

dr hab. inż. Marcin Ziółkowski, prof. ZUT  
Katedra Elektrotechniki Teoretycznej i Informatyki Stosowanej  
Wydział Elektryczny  
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

Szczecin, 1 września 2023 r.

WPLYNĘŁO

2023 -09- 0 6

dn.....

## RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

wykonana na podstawie uchwały Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej z dnia 27 czerwca 2023 r.

**Tytuł rozprawy:**

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

**Autor rozprawy:**

**mgr inż. Sebastian Łapczyński**

**Promotor:**

**dr hab. inż. Łukasz Kolimas, profesor uczelni**

### **1. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy (cel i teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora?**

Współcześnie, układy elektryczne bądź elektromagnetyczne są projektowane z wykorzystaniem zaawansowanego oprogramowania CAD. Oprogramowanie to z reguły bazuje na znanej metodzie elementów skończonych (MES) i/lub metodzie elementów brzegowych (MEB). Wraz ze wzrastającą mocą obliczeniową komputerów aktualnie możliwe jest analizowanie bardzo skomplikowanych kształtów w połączeniu z wieloraką analizą towarzyszących czy sprzężonych ze sobą zjawisk fizycznych.

Autor rozprawy, zgodnie z jej tytułem, za cel przyjął analizę zjawisk fizycznych w układach stykowych oraz torach wieloprądowych podczas przepływu prądu znamionowego i zwarciovego. W multifizycznych modelach numerycznych brał m.in. pod uwagę rozkład pola temperaturowego skutkującego nagrzewaniem elementów aktywnych oraz pasywnych, rozkład pola elektrycznego, ładunku elektrycznego, gęstości prądu elektrycznego i potencjału elektrycznego. Ponadto, analizowano również zjawiska mechaniczne podczas np. symulacji dynamiki ruchu zestyku tulipanowego. Wszystkie wyniki badań symulacyjnych w postaci pięciu różnych rodzajów układów elektrycznych (m.in. wkładka topikowa, wyłącznik NN, rozdzielnica niskiego napięcia, komora gaszeniowa rozdzielnicy NN, układ stykowy ŚN) poddano ewaluacji poprzez ich porównanie z wynikami badań eksperymentalnych sporządzonych przez Autora w jednostkach badawczych.

Zjawiska fizyczne przeanalizowano na podstawie pięciu szczegółowo sporządzonych modeli symulacyjnych 3D. Do badań symulacyjnych wykorzystano metodę elementów skończonych. Następnie, wyniki te poddano ewaluacji poprzez ich porównanie z wynikami badań eksperymentalnych.

Autor, na stronie 84 rozprawy, sformułował następującą tezę:

„W procesie analizy zjawisk fizycznych występujących w układach stykowych oraz torach prądowych możliwe jest wykorzystanie metody elementów skończonych w celu otrzymania wyników będących porównywalnymi, co do jakości oraz wartości z tymi, które zostały uzyskane na drodze

rzeczywistego eksperymentu. Otrzymane w ten sposób modele zjawisk fizycznych pozwalają na optymalizację procesu projektowania konstrukcji układów stykowych oraz torów prądowych.”

## **2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł, w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle?**

W drugim rozdziale Autor przedstawił przegląd literatury dotyczącej układów stykowych i torów prądowych. Przegląd ten przyczynił się do wykazania się przez Autora ogólną wiedzą w dyscyplinie naukowej, co – obok rozwiązania problemu naukowego – jest ustawowym wymogiem przypisanym rozprawom doktorskim. Rozprawa doktorska, przygotowywana pod opieką promotora, powinna stanowić oryginalne rozwiązanie problemu naukowego lub artystycznego oraz wykazywać ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w danej dyscyplinie naukowej, a także umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Do przeglądu literaturowego nie mam większych zastrzeżeń merytorycznych. Doktorant niewątpliwie wykazał wysoki poziom wiedzy teoretycznej w zakresie tematyki poruszanej w rozprawie. Należy podkreślić, że Autor przeanalizował źródła literaturowe także w dalszych rozdziałach rozprawy, przy okazji analizy numerycznej i eksperymentalnej układów elektrycznych. Zamieszczona na końcu rozprawy bibliografia zawiera łącznie 120 pozycji. Są to głównie artykuły naukowe opublikowane w okresie ostatnich dwudziestu lat.

