
Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa JUSTA
pt. „*Metodyka projektowania konstrukcji i sterowania mechatronicznego urządzenia wykonawczego ruchu liniowego*”
wykonanej pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Wojciecha Tarnowskiego z Politechniki Koszalińskiej

Podstawa prawna: Pismo, DZIEKANA Wydziału Technologii i Edukacji Politechniki Koszalińskiej,
prof. dr hab. inż. Tomasza KRZYŻAŃSKIEGO z dnia 8.09.2017

1. Krótki opis zawartości recenzowanej rozprawy

180-stronicowa rozprawa doktorska, składa się z 9 rozdziałów, liczącego ponad 100 pozycji spisu literatury i trzech załączników.

Poprzedzony wykazem oznaczeń i skrótów 13-to stronicowy Wstęp zawiera: wprowadzenie, cele i tezy pracy oraz opis i klasyfikację napędów liniowych. Ponadto podrozdział 1.5 Wstępu zawiera krótką charakterystykę badanego obiektu i zakres pracy. Niezmiernie istotny jest przegląd literatury i analiza stanu dotychczasowych badań na tle przeglądu literatury.

W drugim rozdziale zwięźle opisano procedurę projektowania układów z magnesami trwałymi.

W rozdziale trzecim opisano słownie wstępny model fizyczny i matematyczny napędu liniowego. W podrozdziale 3.1 przedstawiono model obwodowy, a w rozdziale 3.2 model polowy.

Rozdział czwarty zawiera opis modelu matematycznego i jego aplikacji komputerowej w odniesieniu do rozważanego obiektu.

Rozdział piąty (34 strony), stanowiący jeden z głównych trzonów pracy, dotyczy wielowariantowych obliczeń mających na celu ulepszenie parametrów napędu liniowego.

Rozdział szósty zawiera obliczenia strat w obwodzie magnetycznym, co wiąże się z bardzo ważnym zagadnieniem określania nagrzewania się napędu.

Rozdział siódmy (25 stron), dotyczy symulacji własności dynamicznych silnika liniowego opartych na modelu polowym oraz polowo-obwodowym.

Rozdział ósmy (30 stron), zawiera opis i wyniki badań eksperymentalnych będących weryfikacją pomiarową obliczeń.

Rozdział dziewiąty obejmuje wnioski oraz plan dalszych badań w celu optymalizacji konstrukcji napędów liniowych.

2. Ocena wyboru tematu i tezy naukowej rozprawy

2.1 Celowość podjęcia pracy

Temat rozprawy jest ukierunkowany na problemy metodologii projektowania i przetworników elektromechanicznych, a w szczególności urządzeń wykonawczych o ruchu liniowym z wykorzystaniem nowoczesnego polowego i polowo-obwodowego opisu zjawisk. Problemy czasoprzestrzenne są najtrudniejszymi rozwiązywanymi obecnie w elektrotechnice.

Dlatego też Autor porównuje model polowy i polowo-obwodowy. Problematyka ta wymaga znajomości nie tylko analizy pól elektromagnetycznych, lecz także dynamiki obiektów elektromagnetycznych z uwzględnieniem ich sterowania. W/w opis zjawisk jest szczególnie efektywny dla obiektów o charakterystykach nieliniowych oraz tych zasilanych z falowników.

Silniki i przetworniki elektromechaniczne o ruchu liniowym są od końca lat 80-tych (ub. stulecia) przedmiotem intensywnych badań. Świadczą o tym publikacje konferencji międzynarodowych Compumag, ICEM, EPNC, MSM i innych. Autor rozprawy powinien na początku podkreślić, że w celu porównawczym rozwiązał programem Comsol-Multiphysics zagadnienie brzegowe dla równania typu parabolicznego, a także zbudował model polowo-obwodowy w środowisku Matlab-Simulink. Ponieważ silniki liniowe płaskie zostały dobrze opisane dawno temu np. w książkach prof. K. Pawluka (1974) i prof. J. Gierasa (1990), i w publikacjach prof. E. Mendreli (1982), Doktorant koncentruje uwagę na silnikach tubowych, gdzie wykorzystanie materiałów czynnych jest lepsze niż w silnikach płaskich. Silniki te odznaczają się większą siłą ciągu na jednostkę materiałów czynnych. Są one najczęściej elementami wykonawczymi realizującymi krótkie przemieszczenia (pompy, ubijaki itp.).

