

Wojciech Stawicki
Instytut Mechatroniki i Systemów Informatycznych
Politechnika Łódzka
Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź
email: wojciech.stawicki@edu.p.lodz.pl

TRÓJWYMIAROWE MODELOWANIE STYCZNIKA PRĄDU PRZEMIENNEGO

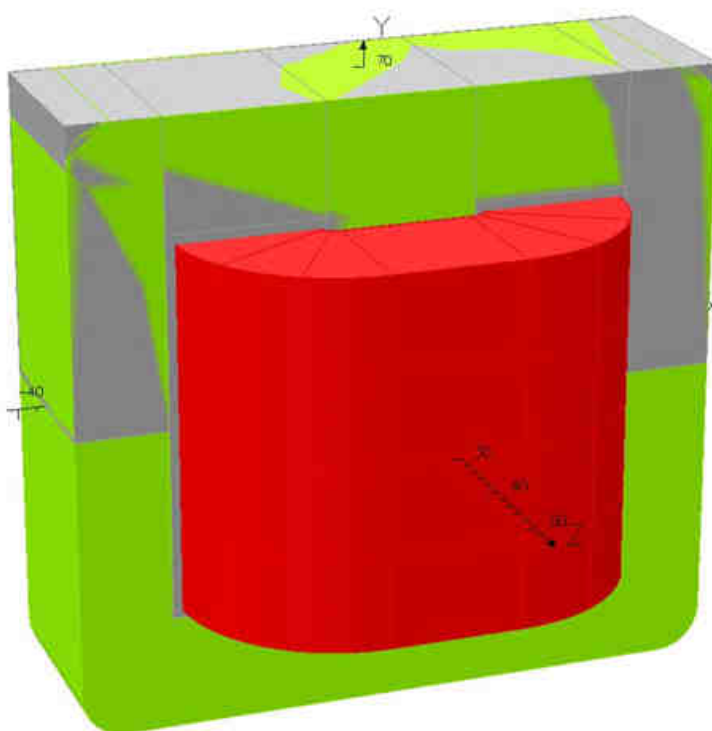
Streszczenie – W artykule opisano problemy powstałe w procesie tworzenia modelu i realizacji trójwymiarowej symulacji komputerowej, elektromagnesu stycznika prądu przemiennego. W tym celu wykorzystano pakiet Modeller wbudowany w program Opera 3D. Opisano również algorytm postępowania dotyczący procesu tworzenia modelu obiektu oraz zaprezentowano wyniki przeprowadzonych symulacji.

Słowa kluczowe: wspomaganie projektowania, model FEM, modelowanie zjawisk elektromagnetycznych

1 Wprowadzenie

Opera 3D jest bardzo zaawansowanym programem obliczeniowym użytecznym w procesie przeprowadzania analiz elektromagnetycznych. Wykorzystuje on metodę elementu skończonego, która jest podstawową metodą wykorzystywaną w tym programie. Modelowanie można także realizować za pomocą innych, powszechnie znanych i stosowanych technik analitycznych, stosowanych do rozwiązywania równań różniczkowych. Techniki te wymagają jednak specjalnych ulepszeń, tak aby można było je zastosować do obliczeń pól elektromagnetycznych w tak skomplikowanych urządzeniach [1]. W stosowanym narzędziu obliczeniowym, dostęp do funkcji modelowania możliwy jest poprzez moduł Geometric Modeller OPERA-3D oraz moduł Post - Processor. Dzięki temu użytkownik ma możliwość tworzenia modeli o skomplikowanej geometrii, definiowania właściwości materiałów w tym np. materiałów o nieliniowych oraz anizotropowych właściwościach. Ponadto program oferuje również, po wykonaniu symulacji i przeprowadzeniu analiz, możliwość generowania wykresów, map konturowych itp. [2, 5].

Celem pracy było stworzenie modelu polowego elektromagnesu, a następnie przeprowadzenie obliczeń jego charakterystyk statycznych. Gotowy model elektromagnesu stycznika prądu przemiennego przedstawia rys. 1.



Rys. 1. Gotowy model elektromagnesu stycznika prądu przemiennego

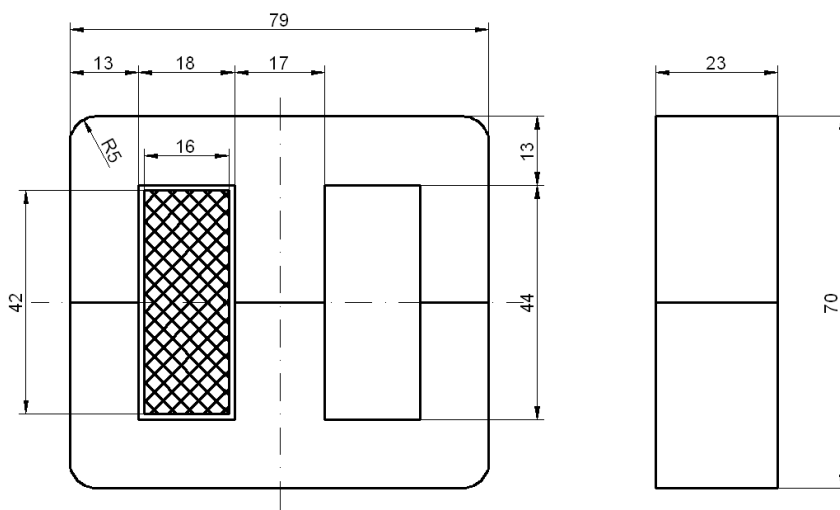
2 Modelowanie stycznika prądu przemiennego

Do stworzenia rdzenia i zwory, w rzeczywistym obiekcie, wykorzystano materiał ferromagnetyczny - blacha krzemowa, zaś uzwojenie cewki stycznika wykonano z drutu miedzianego. Na rys. 2 przedstawiono przekrój poprzeczny elektromagnesu stycznika prądu przemiennego wraz z jego charakterystycznymi wymiarami.

