

dr hab. inż. Andrzej Augustynowicz, profesor uczelni

Opole, 2022-09-17

Katedra Pojazdów

Wydział Mechaniczny

Politechnika Opolska

## Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Artura Kopczyńskiego- „Power distribution in multi-motor power trains in electric road vehicles”.

Recenzję pracy wykonano na zlecenie Dziekana Wydziału Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej prof. dra hab. inż. Piotra Przybyłowicza z 29 czerwca 2022 r. w kontekście uchwały Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna z 01 czerwca 2022r. Opiniowana praca została wykonana pod kierunkiem prof. dra hab. inż. Antoniego Szumanowskiego z Politechniki Warszawskiej. Przy realizacji pracy doktorskiej służył radą i doświadczeniem dr inż. Arkadiusz Hajduga, profesor uczelni, w charakterze promotora pomocniczego.

Praca zajmuje 253 strony wraz załącznikami. Wielkość ta przekracza standardowe wielkości tego rodzaju prac, jednak wynika to z bogatej tematyki podjętej przez doktoranta i w związku z tym jest to wielkość akceptowalna. Ponadto należy zwrócić uwagę, że 26 stron pracy to wartościowe załączniki, które są udokumentowaniem badań eksperymentalnych doktoranta. Praca podzielona jest na 12 rozdziałów. Zacytowana bibliografia to 154 pozycje składające się z książek, publikacji w czasopismach naukowych oraz odnośników do stron internetowych. Przeważającą część spisu stanowią publikacje naukowe a w tym 13 będących pozycjami współautorskimi Doktoranta. Pozycje literaturowe oceniono jako względnie aktualne. Z dużą starannością wykonano spisy ważniejszych skrótów, oznaczeń i jednostek.

### **1. Charakterystyka podjętego tematu pracy**

W otaczającym nas świecie, w którym emisja dwutlenku węgla i zanieczyszczenie środowiska są głównym problemem, samochody elektryczne stają się coraz bardziej atrakcyjne. W porównaniu z samochodami zasilanymi paliwami ropopochodnymi pojazdy elektryczne emitują mniej gazów cieplarnianych i zanieczyszczeń powietrza. Dzięki

postępowi technologicznemu samochody elektryczne poczyniły w ostatnich latach ogromne postępy. Prawie każdy większy światowy producent samochodów rozpoczyna obecnie opracowywanie całkowicie elektrycznych modeli. Z drugiej strony, klientów przyciąga również pomysł korzystania z samochodu elektrycznego.

Zalety samochodów elektrycznych, które mogą zadecydować o ich atrakcyjności w porównaniu do samochodów klasycznych można scharakteryzować w poniższy sposób:

1. Pojazd elektryczny generuje niższe koszty eksploatacji niż samochód tradycyjny,
2. Pojazd elektryczny mniej zanieczyszcza środowisko w porównaniu do tradycyjnego samochodu, ponieważ nie emituje spalin. Ponadto pojazd elektryczny można ładować przy użyciu energii odnawialnej, co zmniejsza emisję gazów cieplarnianych,
3. Samochód elektryczny ma niżej położony środek ciężkości, co poprawia jego stateczność i kierowalność. Ponadto jest znacznie cichszy od tradycyjnego samochodu i bardziej dynamiczny w ruchu miejskim z uwagi na korzystniejszą charakterystykę momentu obrotowego silnika elektrycznego.

Pojazd elektryczny to pojazd, który jest napędzany wyłącznie silnikiem elektrycznym. Zasobnikiem energii elektrycznej dostarczanej do napędu jest bateria wysokonapięciowa, która w przypadku wyczerpania energii wymaga cyklicznego ładowania za pośrednictwem złącza elektrycznego. Taki pojazd, w zależności od koncepcji konstruktora, może być wyposażony w jeden silnik elektryczny napędzający koła jednej osi lub wiele silników napędzających wybrane osie.

Coraz częściej rozważane są pojazdy elektryczne z silnikami wbudowanymi we wnętrzu obręczy koła jezdnego. Takie rozmieszczenie silników zwiększa bezwładność kół i mas nieresorowanych, wpływając na dynamikę ruchu pojazdu, sterowność, bezpieczeństwo i komfort użytkownika. Specyficzne są również wymagania dla stosowanych dla takiej koncepcji silników, które muszą mieć wysoki moment obrotowy, aby uruchomić i przyspieszyć pojazd. Wzrost mas nieresorowanych wpływa również na zachowanie pojazdu podczas hamowania, zwłaszcza na nawierzchniach o niejednorodnym współczynniku przyczepności. Dodatkowo z procesem hamowania związany jest problem sprawności procesu rekuperacji energii.

