

dr. hab. inż. Grzegorz Komarzyniec, prof. PL

Lublin. 17.07.2023r.

Katedra Elektrotechniki i Elektrotechnologii
Wydział Elektrotechniki i Informatyki
Politechnika Lubelska
ul. Nadbystrzycka 38 A
20-618 Lublin

SEKRETARIAT
Rady Dyscypliny AEEITK

Wpłynęło dnia 31.07.2023

Zarejestrowano pod nr

Podpis *Jm*

Recenzja rozprawy doktorskiej pt.:

Metodologia projektowania modułowego układu napędowego autobusów elektrycznych

Pana mgr inż. Łukasza Chełchowskiego

w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne

I. Podstawa opracowania recenzji

- pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne dra hab. inż. Ryszarda Sroki, prof. AGH z dnia 27.04.2023 r.,
- rozprawa doktorska mgra inż. Łukasza Chełchowskiego pt.: *Metodologia projektowania modułowego układu napędowego autobusów elektrycznych*,
- art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2022 r. poz.574 z późn.zm.).

II. Charakterystyka pracy

Rozprawa doktorska mgra inż. Łukasza Chełchowskiego pt.: *Metodologia projektowania modułowego układu napędowego autobusów elektrycznych*, liczy 134 strony wraz ze spisem literatury. Rozprawa podzielona została na 7 rozdziałów. Rozdział pierwszy stanowi wstęp zawierający charakterystykę rynku miejskich autobusów z napędem elektrycznym. We wstępie omówiono także stan wiedzy w zakresie układów napędowych autobusów elektrycznych na podstawie dostępnej literatury. Rozdział pierwszy kończy się przedstawieniem problemu badawczego, celu, tezy i zakresu pracy. Rozdział drugi poświęcony jest rozważaniom analitycznym, obliczeniom i pracom badawczym nad koncepcją modułowego układu napędowego oraz doбором silnika trakcyjnego i układu energoelektronicznego. W rozdziale tym omówiono także problematykę dystrybucji energii elektrycznej na potrzeby zasilania silnika trakcyjnego oraz układów pomocniczych autobusu. Opisano etapy kompletowania elektrycznego układu napędowego składającego się z silnika trakcyjnego, układu energoelektronicznego do jego zasilania, przetwornic DC/DC 24 V i DC/AC 3x400 V oraz rozdzielnic zasilająco-sterujących. Sposób integracji elementów elektrycznego układu napędowego oraz wyposażenia autobusu przedstawiono w rozdziale trzecim. W rozdziale tym omówiono wyposażenie i funkcjonalność rozdzielnic zasilająco-sterujących oraz przedstawiono

sposób realizacji pomiaru wartości napięć i prądów. Duży fragment tego rozdziału poświęcono opisowi algorytmu programu sterującego realizowanego przez Główny Komputer Pojazdu. Wyniki badań wykonanych na prototypie pojazdu zawarto w rozdziale czwartym. W rozdziale tym wykazano korzyści techniczne i ekonomiczne wynikające z wprowadzonych rozwiązań w odniesieniu do autobusu z napędem elektrycznym wcześniejszej generacji. Zaprezentowano sposób implementacji zaproponowanych rozwiązań oraz wykazano poprawność doboru silnika, układów energoelektronicznych oraz rozdzielnic zasilająco-sterujących. Rozdział piąty zawiera uogólnione zasady projektowania modułowego układu napędowego autobusów elektrycznych. W rozdziale tym omówiono zasady opracowywania koncepcji układu napędowego, zasady doboru silnika, układu energoelektronicznego i obwodów zasilania wyposażenia pomocniczego autobusu. Wnioski i podsumowanie pracy zawarto w rozdziale szóstym. Ostatni, siódmy rozdział rozprawy doktorskiej zawiera bibliografię liczącą 59 pozycji, w tym 10 odnośników do stron internetowych. Bibliografia odzwierciedla współczesny stan wiedzy w zakresie budowy i eksploatacji autobusów z napędem elektrycznym. Literatura jest aktualna a jej dobór celowy i poprawny. Układ pracy nie budzi większych zastrzeżeń. Materiał ilustracyjny przedstawiony w pracy jest w większości czytelny, a użyta terminologia prawidłowa i zrozumiała.