W pierwszej kolejności stworzono model połowy, umożliwiający przeprowadzenie obliczeń charakterystyk statycznych elektromagnesu stycznika prądu przemiennego.

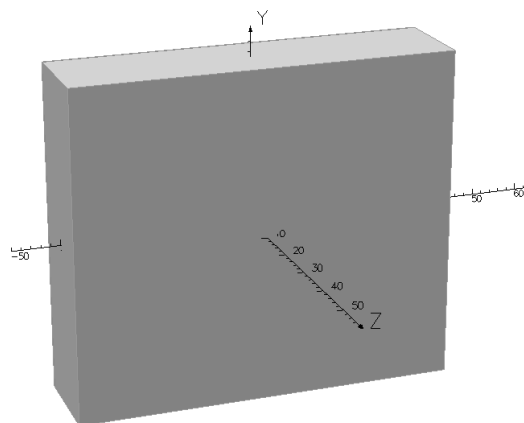
Posiadając model połowy, jedną z wykonanych analiz było określenie zależności pomiędzy siłami przyciągania występującymi między zworą, a rdzeniem, w zależności od dzielącej ich odległości. Obliczono również inne charakterystyki, o których mowa będzie w dalszej części.

Aby otrzymać model połowy elektromagnesu stycznika prądu przemiennego konieczne było stworzenie modelu bryłowego, czyli odwzorowanie geometrii powyższego urządzenia w pakiecie Modeller programu OPERA-3D.



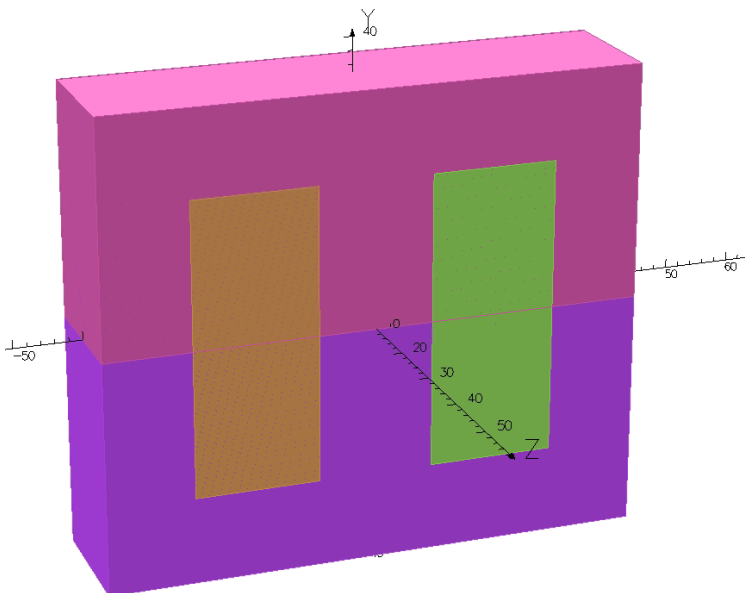
Rys. 2. Przekrój poprzeczny elektromagnesu stycznika prądu przemiennego (w stanie zamkniętym)

Pierwszym krokiem do stworzenia modelu było uruchomienie modułu Modeller w programie OPERA-3D, następnie utworzenie prostopadłościanu za pomocą opcji menu (Create a Block) o odpowiednich wymiarach, będący całą zworą, rdzeniem oraz oknami na uzwojenia elektromagnesu stycznika prądu przemiennego. Prostopadłościan ten przedstawia rysunek 3.



Rys. 3. Prostopadłościan - główny element przyszłego stycznika

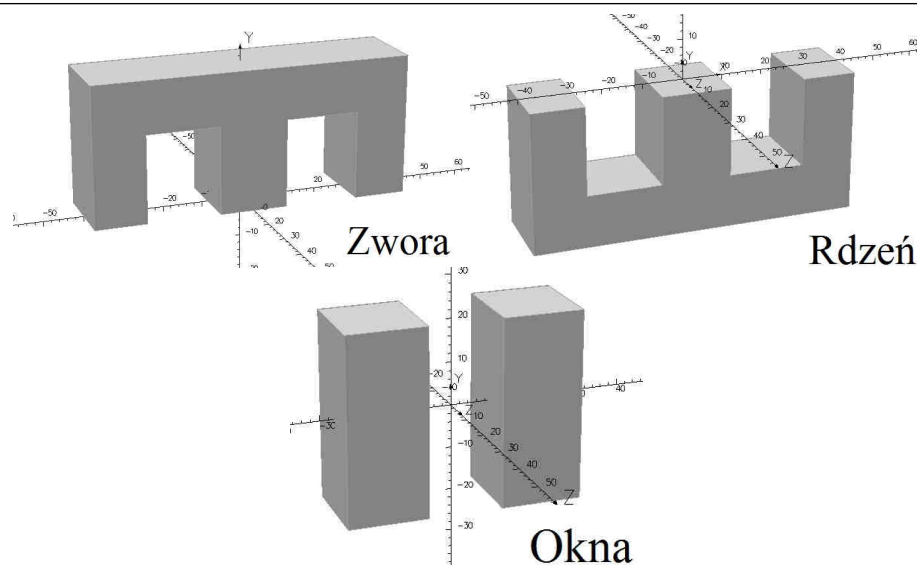
Następnie za pomocą tego samego polecenia (Create a block) stworzono pozostałe prostopadłościany, które rozdzieliły wszystkie połączone elementy na konkretne części, czyli: zworę, okna, przez które będzie przechodziło uzwojenie elektromagnesu stycznika prądu przemiennego i rdzeń. Gotowe prostopadłościany znajdują się na rys.4.



