

Prof. dr hab. inż. Robert Stala
Akademia Górniczo-Hutnicza im S. Staszica w Krakowie,
Al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

Kraków, 31 grudnia 2025

RECENZJA

rozprawy doktorskiej pt. „Opracowanie algorytmów optymalizujących wykorzystanie bateryjnych lub superkondensatorowych zasobników energii wraz z energoelektronicznymi układami konwersji mocy w systemie elektromobilnego transportu celem poprawy parametrów zasilania”, mgr. inż. Rafała Jacukowicza. Promotorem jest dr hab. inż. Dariusz Borkowski, prof. PK. Recenzja zrealizowana na podstawie pisma Dziekana Wydziału Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechniki Krakowskiej dr. hab. inż. Macieja Sułowicza, prof. PK, E-00.510.3.2025 z dnia 21.10.2025 roku o powołaniu na recenzenta rozprawy doktorskiej mgr. inż. Rafała Jacukowicza.

1. Struktura rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska pt. „Opracowanie algorytmów optymalizujących wykorzystanie bateryjnych lub superkondensatorowych zasobników energii wraz z energoelektronicznymi układami konwersji mocy w systemie elektromobilnego transportu celem poprawy parametrów zasilania”, obejmuje 8 rozdziałów zawartych na 102 stronach, 83 pozycje bibliograficzne, spis treści i listę skrótów. Praca została zrealizowana w ramach programu Doktorat Wdrożeniowy, umowa DWD/4/25/2020. Rozprawa w wersji dostarczonej do recenzji nie zawiera streszczenia w języku angielskim, jednak zgodnie z treścią Uchwały Senatu Politechniki Krakowskiej im. Tadeusza Kościuszki z dnia 13 grudnia 2023 r. nr 87/n/12/2023 r., z późn. zmianami (Uchwała nr 21/n/02/2024 z 28 lutego 2024 r.) „Tryb działania i sposób postępowania w sprawie nadania stopnia doktora i doktora habilitowanego” Kandydat do wniosku składanego do przewodniczącego rady naukowej wydziału o wszczęcie postępowania o nadanie stopnia doktora, dołącza streszczenie rozprawy w języku angielskim, a do rozprawy doktorskiej przygotowanej w języku obcym również streszczenie w języku polskim w wersji papierowej oraz w wersji elektronicznej (cytat niedosłowny).

Rozdział pierwszy rozprawy doktorskiej „Wprowadzenie” zawiera istotne podrozdziały takie jak „Cel i zakres pracy”, oraz „Hipotezy badawcze”. Autor określił tu następujące cele badawcze:

- analizę systemów trakcyjnych prądu stałego z uwzględnieniem procesu hamowania rekuperacyjne innego i ograniczonej receptywności sieci,
- budowę modeli obwodowych oraz algorytmów optymalizacji rozmieszczenia i parametrów przytorowych zasobników energii,
- przeprowadzenie badań symulacyjnych pozwalających na ocenę wpływu magazynów energii na parametry pracy systemu,

a także cele wdrożeniowe:

- analizę i ocenę rzeczywistej realizacji komercyjnego systemu przytorowego zasobnika energii,
- implementację i testy algorytmów w kontekście wdrożeniowym,
- weryfikację wyników badań symulacyjnych poprzez porównanie z obserwacjami eksploatacyjnymi.

Autor postawił następujące hipotezy badawcze:

Hipoteza 1: Zastosowanie optymalizacji parametrycznej modeli systemu trakcyjnego z przytorowymi zasobnikami energii pozwala na praktyczne wykorzystanie wyników analiz w procesie projektowania tego typu systemów.

Hipoteza 2: Odpowiednie rozmieszczenie oraz właściwy dobór progów zadziałania przytorowych zasobników energii poprawia parametry zasilania linii trakcyjnej poprzez ograniczenie strat, przeciążeń podstacji i stabilizację napięcia.

