

R E C E N Z J A

rozprawy doktorskiej mgra inż. Michała Szulborskiego pt.

„Analiza sił elektrodynamicznych w torach prądowych i zestykach aparatów elektrycznych w oparciu o symulacyjne analizy sprzężone”

Recenzję rozprawy doktorskiej mgr. inż. Michała Szulborskiego opracowano na zlecenie Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne prof. dr hab. inż. Tomasza Stareckiego, w oparciu o przekazany zasadniczy tekst rozprawy liczący 265 stron.

1. Ocena wyboru tematu i zakresu pracy doktorskiej

Praca doktorska mgra inż. Michała Szulborskiego dotyczy analizy obliczeniowo-badawczej oddziaływań elektrodynamicznych w torach prądowych i zestykach aparatów elektrycznych, które są podstawowymi urządzeniami systemu elektroenergetycznego. Analiza ta ma na celu głównie ustalenie sił i naprężeń występujących w nieruchomych i ruchomych torach prądowych, oraz wspornikach i elementach mocujących, przy przepływie prądów zwarciovych, a także sił działających na łuk elektryczny w komorach gaszeniowych łączników, oraz w cewkach.

Istotne znaczenie w procesie prowadzonych obliczeń miało zastosowanie analizy sprzężonej, umożliwiającej jednoczesne uwzględnienie zagadnień sił elektrodynamicznych i momentów mechanicznych oraz wynikających z nich efektów naprężeniowych. Takie podejście umożliwia prowadzenie kompleksowej analizy konstrukcji elektromechanicznej obciążonych elektrodynamicznie, jednakże wiąże się to z koniecznością zastosowania specjalnych typów elementów skończonych. Prowadzenie obliczeń numerycznych z zastosowaniem analizy sprzężonej stanowi bardziej złożone zagadnienie w porównaniu z klasyczną analizą wytrzymałościową, wymagające wykorzystania komputerów posiadających duże moce obliczeniowe oraz oprogramowania umożliwiającego prowadzenie obliczeń w tym zakresie. Dodatkowe zagadnienie stanowi porównanie otrzymanych wyników obliczeń numerycznych z rezultatami badań doświadczalnych, z obliczeniami analitycznymi, gdy tylko

jest to możliwe, stanowiące bieżącą formę weryfikacji poprawności zastosowanych w obliczeniach modeli numerycznych.

Problematyka rozprawy obejmuje w szczególności zagadnienia związane z obliczaniem:

- sił elektrodynamicznych i naprężeń mechanicznych występujących w torach prądowych szynoprzewodów, łączników elektrycznych i innych przewodach przewodzących prąd zwarciovy, oraz w cewkach jedno i wielozwojowych oraz wielowarstwowych stosowanych w dławikach przeciwzwarciowych;

- sił (momentów) działających na układy stykowe łączników elektrycznych, w szczególności sił odpychających styki od siebie, oraz sił kompensujących to oddziaływanie i powiększających docisk styków, podczas przepływu przez nie prądów zwarciovy;

- przeprowadzenie licznych badań eksperymentalnych w warunkach laboratoryjnych, mających na celu weryfikację uzyskanych wyników badań symulacyjnych.

Rozwój współczesnej elektroenergetyki, wymaga poszukiwania i stosowania nowych rozwiązań konstrukcyjnych aparatów elektrycznych, spełniających coraz wyższe wymagania odnośnie do niezawodności pracy urządzeń rozdzielczych. Osiągnięcia w tej dziedzinie bazują na wynikach analiz teoretycznych, komputerowych symulacji, na wynikach badań doświadczalnych oraz inwencji projektantów.

Recenzowana rozprawa dobrze wpisuje się w ten nurt prac badawczych i dotyczy zagadnień aktualnych i ważnych, czego wyrazem są liczne artykuły na ten temat w literaturze światowej, na organizowanych konferencjach i sympozjach naukowych.

