

O C E N A
rozprawy doktorskiej mgr. inż. Artura Kopczyńskiego
pt.: „Power distribution in multi-motor power trains in electric road
vehicles” (Rozdział mocy w wielosilnikowych napędach elektrycznych
pojazdów drogowych)

podstawa opracowania: pismo Dziekana Wydziału Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej SIMR.521.21.2022 z dnia 29.06.2022, do którego dołączono egzemplarz rozprawy doktorskiej wraz z dokumentami

1. UZASADNIENIE PODJĘCIA TEMATU ROZPRAWY

Ze względu na to, że transport jest najbardziej dynamicznie rozwijającą się dziedziną techniki, można zauważyć wiele weryfikacji konstrukcyjnych istniejących już maszyn, a także pojawianie się całkowicie nowych koncepcji. W związku z tym producenci pojazdów wprowadzają rozwiązania techniczne ograniczające ich negatywny wpływ na środowisko naturalne. Główną gałęzią transportu jest transport drogowy, choćby ze względu na liczbę użytkowanych pojazdów.

Od kilkudziesięciu lat prowadzone są intensywne prace nad nowymi, alternatywnymi konstrukcjami napędów pojazdów drogowych, zwłaszcza pojazdów elektrycznych i ich optymalizacją. Ciągły rozwój napędów pojazdów samochodowych jest spowodowany dążeniem do uzyskiwania coraz lepszych wskaźników pracy silnika przy jednoczesnym ograniczeniu skażenia środowiska naturalnego. Dynamiczny rozwój rynku pojazdów o napędzie elektrycznym (w dalszej części określanym mianem pojazdów elektrycznych) w Europie ma swoje odzwierciedlenie również w Polsce, gdzie odnotowuje się znaczące zainteresowanie tego typu pojazdami.

Zgodnie z danymi zawartymi w raporcie niezależnej firmy analitycznej Canalys, w pierwszej połowie 2021 roku sprzedano 2,6 mln pojazdów elektrycznych (w tym pojazdów hybrydowych typu plug-in), czyli 160% więcej niż w tym samym okresie 2020 roku. Wskaźniki sprzedaży samochodów elektrycznych przekroczyły znacznie zakładane wartości notowane w całkowitej sprzedaży uzyskanej w branży samochodowej. W niektórych krajach europejskich pojazdy elektryczne stanowią ponad 25% sprzedawanych tam nowych pojazdów samochodowych. Norwegia pozostaje światowym liderem, gdzie udział pojazdów elektrycznych w sprzedaży nowych samochodów przekracza 80%. Firmy poszerzają swoją ofertę pojazdów elektrycznych, zapewniając konsumentom coraz większy wybór. Unia Europejska ustaliła docelowe poziomy emisji składników szkodliwych spalin dla producentów samochodów, które coraz trudniej są do spełnienia przez silniki spalinowe. W konsekwencji

tego, poszczególne kraje europejskie oferują zachęty dla nabywców celem nakłonienia ich do kupna pojazdów elektrycznych, wprowadzając jednocześnie odpowiednie regulacje prawne dotyczące zakazu sprzedaży pojazdów z silnikiem spalinowym. Dlatego wszelkie prace związane z nowymi konstrukcjami i udoskonaleniami tego typu silników są zasadne i konieczne.

Mgr inż. Artur Kopczyński w swojej rozprawie doktorskiej podjął aktualny i istotny problem o charakterze naukowym i utylitarnym, związany z analizą procesu rozdziału mocy w wielosilnikowych napędach elektrycznych pojazdów drogowych. Badania naukowe nad tego rodzaju konstrukcjami są prowadzone przez szereg ośrodków naukowo-badawczych, jednakże lektura publikacji naukowych wykazuje, że naukowcy i inżynierowie koncentrowali się do tej pory głównie na analizach symulacyjnych oraz modelowaniu matematycznym. Deficyt prac poświęconych badaniom empirycznym potwierdza słuszność podjętej przez Autora problematyki badawczej i wskazuje, że tematyka, zakres oraz cele przedstawione w pracy zostały zdefiniowane trafnie.

