

Gliwice, 01 lipca 2023r.

dr hab. inż. Tomasz Trawiński, prof. PŚ

Politechnika Śląska  
Wydział Elektryczny  
Katedra Mechatroniki  
ul. Akademicka 10A  
44-100 Gliwice

**S E K R E T A R I A T**  
Rady Dyscypliny AEEITK

Wpłynęło dnia .....03.07.2023.....

Zarejestrowano pod nr .....

Podpis .....dm.....

Recenzja Rozprawy Doktorskiej  
mgr'a inż.'a Łukasza Chełchowskiego  
pt.: **Metodologia projektowania modułowego układu napędowego autobusów  
elektrycznych**

1. Podstawa prawna i przedmiot wykonania recenzji

Recenzję wykonano na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie z dnia 27 kwietnia 2023r. oraz pisma Przewodniczącego ww. Rady Dyscypliny dr hab. inż. Ryszarda Sroki, prof. AGH z dn. 27.04.2023r.

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska autorstwa mgr'a inż'a Łukasza Chełchowskiego o tematyce poświęconej metodologii projektowania modułowego układu napędowego autobusów elektrycznych. Rozprawa zatytułowana "Metodologia projektowania modułowego układu napędowego autobusów elektrycznych" o objętości 134 stron, składa się z siedmiu rozdziałów (w tym spis literatury), zawiera streszczenie w języku polskim i angielskim. Dyscyplina naukowa pracy doktorskiej to: automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

2. Ocena układu rozprawy doktorskiej

Autor pracy doktorskiej swoje osiągnięcia nakreślił w 7 rozdziałach, praca składa się z: 134 stron, 59 rysunków, 34 wzorów i 26 tabel. Rozdział pierwszy – „Wprowadzenie” – ma objętość 15 stron i podzielony jest na 5 podrozdziałów. Najbardziej rozbudowaną objętościowo częścią pracy doktorskiej jest rozdział drugi, składający się z czterech rozdziałów wewnętrznych i 19 podrozdziałów. Całkowita objętość tego rozdziału to 55 stron. Rozdział 3 – „Opracowanie techniki integracji elektrycznego układu napędowego oraz oprogramowania” zawiera 10 stron, w tym 2 podrozdziały. Rozdział 4 składa się z 3 rozdziałów wewnętrznych i 4 podrozdziałów,

ma on objętość 28 stron. Rozdział 5 – „Metodologia projektowania modułowego układu napędowego autobusów elektrycznych” ma objętość 20 stron i składa się z 7 rozdziałów wewnętrznych. Rozdział 6 – „Podsumowanie i wnioski” składa się z 4 stron. Rozdział ostatni to spis literatury zawierający 59 pozycji literaturowych, odwołań do stron internetowych oraz dokumentów wewnętrznych i raportów. Liczba cytowanej literatury jest wystarczająca na potrzeby wywodów naukowych oraz potwierdzenia słuszności tezy i celów pracy. Cytowana literatura zawiera się w przedziale czasu publikacji (w zakresie artykułów) od 2015 do 2023 roku, przy czym najwięcej artykułów cytowanych pochodzi z 2022 roku. Autor odnosi się do aktualnych norm i przepisów. Cytowane piśmiennictwo jest aktualne, jego dobór jest prawidłowy, cytowania są poprawne.

W pracy nie wydzielono spisu oznaczeń, rysunków oraz tabel.

