

RECENZJA

rozprawy doktorskiej

pt: **Analiza zjawisk fizycznych w układach stykowych i torach prądowych podczas przepływu prądu znamionowego oraz zwarciovego**

autorstwa mgra inż. Sebastiana Łapczyńskiego z Politechniki Warszawskiej

Recenzja niniejsza została opracowana na podstawie pisma Pana prof. dr hab. inż. Tomasza Stareckiego z dnia 18.12.2024, powołujące się na uchwałę Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej, o numerze 907/II/2024, z dnia 10 grudnia 2024 r. o powołaniu mnie na recenzenta w postępowaniu w sprawie nadania stopnia naukowego doktora. Opiniowana rozprawa doktorska powstała na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej, Promotorem pracy jest Pan dr hab. inż. dr hab. inż. Łukasz Kolimas, profesora uczelni.

W recenzji zostanie przeprowadzona ocena, czy przedstawiona rozprawa doktorska spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez Ustawę Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. - Dz. U. z 2018 r, poz. 1668, z późniejszymi zmianami).

1. Temat rozprawy i jego uzasadnienie

Problematyka stykowa, w zestyku i torach prądowych, podczas przepływu prądu znamionowego, czy też zwarciovego, ma długotrwałą tradycję. Od blisko 80 lat jest przedmiotem kilku cyklicznych międzynarodowych konferencji. Czołowe miejsce wśród nich zajmuje konferencja IEEE Holm Conference, organizowana regularnie raz w roku w Stanach Zjednoczonych. Równie długą tradycję ma najważniejsza międzynarodowa konferencja stykowa pod nazwą International Conference of Electrical Contacts (ICEC), organizowana od 1961 roku regularnie co dwa lata, przemienne na trzech kontynentach Ameryka-Europa-Azja. Jest ona moderowana przez międzynarodowe grono naukowców działających w zespole International Advisory Group, w skład którego wchodzi również przedstawiciel Polski. W Europie niemieckie stowarzyszenie VDE organizuje co 2 lata w Karlsruhe konferencję pod nazwą VDE-Fachtagung Albert-Keil-Kontaktseminar. W latach osiemdziesiątych dołączyli do tego grona Japończycy, z konferencją International Symposium on Electromechanical Devices (IS-EMD). Również Chińczycy prowadzą od lat dziewięćdziesiątych kilka konferencji z łącznikami elektrycznymi w nazwie. Polska ma także swój udział w tej działalności międzynarodowej. Od 1968 co cztery lata Instytut/Katedra Aparatów Elektrycznych PŁ organizowała w Łodzi międzynarodową konferencję pod nazwą Switching Arc Phenomena (SAP), w której artykuły o tematyce zestykowej zajmują dużo miejsca. W ostatnich kilkunastu latach nastąpił znaczący rozwój konferencji stykowych. Podwoiła się liczba zgłaszanych artykułów, wzrosła liczba współautorów publikacji, wśród których zaczynają wieść prym zespoły wieloosobowe, w większości interdyscyplinarne.

Spektrum tematyczne i przedmiotowe tych konferencji jest szerokie. Obejmuje zagadnienia teoretyczne, konstrukcyjne, eksperymentalne, materiałowe i technologiczne styków w odniesieniu do zestyków słaboprądowych, ślizgowych i silnoprądowych (arcing contacts) łączników elektroenergetycznych. Te ostatnie zagadnienia są w dużym stopniu eksperymentalne. Wymagają dysponowania laboratoriami dużych mocy oraz opracowania specjalnych stanowisk probierczych i metod pomiarowych, związanych z występowaniem w zestykach wielu zjawisk fizycznych, mechanicznych i chemicznych spowodowanych łukiem elektrycznym.

W zestykach łącznika elektrycznego występują w czasie jego pracy różnorodne zjawiska fizyczne, mechaniczne, elektryczne i chemiczne, które powodują szkodliwe skutki determinujące

parametry znamionowe łącznika. Do najważniejszych skutków zalicza się nagrzewanie styków, erozję łukową i szepianie. Aby przeciwdziałać występowaniu tych szkodliwych zjawisk przewodzenia prądu lub znacznie je ograniczyć, stosuje się różne sposoby konstrukcyjne. Jednym z najbardziej skutecznych sposobów jest zastosowanie odpowiedniego materiału stykowego, który będzie odporny na erozję łukową i szepianie oraz będzie wykazywał małą i stabilną w czasie pracy łączeniowej rezystancję zestykową. Wymagania stawiane materiałom stykowym stale wzrastają. Dlatego na świecie prowadzone są liczne prace badawczo-rozwojowe nad zestykami oraz poszukiwanie nowych rozwiązań materiałów kompozytowych, jak również prowadzone są badania modelowe zestyków przy wykorzystaniu profesjonalnych pakietów komputerowych, zarówno podczas przepływu prądu znamionowego, jak też zwarciovego.