## **3. Czy autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?**

W dziesiątym rozdziale *Podsumowanie pracy i wnioski końcowe* Autor deklaruje, że przedstawione w pracy doktorskiej wyniki badań eksperymentalnych i teoretycznych pokazują poprawność tezy rozprawy. Materiał badawczy odnoszący się do tezy rozprawy jest faktycznie bardzo obszerny. Doktorant, przygotowując niniejszą rozprawę, przedstawił budowę oraz wybrane konstrukcje aparatów elektrycznych. Omówił szczegółowo zjawiska fizyczne (elektryczne, termiczne oraz mechaniczne) występujące podczas przepływu prądów znamionowych oraz zwarciovych w układach stykowych oraz torach prądowych. Następnie, Autor opracował modele numeryczne (warunki brzegowe, warunki symulacyjne oraz geometrię) wybranych aparatów elektrycznych, a następnie dokonał ich symulacji w celu otrzymania wyników jak najbliższych rzeczywistym warunkom eksperymentalnym. Finalnie, wykonano porównawcze badania eksperymentalne rzeczywistych aparatów, włączając w to badania zwarciove.

Doktorant rozwiązał postawione zagadnienia, użył właściwej do tego metody, a przyjęte założenia są uzasadnione.

## **4. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy i poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?**

Wkład recenzowanej rozprawy do dziedziny układów i systemów elektroenergetycznych polega na:

- zbudowaniu szczegółowych modeli numerycznych aparatów elektrycznych z reprezentacją graficzną w skali odpowiadającej obiektom rzeczywistym;
- przygotowaniu symulacji numerycznych;
- nowatorskim podejściu do symulowania zjawisk elektrofizycznych ładunku elektrycznego jako cząstki płynu oraz zjawisk konwekcji cieplnej poprzez wykorzystanie modułu mechaniki płynów;
- zaplanowaniu i wykonaniu oryginalnych badań eksperymentalnych z wykorzystaniem własnoręcznie przygotowanych stanowisk badawczych;
- otrzymaniu wyników symulacyjnych zbieżnych z wynikami eksperymentalnymi;

- propozycji modyfikacji konstrukcji dla wybranych aparatów lub ich elementów oraz doświadczalne określenie sensu tych modyfikacji w celu poprawy parametrów elektrycznych oraz mechanicznych aparatów;
- przedstawieniu sposobu prototypowania oraz projektowania urządzeń, która w przyszłości może znacząco ograniczyć ilość generowanych odpadów, przyspieszyć proces projektowania oraz znacząco ograniczyć koszty produkcyjne i czas wdrożenia danego aparatu elektrycznego.

Wyniki tych badań i prac zostały w większości zaprezentowane społeczności naukowo-technicznej już wcześniej – w publikacjach, których współautorem był Autor rozprawy (m.in. w Energies 3x 2020, 6x 2021, 2022, 2x 2023, IEEE Access 2022, 2x International Journal of Electrical Engineering & Education, Przegląd Elektrotechniczny, Archives of Electrical Engineering, Inżynieria Elektryczna), a więc w jakimś stopniu zostały one już zatem ocenione i zweryfikowane.

## 5. Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników (zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy)?

Poniżej przedstawiam wypunktowane uwagi krytyczne oraz redakcyjne.