W rozdziale pierwszym (Wprowadzenie) nakreślony został rys historyczny rozwoju transportu publicznego z wykorzystaniem autobusów. Zwrócono w nim uwagę na fakt budowy i wykorzystania autobusów elektrycznych na przełomie wieku 19 i 20. Autobusy elektryczne w tym okresie szybko zostały zastąpione przez autobusy spalinowe oraz trolejbusy. Spowodowane to było dużą masą akumulatorów i niewielkim zasięgiem jazdy. Scharakteryzowano, w tym rozdziale, obecny rynek autobusów elektrycznych, hybrydowych oraz wodorowych, zwracając uwagę na duży wzrost zainteresowania aglomeracji miejskich ich kupnem. Jak podaje doktorant, 2021 roku w Europie blisko połowa nowo rejestrowanych autobusów miała napęd elektryczny, hybrydowy lub wodorowy. Były to autobusy bateryjne, hybrydowe i wodorowe. Wskazano również podstawy prawne sprzyjające rozwojowi produkcji autobusów zeroemisyjnych i perspektyw jej dalszego rozwoju. Zaprezentowano podstawowe cechy napędu konwencjonalnego i elektrycznego w autobusach miejskich. Przedstawiono stan wiedzy w zakresie układów napędowych autobusów elektrycznych. W rozdziale tym nakreślono problem badawczy oraz przedstawiono tezę pracy. Na postawiony problem badawczy składają się następujące zagadnienia, takie jak: dopasowanie parametrów technicznych do wymagań rynku, wyeliminowanie ograniczeń funkcjonalnych jakie istniały w dotychczas oferowanym modelu Urbino 8,9 LE electric, łatwą wymianą elementów na innego typu, tak aby w przyszłości możliwe było wprowadzenie nowych rozwiązań bez istotnych zmian konstrukcyjnych pojazdu. Podkreślono znaczenie minimalizacji długości przewodów elektrycznych wysokiego napięcia oraz minimalizacji kosztów produkcji. Autor stwierdza w tym rozdziale, po dokonanej analizie dostępnego piśmiennictwa, że istnieje niewielka liczba publikacji poświęcona aspektom projektowania modułowych układów napędowych autobusów elektrycznych. Zgadzam się całkowicie ze zdaniem doktoranta. **Zagadnienie projektowania ww. układów napędowych jest bardzo nowoczesne, aktualne i ciągle rozwijane, a opracowane metody stanowią w znacznej mierze tajemnicę ośrodków zaangażowanych w jej tworzenie. Opracowane metody stanowią o przewadze konkurencyjnej na rynku autobusów elektrycznych. Przyjęta tematyka przez doktoranta odpowiada na obecne zapotrzebowanie i jest bardzo istotna dla rozwoju przemysłu.** Rozdział pierwszy kończy się sformułowaniem celu i tezy. Cel rozprawy to: opracowanie metodologii projektowania modułowego układu napędowego autobusów elektrycznych na podstawie realizacji projektu autobusu Solaris Urbino 9 LE electric. Teza pracy brzmi: zastosowanie metodologii projektowania modułowego układu napędowego umożliwia w autobusach elektrycznych spełnienie kryteriów maksymalizacji liczby dostępnych wariantów konfiguracji podzespołów, zbalansowania rozkładu masy w pojeździe, a także minimalizacji długości przewodów elektrycznych wysokiego napięcia oraz kosztów produkcji.

W rozdziale 2, zatytułowanym „Rozważania analityczne i prace badawcze”, autor przedstawił zagadnienia dotyczące kompletowania elektrycznego układu napędowego kierując się metodami optymalizacji wielokryterialnej. Przedstawił metody projektowe, badawcze doboru i techniki obliczania parametrów technicznych. W rozdziale tym przedstawiono koncepcję modułowego układu napędowego, określono wymagania co do parametrów trakcyjnych silnika i falownika, określono wymagania trakcyjne autobusu, zweryfikowano parametry trakcyjne zestawu silnik-falownik. Omówione zostały zagadnienia doboru układów pomocniczych, określono zapotrzebowanie na moc instalacji elektrycznej o napięciu 24V DC. Wyznaczono parametry przetwornic prądu stałego DC/DC 24 V oraz przetwornic DC/AC 3x400V. Skrupulatnie dokonano analizy konstrukcji rozdzielnic zasilająco-sterujących. Dokonano analizy dystrybucji energii elektrycznej, dokonano analizy poprawności procedury załączania zasilania i jego odłączania w obwodach wysokonapięciowych. Omówiono zagadnienia związane z zabezpieczeniami przeciwzwarciovymi, kontrolą stanu izolacji obwodu wysokiego napięcia, układów pomiarowych napięcia i prądu. Przedstawiono koncepcję modułowej rozdzielniczy zasilająco-sterującej.

