

Wykorzystanie symulacji MES w projektowaniu czujników indukcyjnych

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań opartych na modelowaniu MES będące kontynuacją badań w zakresie oceny czułości czujnika indukcyjnego w pomiarach grubości warstw ochronnych metalu. Przedstawiono nowe efekty badań naukowych weryfikujące dotychczasowe pomiary techniczne dzięki opracowaniu nowego modelu czujnika indukcyjnego w programie ANSYS Maxwell.

Abstract. The article presents the results of research based on FEM modeling which are continuation of research in the evaluation of the sensitivity of an inductive sensor in measuring the thickness of the protective layer of metal. There were presented new results of verification the existing technical measures through the development of a new model of an inductive sensor in the program ANSYS Maxwell. (The use of FEM simulation in the design of inductive sensors)

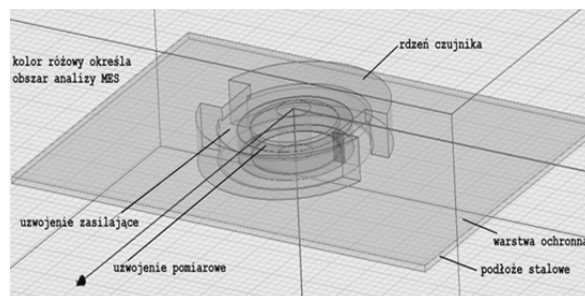
Słowa kluczowe: przetworniki pola magnetycznego, badanie pola magnetycznego, symulacja komputerowa, modelowanie

Keywords: magnetic field transducers, magnetic field investigation, computer simulation, modeling

Wstęp

Metoda Elementów Skończonych albo Metoda Elementu Skończonego (w skrócie MES, ang. finite element method, w skrócie FEM) jest zaawansowaną metodą rozwiązywania układów równań różniczkowych, opierającą się na podziale dziedziny (tzw. dyskretyzacji) na skończone elementy, dla których rozwiązanie jest przybliżane przez konkretne funkcje i przeprowadzaniu faktycznych obliczeń dla węzłów tego podziału [1,2,3,4]. Metoda MES wykorzystana została do weryfikacji badań laboratoryjnych dotyczących oceny czułości czujnika indukcyjnego w pomiarach grubości warstw ochronnych metalu prowadzonych w laboratorium metrologii Politechniki Częstochowskiej [5]. Obliczenia MES wykonano w Instytucie Edukacji Technicznej i Bezpieczeństwa AJD w Częstochowie [6,7,8,9]. Obliczenia symulacyjne uzyskano na podstawie wykonanego modelu samego czujnika jak i układu zasilającego w programie ANSYS Maxwell. Program ten służy do obliczeń dla inżynierów zajmujących się projektowaniem i analizowaniem urządzeń elektromagnetycznych i elektromechanicznych w środowisku 2D/3D [10,11,12,13,14]. Działanie programu opiera się na równaniach Maxwella a więc pozwala na projektowanie i analizowanie dwu- i trójwymiarowych układów elektromagnetycznych i elektromechanicznych i elektrycznych z uwzględnieniem efektu naskórkowego, zbliżenia czy prądów wirowych [15,16]. Uzyskane tą drogą wyniki pomiarów posłużyły do opracowania modelu czujnika indukcyjnego na potrzeby dalszych badań. Opracowanie rzeczywistego modelu oraz ustalenie parametrów symulacji pracy czujnika jest etapem wyjściowym do dalszych innowacji w zakresie budowy czujnika jak i opracowania różnych kombinacji układów zasilających decydujących o skuteczności działania układu pomiarowego. Jak już wspomniano w licznych autorskich publikacjach, czujnik indukcyjny zbudowany został z dwóch uzwojeń nawiniętych na wspólnym rdzeniu ferromagnetycznym. Jedno uzwojenie jest zasilane sygnałem pomiarowym o zmiennej częstotliwości i określonej amplitudzie. Drugie uzwojenie pełni rolę pomiarową i służy do badania wielkości pola magnetycznego prądów wirowych indukowanych w badanej powierzchni w celu określenia grubości warstwy ochronnej metalu na podstawie próbek o określonej grubości podłoża i warstwy wierzchniej [17,18,19]. Na podstawie pomiarów laboratoryjnych wyniki poddano weryfikacji za pomocą wykonanego wirtualnego modelu metodą MES 3D. Na podstawie wykonanych badań porównawczych wyciągnięto konstruktywne wnioski końcowe.