Hipoteza druga określa związek parametrów systemu z zasobnikami energii i oczekiwanych skutków i jest właściwie sformułowana i weryfikowalna. Hipoteza pierwsza odnosi się do metody badawczej na etapie modelowania i jej wpływu na proces projektowania.

Cele do osiągnięcia określają precyzyjnie naukowe etapy prac związane z realizacją algorytmów i badań symulacyjnych, a także odpowiednie etapy wdrożeniowe.

Autor w rozdziale 1.3 przedstawił metodykę badań, z której wynika, że prowadzono badania symulacyjne w środowisku MATLAB, gdzie zamodelowano system i zaimplementowano procedury optymalizacji parametrycznej prowadzące do optymalizacji parametrów magazynów energii.

W pracy odniesiono się do literatury przedmiotu stanowiącej podstawy w takich obszarach jak, modelowanie matematyczne i numeryczne, techniki magazynowania energii, techniki sterowania magazynami energii w sieciach elektroenergetycznych, energoelektroniczne przekształtniki energii dla połączenia ESS z siecią elektroenergetyczną i algorytmy optymalizacji, a także literatury przedstawiającej wdrożenia ESS (Electrical Energy Storage – magazyn energii elektrycznej) w systemach trakcyjnych. W rozdziale zawierającym przegląd literatury autor rozprawy we właściwy sposób przedstawił lukę badawczą jaka w jego opinii wynika z analizy literatury, wskazując na potrzebę prowadzenia kompleksowych badań modelowania sieci, ruchu pojazdów, zasobników z przekształtnikami wraz z badaniami praktycznych algorytmów optymalizacji dla projektowania systemów z przytorowymi zasobnikami energii. W rozdziale tym autor charakteryzuje również uznane w branży inżynierskiej programy wykorzystywane do symulacji ruchu pociągów oraz mocy sieci trakcyjnej, wskazuje jednak na ograniczone możliwości wykorzystania takiego oprogramowania dla rozwiązania zadań optymalizacji obejmujące badania zawarte w rozprawie doktorskiej. Nieliczne przykłady systemów z magazynami energii w sieciach trakcyjnych oraz literaturowa analiza techniki niezbędnej dla realizacji systemów trakcyjnych z przytorowymi magazynami energii potwierdza, że jest to złożony, istotny i aktualny obszar badań o dużym potencjale naukowym. Zawarty w pracy przegląd literatury świadczy o znajomości przez autora stanu wiedzy z zagadnień jakie obejmują prace badawcze przedstawione w rozprawie doktorskiej.

Rozdział trzeci charakteryzuje techniki magazynowania energii o potencjale wykorzystania w systemach trakcyjnych, natomiast w rozdziale czwartym zamieszczono analizę wybranych technik energoelektronicznego przekształcania energii. Istotnym wstępnym wynikiem prezentowanym w rozdziale III są dane pomiarowe mocy podstacji oraz czasu trwania dostarczania i zwracania energii z podstacji do pojazdów, a także liczbę zdarzeń przyspieszania i hamowania odzyskowego pojazdów w mierzonej podstacji. Pozwala to na przyjęcie założeń, co do mocy i pojemności systemu magazynowania energii i strategii jego sterowania, jak słusznie zauważa autor uwzględniając aspekty techniczne i ekonomiczne zasobników i interfejsów energoelektronicznych wyznaczając jaką część mocy pojazdu w stanach dynamicznych należy uzyskać z zasobnika energii. Rozdział czwarty zawiera istotne dla dalszej dyskusji treści związane z podstawową wiedzą z energoelektroniki dotyczącą niez izolowanego przekształtnika DC-DC o topologii dwóch półmostków, opisywanego w rozprawie skrótem FSBB (Four-Switch Buck-Boost). Autor sygnalizuje tu również problem sterowania systemu DC-DC z magazynem energii przy przejściu pomiędzy trybami pracy podwyższania i obniżania napięcia, analizując sterowania dla trybu przejściowego. Kandydat do stopnia doktora uczestniczył w pracach eksperymentalnych i implementacyjnych, gdzie realizowano wyznaczenie współczynników wypełnienia dla mostków

