

Opole, 17.06.2025 r.

Prof. dr hab. inż. Marian Łukaniszyn
Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki
Politechnika Opolska

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr inż. Szymona Stoczko

**pt.: „Trójcewkowy siłownik elektrodynamiczny do zastosowania w napędzie szybkim
wyłącznika ”**

wykonanej pod kierunkiem dr hab. inż. Marcina Szewczyka, prof. uczelni

*Niniejszą recenzję wykonano na zlecenie Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika,
Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne.
Politechniki Warszawskiej
z dnia 22 kwietnia 2025 r.*

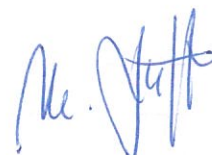
1. Ocena wyboru tematu rozprawy

Praca doktorska „*Trójcewkowy siłownik elektrodynamiczny do zastosowania w napędzie szybkim wyłącznika*” dotyczy aktualnej i rozwijanej w ostatnich latach dziedziny wspomaganej komputerowo analizy pracy i projektowania urządzeń elektrycznych.

Rozwój energetyki rozproszonej i sieci oczkowych prądu stałego oznacza potrzebę rozwoju technologii łączenia i budowy coraz wydajniejszej aparatury łączeniowej. Obecnie publikowanych jest wiele prac w tym obszarze, które mają na celu zaproponowanie nowych wyłączników hybrydowych prądu stałego opartych na komponentach energoelektronicznych oraz łącznikach mechanicznych.

Szybki rozwój konstrukcji przetworników elektromagnetycznych spowodowany został, w ostatnich latach, znaczącym postępem technologicznym w dziedzinie materiałów magnetycznych, energoelektronice, a także rozwojem metod obliczeniowych i związanych z tymi metodami programów. Od ponad 30 lat w analizie przetworników elektromechanicznych stosuje się metody komputerowe rozwiązywania równań pola elektromagnetycznego, w tym metodę elementów skończonych.

Aktualnie istotnym obiektem badań w zakresie łączników elektroenergetycznych są również napędy łączników. Jednym z głównych kierunków badań jest rozwój nowych konstrukcji napędów, umożliwiających skrócenie czasu zadziałania napędu oraz zwiększenie jego trwałości mechanicznej.



Obok powszechnie stosowanych napędów zasobnikowo sprężynowych widoczny jest również trend rozwoju siłowników elektromagnetycznych i elektrodynamicznych, których stosowanie w wyłącznikach próżniowych wynika z wymaganych w tych łącznikach skoków styków.

Obecnie na rynku dostępne komercyjne wyłączniki średnich napięć z napędem elektromagnetycznym, dedykowane do zastosowań elektroenergetycznych. Typowe czasy własne napędów elektromagnesowych są na poziomie od kilkunastu do kilkudziesięciu milisekund i nie są wystarczające w zastosowaniu do szybkiego wyłączania w sieciach prądu stałego.

Prowadzone są zatem prace badawcze związane z konstrukcją szybkich siłowników elektrodynamicznych, będących rozwinięciem koncepcji siłownika Thomsona. Współcześnie opracowywane konstrukcje siłowników elektrodynamicznych powinny zapewnić odpowiednie parametry ruchu elementów wykonawczych siłownika oraz odpowiedni poziom niezawodności. Jednak ze względu na wymagane czasy przemieszczenia, w praktyce prowadzi to do konieczności generacji impulsu prądu o wartości szczytowej kilku lub kilkunastu kiloamperów i czasie trwania ruchu rzędu pojedynczych milisekund. Do uzyskania takich parametrów prądowych zasobnika energii wykorzystywane są zasilacze impulsowe bazujące na naładowanej baterii kondensatorów. Siła napędowa odrzutu elektrodynamicznego oddziałująca na ruchomy element wykonawczy siłownika, przy niskiej gęstości siły z jednostki masy uzwojenia, osiągana jest kosztem odpowiednio wysokiej wartości szczytowej prądu, co przy niskiej indukcyjności cewki napędowej skutkuje uzyskaniem impulsowego przebiegu prądu, a tym samym siły napędowej o podobnym charakterze.