Wykonanie modelu MES ma na celu opracowanie stanowiska symulacyjnego do dalszych badań. Uzyskane w ten sposób wyniki, służyć będą do określenia poprawności wykonanego modelu symulacyjnego oraz wdrożenia nowych rozwiązań konstrukcyjnych mających na celu poprawę pracy czujnika. Wykonany model symulacyjny może być również przykładem oceny przydatności programów symulacyjnych w dydaktyce na poziomie szkoły wyższej o profilu technicznym [20,21].

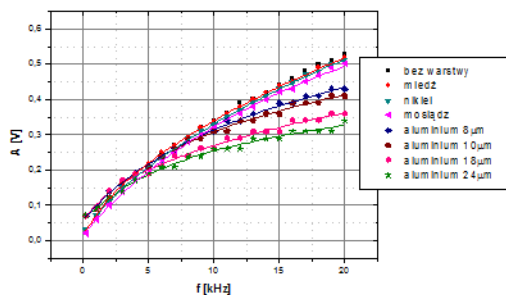


Rys.1. Model czujnika w programie ANSYS Maxwell

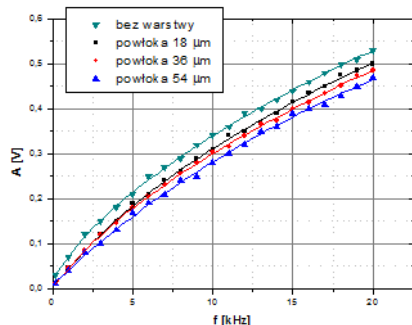
Projekt modelu czujnika w programie ANSYS Maxwell

W artykule przedstawiono jedynie wybrane problemy z jakimi spotkał się autor podczas wykonania modelu czujnika. Poprawne wykonanie modelu w programie MES gwarantuje najefektywniejsze odwzorowanie naturalnego środowiska pracy. Dużą uwagę przywiązano do szczegółowego oddania rzeczywistości poszczególnych elementów składowych czujnika, w tym przypadku uzwojeń czujnika. Dotychczasowe badania wykonano w oparciu o model przedstawiony na rysunku 6, w którym uzwojenia zinterpretowano jako *CreateRegion* a więc jako toroidalny obszar stworzony z bryły któremu nadano właściwości i parametry symulujące działanie uzwojenia. w nowszym opracowaniu modelu symulacyjnym uzwojenia zaprogramowano bardziej szczegółowo posługując się gotowym modelem spirali dostępnym w bibliotece *DLL/RectangularSpiral*. Dzięki zmianom parametrów geometrycznych cewki płaskiej skonstruowano projekt cewki jednozwojowej (cylicylnicznej). Oczywiście na potrzeby wykonania *n*-zwojów cewki zasilającej i pomiarowej, zaistniała konieczność powielenia poszczególnych cewek o wspólnej osi symetrii ale o większej średnicy zewnętrznej (rys.7). Na tym etapie pracy powstała struktura o *n*-uzwojeniach zgodnie z projektem rzeczywistym, jednak o przekroczonej

