

RECENZJA

rozprawy doktorskiej 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.**

1. Podstawa opracowania recenzji

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr. inż. Rafała Jacukowicza pod tytułem *Opracowanie algorytmów optymalizujących wykorzystanie bateryjnych lub superkondensatorowych zasobników energii wraz z energoelektronicznymi układami konwersji mocy w systemie elektromobilnego transportu celem poprawy parametrów zasilania*. Promotorem rozprawy doktorskiej jest dr hab. inż. Dariusz Borkowski, prof. PK. Recenzja została opracowana na podstawie uchwały nr 31/2025 Rady Naukowej dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Wydziału Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechniki Krakowskiej z dnia 21.10.2025. Recenzja ma być wykorzystana w postępowaniu o nadanie Panu mgr. inż. Rafałowi Jacukowiczowi stopnia doktora nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

2. Ocena podjętego tematu

Tematyka podjęta w recenzowanej rozprawie doktorskiej dotyczy jednego z istotnych i dynamicznie rozwijających się obszarów współczesnej elektrotechniki, jakim jest integracja zasobników energii z systemami transportu elektrycznego. W dobie transformacji energetycznej oraz dążenia do zwiększenia efektywności układów zasilania, zagadnienie to nabiera kluczowego znaczenia, wpisując się w światowe trendy badawcze obejmujące koncepcje *Smart Transportation* oraz inteligentnych sieci elektroenergetycznych (*Smart Grids*). W ostatnich latach integracja przytorowych zasobników energii (ESS) z sieciami trakcyjnymi DC jest przedmiotem szczególnie intensywnych badań, co potwierdzają przeglądy poświęcone systemom odzysku energii hamowania i poprawie efektywności energetycznej w transporcie szynowym.

Problematyka badawcza zdefiniowana przez Doktoranta koncentruje się na optymalizacji pracy zasobników energii (bateryjnych i superkondensatorowych) współpracujących z siecią trakcyjną DC poprzez dedykowane układy energoelektroniczne. Jest to bezpośrednia odpowiedź na realne problemy eksploatacyjne, takie jak: niestabilność napięcia w sieci trakcyjnej (w tym głębokie spadki napięcia na końcach sekcji zasilania), ograniczona receptywność sieci dla energii odzyskiwanej podczas hamowania rekuperacyjnego oraz wysokie straty przesyłowe.

Należy podkreślić, że recenzowana rozprawa ma charakter teoretyczno-wdrożeniowy. Podjęta tematyka posiada istotne walory poznawcze oraz aplikacyjne, a uzyskane wyniki mogą stanowić podstawę do modernizacji istniejących systemów trakcyjnych. Autor podjął się ambitnego zadania, które nie ogranicza się jedynie do analiz symulacyjnych, ale obejmuje również weryfikację na obiekcie rzeczywistym, co w dziedzinie energoelektroniki dużej mocy jest przedsięwzięciem skomplikowanym i kosztownym. Z uwagi na wdrożeniowy charakter rozprawy szczególnie istotne jest powiązanie

proponowanych rozwiązań optymalizacyjnych z praktycznym systemem przytorowego magazynu energii.

Podsumowując, uważam, że wybór tematyki badań prowadzonych przez Pana mgr. inż. Rafała Jacukowicza jest w pełni uzasadniony potrzebami nauki i przemysłu, a zakres zrealizowanych prac jest odpowiedni dla rozpraw na stopień doktora.