Tematyka rozprawy ukierunkowana jest na problemy analizy pracy i konstrukcji trójcewkowego siłownika elektrodynamicznego do zastosowania w napędach szybkich łączników średniego napięcia. Za korzystne cechy siłownika trójcewkowego można uznać niższe wymagania dotyczące wartości szczytowej impulsu prądu z zasobnika kondensatorowego dzięki wyższej gęstości siły napędowej niż w przypadku siłownika Thomsona. Wyższa indukcyjność uzwojenia siłownika trójcewkowego pozwala wydłużyć czas trwania siły napędowej oddziałującej na cewkę ruchomą.

Analiza pola magnetycznego umożliwia wyznaczanie ważnych parametrów całkowitych siłownika. Znajomość tych parametrów pozwala przeprowadzić badania symulacyjne pracy siłownika elektrodynamicznego o jednej ruchomej cewce już na etapie projektowania.

Wydaje się zatem zasadnym podjęcie badań trójcewkowego siłownika elektrodynamicznego o jednej ruchomej cewce do zastosowania w napędach szybkich łączników średniego napięcia. Wobec tego pojawia się pytanie czy korzystając z różnych metod aproksymacyjnych oraz wykonanych już pomiarów i rejestracji można rozwiązać ten problem. Moim zdaniem rozprawa doktorska mgra **Szymona Stoczko** odpowiada na to pytanie.

Ośrodek Warszawski jest jednym z nielicznych w kraju, który od kilku lat realizuje w sposób ciągły badania z tej obszernej i ciekawej problematyki.

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska znajduje się w głównym nurcie współczesnego projektowania urządzeń elektrotechnicznych za pomocą technik należących do tzw. elektromagnetyzmu obliczeniowego. Reasumując stwierdzam, że praca badawcza mgr inż. **Szymona Stoczko** w zakresie stosowania metod polowo-obwodowych, w analizie zjawisk elektromagnetycznych, w trójwymiarowych strukturach obiektów fizycznych, doprowadziła do powstania - użytecznego i skutecznego narzędzia analizy i projektowania siłownika elektrodynamicznego o jednej ruchomej cewce. Dlatego też wybór tematu rozprawy doktorskiej mgr inż. **Szymona Stoczko**, związany z analizą pracy i konstrukcją prototypu siłownika elektrodynamicznego o jednej ruchomej cewce, uważam za ciekawy z punktu widzenia rozwiązania problemu naukowego.

Tematykę rozprawy uważam więc za aktualną i nowoczesną. Szerokie spektrum problemów, które pojawiły się w trakcie wykonywania badań, jak również aktualność tematyki z punktu widzenia technicznego gwarantują, że badania mogą być kontynuowane w przyszłości.

2. Cel i teza naukowa rozprawy

Praca Pana mgr inż. **Szymona Stoczko** jest wynikiem systematycznych studiów nad zagadnieniem analizy stanów pracy i badaniem wykonanego modelu fizycznego siłownika elektrodynamicznego do zastosowania w napędach szybkich łączników średniego napięcia.

Przedmiotem pracy jest konstrukcja modeli 2 wymiarowych polowych i magneto statyczno-mechanicznych modeli polowo-obwodowych ruchu ciągłego napędowego siłownika, wyznaczenie parametrów siłowo-kinematycznych, wykonanie obliczeń porównawczych, symulacji komputerowej pracy siłownika oraz weryfikacja pomiarowa na modelach fizycznych.

Autor formułuje cel pracy na str. 14, który sprowadza się do analizy pracy trójcewkowego siłownika elektrodynamicznego, zarówno modelowego, jak i współpracującego z napędem elektromagnetycznym fabrycznego wyłącznika średnich napięć, w celu uzyskania odpowiedniej charakterystyki siłowo-kinematycznej.

