

Kielce, 6.10.2023 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. Anatolija Nikitenko pt. „Regenerative Braking Effectiveness Improvement of DC Supplied Electric Rolling Stock with DC Motors” (“Poprawa efektywności hamowania odzyskowego taboru z silnikami prądu stałego zasilanego z sieci napięcia stałego”)

### 1. Wymagania formalne

#### 1.1. Podstawa prawna

Podstawą do przygotowania recenzji jest pismo Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej, Pana prof. dr. hab. inż. Tomasza Stareckiego, z dnia 28.06.2023 r. z informacją o uchwale Rady Naukowej Dyscypliny, podjętej w sprawie wyznaczenia recenzentów rozprawy mgr. inż. Anatolija Nikitenko, zatytułowanej „Regenerative Braking Effectiveness Improvement of DC Supplied Electric Rolling Stock with DC Motors”. Wystosowanym przez Pana Profesora pismem zostałem poinformowany o powołaniu mnie na recenzenta rozprawy. Jednocześnie zostałem poproszony, aby w związku z wszczęciem przewodu doktorskiego przed dniem 30.04.2019 r. dokonać oceny osiągnięć naukowych kandydata w zakresie dyscypliny elektrotechnika, będącej przedmiotem dotychczasowej działalności naukowej kandydata – z określeniem relacji tych osiągnięć do dyscypliny automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

Rozprawa została przygotowana pod kierunkiem prof. dr. hab. inż. Adama Szeląga. Promotorem pomocniczym był dr inż. Włodzimierz Jefimowski.

#### 1.2. Ocena spełnienia warunków formalnych

Rozprawa doktorska została wydana w formie książkowej. Rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i zawiera streszczenie w języku polskim (str. 7 - 8) oraz w języku angielskim (str. 5 - 6). 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, a następnie poszczególne części rozprawy.

## 2.1. Ocena trafności i znaczenia wybranego problemu badawczego

Doktorant sformułował 4 istotne przesłanki, które skłoniły Go do podjęcia tematu rozprawy:

- efektywność energetyczna - to jeden ze strategicznych problemów, związanych z rozwojem transportu kolejowego, którego kluczowym czynnikiem jest zużycie energii na cele trakcyjne. Wskazany czynnik jest spójny z celami polityki UE, ukierunkowanymi na ograniczenie zużycia energii w transporcie poprzez zwiększenie udziału transportu kolejowego w łącznej wielkości przewozów z uwagi na niższą energochłonność transportu kolejowego;
- obecnie w warunkach Kolei Ukraińskich występuje istotny problem związany z generacją, przesyłem i wykorzystaniem energii powstającej podczas hamowania rekuperacyjnego. Doktorant wskazał na kilka zasadniczych przyczyn takiego stanu rzeczy: niskie prawdopodobieństwo jednoczesnego hamowania rekuperacyjnego przez jeden pociąg i pobierania energii z sieci trakcyjnej przez inny pociąg na tym samym odcinku zasilania; w konsekwencji nadmiarowa energia rekuperacji jest kierowana do stacjonarnych układów rezystorów zlokalizowanych w pobliżu linii kolejowej, znacznie rzadziej do przekształtników DC-AC w podstacjach trakcyjnych, realizujących zwrot energii rekuperowanej do sieci WN. Kolejną problemem jest niska jakość energii rekuperowanej; niska sprawność przekształtników; a także wąski przedział prędkości w którym uruchamiany jest tryb hamowania rekuperacyjnego (dolna granica wynosi ok. 50 km/h), przez co udział odzyskiwanej energii jest niski. Doktorant wskazał również na niższy poziom niezawodności obwodów zasilania lokomotyw z silnikami trakcyjnymi prądu stałego ze sterowaniem rezystorowym w porównaniu z rozwiązaniami z przetwornikami DC/DC lub z napędami wykorzystującymi silniki prądu przemiennego. Maszyniści, ze względu na niestabilność systemu hamowania rekuperacyjnego, często unikają hamowania odzyskowego, preferując bardziej niezawodne sposoby hamowania – dynamiczne (oporowe) lub mechaniczne (pneumatyczne);
- efektywność odzyskiwania energii w dużym stopniu zależy od parametrów układu zasilania trakcji prądu stałego, co powoduje, że proces hamowania odzyskowego jest niestabilny, a odzyskiwana energia jest niskiej jakości;
- aktualnie znaczna część pojazdów trakcyjnych w Ukrainie ciągle jeszcze wykorzystuje silniki trakcyjne prądu stałego przy okresie eksploatacji nawet ponad 25 lat, co wskazuje na potrzebę ich przeprojektowania lub modernizacji pod kątem wykorzystania rekuperacji energii hamowania w większym zakresie.