3. Charakterystyka rozprawy doktorskiej

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska obejmuje 114 stron maszynopisu i została zredagowana w języku polskim. Struktura pracy jest przejrzysta, logiczna i podporządkowana celowi głównemu, jakim jest poprawa parametrów zasilania w systemie transportu elektromobilnego. Praca składa się ze spisu treści, wykazu ważniejszych oznaczeń i skrótów oraz dziewięciu rozdziałów merytorycznych (obejmujących wprowadzenie, podsumowanie oraz bibliografię). Praca napisana jest komunikatywnym językiem technicznym. Układ pracy nie budzi istotnych zastrzeżeń, a materiały graficzne są wykonane starannie i czytelnie. Układ rozdziałów odzwierciedla kolejne etapy procesu badawczego – od sformułowania problemu i przeglądu literatury, przez budowę modeli i implementację algorytmów, aż po analizę wyników symulacyjnych i część wdrożeniową – co ułatwia śledzenie toku rozumowania Autora. Praca została zrealizowana w ramach programu Doktorat Wdrożeniowy, umowa DWD/4/25/2020.

W rozdziale pierwszym Autor zdefiniował problematykę badawczą, koncentrując się na efektywności energetycznej systemów zasilania trakcji elektrycznej prądu stałego. W sposób jasny i rzetelny określono cel i zakres pracy, obejmujący opracowanie i weryfikację algorytmów sterowania oraz dobór parametrów dla zasobników energii (zarówno bateryjnych, jak i superkondensatorowych) w systemach trakcyjnych. Na wyróżnienie zasługuje precyzyjne sformułowanie problemu badawczego, wynikającego z rzeczywistych ograniczeń eksploatacyjnych sieci trakcyjnych. W rozdziale tym wyraźnie wskazano także cele badawcze i wdrożeniowe, obejmujące zarówno analizę systemów trakcyjnych DC z hamowaniem rekuperacyjnym, budowę modeli obwodowych oraz procedur optymalizacji, jak i ocenę działania rzeczywistego przytorowego magazynu energii. Sformułowane hipotezy badawcze, dotyczące możliwości efektywnego ograniczenia strat przesyłowych oraz stabilizacji profilu napięcia poprzez optymalną lokalizację i sterowanie ESS, są logiczne i w dużej mierze weryfikowalne. Przyjęta metodyka badań, łącząca modelowanie matematyczne z eksperymentem, jest adekwatna do postawionych zadań.

Rozdział drugi stanowi syntetyczny przegląd literatury przedmiotu. Doktorant dokonał w nim analizy zagadnień związanych z zasilaniem systemów trakcyjnych DC, odwołując się zarówno do klasycznych metod obliczania rozptyłów mocy (m.in. metody Gaussa-Seidela i Newtona-Raphsona), jak i współczesnych prac dotyczących problematyki hamowania odzyskowego. Ważną część rozdziału zajmują również przeglądy metod optymalizacji (NLP, MILP, metaheurystyki) oraz energoelektroniki (prostowniki aktywne, DC/DC, MMC). Przegląd technologii magazynowania energii (baterie Li-Ion, superkondensatory, hybrydy HESS) jest szczególnie udany – Autor trafnie podkreśla ich potencjał i ograniczenia w kontekście trakcji miejskiej oraz zastosowań w sieciach miejskich. Przegląd ten jest solidny, choć ograniczony do literatury sprzed ~2020 r. – brak odniesień do nowszych prac (2021–2024) nt. hybrydowych ESS i optymalizacji ich lokalizacji. Autor przywołuje przykłady wdrożeń komercyjnych (m.in. ABB/RFI we Forli), co posłużyło do uzasadnienia celowości badań.

W podsumowaniu rozdziału wskazano, że mimo istnienia rozwiązań koncepcyjnych, wciąż istnieje potrzeba opracowania dedykowanych modeli oraz algorytmów pozwalających na efektywną integrację zasobników z infrastrukturą sieciową.

