

dr hab. inż. Marcin Sowa, prof. PŚ  
Politechnika Śląska, Gliwice  
Wydział Elektryczny  
Katedra Elektrotechniki i Informatyki

Gliwice, 2023.08.25

## Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Michała Szulborskiego: „Analiza sił elektrodynamicznych w torach prądowych i zestykach aparatów elektrycznych w oparciu o symulacyjne analizy sprzężone”

### 1 Podstawa opracowania recenzji

Recenzję opracowano na podstawie umowy z Politechniką Warszawską – Wydziałem Elektrycznym reprezentowaną przez Dziekana prof. dr hab. inż. Lecha Grzesiaka w związku z uchwałą Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej z dnia 27.06.2023 r. powołującą recenzentów w przewodzie doktorskim mgr inż. Michała Szulborskiego. Recenzowana praca powstała w Wydziale Elektrycznym na Politechnice Warszawskiej pod kierownictwem dr hab. inż. Łukasza Kolimasa, prof. PW. Liczy ona w sumie 265 stron, 14 stron mieści spis rysunków, 28 stron zawiera literaturę, a 6 stron zawiera spis osiągnięć naukowych i twórczych Autora rozprawy.

### 2 Teza naukowa i zakres pracy

Na stronie 39 Autor formułuje tezę rozprawy:

*W procesie analiz zjawisk elektrodynamicznych występujących w torach prądowych i układach zestykowych możliwe jest zastosowanie zaawansowanych analiz sprzężonych opartych na metodach elementów skończonych, w celu uzyskania precyzyjnych wartości generowanych sił elektrodynamicznych. Otrzymane w ten sposób wyniki oddziaływań elektrodynamicznych są zgodne z założeniami teoretycznymi i badaniami eksperymentalnymi. Tego typu podejście pozwala na poprawne konstruowanie torów prądowych i układów zestykowych w aparatach elektrycznych bądź urządzeniach rozdzielczych.*

Udowodnienie tak sformułowanej tezy wymagało realizacji szeregu badań naukowych. W tym celu Autor zdecydował o następującym układzie pracy:

- w rozdziale pierwszym przedstawił istotę problemu i zakres analiz w wybranym obszarze badawczym, wymienił znane w przeszłości uproszczone narzędzia oraz nowoczesne techniki wyznaczania sił elektrodynamicznych,
- rozdział drugi poświęcił obszernemu przeglądowi wiedzy w zakresie sił elektrodynamicznych w zestykach aparatów elektrycznych i torach prądowych,
- w rozdziale trzecim Autor podał cel i zakres rozprawy doktorskiej oraz sformułował jej tezę,
- w rozdziale czwartym dokonał szczegółowej analizy sił elektrodynamicznych w torach prądowych jedno- i wielopaskowych
- w rozdziale piątym przeprowadził analizę sił elektrodynamicznych występujących w zestykach aparatów elektrycznych,
- w rozdziale szóstym przeanalizował oddziaływania sił elektrodynamicznych w torach prądowych aparatów elektrycznych,
- w rozdziale siódmym przybliżył zagadnienia sił elektrodynamicznych w torach wieloprądowych urządzeń rozdzielczych i przedstawił wyniki badań sił elektrodynamicznych w rozdzielniczy niskiego napięcia,
- w rozdziale ósmym przedstawił analizę sił elektrodynamicznych w szynoprzewodach kompaktowych niskiego napięcia,
- w rozdziale dziewiątym przeprowadził obszerną analizę oddziaływania sił elektrodynamicznych w cewkach,
- w rozdziale dziesiątym nawiązał do badań sił elektrodynamicznych w przewodach, gdzie wyznaczono siły pomiędzy przewodem a elementem ferromagnetycznym,
- w rozdziale jedenastym podsumował zgromadzone wyniki badań.