### Uwagi krytyczne

1. **Czy modele 3D analizowane w rozprawie (geometria) były robione całkowicie od podstaw? Czy brane z biblioteki kształtów?**
2. Na stronie nr 24 rozprawy Doktorant pisze: „Przy tych poziomach prądu i napięcia można stosować materiały stykowe ze złota i innych stopów metali szlachetnych, a dzięki sprawdzonej konstrukcji mechanicznej, urządzenia są w stanie pracować przez miliony cykli łączeniowych”. **Z punktu widzenia projektanta istotne jest sprawdzenie, czy dana konstrukcja mechaniczna wytrzyma przewidywaną liczbę cykli łączeniowych. W szczególności, ważne jest modelowanie pokazujące stopień degradacji, czy deformacji zestyku oraz złącza. Dlaczego modele rozpatrywane w rozprawie tego aspektu nie przedstawiają?**
3. Na stronie nr 24 rozprawy Doktorant pisze: „Ogólnie rzecz biorąc, przy niskim poziomie prądu, typowym dla przełączania elektronicznego, nie występuje wyładowanie łukowe, chociaż może powstać mostek ze stopionego metalu”. **Dlaczego w modelach numerycznych nie uwzględniono aspektu topienia się metalu?**
4. Cały podrozdział 2.3.3 (strona nr 36) Doktorant poświęca ważnemu zagadnieniu, jakim jest erozja styków. **Dlaczego w takim razie w rozprawie nie przedstawiono przykładów dotyczących modelowania erozji, procesów starzeniowych, mechanicznych, czy elektrochemicznych, a ograniczono się jedynie do porównania wyników eksperymentalnych i symulacji temperatur?**
5. Doktorant na stronie nr 59 pisze: „Rezystancja zestykowa  $R_z$  jest podstawowym parametrem zestyku decydującym o jego obciążalności prądowej ciągłej i zwarciowej, a także i całego toru prądowego.” **Dlaczego w rozprawie nie ma badań eksperymentalnych oraz modeli numerycznych pokazujących jak zmienia się wartość rezystancji zestykowej w funkcji siły docisku, czy zmian temperatury?**

6. Do określenia jakości siatki Doktorant w rozprawie wielokrotnie (strony: 113, 114, 134, 139) posługuje się terminem „*Energy error*”. Jaka jest definicja tego parametru i jak on wpływa na błąd numeryczny?
7. Dla wszystkich modeli numerycznych Doktorant wykonuje symulacje elektromagnetyczne (oprócz analiz termicznych). Jakie równanie różniczkowe cząstkowe jest rozwiązywane w symulacjach elektromagnetycznych w zastosowaniu do zaprezentowanych modeli?
8. Jakie warunki brzegowe / początkowe są zastosowane w symulacjach elektromagnetycznych w zastosowaniu do modeli użytych przez doktoranta?
9. W wielu miejscach rozprawy Doktorant często stwierdza istotność analiz sił elektrodynamicznych, np.: strona 64 „Należy wspomnieć, że załączenie dużych, szybko narastających prądów zwarciovych prowadzi do gwałtownego i znaczącego wzrostu sił elektrodynamicznych w zestykach, w czasie szybkiego narastania wartości prądu, jak i dodatkowego działania, mającego wpływ na siły elektrodynamiczne – efektu naskórkowości. W następstwie tego zachodzi osłabienie docisku zestyków”, strona 74 „Podczas badania sił elektrodynamicznych należy brać pod uwagę możliwość wystąpienia zwarć”, „dlatego szczególnie ważne jest uwzględnienie wpływu zmian wartości prądów zwarciovych w stanie przejściowym podczas analizy numerycznej sił elektrodynamicznych.”, strona 75 „Analizę dotyczącą działania sił elektrodynamicznych w torach prądowych aparatów elektrycznych przeprowadza się zwykle z uwzględnieniem przepływu prądów zwarciovych. Wartości sił elektrodynamicznych są wtedy największe. Prądy zwarciove charakteryzują się zmiennością w funkcji czasu, dlatego ważne jest sprawdzenie, jak zmiana wartości tych prądów wpływa na przebiegi czasowe sił elektrodynamicznych.”, strona 144 „Biorąc pod uwagę wpływ temperatury i sił elektrodynamicznych, warunki te mogą powodować pożar w rozdzielnicy, uszkodzenie izolatorów, a nawet zniszczenie szyn zbiorczych”, strona 191/192 „Gdyby którakolwiek z styczek znajdowała się w innej odległości lub pod innym kątem niż pozostałe od roboczej części styku, spowodowałoby to pojawienie się sił elektrodynamicznych oddziaływujących na styczki w różnym czasie. Przekładałoby się to na wypadkową siłę różną od zera działającą poprzecznie do kierunku ruchu części roboczej. Pojawienie się tego typu siły może spowodować odchylenie ruchomej części styku o kilka stopni. Styczki mniejsze mogą zderzać się podczas zamykania z innymi elementami pod niewłaściwym kątem. Dodatkowo wartość pojawiających się sił elektrodynamicznych może różnić się w czasie dla poszczególnych styczek. Oddziaływania tego typu mogą doprowadzić do uszkodzenia, a nawet do zniszczenia układu stykowego”. **Dlaczego w przedstawionych modelach nie pokazano rozkładów wartości i kierunków działania sił elektromagnetycznych?**
10. Jak definiuje się współczynnik „*k*” we wzorze nr 70 (strona nr 77)?
11. Na stronie nr 86 Doktorant pisze: „Zaprojektowany bezpiecznik musi działać prawidłowo przy znamionowym i chwilowym przetężeniu (na przykład przy rozruchu silnika) i przerywać prąd zwarciovy”. Podobnie, na stronie 149: „Dobrym przykładem jest symulacja dotycząca rozkładu ciśnienia gazu na powierzchni komory łukowej przeprowadzona przez Lijuna Wanga i jego zespół. W omawianym przypadku symulacja posłużyła do otrzymania dodatkowych informacji podczas badania odkształceń obudowy komory łukowej spowodowanej przez

