

WPŁYNEŁO  
2023 -08- 10  
dn.....

Wrocław, dnia 07.08.2023 r.

dr hab. inż. Marcin Habrych, prof. uczelni  
Politechnika Wrocławska  
Wydział Elektryczny  
Katedra Energoelektryki  
e-mail: marcin.habrych@pwr.edu.pl

## **RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ MGR. INŻ. MICHAŁA SZULBORSKIEGO**

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

### **I. Podstawa wykonania recenzji**

Podstawą wykonania recenzji rozprawy doktorskiej mgr. inż. Michała Szulborskiego jest pismo Pana prof. dr hab. inż. Tomasza Stareckiego z dnia 27.06.2023 r., powołujące się na uchwałę Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej, z dnia 27 czerwca 2023 r. Opiniowana rozprawa doktorska powstała na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej. Promotorem pracy jest Pan dr hab. inż. Łukasz Kolimas, prof. 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).

### **II. Ogólna charakterystyka tematyki rozprawy**

Głównym przedmiotem badań w rozprawie doktorskiej mgr. inż. Michała Szulborskiego były zagadnienia związane z wyznaczaniem wartości oddziaływań sił elektrodynamicznych, występujących torach prądowych i układach zestykowych aparatów elektrycznych oraz urządzeń rozdzielczych. Do tego celu autor rozprawy wykorzystał zaawansowane metody numerycznych analiz sprzężonych, przeprowadzone w programach komputerowych opartych na metodzie elementów skończonych.

W obecnych czasach zaobserwować można tendencję do miniaturyzacji urządzeń rozdzielczych i aparatów elektrycznych, przy jednoczesnym dążeniu do wzrostu obciążalności ich torów prądowych. To stawia duże wyzwania konstruktorom, którzy muszą zaprojektować aparaty i urządzenia, które będą pracowały niezawodnie, a jednocześnie podczas zakłóceń występujących w sieci elektroenergetycznej spełnią stawiane im wymagania i nie ulegną uszkodzeniu. Stosowane obecnie przez konstruktorów metody analityczne są obciążone dużymi błędami. Dlatego zastosowanie programów komputerowych w procesie projektowania aparatów i urządzeń elektrycznych jest obecnie niezbędnym narzędziem każdego konstruktora. Programy te są obecnie, w większości przypadków, oparte na metodzie elementów skończonych. Obliczenia wykonuje się na

wcześniej przygotowanych modelach 3D aparatów/urządzeń (szczegółowe bliźniaki cyfrowe). Pozwala to odpowiednio zaprojektować i zoptymalizować konstrukcję torów prądowych i układów zestykowych.

Przeprowadzone przez autora rozprawy badania i analizy skupiają się na zjawiskach elektrodynamicznych, występujących w aparatach i urządzeniach rozdzielczych (szczególnie skupiono się na tym problemie podczas występowania dużych wartości chwilowych prądów zwarciovych). Jest to kluczowy warunek krytyczny w konstrukcji urządzeń elektrycznych, który określa ich maksymalną zdolność zwarciovą. W pracy skupiono się również na analizach mechanicznych, wyznaczeniu maksymalnych naprężeń oraz odkształceń powstałych od oddziaływań elektrodynamicznych. Przeprowadzone badania laboratoryjne na rzeczywistych aparatach elektrycznych i urządzeniach rozdzielczych były podstawą do wykonania zaawansowanych analiz sprzężonych, pozwalających wyznaczyć wartości sił elektrodynamicznych w szczegółowych modelach 3D, które dokładnie odzwierciedlały konstrukcję aparatów i urządzeń testowanych w laboratorium.

Uważam, że autor rozprawy podjął się rozwiązania aktualnego i ważnego problemu, stawiając sobie ambitne zadanie zgłębienia i opisanie zjawisk fizycznych występujących w aparatach elektrycznych i urządzeniach rozdzielczych. Precyzyjne wyznaczenie rozkładu sił elektrodynamicznych może usprawnić optymalizację konstrukcji torów prądowych w opracowywanych i już istniejących urządzeniach elektrycznych. Recenzowana rozprawa wpisuje się zatem w **zakres nauk technicznych, w dyscyplinę automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.**

### **III. Struktura pracy, główne rezultaty rozprawy, ocena tezy**

Recenzowana rozprawa doktorska jest bardzo rozbudowana, liczy 265 ponumerowanych stron i została podzielona na 13 głównych rozdziałów. Układ pracy oraz jego podział merytoryczny na rozdziały i podrozdziały uważam za poprawny. Rozprawa składa się z następujących elementów:

