

Kielce, 13.05.2021 r.

Dr hab. inż. Marek Pawełczyk, prof. uczelni
Politechnika Świętokrzyska
Wydział Zarządzania i Modelowania Komputerowego
Aleja Tysiąclecia Państwa Polskiego 7
25-314 Kielce

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Petru Valentin Radu pt. „Analiza celowości zastosowania zasobników energii w układach zasilania miejskiej trakcji elektrycznej”

1. Wymagania formalne

1.1. Podstawa prawna

Podstawą do przygotowania recenzji jest decyzja Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej, która na posiedzeniu w dniu 16.02.2021 r. podjęła uchwałę o wyznaczeniu recenzentów rozprawy mgr. inż. Petru Valentin Radu, zatytułowanej „Analiza celowości zastosowania zasobników energii w układach zasilania miejskiej trakcji elektrycznej”. Pismem, wystosowanym przez Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny, prof. dr. hab. inż. Tomasza Stareckiego, zostałem poinformowany o powołaniu mnie na recenzenta rozprawy.

Rozprawa została przygotowana pod kierunkiem dr. hab. inż. Mirosława Lewandowskiego, profesora uczelni. Promotorem pomocniczym był dr inż. Marcin Steczek.

1.2. Ocena spełnienia warunków formalnych

Rozprawę doktorską otrzymałem w formie książkowej. Rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i zawiera streszczenie w języku polskim (str. 7-8) oraz w języku angielskim (str. 9-10). Tym samym spełnione są wymogi formalne, określone w art. 13 Ustawy z dnia 14 marca 2003 o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (tekst jednolity Dz. U. z 2017 r. poz. 1789).

2. Ocena rozprawy doktorskiej

Zgodnie z art. 13 punkt 1 Ustawy z dnia 14 marca 2003 o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (tekst jednolity Dz. U. z 2017 r. poz. 1789), rozprawa doktorska „powinna stanowić oryginalne rozwiązanie problemu naukowego lub oryginalne rozwiązanie problemu w oparciu o opracowanie projektowe, konstrukcyjne, technologiczne, lub oryginalne dokonanie artystyczne, oraz wykazywać ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w danej dyscyplinie naukowej lub artystycznej oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej”. Posługując się tą podstawą prawną, oceniłem w recenzji kolejno trafność i znaczenie wybranego problemu badawczego, cele postawione w rozprawie, część teoretyczną i część empiryczną rozprawy.



2.1. Ocena trafności i znaczenia wybranego problemu badawczego

Jako zasadniczy cel rozprawy Doktorant wskazał ocenę efektywności zastosowania w systemie trakcji elektrycznej prądu stałego mobilnych (instalowanych na pokładzie pojazdu) oraz stacjonarnych (instalowanych w pobliżu linii) zasobników energii. Zagadnienie wspomagania systemu zasilania trakcji elektrycznej przy wykorzystaniu zasobników energii nie jest nowe, bowiem, jak słusznie zauważa Autor, pierwsze próby w tym zakresie – to pierwsze dekada XX wieku, natomiast na przestrzeni ponad 100 lat ewolucji ulegały zasobniki energii – ich rodzaj, parametry energetyczne, sposób sterowania i, w konsekwencji, efektywność energetyczna i kosztowa ich wykorzystania. Opracowywaniu nowych rozwiązań technicznych towarzyszyły prace ukierunkowane na dobór parametrów zasobników, ocenę przydatności i trwałości poszczególnych rozwiązań. Z reguły próby zastosowania zasobników ograniczały się do rozwiązań prototypowych, a podstawowym problemem była zazwyczaj analiza relacji efektów – oszczędności energii – uzyskanych w okresie trwałości zasobników oraz kosztów budowy i kosztów eksploatacyjnych zasobnika. Przygotowana przez Doktoranta rozprawa bezpośrednio dotyczy ww. zagadnień, przy czym zastosowanie zasobników w ostatnim okresie zyskało na aktualności, bowiem koszty instalacji zasobników mają tendencję spadkową, zaś z drugiej strony daje się zaobserwować szybki wzrost cen energii elektrycznej, szczególnie w Polsce, gdzie zaobserwować można konsekwencje zaniechań kolejnych rządów w zakresie rozwoju energetyki opartej na źródłach alternatywnych w stosunku do węgla kamiennego i brunatnego. Z tego względu może się wkrótce okazać, że obliczenia, oparte na metodyce opracowanej przez Doktoranta, wykażą znacznie większą atrakcyjność ekonomiczną zastosowań zasobników energii w trakcji elektrycznej.

Oceniana rozprawa jest kolejnym efektem badań naukowych w tym zakresie, jakie powstały w wyniku prac prowadzonych przez Zakład Trakcji Elektrycznej na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej, przy czym obroniona w roku 2018 rozprawa doktorska Włodzimierza Jefimowskiego dotyczyła trakcji kolejowej, natomiast w ocenianej rozprawie Autor analizował zastosowanie zasobników energii w metrze.