nagrane gazy i ich oddziaływanie podczas przerywania prądów o różnej wartości [2]”.  
**Dlaczego doktorant nie wykonał tego typu modeli numerycznych i układów pomiarowych?**

12. Strona nr 86: „W publikacji [83] autorzy stwierdzają, że wkładka topikowa to jedno z najważniejszych zabezpieczeń występujących w systemach elektroenergetycznych. Analiza termiczna bezpiecznika jest ważnym aspektem dla zoptymalizowania konstrukcji zabezpieczeń dla danego elementu systemu elektroenergetycznego, a także w celu prawidłowego doboru wartości znamionowej zabezpieczenia w celu ochrony tego obwodu. Zaprojektowany bezpiecznik musi działać prawidłowo przy znamionowym i chwilowym przetężeniu (na przykład przy rozruchu silnika) i przerywać prąd zwarciovym.” **Dlaczego doktorant nie wykonał tego typu modeli numerycznych i układów pomiarowych w celu porównania wyników?**
13. **Dlaczego moduł CFD użyto dopiero w modelu numerycznym przemysłowej rozdzielnicy niskiego napięcia (podrozdział 6.5.6)? Dlaczego nie wykorzystano tego modułu w przykładach dotyczących nagrzewania wkładki topikowej czy nagrzewania toru prądowego wyłącznika niskiego napięcia? Czy moduł Ansys Thermal ma jakieś ograniczenia? Jakie są warunki i kryteria, przy spełnieniu których projektant musi obligatoryjnie wykorzystać moduł CFD? Podobnie na stronie 148 napisano, iż: „Wyniki obliczeń solwera Fluent CFD są zgodne z obliczeniami solwera Transient Thermal i zostały przeprowadzone poprawnie.” Jak to stwierdzenie ma się do dodatkowego zastosowania przez Doktoranta modułu CFD? Na jakiej podstawie stwierdzono poprawność obliczeń?**
14. **Na jakiej podstawie Doktorant stwierdza, że (strona nr 113): „zbieżność obliczeń poniżej 1% jest wynikiem zadowalającym”? Podobnie na stronie nr 139: „W analizowanym przypadku można zauważyć, że w ostatnich sześciu iteracjach obliczeniowych uzyskano „Energy Error” na poziomie 0,68203%. Jest to wynik zadowalający.”**
15. Na stronie nr 141 Doktorant pisze: „Po wygenerowaniu wysokiej jakości siatki obliczeniowej do solwera dodano parametry konwekcji (współczynnik konwekcji i temperaturę otoczenia) oraz promieniowania (emisyjność i temperaturę otoczenia) dla miedzianych szyn zbiorczych.” **Skąd wzięto wartość współczynnika konwekcji oraz emisyjności?**
16. Na stronie 144 Doktorant pisze: „W celu szerszego zbadania wpływu efektów cieplnych wewnątrz rozdzielnicy niskiego napięcia podczas pracy w warunkach prądu znamionowego zastosowano inny solwer będący częścią modułu programu ANSYS – Fluent CFD (Computational Fluid Dynamics).” **Jakie wytyczne dla projektanta wynikają z przeprowadzonych w podrozdziale 6.5.6. analiz numerycznych?**
17. Strona 144: „Moduł obliczeniowy CFD pierwotnie służył do symulacji przepływu płynów, stąd uzyskiwanie z niego wyników jest interpretacją zjawisk elektromagnetycznych.” **Czy może Doktorant wyjaśnić to stwierdzenie?**
18. Na stronie 145 napisano: „W analizowanym przypadku zdecydowano się na zastosowanie solwera Fluent CFD 2D”. **Dlaczego użyto trybu 2D? Jaki błąd w związku z tym popełniono (w porównaniu do analizy pełnej CFD 3D)?**

