

Poznań, dnia 30.06.2023 r.

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

Wpłynęło dnia 05. 07. 2023

Zarejestrowano pod nr

Podpis 

OCENA

Rozprawy doktorskiej mgr. inż. Łukasza Chełchowskiego pt.:

*Metodologia projektowania modułowego układu napędowego autobusów
elektrycznych*

1. Podstawa opinii: pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne z dnia 27.04.2023 roku, do którego dołączono egzemplarz rozprawy doktorskiej.

2. Przedmiot opinii: rozprawa doktorska mgr. inż. Łukasza Chełchowskiego liczy 134 strony tekstu w tym 5 stron bibliografii, pracę napisano w języku polskim. W pracy umieszczono 59 rysunków oraz 26 tabel. W spisie literatury umieszczono 59 pozycji. Praca zawiera streszczenia w językach polskim i angielskim.

3. Ogólna charakterystyka problematyki poruszanej w rozprawie

Rynek pojazdów elektrycznych dynamicznie się rozwija, szczególnie dotyczy to rynku transportu miejskiego. Producenci w zdecydowanej większości konstruują i produkują takie pojazdy w oparciu o konstrukcje modułowe tj. korzystają z wielu dostawców poszczególnych elementów składowych autobusu, w szczególności układów napędowych. Praktyką obowiązującą jest, że w ramach jednej konstrukcji i w ciągu trwającej produkcji zmienia się

producentów poszczególnych elementów z powodów ekonomicznych. To powoduje bardzo często powstawanie luk produkcyjnych, wydłużenie procedur doboru jak również ograniczenie sprawności produkcji. Wiedza na temat projektowania układów napędowych autobusów elektrycznych jest w dzisiejszym świecie coraz bardziej potrzebna. Łączy wiele dyscyplin w ramach dziedziny nauk inżynieryjno-technicznych oraz dyscyplinę ekonomia i finanse. Tak szeroka wiedza wymaga usystematyzowania, dlatego w ramach rozprawy Autor podjął próbę opracowania metodologii projektowania modułowego układu napędowego autobusów elektrycznych.

4. Ogólna charakterystyka elementów rozprawy doktorskiej

Na podstawie literatury oraz dokumentacji firmy Solaris Bus&Coach sp. z o.o., przedstawiono charakterystykę rynku autobusów miejskich ze szczególnym uwzględnieniem napędu elektrycznego. Opisano istniejące rozwiązania oraz najczęstsze problemy producentów tego typu pojazdów. Przedstawiono różnice pomiędzy napędami konwencjonalnymi oraz elektrycznymi w kontekście autobusów miejskich. Przedstawiono problem badawczy oraz zdefiniowano cel, zakres i tezę pracy.

W rozprawie opisano autorską metodologię projektowania modułowego układu napędowego autobusów elektrycznych na podstawie autobusu nowej generacji Solaris Urbino 9 LE electric. Zastosowane metody (symulacji komputerowej, statystyczne, eksperymentalne) oraz techniki obliczeniowe standaryzują w aspekcie techniczno-ekonomicznym rozwój konstrukcji nowych autobusów z napędami elektrycznymi.

Rozprawa zawiera charakterystykę rynku autobusów miejskich ze szczególnym uwzględnieniem napędu elektrycznego. Przedstawiono istniejące rozwiązania oraz najczęstsze problemy producentów tego typu pojazdów.

Rozważaniom analityczno-badawczym poddano silniki elektryczne wraz z falownikami, przetwornicami prądu stałego i zmiennego oraz rozdzielnice zasilająco-sterujące. Przedstawiono wszystkie etapy konfigurowania elektrycznego układu napędowego, począwszy od fazy koncepcyjnej na poziomie systemu, aż po dobór poszczególnych

elementów składowych na podstawie optymalizacji wielokryterialnej metodą sum ważonych z wykorzystaniem do normowania zmiennych metody unitaryzacji zerowanej.

Kolejny etap rozprawy to opracowanie sposobu integracji elementów skonfigurowanych i zaprojektowanych dla elektrycznego układu napędowego autobusu Solaris Urbino 9 LE electric. Integracja objęła połączenie wszystkich elementów obwodu wysokonapięciowego oraz algorytmy potrzebne do realizacji oprogramowania zarządzającego układem.

Rozprawa ukazuje warsztat naukowy autora w zakresie wykorzystanych metod badawczych eksperymentalnych oraz statystycznych, które posłużyły do walidacji zaprojektowanych rozwiązań. Wskazano korzyści uzyskane w rezultacie zastosowania modułowego elektrycznego układu napędowego, wykazując poprawność przyjętej tezy: „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.”

5. Oryginalność rozprawy

Nieznane są recenzentowi prace badawcze i publikacje traktujące w sposób kompleksowy rozwój napędów elektrycznych z uwzględnieniem specyfiki ich konstrukcji, produkcji i aspektu ekonomicznej opłacalności na podstawie konkretnego modelu autobusu z napędem elektrycznym.