Recenzowana praca doktorska Pana mgr inż. Artura Kopczyńskiego doskonale wpisuje się w takie badania i analizy.

Celem pracy jest analiza rozkładu mocy w wielosilnikowych elektrycznych układach napędowych czterokołowych pojazdów drogowych. Zaplanowano weryfikację aspektów

związanych z różnicowaniem prędkości oraz rozkładem momentów na kołach pojazdu w kontekście stabilności jego ruchu z uwzględnieniem specyfiki sterowania silnikami elektrycznymi.

Autor pracy w konsekwencji przeprowadzonej analizy literatury stwierdza, że:

- nie opracowano jednolitych wytycznych w zakresie projektowania algorytmów sterowania wielosilnikowym elektrycznym układem napędowym,
- stabilność pojazdu wyposażonego w wielosilnikowy elektryczny układ napędowy podczas hamowania i pokonywania zakrętów nie została do tej pory kompleksowo zweryfikowana,
- zachodzi potrzeba zwiększenia efektywności odzysku energii z procesu hamowania pojazdu,
- wskazane jest określenie procedur oceny pojazdów o rozważanej konstrukcji.

Uzyskane spostrzeżenia upoważniły autora do zredagowania głównej tezy pracy:

„Poprzez odpowiedni dobór układu napędowego pojazdu i strategii sterowania możliwe jest zwiększenie jego efektywności energetycznej oraz poprawa parametrów trakcyjnych w warunkach dynamicznych, ze szczególnym uwzględnieniem hamowania odzyskowego”.

Autor sformułował również hipotezy pomocnicze pracy:

1. Możliwe jest odwzorowanie parametrów pracy klasycznego mechanizmu różnicowego w wielosilnikowym elektrycznym układzie napędowym poprzez sterowanie silnikami trakcyjnymi.
2. Strategia sterowania wielosilnikowym elektrycznym układem napędowym wpływa na właściwości trakcyjne pojazdu.
3. Pojazdy z wielosilnikowymi układami napędowymi wykazują różne właściwości trakcyjne w zależności od konfiguracji napędu.
4. Konfiguracja wielosilnikowego układu napędowego ma duży wpływ na możliwość odzyskania energii z procesu hamowania.

W konsekwencji sformułowanych hipotez zaplanowano realizację zadań celem ich udowodnienia:

1. Analiza sił działających na każde z kół jezdnych pojazdu w warunkach dynamicznych.

2. Opracowanie modelu symulacyjnego pojazdu czterokołowego z wielosilnikowym elektrycznym układem napędowym w celu analizy jego parametrów dynamicznych (trakcyjnych).
3. Badania symulacyjne wybranych konstrukcji układu napędowego w celu określenia właściwości dynamicznych pojazdu.
4. Opracowanie strategii rozdziału momentów napędowych i hamujących dla pojazdów wielosilnikowych.
5. Przygotowanie stanowiska laboratoryjnego i weryfikacja doświadczalna zaproponowanej strategii sterowania napędem wielosilnikowym.
6. Budowa prototypowego pojazdu i zaimplementowanie opracowanego systemu sterowania.
7. Przegląd czynników wpływających na efektywność odzyskiwania energii w pojazdach z wielosilnikowym układem napędowym.

Zgodnie z przyjętym planem realizacyjnym przedstawiono przebieg badań i uzyskane efekty. W rozdziale czwartym opisano zbadany teoretycznie wpływ odkształcalności opony na tor jazdy pojazdu. Ustalono, że w zależności od wykonywanego manewru zmieniają się obciążenia pionowe na każdym z kół, co bezpośrednio wpływa na zdolność danego koła do przenoszenia momentu napędowego lub hamowania.