- Streszczenie (Abstract),
- Spis treści,
- Rozdział 1: Wstęp,
- Rozdział 2: Przegląd wiedzy w zakresie sił elektrodynamicznych w zestykach aparatów elektrycznych i torach prądowych,
- Rozdział 3: Cel, teza i zakres rozprawy doktorskiej,
- Rozdział 4: Analiza sił elektrodynamicznych w torach prądowych jedno- i wielopaskowych,
- Rozdział 5: Siły elektrodynamiczne występujące w zestykach aparatów elektrycznych,
- Rozdział 6: Oddziaływania sił elektrodynamicznych w torach prądowych aparatów elektrycznych,
- Rozdział 7: Siły elektrodynamiczne w torach wieloprądowych urządzeń rozdzielczych,

- Rozdział 8: Analiza sił elektrodynamicznych w szynoprzewodach kompaktowych niskiego napięcia,
- Rozdział 9: Oddziaływania sił elektrodynamicznych w cewkach,
- Rozdział 10: Występowanie sił elektrodynamicznych w przewodach,
- Rozdział 11: Podsumowanie,
- Rozdział 12: Osiągnięcia naukowe i twórcze autora rozprawy doktorskiej,
- Rozdział 13: Literatura,
- Spis rysunków,
- Spis tabel.

W rozdziale 1 znajduje się wstęp do analizowanej tematyki, gdzie zawarto motywację autora rozprawy do zajęcia się tą problematyką.

W rozdziale 2 przedstawiono przegląd wiedzy z tematyki rozprawy. Pokazano tendencje rozwojowe aparatów elektrycznych i torów prądowych a także pewne ograniczenia w obecnie stosowanych metodach obliczeń różnych wielkości fizycznych, wyznaczanych i wykorzystywanych na etapie projektowania. Analizując spis literatury należy zauważyć, że bibliografia jest bardzo rozbudowana i zawiera 390 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 dogłębnie. W tym miejscu należy podkreślić, iż autor rozprawy opublikował wyniki swoich prac badawczych aż w 22 publikacjach (w tym 14 w czasopismach indeksowanych w Journal Citation Reports) oraz jest współautorem 5 udzielonych patentów.**

W rozdziale 3 postawiono następującą tezę pracy (cytuję):

*„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”.*

**Uważam, że teza jest postawiona poprawnie i jest zrozumiała. Uważam również, że na etapie formułowania tezy można było ją lekko zredagować i skrócić.**

Głównym problemem badawczym pracy i zarazem jej celem, była analiza i badania oddziaływań elektrodynamicznych w torach prądowych i układach zestykowych aparatów elektrycznych w chwili przepływu prądu zwarcowego. Drugim celem pracy było przygotowanie nowatorskich konstrukcyjnych modeli 3D (digital twin) wybranych urządzeń elektrycznych, ze szczególnym uwzględnieniem torów prądowych i układów zestykowych, będących podstawą do wykonania zaawansowanych analiz sprzężonych.

W rozdziale 4 opisano przeprowadzone analizy rozkładu sił elektrodynamicznych w torach prądowych jedno- i wielopaskowych. Autor rozprawy poprawnie zauważył, że obecnie stosowane metody wyznaczania tych parametrów są obciążone stosunkowo

dużymi błędami a o wiele dokładniejsze obliczenia można wykonać z wykorzystaniem numerycznych analiz sprzężonych, które pozwalają na dokładne określenie wartości oddziałujących sił elektrodynamicznych w torach prądowych jedno- lub wielopaskowych. Po uprzednim zaimportowaniu modelu 3D, którym może być model konstrukcyjny danego toru prądowego z projektu, konstruktor może precyzyjnie wyznaczyć wartość siły elektrodynamicznej w danym układzie (ma to szczególne znaczenie dla złożonych rozwiązań i kształtów torów prądowych). Wykorzystując oprogramowanie Ansys po uprzednim przygotowaniu modelu 3D wykonane zostały symulacje obliczeniowe dla toru prądowego jednopaskowego o trzech biegunach. Zaprezentowano otrzymane odkształcenia i przemieszczenia, wartości naprężeń oraz przebiegi sił elektrodynamicznych w wykonanej analizie sprzężonej (dla poszczególnych kroków czasowych). Badania zostały powtórzone dla wielopaskowych torów prądowych w układzie trójbiegunowym.