19. Co wynika z rysunków 7.11, 7.12 zamieszczonych na stronach 146 i 147? Czy na ich podstawie można sformułować wytyczne dla projektanta?
20. Na stronie nr 149 Doktorant pisze, że „Uzyskane modele komór gaszeniowych były poddawane symulacjom nagrzewania, rozkładu potencjału elektrycznego, prędkości ładunku elektrycznego i dróg jakimi ładunki przemieszczały się podczas wyłączenia prądu.” **W którym miejscu rozprawy przedstawiono te zjawiska występujące „podczas wyłączenia prądu”?** **W jaki sposób informacja o rozkładzie potencjału elektrycznego, prędkości ładunku elektrycznego i dróg ładunku wpływa na decyzję projektanta?**
21. Na stronie nr 149 Doktorant pisze, że: „Odzwierciedlenie wyników z części symulacyjnej zostało sprawdzone z wynikami doświadczalnymi.” **Co konkretnie zostało sprawdzone poza temperaturą?**
22. **W jaki sposób w modelu MES zawarto informację o zwarciowej zdolności wyłączenia (strona 159: „zwarciowa zdolność wyłączenia:  $I_{cu} = 6 \text{ kA}$ ; wartość RMS;”)?**
23. **Dlaczego nie wykonano obliczeń numerycznych / modeli numerycznych, z którymi można by porównać wykresy pomiarowe z rysunku 7.4 (strona 154). Podobna sytuacja występuje dla Rys. 8.4 na stronie 173.**
24. Na stronie nr 177 w podrozdziale 8.5.3. między innymi napisano: „Analizę pracy styków w postaci symulacji przeprowadzono w programie ANSYS. Podczas symulacji wykorzystano siły i czasy panujące w istniejących układach zestykowych tulipanowych. Zaowocowało to uzyskaniem wartości jak najbardziej zbliżonych do inżynierskich danych eksperymentalnych.” **Dlaczego nie przedstawiono porównania ze wspomnianymi inżynierskimi danymi pomiarowymi?**
25. Doktorant na stronie 197 pisze: „Podsumowując, należy uznać, że zasadniczy cel pracy, jakim było opracowanie modeli numerycznych w celu wykazania, że możliwe jest wykorzystanie metody elementów skończonych w celu otrzymania wyników będących porównywalnymi, co do jakości oraz wartości z tymi, które zostały uzyskane na drodze rzeczywistego eksperymentu, został osiągnięty.” **Jednakże należałoby doprecyzować to stwierdzenie, że chodzi wyłącznie o wyniki eksperymentów i modeli numerycznych dotyczące rozkładu temperatur w procesie nagrzewania.**
26. W rozdziale nr 10 (strona nr 205) zatytułowanym „ Podsumowanie pracy i wnioski końcowe” Doktorant podkreśla między innymi, że jego osiągnięcia to „zdefiniowanie warunków brzegowych” oraz „nowatorskie podejście do symulowania zjawisk elektrofizycznych ładunku elektrycznego jako cząstki płynu oraz zjawisk konwekcji cieplnej – wykorzystanie modułu CFD”. **Proszę o wyjaśnienie, o jakie warunki brzegowe chodzi (czy chodzi o warunki brzegowe dla rozwiązywanych równań różniczkowych cząstkowych?) oraz jakie nowatorskie podejście zastosowano do symulowania zjawisk elektrofizycznych ładunku elektrycznego jako cząstki płynu oraz zjawisk konwekcji cieplnej.**