Jednym z największych walorów pracy jest całościowa analiza systemu zasilania pojazdów kolei podziemnej, która została oparta na modelu odcinka linii z podstacjami zasilającymi i podstacjami zasobnikowymi, pojazdami trakcyjnymi, przy uwzględnieniu zmienności obciążenia układu zasilania. Autor zamodelował podstacje zasobnikowe, określając i uwzględniając w obliczeniach symulacyjnych sposób sterowania pracą podstacji akumulacyjnej z przekształtnikiem DC/DC, dostosowującym napięcie zasobnika do napięcia w sieci trakcyjnej dla różnego poziomu naładowania zasobnika. Rozważano również wpływ usytuowania podstacji zasobnikowej na możliwe do uzyskania oszczędności energii elektrycznej przy jednoczesnej minimalizacji kosztów instalacji i kosztów utrzymania zasobnika. Autor słusznie zauważył, że efekt ekonomiczny zastosowania zasobników energii wiąże się z efektem minimalizacji pików poboru energii z sieci trakcyjnej i akumulacją „nadmiarowej” energii rekuperacji, czego konsekwencją jest możliwość ograniczenia mocy szczytowej. Uzyskane dzięki pracy zasobnika oszczędności energii elektrycznej przekładają się również na redukcję emisji CO₂. Doktorant poświęcił tym zagadnieniom sporo miejsca, przedstawiając oprócz analizy wpływu zasobników energii na warunki napięciowe w sieci trakcyjnej, analizę ekonomiczną celowości zastosowania pokładowych i stacjonarnych zasobników energii w warunkach kolei podziemnej.

Powyższe aspekty badawcze znalazły odzwierciedlenie w tezie rozprawy, która została sformułowana następująco:

„Zastosowanie zasobników energii w zelektryfikowanym miejskim transporcie szynowym pozwala na zmniejszenia zapotrzebowanej energii elektrycznej i mocy szczytowej oraz poprawę warunków napięciowych w sieci trakcyjnej. Opracowanie i zastosowanie kompleksowych metod wykorzystujących techniki modelowania i symulacji komputerowej umożliwia dobór odpowiedniej lokalizacji oraz wymaganych parametrów i algorytmów sterowania zasobnikami”.

Istotny aspekt nowości został odzwierciedlony przede wszystkim w drugiej części tezy, w której mowa o wyborze miejsca instalacji zasobnika, parametrach określających sposób sterowania zasobnika oraz wykorzystaniu technik modelowania i symulacji komputerowej. Aspekt oszczędności energii elektrycznej, wykorzystywanej na cele trakcyjne oraz ograniczenia mocy szczytowej i poprawy warunków napięciowych, był już przedmiotem wcześniejszych prac w tym obszarze badań, choć nie ulega wątpliwości, że nie w tak szerokim zakresie, jak w ocenianej pracy.

Na str. 27 rozprawy Doktorant zdefiniował kluczowe zadania, niezbędne do naukowej weryfikacji przedstawionej wyżej tezy rozprawy:

- przegląd literatury na temat zastosowania stacjonarnych i pokładowych zasobników energii oraz zasobników zainstalowanych w pojeździe w transporcie kolejowym oraz technik optymalizacji i sterowania zasobników, a także symulacji systemów zasilania trakcji elektrycznej;
- opracowanie modeli matematycznych i symulacyjnych stacjonarnych zasobników energii, układów przekształtnikowych oraz pojazdów trakcyjnych (pociągów metra) wykorzystywanych w systemach zasilania trakcji elektrycznej prądu stałego;
- implementacja opracowanych modeli matematycznych przy wykorzystaniu języka programowania C++ i środowiska programistycznego DEV C++, opracowanie kompleksowego programu symulacyjnego z uwzględnieniem modeli elementów składowych systemu zasilania trakcji elektrycznej,
- opracowanie algorytmów sterowania stacjonarnym zasobnikiem energii (przy uwzględnieniu jego poziomu naładowania, napięcia i mocy ładowania i rozładowania) oraz warunków napięciowych w sieci trakcyjnej w miejscu podłączenia zasobnika, dla dowolnej liczby zasobników energii zainstalowanych w układzie zasilania i przy uwzględnieniu sterowania zasobnikami na dwóch poziomach (w zależności od poziomu naładowania zasobnika i stanu obciążenia sieci trakcyjnej);
- weryfikacja wyników badań symulacyjnych zasobnika oraz wyników przejazdu teoretycznego pociągu metra z wynikami pomiarów wykonanych w warunkach rzeczywistych na linii metra;
- modelowanie numeryczne systemu zasilania odcinka linii metra w warunkach normalnych i awaryjnych pod kątem oceny efektywności energetycznej i ekonomicznej zastosowania zasobników energii w zależności od ich usytuowania, rozkładu jazdy oraz sposobu sterowania, w tym korzyści wynikających z redukcji emisji CO₂ i zmniejszenia zapotrzebowanej mocy szczytowej podstacji;
- weryfikacja zaproponowanej metody optymalizacyjnej (studium przypadku dla istniejącej linii metra) w celu potwierdzenia efektywności zastosowania zasobników energii;
- ocena możliwości wykorzystania opracowanych przez Doktoranta modeli matematycznych i symulacyjnych do prac badawczych i studialnych odnoszących się do zastosowania stacjonarnych zasobników energii w układach zasilania miejskiej trakcji elektrycznej.

Z przedstawionej wyżej charakterystyki zasadniczych zagadnień badawczych rozprawy wynika, że mają one cechy oryginalności i że Doktorant sformułował przedstawione wyżej cele badawcze w sposób prawidłowy, identyfikując istotne problemy techniczne i naukowe, łącząc umiejętności formułowania zadań badawczych z umiejętnościami ich praktycznej analizy, przy wykorzystaniu narzędzi symulacji komputerowej. Zarówno zidentyfikowane przez Doktoranta zasadnicze cele rozprawy, jak i wykorzystane metody analizy, uznają za właściwe i adekwatne do wskazanych w celach rozprawy zadań.