### **3 Aktualność i wartość merytoryczna tematyki**

Recenzowana praca dotyczy analizy sił elektrodynamicznych występujących w zestykach aparatów elektrycznych i torach prądowych. Możliwy destrukcyjny charakter tych sił, będący następstwem występowania prądów zwarciovych, decyduje o krytycznym znaczeniu tego zagadnienia. W pierwszej kolejności wskazać należy na aparaturę zabezpieczeniową, której elementy konstrukcyjne muszą być specjalnie zaprojektowane, aby przenosiły odpowiednie siły (zarówno docisk jak i

rozwarcie, z uwzględnieniem czasów zadziałania zabezpieczenia). Drugim obszarem powiązanim z występowaniem sił elektrodynamicznych są układy stykowo-gaszeniowe, gdzie właściwości tego zjawiska wykorzystywane są do wprowadzenia łuku elektrycznego do komory gaszeniowej. Podkreślenia wymaga zagadnienie precyzyjnej budowy komór gaszeniowych dla maksymalizacji wykorzystania efektu wydmuchu elektromagnetycznego. Jeszcze innym polem analiz związanych z występowaniem sił elektrodynamicznych są tory prądowe. Występowanie znacznych sił elektrodynamicznych w tych układach ma charakter niepożądany i na ogół znajduje swój skutek w postaci uszkodzeń, głównie mechanicznych. Dzięki badaniom tych oddziaływań elektrodynamicznych poszerza się wiedza na temat możliwości poprawy wytrzymałości układów izolacyjnych i wsporczych.

Ewolucja w analizie sił elektrodynamicznych na przestrzeni lat była zbieżna z tą obejmującą badania pól elektromagnetycznych. W przeszłości w obliczeniach przyjmowano założenia uproszczonej geometrii, co umożliwiało otrzymanie rozwiązań analitycznych. Uproszczone wzory miały swoje naturalne zastosowania, z których część wykorzystywana jest po dzień dzisiejszy. W zastosowaniu do analizy sił elektrodynamicznych stanowiły one jednak bardziej formuły pomocnicze, pozwalające jedynie na wstępne oszacowanie rzędu wielkości niż uzyskanie wiarygodnego wyniku. Najbardziej zauważalny rozwój miał miejsce w czasie, gdy powstawały nowoczesne komputery i nastąpił rozwój technik obliczeniowych. Upowszechnienie metod numerycznych pozwoliło na badanie złożonych geometrii rozpatrywanych zagadnień. Co najważniejsze, badania uwzględniające mniej uproszczeń geometrycznych pozwoliły na bardziej wiarygodne oszacowanie zachowania urządzeń jeszcze przed ich zbudowaniem.

Najbardziej znaną metodą numeryczną wykorzystywaną w obliczeniach pola elektromagnetycznego jest metoda elementów skończonych. Jej implementacja w nawet swojej podstawowej postaci, również dla zagadnień dwuwymiarowych, stanowi duże wyzwanie. Sama metoda w dalszym ciągu jest rozbudowywana, jej modyfikacje dotyczą wykorzystanie innych elementów niż standardowe trójkątne (w analizach 2D) czy czworokątne (w analizach 3D) oraz aproksymacje wielomianowe wyższych rzędów. Pomimo trudności w implementacji metody elementów skończonych opracowano wiele programów użytkowych, w tym również darmowych. We wielu programach czy też pakietach obliczeniowych możliwe jest przeprowadzenie analiz często trenowanych w dydaktyce, w przedmiocie Teorii Pola Elektromagnetycznego. Są to moduły: elektrostatyka, pole przepływowe, magnetostatyka oraz „AC magnetism” (pole magnetyczne z uwzględnieniem prądów wirowych, z pominięciem efektów falowych). Bardziej zaawansowane programy pozwalają na uwzględnienie nieliniowości i analizy w stanie nieustalonym. Już na tym etapie skomplikowania, dla samych zagadnień w ujęciu uproszczeń do analizy dwuwymiarowej, wymagana jest znaczna moc obliczeniowa komputera lub świadomość czasochłonności tego typu analizy. Przy dużej ilości elementów, przy generującym się rozmiarze układu równań konieczne jest korzystanie z metod iteracyjnych (nawet w przypadku zagadnień liniowych), co dodatkowo wydłuża czas obliczeń. Analiza sił elektrodynamicznych, tym bardziej w ujęciu trój-

wymiarowym, jest zatem zagadnieniem nie tylko bardzo ważnym ale jednym z trudniejszych. Do rozpatrywania tak ujętych problemów mamy do czynienia już ze znacznie węższym zakresem dostępnego oprogramowania, przede wszystkim jeśli dodatkowo weźmiemy pod uwagę sprzężenie tej analizy z analizą strukturalną, czego również dotyczy recenzowana praca.