Dotychczasowe konstrukcje silników liniowych i przetworników mechanicznych -w większości przypadków- analizowano z wykorzystaniem modeli obwodowych oraz uproszczonych modeli polowych. Tak więc, rozprawa dotyczy aktualnej i rozwijanej w ostatnich latach dziedziny – polowo-obwodowej analizy urządzeń elektromagnetycznych na podstawie symulacji komputerowych. Tematykę rozprawy uważam za aktualną, a wyniki badań przedstawione w pracy wnoszą istotny wkład w opracowanie metodologii projektowania układów elektromechanicznych.

Ze względu na powyższe, **przedmiot rozprawy uważam za ważny zarówno pod względem naukowym jak również poznawczym i konstrukcyjnym.**

2.2 Tezy pracy

Autor we wprowadzeniu opisuje szczegółowe cele pracy, które można określić jako:

- opracowanie procedur i oprogramowania do badania właściwości statycznych i dynamicznych silników liniowych. Należało tu podkreślić, że Autorowi chodzi o efektywne i zarazem dokładne algorytmy.
- przeprowadzenie obliczeń wielowariantowych w celu ulepszenia parametrów badanych obiektów. Warto dodać, że obliczenia te często zastępują trudne zadania optymalizacji.
- przeprowadzenie weryfikacji pomiarowej obliczeń na dedykowanym stanowisku pomiarowym z wykorzystaniem wykonanych przez Autora modeli fizycznych.
- porównanie efektywności modeli matematycznych polowych i polowo-obwodowych w symulacji pracy silników liniowych

Uwzględniając przedstawione wyżej cele pracy oraz zastosowanie magnesów trwałych, Autor sformułował dwie hipotezy rozprawy. Pierwsza z nich mówi o *możliwości opracowanie uniwersalnego i efektywnego narzędzia komputerowego do symulacji i projektowania silników liniowych z magnesami trwałymi*. Ponieważ magnesy trwałe stały się uprawnionym (dla urządzeń elektromagnetycznych) materiałem czynnym, więc mogło to być również zawarte w tytule pracy, podobnie jak to zrobił Autor w tytule rozdziału 2.

Druga teza zakłada, że *wielowariantowa (a nie wieloaspektowa) analiza numeryczna umożliwia poprawę parametrów silnika liniowego już na etapie projektowania*. Autor powinien podkreślić, że nawet w ujęciu obwodowym analiza ta jest oparta na obliczaniu strumieni magnetycznych, co polega na apriorycznym założeniu rozkładu pola.

Autor pisze o powodach postawienia tych hipotez. Jednym z nich jest zmniejszenie szkodliwej siły zaczepowej od magnesów trwałych. Sugeruje to, że magnesy trwałe a'priori' pogarszają właściwości urządzenia. Proponuję, aby w przyszłości pisać o relatywnym (w

stosunku do siły ciągu) zmniejszeniu współczynnika zaczepowego. Niestety, w wielu publikacjach mówi się o samej sile zaczepowej.

3. Merytoryczna ocena na tle opisu treści rozprawy

3.1 Podstawowe założenia i wybór metod analizy

Zgodnie z tytułem, rozprawa dotyczy opracowania metodyki projektowania urządzeń o ruchu liniowym. Autor, we wprowadzeniu do rozdziału 2 bardzo zwięźle omawia nowoczesne sposoby ich projektowania i podkreśla celowość stosowania metod połowych. Warto podkreślić, że chodzi o urządzenia elektromagnetyczne z magnesami trwałymi.