W rozdziale 5 zawarto wyniki badań symulacyjnych rozkładu sił elektrodynamicznych występujących w zestykach wybranych aparatów elektrycznych. Przeanalizowano zjawisko odrzutu elektrodynamicznego występującego w zestykach aparatów łączeniowych a także wpływ odskoków elektrodynamicznych na proces szepiania się styków. Celem naukowym przedstawionych w tym rozdziale badań, było przedstawienie nowoczesnej metodologii i analizy zjawisk fizycznych podczas przepływu prądu (znamionowego i zakłóceniewego) przez zestyki aparatów elektrycznych.

W rozdziale 6 autor rozprawy poddał analizie słusność wykorzystania analiz sprzężonych do dokładnego wyznaczenia wartości sił elektrodynamicznych w torach prądowych aparatów elektrycznych, w odniesieniu do obliczeń analitycznych wykorzystujących uproszczenia. Zaproponował nową metodę wyznaczania sił elektrodynamicznych występujących w zestykach wyłączników i rozłączników niskiego napięcia oraz aparatach średniego napięcia. Zostały wykonane również badania sił elektrodynamicznych w wybranym wyłączniku wysokiego napięcia. Badania symulacyjne poprzedzono pomiarami przebiegu prądu i napięcia podczas wykonywania prób zwarciovych, na wybranych urządzeniach elektrycznych, przeprowadzonymi w Laboratorium Wielkoprądowym na Politechnice Warszawskiej. Dokonano również analizy odkształceń uzyskanych podczas testów zwarciovych w stosunku do wyników symulacyjnych. Autor rozprawy udowodnił, że wyniki maksymalnych wartości sił elektrodynamicznych w torach prądowych odłącznika są zbieżne z ich maksymalnymi odkształceniami sprężystymi. Tak więc, w obliczeniach numerycznych dotyczących wyznaczenia sił elektrodynamicznych oddziałujących na tory prądowe i konstrukcję wsporcze łączników, zaproponowane przez autora podejście symulacyjne może być pomocną metodą wyznaczenia dokładnych wartości sił elektrodynamicznych. Udowodniono, że zastosowanie precyzyjnych modeli obliczeniowych, pozwala na uzyskanie bardzo dokładnych wyników, praktycznie w każdym punkcie konstrukcji odłącznika średniego napięcia. Możliwe jest wyznaczenie przebiegów i otrzymanie dokładnych wartości sił elektrodynamicznych.

W rozdziale 7 zaprezentowano wyniki badań sił elektrodynamicznych wyznaczonych w torach wieloprądowych urządzeń rozdzielczych. Jak wskazał autor rozprawy, obecnie stosowane do tego celu metody analityczne nie pozwalają na wykonanie

precyzyjnych obliczeń dla złożonych układów torów prądowych urządzeń rozdzielczych. Precyzyjne wyniki obliczeniowe uzyskuje się jedynie poprzez zastosowanie metod z wykorzystaniem modelu konstrukcyjnego w technologii 3D, co pozwala na bardzo dokładne odwzorowanie analizowanej konstrukcji i wykonanie precyzyjnych obliczeń wartości sił elektrodynamicznych praktycznie w każdym rozpatrywanym elemencie konstrukcji rozdzielnic. W rozdziale tym autor rozprawy skupił się na potwierdzeniu założonej tezy, iż zastosowanie analiz numerycznych FEM (Metody Elementów Skończonych) dostarcza dokładnych i precyzyjnych wyników dotyczących wyznaczania sił elektrodynamicznych w rozdzielnicach. W tym celu zbudowano rzeczywisty model rozdzielnic niskiego napięcia, na którym przeprowadzono testy zwarciove. Równolegle zbudowano model 3D rozdzielnic, celem przeprowadzenia zbieżnych badań symulacyjnych. Wyniki odkształceń zarejestrowane podczas badań laboratoryjnych i symulacyjnych wykazały wysoką zbieżność, co do kierunku odkształceń oraz poprawność zaproponowanego sposobu wyznaczania dokładnych wartości sił elektrodynamicznych w rozdzielnicach niskiego napięcia. Błąd bezwzględny zawierał się (dla wyznaczonych punktów pomiarowych) w granicach 3,2% - 8,3%, co należy uznać za zadawalający wynik.