Można więc stwierdzić, że podjęta przez doktoranta tematyka ma duże znaczenie poznawcze, jest jak najbardziej celowa, nowoczesna i o dużym znaczeniu praktycznym. Zapewnia bowiem ograniczenie ponoszonych strat ekonomicznych w przypadku awarii systemu elektroenergetycznego, wymusza ciągle doskonalenie konstrukcji aparatów elektrycznych, z uwagi na realizowane przez nie funkcje.

Mając powyższe na uwadze, recenzent pozytywnie ocenia wybór tematu rozprawy doktorskiej.

W stosunku do zakresu pracy doktorskiej opiniujący zgłasza następujące uwagi ogólne:

1. Przeprowadzona przez doktoranta analiza obliczeniowa oddziaływań elektrodynamicznych pomiędzy torami jednopaskowymi w układzie trójbiegunowym w oparciu o programy symulacyjne, dotyczyła wyznaczenia wartości sił

elektrodynamicznych i naprężeń mechanicznych w poszczególnych biegunach badanego toru prądowego. Byłoby interesujące uzyskać od Autora uzupełniającą opinię dotyczącą relacji pomiędzy występującymi w układzie drganiami mechanicznymi towarzyszącymi oddziaływaniom elektrodynamicznym i drganiami własnymi rozpatrywanego toru, a także oceny porównania wyników otrzymanych w ramach przeprowadzonej analizy symulacyjnej, z wynikami obliczeń analitycznych.

2. W przeprowadzonej w pracy analizie obliczeniowej toru prądowego dwupaskowego układu trójbiegunowego sił elektrodynamicznych w oparciu o symulacyjną analizę sprzężoną podano jedynie wyniki w postaci oscylogramów i rysunków. Nie podano natomiast rezultatu porównania otrzymanych wyników obliczeń numerycznych, przynajmniej z obliczeniami analitycznymi, w celu weryfikacji poprawności zastosowanych w obliczeniach modeli numerycznych. . Byłoby interesujące uzyskać od Autora opinię na ten temat.
3. Przedstawione w pracy liczne badania symulacyjne sił elektrodynamicznych w torze prądowym odłącznika średniego napięcia obejmowały wyznaczenie sił elektrodynamicznych występujących w stykach ruchomych i zaciskach przyłączowych (pkt. 1 – 6 na rys. 6.41) w poszczególnych biegunach odłącznika. Nie podano natomiast informacji na temat wartości sił elektrodynamicznych występujących w zestykach rozłącznych odłącznika, a mogących mieć wpływ na otwarcie styków aparatu, podczas przepływu przez tor prądowy znacznych wartości prądów zwarciovych. Byłoby pożądane ustosunkowanie się do tego zagadnienia przez doktoranta.
4. W przeprowadzonej analizie symulacyjnej układu stykowego komory gaszeniowej wyłącznika LTB-D wysokiego napięcia stwierdzono, że poszczególne styczki zestyku głównego umieszczone symetrycznie na obwodzie, nie są obciążone równomiernie. Byłoby interesujące wyjaśnienie przyczyn występowania takiej różnicy w obciążeniu elektrodynamicznym styczek w zestyku?
5. Przedstawione w pracy liczne badania eksperymentalne i symulacyjne różnych rozwiązań konstrukcyjnych torów prądowych aparatów elektrycznych mają znaczenie aplikacyjne, ponieważ otrzymane wyniki stwarzają podstawy do racjonalnego i optymalnego ich projektowania. Byłoby interesujące uzyskać od Autora opinię, czy na tym etapie prac projektowych i przeprowadzonych badań symulacyjno-eksperymentalnych, można by już podjąć próbę sformułowania ogólnej zasady w

skutecznym wykorzystaniu metody analizy sprzężonej w procesie projektowo-konstrukcyjnym aparatów elektrycznych.

Wymienione wyżej uwagi ogólne, traktuję jako dyskusyjne i nie podważają one dalej tezy pracy doktorskiej, natomiast rozszerzają jej zakres. Opiniujący oczekuje ustosunkowania się do wymienionych wyżej uwag ogólnych, w czasie publicznej obrony doktorskiej.

