

RAFAŁ M. WOJCIECHOWSKI
POLITECHNIKA POZNAŃSKA
WYDZIAŁ ELEKTRYCZNY

ZAŁĄCZNIK 2.

Autoreferat przedstawiający opis dorobku i osiągnięć naukowych

AUTOREFERAT

1. Imię i nazwisko

Rafał Marek Wojciechowski

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytuł rozprawy doktorskiej

Studium Pedagogiczne, Politechnika Poznańska, 2004.

Magister inżynier elektryk, Politechnika Poznańska, 2005.

Doktor nauk technicznych. Dziedzina: nauki techniczne. Dyscyplina: elektrotechnika. Specjalność: metody numeryczne w mechatronice. Tytuł nadany uchwałą Rady Wydziału Elektrycznego Politechniki Poznańskiej w dniu 28.09.2010r. na podstawie rozprawy pt. *Numeryczna analiza prądów indukowanych w jednoczynnych i wieloczynnych obszarach przewodzących*, Politechnika Poznańska, 2010.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

Od 01.11.2005 do 30.09.2008 doktorant w Instytucie Elektrotechniki Przemysłowej Wydziału Elektrycznego Politechniki Poznańskiej.

Od 01.10.2008 do 30.09.2013 zatrudniony na stanowisku asystenta w Instytucie Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej Wydziału Elektrycznego Politechniki Poznańskiej.

Od 01.10.2013 zatrudniony na stanowisku adiunkta w Instytucie Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej Wydziału Elektrycznego Politechniki Poznańskiej.

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.):

a) Tytuł osiągnięcia naukowego

Cykl publikacji powiązanych tematycznie pod wspólną nazwą: *Skuteczne algorytmy polowych obliczeń przetworników elektromagnetycznych z wykorzystaniem modeli dwu- i trójwymiarowych* – cykl zawiera 9 publikacji.

b) Publikacje lub inne prace wchodzące w skład osiągnięcia naukowego

- [1] **Rafał M. Wojciechowski**, Cezary Jędryczka, Andrzej Demenko, Jan K. Sykulski, 2015, *Strategies for two-dimensional and three-dimensional field computation in the design of permanent magnet motors*, IET Science Measurement & Technology, vol. 9, No. 2, pp. 224-233.
- [2] Andrzej Demenko, **Rafał M. Wojciechowski**, Jan K. Sykulski, 2014, *2D versus 3D electromagnetic field modeling in electromechanical energy converters*, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 50, no. 2, pp. 1-4.
- [3] Dorota Stachowiak, **Rafał M. Wojciechowski**, 2011, *Analysis of permanent magnet motor with powder magnetic core using edge element method*, Przegląd Elektrotechniczny, vol. 87, no. 11, pp. 116-119.
- [4] **Rafał M. Wojciechowski**, Sławomir Walkowiak, 2012, *Polowa analiza silnika indukcyjnego o masywnym wirniku hybrydowym*, Poznan University of Technology Academic Journals, Issue 72, Electrical Engineering, pp. 157-166.
- [5] **Rafał M. Wojciechowski**, Cezary Jędryczka, Piotr Łukaszewicz, Dariusz Kapelski, 2012, *Analysis of high speed permanent magnet motor with powder core material*, Compel - The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, vol. 31, no. 5, pp. 1528-1540.
- [6] **Rafał M. Wojciechowski**, Cezary Jędryczka, 2015, *The analysis of stray losses in tape wound concentrated windings of the permanent magnet synchronous motor*, Compel - The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, vol. 34, no. 3, pp. 766-777.
- [7] **Rafał M. Wojciechowski**, 2013, *Odwzorowanie rozkładu uzwojeń wykonanych z cienkich przewodów metodą elektrycznego potencjału wektorowego T_0* , Przegląd Elektrotechniczny, vol. 89, no. 9, pp. 58-61.
- [8] Andrzej Demenko, Wiesław Łyskawiński, **Rafał M. Wojciechowski**, 2012, *Equivalent formulas for global magnetic force calculation from finite element solution*, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 48, no. 2, pp. 195-198.
- [9] **Rafał M. Wojciechowski**, 2016, *Analysis and optimisation of an axial flux permanent magnet coreless motor based on the field model using the superposition principle and genetic algorithm*, Archives of Electrical Engineering, vol. 65, no. 3, pp. 601-611.

c) Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.

Przedstawiony zbiór publikacji obejmuje wyniki badań z zakresu analizy, projektowania i numerycznego modelowania **zjawisk elektromagnetycznych zachodzących w przetwornikach elektromagnetycznych z wykorzystaniem dwu- i trójwymiarowych modeli polowych.**

Dynamiczny rozwój sprzętu komputerowego oraz postęp w metodach numerycznych sprawiły, że obecnie w procesie projektowania i optymalizacji przetworników elektromagnetycznych powszechnie stosuje się oprogramowanie do polowej analizy zjawisk. Najczęściej korzysta się z oprogramowania komercyjnego, w którym rozkład pola elektromagnetycznego wyznacza się stosując klasyczne ujęcie metody elementów skończonych (MES) wykorzystujące wielkości węzłowe. Pomimo, że oprogramowanie komercyjne jest szeroko stosowane, to nadal trwają prace nad modyfikacją istniejących już algorytmów i poszukiwaniem nowych. Dowodem na to jest duża liczba zgłaszanych prac na odbywającą się, co 2 lata wiodącą konferencję *Compumag* poświęconą nowym algorytmom i metodom rozwiązywania równań pola elektromagnetycznego. Na konferencję tę nie są przyjmowane prace, w których autorzy wykorzystują oprogramowanie komercyjne. Autor wniosku zna dobrze programy komercyjne. Wykorzystywał je w pracach na zlecenie jednostek naukowo-badawczych i przemysłu. Stosuje także własne oprogramowanie, które zaczął tworzyć w ramach badań nad rozprawą doktorską. Doświadczenie nabyte przy stosowaniu oprogramowania komercyjnego i tworzeniu własnych programów postanowił wykorzystać w badaniach porównawczych różnych ujęć metody elementów skończonych. Badania prowadził z myślą o ocenie oprogramowania polowego do obliczeń projektowych. Zaproponował szereg autorskich modyfikacji i procedur poprawiających dokładność i efektywność obliczeń polowych. W cyklu publikacji stanowiących osiągnięcie habilitacyjne zebrał wyniki badań porównawczych z wykorzystaniem tych modyfikacji, które mają pomóc projektantowi w podjęciu decyzji, jaki model polowy oraz jakie oprogramowanie zastosować w obliczeniach elektromagnetycznych: model dwuwymiarowy (2D) czy trójwymiarowy (3D), oprogramowanie własne czy komercyjne?