układu FSBB zaproponowaną metodą. Zostało to przejrzysto zaprezentowane w rozdziale 4.1.2, a metoda obliczania współczynników wypełnienia tranzystorów przekształtnika bazuje na analizie stanu ustalonego przebiegu prądu dławika. W analizowanym przekształtniku można realizować kształtowanie prądu dławika przez wiele etapów sterowania w pojedynczym okresie pracy, co autor analizuje w kontekście wymaganego wzmocnienia układu. Analiza ta prowadzi do przedstawienia schematu algorytmu określającego selekcję stanu pracy przekształtnika determinującego sposób wyznaczenia współczynników wypełnienia sterowania tranzystorami układu.

Autor słusznie zwraca uwagę na konieczność uzupełnienia przedstawianej metody wyboru wyznaczania współczynników wypełnienia o przypadki wynikające z przeciwnego przepływu energii, co umożliwi sterowanie przekształtnikiem dwukierunkowym. Opracowany układ wyliczania współczynnika wypełnienia zostaje ulokowany w klasycznym układzie regulacji średniego prądu dławika z regulatorem proporcjonalno-całkującym z dodanym wejściem dla pomiaru napięcia wyjściowego. W tym rozdziale zamieszczono również wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych przekształtnika dedykowanego do współpracy z zasobnikami energii. Model symulacyjny zawierał trójfazowy układ FSBB z tranzystorami IGBT. Układ testowy został odpowiednio opracowany, dla badań pracy z obniżaniem oraz podwyższaniem napięcia podczas wymiany energii pomiędzy zasobnikami superkondensatorowymi. W rozprawie nie podano szczegółów dotyczących budowy przekształtnika eksperymentalnego, jednak w pracy zamieszczono wyniki badań przypadku testowania układu regulacji prądu dławika w systemie z dwoma zasobnikami energii. Wyniki analityczne, symulacyjne i eksperymentalne zamieszczone w tym rozdziale tworzą spójny zestaw wskazujący, że kandydat rozwiązał i przebadał problem techniczny regulacji przekształtnika o dwóch półmostkach do kontroli prądu dławika i mocy zasobników przy dwukierunkowym przepływie energii. Stanowi to pewną część wkładu naukowego jednak o niewielkiej złożoności problematyki związanej z analizą i regulacją układu energoelektronicznego, którego topologia należy do ugruntowanej wiedzy z obszaru energoelektroniki.

W dalszej części rozprawy, w rozdziale piątym przedstawiono opis badań modelowania systemu trakcji napięcia stałego z magazynami energii. Autor ponownie, prawidłowo uzasadnia tu korzyści jakie wynikają z konfiguracji sieci trakcyjnej z magazynami energii oraz powołuje się na literaturę charakteryzującą wybrane zagadnienia ze stanu wiedzy w tym obszarze. Modelowanie systemu trakcyjnego będzie prowadzić do weryfikacji „autorskich” algorytmów optymalizacji określających lokalizację i parametry ESS. Modelowanie matematyczne systemu zawiera model ruchu pojazdów wraz z odpowiednimi założeniami modelu sieci zasilającej, zasobników i przekształtników energoelektronicznych DC-DC. Jest to element systemu, który wprowadza zmienność konfiguracji ze względu na czynniki związane ze stanem pojazdów i ich parametrami elektrycznymi. Model ruchu pojazdów wyznacza w każdym kroku obliczeniowym nowy zestaw danych mocy chwilowej pojazdów w poszczególnych węzłach sieci. Model został zaimplementowany w programie Matlab, a dane określające planowany ruch pojazdu, co przekłada się na planowaną zmienność mocy pojazdu, przedstawiono w postaci przebiegów, dla danych węzłów sieci, jak należy się domyślać z rys. 5-2, gdzie występuje opis „moc zadana na źródłach y1, y3, y5, y7”, pomimo, że wcześniej nie przedstawiono schematu modelowanej sieci. Zestaw danych wejściowych dla modelu obejmuje również dane charakteryzujące ruch i parametry pojazdów i urządzeń pomocniczych, co autor przedstawił z odpowiednimi szczegółami. W dalszej części wyjaśniono ogólną strukturę algorytmu, a następnie szczegóły modelu obwodowego systemu trakcyjnego. Przyjęto tu uproszczenie polegające na modelowaniu sieci trakcyjnej jako „rezystancyjny układ wieloźródłowy analizowany w stanach ustalonych”. W rozdziale 5.2.1