Rys. 4. Główne elementy elektromagnesu - zwora, rdzeń oraz okna

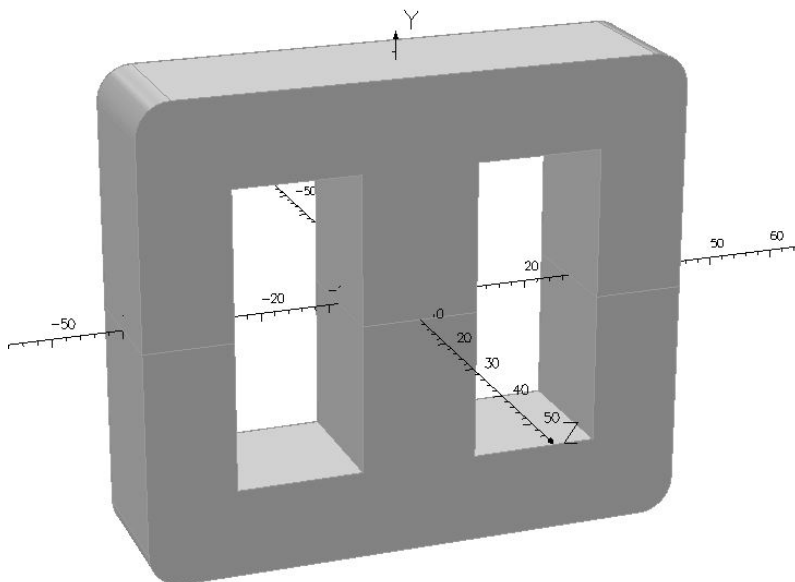
Na rys. 4 znajdują się jedynie kształty reprezentujące zwory, rdzeń oraz okna. W celu usunięcia okien w bryłach zwory oraz rdzenia wykorzystano funkcję (Trim overlap). Jest to funkcja pozwalająca wykonać operacje boolowskie na bryłach, czyli wyciąć kształt jednej bryły z drugiej bryły.

W celu wycięcia jednej bryły z drugiej, potrzeba było użyć funkcji (Trim overlap with regularization), a następnie funkcji (Pick Entities by Property, lista rozwijana) lub (Pick Entity), by zaznaczyć odpowiednie bryły, do których ma się odnieść operacja. Pierwszą bryłą jaką zaznaczono był główny prostopadłościan znajdujący się na rys. 3, a następnie zwora, w skutek czego prostopadłościan będący zworą został odjęty od prostopadłościanu rdzenia. Operacja ta została również wykorzystana do odjęcia brył okien od brył rdzenia oraz zwory.



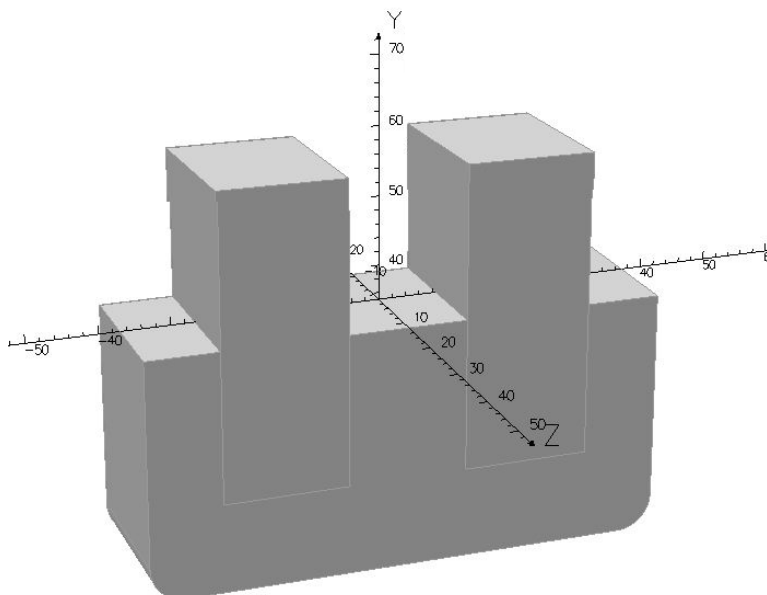
Rys. 5. Wycięte elementy

Kolejnym krokiem było wykonanie zaokrągleń rogów zwory oraz rdzenia. W tym celu użyto funkcji (Blend and Chamfer), następnie została wybrana opcja (blend), w której nadano odpowiednie wartości dla krawędzi oraz kąta zaokrąglenia. Gotową bryłę poddaną powyższym modyfikacjom przedstawia poniższy rysunek.