W rozdziale 8 przedstawiono wyniki badań sił elektrodynamicznych w wybranym szynoprzewodzie kompaktowym niskiego napięcia. W celu przeprowadzania analizy sprzężonej oddziaływań elektrodynamicznych opracowano model 3D wybranego szynoprzewodu o prądzie znamionowym 1600 A. Wybrany model fizyczny szynoprzewodu poddano również badaniom laboratoryjnym. Autor rozprawy stwierdził, że uzyskane wyniki obliczeń są zbieżne z wynikami testów zwarciowych przeprowadzonych w laboratorium. Zbieżność uzyskanych wyników testów zwarciowych i symulacyjnych analiz sprzężonych potwierdzono faktem, iż szynoprzewód nie uległ uszkodzeniu w obu badaniach (str. 170 – cytuję: *„Podczas testów zwarciowych szynoprzewód nie uległ uszkodzeniu, co potwierdza zbieżność uzyskanych wyników z testów zwarciowych i symulacyjnych analiz sprzężonych.”*). Trudno zgodzić się z taką interpretacją wyników, dlatego o odpowiednie wyjaśnienie tego aspektu zwracam się do autora rozprawy w rozdziale IV recenzji.

W rozdziale 9 autor rozprawy zaprezentował wyniki badań symulacyjnych sił elektrodynamicznych występujących w cewkach. Zakres badań obejmował:

- wyznaczenie sił oddziałujących w pojedynczym zwoju cewki,
- wyznaczenie sił oddziałujących pomiędzy poszczególnymi zwojami cewki,
- wyznaczenie sił oddziałujących w cewkach wielowarstwowych,
- wyznaczenie sił oddziałujących pomiędzy dwoma cewkami.

Uzyskane wyniki badań doprowadziły autora rozprawy do uzyskania patentu na wynalazek „Wyzwalacz elektrodynamiczny”.

W rozdziale 10 zaprezentowano wyniki badań sił elektrodynamicznych w przewodach. Autor rozprawy zaprezentował możliwości stosowania analiz symulacyjnych do wyznaczenia oddziaływania sił elektrodynamicznych pomiędzy poszczególnymi fazami kabla energetycznego. Dodatkowo wyznaczył siły oddziałujące

pomiędzy przewodem z prądem a elementem ferromagnetycznym. Założenia teoretyczne, dotyczące oddziaływań elektrodynamicznych pomiędzy przewodem, a elementami ferromagnetycznymi, zostały potwierdzone za pomocą wykonanych analiz symulacyjnych.

Celem naukowym prac badawczych przedstawionych w ocenianej rozprawie była analiza i badania oddziaływań elektrodynamicznych w torach prądowych i układach zestykowych aparatów elektrycznych w chwili przepływu prądu zwarciovego, a także przygotowanie nowatorskich konstrukcyjnych modeli 3D (digital twin) wybranych urządzeń elektrycznych, ze szczególnym uwzględnieniem torów prądowych i układów zestykowych, będących podstawą do wykonania zaawansowanych analiz sprzężonych. Na podstawie analizy rozprawy doktorskiej stwierdzam, że cel naukowy został osiągnięty. Autor rozprawy udowodnił, iż stosując analizy sprzężone (oparte na metodzie elementów skończonych) możliwe jest wyznaczenie wartości sił elektrodynamicznych w poszczególnych częściach analizowanego obwodu/aparatu/urządzenia. **Na tej podstawie stwierdzam, iż udowodniono postawioną tezę pracy.**

#### IV. Uwagi szczegółowe i dyskusyjne

Poniżej zestawiam szczegółowe uwagi i pytania, które nasuwają się podczas lektury ocenianej rozprawy:

1. Na stronie 11 autor rozprawy zamieścił zdanie: „*W tym przypadku siły elektrodynamiczne mają pozytywny wpływ na szybkość łuku elektrycznego, czas łukowy, energię łuku.*”. Proszę o wyjaśnienie pojęcia „*szybkość łuku elektrycznego*”.
2. W celu wykazania poprawności postawionej tezy, określono i przeprowadzono odpowiednie badania i analizy o charakterze teoretycznym oraz praktycznym. Czym kierował się autor rozprawy wybierając obiekty do badań laboratoryjnych i symulacyjnych?
3. Proszę o informacje czy autor rozprawy wykonując badania w programie ANSYS używał opcji zagęszczania siatki w wybranych obszarach analizowanych elementów? Jeżeli tak, to proszę o informację czym się kierował wybierając jej zagęszczenie w danym obszarze?
4. Autor rozprawy zaprezentował wyniki badań symulacyjnych dla wybranych zakłóceń (np. zwarć 3-fazowych). Wyniki badań będą różniły się od rodzaju zakłócenia (np. inne rozkłady uzyska się dla zwarcia 2-fazowego a inne dla 3-fazowego). Proszę o informację jakie analizy (obliczenia dla jakich zakłóceń) należy wykonać na etapie projektowania danych aparatów elektrycznych, czy urządzeń rozdzielczych.
5. Proszę o analizę jak na etapie projektowania aparatu/urządzenia (przy braku jego fizycznego modelu) należy zweryfikować poprawność wykonanych badań symulacyjnych?
6. W rozdziale 8 autor rozprawy stwierdził, że uzyskane wyniki obliczeń są zbieżne z wynikami testów zwarciovych przeprowadzonych w laboratorium. Zbieżność uzyskanych wyników testów zwarciovych i symulacyjnych analiz sprzężonych potwierdzono faktem, iż szynoprzewód nie uległ uszkodzeniu w obu badaniach (str. 170 – cytuję: „*Podczas testów zwarciovych szynoprzewód nie uległ uszkodzeniu, co*

potwierdza zbieżność uzyskanych wyników z testów zwarciovych i symulacyjnych analiz sprzężonych.”). Trudno zgodzić się z taką interpretacją wyników, dlatego proszę o wyjaśnienie tego aspektu.

Bardzo proszę, aby autor rozprawy odniósł się do powyższych uwag i pytań dyskusyjnych.

## V. Uwagi dotyczące redakcji pracy

Rozprawa jest napisana poprawnym językiem technicznym. Autor używa właściwej terminologii i zrozumiałych zwrotów technicznych. **W pracy występują niestety liczne błędy interpunkcyjne, stylistyczne i redakcyjne. Edycję rozprawy oceniam jako słabą stroną ocenianej pracy.**

Z obowiązku recenzenckiego zestawiam poniżej wybrane błędy językowe i uwagi redakcyjne:

1. autor rozprawy 29 razy użył błędnie słowa „wskutek” pisząc je rozłącznie („w skutek”) i tylko 5 razy zapisał to słowo w rozprawie poprawnie,
2. str. 11: jest „... nie sposób pominąć przypadek toru prądowego...”, powinno być: „... nie sposób pominąć przypadku toru prądowego...”,
3. str. 11: jest „... a niżeli...”, powinno być: „... aniżeli...”,
4. str. 18: jest „2.2.2. Sił elektrodynamiczne generowane...”, powinno być: „2.2.2. Siły elektrodynamiczne generowane...”,
5. str. 20: jest „ $F_{NC}$  – siłą ciągu cieplnego...”, powinno być: „ $F_{NC}$  – siła ciągu cieplnego...”,
6. str. 23: jest „Przykład prostych torów prądowych  $S_1$  i  $S_2$  w układzie nierównoległych...”, powinno być: „Przykład prostych torów prądowych  $S_1$  i  $S_2$  w układzie nierównoległym...”,
7. str. 25: występują dwa błędy w jednym zdaniu - jest „Typowym przykładem zastosowanie metody superpozycji jest wyznaczenie oddziaływań cząstkowych poszczególnych odcinków torów prądowych styku ruchomego w dla łącznika mechanizmowego.”, powinno być „Typowym przykładem zastosowania metody superpozycji jest wyznaczenie oddziaływań cząstkowych poszczególnych odcinków torów prądowych styku ruchomego dla łącznika mechanizmowego.”,
8. str. 30: jest „... prądu łuku elektrycznego rzędu do kilkuset amper...”, powinno być „... prądu łuku elektrycznego rzędu do kilkuset amperów...”,
9. str. 31: jest „... nie sposób pominąć publikacje [120] oraz [121,122].”, powinno być „... nie sposób pominąć publikacji [120] oraz [121,122].”,
10. str. 31: jest „Inne ciekawe opracowania, swojej książce przedstawił...”, powinno być „Inne ciekawe opracowania, w swojej książce, przedstawił...”,
11. str. 32: jest „Wartość siły elektrodynamicznej wciągającej łuk elektryczny do wielopłytkowej komory gaszeniowej w odległości, a od krawędzi płytek...”, powinno być „Wartość siły elektrodynamicznej wciągającej łuk elektryczny do wielopłytkowej komory gaszeniowej w odległości  $a$  od krawędzi płytek...”,