2.2. Ocena zawartości rozprawy

Rozprawa w dostarczonej do oceny postaci liczy 170 stron. Prezentowane treści Doktorant podzielił na 9 rozdziałów merytorycznych. Ponadto w skład rozprawy wchodzi bardzo użyteczny podczas lektury rozprawy spis oznaczeń, spis literatury, wykaz rysunków, tabel oraz załącznik, w którym przedstawiono schematy odcinków linii metra z odpowiadającymi im macierzami konduktancji oraz opis metodyki wyznaczania napięć w węzłach sieci, wykorzystywanej w opracowanym przez Autora rozprawy modelu symulacyjnym z przykładowymi wynikami obliczeń. Zasadnicze części rozprawy – to:

- Wprowadzenie, w którym sformułowane zostały cele i teza rozprawy (str. 23 – 28);
- Rozdział 2: Przegląd literatury dotyczącej zasobników (str. 29 – 50);
- Rozdział 3: Opis matematyczny WESD z S.C. stosowanych w układach zasilania trakcji elektrycznej (str. 51 -54);
- Rozdział 4: Model matematyczny systemu trakcyjnego DC z WESD (str. 55 – 66);
- Rozdział 5: Implementacja modelu matematycznego systemu zasilania trakcyjnego DC z WESD oraz algorytmów sterowania WESD w środowisku programowym (str. 67 – 81);
- Rozdział 6: Weryfikacja rezultatów z programu symulacyjnego z wynikami pomiarów przeprowadzonych na linii metra (str. 82 – 105);
- Rozdział 7: Analiza wpływu WESD na układ zasilania metra (str. 106 – 117);
- Rozdział 8: Analiza ekonomiczna stosowania zasobników w pojeździe oraz zasobników stacjonarnych w metrze (str. 228 – 144);
- Podsumowanie.

Zdaniem oceniającego rozprawę z nadawania numery rozdziału w przypadku wprowadzenia i podsumowania można było zrezygnować. Ponadto krótki, liczący tylko 3 strony rozdział 3 można było bez szkody dla czytelności rozprawy połączyć z rozdziałem 4. Punkt 8.1 należało zatytułować „Model ekonomiczny zasobnika zainstalowanego w pojeździe” (w pracy punkt ten nieprecyzyjnie zatytułowano „Model ekonomiczny zasobnika zainstalowany w pojeździe”). Doktorant mógł bez szkody dla wartości merytorycznej pracy zrezygnować z zagadnień związanych z pokładowymi zasobnikami energii – kwestie te zostały w pracy potraktowane marginalnie, a ładunek merytoryczny zagadnień związanych ze stacjonarnymi zasobnikami energii z nadwyżką spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim.

Na stronach 148 – 159 Doktorant umieścił bibliografię, obejmującą 124 pozycje literatury, ułożone zgodnie z kolejnością cytowania, z czego 17 – to źródła internetowe. W przypadku pozycji [116] Doktorant jako nazwę strony www nieprawidłowo wskazał „Statistica” (powinno być „Statista”). W bibliografii Doktorant wymienia 6 pozycji, których jest współautorem. Cztery spośród tych pozycji literatury dotyczą bezpośrednio zagadnień, stanowiących przedmiot rozprawy, dwie zostały opublikowane w wysokopunktowanych czasopismach. Przedstawiony przegląd literatury należy uznać za aktualny i adekwatny do tematyki rozprawy.

We Wprowadzeniu (oznaczonym jako rozdział 1) Doktorant scharakteryzował rolę, jaką odgrywa zelektryfikowany transport szynowy w zakresie realizacji zadań europejskiej polityki transportowej.



Wskazano na zadania, stojące przed jednostkami badawczymi w zakresie ograniczenia energochłonności taboru, obsługującego systemy pasażerskiego transportu miejskiego. Istotną rolę w tym zakresie powinny odegrać systemy akumulacji energii i ich zasadnicze składniki – zasobniki energii elektrycznej. Oznacza to zarówno zadania związane z budową różnych typów zasobników (które nie stanowią przedmiotu rozprawy), jak i kwestie, związane z wykorzystaniem zasobników energii, szczególnie w zakresie akumulacji energii rekuperacji, jak i poprawy warunków napięciowych w sieci trakcyjnej. Aby uzyskać maksimum korzyści z zastosowania zasobników energii konieczne są badania symulacyjne systemów zasilania, ukierunkowane na opracowanie metod sterowania procesami magazynowania energii oraz dobór parametrów zasobników dla różnych wariantów topologii sieci zasilającej. Jak słusznie stwierdza Doktorant zidentyfikowany problem badawczy może być rozwiązywany przy wykorzystaniu metod optymalizacji wielokryterialnej, opisanych i wykorzystanych w rozprawie. Istotnym zagadnieniem jest również analiza ekonomiczna wykorzystania zasobników, uwzględniająca koszty instalacji, utrzymania zasobnika, a także zmieniające się ceny energii elektrycznej oraz efekty związane z redukcją emisji CO₂, a ponadto możliwość ograniczenia mocy zamawianej, wynikająca ze stabilizacji mocy zamawianej dzięki pracy zasobników.