Tak postawione cel pracy oraz 10 zadań badawczych uważam za w pełni poprawne i uzasadnione.

Autor wyszczególnia jedną tezę naukową rozprawy. Zagadnienie naukowe, jakie Autor postawił sobie do rozwiązania zostało określone logicznie i precyzyjnie. Prezentowane wyniki symulacji komputerowych oraz pomiarów na prototypie siłownika elektrodynamicznego do zastosowania w napędach szybkich łączników średniego napięcia mające na celu udowodnienie postawionej tezy, przedstawiono w sposób czytelny i przejrzysty.

3. Ocena merytoryczna rozprawy

Przedstawiona rozprawa została przygotowana jako praca promocyjna (doktorska) w formie monografii. Praca składa się z siedmiu rozdziałów podstawowych i spisu literatury (152 pozycje). Recenzowaną rozprawę zaliczam do grupy prac eksperymentalno - teoretycznych. Uważam, że oceniana praca mgr **Szymona Stoczko** spełnia wymogi pracy doktorskiej, gdyż zawiera oryginalne wartości:

- poznawcze w obszarze badanych zjawisk,
- konceptyjno-konstrukcyjne w obszarze metod projektowania układów pomiarowych,
- teoretyczne w zakresie analizy charakterystyk przemieszczenia elementu wykonawczego i parametrów obwodowych uzwojenia siłownika elektrodynamicznego, zweryfikowane na stanowisku badawczym,
- praktyczne związane z wykonaniem konstrukcji siłownika wraz z zasilaczem impulsowym umożliwiającym osiągnięcie założonych parametrów kinematycznych siłownika,
- eksperymentalne w obszarze identyfikacji parametrów modelu fizycznego siłownika elektrodynamicznego.

Stanowi ona wkład w rozwój technik modelowania, konstrukcji i analizy pracy siłownika elektrodynamicznego do zastosowania w napędach szybkich łączników średniego napięcia. Nie ulega wątpliwości, że Doktorant osiągnął wysoki stopień opanowania teorii i techniki obliczeń polowo-obwodowych oraz metod pomiarowych.

Praca jest skonstruowana poprawnie, zawiera wstęp wraz z omówieniem stanu wiedzy, wyraźnie sformułowany cel, zakres pracy oraz precyzyjnie postawioną tezę (rozdział 1).

W rozdziale 2 Doktorant omówił wyniki dotyczące obliczeń indukcyjności własnych i wzajemnych cewek, energii oraz siły napędowej rozpatrywanego w pracy siłownika. Przedstawił również opis matematyczny pola magnetostatycznego oraz metodę analityczną i polową wykorzystywaną przy modelowaniu uzwojeń.

Rozdział 3 zawiera analizę wariantów konstrukcyjnych cewek rozpatrywanego siłownika trójcewkowego w zakresie wytwarzanych sił oraz w zakresie efektywności wykorzystania energii zastosowanego zasobnika kondensatorowego. Na uwagę zasługuje wykonany magnetostatyczno-mechaniczny model polowo-obwodowy ruchu ciężkiego napędowego siłownika. Badania wykazały, że rozważany siłownik trójcewkowy posiada cechy konstrukcyjne i parametry siłowo-kinematyczne odpowiednie w zastosowaniu do szybkich napędów łączników.

W rozdziale 4 opisano szczegółowo konstrukcję modelu fizycznego siłownika oraz obszerne badania symulacyjne kinematyki ruchu ruchomego rdzenia siłownika. Sprzężony model symulacyjny dobrze odwzorowuje przebieg czasowy prądu oraz uwzględnia zjawiska dynamiczne zachodzące w cewkach podczas ruchu cewki środkowej.