Doktorant opierając się na powyższych przesłankach doszedł do wniosku, że aktualnie stosowane rozwiązania w zakresie hamowania odzyskowego nie pozwalają na jego pełną realizację ze względu na silne uwarunkowanie jego efektywności od parametrów systemu zasilania, bowiem tabor, wyposażony w system odzysku energii rekuperacji, nie jest autonomiczny, a poziom odzysku energii zależy od

możliwości odbioru energii na danym odcinku zasilania przez inne pociągi pobierające w danej chwili energię. Skłoniło to Autora rozprawy do przeprowadzenia analizy celowości zastosowania autonomicznego trybu hamowania odzyskowego przy wykorzystaniu pokładowego układu zapewniającego akumulację i późniejszego wykorzystania odzyskanej energii magazynowania energii przy wykorzystaniu superkondensatorów.

Jako zasadniczy cel rozprawy Doktorant wskazał przeprowadzenie pogłębionej analizy procesu hamowania regeneracyjnego i wskazanie na możliwości poprawy jego efektywności energetycznej dla pojazdów trakcyjnych z silnikami trakcyjnymi prądu stałego, które nadal są eksploatowane, przy uwzględnieniu stochastycznego charakteru zmian napięcia, prądu i energii w procesie rekuperacji. Aby uzyskać istotną poprawę efektywności elektroenergetycznej i jakości odzysku energii dla transportu kolejowego w systemie prądu stałego z silnikami trakcyjnymi prądu stałego konieczne jest opracowanie i wdrożenie autonomicznych trybów hamowania regeneracyjnego taboru elektrycznego, wyposażonego w superkondensatorowe pokładowe systemy magazynowania energii. Wykorzystanie teorii procesów losowych pozwala na uwzględnienie stochastycznego charakteru zmian napięcia i prądu w trakcie rekuperacji oraz, na podstawie ich wyników pomiarów, na oszacowanie parametrów pokładowego układu magazynowania energii z superkondensatorami, a także ocenę parametrów ilościowych i jakościowych odzyskiwanej energii elektrycznej.

Z powyższego wynika, że wybór problemu badawczego, stanowiącego przedmiot rozważań w rozprawie, jest trafny, szczególnie w kontekście znaczenia wykorzystania energii rekuperowanej przez pojazdy trakcyjne w systemach trakcji elektrycznej prądu stałego i w konsekwencji poprawy efektywności energetycznej systemu zasilania oraz wynikających stąd wskazanych przez Doktoranta efektów. Zdefiniowany problem badawczy dotyczy problematyki trakcji elektrycznej prądu stałego, w konsekwencji wpisuje się zarówno w dyscyplinę elektrotechnika, jak i w dyscyplinę automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

Na str. 25 rozprawy Doktorant sformułował następującą tezę rozprawy:

*Znaczący wzrost efektywności elektroenergetycznej i jakości odzysku energii kolejowego transportu elektrycznego prądu stałego z silnikami trakcyjnymi prądu stałego jest możliwy w wyniku opracowania i zastosowania autonomicznych trybów hamowania regeneracyjnego elektrycznych pojazdów trakcyjnych wyposażonego w superkondensatorowy pokładowy system magazynowania energii. Zastosowanie teorii procesów losowych pozwala na uwzględnienie stochastycznego charakteru zmian napięcia i prądu w fazie rekuperacji oraz na podstawie wyników pomiarów eksperymentalnych umożliwia dokładne oszacowanie parametrów pokładowego superkondensatorowego układu magazynowania energii, a także oszacowania wielkości, jakości i strat technologicznych energii elektrycznej odzyskiwanej przez tabor elektryczny.*

Zdefiniowana teza jest zgodna zarówno z przedstawionymi w rozprawie przesłankami, które skłoniły Doktoranta do podjęcia tematu badań, jak i ze wskazanym przez Doktoranta celem rozprawy.

Jako dane wejściowe do modelu obliczeniowego Doktorant wykorzystał dane rzeczywiste, uzyskane w wyniku rejestracji prądów i napięć podczas jazd w warunkach eksploatacyjnych dla kilku kategorii trakcyjnych pojazdów szynowych: różnych serii lokomotyw towarowych, zespołu trakcyjnego i tramwaju. Ponadto wykorzystano wyniki pomiarów dla falownika DC/AC, realizującego zwrot nadmiarowej energii rekuperacji do sieci prądu przemiennego.