W rozdziale 2, zgodnie z jego tytułem, przedstawiono przegląd literaturowy zagadnień związanych z zasobnikami energii, wskazując na własności i możliwości wykorzystania poszczególnych typów zasobników (elektrochemicznych, kinetycznych – bezwładnikowych, pojemnościowych – supekondensatorów, nadprzewodnikowych, gromadzących energię pola magnetycznego, a także odwracalnych ogniw paliwowych). Doktorant przedstawił także krótką historię zastosowań pokładowych i stacjonarnych zasobników energii w systemach transportu szynowego. W punkcie 2.3 rozdziału przedstawiono omówienie zagadnień związanych z optymalizacją sterowania zasobnikami, między innymi wskazano na możliwości w zakresie wykorzystania specjalnych metod optymalizacyjnych do analizy systemów zasilania trakcji elektrycznej, wyposażonych w układy przeznaczone do akumulacji energii. Koncepcję poszukiwania rozwiązań Pareto-optymalnych dla wielokryterialnych problemów optymalizacyjnych przedstawiono na rys. 4. W końcowej części rozdziału omówiono dostępne na rynku symulatory systemów zasilania trakcji elektrycznej, wskazując na ograniczenia, wynikające z przyjętych w tych symulatorach założeń. Przedstawiono także przegląd stosowanych metod iteracyjnych, wykorzystywanych w modelach symulacyjnych do wyznaczania wartości prądów i napięć w poszczególnych węzłach systemów zasilania. W punkcie 2.5, stanowiącym podsumowanie treści zawartych w rozdziale, Doktorant dokonuje przeglądu stosowanych w istniejących rozwiązaniach systemów, przeznaczonych do magazynowania energii, wskazując na zasobniki elektrochemiczne (zwłaszcza litowo-jonowe), szczególnie przydatne w przypadku dłuższego magazynowania większych ilości energii oraz na zasobniki superkondensatorowe, charakteryzujące się dużą gęstością mocy przy stosunkowo niewielkiej gęstości energii, predystynowane do współpracy poprzez sieć trakcyjną z pociągami przystosowanymi do rekuperacji energii podczas hamowania.

W krótkim, kilkustronicowym rozdziale 3 Doktorant przedstawił przyjęte w pracy modele stacjonarnych zasobników energii, wykorzystujących magazynowanie energii w superkondensatorach. W rozdziale zabrakło opisu modelu przekształtnika, wykorzystywanego w modelowaniu symulacyjnym, niezbędnego z punktu widzenia możliwości sterowania pracą zasobnika energii poprzez dostosowywanie napięcia na wyjściu z zasobnika do warunków napięciowych w sieci trakcyjnej. Szkoda, że Doktorant nie przedstawił też bliższych informacji na temat charakteru zmienności zastępczej rezystancji szeregowej w funkcji stanu naładowania superkondensatora i jego temperatury, a także wpływu tętnień prądu na gabaryty filtrów przekształtnika, co ma wpływ na gabaryty i masę zasobnika energii.

Rozdział 4 rozprawy zawiera opis modelu matematycznego systemu zasilania trakcji elektrycznej dla systemu metra. Przedstawiając opis tego modelu Doktorant podkreślił, że problematyka wykorzystania stacjonarnych zasobników energii w systemach zasilania trakcji elektrycznej w komunikacji miejskiej nie została dotychczas szczegółowo przeanalizowana. Doktorant zaproponował w związku z tym nową, autorską metodą modelowania systemu zasilania, przy uwzględnieniu wspomagających pracę systemu zasobników energii. W tabeli 5 (str. 56) przedstawiono zestawienie wzorów wykorzystywanych do opisu dynamiki pociągu oraz wzorów służących do modelowania zależności energetycznych, związanych z ruchem pociągu, zaś w punkcie 4.3 zawarto opis modelu systemu zasilania, obejmującego model pojazdu trakcyjnego (pociąg metra z parametrami trakcyjnymi wyznaczonymi w oparciu o zależności przedstawione w punkcie 4.3 i parametry elektryczne, obliczone przy wykorzystaniu opisanej w punkcie 4.4 metody potencjałów węzłowych) oraz model podstacji trakcyjnej, sieci trakcyjnej i powrotnej, a także zasobnika superkondensatorowego. We wspomnianej metodzie potencjałów węzłowych zastępowano wartości zmienne, odnoszące się do ruchu pojazdu, wartościami ustalonymi dla danego kroku obliczeniowego ($\Delta t = 1$ s). Model podstacji trakcyjnej przedstawiono jako źródło prądowe z konduktancją zastępczą G , a pociągi - jako idealne źródło prądu, sterowane napięciem. Konduktancję podstacji obliczano jako odwrotność sumy rezystancji wewnętrznej podstacji trakcyjnej, kabli zasilających i kabli powrotnych. Zasobnik energii zamodelowano jako idealne źródło prądowe, zależne od napięcia w sieci trakcyjnej. Do wyznaczania macierzy obwodu elektrycznego i napięć w węzłach wykorzystano metodę Newtona-Raphsona. Opisany w rozdziale 4 model odcinka sieci trakcyjnej z zasobnikami energii ma istotne cechy nowości, co potwierdzają również publikacje naukowe prezentujące ten model w wysokopunktowanym czasopiśmie „Energies”. Model został wykorzystany do przeprowadzonych i opisanych w rozprawie badań symulacyjnych.

Rozdział 5 został zatytułowany „Implementacja modelu matematycznego systemu zasilania trakcyjnego DC z WESD oraz algorytmów sterowania WESD w środowisku programowym”. Wskazany tytuł nie do końca precyzyjnie opisuje zawartość rozdziału, bowiem Doktorant skupił się w tej części pracy na prezentacji algorytmu obliczeniowego, który następnie został zaimplementowany w autorskiej aplikacji Doktoranta, nazwanej „Modeltrack”. Istotą opracowanego algorytmu było obliczanie lokalizacji obiektu (pociągu) w danym kroku symulacyjnym i jego lokowanie w odpowiednim węźle, co należy uznać za oryginalny pomysł Autora rozprawy. W punkcie 5.3 został przedstawiony opis algorytmu sterowania zasobników, w którym wartość i kierunek przepływu mocy (do lub z zasobnika) są uzależnione od warunków napięciowych w sieci trakcyjnej oraz od stanu naładowania zasobnika. Szkoda, że w rozprawie, lub załącznikach do niej, nie przedstawiono więcej szczegółów na temat samego sposobu implementacji modelu opisanego w rozdziale 4 i algorytmu przedstawionego w rozdziale 5 – być może zdecydowała o tym konieczność ograniczenia objętości pracy ze względów wydawniczych. Sam fakt skutecznej implementacji modelu potwierdzają przedstawione w kolejnych rozdziałach rozprawy wyniki obliczeń symulacyjnych, wykonane przy wykorzystaniu programu obliczeniowego, stanowiącego ważne osiągnięcie Doktoranta. Istotną zaletą przedstawionego modelu jest możliwość dołączania dowolnej liczby zasobników do odcinka zasilania i niezależnego nimi sterowania.