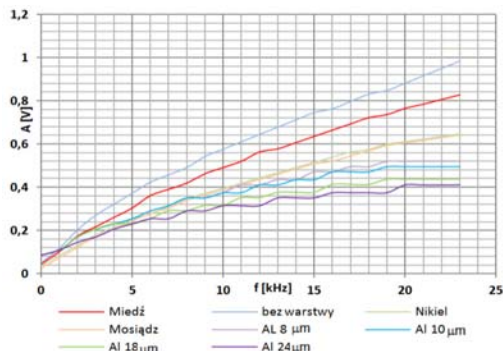
maksymalnej średnicy zewnętrznej całego uzwojenia, które zgodnie z przyjętym w projekcie rdzeniem P22/13 fizycznie nie zmieściłoby się w jego wnętrzu. Dlatego też dokonano zmniejszenia odległości wolnych przestrzeni domyślnych pomiędzy poszczególnymi warstwami cewek do wartości minimalnych możliwych do przyjęcia w programie (rys.8). Kolejny problem wynikał z położenia wzajemnego początków i końców cewek poszczególnych warstw uniemożliwiając połączenie ich płaszczyzn przekrojowych (rys.9). Dlatego parzyste uzwojenia obrócono o nieznaczny kąt i tym sposobem uzyskano pełne uzwojenie zasilające oraz drugie - pomiarowe (rys.10). Następnie cewki przeniesiono do modelu rdzenia oraz wykorzystując wcześniej opracowany w programie model zasilania cały układ poddano badaniom na podstawie poniższych założeń.



Rys.2. Amplituda sygnału pomiarowego (dla sygnału o przebiegu sinusoidalnym) dla różnych grubości powłok przewodzących i odmiennych własności materiałowych na podłożu ferromagnetycznym (badania laboratoryjne)



Rys.3. Charakterystyki amplitudy sygnałów sinusoidalnych dla różnych grubości powłok izolacyjnych na podłożu ferromagnetycznym (badania laboratoryjne)

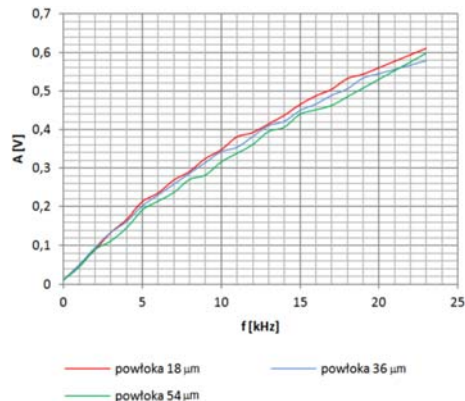


Rys.4. Amplituda sygnału pomiarowego (dla sygnału o przebiegu sinusoidalnym) dla różnych grubości powłok przewodzących i odmiennych własności materiałowych na podłożu ferromagnetycznym (symulacja MES)

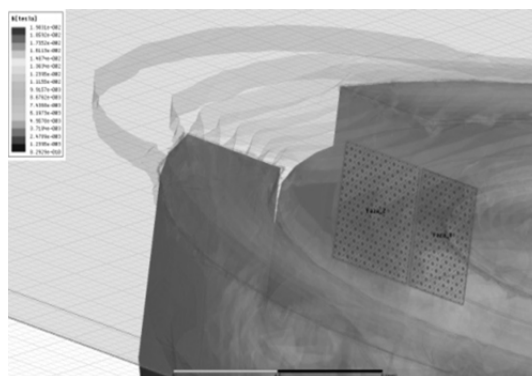
Badania laboratoryjne przetwornika indukcyjno-ściowego transformatorowego

Do przeprowadzenia rzeczywistych pomiarów grubości warstw wierzchnich wykonano wzorcowe próbki o określonej grubości podłoża i warstwy wierzchniej.

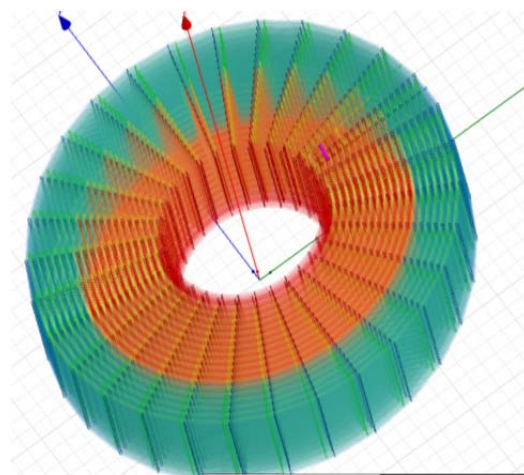
Badania zostały prowadzone dla podłoża ferromagnetycznych, przetwornik był zasilany głównie sygnałami sinusoidalnymi o różnych częstotliwościach. Jako warstwy wierzchniej użyto powłok o właściwościach nieferromagnetycznych i przewodzących.