Architektura pracy świadczy o prawidłowym podejściu Doktoranta do udowodnienia postawionych tez. Tak więc, Autor w rozdziale 2.2.1 formułuje wymagania jakie, powinien spełniać projektowany napęd. Jednakże, brakuje tu powołań na literaturę. Dotyczy to szczególnie aspektów ustalenia maksymalnego przepływu uzwojeń wzbudzających pole, i maksymalnej temperatury pracy. Chodzi o ustalenie przepływu maksymalnego uzwojeń, który określono jako połowę siły koercji Θ_m magnesów trwałych (a nie, jak pisze Autor –ich przepływu). Reasumpcyjne stwierdzenie, że maksymalna temperatura pracy magnesów nie może przekraczać punktu Curie – to trochę za mało, bowiem projektant musi również wprowadzić ograniczenia co do temperatury pracy uzwojeń, elementów izolacyjnych itp.

Autor w rozdziale 2.2.2 słusznie przeprowadza obliczenia wstępne konstrukcji z wykorzystaniem modelu obwodowego. Takie postępowanie pozwala na prawidłowe sformułowanie założeń konstrukcyjnych. W tym podrozdziale Autor nie powinien pisać, że element ma ustaloną cechę (np. wymiar), lecz że będzie spełniał wymieniony warunek-cechę. Pewne założenia wymagają komentarzy. Przykładowo, dotyczy to strumienia magnetycznego, który spełnia równanie (2.1), lecz przy założeniu braku strumienia rozproszenia. Doktorant słusznie zauważa, że do sformułowania założeń konstrukcyjnych należy stosować modele uproszczone, np. obwodowe. Rozdział 2.2.2 jest dobrze napisany i kończy się tabelą 2.1, w której podano wstępne wymiary elementów czynnych. Można było pod wzorami podać również wartości liczbowe, co w naturalny sposób doprowadziłoby do w/w tabeli.

Krótki (12-stronicowy) Rozdział 3 również oceniam dobrze. Jednakże w tytule nie powinno być słowa fizyczny, ponieważ Autor opisuje tu identyfikację zjawisk, która prowadzi do założeń upraszczających model matematyczny. Bardzo ważne jest stwierdzenie, że „przepływ prądu generuje strumień magnetyczny, który jest skierowany przeciwnie do strumienia od magnesów trwałych, lub też sumuje się z tym strumieniem, w zależności od pozycji biegnika względem stojana”. Jest to główna zasada działania napędu, która w wielu pracach nie jest podkreślana. Należy podkreślić autorskie zrozumienie zasady działania elektrycznych napędów liniowych. Pozwoliło to na schematyczną (Rys. 3.1) ilustrację wzajemnej zależności tych zjawisk. Dobrze wykonany opis strumieni magnetycznie skojarzonych, występujących w omawianym napędzie (Rozdz. 3.3.1) ułatwia czytelnikowi zrozumienie istoty problemu.

Moim zdaniem, zbyt skromnie opisano model połowy rozważanego silnika liniowego. Podano równania dla wielkości magnetycznych, lecz nie sformułowano zagadnień brzegowych, dla których te równania są rozwiązywane. Istotnym usprawiedliwieniem tego faktu może być wykorzystanie gotowych pakietów połowych (np. Comsol), w których warunki brzegowe i symetrii zadaje się w postaci słownej. Należy jednak podkreślić, że skuteczniono trudną analizę pola elektromagnetycznego z uwzględnieniem nieliniowości i odwzorowania oddziaływania prądów indukowanych polem zmiennym.