W rozdziale 6 Doktorant krótko opisał funkcjonalności opracowanego programu symulacyjnego oraz listę parametrów, przyjmowanych jako wejściowe do modelu, po czym skonfrontował wyniki pomiarów, przeprowadzonych w warunkach rzeczywistych (II linia metra warszawskiego) z wynikami uzyskanymi na drodze obliczeń symulacyjnych. Z przedstawionych w rozprawie wartości, opisujących zgodność modelu z uzyskanymi wynikami pomiarów, wynika adekwatność modelu, opisującego rzeczywiste warunki pracy systemu zasilania. Dla czasów przejazdu względne różnice wynosiły kilka procent, co należy uznać za dokładność satysfakcjonującą, zważywszy na występujące w warunkach eksploatacyjnych odchylenia od rozkładu jazdy, losowe zmiany stopnia zapełnienia pociągu, sposób

prowadzenia pociągów przez maszynistów itp. Bardzo dobrą zbieżność (na poziomie 1%) uzyskano w wyniku porównania przepływów energii do zasobnika (reżim „poboru” energii), nieco gorszy był wynik dla przepływów energii z zasobnika do sieci trakcyjnej (błąd względny nieprzekraczający 8%), ale i w tym przypadku należy uznać, że uzyskana zgodność jest akceptowalna. Weryfikację zgodności danych uzyskanych w wyniku pomiaru z danymi uzyskanymi z modelu obliczeniowego przeprowadzono również przy wykorzystaniu narzędzi statystyki matematycznej. Doktorant obliczył wartość współczynnika korelacji Pearsona dla analizowanych danych, po czym zweryfikował hipotezę o niezależności uzyskanych przebiegów napięciowych (zmierzonych i obliczonych), obliczając wartość statystyki testowej ($t_s = 51,59$) i porównując ją z wartością krytyczną, wyznaczoną na podstawie rozkładu t-Studenta dla poziomu istotności $\alpha = 0,05$ i $n > 120$ stopni swobody ($t_\alpha = 1,985$). Hipotezę o niezależności należało odrzucić, co potwierdziło istotność uzyskanego współczynnika korelacji. W dalszej części rozdziału przeprowadzono weryfikację obliczonych i zmierzonych na trzeciej szynie napięć dla pociągu i podstacji. Również i w tym przypadku uzyskano dobrą zbieżność wyników pomiarów i symulacji. Przedstawione w rozdziale 6 wyniki potwierdzają poprawność modelu obliczeniowego opracowanego przez Doktoranta i zgodność wyników symulacji z wynikami pomiarów.

Rozdział 7 rozprawy przedstawia wyniki analizy wpływu zastosowania zasobników energii na funkcjonowanie systemu zasilania, w tym na parametry określające warunki pracy zespołu transformatorowo-prostownikowego, napięcie w sieci trakcyjnej, a także na warunki napięciowe na odbieraku prądowym pojazdu trakcyjnego. Analizy prowadzono dla trzech wariantów układu zasilania: dla przypadku z pojazdami bez możliwości rekuperacji energii, dla przypadku z pojazdami przystosowanymi do rekuperacji energii oraz dla przypadku, gdy pociągi rekuperują energię do sieci trakcyjnej i dodatkowo w podstacji trakcyjnej zainstalowany jest zasobnik energii. Obliczenia symulacyjne były prowadzone dla najbardziej niekorzystnych warunków pracy układu zasilania (odstęp pomiędzy pociągami wynoszący 3 minuty). Na podstawie uzyskanych wyników symulacji Doktorant wysnuł wniosek, że zastosowanie hamowania odzyskowego wywiera pozytywny wpływ na warunki pracy układu zasilania – następuje podwyższenie wartości średniego napięcia użytecznego i obniżenie wartości zastępczej prądu 15-minutowego podstacji. Dołączenie do systemu zasobnika energii (w symulacjach założono, że pojemność energetyczną zasobnika wynosi 40 MJ) wzmacnia wspomniany pozytywny efekt. W rozdziale przedstawiono również studium przypadku dla warunków ekstremalnych: awarii jednej z podstacji oraz zaniku zasilania we wszystkich podstacjach. W ostatniej sytuacji energia zakumulowana w zasobniku zapewni dojazd pociągu do najbliższej stacji, co stanowi kolejny argument, uzasadniający celowość instalacji zasobników energii w systemach zasilania linii metra.