W rozdziale 3 zatytułowanym „Opracowanie techniki integracji elektrycznego układu napędowego oraz oprogramowania” przedstawiono sposób integracji elementów dobranych i zaprojektowanych dla autobusu Solaris Urbino 9 LE electric. Zaprezentowano schemat ideowy wszystkich elementów wchodzących w skład układu napędowego, zaprezentowano wizualizacje 3D wszystkich elementów składowych oraz sposobu ich połączeń. Autor w tym rozdziale opisał algorytmy oprogramowania potrzebne do zintegrowania opracowanych komponentów. W rozdziale IV opisano implementację opracowanych elementów układu napędowego w pojeździe prototypowym oraz przeprowadzono walidację przyjętych rozwiązań. Doktorant opisuje sposób rozmieszczenia elementów zaprojektowanego i wykonanego układu napędowego na pojeździe. Elementy układu rozmieszczono w górnej części pojazdu oraz tylnej, dolnej części pojazdu. Przedstawiono wizualizację rozmieszczenia elementów układu napędowego na strukturze pojazdu. Na wyprodukowanym prototypie pojazdu dokonano badań procesu uruchomienia pojazdu, tzn.: weryfikowano proces załączania obwodu wysokiego napięcia HV, monitorowano proces wstępnego ładowania, weryfikowano prawidłowe działanie komunikacji pomiędzy sterownikami. Przedstawiono schematy zastępcze z rozmieszczeniem układów pomiarowych, przedstawiono wyniki badań. Po zakończeniu tych testów przeprowadzono weryfikację trafności doboru silnika i falownika trakcyjnego, wykonując wielokrotnie testy wybiegu autobusu obciążonego dodatkową masą (masa pojazdu i obciążenia to 16 000 kg), zweryfikowano przyspieszenia jakie osiąga pojazd. Uzyskane wyniki zilustrowano w formie tabel wyników oraz wykresów. Przeprowadzone zostały również testy efektywności działania przetwornic DC/DC oraz DC/AC bogato ilustrując je w formie tabel. Kończąc ten rozdział autor dokonuje podsumowania korzyści wynikających z przyjętych rozwiązań, podkreślając znacznie większą sprawność pojazdu dla niskich prędkości, lepszą sprawność dla cykli testowych SORT2 i SORT3 w porównaniu do wcześniejszych pojazdów serii Urbino 8,9 LE electric. Efektywność rozmieszczenia elementów układu napędowego podkreśla fakt znacznej redukcji masy zużytej miedzi w wiązkach przewodów. Rozdział V pod tytułem „Metodologia projektowania modułowego układu napędowego autobusów elektrycznych” przedstawia podstawy teoretyczne związane z pojęciem metodologii, autor przedstawia w nim krok po kroku sposób postępowania konieczny do doboru elementów układu napędowego takich jak: zestaw silnik i falownik trakcyjny, układy zasilania obwodów pomocniczych, rozdzielnic zasilająco-sterujących, integracji komponentów, projektu autobusu oraz walidacji zaproponowanych rozwiązań, odnosząc się do

wcześniejszych rozdziałów oraz koniecznych do spełnienia norm. Można stwierdzić, że rozdział ten ma charakter procedury postępowania dla projektowania i wdrażania elektrycznego układu napędowego autobusu.