III. Tematyka, teza naukowa i cel pracy

Prowadzenie prac w obszarze elektromobilności ma pozytywny wpływ nie tylko na branżę motoryzacyjną, ale również całą gospodarkę, zmieniając konkurencyjność gałęzi przemysłu oraz modyfikując światową mapę zależności od surowców. Rozwój tego sektora wynika nie tylko z uwarunkowań środowiskowych i klimatycznych, ale przede wszystkim z innowacyjnych rozwiązań. W związku z powyższym, wiedza na temat projektowania układów napędowych pojazdów elektrycznych, a w szczególności pojazdów transportu publicznego jakimi są autobusy, staje się w dzisiejszym świecie coraz bardziej potrzebna. Wiedza ta ma charakter interdyscyplinarny, łączy w sobie nauki z obszaru elektrotechniki, mechaniki, informatyki, statystyki i ekonomii. Tak szeroko pojęta wiedza wymaga usystematyzowania ujętego w metodologię projektowania autobusów z napędem elektrycznym. W pracy Doktorant zawęży ten szeroki obszar badawczy do opracowania metodologii projektowania modułowego układu napędowego. Ograniczenie takie jest zasadne, gdyż praca ma charakter wdrożeniowy a efektem badań jest jeżdżący autobus Solaris Urbino 9 LE electric. Genezą podjętych prac są badania ankietowe jakie Doktorant przeprowadza wśród pracowników firmy Solaris, producenta autobusów. Analiza danych ankietowych, analiza rynku autobusów miejskich z napędem elektrycznym oraz studia nad stanem wiedzy w zakresie układów napędowych autobusów elektrycznych pozwalają mgr. inż. Łukaszowi Chełchowskiemu sformułować cel pracy.

Jako cel naukowy rozprawy Doktorant stawia *„opracowanie metodologii projektowania modułowego układu napędowego autobusów elektrycznych na podstawie realizacji projektu autobusu Solaris Urbino 9 LE electric. Uważam, że cel pracy jest ambitny i spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim.*

Dążąc do realizacji celu, Doktorant prowadzi rozważania analityczne i prace badawcze nad koncepcją układu napędowego. Dokonuje doboru silnika trakcyjnego oraz energoelektronicznego układu jego zasilania. Wyznacza zapotrzebowanie na energię elektryczną pozostałych urządzeń wchodzących w skład wyposażenia autobusu i określa wymagania dla ich

układów zasilania. Projektuje rozdzielnice zasilająco-sterującą i integruje sterowniki obwodów elektrycznych ze sterownikiem nadrzędnym, jakim jest Główny Komputer Napędowy. Ostatecznie Doktorant formułuje metodologię projektowania modułowego układu napędowego autobusów elektrycznych.

Praca w sposób spójny realizowana jest według nakreślonego celu, co prowadzi do udowodnienia postawionej tezy. Tezę pracy Autor sformułował w sposób jawny: *Zastosowanie metodologii projektowania modułowego układu napędowego umożliwia w autobusach elektrycznych spełnienie następujących kryteriów: maksymalizacji liczby dostępnych wariantów konfiguracji podzespołów, zbalansowania rozkładu masy w pojeździe, a także minimalizacji długości przewodów elektrycznych wysokiego napięcia oraz kosztów produkcji. Tak postawiona teza ma wyraźny wydzźwięk aplikacyjny, jest poprawna i odpowiednio sformułowana.*

W świetle poczynionych uwag ogólnych stwierdzam, że podjęcie tematu recenzowanego osiągnięcia naukowego w brzmieniu: *Metodologia projektowania modułowego układu napędowego autobusów elektrycznych jest celowe i w pełni uzasadnione oraz ułożone w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne.*

IV. Uwagi merytoryczne

Autor wykazuje dobrą znajomość problemów, których dotyczy recenzowana rozprawa, choć nie ustrzegł się błędów lub fragmentów budzących wątpliwości. Do istotnych wad zaliczam:

1. W pracy Doktorant wielokrotnie powtarza, że jego celem jest eliminacja ograniczeń funkcjonalnych autobusu Urbino 8,9 LE electric, nigdzie jednak tych ograniczeń nie przedstawia w sposób jawny. W rozdziale 1.4 Doktorant wspomina o ankietach jakie przeprowadzał z pracownikami firmy Solaris, w celu identyfikacji ograniczeń wspomnianego autobusu. Należało zamieścić wyniki tych ankiet, co dałoby wyobrażenie o wadach jakie posiada autobus i problemach jakie Doktorant chce rozwiązać. Zwłaszcza, że wyniki ankiety są genezą działań podjętych przez Doktoranta. Jak w ankietach postawiono hipotezy i pytania badawcze? Jakie są wyniki i wnioski z badań ankietowych?
2. Dobierając silnik trakcyjny, Doktorant nie podaje parametrów technicznych branych pod uwagę silników. Zatajanie tych informacji, powołując się na tajemnicę przedsiębiorstwa oraz podpisane umowy o poufności, wydaje się nieuzasadnione. Podanie podstawowych parametrów silnika (moc, moment obrotowy, sprawność, masa) jednoznacznie nie wskazuje na typ silnika oraz jego producenta. Brak tych informacji nie pozwala ocenić poprawności optymalizacji wielokryterialnej silników trakcyjnych przeprowadzonej przez Doktoranta. Ta sama uwaga tyczy się doboru układów energoelektronicznych. Z pracy jednoznacznie nie wynika jakie układy zasilania silnika poddano analizie. Nasuwa się zaś wniosek, że wybrano układ energoelektroniczny proponowany przez producenta silnika?
3. Omawiając algorytmy sterowania napędem autobusu i jego wyposażeniem, Doktorant bardzo lakonicznie podchodzi do tematu, zasłaniając się tajemnicą przedsiębiorstwa. W przypadku pewnych fragmentów kodu źródłowego może być to uzasadnione, jednak wydaje się, że zamieszczenie diagramu blokowego programu nie naruszałoby tajemnicy

producenta, a pozwoliłoby zrozumieć zasadę jego działania. Bez takich informacji trudno jest ocenić skalę problemu i wkład Doktoranta w jego rozwiązanie. W tym fragmencie pracy wyraźnie brakuje schematu układu sterowania i przepływu informacji między urządzeniami wyposażenia autobusu, ich sterownikami i sterownikiem nadrzędnym, jakim jest Główny Komputer Napędowy.

4. W pracy nie zamieszczono schematu instalacji elektrycznej autobusu. Zamieszczenie takiego schematu, nawet w formie uproszczonej, pozwoliłoby zrozumieć jak przebiega rozdział energii elektrycznej między poszczególnymi elementami wyposażenia autobusu.
5. Rozdział piąty zatytułowano *Metodologia projektowania modułowego układu napędowego autobusów elektrycznych*, a więc tak jak brzmi temat rozprawy doktorskiej. Jest to niepotrzebne zawężenie tematu rozprawy doktorskiej do jednego rozdziału. W rzeczywistości metodologia projektowania omawiana jest od rozdziału drugiego i rozciąga się na rozdziały trzy i cztery. W efekcie rozdział piąty powiela dużą część informacji zawartych w rozdziałach go poprzedzających. Rozdział piąty powinien przybliżać uogólnione zasady i wytyczne do projektowania modułowego układu napędowego autobusów elektrycznych i w tym tonie powinien być sformułowany jego tytuł. W rozdziale tym, jak i w całej pracy, brakuje informacji czy zaproponowana przez Autora metoda projektowania jest słuszna tylko dla jednego omawianego autobusu, czy też można ją rozszerzyć na całą gamę różnych typów autobusów miejskich?

Poczynione powyżej przeze mnie uwagi świadczą o tym, że problem projektowania układów napędowych autobusów elektrycznych jest złożony i wielowątkowy. Sformułowane przeze mnie komentarze w żadnej mierze nie obniżają jednoznacznie pozytywnej oceny osiągnięcia naukowego mgr inż. Łukasza Chełchowskiego, jednakże uważam, że mogą być przydatne w jego dalszej pracy naukowej i zawodowej.

V. Ocena poziomu edytorskiego

Podział treści rozprawy jest logiczny i uporządkowany. Rozprawa jest zredagowana na ogół poprawnym i zrozumiałym językiem, z nielicznymi powtórzeniami treści. Szata graficzna jest czytelna i zrozumiała. Sposób przekazywania treści jest zadowalający a informacja dość dobrze wyważona. Czytając lekturę pracy odnosi się wrażenie o wysokiej kompetencji merytorycznej Autora, który potrafi przedstawić trudne zagadnienia w sposób przyjazny dla czytelnika. Autor nie ustrzegł się jednak pomyłek, nieścisłości oraz błędów edytorskich, stylistycznych i gramatycznych.