3.2 Ocena metod rozwiązywania zagadnienia

Z punktu widzenia matematyki rozwiązano równania pola w obszarze 2-wymiarowym z uwzględnieniem warunku symetrii na osi rozważanego napędu. Uwzględniono dodatkowe

utrudnienie spowodowane zmianami szukanej funkcji potencjału wektorowego związane z przesunięciem elementu ruchomego - biegnika. W celu analizy pola elektromagnetycznego wykorzystano Metodę Elementów Skończonych (MES). Po zamieszczeniu równania (3.23), cząstkowego względem potencjału wektorowego, Autor uwzględnił symetrię osiową wprowadzając potencjał, który nazwał elektromagnetycznym (równanie 3.26). Jest to tzw. potencjał zredukowany będący iloczynem promienia ρ i składowej kątowej potencjału wektorowego A_ϕ stosowany w celu ułatwienia obliczeń. Zdanie „*W przypadku pola płaskiego przyjmuje się, że wielkości polowe nie są funkcją współrzędnej z*” zawiera pewną nieścisłość i dotyczy modelowania 3D, w którym pole płaskie spełnia ten warunek. Natomiast Autor rozważa układ płaski we współrzędnych z i r .

Doktorant słusznie zatytułował rozdział 4 jako „*Model komputerowy...*”, ponieważ istnieje wiele programów komputerowych, które pozwalają na adekwatne obliczenia polowe. Ich opis matematyczny jest, z wiadomych względów, bardzo skromny, a formułowanie zagadnień brzegowych niejako mnemotechniczne. Przykładem może być rozdz. 4.2 pracy, gdzie Autor opisał również zagadnienie związane z dyskretyzacją podobszarów przemieszczających się. Na rys. 4.2 podano obszar obliczeniowy z osią symetrii, bez równań obowiązujących na niej oraz na granicach tego obszaru. Komentarz równania (4.2), dotyczącego pochodnych względem funkcji R i Z , znacznie wzbogaciłby pracę.

Bardzo ciekawy jest rozdział 4.3, gdzie Autor pisze nie tylko o obliczeniach indukcyjności i strumieni, lecz przede wszystkim o obliczeniach sił magnetycznych. Wykorzystywanie Tensora Naprężeń Maxwella (TNM) jest niekonwencjonalnym podejściem do tego zagadnienia. Do wyznaczenia sił pochodzenia reluktancyjnego słusznie proponuje się metodę TNM, lub metody prac wirtualnych. Podano, i porównano wyniki obliczeń z zastosowaniem zarówno tensora naprężeń jak też metody prac wirtualnych. Autor stwierdza, że metoda TNM daje nieco mniejsze wartości, lecz „nieco gładsze” przebiegi siły w funkcji położenia biegnika i słusznie zauważa, że metoda prac wirtualnych wymaga dokładniejszej dyskretyzacji przemieszczenia się biegnika. Należy jednak zaznaczyć, że w przypadku nieliniowym siłę trzeba obliczać z koenergii magnetycznej.

3.3 Merytoryczna wartość wyników rozprawy

W stanowiącym jeden z głównych trzonów pracy (24 strony) rozdziale 5, Autor opisuje wielowariantowe obliczenia prowadzące do poprawy parametrów elektromechanicznych. Do polowej analizy konstrukcji wybrał środowisko Comsol Multiphysics, chociaż znane są Mu również inne komercyjne pakiety. Doktorant opracował również algorytm wiążący wyniki analizy pola z równaniami obwodowymi w układach zasilanych napięciowo i prądowo, a także z przekształtników energoelektronicznych.

Autor obliczył pole magnetyczne i wpływ magnetyzacji magnesów na siłę magnetyczną napędu liniowego. Dotyczy to zasilania stosowanego w silnikach krokowych (podrozdz. 5.3), a także synchronicznych (podrozdział. 5.4). Ponadto, zbadano wpływ geometrii obwodu magnetycznego na właściwości napędu, Wyznaczono wartość maksymalną i średnią siły. Wykonano analizę wpływu struktury geometrycznej na parametry silnika tubowego z wykorzystaniem opracowanych uprzednio algorytmów. Bardzo cenne jest porównanie rozkładów indukcji dla 3ch rodzajów konstrukcji biegnika: z magnesami o magnetyzacji: promieniowej, osiowej oraz Halbacha, w stosunku do osi silnika. Porównano wyniki obliczeń z wykorzystaniem MES oraz wzorów analitycznych (Rys. 5.4, 5.6, 5.8). Chociaż przedstawiona metoda analityczna polega na rozwiązaniu równań pola z wykorzystaniem funkcji specjalnych, to warto było podać (w załączniku B) nie tylko wzory, lecz również wartości uzyskane dla wybranych położań biegnika. Na rysunkach nie zamieszczono nabiegunników stojana, a przecież od tego zależy rozkład pola, czego nie obejmują przytoczone wzory analityczne.