12. str. 35: jest „... z klinowymi wycięciami oraz baz wycięć...”, powinno być „... z klinowymi wycięciami oraz bez wycięć...”,
13. str. 36: jest „Można to wykonać stosując poniższe równania:”, powinno być: „Można to wykonać stosując poniższe równania:”,
14. str. 40: jest „przeprowadzono badania eksperymentalnych na rzeczywistych aparatach...”, powinno być „przeprowadzono badania eksperymentalne na rzeczywistych aparatach...”,
15. str. 43: jest „Siłą w tym przypadku rozłożona jest równomiernie...”, powinno być „Siła w tym przypadku rozłożona jest równomiernie...”,
16. str. 44 – błędna numeracja tabeli (1.1 zamiast 4.1),
17. str. 60 – na końcu podtytułu rozdziału 5.1. wstawiono niepotrzebnie przecinek,
18. str. 60: jest „Zjawisko odrzutu elektrodynamicznego występującego z zestykach aparatów elektrycznych związane jest...”, powinno być „Zjawisko odrzutu elektrodynamicznego występującego w zestykach aparatów elektrycznych związane jest...”,
19. str. 63: jest „Przyjmuje się, że odrzut elektrodynamiczny styków rozpoczyna się w chwili, gdy siłą elektrodynamiczna jest...”, powinno być „Przyjmuje się, że odrzut elektrodynamiczny styków rozpoczyna się w chwili, gdy siła elektrodynamiczna jest...”,
20. str. 72: jest „Po wykonaniu symulacji obliczeniowej analizie poddano rozkład gęstości prądu w układzie zestykowy.”, powinno być „Po wykonaniu symulacji obliczeniowej analizie poddano rozkład gęstości prądu w układzie zestykowym.”,
21. str. 74: jest „Rozkład naprężeń w analizowanym zestyku zaprezentowano poniżej...”, powinno być „Rozkład naprężeń w analizowanym zestyku zaprezentowano poniżej...”,
22. str. 79: jest „Precyzyjne kalkulacje sił elektrodynamicznych usprawnia optymalizację konstrukcji torów prądowych...”, powinno być „Precyzyjne kalkulacje sił elektrodynamicznych usprawniają optymalizację konstrukcji torów prądowych...”,
23. str. 86/87 – zdanie „Natomiast w początkowej fazie przepływu prądu zwarciego, istniejąca składowa nieokresowa prądu znacznie większa wartości sił elektrodynamicznych do wartości ok 16 N w pierwszym biegunie wyłącznika, oraz do przeszło 14 N w biegunie trzecim.” nie ma sensu i należy je całkowicie przeredagować,
24. str. 87: jest „... prostopadle do osi cewek z zwrotem od środka na zewnątrz.”, powinno być „... prostopadle do osi cewek ze zwrotem od środka na zewnątrz.”,
25. str. 88: „Zastosowanie płytek ferromagnetycznych w kształcie litery "V" (Rysunek 1)” – nie ma rysunku 1,
26. str. 88: w podpisie do rysunku 6.8 jest odniesienie do rysunków (a) oraz (b) – na rysunku 6.8 nie ma takich oznaczeń,
27. str. 89: jest „... (Rysunek 2).” – nie ma rysunku 2,
28. str. 91: jest „... kształtu oraz położenia względem siebie.”, powinno być „... kształtu oraz położenia względem siebie.”,
29. str. 101: jest „Są to urządzenia zapewniające widoczną i bezpieczną przerwę izolacyjną w obwodzie w stanie otwarcia.”, powinno być „Są to urządzenia zapewniające widoczną i bezpieczną przerwę izolacyjną w obwodzie w stanie otwarcia.”,