### 3. Ocena wyboru tematu i celów rozprawy

Rezolucja przyjęta przez Zgromadzenie Ogólne Organizacji Narodów Zjednoczonych w dniu 25 września 2015 roku zatytułowana „Przekształcamy nasz świat: Agenda na rzecz zrównoważonego rozwoju 2030” nakreśliła 17 celów tzw. zrównoważonego rozwoju oraz 169 zadań szczegółowych. Przedstawiono do recenzji praca doktorska pana mgr'a inż.'a Łukasza Chelchowskiego wpisuje się między innymi w obszary następujących celów rezolucji, takich jak:

- *„Cel 11. Uczynić miasta i osiedla ludzkie bezpiecznymi, stabilnymi, zrównoważonymi oraz sprzyjającymi włączeniu społecznemu”.*
- *„Cel 13. Podjąć pilne działania w celu przeciwdziałania zmianom klimatu i ich skutkom”.*

Praca doktorska realizuje, we właściwym dla niej zakresie, część zadań określonych w zadaniu szczegółowym:

- *„11.2 Do 2030 roku zapewnić wszystkim ludziom dostęp do bezpiecznych, przystępnych cenowo, zrównoważonych i łatwo dostępnych systemów transportu, podnieść poziom bezpieczeństwa na drogach, zwłaszcza poprzez rozwój transportu publicznego, zwracając szczególną uwagę na potrzeby grup szczególnie wrażliwych, kobiet, dzieci, osób niepełnosprawnych oraz osób starszych”.*

Dane zawarte w raporcie European Environmental Agency z lutego 2020 roku przedstawiają, że 32% emisji dwutlenku węgla do atmosfery w Unii Europejskiej pochodzi z transportu drogowego. Działania autora w kierunku powstania autobusu elektrycznego klasy midi stanowi jeden z licznych elementów obniżających emisję szkodliwych gazów cieplarnianych. Wprowadzenie do powszechnego użytku autobusów elektrycznych tej klasy, stanowi także ważny element rozwoju transportu publicznego na terenach mniej zaludnionych. Mając na uwadze powyższy kontekst, cele postawione w pracy doktorskiej uważam za trafne, aktualne i bardzo istotne z naukowego punktu widzenia, jak również z punktu widzenia rozwoju nowoczesnych brań przemysłu i transportu opartego o zeroemisyjne technologie.

### 4. Ocena merytoryczna rozprawy – zastosowane metody badawcze i uzyskane wyniki badań, praktyczne zastosowania

Recenzowana rozprawa doktorska stanowi wartościowy materiał poznawczy w zakresie konstrukcji autobusów elektrycznych cechujących się modułową konstrukcją całego układu napędowego, zapewniającą niezbędną elastyczność dla dalszego ich rozwoju. Autor w przekonujący sposób nakreślił potrzebę produkcji autobusów elektrycznych, podkreślając przy tym sprzyjające okoliczności związane z rozwojem technologii baterii elektrycznych oraz uwarunkowań prawnych i ekologicznych sprzyjających transportowi zeroemisyjnemu. Zastosowane kryteria, takie jak: maksymalizacja liczby dostępnych wariantów konfiguracji podzespołów, zbalansowanie masy w pojeździe, jak również minimalizacja długości przewodów wysokiego napięcia a w końcu ograniczenie i optymalizacja kosztów produkcji, to

aspekty kluczowe w celu osiągnięcia optymalnego produktu i zapewnienia przewagi konkurencyjnej na rynku autobusów elektrycznych. Autor w sposób prawidłowy stosuje metody optymalizacyjne wielokrotnie na etapie rozważań teoretycznych, podczas doboru elementów układu napędowego, uwzględniając przy tym aspekty ekonomiczne. W pracy dokonano badań statystycznych na istniejącej flocie autobusów elektrycznych, uzyskując dzięki temu dane potrzebne do skutecznego, technicznie i ekonomicznie uzasadnionego doboru wybranych komponentów układu napędowego i zasilania elementów wewnętrznych autobusu. Takie postępowanie jest w mojej ocenie bardzo trafne. Sposób prezentacji, zastosowane metody i narzędzia (aparatura pomiarowa, nowoczesne oprogramowanie) świadczą o ugruntowanej szerokiej wiedzy autora rozprawy. Całość przeprowadzonych rozważań teoretycznych, badań eksperymentalnych, opracowanie metodologii projektowania elektrycznego modułowego układu napędowego ma ogromny potencjał rozwojowy, który potwierdzony jest wdrożeniem do produkcji seryjnej autobusu elektrycznego Urbino 9 LE electric. Ponadto osiągnięcia autora przyczynią się do rozwoju trolejbusów, autobusów z innym rodzajem napędu, takim jak napęd z wykorzystaniem wodoru.