Wolke

Rozdział trzeci ma charakter analityczno-koncepcyjny i stanowi kluczowy etap w procesie decyzyjnym dotyczącym doboru technologii zasobnika energii. Autor dokonał w nim szczegółowej analizy porównawczej dostępnych ogniw elektrochemicznych (w tym LFP, NMC, LTO) oraz superkondensatorów, zestawiając ich parametry techniczno-ekonomiczne z wymaganiami trakcji elektrycznej. Na wyróżnienie zasługuje przeprowadzona przez Autora analiza rzeczywistego cyklu pracy systemu trakcyjnego (analiza statystyczna zdarzeń przyspieszania i hamowania w cyklu dobowym), na podstawie której oszacowano potencjał rekuperacyjny sieci oraz wymaganą moc szczytową zasobnika. Te obliczenia pozwoliły Autorowi na merytoryczne uzasadnienie wyboru technologii charakteryzującej się wysoką gęstością mocy i odpornością na cykliczne obciążenia udarowe, co stanowi punkt wyjścia dla dalszych prac modelowych.

Pewien niedosyt budzi nierównowaga w szczegółowości charakterystyki technologii – bardzo precyzyjne zestawienie ogniw bateryjnych (LFP, NMC, LTO) kontrastuje z ogólniejszym potraktowaniem superkondensatorów. W rozdziale zabrakło szerszego odniesienia do superkondensatorów hybrydowych (Li-Ion Capacitors LiC) oraz innowacyjnych grafenowych EDLC, które w ostatnich latach zyskały na znaczeniu w aplikacjach trakcyjnych. Przyjęte kryterium porównawcze (C-rate z Tabeli 3-1) jest pewnym uproszczeniem w kontekście pracy impulsowej trakcji, choć nie podważa słuszności wyboru EDLC ze względu na ich wyjątkową żywotność cykliczną. Ponadto, w analizie cyklu dobowego (Rys. 3-3–3-5) warto byłoby odnieść się do sezonowości obciążeń (lato/zima) lub wpływu rozkładów jazdy na potencjał rekuperacyjny – czynniki istotne dla długoterminowej eksploatacji ESS.

Rozdział czwarty poświęcony jest analizie układów energoelektronicznych, stanowiących interfejs wykonawczy dla zasobników energii. Doktorant przedstawił w nim standardową ewolucję układów prostownikowych (od niesterowanych po aktywne układy AFE), kładąc główny nacisk na analizę przekształtników DC/DC. Szczegółowej analizie matematycznej poddano topologię czterokluczową typu Buck-Boost (FSBB). Na uznanie zasługuje wyprowadzenie zależności opisujących pracę FSBB nie tylko w CCM i DCM, ale także w strefie przejściowej – co stanowi istotny wkład Autorski (równania bilansu wolto-sekundowego, rozwiązywanie niestabilności przy zbliżonych napięciach). Bazując na wyprowadzonym bilansie, Doktorant rozwiązał problem niestabilności sterowania w obszarze zbliżonych napięć wejściowych i wyjściowych. Świadczy to o głębokim zrozumieniu zjawisk fizycznych i stanowi solidną podstawę dla omówionej struktury sterowania kaskadowego z wykorzystaniem sprzężenia feed-forward. Zgodnie z charakterem rozprawy wdrożeniowej, kluczowym atutem rozdziału jest weryfikacja eksperymentalna. Przeprowadzone testy na obiekcie rzeczywistym o mocy 375 kW w warunkach komercyjnych jednoznacznie potwierdzają aplikacyjną przydatność opracowanych algorytmów.

Pewne zastrzeżenia budzi czytelność niektórych wykresów (zbyt złożone opisy matematyczne na osiach) oraz przyjęcie pewnych uproszczeń w modelu (brak analizy czasów martwych, pasożytniczych indukcji kabli). To jednak kwestie drugorzędne wobec wartości wkładu teoretycznego i praktycznego.