Wygodne (na ile to możliwe) formułowanie geometrii, zadawanie parametrów środowiskowych oraz wymuszeń i warunków brzegowych dla tak złożonej analizy oferuje wyłącznie kilka znanych programów specjalistycznych. Ze względu na zakres możliwości programy te można rozpatrywać w kategoriach środowisk obliczeniowych. Na szczególną uwagę zasługują dwa komercyjne środowiska: Ansys oraz COMSOL Multiphysics. W aktualnej ofercie zawierają bogaty zakres pakietów obliczeniowych różnych pól, gdzie Autor połączył analizy wykorzystujące pakiety obliczeń pola elektromagnetycznego (konkretniej często zwanych analizami pola magnetycznego z uwzględnieniem prądów wirowych) i zmian strukturalnych („Transient Structural”).

Biorąc pod uwagę aktualność i poziom trudności wybranej tematyki, podjęte badania należy uznać za zasadne i rozwojowe.

## 4 Ocena metodologii badań i wyników

Uzasadnienie podjęcia badań można ponownie przywołać w kontekście niepożądanych skutków temperaturowych i dynamicznych (mechanicznych) przepływów prądów zwarciovych. Wspomniane skutki mogą występować oddzielnie jak i w połączeniu (wysoka temperatura prowadzi do większej podatności na uszkodzenia, które mogą spowodować znaczne siły elektrodynamiczne). Analizy wykorzystujące metodę elementów skończonych nie mają sobie równych w obliczaniu sił elektrodynamicznych. Autor wspomina o minionych metodologiach, ale słusznie ocenia ich zastosowania jako nierzadko przydatne jedynie w ustalaniu wstępnych wyników i oszacowaniu pewnych poziomów wyznaczanych wartości. Uważam zatem wybór zaawansowanych narzędzi wykorzystujących metodę elementów skończonych za silnie uzasadnione, w tym również prawidłowe wykorzystanie odpowiednich modułów (Magnetic Transient i Transient Structural).

Opisy wprowadzające do kolejnych rozdziałów świadczą o znacznej wiedzy Autora na temat badań sił elektrodynamicznych w zestykach aparatów elektrycznych i torach prądowych, wskazując jednocześnie na właściwe rozeznanie z literaturą krajową i zagraniczną. Zawarte w pracy szczegółowe opisy urządzeń wskazują na znajomość konstrukcji aparatów elektrycznych i sposobów ich działania.

Kolejne rozdziały (zwłaszcza począwszy od podrozdziału 6.1.2) zawierają kompetentnie przygotowane analizy, charakterystyczne dla rezultatów pracy działu badawczo-rozwojowego profesjonalnej firmy konstrukcyjnej. Rozdziały 7, 8 i 9 zawierają szczegółowe analizy, prezentujące poziom właściwy dla publikacji naukowych.

W pracy pojawia się kilka odniesień do rozwiązań analitycznych, jednak Autor nie stosuje ich w bardziej złożonych zagadnieniach. Przy bardziej zaawansowanych cechach geometrycznych wykorzystanie wspomnianych rozwiązań lub wzorów empirycznych jest praktycznie niemożliwe. Z tego powodu Autor ograniczył się do wykorzystania metodologii opartej na metodzie elementów skończonych do obliczania sił elektrodynamicznych. W niektórych badaniach Autorowi udało się określić zakres potencjalnych uszkodzeń i odkształceń. W badaniach gdzie zmiany te były prawie niewidoczne (przykład: podrozdział 6.2) i trudne do zmierzenia w praktyce, Autor dokonał właściwej interpretacji wyników, gdzie badania te prowadzą do identyfikacji czynników, które należy wziąć pod uwagę w projektowaniu (np. lokalizacja najbardziej narażonych elementów, zwiększenie wytrzymałości konstrukcji).