W praktyce zwykle dąży się do możliwie jak największego skrócenia czasu przygotowania modelu dyskretnego i czasu obliczeń. Dlatego powszechnie wykorzystuje się oprogramowanie komercyjne i jeśli tylko struktura rozpatrywanego układu na to pozwala wybiera się modele 2D. Przy formułowaniu modeli 2D zwykle poszukuje się takich symetrii układu, które pozwolą na zadawalająco dokładne odwzorowanie rozkładu pola w projektowanym obiekcie. W klasycznych ujęciach 2D przyjmuje się, że

gęstość strumienia magnetycznego w kierunku jednej z osi przyjętego układu współrzędnych jest równa zeru, [1, 2], np. w klasycznej maszynie elektrycznej przyjmuje się, że, składowa gęstości strumienia w kierunku osi wału jest równa zeru. W modelu 2D pomija się zjawiska związane z występowaniem strumienia wokół połączeń czołowych, a także te, które wynikają z różnej długości stojana i wirnika. W przypadku maszyn o małej smukłości pominięcie tych zjawisk może prowadzić do mało wiarygodnych wyników. Klasyczne modele 2D nie odzwierciedlają także w pełni zjawisk zachodzących w układach, w których występują wielospójne obszary przewodzące. Na przykład w modelach 2D klatki rozruchowej silników synchronicznych, wycinkom pierścieni zwierających zwykle przyporządkowuje się zerowe rezystancje. W związku z powyższym Autor wniosku przeprowadził badania zmierzające do oceny wiarygodności modeli 2D [1-3]. Przedstawił strategię łączenia obliczeń projektowych na podstawie modeli 2D z obliczeniami na podstawie modeli 3D. Wskazał na korzyści stosowania strategii oznaczonej w skrócie, 3D→2D→3D, w której obliczenia na podstawie modeli 3D są wykonywane na początku i na końcu procesu projektowania. Pierwszym etapem tej strategii jest wykonanie obliczeń na podstawie modelu 3D. Obliczenia wykonuje się w celu wstępnego zapoznania się z parametrami projektowanego obiektu i uzyskaniem przybliżonych wartości współczynników korygujących, np. współczynnika określającego zastępczą długość obiektu [1,2] lub konduktywności materiału [2]. Następnie otrzymane wartości współczynników wprowadza się do obliczeń optymalizacyjnych, w których wykorzystuje się mniej czasochłonny model 2D. Ostatnim etapem strategii 3D→2D→3D jest weryfikacja otrzymanych na podstawie modeli 2D wyników obliczeń. Do weryfikacji wykorzystywany jest model 3D. Zaproponowaną strategię 3D→2D→3D Autor wniosku porównał z innymi powszechnie stosowanymi strategiami projektowania przetworników elektromagnetycznych [1,2]. Przedstawił zalety stosowania tej strategii oraz wykazał jej przewagę nad innymi strategiami.

Autor wniosku prowadzi badania w zespole, w którym do opisu pola elektromagnetycznego stosuje się wartości krawędziowe i funkcje interpolacyjne elementu ściankowego oraz krawędziowego. Stosuje najnowsze metody wykorzystujące ten opis, w tym głównie metodę elementów krawędziowych (MEK). Na podstawie badań skuteczności autorskich algorytmów i programów do rozwiązywania równań MEK sformułował istotne wnioski, co do zalet metody w porównaniu z klasyczną MES [1]. Z myślą o projektowaniu maszyn różniących się długością pakietu rdzenia stojana i wirnika opracował własne modele quasi-3D i wdrożył oprogramowanie wykorzystujące te modele [1]. Udoskonalił istniejące oraz opracował nowe algorytmy i procedury

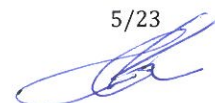
opisu źródeł pola magnetycznego w zdyskretyzowanych układach z polem dwu- i trójwymiarowym.

Autor wniosku prowadził ponadto badania nad poszukiwaniem nowych, skutecznych metod opisu uzwojeń w dwu- i trójwymiarowej przestrzeni elementów skończonych [5-7]. Między innymi zapropozował oryginalną metodę, w której do opisu rozkładu uzwojeń o cienkich przewodach wykorzystywany jest elektryczny potencjał wektorowy T_0 [7]. Metoda pozwala na wyznaczenie trójwymiarowego rozkładu źródeł pola magnetycznego i rozkładu siły magnetomotorycznej dla układu z cewkami o złożonych kształtach. Jej przewaga nad innymi metodami wynika z możliwości dokładnego opisu źródeł w obszarze połączeń czołowych, w których występują trudne do opisu przeplecenia zwojów. Kłopoty z odwzorowaniem połączeń czołowych nie występują w modelach 2D. W tego typu modelach połączenia czołowe traktuje się zerowymiarowo, a więc jako elementy skupione połączone z elementami układu obwodu zasilającego. Badania przeprowadzone przez Autora dotyczyły także tego typu modeli [4-6]. Opracował własny algorytm i program do analizy rozkładu pola elektromagnetycznego w silniku indukcyjnym o masywnym wirniku. W algorytmie tym równania MEK dwuwymiarowego modelu polowego, dla sformułowania wykorzystującego zespolony potencjał wektorowy A , połączył z równaniami obwodów zasilających [4].

Autor wniosku prowadził również badania mające na celu opracowanie procedur i algorytmów obliczania sił i momentów elektromagnetycznych [8]. Skuteczność opracowanych algorytmów i procedur badał w odniesieniu do modeli 2D, quasi-3D i 3D. Otrzymane wyniki obliczeń sił i momentów porównał z wynikami pomiarów zaprojektowanych i zbudowanych prototypów [5,9]. Duża zgodność wyników obliczeń i pomiarów potwierdziła skuteczność opracowanych algorytmów i procedur.

Za istotne osiągnięcie Autor wniosku uważa opracowanie metody wyznaczania rozkładu pola w układzie trójwymiarowym poprzez superpozycje rozwiązań równań dla osiowosymetrycznych układów 2D [9]. Metodę opracował z myślą o projektowaniu i optymalizacji wysokoobrotowych bezrdzeniowych silników specjalnego przeznaczenia. Wykazał przewagę zaproponowanego sposobu obliczeń nad typowym podejściem, w którym do analizy i projektowania maszyn wykorzystuje się trójwymiarowy model polowy oraz dostępne oprogramowanie komercyjne.

Opracowane przez Autora wniosku modele i metody oraz algorytmy obliczeniowe mogą być stosowane głównie przez tych projektantów, którzy potrafią stworzyć własne oprogramowanie do wyznaczania rozkładu pola i obliczania na podstawie tego rozkładu poszukiwanych parametrów całkowych. Obecnie większość projektantów korzysta



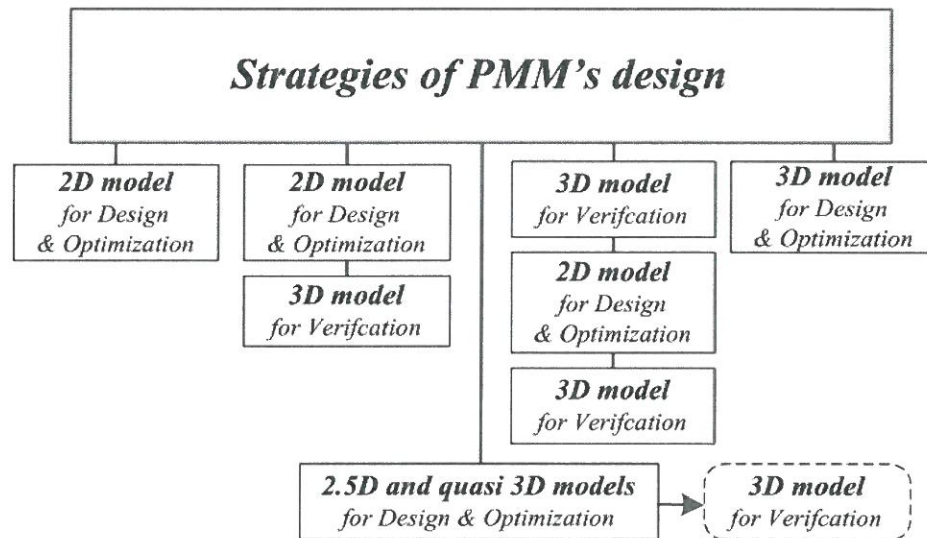
z ogólnodostępnych programów komercyjnych. W programach tych możliwość ingerencji w kod źródłowy jest bardzo ograniczona, o czym przekonał się Autor testując dostępne na rynku programy komercyjne. Autor uważa, że dla projektantów stosujących tego typu oprogramowanie przydatna jest zaproponowana przez niego wymieniona wcześniej strategia 3D→2D→3D. Omówioną strategię Autor stosował wielokrotnie projektując specjalistyczne maszyn i przetworniki elektromagnetyczne dla Otis Elevator Company, Clipper Windpower czy United Technologies Research Center w ramach współpracy naukowej z tymi jednostkami.