2. Zakres pracy doktorskiej i jej elementy oryginalne

Recenzowana praca obejmuje:

- a. wstęp,
- b. przegląd stanu techniki w zakresie oddziaływań elektrodynamicznych w torach prądowych i układach stykowych aparatów elektrycznych,
- c. cel, tezę i zakres pracy,
- d. wyznaczanie numeryczne z zastosowaniem analizy sprzężonej oddziaływań elektrodynamicznych w torach prądowych, zestykach, komorach gaszeniowych oraz cewkach, a także przeprowadzenie badań eksperymentalnych wybranych torów prądowych,
- e. analizę uzyskanych wyników badań i podsumowanie.

Doktorant w pracy postawił sobie za cel, dokonanie oceny rozkładu sił elementarnych w torach prądowych i zestykach aparatów elektrycznych obciążonych prądem zwarciovym, a podlegających oddziaływaniom elektrodynamicznym. Ważnym czynnikiem w określeniu stanu naprężeń występującego wówczas w rozpatrywanych konstrukcjach aparatów elektrycznych jest nierównomierność ich występowania, oraz brak możliwości dokładnej oceny rzeczywistych rozkładów ich wartości. Prowadzone w tym zakresie pracochłonne i kosztowne badania eksperymentalne, nie pozwalają na pełną ocenę pracy ich konstrukcji elektromechanicznej.

Teza sformułowana przez doktoranta w rozprawie doktorskiej została potwierdzona dokonanymi działaniami obliczeniowymi dotyczącymi wyznaczania sił elektrodynamicznych w torach prądowych, działających na elementy ruchome łączników elektrycznych, przemieszczeniem się łuku elektrycznego w komorach gaszeniowych łączników, oddziaływań elektrodynamicznych w cewkach, jak i wynikami eksperymentalnych badań autora.

Zdaniem recenzenta za oryginalny dorobek zawarty w pracy doktorskiej mgr. inż. Michała Szulborskiego należy uznać:

- a. opracowanie modeli numerycznych w technologii 3D wybranych torów prądowych i układów stykowych;
- b. przeprowadzenie licznych badań symulacyjnych z zastosowaniem analiz sprzężonych do wyznaczenia oddziaływań elektrodynamicznych i naprężeń mechanicznych w rozpatrywanych aparatach elektrycznych, oraz sformułowanie wniosków mogących stanowić podstawę modernizacji istniejących rozwiązań aparatów elektrycznych;
- c. twórcze wykorzystanie wyników badań w tej dziedzinie przeprowadzonych w kraju i zagranicą, stanowi to logiczną podstawę rozwijanej przez Autora tezy, oraz programu i realizacji badań obliczeniowo-eksperymentalnych;
- d. doktorant wykazał się przy tym zdolnością do samodzielnego prowadzenia badań, a także przedstawił zalecenia dotyczące dalszych badań naukowych w tym zakresie.

Dzięki wykazanym umiejętnościom Doktorant uzyskał interesujące wyniki badań i analiz pokazując przy tym dobre przygotowanie teoretyczne i dużą zręczność zarówno w modelowaniu, jak i komputerowej symulacji rozpatrywanych zagadnień.

3. Ocena wiedzy doktoranta w zakresie realizowanej pracy doktorskiej i jej poziomu edytorskiego

W rozprawie doktorskiej doktorant powołał się na 390 pozycji literatury dotyczącej:

- a. przeglądu i budowy i wybranych torów prądowych i układów stykowych aparatów elektrycznych,
- b. analizy obliczeniowej oddziaływań elektrodynamicznych aparatów elektrycznych obciążonych prądem zwarciovym,
- c. zastosowania numerycznych metod obliczeniowych (MES) w technice,
- d. tworzenia trójwymiarowych modeli numerycznych konstrukcji elektromechanicznych.