Ważnym elementem pracy jest analiza wpływu geometrii magnetowodu silnika na jego charakterystyki. Badano zmiany wymiarów magnetowodu stojana, co niewątpliwie wiąże się z wymiarami cewek. Jak można się było spodziewać, kilkakrotna zmiana wysokości stojana daje tylko kilkoprocentową zmianę siły zaczepowej. Wpływ wymiarów cewek nie jest tak istotny jak wpływ wymiarów magnesów trwałych oraz przekładek ferromagnetycznych, biegnika, które Autor nazwał jarzmami. Ważny jest tutaj wniosek, że wzrost szerokości elementów biegnika powoduje wzrost siły ciągu do pewnej wartości. Wynika to z udziału siły zaczepowej i magnetycznej w wartości całkowitej siły, co zilustrowano na Rys. 5.24 i 5.25.

Niemal najważniejszym aspektem projektowania jest analiza cieplna obiektu. Przegrzanie może spowodować całkowite rozmagnesowanie magnesów, nie mówiąc już o uszkodzeniu izolacji uzwojeń. Analiza cieplna jest zagadnieniem bardzo trudnym. Chodzi nie tylko o wyznaczenie źródeł ciepła, lecz przede wszystkim o ukierunkowanie jego strumienia. Dlatego też z wyjątkowym asumptem przeczytałem rozdział 6 pt. „*Straty w obwodzie magnetycznym napędu liniowego*”. Przede wszystkim, ważne są straty z histerezy i prądów wirowych przy zasilaniu prądem przemiennym, które również występują podczas zasilania z układów PWM. Autor podaje zależność strat w magnetowodzie od częstotliwości i sposobu zasilania silnika liniowego. Ciekawe byłoby zestawienie tych strat dla różnych konstrukcji silnika tubowego. Ponieważ, ze względu na złożoność modelu, Autor obliczał straty w modelu jednosegmentowym, więc wnioski uzyskane z tej analizy stanowią pewien przyczynek do dalszych badań naukowych.

Drugim trzonem pracy jest 26cio stronicowy rozdział 7. Do badań symulacyjnych w nim opisanych zastosowano zarówno pakiet do analizy polowej zjawisk niestacjonarnych, w środowisku Comsol-multiphysics, jak również narzędzie wykonane w środowisku Matlab-simulink. Doktorant analizował pracę silnika jedno, trój, dziewięcio- segmentowego oraz wielofazowego, w zakresie prądów zasilania od 1 do 12A i 36 milimetrowym skoku biegnika. Bardzo ciekawa jest analiza przemieszczenia biegnika w zależności od jego masy oraz w funkcji współczynnika tarcia. Autor sparametryzował w obliczeniach napięcie. Wyjaśnienia wymaga przesunięcie względem siebie wykresów przebiegów siły i przemieszczenia biegnika silnika 1- i 3- segmentowego uzyskany w obydwu w środowiskach. Szkoda, że Autor nie stabelaryzował wartości prądów i napięć, podanych na rysunkach 7.13, 7.14, 7.17 i 7.21.