Za błędy edytorskie o niewielkim znaczeniu, niewpływające na ocenę redakcji rozprawy uważam:

1. Strona 5, drugi akapit, wiersz 3. Napisane jest: *Łączy ona wiele dyscyplin w ramach nauk inżynieryjno-technicznych oraz ekonomia i finanse, ...*, a powinno być: *Łączy ona wiele dyscyplin w ramach nauk inżynieryjno-technicznych oraz ekonomię i finanse, ...*
2. Strona 6, rysunek 1. W opisie rysunku jest: *% udział autobusów elektrycznych ...*, a powinno być: *Procentowy udział autobusów elektrycznych*
3. Strona 11, rysunek 6. W legendzie do rysunku brakuje opisu bloków schematu oznaczonych kolorem niebieskim.

4. Strona 25, wzór (3). We wzorze tym pojawia się symbol α napisany czcionką zwykłą, gdy powinien być napisany czcionką pochyloną.
5. Strona 70. Symbol rezystancji napisany jest czcionką prostą a powinien być pochyloną.
6. Strona 71, rysunek 27. Na osi rzędnych odpowiadających wartości prądu pojawiają się wartości liczbowe z trzema zerami po przecinku. Może budzić to wątpliwości do wartości prądów.
7. Strona 92 i 93. Wartości liczbowe przypisane osiom na rysunkach 45 i 46 są nieczytelne ze względu na zbyt małą czcionkę.
8. Strona 97. W opisie do wzoru pojawia się symbol siły pisany czcionką prostą, gdy powinien być napisany czcionką pochyloną.
9. Strona 98. W tekście pojawia się symbol współczynnik oporu pisany czcionką prostą, gdy powinien być napisany czcionką pochyloną.
10. Strona 102. Napisane jest: ... *wyższej niż w wynika to z symulacji.*, a powinno być: ... *wyższej niż wynika to z symulacji.*
11. Strony 105 i 106, tabele 24 i 25. W opisie tabel pojawiają się znaki matematyczne „<” oraz „>”. Należało zapisać słownie ... *prądu mniejszego od ...* oraz ... *prądu większego od ...*

Za błędy edytorskie wpływające na odbiór pracy uznaję:

1. Na stronie 21 napisane jest: ... *znajdować się będą w strefie „brudnej”* Żargonowe stwierdzenie „strefa brudna” jest nieprecyzyjne. Należało użyć dłuższego opisu precyzyjnie wskazującego w jakich miejscach będą montowane podzespoły układu napędowego i na jakie czynniki atmosferyczne lub techniczne będą narażone.
2. Schematy elektryczne powinny być czytelne i zrozumiałe. W przypadku rysunku 28, przedstawiającego schemat ideowy rozdzielnicy zasilająco-sterującej w wersji modułowej, czcionka wykorzystana w opisach elementów schematu jest zbyt mała, przez co opisy nieczytelne. Podobna uwag tyczy się rysunku 44.
3. Opisy sygnałów przedstawionych na rysunku 43 są mało czytelne, głównie poprzez ich skrócenie względem opisów stosowanych w tekście.
4. Na wykresach przedstawionych na rysunkach 54 i 55 występują słupki w trzech kolorach, gdy w legendzie opisane są tylko dwa kolory, budzi to wątpliwości do danych przedstawionych na rysunkach.
5. Na rysunkach 57 i 58 pojawiają się porównania długości i masy miedzi wiązek kablowych stosowanych w nowo projektowanym autobusie oraz w poprzednim modelu autobusu. Ze względu na brak w pracy schematu instalacji elektrycznej wprowadzone na rysunkach oznaczenia wiązek kablowych nie niosą w sobie żadnych informacji.

Pomimo pewnej liczby usterek, można uznać, że w zdecydowanej większości nie są to błędy szczególnie rażące. Zauważone usterki nie utrudniają z znaczący sposób lektury rozprawy i nie wpływają w istotnym stopniu na pozytywną ocenę rozprawy.