W rozdziale 8 przedstawiono wyniki analizy ekonomicznej efektów zastosowania zasobników energii na pojeździe oraz zasobników stacjonarnych. W analizie brano pod uwagę koszty CAPEX (nakłady inwestycyjne związane z instalacją zasobnika) - koszty: baterii superkondensatorów, przekształtnika DC/DC, szafy i pulpitu sterowania, aparatury przyłączeniowej, rozdzielni głównej, rozdzielni na potrzeby własne podstacji zasobnikowej, zasilacza sieci trakcyjnej, klimatyzacji, odłączników sieci i kabli powrotnych, koszt budowy pomieszczenia, w którym zostanie zainstalowany zasobnik oraz koszt instalacji. Jako koszty OPEX (operacyjne) wskazano koszt wymiany uszkodzonych modułów i napraw zasobnika, a także koszt energii związany z koniecznością klimatyzowania pomieszczenia, w którym zainstalowano zasobnik. Jako miernik, pozwalający na ocenę efektywności ekonomicznej zasobnika, wykorzystano iloraz różnicy wartości oszczędności energetycznych uzyskanych w wyniku zastosowania zasobnika (z uwzględnieniem efektu ograniczenia emisji CO₂) łącznych kosztów inwestycyjnych odniesionej do sumy uzyskanych oszczędności. W studium przypadku dokonano oceny efektywności wykorzystania trzech wariantów pokładowego zasobnika energii oraz efektywności instalacji stacjonarnego zasobnika superkondensatorowego. W przypadku zasobnika stacjonarnego wskaźnik,

opisujący efektywność instalacji zasobnika, przyjmuje wartość dodatnią przed upływem 10 lat, o ile uwzględni się dodatkowy efekt w postaci ograniczenia emisji CO₂. Biorąc pod uwagę szybki wzrost cen uprawnień do emisji CO₂ oraz związany z tym wzrost cen energii elektrycznej dla odbiorców przemysłowych można przyjąć, że wskaźnik efektywności, wyliczony w pracy, będzie miał tendencję wzrostową z uwagi na niższy koszt instalacji i większą wartość zaoszczędzonej energii.

Ostatni, dziewiąty rozdział pracy, poświęcony jest optymalizacji wielokryterialnej parametrów zasobnika, przy czym jako zmienne decyzyjne przyjęto: parametr, charakteryzujący lokalizację zasobnika, moc zasobnika oraz jego pojemność energetyczną, natomiast jako kryteria optymalizacyjne wskazano minimalizację zapotrzebowania na energię elektryczną przez podstawę oraz minimalizację kosztu zasobnika. Ze względu na występowanie trzech zmiennych decyzyjnych oraz dwóch kryteriów optymalizacji konieczne było wyznaczenie zbiorów rozwiązań Pareto-optymalnych, a następnie, na ich podstawie, wybór jednego z uzyskanych rozwiązań w oparciu o nadrzędne kryterium efektywności ekonomicznej. Doktorant przedstawił schemat modelu optymalizacji wielokryterialnej, wykorzystujący algorytm programowania dynamicznego dla zdefiniowanego zakresu zmienności zmiennych decyzyjnych. W przedstawionym w pracy studium przypadku przyjęto wartości parametrów takie same, jak dla oceny efektywności instalacji zasobnika stacjonarnego w rozdziale 8. Analizie poddano zależności energii rekuperowanej przez zasobnik superkondensatorowy, zainstalowany na II linii metra warszawskiego dla różnych minimalnych poziomów napięcia dla baterii superkondensatorów oraz dla różnych rozkładowych odstępów czasowych pomiędzy pojazdami. Najbardziej korzystnym pod względem oszczędności energii przypadkiem okazał się rozkład jazdy z 5-minutowym odstępem przejazdu pociągów i rozładowaniem zasobnika do poziomu 250 V. Wykazano również wpływ modyfikacji mocy zainstalowanej zasobnika w podstacji P6 na efektywność ekonomiczną instalacji tego urządzenia. Wyznaczono zbiór rozwiązań dopuszczalnych, optymalny wskaźnik efektywności uzyskano dla mocy podstacji akumulacyjnej, wynoszącej 2 MW. W rozprawie rozważano również wpływ lokalizacji podstacji akumulacyjnej na efektywność instalacji – okazało się, że w przypadku instalacji zasobnika o mocy 1,5 MW i pojemności energetycznej 11 kWh w podstacji trakcyjnej PT1 wskaźnik efektywności ekonomicznej dla 10-letniego okresu eksploatacji wynosi ponad 40%. Jeszcze większe korzyści przyniosłaby instalacja zasobnika w PT1 (> 40%), w PT3 (ok. 190%), w PT5 (> 100%) lub w PT7 (ok. 190%). Z przedstawionych w rozdziale 9 rozważań wynika konieczność przeprowadzenia analizy efektywnościowej przed podjęciem decyzji o instalacji zasobnika w systemie zasilania. Dla odpowiedniej lokalizacji zasobnika wskaźnik efektywności dla 10-letniego okresu eksploatacji przyjmuje wartości dodatnie, nawet w przypadku pominięcia korzyści wynikających z ograniczenia emisji CO₂.

Po zapoznaniu się z treścią rozprawy i wynikami przeprowadzonych obliczeń symulacyjnych, potwierdzonych wynikami dokonanych przez Doktoranta pomiarów w podstacji P6 metra warszawskiego uznaję, że zawartość pracy odpowiada tytułowi pracy, a układ pracy uznaję za poprawny. Sformułowane przez Doktoranta wnioski końcowe odzwierciedlają wyniki przeprowadzonych badań, są prawidłowe i potwierdzają słuszność zdefiniowanej tezy badawczej. Przeprowadzone przez Autora studium literaturowe oraz rzetelne i prawidłowe odniesienia do wskazanych w rozprawie pozycji bibliografii świadczą o bardzo dobrym rozeznaniu w zakresie stanu wiedzy w obszarze, związanym z tematyką pracy. Należy również podkreślić interdyscyplinarny charakter pracy – oprócz dominujących w pracy rozważań dotyczących trakcji elektrycznej, w tym systemów zasilania zelektryfikowanych linii obsługujących ruch pasażerski, Doktorant wykazał biegłość w zakresie programowania (o czym świadczą opracowane przez Doktoranta algorytmy i program komputerowy „Modeltrack”), w zakresie oceny efektywnościowej przedsięwzięć ekonomicznych oraz w zakresie metod optymalizacji wielokryterialnej.