Autor słusznie podkreśla czasochłonność rozwiązania polowego (1,4 h) w porównaniu z kilkosekundową analizą wykonaną z wykorzystaniem pakietu Matlab. Należy podkreślić, że obliczenia wykonywano na komputerze z procesorem Pentium Dual Core T4300 taktowanym zegarem 2,1 GHz. Dlatego też dla silnika 9-cio segmentowego i wielofazowego Autor podał wyniki uzyskane przy pomocy środowiska Matlab. Dla silnika wielofazowego Doktorant rozpatrzył 3-fazowe sterowanie bipolarne i sinusoidalne. Słuszna jest uwaga, iż zmniejszenie szerokości impulsów wygładza czaso-przebiegi siły i przesunięcia. Analiza pracy silnika sterowanego napięciem sinusoidalnym świadczy o konieczności skorelowania liczby segmentów i częstotliwości zasilania sinusoidalnego w celu zmniejszenia wielkości impulsów w miejscach skoków biegnika. Cały rozdział 7 jest bardzo ciekawy. Jednakże porównanie różnych konstrukcji powinno być wielowątkowe, zarówno pod względem zasilania jak i elementów czynnych. Stwierdzenie, że zwiększenie liczby segmentów i częstotliwości sygnałów sterujących poprawia właściwości dynamiczne silnika jest zbyt ogólne.

W rozdziale 8 opisano elementy modelu fizycznego silnika liniowego i zakres testów oraz stanowisko do weryfikacji pomiarowej symulowanych charakterystyk. Porównano też wyniki badań eksperymentalnych z wynikami symulacji charakterystyk silnika liniowego. Na rysunkach 8.1 do 8.4 Autor zamieścił dobrej jakości zdjęcia części składowych modelu fizycznego wykonanego w w/w celu. Ponadto przystępnie opisał aparaturę kontrolno-pomiarową. Należy podkreślić prawdziwą współpracę z Wojskową Akademią Techniczną, gdzie Doktorant robił pomiary.

3. 4 Wykaz osiągnięć Doktoranta

Za najważniejsze osiągnięcie Autora uważam

- Rozwiązanie parabolicznego równania przestrzenno-czasowego dla napędu liniowego z wykorzystaniem oprogramowania Comsol-multiphysics,
- opracowanie modeli polowo- obwodowych i oprogramowania do symulacji dynamiki napędów liniowych,
- wykonanie efektywnej symulacji analizy pracy dla wielowariantowych konstrukcji silników liniowych,
- zaprojektowanie, wykonanie i przeprowadzenie weryfikacji pomiarowej obliczeń na obiekcie fizycznym,
- przeprowadzenie analizy porównawczej wybranych wymiarów obiektu i zastosowanych materiałów czynnych nakierowanej na wybór konstrukcji zbliżonej do optymalnej,

4. Ocena kompetencji doktoranta

4. 1 Ocena umiejętności prezentacji wyników

Praca jest napisana zrozumiałym językiem. Jest starannie ilustrowana graficznie. Poza nielicznymi błędami edytorskimi, praca nie wymaga uzupełnień i poprawek.

Moim zdaniem wyjaśnienia wymaga fakt, że Autor przedstawia głównie rezultaty obliczeń w postaci rozkładów modułu indukcji w obszarze rdzenia. W obszarze poza nim i uzwojeniami ważne byłoby podanie przynajmniej decydującej składowej indukcji. Ma to znaczenie w przypadku uwzględniania pola magnetycznego rozproszenia.

Przedstawiona rozprawa dowodzi, że doktorant umie korzystać z najnowszej literatury w obranej dziedzinie wiedzy, podchodzi do niej krytycznie, a ponadto potrafi twórczo rozwijać osiągnięcia innych autorów. Autor umiejętnie przeprowadził analizę porównawczą symulacji charakterystyk dla różnych rozwiązań konstrukcyjnych, co nie jest łatwe. Wnioski z symulacji są prawidłowe.

Przedstawiona praca została starannie przygotowana jako praca promocyjna (doktorska). Składa się ona z 9-ciu rozdziałów, dwóch załączników i obszernej (ponad 100 pozycji) bibliografii. Zastosowany sposób numeracji pozycji literaturowych jest raczej wykorzystywany w roboczych wersjach prac. Lepiej stosować numerację cyfrową. Publikacje Doktoranta obejmują 8 pozycji i są łatwo dostrzegalne. Szata graficzna jest bardzo bogata i ilustruje, w postaci diagramów, niemal wszystkie analizowane przypadki.