W świetle wymienionych aspektów uważam, że podjęta przez Autora problematyka jest istotna i wnosi nowość w zakresie badań nad systemami napędowymi w elektrycznych pojazdach drogowych. Biorąc pod uwagę współczesny stan wiedzy światowej na temat podjętego zagadnienia uważam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Artura Kopczyńskiego stanowi oryginalne osiągnięcie Autora i wnosi ważne aspekty do analiz, badań oraz konstrukcji nad rozdziałem mocy w wielosilnikowych napędach elektrycznych pojazdów drogowych.

Postawione zadanie naukowe spełnia wymagania stawiane rozprawie doktorskiej. Tematyka rozprawy jest aktualna i zgodna z kierunkami badań nad rozwojem alternatywnych napędów w pojazdach drogowych, w aspekcie poprawy osiągnięć i w szczególności mających na celu zmniejszenie zużycia energii.

2. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA ROZPRAWY

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska jest zawarta na 253 stronach maszynopisu. Praca została podzielona na 12 zasadniczych rozdziałów. Treść obejmuje również streszczenie w języku angielskim i polskim, wykaz zastosowanych skrótów oraz symboli i wykaz literatury oraz 5 załączników. Bibliografię stanowi 154 pozycji o charakterze naukowym i poznanym, obejmujących tematykę badawczą rozprawy. Uwzględniono w nich artykuły naukowe w języku polskim i angielskim. Na uwagę zasługuje cytowanie przez Autora wielu relatywnie nowych publikacji anglojęzycznych. Potwierdza to aktualność podjętej problematyki i świadczy o rzetelnym przeglądzie literatury dokonany przez Doktoranta. Cała dysertacja została napisana poprawnym i precyzyjnym językiem technicznym.

Celem poznawczym pracy była analiza strategii sterowania mocą w wielosilnikowych napędach elektrycznych pojazdów drogowych pod kątem zwiększenia efektywności energetycznej i parametrów trakcyjnych w warunkach dynamicznych, z uwzględnieniem hamowania odzyskowego.

Autor sformułował dodatkowe hipotezy robocze, mówiące że:

- Możliwe jest odwzorowanie parametrów pracy klasycznego mechanizmu różnicowego w wielosilnikowym napędzie elektrycznym na drodze sterowania silnikami trakcyjnymi.
- Strategia sterowania wielosilnikowym napędem elektrycznym wpływa na właściwości trakcyjne pojazdu.
- Pojazdy o wielosilnikowych układach napędowych wykazują różne właściwości trakcyjne w zależności od konfiguracji napędu.
- Konfiguracja wielosilnikowego napędu elektrycznego w dużym stopniu wpływa na możliwość rekuperacji energii z procesu hamowania.

W pracy przeanalizowano różne aspekty związane z napędami wielosilnikowymi o niezależnym napędzie kół (IWD z ang. *Individual Wheel Drive*) i o niezależnym napędzie osi (IAD z ang. *Individual Axle Drive*). Po analizie teoretycznej, Autor zbudował modele obliczeniowe i przeprowadził symulacje komputerowe dla zweryfikowania właściwości pojazdów o różnych konfiguracjach napędu. Następnie zaproponował różne strategie sterowania napędem wielosilnikowym, z uwzględnieniem czynników wpływających na efektywność rekuperacji energii. Na zakończenie tego procesu opracował i uruchomił prototypowy pojazd o napędzie wielosilnikowym wraz z autorskim algorytmem sterowania.

W zakresie rozważań teoretycznych zweryfikowano główne czynniki mające wpływ na kinematykę pojazdu. Poprawę właściwości trakcyjnych pojazdu można osiągnąć przez napęd IWD, który w sposób dowolny pozwala na sterowanie momentem poszczególnych kół napędowych.