-
- ad. [1] **Rafał M. Wojciechowski**, Cezary Jędryczka, Andrzej Demenko, Jan K. Sykulski, 2015, *Strategies for two-dimensional and three-dimensional field computation in the design of permanent magnet motors*, IET Science Measurement & Technology, vol. 9, no. 2, pp. 224–233.

W artykule omówiono pięć najczęściej stosowanych strategii projektowania maszyn magnetoelektrycznych wykorzystujących modele polowe. Strategie zestawiono na rysunku 1. Najwięcej uwagi poświęcono zaproponowanej przez Autora wniosku strategii projektowania 3D→2D→3D. Opracowanie tej strategii Autor wniosku uważa za swoje istotne osiągnięcie. W artykule szczegółowo omówiono etapy projektowania maszyn magnetoelektrycznych z wykorzystaniem tej strategii. Przedstawiono propozycję wyznaczania, na podstawie wstępnych obliczeń 3D, współczynników korygujących wymiary modeli 2D. Dzięki zastosowaniu tych współczynników modele 2D stają się bardziej wiarygodne. Zaproponowano metodę wyznaczania współczynnika określającego ekwiwalentną długość dwóch typów silników, tj.: (a) silnika magnetoelektrycznego o wewnętrznym wirniku i naklejanym na jego obwodzie magnesów oraz (b) silnika o dwupoziomowym układzie magnesów. Z myślą o wyznaczaniu tych współczynników Autor opracował własne oprogramowanie, w którym zastosował metodę elementów krawędziowych (MEK) i sformułowanie wykorzystujące magnetyczny potencjał wektorowy A .

W artykule przedstawiono także korzyści wynikające ze stosowania mało rozpowszechnionych tzw. modeli quasi-3D. Modele quasi-3D doskonale nadają się do analizy i projektowania maszyn różniących się długością pakietu stojana i wirnika. Przedstawiono zasadę tworzenia tego typu modeli. Zaproponowano metodę odwzorowywania obszaru szczeliny powietrznej pomiędzy stojanem i wirnikiem różniącymi się długościami, co jest własnym, oryginalnym osiągnięciem

Autora wniosku. Autor wniosku zauważył, że do odwzorowywania tego typu obszarów doskonale nadają się elementy krawędziowe pięciokątne. Wskazał na zalety modeli quasi-3D w porównaniu klasycznymi modelami 2D na przykładzie obliczeń projektowych silnika magnetoelektrycznego o podwójnym wirniku do napędu bezpośredniego wind.



Rys.1. Strategie projektowania maszyn elektrycznych z magnesami trwałymi

- ad. [2] Andrzej Demenko, **Rafał M. Wojciechowski**, Jan K. Sykulski, 2014, *2D versus 3D electromagnetic field modeling in electromechanical energy converters*, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 50, no. 2, pp. 1–4.

Omawiający artykuł nawiązuje do wyników badań przedstawionych w [1]. W pracy rozważano możliwość stosowania strategii projektowania dla szerszej klasy obiektów z polem elektromagnetycznym. Rozpatrzono strategie, w których obliczenia wykonuje się na podstawie modeli polowych 2D i 3D, w tym proponowaną przez Autora wniosku strategię 3D→2D→3D. Pokazano, że stosowanie strategii wykorzystujących w obliczeniach projektowych wyłącznie modeli 2D może prowadzić do mało wiarygodnych wyników obliczeń. Przedstawiono wyniki badań dotyczące oceny wiarygodności modeli 2D. Na przykładzie wybranych układów z polem elektromagnetycznym zilustrowano wpływ: (a) wymiarów zewnętrznych układu; (b) rodzaju zastosowanego materiału magnetycznego oraz (c) sposobu rozmieszczania źródeł pola na różnice wyników obliczeń uzyskanych na podstawie modeli 2D i modeli 3D. Przedstawiono koncepcje obliczeń współczynników korygujących wymiary i parametry modeli

2D. Koncepty zweryfikowano na dwóch przykładach: (a) silnika z magnesami trwałymi, dla którego poszukiwano ekwiwalentnych długości pakietu rdzenia oraz (b) układu złożonego z przewodzącej płyty i cewki, dla którego określono zastępczą przewodność materiału płyty. W przykładzie (a) celem wprowadzenia ekwiwalentnych długości była poprawa dokładności obliczeń harmonicznych charakterystyki momentu w funkcji kąta obciążenia wewnętrznego. W przypadku (b) współczynnik korygujący konduktywność płyty wyznaczano z myślą o uzyskaniu na podstawie modelu 2D jak najdokładniejszych wartości strat mocy w płycie i wartości siły elektrodynamicznej pomiędzy cewką a płytą. Obliczenia wykonywano dla różnych wartości parametrów opisujących strukturę obiektu. Na potrzeby analizy w ujęciu dwu- i trójwymiarowym rozpatrywanych układów opracowano autorskie oprogramowanie.

- ad. [3] Dorota Stachowiak, **Rafał M. Wojciechowski**, 2011, *Analysis of permanent magnet motor with powder magnetic core using edge element method*, Przegląd Elektrotechniczny, vol. 87, no. 11, pp. 116–119.

W ostatnich latach dzięki osiągnięciom metalurgii proszków coraz częściej obwody magnetyczne maszyn elektrycznych wykonuje się z materiałów proszkowych. Dlatego podjęto się badań nad zastosowaniem kompozytu magnetycznie miękkiego Somaloy 500 do budowy silników magnetoelektrycznych. Równoległe z prowadzonymi badaniami przeprowadzono analizę wpływu parametrów materiałowych kompozytu na wartość uzyskiwanych wyników obliczeń na podstawie modeli 2D i 3D. Autor wniosku zauważył, że dwuwymiarowe rozpatrywanie obwodu magnetycznego maszyn o rdzeniu proszkowym może prowadzić do większych niedokładności niż takie same rozpatrywanie maszyn o rdzeniu pakietowanym. Przyczyn mniejszej wiarygodności modeli 2D należy doszukiwać się w niższej wartości przenikalności magnetycznej materiałów proszkowych od przenikalności blach elektrotechnicznych w rezultacie, czego większy jest strumień rozproszenia w obszarze połączeń czołowych.

W pracy przedstawiono wyniki analizy porównawczej obliczeń momentu elektromagnetycznego i sił elektromotorycznych dwóch silników magnetoelektrycznych. Rozpatrzono silniki różniące się rodzajem zastosowanego materiału magnetycznego wirnika. Przyjęto, że wirnik jednego z silników jest wykonany z blachy elektrotechnicznej, a drugiego z materiału kompozytowego typu Somaloy 500. Stojany obu maszyn wykonano w formie pakietów. Na potrzeby

analizy rozkładu pola elektromagnetycznego Autorzy opracowali autorskie oprogramowanie, w którym zastosowano metodę elementów krawędziowych i sformułowanie wykorzystujące potencjały wektorowe: magnetyczny A oraz elektryczne T_m i T_0 .

Zbadano wpływ parametrów materiałowych wirników i proporcji wymiarów zewnętrznych silników na wartość momentu elektromagnetycznego i wartość sił elektromotorycznych. Oczywiście dla rozpatrywanych przypadków w ujęciu 3D obliczone wartości momentu elektromagnetycznego i sił elektromotorycznych silnika o rdzeniu proszkowym były mniejsze od silnika o rdzeniu pakietowanym, a wartość momentu zaczepowego większa. Analizowano również względne wartości różnic pomiędzy wynikami momentu elektromagnetycznego na podstawie modeli 2D i 3D. Wyniki analizy potwierdziły przypuszczenia Autora wniosku, że w odniesieniu do maszyn wykonanych z materiałów proszkowych wiarygodność modeli 2D jest mniejsza od wiarygodności tych samych modeli dla silników o rdzeniu pakietowanym.