Rys.5. Charakterystyki amplitudy sygnałów sinusoidalnych dla różnych grubości powłok izolacyjnych na podłożu ferromagnetycznym (symulacja MES)



Rys.6. Przykładowy obraz indukcji magnetycznej w badanej próbce (widok od strony badanej powierzchni)



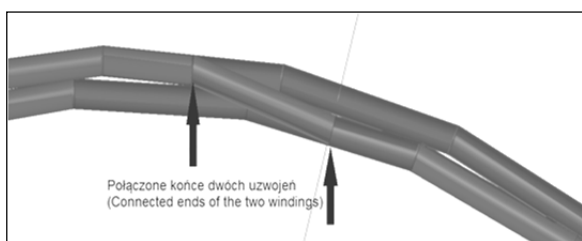
Rys.7. Widok uzwojeń (kolor pomarańczowy - uzwojenie zasilające, zielone - uzwojenie pomiarowe)

Wyniki pomiarów na podstawie MES w programie symulacyjnym

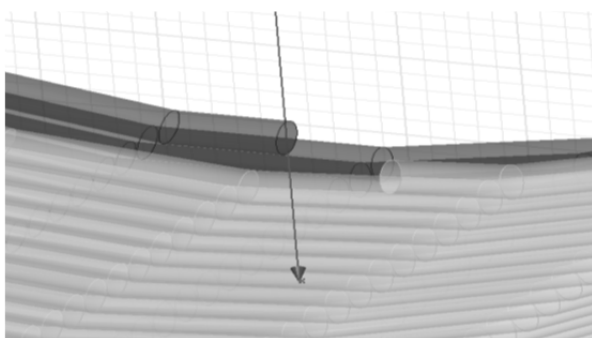
Wyniki badań laboratoryjnych posłużyły do opracowania układu zasilającego oraz analizy uzyskanych danych sygnału pomiarowego w metodą elementów skończonych (rys.4,5).



Rys.8. Widok częściowy dwóch cewek, cewka zasilająca (górna część zdjęcia) po minimalizacji odległości poszczególnych warstw oraz cewka pomiarowa o zbyt dużych wolnych przestrzeniach pomiędzy kolejnymi uzwojeniami (dolna część zdjęcia).



Rys.9. Metoda połączeń poszczególnych uzwojeń poprzez wprowadzony, dodatkowy łącznik.



Rys.10. Przesunięcie płaszczyzn pomiędzy poszczególnymi połączeniami uzwojeń

Podsumowanie

Porównanie wyników można dokonać do częstotliwości nie większej niż 20kHz, albowiem zaobserwowano iż podczas badań laboratoryjnych powyżej tej częstotliwości indukcyjność ma praktycznie stałą wartość. Badania MES ukazały jednak, iż powyżej tej częstotliwości można zauważyć wzrost indukcyjności. Jednak dla celów porównawczych obydwu metod, maksymalną rozpatrywaną częstotliwość ograniczono do 20kHz, nie jest to jedyna zauważalna różnica. Porównując przebiegi na rysunku 2 oraz 4 widać wyraźnie, iż występują różnice w wartości maksymalnych amplitud dla poszczególnych przebiegów. Amplitudy sygnału pomiarowego o przebiegu sinusoidalnym wyznaczone metodą laboratoryjną dla poszczególnych grubości powłok przewodzących są niższe niż wartości uzyskane metodą MES. Przy wartości 20kHz maksymalna amplituda dla przebiegu bez warstwy ochronnej wynosi 0,52V, natomiast dla MES aż 0,84V. Dla warstwy Al₂₄μm

wynosi 0,35V natomiast wg. MES 0,4V. Błąd bezwzględny wydaje się dla tej wielkości niewielki (0,05V), jednak dla opracowania modelu czujnika charakteryzującego się dużą dokładnością wymaga dalszej analizy.

Charakterystyki amplitudy sygnałów sinusoidalnych dla różnych grubości powłok izolacyjnych na podłożu ferromagnetycznym (rys.2,4) pokazują zbliżony przebieg jednak i w tym przypadku występują nieznaczne różnice. Przy wartości 20kHz amplituda różni się dla warstwy 54μm jedynie o 0,06V a więc różnice wydają się również niewielkie jednak istotne. Błąd względny wyniósł 13%.