Na dodatek, ze względu na trwającą światową wojnę hybrydową, obecnie jest duże zapotrzebowanie ze strony przemysłu na nowe bądź udoskonalone materiały stykowe do łączników elektroenergetycznych o coraz wyższych parametrach znamionowych.

Podjęcie tej tematyki jest w pełni uzasadnione ze względu na jej duże znaczenie zarówno naukowe, jak i aplikacyjne szczególnie dla konstruktorów łączników zestykowych i producentów materiałów stykowych, jak również dla umożliwienia racjonalnej eksploatacji łączników i zwiększenia niezawodności obwodów, w których zostały zastosowane.

Celowość rozwijania tej tematyki w stosunku do obecnego poziomu wiedzy jest wobec tego bezdyskusyjna, a recenzowana rozprawa stanowi oryginalny dorobek Doktoranta. Główną przesłanką uzasadniającą prezentowane stanowisko jest, w recenzowanej pracy, interdyscyplinarne opracowanie wielu złożonych zagadnień teoretycznych i praktycznych dotyczących możliwości poprawy sposobu prototypowania, który ma na celu: lepsze zrozumienie zjawisk fizycznych, poprawę konstrukcji urządzeń elektrycznych, oraz przyspieszenie procesu projektowania, ograniczającego koszty produkcyjne i czas wdrożenia aparatu elektrycznego.

2. Struktura pracy, główne rezultaty rozprawy, ocena tezy i umiejętność prezentowania wyników naukowych

Przystępując do charakterystyki rozprawy należy w tym miejscu zaznaczyć, że stanowi ona zbiór opublikowanych i powiązanych tematycznie artykułów naukowych, co jest zgodne z Art. 187, ust. 3. obowiązującej ustawy "Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce". Recenzent nie będzie oceniał dołączonych patentów, bo nie są one wymienione w ww. ustawie, a na dodatek recenzent nigdzie w ocenianej pracy nie znalazł informacji o wdrożeniu patentu z zakresu P1 – P6.

Recenzowana rozprawa doktorska wraz ze spisem literatury liczy 69 ponumerowanych stron oraz 217 nieponumerowanych (ksero artykułów + ksero jednostronicowe informacji o patencie) i została podzielona na 5 głównych rozdziałów. Rozprawa składa się z następujących elementów:

- Streszczenie (Abstract);
- Spis treści;
- Rozdział 1: Wstęp;
 - Rozdział 1.1.: Zjawiska fizyczne występujące w torach prądowych, zestykach aparatów elektrycznych i urządzeniach rozdzielczych podczas przepływu prądu znamionowego oraz zwarciovego;
 - Rozdział 1.2.: Przegląd stanu techniki na podstawie kluczowych publikacji dla pracy autora;
 - Rozdział 1.3.: Numeryczna analiza zjawisk fizycznych – wykorzystanie MES;
 - Rozdział 1.4.: Cel badań oraz tezy badawcze;
 - Rozdział 1.5.: Publikacje oraz patenty składające się na niniejszą rozprawę;
- Rozdział 2: Wkład autora rozprawy;
 - Rozdział 2.1.: Publikacje dotyczące analizy oddziaływań elektrodynamicznych;
 - Rozdział 2.2.: Publikacje dotyczące analizy zjawisk termicznych;
 - Rozdział 2.3.: Publikacje dotyczące analizy zjawisk łukowych;
 - Rozdział 2.4.: Publikacje dotyczące analizy zjawisk mechanicznych;

- Rozdział 2.5.: Patenty;
- Rozdział 3: Podsumowanie i wnioski końcowe;
- Rozdział 3.1.: Podsumowanie;
- Rozdział 3.2.: Wnioski końcowe;
- Rozdział 4: Literatura;
- Rozdział 5: Kopie publikacji oraz patentów składających się na niniejszą rozprawę.

Najważniejszym rozdziałem rozprawy jest rozdział 5, w którym zawarto zbiór jedenastu opublikowanych i powiązanych tematycznie artykułów naukowych oznaczonych jako A1 – A11 (zgodnie z artykułem 187 ustęp 3 Ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce: „Rozprawę doktorską może stanowić praca pisemna, w tym monografia naukowa, zbiór opublikowanych i powiązanych tematycznie artykułów naukowych, praca projektowa, konstrukcyjna, technologiczna, wdrożeniowa lub artystyczna, a także samodzielna i wyodrębniona część pracy zbiorowej”).