Dokonując przeglądu badań przedstawionych w pracy, należy podkreślić ogrom walorów praktycznych. Autor wyczerpująco zaprezentował swój warsztat badawczy, w tym stanowiska laboratoryjne, szczegółowo opisał urządzenia oraz omówił aspekty towarzyszące realizacji eksperymentów. Badania na rzeczywistych obiektach zostały przygotowane w sposób staranny i przemyślany. Należy tu przede wszystkim zwrócić uwagę na problem powtarzalności, gdyż badania te mogą mieć charakter niszczący (np. jak w rozdziale 7.1).

Ilość oryginalnych osiągnięć Autora jest imponująca i dostarcza wachlarz możliwości aplikacyjnych metodologii wyznaczania sił elektrodynamicznych i sposobu sprzęgania jej z analizą strukturalną. Podsumowując dorobek Autora zawarty w pracy, oprócz opracowania metodologii ujętej w tezie, na szczególną uwagę zasługują następujące dokonania:

- stworzenie i zbadanie trójwymiarowego modelu komory wyłącznika wysokiego napięcia (rozdział 6.3), który opracował Autor opierając się na dokumentacji technicznej,
- opracowanie i szczegółowe zbadanie modelu rozdzielnic niskiego napięcia, która również w rzeczywistości została poddana testom zwarciovym (rozdział 7),
- złożone badania (uwzględniające modele trójwymiarowe) sił elektrodynamicznych jedno- i wielozwojowych oraz wielowarstwowych cewek (obszerny rozdział 9).

## 5 Ogólne uwagi krytyczne

Lektura pracy nie pozostawia wątpliwości co do jej fachowości oraz wysiłku włożonego w jej staranne i przemyślane opracowanie. Należy ponownie przypomnieć, że Autor przeprowadził bardzo zaawansowane i szczegółowe analizy, i co niemniej istotne w większości zrealizowane w oparciu o badania na obiektach rzeczywistych. Tak bogate i szerokie spektrum pracy, a właściwie każdej pracy o takiej objętości, niesie za sobą ryzyko wystąpienia kilku pułapek. Dotyczy to przede

wszystkim zredukowania niektórych treści dla uzyskania bardziej zwięzłych opisów. Naturalnie występuje tendencja, która motywuje autorów do szczegółowego opisywania bardziej zaawansowanych analiz, przy jednoczesnym ograniczaniu opisu badań wstępnych. Choć nie jest to tak oczywiste w publikacjach naukowych, w obszerniejszych pracach takich jak recenzowana rozprawa, efekt jest taki, że niektóre interesujące szczegóły są pomijane w początkowych fragmentach pracy. Może być to mylnie interpretowane jako nawyk całkowitego pomijania takich fragmentów w dalszym etapie pracy. W recenzowanej rozprawie kwestia ta dotyczy jedynie: opcji ustawień symulacji oraz zastosowania rozwiązań analitycznych. Jako naukowiec zajmujący się obliczeniami pola elektromagnetycznego za interesujące uznałem fragmenty zawarte w dalszej części tekstu (rozdziały 6.1.2 i wyżej, aż do rozdziału 10), gdzie zawarte zostało wiele szczegółów dotyczących aspektów konfiguracji zagadnień. Zawierają one potencjalnie ciekawe sugestie do własnych analiz dla osób zaznajomionych z tematyką. Dla pozostałych czytelników informacje dotyczące konfiguracji samych symulacji wskazują na bardzo ważne i nieoczywiste czynniki, na przykład jak ważną przeszkodą w obliczeniach 3D jest zależność czasu obliczeń od gęstości siatki (a konkretniej – ilości elementów siatki), nawet dla obecnie dostępnych komputerów (przykład: zagadnienie z rozdziału 6.2 w rozprawie, dotyczące trójfazowego odłącznika, gdzie siatka metody elementów skończonych zawierała 4 281 994 elementy typu czworobocznego, a jedna z symulacji trwała 9 dni 5h). W początkowych rozdziałach pracy miejscami brakuje tego typu szczegółów charakteryzujących symulacje. Zbyt zwięzłe omówienie symulacji we wcześniejszych rozdziałach prowadzi niestety również do błędnego wrażenia odnośnie traktowania wzorów wynikających z rozwiązań analitycznych. W pierwszych rozdziałach pracy nierzadko dużą uwagę poświęcono prezentacji wzorów wynikających z rozwiązań analitycznych, które nie znalazły dalej swojego szerszego zastosowania. Oczywistym jest, że dla bardziej skomplikowanych geometrycznie struktur są one praktycznie nieaplikowalne, co tłumaczy dlaczego Autor na dalszym etapie już do nich nie nawiązał. Jednak ich pierwotna prezentacja powinna być wsparta prostym przykładem, który pozwoliłby pokazać wyższość proponowanej metodologii.