VI. Główne osiągnięcia rozprawy

Tylko pobieżne spojrzenie na problem naukowy sformułowany do rozwiązania w ramach rozprawy można stwarzać wrażenie, iż jest to problem trywialny. W rzeczywistości problem ten wymaga szerokiego spojrzenia, obejmującego swym zasięgiem wiedzę z zakresu

elektrotechniki, mechaniki, informatyki, statystyki i ekonomii. Doktorant udowodnił, że potrafi łączyć wiedzę z tych obszarów nauki w ramach badań wdrożeniowych.

Głównym oryginalnym dorobkiem Autora jest udowodnienie postawionej w pracy tezy poprzez wdrożenie do eksploatacji nowego modelu autobusu z napędem elektrycznym. Autobus ten zgodnie z przyjętymi założeniami uzyskał lepsze wyniki we wszystkich kryteriach oceny względem poprzedniego modelu. Na drodze optymalizacji wielokryterialnej uzyskano wzrost liczby dostępnych wariantów konfiguracji podzespołów autobusu, osiągnięto lepszy rozkład mas w pojeździe, skrócono długość przewodów elektrycznych wysokiego napięcia oraz zmniejszono koszty produkcji. Wspomniane efekty uzyskano wykorzystując autorską metodologię projektowania modułowego układu napędowego autobusów elektrycznych. Metodologię tą Doktorant sformułował uogólniając konkluzje wyciągnięte z pozostałych osiągnięć, spośród których jako znaczące należy wymienić:

- określenie wymagań trakcyjnych dla autobusu z napędem elektrycznym,
- opracowanie autorskiej koncepcji elektrycznego układu napędowego,
- dokonanie optymalizacji wielokryterialnej, metodą sum ważonych z wykorzystaniem do normowania zmiennych metody unitaryzacji zerowej, celem uzyskania optymalnego rozwiązania układu napędowego,
- opracowanie algorytmów oprogramowania dla sterowników rozdzielnic oraz Głównego Komputera Napędu,
- opracowanie metodyki badawczej i przeprowadzenie badań eksperymentalnych oraz prób drogowych skonstruowanego autobusu.

Doktorant w stopniu biegłym opanował tematykę rozprawy nie tylko od strony teoretycznej, ale przede wszystkim praktycznej i wdrożeniowej. Na podstawie przeprowadzonych badań ankietowych, technologicznych i eksploatacyjnych umiejętnie formułuje wytyczne do projektu napędu elektrycznego nowego typu autobusu miejskiego. Za pomocą właściwie dobranych narzędzi, w dużej mierze własnego autorstwa, dobiera i projektuje niezbędne wyposażenie autobusu. Zaproponowane rozwiązania poddaje symulacjom i testom potwierdzającym słuszność przyjętych koncepcji. Efektem końcowym prac jest wdrożenie rozwiązań w nowym dopuszczonym do ruchu autobusie Solaris Urbino 9 LE electric.

W świetle poczynionych uwag stwierdzam, że Doktorant dysponuje wymaganym do prowadzenia badań naukowych i ich wdrożeń zasobem wiedzy z zakresu dyscypliny naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne.

VII. Podsumowanie i konkluzje oceny rozprawy

Podsumowując rozprawę naukową mgr. inż. Łukasza Chełchowskiego pt.: *Metodologia projektowania modułowego układu napędowego autobusów elektrycznych*, stwierdzam, że opracowanie to ma odpowiednio wysoką wartość i stanowi oryginalne oraz znaczące osiągnięcie naukowe.

Przedstawioną do recenzji rozprawę należy zaliczyć do grupy prac, które mają charakter wdrożeniowy. Doktorant wykazał, że ma niezbędne kwalifikacje do prowadzenia badań naukowych, rozwiązywania w sposób oryginalny postawionych przed nim problemów oraz wdrażania opracowanych rozwiązań. Zamierzony cel pracy został osiągnięty a teza udowodniona.

Biorąc pod uwagę wszystkie elementy oceny zawarte w niniejszej recenzji, **stwierdzam**, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgra inż. Łukasza Chęłchowskiego jest kompletna i nie wymaga żadnych zmian ani uzupełnień oraz wnosi istotny wkład w rozwój dyscypliny Elektrotechnika. Spełnia ona wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone w Ustawie Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 roku (Dz.U. z 2022 r. poz.574 z późn.zm.). Wnioskuje o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.

dr. hab. inż. Grzegorz Komarzyniec, prof. PL