W rozdziale 1 rozprawy (str. 12) postawiono następującą główną tezę pracy *„Istnieje możliwość badania zjawisk fizycznych związanych z przepływem prądu znamionowego i zwarciovego przez aparaty elektryczne i urządzenia rozdzielcze z wykorzystaniem szczegółowych, wiarygodnych modeli 3D oraz symulacji wykorzystujących metodę elementów skończonych. Istnieje możliwość badania zjawisk fizycznych związanych z techniką łączenia realizowaną przez aparaty elektryczne i urządzenia rozdzielcze na drodze symulacyjnej z dużą zbieżnością wyników.”*

Recenzent uważa, że teza jest postawiona poprawnie i jest zrozumiała w pierwszym zdaniu. W drugim zdaniu tezy może pojawić się wątpliwość, dla nie specjalistów z zakresu aparatów elektrycznych, czego ma dotyczyć „duża zbieżność wyników”. Teza główna została podzielona na 5 szczegółowych tez. Uważam, że ten zabieg jest niepotrzebny i tezy te należałoby raczej przededagować na zakres merytoryczny pracy.

Poniżej przeanalizowano wkład własny autora rozprawy w opracowanie danej publikacji. Publikacje [A1, A2] dotyczy dotyczące analizy zjawisk łukowych. Publikacja [A3] dotyczy modelowania zjawisk mechanicznych podczas ruchu zestyku tulipanowego. Publikacje [A4, A5, A9, A10, A11] dotyczą modelowania oddziaływania sił elektrodynamicznych w układzie stykowym tulipanowym wysokiego napięcia oraz torów prądowych w rozdzielnicy niskiego napięcia., natomiast publikacje [A6, A7, A8] dotyczące modelowania i analizy zjawisk termicznych w torach prądowych aparatów elektrycznych i urządzeń rozdzielczych.

[A1] Łukasz Kolimas, Sebastian Łapczyński, "Currents of contact welding in a static layout: A laboratory exercise", International Journal of Electrical Engineering Education, I, ISSN 0020-7209, 2022, s. 3 – 19, (40 pkt. wg. wykazu MNiSW, IF= 0,938).

Ze względu na to, że artykuł ten nie jest artykułem naukowym, tylko dydaktycznym, dlatego recenzent nie będzie go oceniał, i zgodnie z artykułem 187 ustęp 3 Ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce zmuszony jest wykluczyć go z cyklu powiązanych tematycznie artykułów przedstawionych do recenzji.

[A2] Łukasz Kolimas, Sebastian Łapczyński, Michał Szulborski, Michał Świetlik, "Low Voltage Modular Circuit Breakers: FEM Employment for Modelling of Arc Chambers", Bulletin of the Polish Academy of Sciences-Technical Sciences, 68, ISSN 0239-7528, s. 61-70, 2020, (100 pkt. wg. wykazu MNiSW, IF=1,38).

W pracy [A2] zaproponowano nowe sposoby modelowania zjawisk łukowych w aparatach niskiego napięcia. W publikacji został zaproponowany model komory gaszeniowej wyłącznika nadprądowego niskiego napięcia umożliwiający obserwację gradientu napięcia oraz analizę pola przepływowego ww. komorach. Zaprezentowano również badania eksperymentalne w obszarze aparatów modułowych niskiego napięcia, badań w obszarze wytrzymałości elektrycznej i mechanicznej kluczowych elementów aparatów elektrycznych niskiego napięcia. Przedstawiony model oraz procedura w pracy [A2] zostały zweryfikowane badaniami empirycznymi, które potwierdzają zasadność takiego postępowania. Ważną cechą wynikającą z tej pracy jest możliwość rekonstrukcji modeli komór łukowych i w przypadku zmian konstrukcyjnych, uniknięcie kosztownych i czasochłonnych badań laboratoryjnych lub przynajmniej ograniczenie nakładów.

Autor rozprawy wskazał, iż był odpowiedzialny za zbudowanie modelu 3D komory gaszeniowej, za samodzielne wykonanie symulacji termicznych dla komór gaszeniowych badanych wyłączników nadprądowych oraz za analizę wyników uzyskanych z modelowania i badań eksperymentalnych. Udział autora rozprawy w opracowaniu tej publikacji wynosi 20%.

[A3] Sebastian Łapczyński, Michał Szulborski, Karol Golota, Łukasz Kolimas, Łukasz Kozarek, "Mechanical and Electrical Simulations of Tulip Contact System", *Energies*, 1, ISSN 1996-1073, s. 1-28, 2020, (140 pkt. wg. wykazu MNiSW, IF=3,2).

W pracy [A3] został zaproponowany model fizycznego układu stykowego tulipanowego umożliwiający m.in. obserwację działania sił działających na stycki układu stykowego, obserwację wpływu mimośrodowo zamocowania styku ruchomego na możliwość załączania, wyznaczania wartości parametrów elektrycznych podczas operacji łączeniowych. Dzięki połączeniu dwóch rodzajów analiz – analizy ruchu zestyku i analizy rozkładu pola elektrycznego, zaobserwowano znaczenie wzajemnych przemieszczeń styków względem siebie i ich wzajemne oddziaływanie.