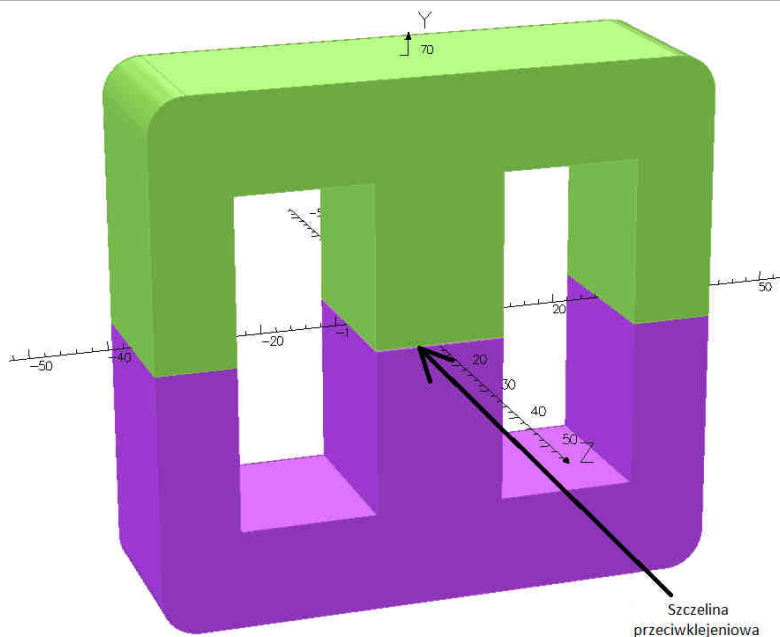
Rys. 6. Zaokrąglone narożniki zwory i rdzenia

Następny krok, który podjęto to wymodelowanie kolejnego prostopadłościanu za pomocą wyciągnięcia górnej powierzchni środkowej kolumny rdzenia w celu skrócenia środkowej kolumny zwory, aby powstała tzw. szczelina przeciwklejoniowa. Aby ułatwić tworzenie powyższego prostopadłościanu należało ukryć zworę. W tym celu wykorzystana została opcja (Hide) zawarta w funkcji (Selection). Rezultat przedstawiono na poniższym rysunku.



Rys. 7. Fragment modelu z ukrytą zworą elektromagnesu stycznika prądu przemiennego

Aby stworzyć prostopadłościan reprezentujący szczelinę przeciwklejoniową, użyto następujących funkcji: (Pick Faces), za pomocą której wybrano powierzchnię środkowej kolumny rdzenia oraz funkcja (Copy), aby skopiować wcześniej wspomnianą powierzchnię. Kopia tej powierzchni posłużyła jako podstawa nowego prostopadłościanu. Kolejnym krokiem było użycie funkcji (Vectors), a następnie zaznaczenie w niej opcji (Face normal) oraz uzupełnienie pola (Scale factor for vectors) liczbą 3 oraz zatwierdzenie wszystkich zmian. Dzięki tej modyfikacji możliwy był następny krok: korzystając z funkcji (Sweep Face) oraz wprowadzając porządkany parametr wysokości bryły i zatwierdzeniu, zaznaczona powierzchnia stworzyła prostopadłościan symulujący szczelinę przeciwklejoniową. Następnie zwora została uwidoczniła dzięki opcji (Clear) zawartej w funkcji (Selection).

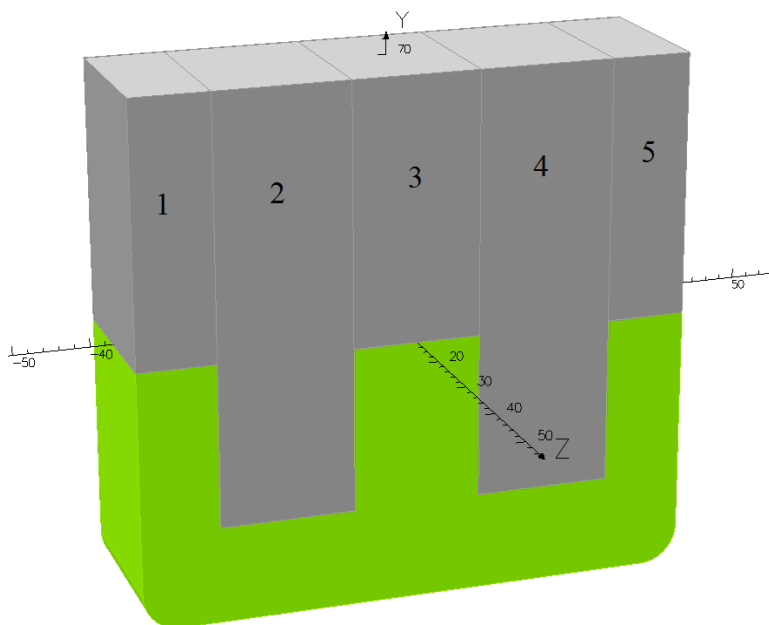


Rys. 8. Szczelina przeciwklejieniowa elektromagnesu stycznika prądu przemiennego

Aby odjąć obiekt szczeliny przeciwklejieniowej od zwory elektromagnesu stycznika prądu przemiennego, zastosowano funkcje w poniższej kolejności: (Pick Bodies), za pomocą której zaznaczono kolejno zworę oraz szczelinę przeciwklejieniową, a następnie (Substraction with regularization). Kolejność zaznaczania była ważna, gdyż funkcja odejmująca domyślnie odejmuje drugą bryłę od pierwszej bryły. Z racji tego iż powyższy model ma posłużyć do obliczeń charakterystyk statycznych konieczne było stworzenie brył imitujących szczeliny powietrzne oraz zwiększenie wysokości okien. Bryły te są niezbędne, gdyż na skutek oddalania się od siebie zwory i rdzenia elektromagnesu stycznika prądu przemiennego zwiększa się przerwa pomiędzy nimi, co w rzeczywistym układzie jest szczeliną powietrzną [4]. Wysokość brył imitujących szczelinę powietrzną dobrano tak, aby uwzględniono największą przewidzianą przerwę.