Rozdział piąty stanowi syntezę wcześniejszych rozważań teoretycznych, prezentując budowę kompleksowego, autorskiego środowiska symulacyjnego. Autor dokonał w nim skutecznej integracji podsystemu mechanicznego (odwzorowującego kinematykę ruchu pojazdów) z modelem elektrycznym sieci trakcyjnej wielowęzłowej. Przyjęto poprawną metodykę weryfikacji poprawności modelu. Doktorant zastosował podejście walidacji przyrostowej, definiując cztery odrębne scenariusze testowe: od jazdy pojedynczego pojazdu, poprzez analizę wymiany energii między pojazdami, aż po testy logiki sterowania zasobnikiem i układem wytracania energii. Przeprowadzona walidacja potwierdza, że model prawidłowo odwzorowuje naturalną receptywność sieci oraz precyzyjnie bilansuje energię traconą w rezystorach hamowania, co stanowi fundament dla późniejszej oceny efektywności ekonomicznej. Elementem dyskusyjnym jest sposób definicji warunków brzegowych w zakresie potrzeb

Wol

nietrakcyjnych taboru. W strukturze modelu nie wyodrębniono wprost mocy pobieranej np. na cele bytowe (ogrzewanie, klimatyzacja), co może istotnie pomniejszać wolumen energii dostępnej do zmagazynowania w rzeczywistych warunkach. Przyjęte uproszczenie skutkuje akceptacją bardziej optymistycznego scenariusza energetycznego, choć nie podważa poprawności logiki algorytmów sterowania.

W rozdziale szóstym, Autor przenosi rozważania z poziomu technicznego (modelowanie) na poziom decyzyjny i inwestycyjny. Wykorzystano opracowany wcześniej model symulacyjny jako środowisko dla rozbudowanej analizy wrażliwości parametrów systemu (lokalizacja zasobników, pojemność, progi napięciowe sterowania). Zastosowano metody Monte Carlo oraz systematyczne próbkowanie przestrzeni rozwiązań do analizy statystycznej danych. Przedstawiono macierz korelacji zmiennych, co świadczy o świadomym podejściu do redukcji wymiarowości zadania optymalizacyjnego. Autor zidentyfikował parametry krytyczne dla efektywności energetycznej, eliminując te o marginalnym wpływie, co jest dobrą praktyką przy złożonych symulacjach obliczeniowych. W kontekście doktoratu wdrożeniowego rozdział ten posiada znaczną wartość aplikacyjną. Przedstawione metody mogą wspierać decyzje inwestycyjne, umożliwiając kompromis między kosztami infrastruktury a oszczędnościami energetycznymi.

Rozdział siódmy stanowi kluczowy element rozprawy wdrożeniowej, prezentując weryfikację opracowanych rozwiązań w warunkach rzeczywistej eksploatacji komercyjnej. Autor opisał proces walidacji systemu opartego na superkondensatorach w sieci trakcyjnej 3000 V DC. Najistotniejszym wnioskiem płynącym z tego rozdziału jest potwierdzenie skuteczności algorytmów sterowania z wykorzystaniem sprzężenia feed-forward, teoretycznie opracowanych w czwartym rozdziale pracy. Pomiarzy oscyloskopowe (rejestracja napięć i przepływów energii) dowodzą, że układ zachowuje stabilność nawet przy gwałtownych zmianach obciążenia, charakterystycznych dla ruchu kolejowego, co weryfikuje poprawność przyjętej metodologii opartej na bilansie wolto-sekundowym.

Należy odnotować, że ze względu na komercyjny charakter projektu i ograniczenia wynikające z ochrony własności intelektualnej i tajemnicy przedsiębiorstwa, Doktorant nie zaprezentował pełnej dokumentacji technicznej wdrożenia oraz zastosowanej aparatury pomiarowej. Autor nie dokonuje bezpośredniego nałożenia wyników symulacyjnych na pomiarowe dla tego samego wymuszenia, lecz wskazuje na zbieżność charakterystyk i trendów regulacyjnych. Niemniej jednak, przedstawione przebiegi czasowe oraz opis jakościowy są wystarczające do stwierdzenia, że cel pracy – polegający na opracowaniu i wdrożeniu efektywnego systemu wspomaganego zasilania trakcji – został osiągnięty. Rozdział ten stanowi most łączący teorię (modele numeryczne) z praktyką inżynierską na wysokim poziomie gotowości technologicznej.