3. Ocena osiągnięć badawczych Doktoranta

Oceniana rozprawa stanowi oryginalne osiągnięcie naukowe Doktoranta w zakresie analizy efektywności zastosowania zasobników energii w systemach trakcji elektrycznej prądu stałego, zwłaszcza w odniesieniu do linii metra i stacjonarnych zasobników superkondensatorowych. Za najważniejsze osiągnięcia Autora uznaję:

- opracowanie modelu symulacyjnego odcinka linii metra ze stacjonarnymi zasobnikami energii;
- opracowanie dwupoziomowego algorytmu sterowania pracą zasobnika;
- wykorzystanie iteracyjnej metody Newtona-Raphsona do wyznaczenia prądów i napięć w sieci trakcyjnej;
- implementacja opracowanych modeli matematycznych i algorytmów sterowania w programie komputerowym „Modeltrack”, stanowiącym narzędzie do badań symulacyjnych systemów zasilania trakcji elektrycznej wyposażonych w zasobniki energii;
- weryfikacja opracowanego modelu symulacyjnego i jego implementacji poprzez porównanie wyników symulacji z wynikami pomiarów uzyskanych w warunkach rzeczywistych i ocenę ich zgodności;
- przeprowadzenie badań symulacyjnych, mających na celu ocenę efektywności energetycznej i ekonomicznej zastosowania zasobników energii;
- wykorzystanie metod programowania dynamicznego do optymalizacji wielokryterialnej lokalizacji i parametrów zasobników energii (moc i pojemność zasobnika) pod kątem możliwych do uzyskania oszczędności energii oraz oczekiwanych efektów ekonomicznych ich zastosowania.

Oceniana rozprawa obejmuje studium literaturowe dotyczące zagadnień związanych z przedstawionym w pracy obszarem badań, budowę modelu matematycznego systemu zasilania z zasobnikami energii, algorytmów przeznaczonych do ich implementacji, programu komputerowego wykorzystującego te algorytmy, weryfikacji programu symulacyjnego oraz wyników badań symulacyjnych dla różnych wariantów pracy systemu. Doktorant potwierdził umiejętności we wszystkich wskazanych wyżej obszarach i wykazał się umiejętnością formułowania problemów badawczych i ich samodzielnego rozwiązywania.

Uznaję, że Dyplomant wniósł istotny wkład w rozwój dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika z zakresie badań ukierunkowanych na poprawę efektywności energetycznej i ekonomicznej systemów zasilania trakcji elektrycznej poprzez wykorzystanie zasobników energii.

4. Uwagi

W wyniku lektury rozprawy pojawiły się następujące uwagi o charakterze ogólnym:

- Proszę o wyjaśnienie, dlaczego jako obiekt badań w rozprawie wybrano zasobniki superkondensatorowe, a nie baterie litowo-jonowe, które charakteryzują się wyraźnie lepszymi parametrami opisującymi gęstość mocy i energii.
- Proszę o ocenę wpływu uwzględnienia zmienności impedancji na dokładność modelu (o czym mowa na str. 52 rozprawy).
- Na str. 88 Doktorant stwierdza: *„Istnieje szereg metod weryfikacji, czy wyniki z symulacji z wykorzystaniem opracowanego programu są zbliżone do wyników pomiarów w warunkach rzeczywistych, tzn. czy rozbieżności pomiędzy wynikami symulacji i pomiarów znajdują się w akceptowanej granicy różnicy, która może wynosić od kilku do ponad 10%”* Proszę o doprecyzowanie tego stwierdzenia.

- Proszę o wyjaśnienie, dlaczego w przypadku superkondensatorów Autor konsekwentnie używa skrótu S.C., a nie, jak w przypadku pozostałych skrótów „SC”.
- Proszę o wyjaśnienie stwierdzenia (str. 41) „W pracach [66][67] autorzy opracowali nieliniowy program liczb całkowitych, aby zmaksymalizować wykorzystanie energii hamowania”.

Ponadto w związku z lekturą pracy nasuwają się następujące uwagi szczegółowe:

- Str. 30: „nowoczesne koła zamachowe lewitują za pomocą elektromagnesów w próżni, co zmniejsza opór powietrza” - sformułowanie niefortunne, w próżni nie ma powietrza w celu obniżenia tzw. oporów brodzenia bezwładniki (koła zamachowe) wirują w komorach, w których radykalnie obniża się ciśnienie powietrza lub powietrze zastępuje się gazem o niskiej lepkości (np. wodorem).
- Str. 30: „Aby zmagazynować więcej energii, trzeba zwiększyć prędkość obracania się koła – niestety wraz ze zwiększeniem prędkości obracania się koła zwiększa się ryzyko potencjalnej awarii (...) Nowoczesne koło zamachowe jest zbudowane z włókna węglowego, sprawność wynosi 70%–90% [42]. Koło jest w stanie szybko przekazać zgromadzoną energię, nie wymaga utrzymania, zajmuje mało powierzchni, ilość cykli ładowania i rozładowania wynosi ok. miliona” – ryzyko awarii jest konsekwencją niewystarczającej wytrzymałości mechanicznej, a tylko pośrednio prędkości wirowania; współcześnie koła zamachowe buduje się z materiałów kompozytowych na bazie, ale nie wyłącznie, z włókien węglowych; „ilość cykli” – poprawnie „liczba cykli”; „zajmuje mało powierzchni” – chodziło raczej o objętość niż o powierzchnię.
- Str. 31: „(nadprzewodnik) jest podatny na zmiany temperatury” – chodzi raczej o to, że powyżej temperatury krytycznej (w przypadku klasycznych nadprzewodników bliskiej 0K) efekt nadprzewodnictwa znika i wydzielają się duże ilości energii cieplnej.
- Str. 32: „Zasobnik ważył 2 tony i składał się z 672 ogniw, 168 podłączonych szeregowo i 4 podłączonych równolegle” – poprawnie: 4 gałęzi równoległych z 168 ogniwami połączonymi szeregowo.
- Str. 37: w tabeli 1 pojemność akumulatorów wyrażana jest w A/h, powinno być Ah.
- Str. 38: Pierwsze zasobniki wirujące pojawiły się na linii Keihin na początku lat 80. ubiegłego stulecia (jeszcze w wersji wolnoobrotowej).
- Str. 40: „(Zasobnik) został zaprojektowany w oparciu o krzywą zużycia energii mierzonej oraz pozycję trolejbusu na torze” – określenie niepoprawne – prawdopodobnie chodziło o charakterystykę poboru energii oraz aktualną lokalizację trolejbusu na trasie.
- Str. 42: „Korzystając z zasady maksymalnej Pontryagina...” – w języku polskim raczej używa się określenia „zasada maksimum Pontriagina”.
- Str. 43: „Autorzy wykorzystują wariację próbki wartości prądu RMS S.C.” – chodzi o wariację próbkową wartości skutecznej prądu.
- Str. 48: „Na wykresie Ragone (rysunek 5) zostały przedstawione charakterystyki czasowe dla ładowania i rozładowania zasobnika”- wykres Ragone przedstawia zależność pomiędzy gęstością mocy a gęstością energii, na rysunku umieszcza się też stałe czasowe procesu ładowania i rozładowywania zasobników.
- Str. 54: „Poniżej zostały przedstawione równania elektryczne zasobnika energii na podstawie rysunku 8” – równanie 3.6 jest konsekwencją tego, że energię oblicza się jako całkę mocy chwilowej.
- Str. 80 : na rys. 20 nie ma żadnej informacji na temat SOC zasobnika.

- Str. 93, tab. 19: z tabeli wynika, że „pojemność energetyczna” zasobnika wynosi 165 F. W tym wypadku chodzi o pojemność (wyrażoną w faradach). Pojemność energetyczna oznacza zasób energii i powinna być wyrażona w dżulach (J) lub w kilowatogodzinach (kWh).
- Str. 93, tab. 20 „czas oczekiwania na przystanku” – chodzi o czas postoju pociągu na stacji metra.
- Str. 93: wartości rezystancji jednostkowych zostały podane w „ohm/km”, w innych miejscach w pracy rezystancja jest podawana w jednostkach oznaczonych symbolem „ Ω ”.
- Str. 101 „wyznaczona została funkcja testowa t-Studenta” – chodzi o statystykę testową o rozkładzie t-Studenta.
- Str. 119, 120: ' N_p – liczba modułów S.C. połączonych równolegle’ – powinno być: liczba gałęzi równoległych.
- Str. 128: we wzorze (9.2) brakuje „dt” na końcu wyrażenia podcałkowego

Pragnę podkreślić, że przedstawione wyżej uwagi o charakterze dyskusyjnym mają na celu doprecyzowanie stwierdzeń przedstawionych w pracy i nie mają istotnego wpływu na wartość merytoryczną rozprawy. Uwagi szczegółowe wynikają w większości przypadków z problemów terminologicznych i językowych, co było nieuniknione z uwagi na fakt, że dla Autora rozprawy język polski nie jest językiem ojczystym. Nie miały one wpływu na zrozumiałość przekazu treści pracy.

5. Wnioski końcowe

Zdaniem recenzenta oceniana rozprawa stanowi istotne osiągnięcie naukowe Doktoranta i wnosi znaczący wkład w rozwój wiedzy w zakresie systemów zasilania trakcji elektrycznej z zasobnikami energii oraz efektywności energetycznej i ekonomicznej tego typu rozwiązań. Należy podkreślić oryginalność rozwiązań, przedstawionych przez Autora rozprawy, samodzielność w zakresie studiów zagadnień teoretycznych oraz walory użytkowe pracy – zwłaszcza w zakresie opracowania programu symulacyjnego, pozwalającego na przeprowadzenie badań symulacyjnych systemu zasilania trakcji elektrycznej prądu stałego ze stacjonarnymi zasobnikami energii oraz na ocenę efektywności takich rozwiązań.

Doktorant poprawnie sformułował cel rozprawy, zgodny z jej tematem, prawidłowo zaplanował sekwencję zadań naukowych, których wykonanie umożliwiło osiągnięcie założonego celu i potwierdzenie hipotez badawczych sformułowanych w tezie rozprawy.

Stwierdzam, że oceniana rozprawa zatytułowana „Analiza celowości zastosowania zasobników energii w układach zasilania miejskiej trakcji elektrycznej” spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim zgodnie z Ustawą z dn. 14 marca 2003 r. o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym i Tytule w Zakresie Sztuki. Wnoszę o przyjęcie przez Radę Naukową Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej rozprawy doktorskiej mgr inż. Petru Valentin Radu i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Ponadto, biorąc pod uwagę wysoki poziom naukowy i osiągnięcia Autora uzyskane w trakcie realizacji tej pracy oraz Jego aktywność naukową wnioskuję o wyróżnienie opiniowanej rozprawy.



Dr hab. inż. Marek Pawełczyk, prof. uczelni