W zakresie analizy dynamiki samochodu zaproponowano model pojazdu czterokołowego o 8 stopniach swobody (8DOF z ang. *8 Degree of Freedom*). Model został uzupełniony o modele komponentów układu napędowego, takie jak np. silnik synchroniczny z magnesami trwałymi wraz z układami regulacji i o model opony. Wykazano, że pojazd z aktywnym różnicowaniem prędkości ma większą stateczność ruchu w porównaniu do pojazdu bez aktywnego sterowania. Zweryfikowano poprawność algorytmu różnicowania prędkości w niezależnym napędzie kół opartego na odzwierciedleniu zależności kinematycznych pojazdu.

Wykazano, że możliwe jest poprawienie właściwości trakcyjnych pojazdu o napędzie wielosilnikowym przez zastosowanie alternatywnych metod rozdziału momentów napędowych pomiędzy osiami kół. Najlepsze wyniki w tym zakresie uzyskano dla metody aktywnego rozdziału w oparciu o chwilową wartość przyspieszenia wzdłużnego.

Zidentyfikowano i uszeregowano czynniki mające wpływ na efektywność rekuperacji energii, z których najważniejsze to profil hamowania i sumaryczna sprawność komponentów układu napędowego. Wykazano, że samochody z napędem na wszystkie koła mają największy potencjał do odzysku energii z procesu hamowania, ale wymagają kontrolowania dystrybucji momentu hamującego, aby uniknąć utraty stateczności.

Ostatnim aspektem przedstawionym w pracy jest opracowanie i uruchomienie prototypowego pojazdu o napędzie wielosilnikowym. Zaproponowana topologia układu sterowania pozwoliła na osiągnięcie pełnej funkcjonalności napędu. Uzyskano dobre szybkości odpowiedzi silników trakcyjnych na zadane przez kierowcę wymuszenia. Oznacza to, że czas obliczeniowy programu z algorytmem sterowania jest krótki. Ta właściwość powinna w przyszłości pozwolić na badania algorytmów stabilizacji toru jazdy.

3. OCENA ROZPRAWY

Uwagi ogólne

Rozprawę oceniam bardzo wysoko pod względem merytorycznym i metodycznym. Praca zawiera pojedyncze błędy i niedociągnięcia, które nie rzutują na jej ogólną wysoką ocenę. Układ rozprawy jest logiczny i odpowiada tokowi wykonanych badań oraz analiz. W pracy prawidłowo przedstawiono ciąg czynności badawczych w sposób charakterystyczny dla rozpraw doktorskich. Podział treści rozprawy i kolejność rozdziałów są przejrzyste oraz nie budzą zastrzeżeń. Praca nie zawiera powtórzeń i błędów logicznych. Rozprawa została napisana wyjątkowo starannie z wykorzystaniem poprawnego języka technicznego. Ponadto rozprawa jest napisana w języku angielskim, co bardzo ułatwi jej promocję na rynku światowym. Wykorzystane pojęcia i terminologia są używane właściwie. Przedstawione w pracy rysunki i tabele zostały opracowane bardzo dokładnie, z dbałością o czytelność zamieszczonego w nich tekstu. Materiały ilustracyjne w części teoretycznej dobrze uzupełniają opisywane treści. Na uwagę zasługuje precyzyjne sformułowanie celów badawczych i zakresu

pracy. Doktorant wykonał eksperymenty i analizy, które stanowią wartość naukową, jak również użyteczną.

Zalety pracy:

- Praca wpisuje się w aktualne tendencje rozwoju alternatywnych napędów pojazdów drogowych z jednoczesną poprawą jego osiągnięć, w tym minimalizacją zużycia energii.
- Opracowanie modeli symulacyjnych do analizy strategii sterowania i parametrów trakcyjnych różnych konfiguracji wielosilnikowych układów napędowych.
- Określenie właściwości poszczególnych napędów wielosilnikowych na drodze badań symulacyjnych.
- Opracowanie i zweryfikowanie różnych strategii sterowania napędem wielosilnikowym.
- Zmodernizowanie stanowiska laboratoryjnego i wykazanie możliwości odzwierciedlenia pracy mechanizmu różnicowego na drodze odpowiedniego sterowania napędem wielosilnikowym o niezależnym napędzie kół.
- Zidentyfikowanie i pogrupowanie czynników mających wpływ na efektywność odzysku energii z procesu hamowania.
- Opracowanie koncepcji i wykonanie prototypowego pojazdu o napędzie wielosilnikowym zarządzanego przez autorską strategię sterowania wraz z uzyskaniem oraz zweryfikowaniem pełnej funkcjonalności napędu.
- Na podstawie wszystkich przeprowadzonych analiz można stwierdzić z całą pewnością, że napędy wielosilnikowe mają wiele unikatowych właściwości i dalsze badania w tym zakresie znajdują uzasadnienie badawcze, naukowe oraz ekonomiczne.
- Wykazano możliwość implementacji zaproponowanego algorytmu sterowania napędem w prototypowym pojeździe wraz z całą infrastrukturą niezbędną do jego prawidłowej realizacji.
- Pojazd z napędem AWD ma największy potencjał do odzysku energii.

O wysokiej wartości merytorycznej pracy świadczą również:

- właściwe uzasadnienie podjętej tematyki poprzedzone szeroką analizą stanu wiedzy,
- trafne zdefiniowanie celu i zakresu pracy,
- oryginalność uzyskanych wyników badań,
- wykorzystanie zaawansowanej analizy matematycznej do przetwarzania zarejestrowanych danych,
- logiczna i przejrzysta struktura pracy.

W trakcie realizacji rozprawy Doktorant wykazał się dobrym przygotowaniem do pracy naukowej, w szczególności znajomością zagadnień teoretycznych poświęconych napędom pojazdów elektrycznych, teorii sterowania silnikami elektrycznymi, umiejętnością wykorzystania współczesnych metod pomiarowych i symulacyjnych w badaniach systemów napędowych oraz umiejętnością zaawansowanej matematycznej analizy danych.

Uwagi krytyczne

Pomimo bardzo wysokiej oceny merytorycznej rozprawy doktorskiej pojawiają się drobne uwagi i wątpliwości, niektóre o charakterze dyskusyjnym, mające charakter krytyczny:

1. W wyniku przeglądu literaturowego autor stwierdza, że: „Różnorodność współczesnych układów napędowych pojazdów elektrycznych stwarza konieczność zdefiniowania procedur do ich oceny.” Czy Autor próbował opracować takie procedury?
2. W przeglądzie literaturowym Autor odwołuje się do znanych algorytmów kontroli trakcji pojazdu o niezależnym napędzie kół, jednak w swoich badaniach nie podejmuje próby zastosowania takiego algorytmu tylko proponuje własne.

3. W badaniach symulacyjnych niezależnie od konfiguracji napędu wielosilnikowego założono tę samą masę pojazdu. Zapewne pojazd wyposażony w cztery silniki napędowe będzie cięższy od analogicznego wyposażonego jedynie w dwa. Co było przyczyną takiego wyboru?
4. W zaproponowanym modelu symulacyjnym pojazdu zastosowano uproszczenia w zakresie geometrii zawieszenia oraz pominięto drgania pionowe nadwozia jak i poszczególnych kół. Ponadto, modele te nie zostały poddane walidacji z obiektami rzeczywistymi. Również niektóre dane przyjęte w symulacjach, jak np. współczynniki modelu opony nie odpowiadają dokładnie tym oponom zastosowanym w pojeździe opisanym w rozdziale 10.
5. Zastosowany w pracy model silnika synchronicznego nie uwzględnia obszaru pracy przy osłabianiu strumienia magnetycznego pochodzącego od magnesów trwałych. W rozdziale 10 wskazano na możliwość pracy silników napędowych pojazdu w tym obszarze.
6. Ograniczeniem stanowiska opisanego w rozdziale 6 jest brak kinematycznego połączenia pomiędzy oboma zestawami silników, jak również brak możliwości odzwierciedlenia właściwości koła ogumionego.
7. W badaniach zaprezentowanych w rozdziale 7 jako główne kryterium porównawcze Autor wykorzystuje odchylenie rzeczywistej trajektorii ruchu pojazdu od idealnej wynikającej z kinematyki. Czy Autor zakładał wykorzystanie innych parametrów, jak np. prędkość maksymalna pojazdu podczas rozpatrywanego manewru, do oceny właściwości trakcyjnych analizowanych konfiguracji układu napędowego?
8. Badania zaprezentowane w rozdziale 8 ograniczono jedynie do symulacji manewru rozpędzania pojazdu na odcinku prostym drogi. Dla ruchu krzywoliniowego należy uwzględnić dodatkowe czynniki, jak np. przyspieszenie poprzeczne, czy prędkość kątowna pojazdu wokół osi z. Czy Autor rozpatrywał wykonanie takich analiz?
9. W rozdziale 9 autor wskazał na konieczność monitorowania stateczności ruchu pojazdu podczas hamowania odzyskowego oraz na wymaganą w niektórych sytuacjach współpracę systemów hamowania odzyskowego z hamulcami ciernymi. W pracy nie przedstawiono wyników wskazujących na analizę współpracy obu układów hamulcowych.