Autor rozprawy wskazał, iż był odpowiedzialny m.in. za zbudowanie modelu 3D układu stykowego oraz współpracował przy wykonaniu symulacji dynamiki ruchu zestyku. Udział autora rozprawy w opracowaniu tej publikacji wynosi 10%.

[A4] Łukasz Kolimas, Krzysztof Bieńkowski, Sebastian Łapczyński, Michał Szulborski, Łukasz Kozarek, Karol Birek, "Control System and Measurements of Coil Actuators Parameters for Magnetomotive Micropump Concept", *Bulletin of the Polish Academy of Sciences-Technical Sciences*, 68, ISSN 0239-7528, s. 893-901, 2020, (100 pkt. wg. wykazu MNiSW, IF=1,38).

W pracy [A4] została zaproponowana budowa oraz pomiary siłowników elektrodynamicznego oraz reluktancyjnego jako napęd nowatorskiej koncepcji mikropompy magnetomotorycznej. Na podstawie badań parametrów aktuatorów m.in. prędkości tłoka, energii zgromadzonej w kondensatorach i sprawności, wybrano najlepsze rozwiązanie do zastosowania w pracach nad konstrukcją mikropompy magnetomotorycznej.

Autor rozprawy samodzielnie opracował model 3D siłownika elektrodynamicznego i był odpowiedzialny za prace eksperymentalne i analityczne porównujące wyniki symulacji i badań empirycznych siłownika reluktancyjnego z elektrodynamicznym celem wyboru odpowiedniego rozwiązania do zastosowania w pompie magnetomotorycznej. Udział autora rozprawy w opracowaniu tej publikacji wynosi 40%.

[A5] Michał Szulborski, Sebastian Łapczyński, Łukasz Kolimas, Łukasz Kozarek, Desire Rasolomampionona, "Calculations of Electrodynamic Forces in Three-phase Asymmetric Busbar System with the use of FEM", *Energies*, 1, ISSN 1996-1073, s. 1-25, 2020, (140 pkt. wg. wykazu MNiSW, IF=3,2).

W pracy [A5] przeprowadzono obliczenia analityczne trójfazowego układu szyn zbiorczych. Obliczono maksymalną wartość siły elektrodynamicznej, wartość wytrzymałości mechanicznej, częstotliwość drgań własnych szyn zbiorczych oraz wykonano obliczenia za pomocą modelu równoległego układu szyn zbiorczych w programie ANSYS uzyskując potwierdzenie wyników analitycznych. Zaproponowany model umożliwiał: obserwację działania sił, energii działających na izolatory wsporcze, realizację doboru i modelowania torów prądowych ze względu na zagrożenia związane z przepływem prądu zwarcowego, obserwację skutków działania sił elektrodynamicznych od prądu zwarcowego niesymetrycznego.

Autor rozprawy samodzielnie opracował model 3D badanej rozdzielniczy oraz jej torów prądowych. Doktorant wykonał symulację deformacji torów prądowych pod wpływem działania sił elektrodynamicznych. Udział autora rozprawy w opracowaniu tej publikacji wynosi 10%.

[A6] Michał Szulborski, Sebastian Łapczyński, Łukasz Kolimas, Łukasz Kozarek, Desire Rasolomampionona, Tomasz Żelaziński, Adam Smolarczyk, "Transient Thermal Analysis of NH000 gG 100A Fuse Link Employing Finite Element Method", *Energies*, 14(5), ISSN 1996-1073, s. 1-17, 2021, (140 pkt. wg. wykazu MNiSW, IF=3,2).

W pracy [A6] zaproponowano trójwymiarowy model wkładki bezpiecznikowej NH000 gG 100 A wykonany metodą elementów skończonych. Głównym przedmiotem przeprowadzonych analiz były właściwości termiczne bezpieczników podczas pracy w warunkach znamionowych

(100 A) i niestandardowych (110 A i 120 A). Prace dotyczą zarówno elementów zewnętrznych wkładki bezpiecznikowej (korpus ceramiczny), jak i elementów wewnętrznych (obwód prądowy). Opisano zarówno rozkład gęstości prądu elektrycznego, jak i jego wpływ na temperaturę elementów konstrukcyjnych bezpieczników w czasie ich pracy.

Autor rozprawy był odpowiedzialny za prace dotyczące budowy stanowiska eksperymentalnego oraz wykonanie modelu 3D wkładki topikowej. Autor współpracował przy wykonaniu symulacji termicznych MES wkładki topikowej i był odpowiedzialny za analizę materiałową. Udział autora rozprawy w opracowaniu tej publikacji wynosi 15%.