-
- ad. [4] **Rafał M. Wojciechowski**, Sławomir Walkowiak, 2012, *Polowa analiza silnika indukcyjnego o masywnym wirniku hybrydowym*, Poznań University of Technology Academic Journals, Issue 72, Electrical Engineering, pp. 157–166.

Autor wniosku stosuje dwie metody polowej analizy przebiegów zmiennych w czasie: (a) metodę polegającą na dyskretyzacji czasu i (b) metodę potencjałów zespolonych. Oprogramowanie dla tej drugiej metody opracował z myślą o przebiegach sinusoidalnie zmiennych, w których rozpatruje się tylko pierwszą harmoniczną. Oprogramowanie wykorzystano do polowej analizy silnika indukcyjnego o wirniku hybrydowym z wykorzystaniem modelu 2D. W rozpatrywanej konstrukcji wirnik jest dwuwarstwowy i zawiera warstwę podstawową wykonaną z materiału proszkowego Somaloy 500 oraz warstwę przyszczelinową z materiału przewodzącego. Na potrzeby analizy rozkładu pola elektromagnetycznego w badanym silniku opracowano dwuwymiarowy model polowy, w którym zastosowano MEK i sformułowanie wykorzystujące zespolony potencjał wektorowy A . W celu odwzorowania ruchu wirnika Autor wniosku opracował metodę, w której gęstość prądów indukowanych w warstwie przewodzącej $\sigma dA/dt$ jest w opisie zespolonym reprezentowana przez iloczyn $j\sigma\omega A$, przy czym: σ - konduktywność materiału, s - poślizg, ω pulsacja napięcia zasilania. W zaproponowanym ujęciu, modyfikując iloczyn σs , można model 2D o parametrach rzeczywistych zastąpić równoważnym

modelem, w którym poza uwzględnieniem ruchu wirnika, uwzględnia się, że "ścieżki" prądów indukowanych są dłuższe niż w klasycznym ujęciu 2D, bo zawierają także fragmenty leżące w płaszczyźnie prostopadłej do osi wału. Zastosowana przez Autora modyfikacja jest podobna do modyfikacji, którą stosuje się przy wyznaczaniu rezystancji uzwojeń klatki w maszynie indukcyjnej. Do rezystancji klatki dodaje się z odpowiednią wagą rezystancję wycinków pierścieni. Opracowany model Autor wniosku rozszerzył o równania napięciowe uzwojeń i obwodów zasilających. W równaniach napięciowych uzwojeń uwzględnił indukcyjności połączeń czołowych, które można obliczać na podstawie modeli 3D.

W pracy zbadano wpływ parametrów materiałowych i grubości warstwy przewodzącej wirnika na rozkład pola magnetycznego i wartość parametrów funkcjonalnych silnika, tj. moment elektromagnetyczny, siła elektromotoryczna, moc na wale. Opracowane oprogramowanie Autorzy zastosowali w obliczeniach projektowych silnika indukcyjnego o dwuwarstwowym wirniku.

-
- ad. [5] **Rafał M. Wojciechowski**, Cezary Jędrzycka, Piotr Łukaszewicz, Dariusz Kapelski, 2012, *Analysis of high speed permanent magnet motor with powder core material*, *Compel - The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, vol. 31, no. 5, pp. 1528–1540.

W omawianym artykule przedstawiono dyskretny 2D model połowy wysoko-obrotowego silnika magnetoelektrycznego o rdzeniu proszkowym. Przy tworzeniu modelu wykorzystano analogie pomiędzy równaniami metody elementów krawędziowych (MEK), a równaniami ściankowymi siatki reluktancyjnej. Omówiono procedury formułowania źródeł pola magnetycznego. Przedstawiono sposób wyznaczania gałęziowych sił magnetomotorycznych (*smm*) w MEK dla obszarów z magnesami trwałymi i uzwojeniami cienkozwojonymi. Przy tworzeniu formuł opisujących gałęziowe *smm* posłużono się elektrycznym potencjałem wektorowym T , który w obszarach z magnesami trwałymi jest reprezentowany przez wektor namagnesowania T_m , a w obszarach z uzwojeniami cienkozwojonymi przez potencjał T_0 opisujący gęstość prądu w "ścieżce" o zdeteminowanym kierunku i zwrocie.

Autor wniosku zastosował nowatorską metodę opisu źródeł pola. W odróżnieniu od klasycznego ujęcia, które sprowadza się do formowania prawych stron równań MEK na podstawie oczkowych *smm*, w zastosowanym

ujęciu źródła pola obliczał na podstawie gałęziowych sił magnetomotorycznych. Taki opis jest bardziej uniwersalny, bo pozwala na odwzorowanie źródeł pola w modelach 2D i 3D zarówno dla sformułowań wykorzystujących potencjał skalarny Ω jak i wektorowy A . Tym samym ułatwia tworzenie wielofunkcyjnego oprogramowania dostosowanego do obliczeń 3D i po drobnej modyfikacji także obliczeń 2D.

W pracy obliczenia projektowe zrealizowano w autorskim oprogramowaniu. W obliczeniach silnika o rdzeniu proszkowym Autor wniosku wykorzystał doświadczenie dotyczące korygowania parametrów modeli 2D. Zauważył, że rozpatrywana maszyna ma dużą smukłość definiowaną, jako stosunek długości rdzenia do promienia zewnętrznego stojana silnika. Chociaż rdzeń silnika był proszkowy można powiedzieć, że wpływ korekty na wyniki obliczeń był prawie pomijalny. Należy odnotować, że na podstawie wyników obliczeń projektowych wykonano prototyp silnika. Przeprowadzono analizę porównawczą wyników obliczeń i pomiarów. Największa różnica dotyczyła wartości momentu. Moment zmierzony był o 3% większy od momentu obliczonego. Na podstawie analizy otrzymanych wyników Autor wniosku wykazał, że w przypadku rozpatrywanej maszyny z powodzeniem można stosować model 2D.

-
- ad. [6] **Rafał M. Wojciechowski**, Cezary Jedryczka, 2015, *The analysis of stray losses in tape wound concentrated windings of the permanent magnet synchronous motor*, Compel - The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, vol. 34, no. 3, pp. 766–777.

W artykule przedstawiono przykład zastosowania modelu 2D do obliczania rozkładu prądów indukowanych i strat mocy w uzwojeniach wykonanych z przewodów profilowych. Model opracowano z myślą o obliczeniach optymalizacyjnych silników magnetoelektrycznych. Przy jego opracowaniu zastosowano metodę elementów krawędziowych i sformułowanie wykorzystujące potencjały: wektorowy A i skalarny V . W zapropo-nowanym modelu uwzględniono, że pętla dla prądów indukowanych obejmuje połączenia czołowe, przy czym połączenia te są traktowane jako elementy zero-wymiarowe. Rozpatrywano prądy indukowane zarówno przez strumień główny i strumień rozproszenia. Zmiany strumienia głównego są wywołane zmianą położenia wirnika, a zmiany strumienia rozproszenia - zmianami prądów w uzwojeniach. W modelu uwzględniono, że uzwojenie silnika zasilane jest ze źródła napięcia. W celu uzyskania satysfakcyj-

nującej wiarygodności obliczeń zastosowano szczególnie gęstą siatkę dyskretyzującą w obszarze prętów profilowych. Opracowanie algorytmów i procedur numerycznych zaimplementowanych w oprogramowaniu jest własnym wkładem Autor wniosku.