przedstawiono założenia modelu, w tym omówiono jego topologię bez przedstawienia schematu, a także ponownie założenia dla modelowania, zestaw danych wyjściowych, oraz modele komponentów węzłowego systemu trakcyjnego w postaci źródeł prądowych zależnych od parametrów fizycznych i rezystancji obwodu sieci. Tak przyjęte założenia pozwoliły autorowi na rozwiązywanie problemu wyznaczania prądów iteracyjnie z uwzględnieniem spadków napięć, bieżących wartości napięć i zadanych mocy, a następnie zaimplementowanie opracowanego narzędzia obliczeniowego wielkości elektrycznych w całościowym modelu systemu trakcyjnego z zasobnikami energii dla jego optymalizacji. O rzetelności podejścia autora dla realizacji poprawności narzędzia obliczeniowego modelowanego obwodu elektrycznego źródłowo-rezystancyjnego świadczy przedstawione w rozprawie porównanie z wynikami modelowania w programie LTSpice. Weryfikacja przeprowadzona na przykładowych danych pozwoliła autorowi na uznanie opracowanego narzędzia obliczeniowego za odpowiednie do dalszego modelowania. Tym samym autor rozwiązał problem realizacji obliczeń prądów i napięć w sieci trakcyjnej bazując na jej sparametryzowanym modelu, proponując koncepcję modelowania i dokonując wyboru algorytmu iteracyjnego.

Istotnym etapem dla weryfikacji hipotez stawianych przez kandydata w rozprawie doktorskiej są badania nad optymalizacją systemów trakcyjnych z zasobnikami energii przedstawione w rozdziale szóstym. We wstępie do tego rozdziału autor ponownie zwięźle uzasadnia korzyści odzyskiwania energii w sieci trakcyjnej przy hamowaniu pojazdów co oczywiście generuje problem i pytania naukowe o parametry zasobników energii współpracujących z siecią trakcyjną i ich optymalne dostosowanie do danej sieci na etapie projektowania z uwzględnieniem również parametrów obciążenia przez pojazdy. W rozprawie autor proponuje rozwiązanie tego problemu naukowego przez zastosowanie algorytmów optymalizacji dla takich systemów. W rozprawie podano systematyczny opis założeń, co do parametrów i celów optymalizacji oraz charakterystyki metod i ich uzasadnienie wyboru. Autor uzasadnia również wybór metody optymalizacji wielokryterialnej związanej z korzyścią jaką jest czytelny wpływ zmiennych projektowych na funkcje kosztu, co dalej uzasadniane jest możliwością zastosowania proponowanej procedury optymalizacji do celów wdrożeniowych. Jako funkcje kosztu wymieniono tu straty w liniach trakcyjnych, energia wytracana w przekształtnikach hamowania, efektywność wykorzystania zasobników energii, stopień samo-receptywności systemu, a jako zmienne podlegające optymalizacji wymienia się liczbę zasobników ich położenie i nastawy przekształtników dla trybów hamowania, pojazdu i odzyskiwania energii i wspierania linii przez zasobnik. W tym miejscu istotne byłoby również podanie wagi poszczególnych parametrów w procesie optymalizacji wielokryterialnej. Autor nadmienia jednak, że przedstawione zestawienie celów funkcji kosztów demonstruje zasadę działania algorytmów, a w zapotrzebowaniu przemysłowych mogą pojawić się inne parametry i ich wagowe kombinacje. W rozdziale szóstym przedstawiono wyniki symulacyjne demonstrujące obliczenia sygnałów elektrycznych systemu, co umożliwia wykorzystania ich w algorytmach optymalizacji. Zamieszczono tu również istotne parametry linii, pojazdów, obwodów elektrycznych, narzędzia obliczeniowego i zakresów zmiennych modelu optymalizacji. Tak opracowany model wraz z zademonstrowanymi wynikami działania algorytmów przeszukania, zamieszczonymi w podrozdziale 6.3.1 stanowi istotny, naukowy element rozprawy. Przedstawiono tu cztery przypadki, o różnym stopniu złożoności, w których minimalizowana jest funkcja kosztu określająca straty energii w linii oraz rezystorach pojazdowych, a wyniki odniesione są do referencyjnego przypadku, gdzie parametrem jest wartość napięcia aktywacji przekształtnika hamowania. Uzyskanie wyniku przeszukiwania wpływu wartości napięcia aktywacji przekształtnika hamowania na energię strat w systemie pozwoliło traktować ten parametr jako stały w kolejnym przypadku optymalizacji, gdzie założono zakres