Na podstawie obserwacji oraz porównania wyników należy stwierdzić, iż pomimo staranności wykonania modelu symulacyjnego, metoda elementów skończonych wprowadza szereg możliwych błędów rozwiązania do których zaliczyć można: błąd modelowania (zastosowany model matematyczny nie odzwierciedla dokładnie rzeczywistości), błąd wartości współczynników (przyjęte wartości współczynników równań różniczkowych cząstkowych i warunków brzegowych, czyli np. dane materiałowe, dane o interakcji obiektu ze światłem zewnętrznym obarczone są błędem), błąd odwzorowania obszaru (obszar obliczeniowy nie odpowiada dokładnie rzeczywistemu obszarowi zajmowanemu przez analizowany obiekt), błąd numeryczny (błąd dyskretyzacji, zastosowana metoda aproksymacji wprowadza błąd w stosunku do rozwiązania dokładnego problemu wyjściowego), błąd zaokrągleń (ze względu na zastosowanie ograniczonej dokładności reprezentacji liczb w komputerze, rozwiązanie uzyskane programem komputerowym nie odpowiada rozwiązaniu przybliżonemu, które zostałyby otrzymane przy dokładnej reprezentacji liczb).

Ze względu na to, że głębokość wnikania sygnału pomiarowego do badanej warstwy na podłożu ferromagnetycznym maleje wraz ze wzrostem częstotliwości, należy dostosować częstotliwość i amplitudę sygnału do każdej próbki w sposób indywidualny, aby dokładność pomiaru była jak największa.

Ocenę dokładności pomiarów grubości powłok można realizować również dla pomiarów wykonywanych w ramach zajęć dydaktycznych laboratoryjnych z Metrologii Elektrycznej np. metodą problemową i projektów. Po wykonaniu badań studenci mogą wykorzystać komputerowe metody obliczeniowe do oceny dokładności i wykreślenia charakterystyk pracy układu. Proces pomiarowy można bezpośrednio zmieniać i kontrolować za pomocą narzędzi wbudowanych w pakiet programowy. Pomiaru takie dzięki oprogramowaniu ANSYS Maxwell można wykonywać nie tylko na zajęciach dydaktycznych ale także przeprowadzać ich symulację bez dostępu do fizycznego układu pomiarowego. Umożliwia to wcześniejsze sprawdzenie poprawności działania oraz wprowadzenie poprawek konstrukcyjnych już na etapie projektowania takiego układu pomiarowego.

Zaletą oprogramowania ANSYS Maxwell jest prosty interfejs oraz w pełni zautomatyzowany proces obliczeniowy wymagający od użytkownika jedynie stworzenia lub wczytania geometrii, przypisania własności materiałowych oraz określenia interesujących użytkownika wyników analizy np. obliczenia indukcyjności. Wykorzystując technologię adaptacyjnego tworzenia siatki program sam generuje odpowiednią siatkę elementów skończonych, dzięki czemu symulacja przestaje być skomplikowanym zagadnieniem.

Deterministyczne symulacje komputerowe mające charakter oprogramowania interakcyjnego (dialogowego i specjalistycznego) znajdują swoje miejsce również w procesie dydaktycznym, albowiem są praktyczną odpowiedzią na powszechnie głoszone postulaty

konektywizmu oraz konstruktywizmu w nowoczesnym kształceniu technicznym oparte na technologii informatycznej [22,23,24].