Wykonano obliczenia optymalizacyjne silnika stosowanego w napędzie wind, a wyniki przedstawiono w omawianej pracy. Obliczenia realizowano z myślą o minimalizacji straty mocy powstających w uzwojeniach prętowych. Rozpatrzono sześć sposobów nawijania cewek uzwojeń prętowych. Prowadząc obliczenia optymalizacyjne silnika Autor wniosku wykorzystał doświadczenie dotyczące korygowania parametrów modeli 2D. Zauważył, że rozpatrywana maszyna charakteryzuje się smukłością, dla której wpływ korekty na wyniki obliczeń jest pomijalny. Zbadano wpływ rozwarcia żłobków stojana maszyny na wartość powstających strat mocy. Wytypowano 2 sposoby nawijania cewek uzwojeń, dla których uzyskano najmniejsze wartości straty mocy. Na podstawie przeprowadzonych badań wykazano, że na wartość strat mocy powstających w uzwojeniach profilowych znaczący wpływa ma nie tylko sposób ułożenia prętów w żłobku maszyny, ale także rozwarcie żłobkowe stojana maszyny.

-
- ad. [7] **Rafał M. Wojciechowski**, 2013, *Odwzorowanie rozkładu uzwojeń wykonanych z cienkich przewodów metodą elektrycznego potencjału wektorowego T_0* , Przegląd Elektrotechniczny, vol. 89, no. 9, pp. 58–61.

W pracy przedstawiono wyniki badań nad poszukiwaniem skutecznych metod opisu uzwojeń w trójwymiarowej przestrzeni elementów skończonych. Autor zaproponował oryginalną metodę, w której rozkład uzwojeń o cienkich przewodach określa się na podstawie równań pola przepływowego prądu i sformułowania wykorzystującego elektryczny potencjał wektorowy T_0 . Zaproponowana przez niego metoda umożliwia wyznaczenie trójwymiarowego rozkładu źródeł pola magnetycznego dla układów z cewkami o złożonych kształtach. Przewaga tej metody nad innymi uwidacznia się szczególnie przy opisie źródeł pola w obszarze połączeń czołowych o złożonej geometrii. W metodzie źródła opisuje się za pomocą wartości krawędziowych. W związku z tym metoda może być z powodzeniem stosowana zarówno dla sformułowań wykorzystujących do opisu pola wartości krawędziowe jak i węzłowe. Metoda jest bardzo dobrze dostosowana do opisu pola magnetycznego za pomocą wartości węzłowych magnetycznego potencjału skalarnego Ω . Stosując tę metodę

nie ma potrzeby wprowadzania dwóch potencjałów skalnych: globalnego i zredukowanego.

Do rozwiązywania równań opisujących rozkład potencjału T_0 w obszarze z uzwojeniami o cienkich przewodach Autor zastosował metodę elementów krawędziowych. Sposób obliczania rozkładu krawędziowych wartości potencjału T_0 oraz określania rozkładu wektora gęstości prądu J_0 zilustrował na przykładzie cewki dwuwarstwowego uzwojenia stojanu maszyny indukcyjnej dużej mocy. Do obliczeń wykorzystał autorskie oprogramowanie.

- ad. [8] Andrzej Demenko, Wiesław Łyskawiński, **Rafał M. Wojciechowski**, 2012, *Equivalent formulas for global magnetic force calculation from finite element solution*, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 48, no. 2, pp. 195–198.

Jednym z najistotniejszych zalet numerycznych metod wyznaczania rozkładu pola magnetycznego jest możliwość wykorzystania uzyskanych rozkładów pól do obliczeń sił i momentów elektromagnetycznych. Chociaż numeryczne metody wyznaczania pola magnetycznego stosowane są od dawna, to nadal trwają prace nad ich ciągłym udoskonaleniem. Wśród prac nad tymi metodami do bardzo istotnych należą badania nad poszukiwaniem skutecznych metod wyznaczania sił i momentów. W oprogramowaniu komercyjnym stosowane są różne metody, np.: (a) zasada prac wirtualnych, (b) numeryczna reprezentacja objętościowej gęstości siły lub momentu lub (c) numeryczna reprezentacja tensora naprężeń Maxwella. Wymienione metody w odniesieniu do rozwiązań analitycznych dają identyczne wyniki. Jednak po zastosowaniu tych metod do rozkładów wyznaczanych metodami numerycznymi uzyskuje się różne wyniki obliczeń sił i momentów elektromagnetycznych. W rezultacie można uzyskać różną od zera wartość siły lub momentu działającą na pustą przestrzeń.

Omawiana praca przedstawia wyniki badań Autorów poświęconych poszukiwaniu takich ujęć, które dla wymienionych metod (a)÷(c) dają jednoznaczne wyniki obliczeń. W pracy udało się Autorom wykazać, że w układach z jednorodną siatką dyskretyzacyjną formuły uzyskane na podstawie zasady pracy wirtualnej można przekształcić do formuł reprezentujących metodę sił objętościowych i tensora naprężeń Maxwella. Dotyczy to zarówno ujęć wykorzystujących węzłowe wartości potencjału skalarne Ω jak i krawędziowe wartości potencjału wektorowego A . W pracy Autor wniosku wykorzystał własne oprogramowanie do przetestowania opracowanych formuł. Wykonał obliczenia siły

elektrodynamicznej działającej na aluminiową płytę w trójwymiarowym układzie z problemu TEAM Workshops No. 7. Badał wpływ wyboru powierzchni całkowania na wartość otrzymywanych wyników obliczeń po zastosowaniu formuł wykorzystujących metodę tensora naprężeń Maxwella. Na podstawie przeprowadzonych badań Autor wniosku pokazał, że wartości wyliczonych sił dla wytypowanych powierzchni całkowania są zbieżne z dokładnością do 7 miejsc znaczących. Autor wniosku uczestniczył również w obliczeniach: sił magnetycznych w trójwymiarowym układzie złożonym z trzech magnesów i momentu elektromagnetycznego na podstawie dwuwymiarowego modelu silnika indukcyjnego z problemu TEAM Workshops No. 30. Dla obu rozpatrywanych układów wyniki obliczeń numerycznych porównano z wynikami obliczeń analitycznych. Różnice pomiędzy uzyskanymi wartościami dla układu 3 magnesów nie przekraczały 2%, zaś dla modelu 2D silnika indukcyjnego 4%. Uzyskanie wysokiej zgodności pomiędzy wynikami świadczy o skuteczności opracowanych formuł.

- ad. [9] **Rafał M. Wojciechowski**, 2016, *Analysis and optimisation of an axial flux permanent magnet coreless motor based on the field model using the superposition principle and genetic algorithm*, Archives of Electrical Engineering, vol. 65, no. 3, pp. 601-611.

W artykule Autor przedstawił oryginalną metodę obliczania trójwymiarowego rozkładu pola magnetycznego w bezrdzeniowym silniku magnetoelektrycznym o strumieniu osiowym (z ang. AFPMCM – *Axial Flux Permanent Magnet Coreless Motor*). Z uwagi na brak rdzenia i zbliżoną do powietrza przenikalność "wewnętrzna" magnesów można przyjąć, że rozpatrywany układ jest jednorodny magnetycznie ($\mu = \mu_0$). Do analizy rozkładu pola w badanym silniku Autor opracował autorskie oprogramowanie, w którym zastosował algorytmy i procedury polegające na superponowaniu rozkładów pól pochodzących od wyodrębnionych źródeł, tj. cewek i magnesów. W rozpatrywanym układzie rozkład pola od poszczególnych źródeł charakteryzuje się symetrią osiową. Do wyznaczania rozkładu pola o symetrii osiowej Autor zastosował dwie metody: (a) metodę analityczną bazującą na prawie Biota-Savarta (metoda BS) i (b) metodę elementów skończonych (metoda 2D FE) dla sformułowania wykorzystującego krawędziowe wartości potencjału A . Autor przeprowadził szereg obliczeń testujących opracowane oprogramowanie. Otrzymane wyniki obliczeń porównał z wynikami uzyskanymi po zastosowaniu komercyjnego oprogramowania Maxwell 3D. Obliczenia wykonywane w oprogramowaniu własnym przeprowadził na