### Drobne uwagi redakcyjne:

1. W rozprawie na początku brakuje wykazu ważniejszych oznaczeń, taki „spis” wielkości fizycznych, zmiennych uporządkowałby niewątpliwie symbolikę wykorzystywaną we wzorach.
2. Strona nr 3: „Ponad to autor proponuje nowatorskie (...)” – poprawny zapis to: Ponadto autor proponuje nowatorskie (...).
3. Brak cytowania wzorów, np. str 31, 40, itd.
4. Strona nr 16: „Tory wielkopądowe przeznaczone do przewodzenia dużych wartości prądów znamionowych i chwilowych wartości prądów zwarciovych są zwykle budowane, jako zbiór wielu pojedynczych równoległych pasków, przy czym odstęp między nimi są niewielkie.” – niepotrzebny przecinek przed wyrazem „jako”.
5. Strona nr 45, podpis pod wzorem nr (10) „ $P$  – moc rozpraszana na jednostkę długości [W]”. Prawidłową jednostką mocy na jednostkę długości jest [W/m]. Zapewne Doktorantowi chodziło o moc rozpraszaną w jednostce długości.
6. Strona nr 47: „Dla przypadku chłodzenia poprzez swobodny przepływ powietrza korzysta się z zależności (19):” – niepotrzebnie zduplikowano numerację dla wzoru nr 19.
7. Strona nr 47: we wzorze nr 18 przyjęto oznaczenie dla liczby Reynoldsa jako „ $Ra$ ”, tymczasem w treści rozprawy (powyżej, nad wzorem nr 15) występuje oznaczenie „ $Re$ ” (i w zasadzie w literaturze przyjmuje się oznaczenie  $Re$ ).
8. Strona nr 48: zgodnie z oznaczeniami wielkości zapisanymi w komórkach Tabeli 2.3, w jej opisie również Autor powinien użyć zapisu czcionką pochyłą („Tab. 2. 3. Zestawienie wartości oraz dla danego zakresu iloczynu liczb  $Gr$  oraz  $Pr$ ”).
9. Strona nr 52: niespójność oznaczeń: w treści rozprawy powyżej wzoru nr 29 dla oznaczenia ciepła oddanego do otoczenia w jednostce czasu przez zewnętrzną powierzchnię elementu  $dx$  przewodnika użyto symbolu  $d_{q0}$ , natomiast we wzorze nr 32 użyto symbolu  $dq_0$ .
10. Strona nr 55: we wzorze nr 45 do oznaczenia konduktywności użyto symbolu  $\delta$ , natomiast w opisie tego wzoru użyto symbolu  $\gamma$ .
11. Strona nr 64: „W celu wyznaczenia prądów szczepienia (...)” – literówka, popranie powinno być: „W celu wyznaczenia prądów szczepienia (...)”. Szczenia – w sensie złączenia razem jakichś przedmiotów, zaczeplając jeden o drugi.
12. Strona nr 68: w podpisie wzorów nr 64 i 65 występuje wielkość  $h$  – („ $h$  – długość kolumny łukowej”). Tymczasem we wzorach nie ma wielkości  $h$ .
13. Strona nr 69: literówka w zdaniu: „(...) natomiast prędkość naturalnego unoszenie się łuku wynosi (...)”.
14. Nieprawidłowo wyrazu „ilość” do określenia rzeczy policzalnych. W poniższych cytatach, zamiast „ilość”, powinno się użyć wyrazu „liczba”:
  - „wymagana ilość płytek” – wymagana liczba płytek
  - „ilość torów prądowych” – liczba torów prądowych
  - „charakteryzujących się dużą ilością odpływów małej mocy” – charakteryzujących się dużą liczbą odpływów małej mocy
  - „wymaga mniejszej ilości konstrukcji wsporczych”
  - „wokół ilości od 12 do 16 sztuk w komorze gaszeniowej”
  - „zostały wyposażone w większą ilość płytek dejonizacyjnych”
  - „odpowiednio odebranej ilości płytek i mechanizmu napędu”
  - „rodzaj materiału, z którego są wykonane oraz ilość zamontowanych wsporników izolacyjnych” – rodzaj materiału, z którego są wykonane oraz liczba zamontowanych wsporników izolacyjnych
  - Tab 5.4 „ilość kroków” – liczba kroków
  - „Ostateczna ilość elementów siatki” – Ostateczna liczba elementów siatki

- „błąd energii w stosunku do ilości czworoscianów” – błąd energii w stosunku do liczby czworoscianów
- „Ilość płytek w komorze łukowej dla prądu przemiennego opisuje równanie (...)” – Liczba płytek w komorze łukowej dla prądu przemiennego opisuje równanie (...)
- „ostateczna ilość elementów” – ostateczna liczba elementów

15.Strona nr 69: literówka w treści: „natomiast prędkość naturalnego unoszenie się łuku wynosi”.