Autor: dr Tomasz Prauzner, Akademia im. Jana Długosza w Częstochowie, Aleja Armii Krajowej 13/15, 42-218 Częstochowa, e-mail: matompra@poczta.onet.pl

LITERATURA

- [1] Bołkowski S., Sikora J., Skoczyła J., Sroka J., Stabrowski M., Wincenciak S., *Komputerowe metody analizy pola elektromagnetycznego*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, (1993)
- [2] Jabłoński P., *Metoda elementów brzegowych w analizie pola elektromagnetycznego*, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, (2003)
- [3] Jin J.M., *The Finite Element Method in Electromagnetics*, Wiley, IEEE Press, (2002)
- [4] Kuczmann M., Iványi A., *The finite element method in magnetics*, Academic Press, Budapest, (2008)
- [5] Prauzner T., Ptak P., *Analiza parametrów pracy wybranych czujników pola magnetycznego*, Przegląd Elektrotechniczny, 90 (2014), nr.12, 273-276
- [6] Prauzner T., *Effectiveness of magnetic detectors in alarm systems*, Przegląd Elektrotechniczny, 90 (2014), nr.12, 269-272
- [7] Prauzner T., *Finite Element Method in an analysis of selected parameters of an inductive sensor for protective coatings measurements*, Przegląd Elektrotechniczny, 91 (2015), nr.12, 205-208
- [8] Prauzner T., *Zakłócenia elektromagnetyczne w elektronicznych systemach alarmowych*, Przegląd Elektrotechniczny, 88 (2012), nr.12b, 205-208
- [9] Ptak P., Prauzner T., *Badanie czujników detekcji zagrożeń w systemach alarmowych*, Przegląd Elektrotechniczny, 10 (2013), 274-276
- [10] Bianchi N., *Electrical Machine Analysis Using Finite Elements*. Taylor & Francis Group, (2005)
- [11] Jakubiec B., *Model elektrycznego układu napędowego małego systemu mobilnego*, Przegląd Elektrotechniczny, (2013), nr.12, 173-176
- [12] Jakubiec B., *Napęd pojazdu elektrycznego z wielofazowym silnikiem synchronicznym z magnesami trwałymi*, Przegląd Elektrotechniczny, 91 (2015), nr.12, 125-128
- [13] Miaskowki A., Krawczyk A., Olchowik G., Łada-Tondyra E., Bartosiński A., *A Numerical Evaluation of Electric Field and SAR Distribution Around a Titanium Implant in the Trunk of a Boy*, Przegląd Elektrotechniczny, (2012), nr.12b, 77-79
- [14] Xiaolin Ch., Yijun L., *Finite element modeling and simulation with ANSYS Workbench*, CRC Press, (2014)
- [15] Olesiak K., *Application of the fuzzy controller in the speed control system of an induction motor*, Przegląd Elektrotechniczny, 89 (2013), nr.12, 336-339
- [16] Olesiak K., *Selected problems of the asynchronous drive control with the three-phase soft-start system*, Solid State Phenomena, Vol. 210 (2014), 245-251
- [17] Ptak P., Borowik L., *Badanie wielowarstwowych powłok ochronnych*, Przegląd Elektrotechniczny, 91 (2015), nr.12, 209-211
- [18] Ptak P., Borowik L., *Dokładność czujników indukcyjnych w defektoskopii warstw ochronnych urządzeń elektrycznych*, Przegląd Elektrotechniczny, 90 (2014), nr.12, 277-280
- [19] Tumański S., *Czujniki pola magnetycznego*, Przegląd Elektrotechniczny, 10 (2013), 1-11
- [20] Matuszczyk P., *MATLAB - interaktywne środowisko do wykonywania obliczeń naukowych i symulacji komputerowych*, Wydawnictwo WSB Poznań, (2014), 347-358
- [21] Migo P., Noga H., *Start-up of SSTC semiconductor tesla coil - an example of an educational project*, Przegląd Elektrotechniczny, Vol.1, (2015), nr.12, 167-169
- [22] Noga H., Piaskowska-Silarska M., Depešová J., Pytel K., Migo P., *Examination of the theta index during solving IT issues*, Emerging eLearning Technologies and Applications (ICETA), IEEE 12th International Conference, (2014), 361-366
- [23] Noga H., *Metody socjometryczne w edukacji techniczno – informatycznej*, Trendy ve vzdělávání, Informační technologie a technické vzdělávání, (2009), 165-169
- [24] Noga H., Piaskowska-Silarska M., Depešová J., Pytel K., Migo P., *Neuro - didactic perspective of creative attitude towards education in the third millennium - examination of individual cases*, Emerging eLearning Technologies and Applications (ICETA) IEEE 12th International Conference, (2014), 355-360