modelach obejmujących cały rozpatrywany silnik. W przypadku modelu 3D z wykorzystaniem środowiska Maxwell odwzorowano 2/7 obwodu silnika, dyskretyzując ten obszar za pomocą elementów czworościennych o łącznej liczbie przekraczającej 1.5 mln elementów. Tak dużą liczbę elementów Autor przyjął w celu uzyskania poprawnego przebiegu momentu elektromagnetycznego pozbawionego szumów wynikających z zastosowanej w programie nieregularnej siatki dyskretyzującej. Autor porównał czasy obliczeń po zastosowaniu oprogramowania komercyjnego i własnego. Czas obliczeń pojedynczego rozkładu pola za pomocą programu Maxwell 3D trwał aż 83 minuty, podczas gdy obliczenia wykonane za pomocą autorskich programów z wykorzystaniem superpozycji i metody BS tylko 22s, zaś z wykorzystaniem metody 2D FE zaledwie 5s.

Zaproponowane przez Autora ujęcie jest bardziej efektywne, co ma znaczenie w procesie optymalizacji maszyn bezrdzeniowych o strumieniu osiowym. Opracowane oprogramowanie Autor połączył z procedurami obliczeń optymalizacyjnych silnika AFPMCM. Na podstawie otrzymanych wyników obliczeń zbudował prototyp. Wyniki obliczeń symulacyjnych porównał z wynikami pomiarów. Moment obliczony po zastosowaniu metody BS różnił się od momentu zmierzonego o 2.1%. Dla metody 2D FE różnica nie ta przekraczała 4.1% i 8.5% dla programu Maxwell 3D. Na podstawie otrzymanych wyników Autor wykazał, że wyniki uzyskane na podstawie programu komercyjnego, nawet dla bardzo gęstej siatki, są mniej dokładne od wyników uzyskanych w oprogramowaniu wykorzystującym superpozycję dwuwymiarowych rozkładów pól.

Przedstawiony artykuł pokazuje jak istotna jest umiejętność włączania obliczeń 2D do analizy układów, w których pole ma charakter trójwymiarowy. Pokazuje również, że w szczególnych przypadkach możliwe jest uzyskiwanie dokładnego rozwiązania układu 3D poprzez superpozycję rozwiązań układów dwuwymiarowych.

Podsumowanie

Prowadzone przez Autora wniosku prace były ukierunkowane przede wszystkim na opracowanie strategii obliczeń projektowych przetworników elektromagnetycznych, w których wykorzystuje się modele polowe. Autor wniosku koncentrował się na poszukiwaniu takich ujęć wykorzystujących modele dwu i trójwymiarowe, przy których możliwe będzie zredukowanie czasu obliczeń projektowych i optymalizacyjnych. Skrócenie czasu obliczeń wynika z zastosowania w procedurach optymalizacyjnych

modeli 2D wykorzystujących ekwiwalentne parametry. Zastępcze parametry modeli 2D są dobierane tak, aby zwiększyć dokładność modeli matematycznych wykorzystywanych w obliczeniach optymalizacyjnych i zbliżyć wyniki obliczeń tych modeli do wyników uzyskiwanych na podstawie modeli 3D. Wynikiem tych prac jest opracowana przez Autora wniosku strategia projektowania maszyn elektrycznych (3D→2D→3D), która może być stosowana przez projektantów maszyn wykorzystujących zarówno oprogramowanie własne jak i komercyjne.

Przeważająca większość prowadzonych przez Autora wniosku badań wymagała opracowania autorskich algorytmów i programów do analizy pola elektromagnetycznego oraz obliczeń sił i momentów elektromagnetycznych. Autor wniosku opracował własne modele 2D, quasi-3D i 3D oraz wdrożył szereg programów wykorzystujących te modele. Udoskonalił istniejące i opracował nowe algorytmy oraz procedury opisu źródeł pola magnetycznego w modelach 2D i 3D.

Do najważniejszych osiągnięć w głównym nurcie badań Autor wniosku zalicza:

- opracowanie autorskiej strategii 3D→2D→3D projektowania przetworników elektromagnetycznych [1, 2],
- opracowanie metod określania współczynników korygujących ekwiwalentne parametry i wymiary modeli 2D, na podstawie wstępnych obliczeń 3D [1, 2],
- opracowanie 2D, quasi-3D i 3D modeli polowych do analizy zjawisk elektromagnetycznych w przetwornikach elektromagnetycznych [1-9],
- opracowanie i wdrożenie algorytmów oraz procedur rozwiązywania zespolonych równań MEK sprzężonych z równaniami napięciowymi uzwojeń zawierających indukcyjności połączeń czołowych wyznaczanych na podstawie modeli 3D [4],
- opracowanie algorytmów i procedur obliczania źródeł pola na potrzeby analizy układów z polem elektromagnetycznym na podstawie modeli 2D i 3D [5-7],
- opracowanie procedur i algorytmów obliczania sił i momentów w układach 2D i 3D na podstawie rozkładu pola elektromagnetycznego wyznaczanego metodą elementów skończonych [8],
- opracowanie procedur odwzorowania uzwojeń o cienkich przewodach na potrzeby analizy przetworników z 3D polem elektromagnetycznym [7],
- opracowanie zbioru autorskich programów do analizy rozkładów pól elektromagnetycznych w przetwornikach elektromagnetycznych [1-9].

Omówiony przez Kandydata cykl publikacji nie wyczerpuje w pełni złożonej i obszernej problematyki związanej z analizę, projektowaniem i numerycznym

modelowaniem przetworników elektromagnetycznych z wykorzystaniem dwu- i trójwymiarowych modeli polowych. W dalszych badaniach Autor wniosku zamierza koncentrować się na numerycznym modelowaniu dwu i trójwymiarowych układów z polem elektromagnetycznym zasilanych ze źródeł wyższej częstotliwości.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych

Do pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych niewchodzących w skład osiągnięcia wymienionego w pkt. 4b Autor wniosku zalicza publikacje związane z realizacją prac badawczych dotyczących:

- 5.1. modelowania i analizy rozptyłu prądów indukowanych w wielospójnych obszarach przewodzących,
 - 5.2. modelowania i analizy zjawisk elektromagnetycznych zachodzących w układach bezprzewodowego przesyłu energii.
-

ad. [5.1] **Modelowanie i analiza rozptyłu prądów indukowanych w wielospójnych obszarach przewodzących:**

- [1] **Rafał M. Wojciechowski**, Andrzej Demenko, Jan K. Sykulski, 2010, *Inducted currents analysis in multiply connected conductors using reluctance – resistance networks*, Compel - The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, vol. 29, no. 4, pp. 908–918.

W artykule zaproponowano oryginalną metodę sieci reluktancyjno - rezystancyjnej (RRN). Metodę opracowano z myślą o wyznaczaniu rozptyłu prądów indukowanych w wielospójnych trójwymiarowych układach przewodzących. W pracy rozptyw prądów wyznaczano w przewodzącej płycie z niesymetrycznie rozmieszczonym otworem, tj. analizowano układ zaproponowany przez *TEAM Workshops problem No. 7*. Opracowano równania metody sieci reluktancyjno - rezystancyjnej, które formowano stosując metodę elementów krawędziowych dla sformułowań wykorzystujących potencjały wektorowe: magnetyczny \mathbf{A} oraz dwa elektryczne \mathbf{T} i \mathbf{T}_0 . Zaproponowano sposób formułowania równań MEK dla sformułowania wykorzystującego potencjał \mathbf{T}_0 , tj. równania opisujące rozptyw prądów indukowanych wokół obszarów niespójności. Równania metody RRN rozwiązywano stosując autorską metodą relaksacji blokowej w połączeniu z metodą dekompozycji Cholesky'ego.