zmian wartości napięcia ładowania i rozładowania zasobnika energii, a także położenie aktywnego zasobnika energii. Dla tego przypadku uzyskano istotne wyniki pozwalające potwierdzić zmniejszenie traconej energii w na odcinku linii z zasobnikiem energii, a także umożliwiające wyznaczenie lokalizacji zasobnika w środku odcinka linii oraz energii jego cyklu przeładowania na poziomie 10.2kWh. Wyniki te autor potwierdza w kolejnym, bardziej szczegółowym badaniu prze zmiennych parametrach jaki w przypadkach pierwszym i drugim o 924 punktach przeszukiwań. Pozwoliło to na skorygowanie pojemności zasobnika i oszacowanie redukcji strat energii o 60% w porównaniu do przypadku referencyjnego. W przypadku czwartym Autor przeprowadził badania poszukiwania parametrów optymalnych w systemie z czterema zasobnikami. Zaadresowano tu problem uproszczenia złożoności obliczeniowej przez zastosowanie metody Monte Carlo dla wstępnej selekcji parametrów, a w wyniku zastosowania tej metody generowania zmian parametrów wskazano na przypadek o dwóch zasobnikach o całkowitej wymienianej z systemem energii 12.3kWh, co przyniosło znaczną redukcję energii traconej w rezystorach hamujących. Ocenę generowanych parametrów oraz ich korelację z wynikami można ocenić na zamieszczonych w rozprawie histogramach oraz macierzy korelacji, co jak zauważono pozwala również na eliminację nadmiarowych parametrów oraz modyfikacji zmian parametrów. Wyniki pozwalają potwierdzić wpływ progów napięcia aktywacji i liczby zasobników energii na możliwość ograniczenia strat przesyłowych, oraz pojemności zasobników na możliwość redukcji strat hamowania rezystancyjnego. Autor przedstawiając kolejne metody optymalizacji w sposób przejrzysty scharakteryzował zastosowane podejście do badań optymalizacji systemu trakcyjnego z zasobnikami energii, a finalną sekwencję działań w procesie optymalizacji zamieścił w postaci diagramu przedstawionego na rys. 6-9. Ze schematu tego wyniku opisana wcześniej procedura postępowania z wielokrotnym zawężaniem siatki przeszukiwania bazując na wynikach z algorytmu opartego na metodzie Monte Carlo. Przedstawiane w tym rozdziale wyniki pozwoliły na potwierdzenie stawianej hipotezy i celów naukowych.