30. str. 102: jest „Przykład tego typu rozwiązania konstrukcyjnego jest przedstawiona poniżej ...”, powinno być „Przykład tego typu rozwiązania konstrukcyjnego jest przedstawiony poniżej...”
31. str. 104: jest „...pracę odłączników zarówno w pozycji pionowej i poziomej...”, powinno być „... pracę odłączników zarówno w pozycji pionowej, jak i poziomej...”
32. str. 104: zdanie „Otrzymany w pełni funkcjonalny odłącznik wyprodukowany przez firmę ABB typu ONIII niezbędny do zebrania wymiarów i szczegółów konstrukcyjnych do projektowanego szczegółowego modelu 3D (Rys. 6.26).” - to zdanie nie ma sensu i należy je przeredagować,
33. str. 109: jest „... siły elektrodynamiczne były inne dla każdego z bieguna.”, powinno być „... siły elektrodynamiczne były inne dla każdego z biegunów”
34. str. 111: jest „Wartości wyliczone dla fazy L1 zobrazowano na poniższym rysunki...”, powinno być „Wartości wyliczone dla fazy L1 zobrazowano na poniższym rysunku...”
35. str. 112: jest „Wykonane obliczenia dla prądu zwarciovego 1-sek równego 20 kA obrazuje...”, powinno być „Wykonane obliczenia dla prądu zwarciovego 1-sek równego 20 kA obrazują...”
36. str. 112: „Dodatkowo w celu zobrazowania przeliczono wartości sił na obciążenia jakim poddawane są zaciski...” – zobrazowania czego?
37. str. 113: jest „... które powodowały by jego uszkodzenie.”, powinno być „... które powodowałyby jego uszkodzenie.”
38. str. 115: jest „Wybrane punkty toru prądowego odłącznika dla których wyznaczono maksymalne odkształcenia sprężysta...”, powinno być „Wybrane punkty toru prądowego odłącznika, dla których wyznaczono maksymalne odkształcenia sprężyste...”

**Na tym etapie zakończę wskazywanie błędów edycyjnych w ocenianej pracy. W dalszej części rozprawy znajduje się ich jeszcze kilkadziesiąt.**

Przedstawione uwagi nie obniżają wartości merytorycznej rozprawy i nie umniejszają osiągnięć przedstawionych w ocenianej rozprawie doktorskiej. Ich wskazanie niech będzie zachętą dla autora rozprawy do większej uwagi podczas redagowania wszelkiego rodzaju tekstów.

## **VI. Wniosek końcowy**

Przedstawiona rozprawa doktorska stanowi samodzielne rozwiązanie interesującego, oryginalnego i ważnego dla praktyki problemu naukowego w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne. Uważam, że rozprawa ta wnosi przydatny wkład do rozwoju elektroenergetyki. Przedstawione przez autora rozprawy rezultaty badań oceniam jako poprawne. Doktorant wykazał się przy tym posiadaną i nabytą wiedzą z zakresu tematyki rozprawy doktorskiej oraz umiejętnością samodzielnego prowadzenia badań naukowych.

Badania zostały przeprowadzone ze sprawnym zastosowaniem układów pomiarowych oraz nowoczesnych narzędzi programowych, stosowanych powszechnie w badaniach symulacyjnych. Autor rozprawy przeanalizował możliwości zastosowania

złożonych, zaawansowanych analiz sprzężonych do wyznaczania precyzyjnych wartości sił elektrodynamicznych. Do tego celu wykorzystano opracowane modele 3D w postaci cyfrowych bliźniaków (digital twin) wybranych aparatów elektrycznych i urządzeń rozdzielczych.

Jako główne, oryginalne osiągnięcia naukowe autora rozprawy, można między innymi zaliczyć:

- zaproponowanie oryginalnego, nowego sposobu obliczania sił elektrodynamicznych występujących w torach prądowych jedno- i wielopaskowych, w zestyku jednopunktowym oraz w zestyku tulipanowym,
- opracowanie oryginalnego sposobu modelowania zjawisk fizycznych dla zestyku i toru prądowego modułowego wyłącznika nadprądowego,
- zaproponowanie nowego sposobu modelowania zjawisk fizycznych występujących w płytkowych komorach gaszeniowych modułowych wyłączników i rozłączników niskiego napięcia, w odłączniku średniego napięcia, a także w biegunie wyłącznika wysokiego napięcia, w szynoprzewodzie kompaktowym niskiego napięcia, w przewodach elektrycznych oraz w cewkach jedno-, wielozwojowych i wielowarstwowych,
- opracowanie precyzyjnych cyfrowych bliźniaków (digital twin) wybranych urządzeń rozdzielczych i aparatów elektrycznych.

**Na tej podstawie stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Michała Szulborskiego pt. „Analiza sił elektrodynamicznych w torach prądowych i zestykach aparatów elektrycznych w oparciu o symulacyjne analizy sprzężone” spełnia z wyraźnym nadmiarem 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). Wnioskuje o dopuszczenie mgr. inż. Michała Szulborskiego do publicznej obrony.**