4. 2 Ocena stopnia wiedzy ogólnej doktoranta

Autor rozprawy wykazał się dobrą ogólną wiedzą teoretyczną w zakresie optymalizacji konstrukcji silników tubowych będących przedmiotem pracy. Świadczy o tym fakt, że do analizy napędu liniowego zasilanego napięciowo (Rozdz. 5 i 7) przyjął model obliczeniowy, uwzględniający powiązanie wyników analizy pola z algorytmem rozwiązania równań obwodowych, co w roku 2001 nazwałem metodą polowo-obwodową. Ze względu na koszty obliczeń jest to jedyne efektywne podejście do analizy układów elektromechanicznych z zasilaniem falownikowym.

Doktorant wykazał się dobrą znajomością nowoczesnej metodyki modelowania złożonych obiektów fizycznych, wykorzystania pakietów komercyjnych i wiedzą praktyczną w zakresie tworzenia modeli fizycznych oraz weryfikacji pomiarowej obliczeń.

Wyniki rozważań zawarte w pracy upoważniają do stwierdzenia, iż zostały udowodnione tezy rozprawy oraz osiągnięto założone cele pracy.

5. Uwagi ogólne

Ponieważ tytuł pracy zawiera frazę „metodyka projektowania” to wydaje się, że Doktorant powinien przynajmniej wspomnieć o zastosowaniu modelowania opartego na elektromagnetycznym skalowaniu równań Maxwella, które z powodzeniem wprowadzono w Katedrze elektrotechniki i Mechatroniki Politechniki Opolskiej, w odniesieniu do obliczania silników liniowych a także dławików i transformatorów. Zastosowanie tego podejścia pozwala uniknąć wielokrotnej analizy pola w celu opracowania typoszeregu w/w obiektów.

W całej pracy niesłusznie użyto sformułowania „*nieliniowy rozkład pola magnetycznego*”. Można skonstatować charakter pola, jako „*pole z podobszarami o nieliniowych charakterystykach*”. Jednakże, esencjonalnie może być „*pole nieliniowe*”. Jest to sprawa semantyki. Autor jest tu częściowo usprawiedliwiony, ponieważ nawet w literaturze fachowej niesłusznie używa się błędnych sformułowań np. „*źródła energii odnawialnej*”.

Doktorant we wnioskach końcowych słusznie zauważa, że ważne są czasy obliczeń, które świadczą o skuteczności pakietu software'owego, przy zadanej dokładności. Autor stwierdza, że obliczanie niestacjonarnego zagadnienia polowego (w środowisku Comsol-multiphysics) zajmuje kilka godzin, podczas gdy obliczenia metodą polowo-obwodową trwają ok. minuty. Tym samym wykazał efektywność obliczeń zawartych w tezie pracy. Bardzo ciekawe byłoby porównanie czasów dla poszczególnych „bazowych” przykładów.

Uważam, że praca stanowi samodzielne rozwiązanie szeregu ważnych zagadnień naukowych przy użyciu nowoczesnych metod badawczych. Uwagi zawarte w komentarzach mogą być dyskusyjne i moim zdaniem nie wymagają natychmiastowej korekty i nie obniżają pozytywnej merytorycznej pracy.

6. Konkluzja recenzji

Stwierdzam, że opiniowana rozprawa pt. „*Metodyka projektowania konstrukcji i sterowania mechatronicznego urządzenia wykonawczego ruchu liniowego*” autorstwa mgr inż. Krzysztofa JUSTA stanowi samodzielne rozwiązanie zadania badawczego i spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim przez Ustawę o Tytule Naukowym i Stopniach Naukowych oraz Stopniach i Tytule w Zakresie Sztuki z 14 marca 2003 roku wraz z późniejszymi zmianami.

W związku z powyższym, wnioskuję o przyjęcie przedstawionej pracy jako rozprawy doktorskiej i dopuszczenie mgr inż. Krzysztofa JUSTA do obrony w/w pracy.

Bronisław Tomczuk

Kierownik
Katedry Elektrotechniki i Mechatroniki

Prof. dr hab. inż. Bronisław Tomczuk