W bibliografii dołączonej do rozprawy umieszczono 7 pozycji literatury z listy (JCR) – wszystkie współautorskie, natomiast w ramach znaczących osiągnięć naukowych i twórczych autora rozprawy dołączono wykaz 7 pozycji literatury z listy (JCR), oraz 3 publikacje w

czasopismach z listy ministra - wszystkie współautorskie, a także 5 publikacji, w tym dwie indywidualne, w czasopismach innych niż uprzednio wymienione. Doktorant jest współtwórcą 5 patentów krajowych. Podany wykaz zamieszczonej literatury można uznać jako wystarczający do przyjętego planu i programu badań.

Rozprawa natomiast została napisana i zredagowana umiarkowanie starannie, z uchybieniami redakcyjnymi, powtórzeniami tekstu i licznymi mało czytelnymi rysunkami.

4. Uwagi szczegółowe

Do opiniowanej pracy doktorskiej mgr. inż. Michała Szulborskiego recenzent zgłasza następujące uwagi szczegółowe:

1. s. 47. Rys. 4.6 i 4.7 - wartości maksymalne siły elektrodynamicznej i wartości osiągniętych naprężeń w szynie L2 dla czasu np. 0.04 s., nie są zgodne co do wartości maksymalnych. Brak informacji, jaka może być przyczyna tej niezgodności ?;
2. s. 61. Rys. 5.2. wg. [23] F_{ez} – siła elektrodynamiczna zestykowa, wg [16] – siła odpychająca styki w zestyku punktowym;
3. s. 68. Tytuł rozdziału nie odpowiada w pełni treści zawartej w tym rozdziale ?;
4. s. 74. [137] - Artykuł dotyczył układu stykowego stożkowego załącznika zwarciovego;
5. s. 84. Rys. 6.4 – rys. mało czytelny;
6. s. 88. Wartość siły elektrodynamicznejmożna wyznaczyć z poniższego wzoru (48) ?
7. s. 190. Błędny zapis wzoru (58);
8. s. 191. Oznaczenia na rys. 9.22 nie są zgodne z warunkiem $h/D < 0,5$;
9. s. 192. Błędny zapis wzoru (59) ;
10. Literatura: p. 274, p.320; p.306, p.342 – powtórzenia.

5. Wniosek końcowy

Opiniowana rozprawa doktorska mgr. inż. Michała Szulborskiego

pt.

„Analiza sił elektrodynamicznych w torach prądowych i zestykach aparatów elektrycznych w oparciu o symulacyjne analizy sprzężone”

oparta o wyniki przeprowadzonych analiz obliczeniowych i badań doświadczalnych oddziaływań elektrodynamicznych w torach prądowych i zestykach aparatów elektrycznych, spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim.

Rozpoznane i opracowane zostały modele numeryczne w technologii 3D wybranych torów prądowych i układów stykowych, przeprowadzono liczne obliczenia i badania symulacyjne oddziaływań elektrodynamicznych oraz naprężeń mechanicznych z zastosowaniem analiz sprzężonych, a także sformułowane zostały zalecenia mogące stanowić podstawę modernizacji istniejących rozwiązań konstrukcyjnych aparatów elektrycznych.

Omawiana rozprawa stanowi samodzielne rozwiązanie ważnego zadania naukowego z dyscypliny naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne, dotyczącego zastosowania metod numerycznych w obliczeniach i projektowaniu torów prądowych i układów stykowych aparatów elektrycznych.

Podsumowując można stwierdzić, że mgr inż. Michał Szulborski podjął aktualne i ważne zadanie rozwiązując je, stosując akceptowalne metody, oraz wykazał się zarówno wiedzą jak i umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

W świetle wymagań i przepisów Ustawy z dnia 20 lipca 2018 Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r., poz. 1668 ze zm. stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Michała Szulborskiego spełnia wymagania określone w wyżej wymienionej Ustawie, w związku z czym stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej dyskusji i obrony.



/ Stanisław Kulas /