6. Wartość naukowa i aplikacyjna

Sformułowany w pracy problem związany z opracowaniem metodologii doboru konfiguracji nowoczesnych autobusów elektrycznych w aspekcie rozwoju elektrycznego układu napędowego autobusu elektrycznego został przez autora rozwiązany.

Rezultaty badań i analiz wdrożono w prototypowym autobusie Solaris Urbino 9LE electric (następca modelu Urbino 8,9LE electric), który wykorzystano do testów i walidacji. Na tej podstawie opracowano uniwersalną metodologię projektowania, która pozwala pod względem

technicznym jak i ekonomicznym, rozwijać ten typ autobusu oraz wdrażać nowe rozwiązania konstrukcyjne. Powyższe potwierdził opiekun-pracodawca w piśmie z dnia 29.03.2023.

7. Zastosowane metody badawcze

Do stwierdzenia zasadności postawionej tezy zastosowano właściwe narzędzia oraz strukturę modelowania. Zagadnienie wielokryterialne sprowadzono do jednokryterialnego, gdzie poszczególne funkcje określające kryteria doboru silnika trakcyjnego przekształcono w jedną funkcję celu. Na tej podstawie przeprowadzono analizę doboru falownika trakcyjnego. Za pomocą autorskiego narzędzia eSConnect dokonano analizy prędkości wybranych pojazdów a wyniki opisano histogramem sporządzonym w MATLAB. Następnie założenia doboru silnika trakcyjnego i falownika zwizualizowano za pomocą wykresu trakcyjnego pojazdu. Kończącą weryfikację przeprowadzono standaryzowaną procedurą pomiaru zużycia energii w autobusach elektrycznych e-SORT.

Do wyznaczenia zapotrzebowania na moc instalacji elektrycznej zastosowano dwie metody: obliczeniową w oparciu o literaturę i doświadczenie oraz autorską analityczną. Do doboru przetwornicy zastosowano optymalizację wielokryterialną w oparciu o metodę sum ważonych z wykorzystaniem metody unitaryzacji zerowanej do normowania zmiennych. Opisano metodologię doboru i zaprojektowania modułowej rozdzielnicy zasilająco-sterującej oraz integracji elektrycznego układu napędowego wraz z oprogramowaniem.

Kończącym etapem rozprawy jest opis projektu autobusu oraz weryfikacja prototypu w tym poprawności konstrukcji rozdzielnicy zasilająco-sterującej, silnika trakcyjnego i falownika, przetwornicy. Przeprowadzono również analizę ekonomiczną dobranych elementów i konstrukcji prototypu.

8. Wykaz literatury

Literatura zawiera 59 pozycji, które w znaczącej części obejmują lata 2020–2023 co świadczy o unikatowości rozprawy i zagadnień w niej opisanych. Należy podkreślić, że poruszana tematyka w rozprawie jest bardzo aktualna i pozycji literaturowych traktujących ją w sposób kompleksowy praktycznie nie ma.

9. Uwagi ogólne

Uważam, że rozprawa doktorska ma wymiar unikatowy. Łączy elementy pracy naukowej oraz posiada walory opracowania technicznego gotowego do wdrożenia. Autor do rozwiązania postawionego problemu badawczego podszedł kompleksowo, wykorzystał narzędzia naukowe, informatyczne i techniczne. Badania i analizy były oparte na komercyjnych elementach składowych układu napędowego więc w tym aspekcie rozprawa nie wnosi nic nowego. Jednak dobór parametrów poszczególnych układów z zachowaniem technicznej kompatybilności z jednoczesnym spełnieniem aspektów ekonomicznych stanowi poważne wyzwanie dla firm produkujących tego rodzaju obiekty techniczne. Pomiędzy poszczególnymi działami inżynierskimi i odpowiadającymi za stan finansowy przedsiębiorstwa często dochodzi do rozbieżności wynikających z konieczności zapewnienia odpowiednich danych technicznych projektowanych przez inżynierów obiektów a zbyt dużym koszcie zastosowanych do ich budowy elementów składowych. Recenzowana praca bardzo dobrze wpisuje się w rozwiązanie tego problemu dla projektowania autobusów z modułowym elektrycznym układem napędowym jednocześnie jest zebrany kompendium wiedzy dotyczącej metodologii doboru jak również stanowi znakomity materiał dydaktyczny.

