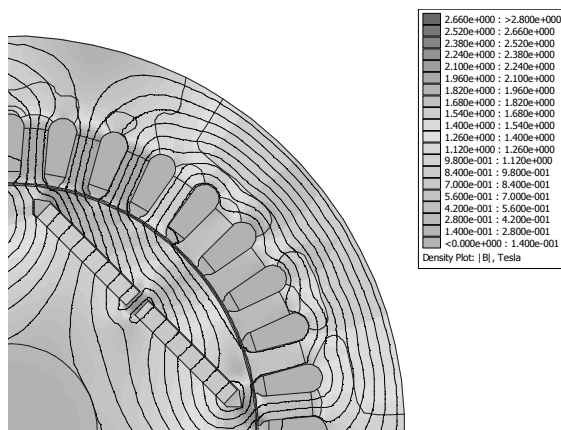
Rys. 10. Model geometryczny z obszarami, w których występują naprężenia



Rys. 11. Model dyskretny w programie FEMM 4.2



Rys. 12. Rozkład indukcji w blachach bez podziału na obszary, w których występują naprężenia

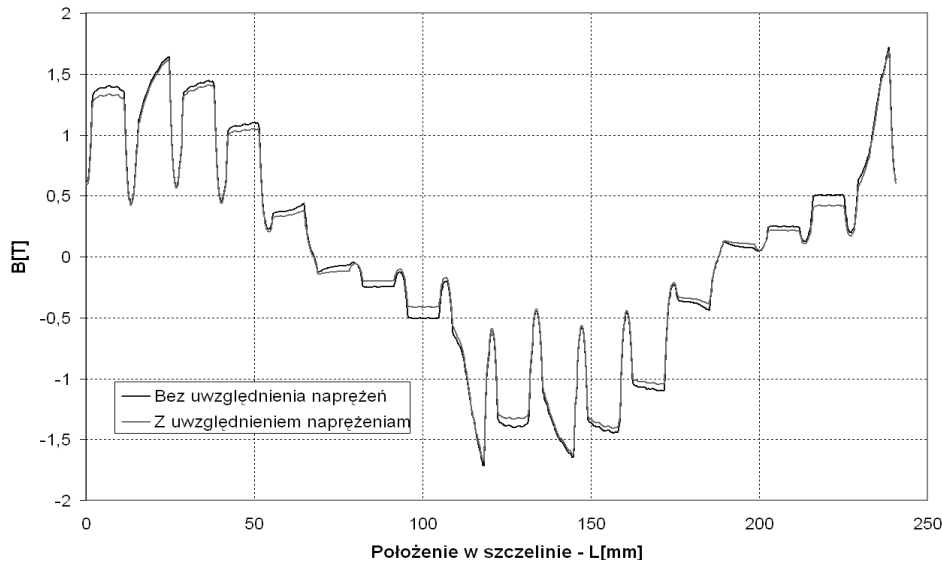


Rys. 13. Rozkład indukcji w blachach z podziałem na obszary, w których występują naprężenia

## 7. Podsumowanie

W obecnych czasach, kiedy sprawność silników osiąga wartości graniczne, to poprawienie sprawności choćby o kilka dziesiątych procenta jest również istotna. Uzyska się to poprzez uwzględnianie zmienności parametrów magnetycznych blach w stanach statycznych i dynamicznych obliczeń projektowych.

Artykuł powstał w ramach grantu finansowanego przez MNiSzW nr N N510 238538



Rys. 14. Rozkład indukcji w szczelinie w zależności od położenia

### Literatura

- [1]. Żurek Z.H.: *Sprężystość mechaniczna w obwodach magnetycznych – część wstępna*, Zeszyty Problemowe BOBRME KOMEL Nr 82/2009, s. 39-43.
- [2]. Żurek Z.H.: *Pomiary pola magnetycznego w diagnostyce technicznej i materiałowej elementów maszyn*, XXV Międzynarodowa Konferencja z Podstaw Elektrotechniki i Teorii Obwodów, Tom I, s. 75-80.
- [3]. Gumaniuk M.M.: *Czujniki magnetosprężyste w automatyce*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1967.
- [4]. Zienkiewicz O. C.: *Metoda elementów skończonych*, Arkady, Warszawa 1972.

### Autorzy

Zbigniew Hilary Żurek  
 zbigniew.zurek@polsl.pl  
 prof. nzw. dr hab. inż.,  
 Politechnika Śląska, Wydział Transportu,  
 Katedra Transportu Szynowego,  
 40-019 Katowice, ul. Krasińskiego 8,

mgr inż. Mariusz Śladowski  
 m.sladowski@komel.katowice.pl  
 Branżowy Ośrodek Badawczo-Rozwojowy  
 Maszyn Elektrycznych „KOMEL”  
 40-203 Katowice,  
 al. Roździeńskiego 188.