Podczas tworzenia brył imitujących szczeliny powietrzne można było skorzystać z wyciągania powierzchni w sposób analogiczny do powstania szczeliny przeciwklejieniowej bądź za pomocą funkcji (Create a block). W celu powiększenia wysokości okien została zastosowana funkcja (Sweep Face), tak jak to zostało wcześniej opisane, lecz z tą różnicą, że należało zaznaczyć opcję (Remove starting face). Opcja ta zmieniła wymiary pierwotnej bryły, a nie stworzyła dodatkowy prostopa-

dłościan zaczynający się przy zaznaczonej powierzchni. Efekty powyższych operacji przedstawia rys. 8, na którym ponownie zwora została ukryta w celu bardziej przejrzystej prezentacji.

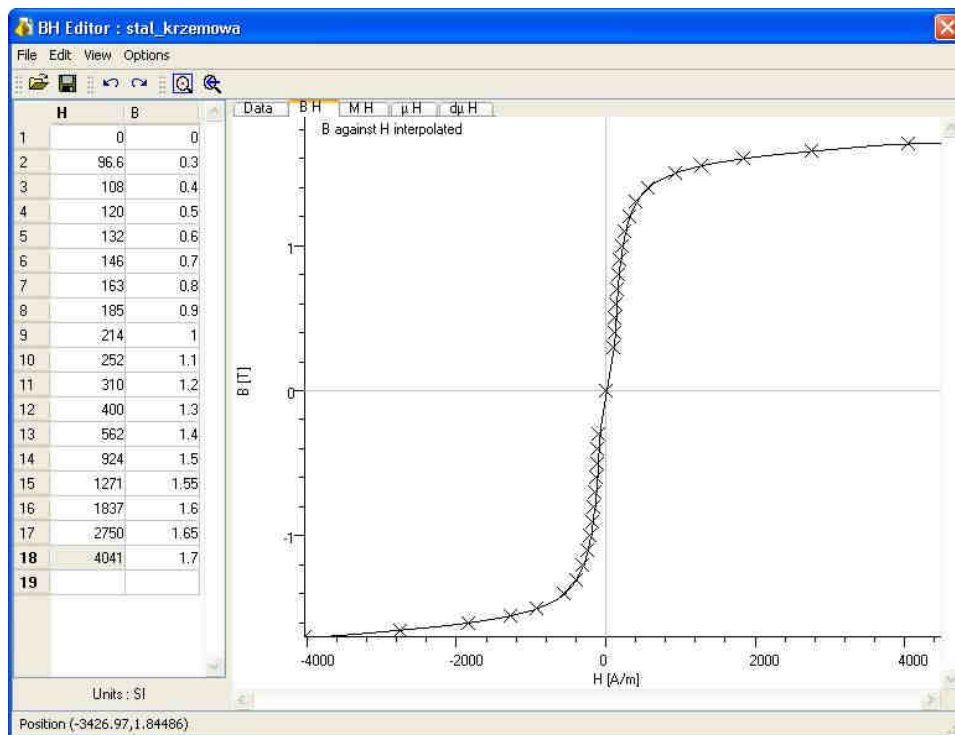


Rys. 9. Szczeliny powietrzna elektromagnesu stycznika prądu przemiennego - numery 1 - 5

Przeprowadzenie obliczeń wymagało dodania parametrów materiałów poprzez nadanie odpowiednich etykiet komórkom modelu. Bardzo istotnym parametrem jest względna przenikalność magnetyczna. Aby uwzględnić nieliniowość materiału, zamiast stałej wartości przenikalności magnetycznej podano charakterystykę magnesowania materiału. Materiał, który użyto do zbudowania zwory i rdzenia to blacha krzemowa.

Operację przypisania parametrów materiałów wykonano za pomocą funkcji (Pick Cells), później zaznaczono porządkany prostopadłościan, a następnie dzięki funkcji (Cell Properties) dodano odpowiednie etykiety materiałów wraz z wybranymi parametrami. Na przykład dla zwory oraz rdzenia dodano materiał stal_krzemowa, dla szelin powietrznych materiał air. Dla wcześniej zdefiniowanych etykiet materiałów użytkownik może wprowadzić odpowiednie parametry fizyczne dla wybranych materiałów. Aby wprowadzić punkty charakterystyki magnesowania dla stali krzemowej użyto funkcji (Set BH Curve Properties), następnie

dodano taką samą etykietę jak wcześniej, czyli stal_krzemowa. Po otwarciu edytora punktów charakterystycznych z okna (Options) zastosowano funkcję (Convert to SI), a następnie wprowadzono dane, dzięki czemu po przejściu do BH otrzymno charakterystykę przedstawioną na rys. 10.