Rozdział 5 zawiera opis realizacji laboratoryjnej modelu fizycznego trójcewkowego siłownika elektrodynamicznego jako elementu napędu fabrycznego wyłącznika SN firmy Tavrida, o parametrach znamionowych 12kV/1000A/20kA. Przygotowane stanowisko laboratoryjne posłużyło do przeprowadzenia badań kinematyki styku ruchomego bieguna wyłącznika, realizowanego przez zespół napędowy wyłącznika (rozdział 6). Autor dokonał krytycznego porównania wyników badań i obliczeń analizowanych konstrukcji. Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że możliwe jest wykorzystanie szybkiego trójcewkowego siłownika elektrodynamicznego o rozpatrywanej w niniejszej pracy konstrukcji do przemieszczania styków wyłącznika w zakresie pełnego skoku styków, z czasem znacznie krótszym niż czas wynikający z zastosowania napędu fabrycznego wyłącznika. Uzyskane wyniki pomiarów weryfikują postawioną tezę.

W rozdziale 7 zamieszczono podsumowanie.

Oceniając pracę chcę podkreślić, że została ona wykonana na bardzo dobrym poziomie i jest wartościowa z punktu widzenia pogłębienia wiedzy na temat modelowania i konstrukcji siłownika elektrodynamicznego do zastosowania w napędach szybkich łączników średniego napięcia. Wnosi ona także oryginalny wkład naukowy i potwierdza dobre kwalifikacje Autora rozprawy.

Do oryginalnych osiągnięć w pracy doktorskiej można zaliczyć:

- dokonanie obszernego przeglądu literatury;
- opracowanie metody wyznaczania parametrów elektrycznych i mechanicznych siłownika elektrodynamicznego do zastosowania w napędach szybkich łączników średniego napięcia;
- opracowanie licznych modeli polowych i sprzężonych modeli magnetostatyczno-mechanicznych polowo-obwodowych badanych siłowników – świadczy to o dużej biegłości w znajomości oprogramowania;
- przeprowadzenie badań symulacyjnych ruchu elementu wykonawczego siłownika z uwzględnieniem parametrów zasilania uzwojenia oraz obciążenia mechanicznego siłownika;
- projekt i wykonanie układów pomiarowych;
- budowę stanowisk laboratoryjnych do wyznaczania parametrów badanych siłowników w tym, w szczególności stanowiska zespołu napędowego tworzącego napęd fabryczny

elektromagnesowy oraz badany w niniejszej rozprawie szybki siłownik elektrodynamiczny;

- analizę porównawczą siłownika o konstrukcji klasycznej z trójcewkową konstrukcją siłownika elektrodynamicznego;
- zaproponowany model i prototyp trójcewkowej konstrukcji siłownika elektrodynamicznego można uznać za element nowości. Model został opracowany na podstawie pomiarów i obliczeń polowo-obwodowych.

Brak też moim zdaniem poważniejszych błędów i uchybień, które należałoby podnieść.

W trakcie zapoznawania się z treścią pracy nasunęło mi się kilka pytań i uwag dyskusyjnych, do których prosiłbym o komentarz ze strony Doktoranta:

1. W jaki sposób praca wpisuje się w aktualne światowe trendy w dziedzinie napędów wyłączników? Jak ocenić nowatorstwo proponowanego rozwiązania?
2. Które zgłoszenia patentowe i publikacje stanowią bezpośredni efekt badań opisanych w rozprawie? Jakiego było znaczenie współpracy z przemysłem?
3. Jakie są główne przewagi proponowanego trójcewkowego siłownika elektrodynamicznego w porównaniu do klasycznego siłownika Thomsona?
4. W jaki sposób teza pracy została zweryfikowana w praktyce – czy uzyskano pełne potwierdzenie założonych parametrów (czas zadziałania <10 ms, skok 15 mm, podziałka ≤ 10 mm)?
5. Jakiego były największe trudności podczas realizacji badań eksperymentalnych i jak zostały one pokonane?
6. W jaki sposób wyznaczano charakterystyki siłowe dla różnych konfiguracji geometrycznych cewek? Jakiego były kryteria wyboru optymalnej geometrii? Czy Autor widzi możliwości zastosowania metod optymalizacji?
7. Jakiego typy sprężyn zostały zastosowane w układzie dociskowym i dlaczego wybrano konkretne rozwiązanie?
8. Czy wykonane badania na rzeczywistym wyłączniku Tawrida w pełni odzwierciedlają warunki pracy urządzenia w sieci elektroenergetycznej?
9. Jakiego były kryteria oceny poprawności działania opracowanego napędu w kontekście synchronizacji z napędem fabrycznym?
10. Jakiego potencjalne kierunki dalszych badań Autor uznaje za najbardziej obiecujące? Czy przewidywana jest adaptacja siłownika do wyłączników wysokiego napięcia?
11. Jakiego aspekty niezawodności siłownika zostały już ocenione, a które wymagają dalszych testów długoterminowych?
12. Gdzie zatem Autor widzi możliwość zastosowania prezentowanej przez siebie konstrukcji siłownika elektrodynamicznego?