Rozdział ósmy stanowi syntetyczne podsumowanie uzyskanych wyników oraz prezentację wniosków końcowych. Doktorant potwierdził w nim osiągnięcie głównego celu pracy, wykazując użyteczność opracowanych modeli i algorytmów w praktyce inżynierskiej. Na uznanie zasługuje krytyczne podejście Autora do własnych wyników. Wskazano na pewne ograniczenia zastosowanego solvera (tendencje do oscylacji w stanach granicznych), co świadczy o rzetelności badawczej. Jednocześnie Autor zarysował również klarowne i ambitne kierunki dalszych prac, obejmujące implementację metod sztucznej inteligencji oraz rozbudowę kryteriów optymalizacyjnych o zaawansowane modele ekonomiczne.

Z recenzenckiego obowiązku należy jedynie zauważyć, że wnioski końcowe zyskałyby na sile wyrazu, gdyby Autor w większym stopniu posłużył się wskaźnikami ilościowymi (przywołując konkretne wartości redukcji strat czy mocy szczytowej uzyskane w Rozdziale 6), zamiast ograniczać się do sformułowań jakościowych.

Podsumowując ocenę merytoryczną rozprawy, stwierdzam, że stanowi ona dojrzałe studium naukowo-techniczne. Doktorant prawidłowo zidentyfikował i rozwiązał istotny problem badawczy, jakim jest dobór optymalnych parametrów i strategii sterowania dla systemów zasobników energii w trakcji elektrycznej DC.

Na uznanie zasługuje kompleksowe podejście do tematu – od budowy zaawansowanego modelu symulacyjnego, poprzez zastosowanie metod statystycznych do analizy wrażliwości, aż po skuteczną implementację rozwiązania w skali przemysłowej (poziom wdrożenia). Mimo wskazanych w recenzji drobnych uwag dyskusyjnych, praca broni się jako spójna całość.

4. Główne wątpliwości i uwagi dyskusyjne

Zwracam uwagę, że sformułowanie hipotezy dotyczącej „właściwego doboru progów zadziałania” przytorowych zasobników energii ma charakter dość ogólny i mało precyzyjny. Bardziej odpowiednie byłoby wskazanie, jakie klasy parametrów (np. zakresy napięć, czasy reakcji, liczba i rozmieszczenie zasobników) są przedmiotem optymalizacji oraz względem jakich mierników jakości (straty energii, liczba przekroczeń dopuszczalnych spadków napięcia, obciążenie podstacji) ma nastąpić poprawa.

Pytania dyskusyjne:

1. Czy Autor rozważał porównanie LiC vs. klasyczne EDLC pod kątem kompromisu gęstość energii/mocy w trakcji? Nowsze publikacje wskazują na ich rosnącą popularność w hybrydowych ESS.
2. Jakie były zmierzone straty przełączania IGBT przy 375 kW i jak wpływają na sprawność całego ESS?
3. Jak Autor ocenia wpływ pominięcia potrzeb bytowych (ogrzewanie, klimatyzacja, oświetlenie) na szacunki potencjału rekuperacyjnego?
4. Czy model wielowęzłowy uwzględnia zmienność rezystancji sieci trakcyjnej w funkcji temperatury otoczenia lub stopnia zużycia izolacji przewodów?
5. Jakie są czasy obliczeń dla pełnego cyklu optymalizacji (30 km linii, 4 ESS)? Czy narzędzie nadaje się do wsparcia decyzji w czasie rzeczywistym podczas planowania rozkładów lub awarii podstacji?
6. W analizie statystycznej (macierz korelacji) wykazano silną zależność ujemną (np. -0.88) pomiędzy wybranymi zmiennymi. Jaką interpretację fizyczną ma ta korelacja i jak wpłynęła ona na redukcję przestrzeni poszukiwań w algorytmie optymalizacyjnym?
7. W Rozdziale 7 przedstawione są wyniki pomiarów rzeczywistych i stwierdzona zgodności z modelem symulacyjnym. Jaka była ilościowa miara tej zgodności? Czy wyznaczono np. błąd względny modelu względem pomiaru w stanach dynamicznych? W których punktach pracy model "cyfrowego bliźniaka" najbardziej odbiegał od rzeczywistości i ewentualnie dlaczego?
8. Czy podczas uruchomienia na obiekcie komercyjnym (3000 V DC) konieczne było znaczące przestrojenie parametrów regulatorów względem wartości wyliczonych w symulacji?