W rozprawie zawarto też opis analizy komercyjnej realizacji optymalizacji systemu trakcyjnego z przytorowym superkondensatorowym zasobnikiem energii we wdrożonej instalacji o napięciu stałym 3000 V. Kandydat powołując się na komercyjny charakter pracy wdrożeniowej zastrzegł, że w rozprawie nie przedstawił „pełnych szczegółów technicznych implementacji ani parametrów pracy całego systemu”. W kontekście badań naukowych rozdział ten demonstruje wyniki wdrożeniowe algorytmów optymalizacji. W rozprawie, w rozdziale 7 nie zawarto wyników badań eksperymentalnych umożliwiających weryfikację różnych przypadków algorytmów i parametrów elementów systemu takich jak przekształtniki energoelektroniczne czy wartości zmian napięcia w linii zasilającej. Przedstawiono tu wyniku pomiarów jednego przypadku, niemniej jednak podano wystarczające informacje o przeprowadzonych badaniach weryfikacyjnych dla oceny ich zbieżności z częścią analityczną przedstawioną w rozprawie przez autora. Zaprezentowane wyniki pokazują dane pomiarowe z rejestratora pokładowego pojazdu, a także porównanie profilu teoretycznego i rzeczywistego prędkości i mocy pojazdu. Autor przedstawił również wynik obliczenia różnicy wielkości modelowanych i zmierzonych, które wskazują, że badane modele symulacyjne pozwoliły na przeprowadzenie wiarygodnych badań systemów trakcyjnych z superkondensatorowym przytorowym zasobnikiem energii. Dane uzyskane z zasobnika energii w systemie ze zmienną mocą pojazdu demonstrują jego prawidłowe działanie w zakresie znamionowych parametrów. Komentarz autora jest słuszny, co do możliwości ograniczenia spadków napięcia poniżej wartości krytycznych w wyniku zastosowania zasobników energii, jednak interesującym wynikiem badań naukowych byłaby zależność analityczna wiążąca moc i położenie zasobników z mocą pojazdów. Należy jednak założyć, że taki wynik jest osiągalny dla autora przez zastosowanie przedstawionych w rozprawie metod badawczych. Podobne

zależności dotyczą strat energii w liniach trakcyjnych, co zostało zademonstrowane w badaniach symulacyjnych kandydata.

W rozdziale ósmym rozprawy zamieszczono wnioski z przeprowadzonych badań, dalsze szczegóły dotyczące przebiegu testów wdrożeniowych i wkładu kandydata w realizację tych prac, potencjału przemysłowego wyników prac badawczych przedstawionych w rozprawie, a także kierunki dalszych badań związanych z tym zagadnieniem.

2. Wartość naukowa pracy

W rozprawie doktorskiej mgr inż. Rafał Jacukowicz przedstawił wyniki badań naukowych i wdrożeniowych w obszarze poprawy parametrów zasilania w systemie elektromobilnego transportu przez opracowanie algorytmów optymalizujących wykorzystanie zasobników energii wraz z przekształtnikiem energoelektronicznym, a także omówił etapy realizacji badań oraz wykorzystane narzędzia. Na poszczególnych etapach kandydat do stopnia doktora analizował zagadnienia związane ze stanem wiedzy w obszarze magazynów energii, systemów trakcyjnych, przekształtników energoelektronicznych i algorytmów optymalizacji, a także uczestniczył w pracach wdrożeniowych systemu przytorowego superkondensatorowego zasobnika energii, którego projekt może być efektywnie wspomagany przez algorytmy opracowane w wyniku prac badawczych kandydata. Przeprowadzając te badania i prace wdrożeniowe kandydat wykazał prawdziwość prawdopodobnych założeń badawczych stawianych jako hipotezy i udowodnił te założenia przedstawiając wyniki badań i użyte metody badawcze. Kandydat zrealizował również cele badawcze i wdrożeniowe, a najistotniejsze oryginalne rozwiązania problemów naukowych projektowych i konstrukcyjnych autora rozprawy to opracowanie narzędzia obliczeń numerycznych implementowanego w systemie symulacyjnych z modelem trakcyjnym i ruchem pojazdów, przeprowadzenie optymalizacji systemu trakcyjnego z przytorowymi superkondensatorowymi zasobnikami energii według metody umożliwiającej wykorzystanie wyników dla projektowania praktycznego systemu trakcyjnego, wykazanie korelacji strat energii w rezystorach hamowania pojazdów i linii trakcyjnej z parametrami i lokalizacją przytorowego zasobnika energii, weryfikacja narzędzia obliczeń numerycznych i algorytmów optymalizacji na wynikach testów na obiekcie komercyjnym, a także w pewnym zakresie obliczenia sterowania przekształtnika DC-DC o topologii podwójnego półmostka dla dwukierunkowego przekształcania energii. Badania te zostały omówione w rozprawie odpowiednio szczegółowo, aby stwierdzić, że kandydat do stopnia doktora wykazał się umiejętnością prowadzenia prac naukowych. Ze względu na zróżnicowanie wymienionych zagadnień badawczych, które integrują obszar szeroko pojętej teorii obwodów, fizyki, matematyki stosowanej, automatyki czy energoelektroniki kandydat wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne.