4. Uwagi szczegółowe

Podkreślam staranność Autora w poprawnym zapisywaniu wzorów matematycznych oraz bardzo dobrą stronę graficzną pracy.

W pracy znalazłem drobne błędy edytorskie (str.: 17, 21, 32, 35, 41, 100, 123) i dotyczące stylu (str.:31, 32, 54, 114, 115, 139), które nie wpływają na ostateczną pozytywną ocenę pracy.

Zwracam natomiast uwagę na pewne uchybienia:

-str.: 40, błędny podpis pod rys. 4.18;

5.. Konkluzja recenzji

Stwierdzam, iż rozprawa jest napisana bardzo starannie, układ pracy jest precyzyjny i logiczny, a strona graficzna jest wzorowa. Wnioski końcowe uzyskane w pracy są poprawne i interesujące.

Przedstawione powyżej uwagi ogólne i szczegółowe nie obniżają mojej pozytywnej oceny pracy. Wyniki rozważań zawarte w rozprawie upoważniają do stwierdzenia, iż została udowodniona teza oraz osiągnięto założone cele pracy.

Przedstawiona rozprawa dowodzi, że Doktorant umiejętnie korzysta z najnowszej literatury w obranej dziedzinie wiedzy, podchodzi do niej krytycznie, a ponadto potrafi twórczo rozwijać osiągnięcia innych autorów.

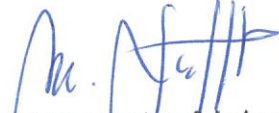
Doktorant wykazał się bardzo dobrą znajomością nowoczesnej metodyki modelowania złożonych obiektów fizycznych, metod numerycznych i technik programowania i pomiarów. Uważam, że praca stanowi samodzielne rozwiązanie przez Autora szeregu zagadnień naukowych przy użyciu nowoczesnych metod badawczych.

Mgr **Szymon Stoczko** jest autorem 7 publikacji w tym: 5 publikacji w recenzowanych czasopismach międzynarodowych i krajowych, 2 publikacje w materiałach konferencyjnych.

Jest współautorem 2 patentów i 1 zgłoszenia patentowego. Brał udział w realizacji 10 grantów i prac zleconych.

Stwierdzam, iż przedstawiona rozprawa pt.: „*Trójcewkowy siłownik elektrodynamiczny do zastosowania w napędzie szybkim wyłącznika*” autorstwa Pana mgr inż. **Szymona Stoczko** stanowi samodzielne rozwiązanie zadania badawczego i spełnia z wyraźnym nadmiarem kryteria stawiane kandydatom do stopnia naukowego doktora w Ustawie - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (j.t. Dz. U. z 2023 r. poz. 742, z późn. zm.). Można, moim zdaniem, rozważyć wyróżnienie pracy.

W związku z powyższym stawiam wniosek o przyjęcie przedstawionej pracy jako rozprawy doktorskiej i dopuszczenie jej Autora Pana mgr inż. **Szymona Stoczko** do dalszych etapów przewodu doktorskiego w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.



prof. dr hab. inż. Marian Łukaniszyn