Pozostałe uwagi ogólne:

1. Znaczna objętość dysertacji, wynikająca m.in. z „podręcznikowego” charakteru niektórych rozdziałów.
2. Mimo bardzo starannego zredagowania rozdziału „12. Conclusion”, sugerowałbym bardziej przejrzyste zakończenie pracy przez dodanie syntetycznych wniosków w następującej konfiguracji:
 - ogólne (zrealizowanie celów pracy i czy udowodniono tezy),
 - szczegółowe,
 - metodyczne,
 - utylitarne,
 - perspektywiczne (kierunki dalszych badań).
3. W pracy występuje tzw. „tekst wiszący”, poniżej wyjaśnienie ogólne problemu:
 - przy numeracji cyfrowej wielorzędowej po tytule rozdziału 1 powinien od razu następować tytuł podrozdziału 1.1, a tuż po tytule podrozdziału 1.6 powinien być tytuł podrozdziału 1.6.1 itd.; między nimi nie powinno być żadnego tekstu,
 - w pracy Autora występuje taki tekst w: 4.3 → 4.3.1; 4.4 → 4.4.1; 10 → 10.1;

Podsumowanie oceny merytorycznej

Pomimo wymienionych powyżej drobnych uwag krytycznych i sugestii bardzo wysoko oceniam poziom merytoryczny rozprawy doktorskiej. Na szczególną uwagę zasługuje szeroki zakres wykonanej pracy, trafność podjętej tematyki badawczej i duży wkład intelektualny

Autora. Wymienione uwagi krytyczne, niektóre o charakterze dyskusyjnym, nie umniejszają mojej wysokiej oceny recenzowanej pracy.

Przedstawiona rozprawa zawiera ważne treści poznawcze i praktyczne. Badania przedstawione w pracy zwróciły uwagę na duże znaczenie strategii rozdziału mocy wielosilnikowych napędach elektrycznych pojazdów. Przeprowadzona przez Doktoranta analiza wskazuje na korzyści związane z tą strategią sterowania dla poprawy efektywności energetycznej i parametrów trakcyjnych w warunkach dynamicznych, z uwzględnieniem hamowania odzyskowego.

Uważam, że opracowany przez Autora materiał literaturowy i badawczy zostały użyte we właściwy sposób. Opracowane przez Doktoranta wyniki i przedstawione analizy świadczą o rzetelności oraz jego wnikliwości badawczej. Rozprawa doktorska przedstawiona do oceny może zostać uznana za oryginalne dzieło wnoszące duży wkład i mające duże znaczenie dla rozwoju nowych konstrukcji pojazdów elektrycznych.