-
- [2] **Rafał M. Wojciechowski**, Andrzej Demenko, Jan K. Sykulski, 2012, *Comparative analysis of $A-V$ and $A-T-T_0$ calculations of induced currents in multiply connected regions*, IET Science Measurement & Technology, vol. 6, no. 5, pp. 312–318.

W pracy przedstawiono analizę porównawczą dwóch sformułowań analizy pól elektromagnetycznych w układach z przewodzącymi obszarami wielospójnymi, tj. popularnego i ogólnie stosowanego sformułowania $A-V$ z nowym, mało znanym sformułowaniem $A-T-T_0$. Przedstawiono równania MEK dla rozważanych ujęć. Na przykładzie wybranych rozkładów wielkości polowych pokazano, że otrzymane rozkłady dla ujęcia $A-T-T_0$ są równoważne rozkładom uzyskiwanym po zastosowaniu ujęcia $A-V$. Wyniki obliczeń dla obu sformułowań porównano z wynikami uzyskanymi z pomiarów dla zadania testowego *TEAM Workshop Problem No. 7*. Wykazano, że stosując nowe ujęcie $A-T-T_0$ można w znaczący sposób skrócić czas obliczeń i szybciej uzyskać rozkłady prądów indukowanych w układach z przewodzącymi obszarami wielospójnymi niż stosując ujęcie $A-V$.

-
- [3] **Rafał M. Wojciechowski**, Cezary Jedryczka, Wojciech Szelaąg, Andrzej Demenko, 2012, *Description of multiply connected regions with induced currents using $T-T_0$ method*, Progress In Electromagnetics Research B, vol. 43, pp. 279-294.

W artykule przedstawiono metodę odwzorowania wielospójnych obszarów przewodzących w przestrzeni elementów skończonych. Do wyznaczania rozptyłu prądów indukowanych w obszarach wielospójnych zaproponowano nowatorską metodę połączonych potencjałów wektorowych T i T_0 . Podano równania metody $T-T_0$. Zastosowano metodę sieci rezystancyjnej. Omówiono sposób formułowania równań metody dla oczek podstawowych i oczek dodatkowych wokół obszarów niespójności dla ściankowego modelu obszaru wielospójnego. Formułując równania dla oczek wokół obszarów niespójności posłużono się macierzami opisującymi rozmieszczenie oczek dodatkowych w przestrzeni krawędzi i ścianek elementów skończonych. Podano zależności opisujące wektory wymuszeń dla pola przepływowego prądu. Skuteczność metody $T-T_0$ wykazano na przykładzie układu z przewodzącym obszarem wielospójnym i asymetrycznie rozmieszczonym otworem.

Omówione w punkcie 5.1 prace stanowią kontynuację badań realizowanych przez Autora wniosku w rozprawie doktorskiej. Kandydat w dalszym ciągu rozwija metody

numeryczne umożliwiające wyznaczanie rozkładów prądów indukowanych w jedno- i wielospójnych obszarach przewodzących.

ad. [5.2] **Modelowanie i analiza zjawisk elektromagnetycznych zachodzących w układach bezprzewodowego przesyłu energii:**

- [1] Milena Kurzawa, Wiesław Łyskawiński, **Rafał M. Wojciechowski**, 2015, *Measurement verification of a field-circuit model of the wireless energy transmission system*, XVIII International Symposium on Theoretical Electrical Engineering ISTET 2015, 7–10 June 2015, Kołobrzeg, Poland., pp. 96.

W pracy omówiono układ bezprzewodowej transmisji energii elektrycznej (WREL) złożony z transformatora powietrznego z równoległym - szeregowym obwodem rezonansowym, elementami obwodu zasilającego oraz odbiorczego. Na potrzeby analizy zjawisk elektromagnetycznych opracowano polowo-obwodowy model układu w środowisku Maxwell. Zbadano wpływ odległości pomiędzy cewkami transformatora oraz częstotliwości napięcia zasilania na: sprawność układu, moc pobieraną i wydatkowaną przez układ oraz wartość napięcia na zaciskach wyjściowych układu. Opracowano koncepcję oraz zbudowano stanowisko badawcze umożliwiające weryfikację wyników obliczeń. Przeprowadzono analizę porównawczą wyników obliczeń z wynikami pomiarów.

- [2] Wiesław Łyskawiński, Milena Kurzawa, **Rafał M. Wojciechowski**, 2016, *Polowy model transformatora powietrznego z uzwojeniem spiralnym w układzie bezprzewodowego przesyłu energii*, Poznań University of Technology Academic Journals, Electrical Engineering, Issue 85, pp. 255 - 265.

W pracy opracowano polowo-obwodowy model transformatora powietrznego pracującego w układzie bezprzewodowego przesyłu energii. Model obejmuje równania opisujące rozkład nieustalonego, wymuszanego napięciowo pola elektromagnetycznego i równania Kirchhoffa dla obwodów elektrycznych. Do formułowania równań dyskretnego modelu zjawisk zastosowano metodę elementów skończonych, wielkości krawędziowe i węzłowe. Uwzględniono zjawisko występowania prądów indukowanych w przewodach uzwojeń transformatora. Do rozwiązywania równań MES zastosowano metodę iteracyjną. Na podstawie uzyskanego algorytmu rozwiązywania równań MES opracowano oprogramowanie umożliwiające wyznaczanie nieustalonego pola magnetycznego. Oprogramowanie przetestowano na przykładzie układu bezprzewodowej trans-

misji energii z transformatorem powietrznym o uzwojeniach spiralnych i szeregowo-szeregowym obwodem rezonansowym. Przedstawiono wybrane wyniki obliczeń.

- [3] Milena Kurzawa, **Rafał M. Wojciechowski**, 2016, *Analiza układu bezprzewodowego przesyłu energii z szeregowo – szeregowym obwodem rezonansowym*, Poznań University of Technology Academic Journals, Electrical Engineering, Issue 86, pp. 241 - 253.

W pracy przedstawiono wyniki obliczeń symulacyjnych uzyskane na podstawie obwodowego modelu układu bezprzewodowej transmisji energii elektrycznej (WREL). Podano równania modelu obwodowego WREL z szeregowo – szeregowym obwodem rezonansowym. W celu rozwiązania równań modelu zastosowano metodę polegającą na dyskretyzacji czasu, tj. metodę kolejnych kroków czasowych (*z ang. time stepping method*) i schemat numeryczny z parametrem wagowym. Na podstawie zaproponowanego modelu opracowano autorskie oprogramowanie. W pracy zaproponowano metodę doboru wartości pojemności rezonansowych układu w zależności od pożądanej mocy układu i obciążenia układu. Zbadano wpływ wartości pojemności rezonansowych na sprawność układu, moc pobieraną i moc układu. Przedstawiono wybrane wyniki obliczeń symulacyjnych.

6. Podsumowanie

Dorobek naukowy Autora po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych wniosku, obejmuje **45** artykułów. W czasopiśmie z listy *Journal Citation Report* zostało opublikowanych **10** artykułów. **13** prac opublikowano w czasopiśmie specjalistycznych z zakresu elektromagnetyzmu, metod numerycznych i maszyn elektrycznych nieposiadających współczynnika wpływu (*Impact Factor*), tj.: *Progress In Electromagnetics Research B* (PIER B), *Poznan University of Technology Academic Journals*, *Przeglądzie Elektrotechnicznym czy Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, Komel. Pozostałe publikacje zostały opublikowane w materiałach renomowanych konferencji międzynarodowych, tj.: *International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields* (Compumag), *International Conference on Computation Electromagnetics* (CEM), *Symposium on Electromagnetic Phenomena in Nonlinear Circuits* (EPNC); *International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering* (ISEF), *Symposium Maszyn Elektrycznych* (SME); oraz w materiałach konferencji krajowych, tj.: *Wybrane Zagadnienia Elektrotechniki i Elektroniki* (WZEE),

Zastosowania Komputerów w Elektrotechnice (ZKwE), Podstawowe Problemy Energoelektroniki, Elektromechaniki i Mechatroniki (PPEEm).