W rozdziale piątym zaproponowano model pojazdu o ośmiu stopniach swobody w którym uwzględniono przechył nadwozia i związane z tym zmiany obciążeń pionowych na poszczególnych kołach pojazdu, w tym wpływ sztywności i tłumienia zawieszenia. Opisano również nieliniowe modele elementów układu napędowego oraz dwa typy maszyn elektrycznych z układami sterowania. Na podstawie tych modeli matematycznych opracowano modele symulacyjne w środowisku Matlab Simulink. Stwierdzono, że opracowana i użyta metoda badań w stopniu wystarczającym może posłużyć badaczom do oceny właściwości wielosilnikowych układów napędowych oraz algorytmów ich sterowania.

W rozdziale szóstym przedstawiono badania stanowiskowe, w trakcie których rejestrowano przebiegi prędkości obrotowych i prądów elektrycznych silników napędowych, a następnie porównywano zadane parametry z parametrami zmierzonymi. Stwierdzono, że zaproponowany algorytm pozwoli sterować wielosilnikowym zespołem napędowym. Niedoskonałością stanowiska był brak połączenia kinematycznego pomiędzy obydwoma zespołami silników oraz niemożność uwzględnienia właściwości opony pneumatycznej.

W rozdziale siódmym przedstawiono badania symulacyjne w środowisku Matlab Simulink pojazdu z kołami napędzanymi niezależnie. Badano pojazd zmieniając sposób jego napędzania (napędzając wszystkie koła i odpowiednio koła przednie oraz koła tylne). Przeprowadzono analizę parametrów dynamicznych wpływających na trajektorię ruchu pojazdu i potwierdzono poprawność działania modelu symulacyjnego. W czasie badań oceniano również wpływ rozkładu masy oraz położenie środka ciężkości. W rozdziale siódmym zbadano również zachowanie pojazdu w sytuacji awarii silnika napędowego podczas ruchu prostoliniowego oraz podczas pokonywania zakrętów.

W rozdziale ósmym omówiono trzy strategie rozdziału momentów napędowego i hamującego pomiędzy przednimi i tylnymi kołami pojazdu. Pierwsza strategia zakładała rozkład równomierny, druga aktywna oparta na przyspieszeniu chwilowym, a trzecia proporcjonalna. Z przeprowadzonych badań wynika, że równomierny rozkład momentów był najmniej korzystny, gdyż powodował największy poślizg na kołach. Najlepsze właściwości wykazała metoda aktywna, która pozwala zminimalizować różnicę w poślizgu występującą na poszczególnych kołach oraz ograniczyć ich wartości szczytowe. Przedstawione badania ograniczały się jedynie do symulacji manewru przyspieszenia pojazdu na prostym odcinku drogi.

W rozdziale dziewiątym omówiono efektywność odzysku energii. Rozważania ograniczono do identyfikacji i pogrupowania czynników wpływających na efektywność odzysku energii. Stwierdzono, że napędzanie wszystkich kół pojazdu daje największy potencjał odzyskiwania energii w procesie hamowania.

W rozdziale dziesiątym przedstawiono prototyp pojazdu z elektrycznymi silnikami napędzającymi koła przednie oraz najważniejsze aspekty związane z takim przedsięwzięciem jak jego zaprojektowanie, budowę i weryfikacją doświadczalną. Jednym z efektów badań była zadawalająca szybkość odpowiedzi silników trakcyjnych na nastawiane przez kierującego dane wejściowe.

### **Ocena pracy i uwagi krytyczne**

Jak wynika z przedstawionego wyżej opisu wybranych rozdziałów praca ma ciekawy i oryginalny charakter a jej wykonanie wymagało od Autora posiadania wiedzy z zakresu mechaniki i energochłonności ruchu pojazdu o napędzie elektrycznym, ale także dysponowania informacjami związanymi ze sterowaniem takiego napędu oraz współczesnymi technikami badawczymi.

Autor rozprawy zajmując się zagadnieniem układów napędowych pojazdów elektrycznych wpisuje się w nurt współczesnych prac badawczych wpływających na redukcję zużycia paliw kopalnych oraz emisji gazów toksycznych. W szczególności przeprowadzone badania symulacyjne i stanowiskowe złożonych procesów sterowania autorskiego wielosilnikowego układu napędowego przyczyniły się do poszerzenia wiedzy i rozpoznania zjawisk towarzyszących sterowaniu napędem pojazdu elektrycznego.