Autor podjął się trudnej problematyki naukowej i wykorzystał złożoną metodologię badawczą. Przedstawione w pracy zagadnienia nie wyczerpują wszystkich zagadnień związanych z analizą rozdziału mocy w wielosilnikowych napędach elektrycznych pojazdów, ponieważ zależy ona od szeregu czynników zewnętrznych i parametrów sterujących pracą pojazdu drogowego. Obecny stan wiedzy nie pozwala na pełną ocenę wpływu tych czynników i parametrów na tę strategię. Wskazuje to na konieczność prowadzenia dalszych badań w tym zakresie.

Ponadto, biorąc powyższe po uwagę, proponuję uzupełnić przedmiotową dysertację o topologię elektrycznych układów napędowych i po wyeliminowaniu fragmentów koniecznych w pracy doktorskiej oraz w przyszłości ujęcie całości wiedzy związanej z systemami napędów elektrycznych w jednej pozycji książkowej.

4. PODSUMOWANIE

Na podstawie analizy przedstawionej do oceny rozprawy doktorskiej stwierdzam, że:

- Autor dokonał wyjątkowo trafnego wyboru tematyki swojej pracy, a jej zakres spełnia stawiane wymagania,
- zasadnicze cele pracy zostały w pełni osiągnięte w zakresie przyjętym przez Doktoranta, bowiem uzasadnione zostały twierdzenia Autora ujęte w tezach pracy, a prezentowane wyniki są uzyskane w poprawnie przeprowadzonych studiach i eksperymentach własnych i mogą służyć do dalszych prac,
- formalny układ pracy jest prawidłowy,
- dysertacja dobrze nawiązuje do aktualnej wiedzy i praktyki, a w niektórych elementach wnosi do nich nowe treści,
- znaczna akumulacja należycie ustalonych faktów sprawia, że zostało spełnione kryterium logicznej poprawności pracy.

Powyższe fakty świadczą o kompetencjach Doktoranta w zakresie samodzielnego prowadzenia badań naukowych i wskazują na Jego dużą wiedzę ogólną oraz umiejętności praktyczne w dyscyplinie naukowej „Inżynieria Mechaniczna”, w której mieszczą się zagadnienia objęte rozprawą.

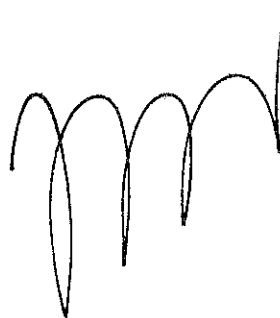
Stwierdzam zatem, że praca mgr. inż. Artura Kopczyńskiego pt.: „Power distribution in multi-motor power trains in electric road vehicles” (promotor: prof. dr hab. inż. Antoni Szumanowski; promotor pomocniczy: dr inż. Arkadiusz Hajduga, prof. PW) spełnia wymagania określone dla tego typu prac, zgodnie z Ustawą z 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. z 2003 r., nr 65, poz. 595, z późn. zm.) w zw. z art. 179 Ustawy z dnia 3 lipca

2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U.2020.1086 z późn. zm.), a Autor może być dopuszczony do jej publicznej obrony.

Usterki pracy są nieliczne, drugorzędne i nie wpływają na moją pozytywną ocenę pod względem postawienia problemu badawczego, zrealizowania programu badań doświadczalnych, analizy wyników i napisania przejrzystej rozprawy naukowej.

Dlatego stawiam wniosek o wyróżnienie tej pracy, ze względu na:

1. Ważny, aktualny i oryginalny w skali światowej problem badawczy;
2. Wnikliwe przeanalizowanie bardzo złożonego problemu naukowego, dotyczącego zagadnienia rozdziału mocy w wielosilnikowych napędach elektrycznych pojazdów drogowych. Zakres pracy i poziom warsztatu naukowego przewyższa wartości uznawane powszechnie za standardowe;
3. Uzyskanie oryginalnych wyników naukowych o dużych wartościach poznawczych, z perspektywą ich wykorzystania w praktyce, w działaniach związanych z konstrukcją systemów napędowych pojazdów elektrycznych.

A handwritten signature in black ink, consisting of several overlapping loops and a final vertical stroke on the right side.