Zestawienie zaprezentowanych wyników i metod badawczych wykazuje, że przedłożona rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemów naukowych związanych z optymalizacją systemu trakcyjnego z przytorowymi zasobnikami energii. Jak podaje kandydat w rozprawie, wyniki jego badań i opracowane algorytmy znalazły praktyczne zastosowanie w implementacji nowych technologii w infrastrukturze kolejowej. Rozprawa doktorska jest dowodem na oryginalne zastosowanie osiągniętych wyników badawczych w sferze gospodarczej.

3. Pytania i uwagi do dyskusji

W ramach dyskusji z autorem rozprawy nasuwają się następujące zagadnienia:

1. Autor w rozprawie zamieszcza analizę możliwych do zastosowań trakcyjnych technik magazynowania energii, w tym baterii litowo-jonowych, a tytuł pracy sugeruje badania w kierunku optymalizacji wykorzystania bateryjnych lub superkondensatorowych zasobników energii. Z opisu badań przeprowadzonych w ramach rozprawy wynika, że dokonano wyboru superkondensatorowego zasobnika energii. Interesujące byłoby wskazanie różnic parametrów technicznych jakie determinują taki wybór i wykazanie w jakim stopniu wykorzystanie bateryjnych zasobników energii dla problemów technicznych analizowanych w rozprawie jest zasadne.
2. W rozdziale 4.1.4 podano informację, że model symulacyjny zawierał trójfazowy układ FSBB z tranzystorami IGBT. Interesujące byłoby przedstawienie w pracy czy model wykonany został na bazie łączników idealnych, czy modelach oddających fizyczne parametry tranzystorów, co dalej umożliwiłoby badanie nie tylko przebiegów, ale również sprawności przekształtnika.
3. W pracy wielokrotnie wspomniano o możliwym niestabilnym charakterze systemu, np., przy przejściu z trybu obniżania do podnoszenia napięcia. Taki przypadek powinien zostać przedstawiony, np. przy wykorzystaniu wyników badań symulacyjnych, wraz z odpowiednim komentarzem.
4. Na przebiegu prądu przedstawionym na rys. 4-21 widoczne są oscylacje o częstotliwości mniejszej niż częstotliwość impulsowania tranzystorów. Interesujące byłoby wyjaśnienie jaka jest przyczyna występowania oscylacji w przebiegu prądu dławika i w jaki sposób dobrano nastawy regulatora.