Baza **Web of Science** Core Collection (WoS) indeksuje **22** publikacje cytowane **64** razy (w tym **40** bez autocytowań); **H-index** równy **6**. Ponadto baza zawiera **6** publikacji nieindeksowanych w bazie (w zakładce „*Cited Reference Search*”) cytowanych **6** razy. Sumarycznie wynikiem przeszukania bazy Web of Science Core Collection jest **70 cytowań** (w tym **43** bez autocytowań).

Baza **Scopus** indeksuje **30** publikacji cytowanych **92** razy (w tym **58** bez autocytowań); **H-index** równy **6**. Dodatkowo **11** publikacji nieindeksowanych w bazie Scopus (pobranych z pola *References* artykułów cytujących) jest cytowanych **16** razy. Sumarycznie wynikiem przeszukania bazy Scopus jest **108** cytowań (w tym **59** bez autocytowań).

Publikacje Autora wniosku są cytowane również w rozprawach doktorskich:

- Łukasz Knypiński, 2016, *Optymalizacja silników o magnesach trwałych na podstawie polowo-obwodowego modelu zjawisk elektromagnetycznych*, Politechnika Poznańska, Poznań 2016,
- Cristian Robert Roman, 2014, *Study of the electromagnetic pumping systems of molten metals and molten salts*, Universite Grenoble Alpes, France,
- Elmer Sorrentino Ramírez, 2014, *Determinación de las impedancias homopolares de un transformador trifásico de tres columnas con conexión YNyd a partir de sus dimensiones geométricas*, Universidad Carlos III de Madrid, España,
- Dang Quoc Vuon, 2013, *Modeling of Electromagnetic Systems by Coupling of Subproblems - Application to Thin Shell Finite Element Magnetic Models*, University of Liege, Belgium,
- Patricia Penabad Duran, 2013, *3D Methodology for the Overheating Assessment on Power Transformers Structural Parts*, University of Vigo, Vigo, Spain,

i książce:

Giselle M. Galvan-Tejada, Marco Antonio Peyrot-Solis, Hildeberto Jardón Aguilar, 2015, *Ultra Wideband Antennas: Design, Methodologies, and Performance*, CRC Press.

Sumaryczna liczba punktów Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego dla publikacji Autora wniosku wynosi **577** (09.02.2017r.)

Sumaryczny Impact Factor dla publikacji w czasopismach z listy JCR zgodnie z rokiem opublikowania wynosi **11.762**.

Aktywność Autora wniosku w środowisku naukowym związana jest m.in. z aktywnym uczestnictwem w międzynarodowych konferencjach naukowych i pełnioną od 2011 roku funkcją Sekretarza Technicznego Komitetu Elektrotechniki PAN. Autor wniosku jest zapraszany do przygotowywania recenzji artykułów do czasopism indeksowanych w bazie JCR, tj.: *IEEE PES Trans. on Energy Conversion, IEEE Trans. on Magnetics, Journal of Mechanical Engineering Science, Compel, Progress In Electromagnetics Research* oraz renomowanych czasopism spoza tej bazy, np.: *Archives of Electrical Engineering, Advances in Electrical Engineering, Academic Journals Poznan University of Technology, Electrical Engineering, Przegląd Elektrotechniczny*.

Autor wniosku uczestniczył aktywnie w realizacji wieloletniego bardzo dużego projektu „*Nowa generacja energooszczędnych napędów elektrycznych do pomp i wentylatorów dla górnictwa*” współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego, oraz projektu rozwojowego „*Proszkowe obwody magnetyczne w uniwersalnych napędach elektrycznych*” finansowanego z środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego. Kierował pracami badawczymi w ramach projektu pt. „*Półowa analiza zjawisk w przetwornikach elektromagnetycznych zasilanych ze źródeł wyższych częstotliwości*” finansowanego z dotacji celowej na prowadzenie badań naukowych lub prac rozwojowych oraz zadań z nim związanych, służących rozwojowi młodych naukowców. Uczestniczył aktywnie w badaniach naukowych realizowanych we współpracy z Otis Elevator Company, Clipper Windpower czy United Technologies Research Center.

Poza działalnością naukową Autor wniosku prowadzi aktywnie działalność popularyzatorską i dydaktyczną. W latach 2008-2012 uczestniczył w wieloletnim projekcie „*Era Inżyniera. Rozbudowa potencjału rozwojowego Politechniki Poznańskiej*”, oraz projekcie „*Europejska Noc Naukowców*” w latach 2015 i 2016. Uczestniczył w XVI Poznańskim Festiwalu Nauki i Sztuki w 2013r. z pokazem nt. „*Materiały inteligentne i współczesne układy napędowe stosowane w przemyśle motoryzacyjnym*” oraz XVII Poznańskim Festiwalu Nauki i Sztuki w 2014r. z pokazem nt. „*Współczesne układy napędowe w mechatronice i robotyce*”. Od roku 2010 jest opiekunem naukowym Koła Naukowego „*Magnesia*” działającym przy Zakładzie Mechatroniki i Maszyn Elektrycznych Politechniki Poznańskiej. W roku akademickim 2013/2014 pełnił funkcję opiekuna naukowego studenta Tomasza Boczkowskiego realizującego indywidualny program studiów na 2 i 3 semestrze studiów stacjonarnych magisterskich na kierunku Elektrotechnika. Od roku 2013 pełni także funkcję promotora pomocniczego mgr inż. Piotra Łukaszewicza w otwartym przewodzie doktorskim nt. „*Analiza rozkładu sił*”

pochodzenia elektromagnetycznego w maszynach elektrycznych o magnesach trwałych" na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej.

Zestawienie osiągnięć po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych:			Razem
Opublikowane prace naukowe			45
Czasopisma	z listy JCR	10	
	międzynarodowe	2	
	krajowe	11	
Materiały konferencyjne	międzynarodowe	19	
	krajowe	3	
Opracowania zbiorowe			
Kierowanie lub udział w projektach badawczych	międzynarodowe	6	9
	krajowe	3	
Udział w konferencjach naukowych lub w komitetach organizacyjnych tych konferencji	międzynarodowe	8	10
	krajowe	2	
Zgłoszenia patentowe (międzynarodowe)			2
Uczestnictwo w programach europejskich, międzynarodowych i krajowych			2
Udział w konsorcjach i sieciach badawczych			1
Członkostwo w towarzystwach naukowych			5
Wykonane ekspertyzy lub inne opracowania na zamówienie			5
Udział w zespołach eksperckich i konkursowych			1
Recenzowanie artykułów dla czasopism	z listy JCR	22	31
	międzynarodowych	4	
	krajowych	5	
Recenzowanie artykułów konferencyjnych	międzynarodowych	42	44
	krajowych	2	
Recenzowanie projektów międzynarodowych dla <i>Austrian Science Fund (FWF - Der Wissenschaftsfonds)</i>			1
Zestawienie wskaźników bibliometrycznych:			
Sumaryczny Impact Factor (<i>IF</i>) opublikowanych publikacji według listy JCR			11.762
Liczba cytowań publikacji według bazy WoS (<i>bez autocytowań</i>)			70(43)
Indeks Hirscha według bazy WoS			6


 /Rafał M. Wojciechowski/