## 6 Uwagi redakcyjne

W zakresie redakcji pracę należy ocenić pozytywnie, podobnie jak sposób zorganizowania rozdziałów. Liczne fotografie oraz schematy ideowe badanych obiektów i urządzeń stanowią świadectwo faktycznie zrealizowanych eksperymentów oraz czynią pracę atrakcyjną dla potencjalnego odbiorcy. Natomiast wyraźny zarzut należy uczynić wobec czytelności rysunków wygenerowanych w wykorzystywanym przez Autora środowisku obliczeniowym. Czcionka wykorzystana na wykresach jest często tak drobna, że uniemożliwia swobodny odczyt, co jeszcze bardziej nasila się w przypadku wersji papierowej pracy. Jest to szczególnie istotne w kontekście interpretacji wyników. Z uwagi na obszerność pracy, doktorant nie ustrzegł się od nielicznych błędów redakcyjnych, składniowych i językowych,

jak np.:

1. strona 30: „model strumieniowy model”,
2. strona 138, pierwszy akapit „za był za”,
3. strona 83, akapit 2 „siatka obliczeniowa mesh” („mesh” to siatka obliczeniowa, moim zdaniem lepiej wstawić wtedy mesh w nawiasy, ewentualnie w cudzysłów jak dokonał tego Autor na stronie 108, na opisie rysunku 6.32),
4. początek strony 89: nawiązanie do nieistniejącego „Rysunku 2”,
5. opis rysunku 6.41, strona 115 : „odkształcenia sprężysta”,
6. strona 128: „Ractangular Plot”,
7. równanie (48) (strona 88) odnosi się do wyznaczania wielkości opisanej symbolem  $B$ ; w polu elektromagnetycznym tak definiuje się indukcję magnetyczną; równanie te albo poprzedzające je stwierdzenie („Wartość powstającej siły elektrodynamicznej (...) można wyznaczyć z poniższego wzoru”) wprowadza czytelnika w błąd.

Powyższe usterki redakcyjne mają marginalne znaczenie i nie wpływają na merytoryczny i fachowy wizerunek pracy. Czytelność i zrozumienie bronionej tezy pozostają niezaburzone.

## 7 Uwagi merytoryczne i pytania

Pod względem merytorycznym pracę należy ocenić pozytywnie, podkreślając kompetentność i rozeznanie Autora w tematyce podniesionej w pracy. Jednak jak w przypadku każdej pracy podczas lektury nasunęło się kilka uwag i pytań, do których oczekuję od Autora odpowiedzi lub komentarza:

1. W przypadkach, gdzie badania obiektu rzeczywistego wspierano badaniami symulacyjnymi, zadane wymuszenia były odzwierciedleniem faktycznie zarejestrowanych przebiegów prądów (przykładowo w podrozdziale 7.2 i rozdziale 8). Dla symulacji nie uzupełnianych pomiarami na obiekcie rzeczywistym (badania opisane do rozdziału 5 włącznie) wymuszenia prądowe często zadawane są bez podania wyjaśnień, a nawet genezy. Ilustrują to następujące wybrane przypadki:
  - rozdział 4.3, strona 45, rysunek 4.1,
  - ostatnie zdanie strony 52, odwołujące się do rys. 4.12 (str. 53, rozdział 4.2), gdzie dla fazy L2 zadano przebieg bez składowej nieokresowej,
  - strony 83-84, gdzie badano wyłącznik trójfazowy – tu zadano „wymuszenia prądowe w postaci prądów zwarciovych na poziomie 9 kA RMS ze składowymi nieokresowymi zwiększającymi prądy zwarciove w początkowej fazie ich trwania o dodatkowe 5 kA”.