[A7] Michał Szulborski, Sebastian Łapczyński, Łukasz Kolimas, Daniel Zalewski, "Transient Thermal Analysis of the Circuit Breaker Current Path with the use of FEA Simulation", *Energies*, I, ISSN 1996-1073, s. 1-24, 2021, (140 pkt. wg. wykazu MNiSW, IF=3,2).

W pracy [A7] zaproponowano nowe sposoby modelowania zjawisk fizycznych aparatów modułowych niskiego napięcia. Opracowano dokładny model 3D oraz wykonano analizy pól sprzężonych. Model wykorzystano podczas konstruowania i prototypowania nowych konstrukcji modułowych aparatów elektrycznych. Autorzy biorąc pod uwagę dokładne odwzorowanie toru prądowego kompaktowego wyłącznika nadprądowego podeszli kompleksowo do analizy termicznej oraz analizy parametrów elektrycznych.

Autor rozprawy odpowiedzialny był za opracowanie dokładnego modelu 3D toru prądowego wyłącznika nadprądowego oraz wykonanie symulacji termicznych dla tego aparatu. Ponadto autor współpracował przy zbudowaniu stanowiska pomiarowego. Udział autora rozprawy w opracowaniu tej publikacji wynosi 15%.

[A8] Michał Szulborski, Sebastian Łapczyński, Łukasz Kolimas, "Thermal analysis of heat distribution in busbars during rated current flow in low-voltage industrial switchgear", *Energies*, 14, ISSN 1996-1073, s. 1-23, 9, 2021, (140 pkt. wg. wykazu MNiSW, IF=3,2).

W pracy [A8] przedstawiono analizę sprzężoną: Maxwell 3D, Transient Thermal oraz Fluent CFD, w chwili startu przepływu prądu znamionowego na szynach głównych rozdzielnic niskiego napięcia. Przedstawiono sposób odprowadzania ciepła w szynach zbiorczych i obudowie rozdzielnic poprzez konwekcję powietrzną. Uwzględniono rozkład temperatur izolatorów. Uzyskane wyniki podczas symulacji pozwoliły na wprowadzenie zmian konstrukcyjnych w przygotowanym prototypie rozdzielnic już na etapie projektowania i budowy.

Autor rozprawy był odpowiedzialny za opracowanie modelu 3D rozdzielnic oraz jej torów prądowych i współpracował przy wykonaniu symulacji termicznych dla sporządzonego modelu 3D. Ponadto autor współpracował przy zbudowaniu stanowiska badawczego oraz porównaniu wyników uzyskanych z symulacji z wynikami eksperymentalnymi. Udział autora rozprawy w opracowaniu tej publikacji wynosi 20%.

[A9] Michał Szulborski, Sebastian Łapczyński, Łukasz Kolimas, "Increasing magnetic blowout force by using ferromagnetic side plates inside MCB", *Energies*, I, ISSN 1996-1073, s. 1-17, 2022, (140 pkt. wg. wykazu MNiSW, IF=3,2).

W pracy [A9] przedstawiono metodę numerycznego modelowania komór gaszeniowych niskiego napięcia stosowanych w aparatach modułowych. Skupiono się na przedstawieniu zjawiska zwiększania wydmuchu poprzez zastosowanie płytek ferromagnetycznych dzielących łuk elektryczny wewnątrz aparatu elektrycznego. Przeprowadzone symulacje obliczeniowe w pracy potwierdziły, że wykonywanie analiz numerycznych na dokładnych modelach konstrukcyjnych 3D może stanowić istotne ułatwienie podczas budowy i prototypowania komór gaszeniowych. Dodatkowo wyniki symulacji są spójne z wynikami uzyskanymi z przeprowadzonych badań eksperymentalnych.

Autor rozprawy samodzielnie opracował modele symulacyjne komory gaszeniowej i płytek dejonizacyjnych na potrzeby symulacji oddziaływania łuku elektrycznego oraz w stopniu znaczącym wykonał symulacje dla wyżej wymienionych obiektów. Udział autora rozprawy w opracowaniu tej publikacji wynosi 40%.

[A10] Michał Szulborski, Sebastian Łapczyński, Łukasz Kolimas, Mykhailo Tyryk, "Electrodynamic Forces in a High Voltage Circuit Breakers with Tulip Contact System – FEM simulations", *IEEE Access*, I, ISSN 2169-3536, s.1-22, 2022, (100 pkt. wg. wykazu MNiSW, IF= 3,9).