Do zalet rozprawy należy zaliczyć:

- opracowanie praktycznej metodologii doboru elementów składowych modułowego elektrycznego układu napędowego z uwzględnieniem aspektów funkcjonowania firmy produkującej autobusy elektryczne,
- opracowanie autorskiej metody statystycznej do doboru przetwornic napędu elektrycznego,
- opracowanie autorskiego modułu funkcjonowania do oprogramowania eSConnect celem stworzenia histogramów określenia najczęściej występujących przedziałów prądów oraz identyfikowania prądów maksymalnych na podstawie danych eksploatacyjnych autobusów będących w eksploatacji firmy Solaris,
- opracowanie algorytmów oraz dedykowanego oprogramowania do sterowników rozdzielnic oraz głównego komputera sterującego układem napędowym,

- opracowanie metodologii weryfikacji poszczególnych elementów modułowego układu napędowego w oparciu o europejski test SORT i w ruchu rzeczywistym (bardzo rzadko spotykane narzędzie do weryfikacji),
- zwiększenie wariantowości budowy modułowego napędu elektrycznego w konkretnym modelu autobusu co wpłynęło na zdecydowanie korzystny efekt marketingowy w postaci szerszej oferty rozpatrywanego modelu autobusu firmy Solaris,
- możliwość łatwej multiplikacji opracowanej metodologii na pozostałe produkty firmy Solaris (doktorant literalnie w rozprawie przytacza inny model autobusu, do budowy którego zastosowano opracowaną metodologię),
- udowodniony i zaprezentowany w pracy korzystny efekt ekonomiczny w postaci obniżenia kosztów wybranych elementów układu napędowego o wymaganych parametrach ale w danej chwili rynkowej o niższej cenie w postaci do konkurentów np. przez dywersyfikację dostawców poszczególnych elementów a nie zestawów złożonych z kilku elementów dostępnych w pakiecie na rynku (napęd modułowy zastąpił napęd scentralizowany).

Wady i wątpliwości dotyczące rozprawy:

- praktycznie każdy rozdział mógłby stanowić osobną tematykę do napisania rozprawy doktorskiej. To moim zdaniem doprowadziło do rozdrobnienia kwestii dogłębnych rozważań naukowych w danej tematyce. Jednak należy również przyznać, że doktorat wdrożeniowy posiada inną specyfikę realizacji, który musi być pełny w danym zagadnieniu nawet kosztem szczegółowej analizy naukowej ponieważ takie są oczekiwania pracodawcy,
- statystycznie rzecz biorąc autor rozprawy oparł swoje rozważanie w oparciu o jeden model autobusu, nie budzi to dużego zastrzeżenia ale praca byłaby pełniejsza gdyby można było opracowaną metodologię skonfrontować z innymi modelami, ponieważ zmiana parametrów końcowych produktu może wpływać na efekt zastosowanej metodologii,

- zabrakło mi badań w rzeczywistych warunkach eksploatacji na terenie miasta poznania ponieważ wiem, że Solaris takimi badaniami dysponuje w przypadku klasycznych napędów. Solaris posiada opracowaną metodologie badań autobusów elektryczny jeśli chodzi o energochłonność na wybranych liniach rzeczywistych transportu miejskiego. To jest prawdziwa i praktyczna weryfikacja opracowywanych konstrukcji,
- w rozdziale 2.4 autor skupił się na układzie wstępnego ładowania kondensatorów i układzie stanu kontroli izolacji a mało uwagi poświęcił doborowi bezpieczników przeciwzwarciovych styczników oraz przetworników napięć i prądów,
- korzystanie z narzędzi informatycznych nie budzi w dzisiejszym świecie wątpliwość ale w rozprawie można było poświęcić trochę więcej miejsca na przedstawienie algorytmów zaimplementowanych do oprogramowania ponieważ dysertacja to praca naukowa a nie popularno-naukowa,
- w żadnym punkcie pracy nie doszukałem się kwestii związanej z rozważaniami dotyczącymi parametrów układu przeniesienia napędu a wiadomym jest, że charakterystyka pracy napędu elektrycznego i konwencjonalnego jest różna przy czym rynek np. osi napędowych nie nadażył jeszcze nad tą zmianą. Uważam, że aby opracowana metodologia była pełna to również ten aspekt powinien być wzięty pod uwagę gdyż wpływa to na końcowe parametry trakcyjne autobusu.

10. Podsumowanie i konkluzja

Rozprawa doktorska mgr. inż. Łukasza Chełchowskiego jest wartościowym i aktualnym opracowaniem o charakterze studyjnym, które wnosi treści poznawcze i wskazuje nowe kierunki rozwoju i doskonalenia metod związanych z transportem miejskim i doбором elementów składowych modułowego elektrycznego układu napędowego.

Mgr inż. Łukasz Chełchowski wykazał się umiejętnością samodzielnego formułowania i rozwiązywania zadań naukowych na poziomie prac doktorskich i reprezentuje wystarczający poziom wiedzy w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne.

Stwierdzam, że przedstawiona przez Pana mgr. inż. Łukasza Chełchowskiego rozprawa doktorska spełnia wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku (prawo o szkolnictwie wyższym i nauce: Dz.U. z 2022r. poz.574 z późniejszymi zmianami), w zakresie rozpraw doktorskich i stawiam wniosek o dopuszczenie Autora do publicznej obrony.

Podpis recenzenta

A handwritten signature in blue ink, consisting of several overlapping loops and a long horizontal stroke extending to the right.