Czy wykorzystane w eksperymentach postacie i rzędy wielkości prądów wynikają z obserwacji w praktycznych warunkach (są typowe), czy też są to jedynie przebiegi arbitralne do tych poszczególnych analiz.

2. Dla badaczy zajmujących się obliczeniami teorii pola elektromagnetycznego, (a jeszcze nie mającym dostępu do oprogramowania Ansys i modułu Maxwell 3D) interesujące mogą być informacje dotyczące istotnego szczegółu jak ujęte mogą być sprzężenia analizy pola elektromagnetycznego z analizą zmian strukturalnych. Z pewnych fragmentów tekstu odnoszę wrażenie, że analiza przeprowadzona była każdorazowo dla kolejno: najpierw pola elektromagnetycznego (stan nieustalony pola magnetycznego z prądami wirowymi), gdzie z tego modułu możliwe jest wyznaczenie sił elektrodynamicznych, po czym eksportowane siły służą w module Transient Structural jako wymuszenia. Proszę o krótki komentarz czy tą alternatywą sprzężenia posługuje się Autor w pracy. Inna możliwość konfiguracji dotyczy sprzężenia analiz tak jak dokonuje się dla pól: magnetycznego i temperaturowego. W tamtym przypadku poprzez komponent strat cieplnych pole magnetyczne wpływa na pole temperaturowe, które to z powrotem wpływa na pole magnetyczne poprzez zmianę parametrów środowiskowych. Czy doktorant posiada wiedzę lub doświadczenie na temat czy pozwala na to wybrane środowisko obliczeniowe bez większych komplikacji?
3. Czy możliwe jest na podstawie obserwacji wyników jak np. w rozdziale 4.2 (rysunki 4.19 i 4.20), a przede wszystkim wyników analizy strukturalnej, oszacowanie jaki powinien być maksymalny krok czasowy analizy biorąc pod uwagę tak szybkie zmiany oddziaływujących sił elektrodynamicznych? Dodatkowo: czy tego typu wyniki można przyjmować jako w pełni wiarygodne pod względem przebiegów (wartości sił i maksymalnych naprężeń) czy raczej stanowią one wyznacznik szacunkowych ich maksymalnych wartości?
4. Autor na stronie 116 (akapit 3, rozdział 6.2) stwierdza, że zastosowanie obecnie intensywnie rozwijanej technologii “digital twin” może znacznie zredukować czas obliczeń z kilku dni do kilku godzin; proszę o komentarz jakie okoliczności i właściwości potencjalnie miałyby zadecydować o tym usprawnieniu obliczeń.
5. Autor omawiając symulacje dotyczące zestyków aparatów elektrycznych kilka razy nawiązuje do ryzyka szepienia się styków; czy możliwe jest szczegółowe zbadanie tego zjawiska przy samym sprzężeniu jakie wykorzystano w pracy (pole magnetyczne z prądami wirowymi sprzężone z analizą strukturalną), czy też konieczne jest dodanie innych analiz np. takich jak chociażby temperaturowa?



## 8 Podsumowanie

W podsumowaniu stwierdzam, że recenzowana praca spełnia wymagania stawiane dysertacjom doktorskim (art. 187 ust. 1 i ust. 2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce; Dz. U. z 2018 r., poz. 1668 ze zm.) oraz zawiera znaczący wkład w rozwój dyscypliny. Wspomniane wcześniej usterki w jakikolwiek sposób nie wpływają na ogólną ocenę pozytywną. Pytania zawarte w recenzji nie mają charakteru kwestionującego, a stanowią jedynie dociekania recenzenta. Rozprawa prezentuje wysoki poziom merytoryczny, zawiera dużą ilość oryginalnych badań i wyników, które Autor szczegółowo i przejrzysto zaprezentował. Wnioskuje o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr inż. Michała Szulborskiego do publicznej obrony.