W pracy [A10] przeanalizowano wpływ sił elektrodynamicznych działających na stycki układu tulipanowego stosowanych w wyłącznikach wysokiego napięcia. Autorzy zaproponowali zastosowanie metody elementów skończonych celem wyznaczenia wartości sił elektrodynamicznych działających na układ styków poprzez wykonanie szczegółowej symulacji sprzężonej 3D. Analiza wyników pozwoliła na sformułowanie wniosków dotyczących działania takich układów styków w warunkach zwarciovych, w szczególności dotyczących wiele punktów oddziaływań rozmieszczonych na poszczególnych styckach.

Autor rozprawy zaprojektował w stopniu znaczącym modele symulacyjne zestyku tulipanowego. Również w stopniu znaczącym wykonał symulacje sił elektrodynamicznych dla ww. obiektu. Autor brał udział w ocenie analitycznej dotyczącej wartości sił elektrodynamicznych jakie uzyskano podczas przeprowadzania symulacji i odniesienia ich do wartości rzeczywistych oraz analitycznych dostępnych w literaturze. Udział autora rozprawy w opracowaniu tej publikacji wynosi 40%.

[A11] Michał Szulborski, Sebastian Łapczyński, Łukasz Kolimas, Łukasz Kozarek, Hubert Cichecki, Przemysław Sul, Maciej Owsinski, Przemysław Berowski, Dariusz Baczyński, Marcin Wesołowski, "Examination of Electrodynamic Forces in High Voltage Disconnecter Related to the Short-Circuit Current Using the Digital Twin Technology", IEEE Access, s. (99):1-1, 2024, (100 pkt. wg. wykazu MNiSW, IF= 3,56).

W pracy [A11] zaprezentowano technologię Digital Twin modelowania obiektów w analizie symulacyjnej zjawisk fizycznych. Zaprezentowano, zweryfikowano i omówiono model Digital Twin (DT) przedstawiający analizę sił elektrodynamicznych w trójfazowym rozłączniku wysokiego napięcia. Wyniki modelowania MES za pomocą technologii DT porównano i zweryfikowano z wartościami eksperymentalnymi uzyskanymi z badań zwarciovych przeprowadzonych w Instytucie Energetyki.

W tej publikacji autor rozprawy był odpowiedzialny za opracowanie metody badawczej i współpracował przy budowie modelu symulacyjnego rozłącznika wysokiego napięcia. Również współpracował przy wykonywaniu symulacji sił elektrodynamicznych dla ww. obiektu. Udział autora rozprawy w opracowaniu tej publikacji wynosi 10%.

Wszystkie artykuły naukowe ujęte w ocenianym zbiorze opublikowanych i powiązanych tematycznie artykułów naukowych są publikacjami współautorskimi (od 3 do 10 autorów). Słabością rozprawy jest fakt, że Doktorant tylko w jednej publikacji jest umieszczony jako pierwszy autor i tylko w 3 publikacjach jego wkład jest w miarę znaczący i wynosi 40%, zaś w pozostałych mieści się tylko w zakresie 10-20%. Należy podkreślić, że 10 publikacji ukazało w czasopiśmie z tzw. „Listy Filadelfijskiej” (6 w Energies, 2 w Bulletin of the PAN i 2 w IEEE Access), co uważam za mocną stronę ocenianej rozprawy doktorskiej. Należy podkreślić, że artykuły te przeszły proces recenzowania i przez niezależnych recenzentów zostały już konstruktywnie ocenione i w pewien sposób ukształtowane.

Spis literatury rozprawy doktorskiej zawiera 110 pozycji. W zdecydowanej większości pozycje literaturowe są stosunkowo nowe. Stwierdzam, że literatura została wybrana właściwie i jest w pracy wykorzystywana poprawnie, a analiza literaturowa zagadnienia została wykonana w sposób właściwy. Niesmak pozostawia tylko brak znaczącej pozycji monograficznej w języku polskim popełnionej przez prof. Witolda Tarczyńskiego, *Elektrodynamika aparatów elektrycznych* (ISBN 978-83-7283-239-9, 2007, s. 307).

Dla zrealizowania założonego programu interdyscyplinarnych badań teoretycznych jak i eksperymentalnych Doktorant musiał opanować nowoczesne techniki badawcze głównie z zakresu informatyki, miernictwa jak i elektrotechniki, w szczególności techniki wysokich napięć, a sposób wywiązania się z postawionych sobie zadań badawczych świadczy o wystarczających naukowych kwalifikacjach Doktoranta. Doktorant uzyskał zdolność samodzielnego prowadzenia badań, a także posiada umiejętność przedstawiania i komentowania uzyskanych wyników badań i analiz oraz formułowania wniosków.