Wybór badań i stosowanych procedur, między innymi symulacyjnych oceniam jako trafny i logiczny. Uzyskane zależności mają charakter poznawczy i użyteczny. Autor rozprawy prezentując konkretne, autorskie rozwiązania techniczne, weryfikując je, zrealizował postawione sobie cele rozprawy. Praca pod względem redakcyjnym jest napisana bardzo starannie a terminologia poza kilkoma wyjątkami poprawna. Zauważone uchybienia przedstawiono w dalszej części recenzji.

Praca, jak zauważono wcześniej, ma charakter eksperymentalno – pomiarowy, a tego typu analizy zazwyczaj dają powód do merytorycznych dyskusji, pytań i uwag, z których wymieniono kilka:

1. Teza główna ma charakter zbyt ogólny, jednakże autor rozwija ją w tezach pomocniczych.
2. W odniesieniu do tezy drugiej można stwierdzić w jej zamyśle oczywistość. Bowiem każda strategia sterowania ruchem pojazdu wpływa w jakiś tam sposób na właściwości trakcyjne pojazdu (lepiej lub gorzej).
3. W odniesieniu do tezy czwartej autor pisząc o możliwości odzyskania energii z procesu hamowania miał chyba na myśli wpływ konfiguracji układu napędowego na ewentualny potencjał jaki mogą zaoferować silniki elektryczne umieszczone w obręczach kół jezdnych. W takim ujęciu o zagadnieniu autor pisze we wnioskach końcowych.
4. Właściwości trakcyjne pojazdu definiowane w teorii ruchu pojazdu określają takie parametry jak np.: prędkość maksymalna, przyspieszenie osiągnięte podczas procesu rozpędzania, czas rozpędzania, zależność siły napędowej na kołach od prędkości jazdy. Są one wykorzystywane najczęściej do porównań z innymi pojazdami lub rozwiązaniami układu napędowego. Czy autor, mając na uwadze powyższe, również traktuje podobnie przytoczone właściwości oraz czy dokonywał porównań (odniesień) swojego rozwiązania z innymi twierdząc że „zastosowanie niezależnego układu napędowego pozwala osiągnąć poprawę własności trakcyjnych”?

5. W uzasadnieniu podejmowanego tematu, autor w efekcie przeanalizowanej literatury stwierdza, że jak dotąd „nie opracowano jednolitych wytycznych w zakresie projektowania algorytmów sterowania wielosilnikowymi elektrycznym układem napędowym”. Czy wytyczne o takim charakterze (uniwersalne) są możliwe do opracowania? Czy autor podjął próbę opracowania takich wytycznych?
6. W uzasadnieniu podejmowanego tematu, autor pisze o celowości stworzenia procedur oceny pojazdów o przedmiotowej konstrukcji. W dalszej części pracy nie stwierdzono rozważań na ten temat.
7. W uzasadnieniu podejmowanego tematu, autor przytacza następujące spostrzeżenie „większość opracowań dotyczy głównie reagowania w sytuacjach utraty stabilności pojazdu, ale nie zapewnia odpowiedniej kontroli, aby zapobiec wystąpieniu sytuacji niebezpiecznych”. Jakże zatem jest stanowisko autora wynikające z jego doświadczeń przy budowaniu algorytmu sterowania co do kwestii predykcji sytuacji przed wystąpieniem utraty stateczności i kierowności pojazdu.
8. Wyjaśnienia wymaga kwestia pojmowanej przez autora reakcji układu sterowania układem napędowym w kontekście sytuacji powstania awarii silnika elektrycznego umieszczonego w obręczy koła i dalszych konsekwencji takiego stanu.
9. Wyjaśnienia wymaga kwestia takich pojęć jak sterowność i stabilność pojazdu które autor stosuje do analizy reakcji analizowanego pojazdu w przypadkach analizy różnych wersji napędu oraz w przypadku awarii o której mowa w punkcie 7 uwag.

#### 4. Wniosek końcowy

Stwierdzam, że mgr inż. Artur Kopczyński posiada umiejętność samodzielnego rozwiązywania złożonych problemów naukowych a przedstawiona do oceny praca pt.: „Power distribution in multi-motor power trains in electric road vehicles”, spełnienia w stopniu wystarczającym warunki określone w Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 z późniejszymi zmianami oraz w Ustawach Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 roku z późniejszymi zmianami oraz Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 3 lipca 2018 z późniejszymi zmianami.

Mając na uwadze powyższe stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony przed Radą Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej.