5. Dodatkowe uwagi o charakterze redakcyjnym

Redakcja pracy jest staranna, a szata graficzna czytelna. Tym niemniej Autor nie ustrzegł się drobnych błędów edytorskich i stylistycznych. W bibliografii pozycja [22] jest powtórzona w [51]. Należy jednak wyraźnie podkreślić, że wymienione usterki mają charakter wyłącznie redakcyjny, nie wpływają na merytoryczną wartość rozprawy ani na czytelność prezentowanych wyników, a tym samym nie wymagają wprowadzania korekt w tekście pracy.

6. Ocena pracy i wniosek końcowy

Uzyskane w rozprawie wyniki, oparte na badaniach własnych Doktoranta, są wartościowe zarówno z punktu widzenia naukowego, jak i praktycznego. Autor zaprezentował w swojej rozprawie doktorskiej oryginalne rozwiązanie problemu optymalizacji ESS w trakcji DC.

Jako jego wkład w dyscyplinę naukową automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne zaliczam przede wszystkim:

1. Opracowanie autorskiego, zintegrowanego środowiska symulacyjnego, łączącego model kinematyki ruchu wielu pojazdów trakcyjnych z wielowęzłowym modelem elektrycznym sieci, co pozwoliło na precyzyjne odwzorowanie zjawisk dynamicznych i bilansowanie energii w systemie z zasobnikami.
2. Opracowanie metodyki doboru optymalnych parametrów eksploatacyjnych przytorowych zasobników energii (w tym progów napięciowych i lokalizacji) z wykorzystaniem zaawansowanej analizy statystycznej oraz macierzy korelacji zmiennych decyzyjnych.
3. Zaprojektowanie i skuteczną weryfikację eksperymentalną algorytmów sterowania przekształtnikami DC/DC (w tym metodą feed-forward) w warunkach rzeczywistych komercyjnego systemu trakcyjnego 3000 V DC, potwierdzając ich stabilność i efektywność.
4. Wykazanie ilościowego wpływu zastosowania magazynów energii na redukcję strat w rezystorach hamowania oraz obniżenie szczytowego zapotrzebowania na moc, co stanowi podstawę do budowy modeli biznesowych dla nowoczesnej trakcji elektrycznej.

Sposób prowadzenia badań oraz rezultaty możliwe do wykorzystania w praktyce inżynierskiej potwierdzają znaczną wiedzę Doktoranta oraz zdolność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Mając na uwadze wymienione oryginalne osiągnięcia naukowe, uważam, że Pan mgr inż. Rafał Jacukowicz zrealizował cel badawczy oraz zweryfikował sformułowane hipotezy. Opracowane narzędzie symulacyjne i wyniki eksperymentalne stanowią oryginalny wkład o wymiernej wartości aplikacyjnej. Możliwość generalizacji na inne systemy zasilania transportu dodatkowo podnosi znaczenie pracy.

Uwzględniając całość rozprawy doktorskiej wraz z oryginalnymi osiągnięciami naukowo-badawczymi, stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska – 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”* **spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim** przez obowiązującą ustawę o tytule naukowym i stopniach naukowych dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

W związku z tym, przedkładam Radzie Naukowej dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Wydziału Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechniki Krakowskiej wniosek o przyjęcie i dopuszczenie recenzowanej rozprawy do publicznej obrony.

Marcin Wolkiewicz

Marcin Wolkiewicz