Celem naukowym prac badawczych przedstawionych w ocenianej rozprawie było opracowanie modeli układów stykowych, torów prądowych aparatów elektrycznych i urządzeń rozdzielczych oraz wykonanie symulacji w celu badania zjawisk fizycznych związanych z przepływem prądu znamionowego i zwarciovego. Zaprojektowane modele oraz wyniki symulacji dość dobrze odzwierciedlały pomiary uzyskane podczas

eksperymentów. Niewątpliwie, Doktorant swoją rozprawą doktorską przyczynił się do rozwoju reprezentowanej przez siebie dziedziny nauki. W świetle przedstawionych wyników rozprawy tezę można uznać za udowodnioną oraz cele pracy za osiągnięte zarówno na płaszczyźnie teoretycznej jak i praktycznej.

Podsumowując, można stwierdzić, że mgr inż. Sebastian Łapczyński wykazał się zarówno wiedzą jak i umiejętnością prowadzenia pracy naukowej. W szczególności znajomość prac projektowych i eksperymentalnych, z wykorzystaniem nowoczesnych technik obliczeniowych i narzędzi badawczych jest niewątpliwą zaletą Doktoranta, godną podkreślenia.

3. Strona edytorska rozprawy

Rozprawa jest opracowana w sposób dość zrozumiały dla czytelnika. Druk i grafika komputerowa są czytelne. Z językowego punktu widzenia praca jest napisana dość poprawnie, choć odnosi się wrażenie, że była pisana w pośpiechu, bez wystarczającej spokojnej korekty i użycia poprawnych terminologii z zakresu aparatów elektrycznych. Autor nie ustrzegł się od popełnienia kilku błędów redakcyjnych, edytorskich, interpunkcyjnych bądź nieprecyzyjnych sformułowań. Pojawiają się częste niepotrzebne powtórzenia sformułowań. Recenzent uważa jednak, że poziom edytorski rozprawy doktorskiej jest wystarczający, a przykładowe uwagi podane w uwagach szczegółowych i redakcyjnych nie umniejszają pozytywnie merytorycznej oceny uzyskanych w pracy wyników.

4. Zagadnienia dyskusyjne i uwagi krytyczne

- 1) Str. 7 wiersz 4 od góry – Jakie parametry łączeniowe aparatów elektrycznych zależą od parametrów kinematycznych układu napędowego styków łącznika?
- 2) Str. 10 wiersz 12 od góry – Co to są „charakterystyki zapłonowe łączników elektrycznych”?
- 3) Str. 10 wiersz 19 od góry – Proszę odpowiedzieć o jakie cechy mechaniczne i elektryczne chodzi?; oraz Co to jest „wydajność układu stykowego”?
- 4) Artykuł A2 na str. 66 znajduje się rys. 11. Proszę odpowiedzieć na następujące zagadnienia:
 - a) dlaczego na oscylogramach nie pokazano przebiegów napięcia zasilającego,
 - b) dlaczego półfala prądu jest odkształcona od przebiegu sinusoidalnego zanim wystąpi łuk elektryczny, skoro obwód jest zasilany napięciem przemiennym,
 - c) proszę uzasadnić kryteria oceny komór 9-cio i 13-sto płytkowej (wynik negatywny, wynik pozytywny) skoro na wszystkich pokazanych na rys. 11 oscylogramach widać wyłączenie prądu, natomiast czas trwania oscylacji po przejściu prądu przez zero jest różny,
 - d) czy w obwodach praktycznych wyłącznik szybki prądu przemiennego z komorą 9-cio płytkową nie wyłączy prądu?
- 5) Artykuł A2 na str. 67 znajduje się punkt 4.3. Proszę o uzasadnienie dlaczego liczba płytek komory gaszeniowej wpływa na zmianę wytrzymałości napięciowej przerwy zestykowej.
- 6) Artykuł A3 na str. 25/28 znajduje się rys. 33. Czy pokazany na tym rysunku przebieg przyspieszenia może być podstawą do wnioskowania o ruchu badanego obiektu?
- 7) Artykuł A5 na str. 24/26 znajduje się rys. 18. Dla jakich warunków obwodowych podano powyższy przebieg? Czy w obwodach niskonapięciowych występuje tak duża składowa nieokresowa prądu zwarciovego?
- 8) Artykuł A7 na str. 7/24 znajduje się rys. 3. Czy jest model wykonany do badań, czy produkowany wyłącznik instalacyjny konkretnej firmy?

- 9) Artykuł A9 na str. 5/19 znajduje się rys. 6. Czy w wyłącznikach instalacyjnych, badanych przez doktoranta, występują tory prądowe pokazane na rys. 6 charakterystyczne dla niskonapięciowych wyłącznikach szybkich prądu przemiennego na duże wartości prądów znamionowych?

Jednocześnie stwierdzam, że nie sprawdzałem poprawności przekształceń wzorów podanych w artykułach A1 – A11.