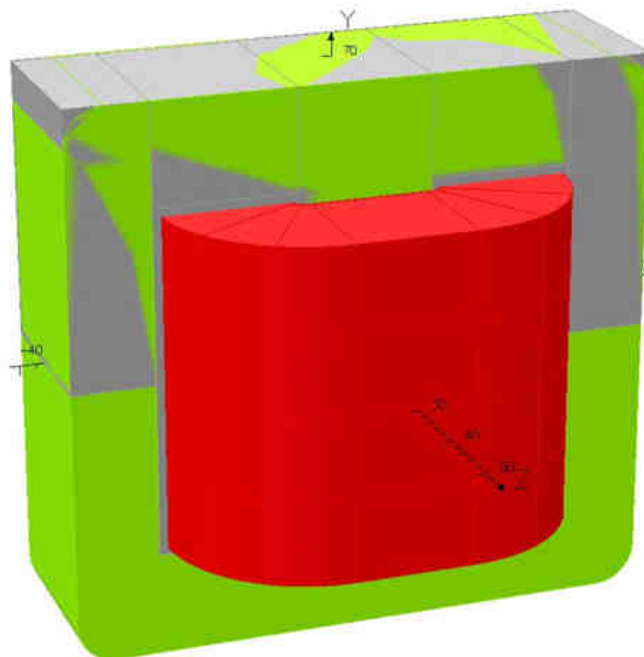
Rys. 10. Charakterystyka magnesowania stali krzemowej - wykres BH

W składzie chemicznym stali krzemowej dominuje żelazo, przez co charakterystyka magnesowania jest bardzo zbliżona do charakterystyki czystego żelaza [3].

Kolejnym krokiem było zamknięcie BH editora, wybranie opcji (View) dla materiału stal_krzemowa z funkcji (Set BH Curve Properties), a następnie wybranie parametrów - dla (Permeability options: Nonlinear) a dla (Assign a BH curve: stal_krzemowa). Po takim zdefiniowaniu materiału nadszedł czas na stworzenie uzwojenia elektromagnesu stycznego prądu przemiennego.

W celu stworzenia uzwojenia modelowanego elektromagnesu stycznego, zasilanego napięciowo wykorzystano funkcję sparametryzowanego uzwojenia typu (Racetrack). Uzwojenie będzie się

składało z czterech części. Każda z tych części będzie posiadała odpowiednio $\frac{1}{4}$ liczby wszystkich uzwojeń.



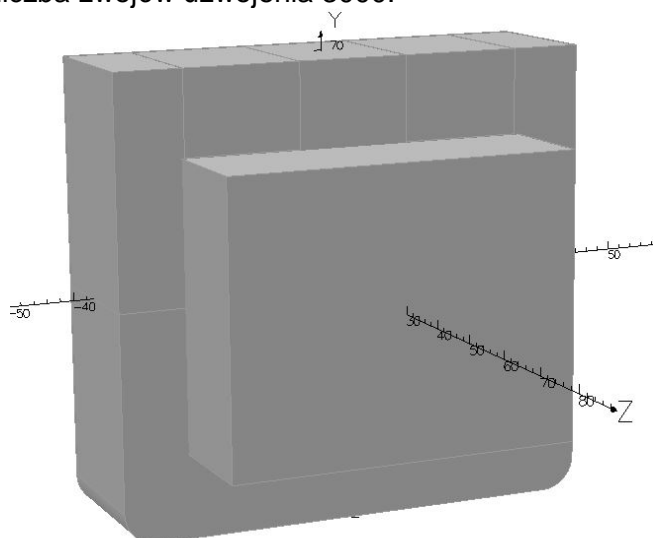
Rys. 11. Efekt końcowy pracy nad model elektromagnesu stycznika prądu przemiennego

Każdą część połączono szeregowo, a całość zasilono z jednego źródła napięcia. Rezystancję czterech części uzwojenia zastąpiono jednym rezystorem o rezystancji równej sumie czterech części uzwojenia. W celu utworzenia uzwojenia, należało uruchomić funkcję (Racetrack), następnie w zakładce (Local Coordinate Systems) wprowadzić położenie uzwojenia dla lokalnego układu współrzędnych, w zakładce (Racetrack Parameters) wprowadzić wymiary uzwojenia, w zakładce (Source Drivers) zaznaczyć, że element ten ma być elementem typu (Circuit element), kolejno nadać nazwę pierwszej części uzwojenia oraz wprowadzić odpowiednią wartość tolerancji. Aby stworzyć kolejną część uzwojenia wystarczyło powtórzyć powyższe kroki z tą różnicą, że w przypadku definiowania parametrów w zakładce (Racetrack Parameters) w oknie (Point on cross-section) dopisać +h, gdzie h to wysokość wcześniej stworzonej części uzwojenia. W analogiczny sposób powstały kolejne dwie części uzwojenia, co przedstawia rys. 10.

3 Symulacja i wyniki obliczeń

Zakończenie etapu modelowania elektromagnesu stycznika prądu przemiennego pozwoliło przejść do następnego etapu, jakim było wykonanie obliczeń. Niezbędnym do realizacji tego celu było połączenie uzwojeń w zamknięty obwód. W tym celu wybrano odpowiedni solver (ELEKTRA Steady State). Korzystając z funkcji (ELECTRA-SS) oraz zawartej w niej opcji (Set Circuit Properties) stworzono obwód, w którym zdefiniowano poniższe parametry:

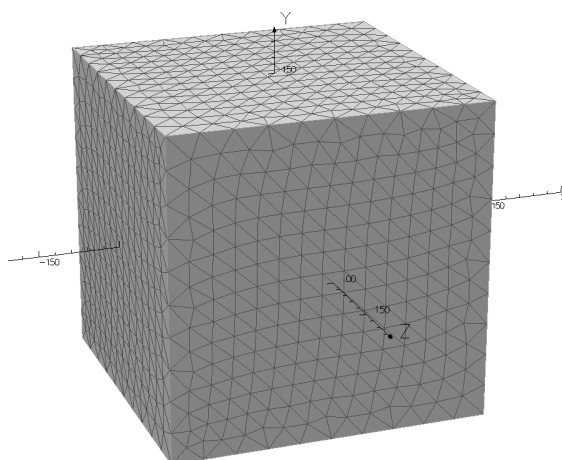
- uzwojenie elektromagnesu zasilane napięciem sinusoidalnym zmiennym 400V (wartością skuteczną) o częstotliwości 50Hz,
- całkowita rezystancja uzwojenia 110 Ω ,
- liczba zwojów uzwojenia 3000.