## 5. Podsumowanie i konkluzja

Przedstawiony w ocenianej rozprawie materiał pochodzi z bardzo obszernych i wieloletnich badań teoretycznych, eksploatacyjnych istniejącej floty autobusów elektrycznych oraz licznych testów. Jakość pozyskanych danych nie budzi, w moim przekonaniu, żadnych wątpliwości. Autor w pracy posługiwał się umiejętnie aparatem matematycznym z zakresu statystyki i teorii optymalizacji. Doktorant często odnosił się do stanu obecnej wiedzy, w prawidłowy sposób dobierając materiał publikacyjny, wyniki obliczeń i analiz prezentował w profesjonalny i przekonujący sposób.

Do szczególnych, najważniejszych osiągnięć doktoranta zaliczam:

- 1) Sformułowanie metodologii projektowania modułowego układu napędowego dla autobusów elektrycznych,
- 2) Osiągnięcie znacznej redukcji kosztów produkcji, sięgającej aż 24% w odniesieniu do autobusów wcześniejszej generacji,
- 3) Zwiększenie możliwości przewozowych autobusu o 6%,
- 4) Zwiększenie możliwości w zakresie kształtowania komfortu podróżujących pasażerów oraz wymagań zamawiającego,
- 5) Przeprowadzenie szerokiego programu badań eksperymentalnych na istniejącej flocie autobusów,
- 6) Wykonanie badań doświadczalnych potwierdzających trafność i efektywność opracowanych rozwiązań technicznych,
- 7) Przeprowadzenie badań statystycznych oraz optymalizacji wielokryterialnej z uwzględnieniem aspektów ekonomicznych,
- 8) Przygotowanie dokumentacji technicznej na potrzeby produkcji autobusów elektrycznych nowej generacji,
- 9) Zapewnienie przewagi konkurencyjnej dla przedsiębiorstwa, na trudnym i wymagającym rynku autobusów elektrycznych.

Mając na uwadze powyższe osiągnięcia, stwierdzam, że cele stawiane w rozprawie doktorskiej zostały osiągnięte. Stwierdzam, że spełnione zostały warunki określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku, Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (t.j. Dz. U. z 2022r. poz. 574 z późn. zm.), to jest:

*Art. 187. [Rozprawa doktorska]*

1.

*Rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie albo dyscyplinach oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej.*

2.

*Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej lub społecznej albo oryginalne dokonanie artystyczne.*

3.

*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.*

4.

*Do rozprawy doktorskiej dołącza się streszczenie w języku angielskim, a do rozprawy doktorskiej przygotowanej w języku obcym również streszczenie w języku polskim. W przypadku gdy rozprawa doktorska nie jest pracą pisemną, dołącza się opis w językach polskim i angielskim.*

Niniejszym stwierdzam, że przedstawiona do recenzji praca doktorska spełnia wszystkie wymogi formalne i w mojej ocenie pan mgr inż. Łukasz Chełchowski może być dopuszczony do publicznej obrany pracy.



Signed by /  
Podpisano przez:

Tomasz Trawiński  
Politechnika  
Śląska

Date / Data:  
2023-07-01 15:28

dr hab. inż. Tomasz Trawiński, prof. PŚ