5. Najważniejsze uwagi szczegółowe i redakcyjne

- 1) Str. 7 – trzynasty wiersz od dołu, zamiast słowa „zwarcia” lepiej użyć „styczności” bądź „zamknięcia”.
- 2) Str. 7 – piętnasty wiersz od dołu, definicja zestyku niepoprawna, zadaniem napędu jest mechaniczne przestawienie styku ruchomego.
- 3) Str. 7 – trzynasty wiersz od dołu, pojawiło się błędne zdanie - mechanizm napędowy zamyka i otwiera styki, a załączanie i wyłączanie prądu jest realizowane w układzie stykowo-gaszeniowym.
- 4) Str. 7 – dwunasty wiersz od dołu, za „niezawodne wyłączanie prądu” odpowiada nie tylko „mechanizm układu zestykowego”.
- 5) Str. 7 oraz 9 – dziewiąty wiersz od dołu, oraz szósty wiersz od góry, jest „szczepienie” powinno być „szczępienie”, to nie jest praca z biologii.
- 6) Str. 8 – punkt 5.b – jest „nieporządknych” a chyba powinno być „niepożądaných”.
- 7) Str. 9 – powołano się na monografię B. Miedzińskiego [10], a w literaturze umieszczono „*Jordanidis, A.; Franck, C.M. Self-consistent radiation based simulation of electric arcs. Part II: Application to gas circuit breakers. J. Phys. D Appl. Phys. 2008, 41, 135206*”.
- 8) Str. 29 – szesnasty wiersz od dołu, jest „wadze” lepszym byłoby „znaczeniu”.
- 9) Str. 39 – ósmy oraz osiemnasty wiersz od dołu, jak Doktorant rozumie sformułowanie „Opracowany właściwy...”.
- 10) **Uwaga porządkowa dotycząca wzorów matematycznych oraz rysunków użytych w artykułach: żeby nie było wątpliwości, w następnych publikacjach, dobrym nawykiem dojrzałego naukowca jest oznaczać wzory i rysunki zaczerpnięte z literatury.**

Pozostałe drobne uwagi redakcyjne zostaną przekazane bezpośrednio Autorowi, przy najbliższej sposobności.

6. Ocena ostateczna rozprawy

Rozprawa doktorska pt: *Analiza zjawisk fizycznych w układach stykowych i torach prądowych podczas przepływu prądu znamionowego oraz zwarciovego*, autorstwa mgr inż. Sebastiana Łapczyńskiego, stanowi ważną w zakresie poznawczym i teoretycznym pracę naukową o wystarczających cechach oryginalności. Doktorant wniósł dający się jednoznacznie wyodrębnić wkład w ważną dla nauki dziedzinę techniki projektowania układów stykowych i torów prądowych. Za najważniejsze samodzielne osiągnięcia Autora uważam:

- 1) wykonanie badań eksperymentalnych rzeczywistych obiektów, w tym badań zwarciovych,
- 2) opracowanie reprezentacji graficznych w środowisku 3D wybranych elementów aparatów elektrycznych,
- 3) opracowanie numerycznych modeli symulacyjnych zjawisk fizycznych, w tym: oddziaływania termicznego, oddziaływania elektrodynamicznego, oddziaływania

mechanicznego, oddziaływania łukowego, generujących rozwiązania zbieżne z wynikami uzyskanymi z badań eksperymentalnych.

Na podkreślenie zasługują umiejętności Doktoranta w zakresie rozwiązywania pracochłonnych problemów interdyscyplinarnych, zdolność do krytycznej interpretacji uzyskiwanych wyników oraz umiejętność pisanie wniosków patentowych na podstawie modeli symulacyjnych oraz badań eksperymentalnych. Wskazuje to na wystarczające przygotowanie teoretyczne Doktoranta w zakresie samodzielnego rozwiązywania trudnych problemów naukowych. Powyższa ocena wraz z podanymi pozytywnymi konstatacjami dotyczącymi celowości podjętej tematyki, zakresu i kompletności rozprawy, udowodnienia jej tezy i osiągnięcia założonych celów pozwalają stwierdzić, że **recenzowana praca spełnia wszystkie wymagania ustawowe stawiane rozprawom doktorskim.**

W związku z art. 179 ust. 1 ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr inż. Sebastiana Łapczyńskiego nt. *„Analiza zjawisk fizycznych w układach stykowych i torach prądowych podczas przepływu prądu znamionowego oraz zwarciovowego”* spełnia wymagania formalne określone w Ustawie z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2003, nr 65, poz. 595) wraz z późniejszymi zmianami.

Przedstawiona rozprawa doktorska mieści się w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych (odpowiadającej dziedzinie nauk technicznych wg Rozporządzenia MNiSW z 2011 roku), w dziedzinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne (odpowiadającej dyscyplinie elektrotechnika wg Rozporządzenia MNiSW z 2011 roku).

Wnoszę przeto o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.

06.02.2025 