Rys. 12. Ostateczna postać modelu elektromagnesu stycznika prądu przemiennego z obszarami powietrza

Kolejną operacją, którą należało wykonać, by przystąpić do wykonywania obliczeń, było stworzenie prostopadłościanów, które symulowałyby obszary powietrza wokół uzwojenia elektromagnesu. Stworzenie tych dodatkowych prostopadłościanów zapobiegło pojawieniu się błędów podczas generowania objętościowej siatki elementów skończonych. Na zewnętrznych powierzchniach prostopadłościanów imitujących obszary powietrza zostały także zdefiniowane odpowiednie warunki brzegowe. Bryły imitujące obszary powietrzne zostały stworzone za pomocą funkcji (Create a block) - rys. 11, a następnie przypisano do nich odpowiednie etykiety materiałów za pomocą funkcji (Cell properties).

Cały model został otoczony przestrzenią w postaci prostopadłościanu, który wykonano w następujący sposób. Za pomocą funkcji (Model symetry) określono warunki brzegowe typu (Tangential magnetic). Następnie stworzono środowisko poprzez utworzenie bryły za pomocą funkcji (Create Model Body). W funkcjach (Generate Surface Mesh) oraz (Generate Volume Mesh) zdefiniowano odpowiednie parametry rys. 13.



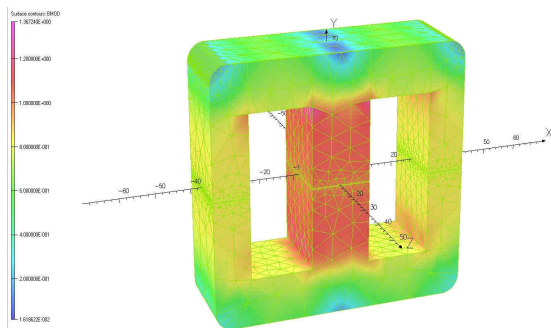
Rys. 13. Środowisko otaczające model – blok zawierający powietrze

Obliczenia wykonano za pomocą solwera (ELECTRA Steady State Settings). Za pomocą menu (Post - Processor) wyświetlono rozkład modułu indukcji w rdzeniu dla różnych chwil czasowych zdefiniowanych za pomocą kąta reprezentującego aktualną chwilę czasową. Przy użyciu wcześniej opisanych funkcji, służących do zaznaczania obiektów oraz funkcji (Transform) zmieniono wartość szerokości szczeliny powietrznej.

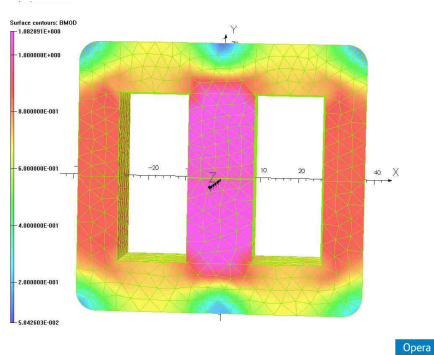
Proces zakończony otrzymaniem wyników przebiegał w następujący sposób: generowanie siatki elementów skończonych, określenie ścieżki zapisu wyników do pliku oraz uruchomienie solwera, a następnie obserwacja wyników obliczeń w module (Post - Processor).

Poniżej przedstawiono siatki elementów skończonych, chwilę czasową, reprezentowaną przez kąt 45 stopni, dla trzech wartości liczby elementów wraz z tabelami zawierającymi obliczone wartości sił i prądów w funkcji odległości zwory od rdzenia.

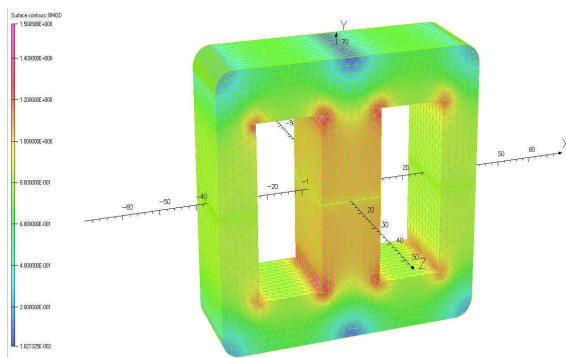
Wygenerowaną siatkę zawierającą 117490 elementów skończonych przedstawiono na rys. 14. Wygenerowaną siatkę zawierającą 234432 elementów skończonych przedstawiono na rys. 15. Wygenerowaną siatkę zawierającą 614486 elementów skończonych przedstawiono na rys. 16