16.Strona nr 73: powtórzone wzory nr 66 i 67.

17.Strona nr 76: powtórzone zdanie „Wzajemne odpychanie się styków na skutek działania sił elektrodynamicznych zostało przedstawione na Rysunku 2. 29 poniżej.”

18.Strona nr 88: w podpisie wzorów (71-74) dwa razy napisano: „ $J$  – całkowity wektor gęstości prądu elektrycznego;  $J$  – całkowity wektor gęstości prądu elektrycznego”.

19.Strona nr 113: Błąd stylistyczny: „Uzyskana zbieżność obliczeń poniżej 1% jest wynikiem zadowalającym dla tego typu symulacji, często zdarza się, że symulacja nie może osiągnąć zbieżności pomimo wielu iteracji obliczeniowych i gęsto wygenerowanej siatki obliczeniowej składającej się z kilku milionów elementów Tetrahedra”. Zapewne rozbicie na dwa zdania byłoby lepsze: „Uzyskana zbieżność obliczeń poniżej 1% jest wynikiem zadowalającym dla tego typu symulacji. Często zdarza się, że symulacja nie może osiągnąć zbieżności pomimo wielu iteracji obliczeniowych i gęsto wygenerowanej siatki obliczeniowej składającej się z kilku milionów elementów Tetrahedra”.

20.Strona nr 114, w podpisach tabel nr 5.2 oraz 5.3 niepotrzebnie użyto wyrazu „Tabela”.

Wystarczyłoby napisać odpowiednio: „Tab. 5.2. Dane materiałowe użyte w symulacjach” oraz „Tab. 5. 3. Błędy (%) w wykonanych symulacjach.”

21.Strona nr 134: „Rozmiar siatki dla solwera CFD wynosił odpowiednio 335420 węzłów i 331140 elementów” – brakuje kropki na końcu zdania.

22.Strona nr 134: zwrot „z siatki o odpowiedniej gęstości” jest nieprecyzyjny.

23.Strona nr 138: niepotrzebna personifikacja oprogramowania: „Oprogramowanie ANSYS Maxwell 3D zdołało załadować wcześniej przygotowany model w formacie „.sat”. Może lepiej by było: Do oprogramowania ANSYS Maxwell 3D zaimportowano wcześniej przygotowany model w formacie .sat”.

24.Strona nr 207: „otrzymanie wyników symulacyjnych o zadowalającym poziomie zbieżności w porównaniu do wyników eksperymentalnych;” – zwrot „zadowalającym” jest nieprecyzyjny.

## 6. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

Bez wątplenia rozprawa dotyczy zagadnienia o bardzo dużym znaczeniu, zarówno z naukowego, jak i aplikacyjnego punktu widzenia. Praca może być materiałem źródłowym dla badaczy zajmujących się projektowaniem układów energoelektrycznych.

### PODSUMOWANIE

Uważam, że Autor rozprawy wniósł istotny wkład do teorii i praktyki badanego zagadnienia. Wykazał przy tym, że posiada dużą wiedzę ogólną oraz uzdolnienia do pracy naukowo-badawczej. Wreszcie – co szczególnie ważne w naukach technicznych – skonfrontował rozważania teoretyczne z wynikami eksperymentów.

Rozprawa spełnia wymagania i warunki określone w art. 187 ust. 1-2 *Ustawy* i w związku z tym stawiam wniosek o przyjęcie jej przez Radę Naukową Dyscypliny Automatyka, Elektronika,



**Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej jako rozprawy doktorskiej oraz dopuszczenie do publicznej obrony.** Równocześnie oczekuję, że podczas publicznej obrony mgr inż. Sebastian Łapczyński odniesie się do moich uwag krytycznych.



(Marcin Ziółkowski)