Pomimo poprawnej formy edycyjnej i językowej rozprawy można sformułować następujące szczegółowe uwagi o mniejszym znaczeniu merytorycznym:

1. Na rys. 2-25 przedstawiono wynik w postaci przebiegu napięcia w stanie przejściowym opisany jako odpowiedź skokowa, gdzie występuje sygnał referencyjny napięcia wyjściowego i napięcie wyjściowe. Nie jest jednak jasne w jakim układzie regulacji ten wynik został uzyskany, ponieważ na schemacie blokowym z rys. 4.15 sygnał napięcia referencyjnego i regulator napięcia nie występuje.
2. Należy sprawdzić błędy edycyjne w treści podpisu pod rysunkami 3-3 oraz 3-4
3. W rozdziale 4, ale również w całej rozprawie występuje nieprecyzyjne nazewnictwo przekształtników energoelektronicznych, np. określenie „konwertery”, czy „czteroprzełącznikowy”, a także „kontroler” (w pracy używane jest również prawidłowe określenie regulator). Należy jednak dodać, że tytuł rozdziału czwartego „Układy energoelektroniczne” sformułowany jest poprawnie.
4. Opis do rysunku 4-2 „zmodyfikowana funkcję transferu oraz współczynniki wypełnienia dla tranzystorów Q1 oraz Q2” nie jest zbieżny z jego zawartością, gdzie przedstawiono wartości $dQ1$ jeden i $dQ4$.
5. Opis przedstawiony na stronie 44 „kod źródłowy został załadowany do kontrolera energoelektronicznego”, nie jest do końca zrozumiały. Ponadto odniesiono się tu do rysunku 4-37, na którym nie wskazano poszczególnych komponentów badanego układu.
6. W zdaniu odwołującym się do warunków spełnionych w iteracyjnym algorytmie: „Aktualizacja – jeżeli warunek (60) i (61) nie są spełnione” powinno być odwołanie do zależności (61) i (62).
7. Następujące zadanie wymaga korekty: „którego auto jest współautorem”.
8. Wielkość czcionki na niektórych rysunkach jest znacznie mniejsza niż wielkość czcionki tekstu rozprawy, co utrudnia ich odczytanie.

4. Wniosek końcowy

W rozprawie doktorskiej pt. „Opracowanie algorytmów optymalizujących wykorzystanie bateryjnych lub superkondensatorowych zasobników energii wraz z energoelektronicznymi układami konwersji mocy w systemie elektromobilnego transportu celem poprawy parametrów zasilania” mgr inż. Rafał Jacukowicz przedstawił uzyskane wyniki badań, metody i etapy realizacji badań, a także aspekty ich wdrożenia oraz podstawy teoretyczne związane z zagadnieniami badawczymi. Kandydat do stopnia doktora wykazał prawdziwość stawianych hipotez i osiągnął założone cele badawcze, a rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Kandydat w rozprawie doktorskiej przedstawił oryginalne rozwiązanie problemu naukowego związanego z poprawą parametrów zasilania w systemie elektromobilnego transportu przez opracowanie algorytmów optymalizujących wykorzystanie zasobników energii, co wiązało się również z wdrożeniem czyli zastosowaniem wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej.

Stwierdzam, że rozprawa pt. „Opracowanie algorytmów optymalizujących wykorzystanie bateryjnych lub superkondensatorowych zasobników energii wraz z energoelektronicznymi układami konwersji mocy w systemie elektromobilnego transportu celem poprawy parametrów zasilania”, mgr. inż. Rafała Jacukowicza spełnia wymagania ustawodawcy, dla kandydatów ubiegających się o stopień doktora w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne. Tym samym, wyrażam opinię pozytywną o rozprawie mgr. inż. Rafała Jacukowicza pt. „Opracowanie algorytmów optymalizujących wykorzystanie bateryjnych lub superkondensatorowych zasobników energii wraz z energoelektronicznymi układami konwersji mocy w systemie elektromobilnego transportu celem poprawy parametrów zasilania” i wnoszę o dopuszczenia mgr. inż. Rafała Jacukowicza do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Prof. dr hab. inż. Robert Stala

Kraków, 31 grudnia 2025