Rys. 14. Siatka elementów skończonych - model 1



Rys. 15. Siatka elementów skończonych - model 2

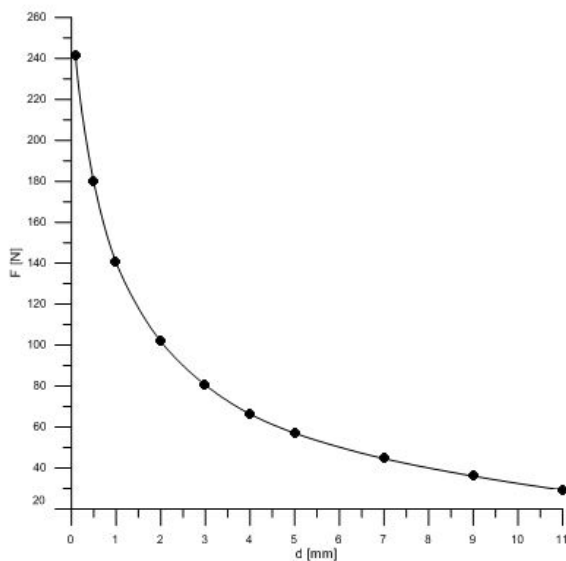


Rys. 16. Siatka elementów skończonych - model 3

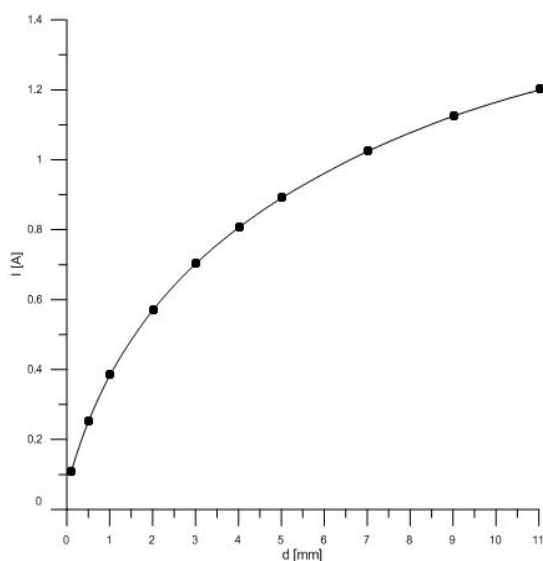
Tabełę z obliczonymi wartościami sił F , natężeniami prądów I w funkcji odległości przedstawiono w tabeli 1.

Tabela. 1. Obliczone wartości siły i wartości skutecznej pobieranego prądu

Odległość zwory	Model 1		Model 2		Model 3	
d [mm]	F [N]	Isk [A]	F [N]	Isk [A]	F [N]	Isk [A]
0,1	239,24	0,108939	241,2	0,109539	241,78	0,109759
0,5	177,56	0,25016	180	0,385001	181,03	0,252817
1	137,99	0,381264	140,5	0,571098	141,33	0,386131
2	99,84	0,564248	101,75	0,704312	102,32	0,572607
3	78,38	0,694538	80,35	0,807359	80,82	0,707074
4	65,01	0,798658	66,18	0,807359	66,85	0,812486
5	55,4	0,879714	56,85	0,89206	57,42	0,897583
7	43,08	1,009997	44,41	1,025365	44,75	1,031466
9	34,67	1,107349	35,85	1,126069	36,14	1,131931
11	28,23	1,182864	29,06	1,200851	29,51	1,209264



Rys. 17. Obliczona zależność siły przyciągania zwory w funkcji odległości zwory od rdzenia stycznika



Rys. 18. Obliczona zależność wartości skutecznej pobieranego prądu w funkcji odległości zwory od rdzenia stycznika

4 Wnioski

Wraz ze zwiększającą się liczbą elementów modelu, zaobserwowano np. spadek wartości indukcji magnetycznej z 1,458 T poprzez 1,455 T do 1,450 T (pomiaru indukcji wykonano w tym samym punkcie, przy tej samej odległości zwory od rdzenia), oraz odpowiednio dłuższe czasy wykonania obliczeń. Czasy obliczeń dla kolejnych modeli wynosiły ok. 50 sekund, ok. 100 sekund, ok. 480 sekund. Wartości sił F , jak i natężenia prądów I dla każdego z przypadków były bardzo zbliżone.

Otrzymane charakterystyki $F=f(d)$ oraz $I=f(d)$ odzwierciedlają zachowanie rzeczywistego obiektu elektromagnesu stycznika prądu przemiennego, jakie zaobserwowano podczas prób w laboratorium, mianowicie wraz ze wzrostem odległości zwory od rdzenia wartość siły F malała wykładniczo. Ponadto, w przypadku oddalania się zwory od rdzenia elektromagnesu wartość prądu rostała wykładniczo.

5 Literatura

- [1] Elbaum J., *Obwody magnetyczne*, Państwowe Wydawnictwo Techniczne, Warszawa 1959

- [2] Opera – 3D Reference manual. Vector Fields Limited, England
- [3] Ferrara E., Olivetti E., Fiorillo F., Forton E., Martino L., Rocchino L., *Microstructure and magnetic properties of pure iron for cyclotron electromagnets*, Journal of Alloys and Compounds, Volume 615, Supplement 1, 5 December 2014, Pages S291-S295
- [4] Chu S. Y., Hwang Y. J. Choi S., Na J. B., Kim Y. J. Chang K. S., Bae D. K., Lee C. Y., Ko T. K., *Design, manufacture and performance evaluation of HTS electromagnets for the hybrid magnetic levitation system*, Physica C: Superconductivity, Volume 471, Issues 21-22, November 2011, Pages 1501-1505
- [5] Krawczyk A. Wiak S. (editors), *Electromagnetic fields in electrical engineering*, IOS Press, Amsterdam 2002

THREE-DIMENSIONAL MODELING OF AN AC CONTACTOR

Summary: The article describes the problems arising in the process of model creation and implementation of three-dimensional computer simulation, of solenoid of AC contactor. For this purpose a Modeller package integrated into the Opera 3D, was used. Moreover, the author describes the algorithm of conduct for the creation of the object model, and presents the results of simulations.

Keywords: aided design, FEM model, modeling of electromagnetic phenomena