Zgodnie z deklaracją Doktoranta zastosowanie autonomicznych trybów rekuperacji energii hamowania

w oparciu o systemy pokładowe przyniesie następujące efekty:

- a) ograniczenie zużycia energii na cele trakcyjne o 10- 15% w przypadku pociągów prowadzonych przez lokomotywy elektryczne, 15 - 30% w przypadku elektrycznych zespołów trakcyjnych w ruchu podmiejskim oraz 30-40% w przypadku tramwajów;
- b) ograniczenie strat energii, odzyskiwanej podczas hamowania rekuperacyjnego i przesyłanej w systemie zasilania trakcji elektrycznej do zewnętrznego systemu zasilania o: 16 - 25% w przypadku pociągów prowadzonych przez lokomotywy elektryczne, 12 - 14% w przypadku elektrycznych zespołów trakcyjnych w ruchu podmiejskim i ok. 25% w przypadku tramwajów;
- c) obniżenie wartości współczynnika obciążenia transformatorów obniżających i przekształtnikowych w podstacjach trakcyjnych o 65 - 69%;
- d) zwiększenie przepustowości odcinka kolejowego o 50 - 52%;
- e) znaczące zmniejszenie obciążenia zespołów prostownikowych podstacji trakcyjnych;
- f) poprawę trwałości urządzeń elektrycznych systemu zasilania trakcji;
- g) ograniczenie nakładów inwestycyjnych związanych z budową nowych podstacji trakcyjnych, sieci trakcyjnych i linii elektroenergetycznych;
- h) ograniczenie intensywności procesów starzenia się przewodu jezdnego, proporcjonalnego do temperatury przewodu;
- i) podwyższenie minimalnego poziomu napięcia w sieci trakcyjnej poprzez ograniczenie pików mocy szczytowej pociągu i spłaszczenie krzywej obciążenia podstacji trakcyjnej;
- j) poprawę jakości energii elektrycznej w systemach transportu elektrycznego, bowiem rekuperowana energia o złej jakości nie jest przekazywana do sieci trakcyjnej.

Na str. 26 rozprawy Doktorant zdefiniował kluczowe zadania, których wykonanie jest niezbędne do naukowej weryfikacji przedstawionej wyżej tezy rozprawy i osiągnięcie zdefiniowanych celów badawczych:

1. Przeprowadzenie studiów literaturowych w zakresie tradycyjnych trybów hamowania odzyskowego i, po rozważeniu charakterystyk głównych typów urządzeń magazynujących energię elektryczną, oszacowanie możliwości ich zastosowania do pokładowej akumulacji energii.
2. Wybór reżimów pracy systemów transportu elektrycznego i typów pojazdów trakcyjnych (lokomotyw elektrycznych, zespołów trakcyjnych i tramwajów) oraz przeprowadzenie rejestracji losowych przebiegów zmienności napięć i prądów w fazie napędu i rekuperacji.
3. Przeprowadzenie analiz probabilistyczno-statystycznych i korelacyjno-spektralnych uzyskanych przebiegów czasowych napięć i prądów.
4. Opracowanie nowej metody, określanej przez Doktoranta jako „korelacyjno-dyspersyjnej”, wyznaczenia składowych mocy elektrycznej, wyznaczenie zależności analitycznych oraz przeprowadzenie oceny ilościowej mocy i energii dla lokomotyw elektrycznych, zespołów trakcyjnych i tramwajów generowanej w fazie hamowania odzyskowego.
5. Opracowanie metody pośredniego eksperymentalnego pomiaru energii elektrycznej w fazie hamowania odzyskowego i przeprowadzenie oceny porównawczej strat energii występujących podczas eksploatacji różnych typów pojazdów trakcyjnych (lokomotyw elektrycznych, zespołów trakcyjnych i tramwajów).
6. Dokonanie oceny jakości odzyskiwanej energii, zwracanej do sieci pierwotnej w rzeczywistych warunkach pracy badanych lokomotyw elektrycznych i zespołów trakcyjnych.
7. Opracowanie rozwiązań w zakresie autonomicznego trybu hamowania odzyskowego, pozwalającego na ograniczenie objętości i masy pokładowego układu magazynowania energii.

8. Krytyczna analiza i doprecyzowanie kryteriów, jakie musi spełniać pokładowy magazyn energii oraz wybór zasobnika superkondensatorowego do dalszych badań.
9. Obliczenia pojemności energetycznej i pojemności pokładowego magazynu energii dla badanych typów pojazdów trakcyjnych oraz określenie jego lokalizacji.
10. Wykazanie zależności pomiędzy końcową prędkością rozruchu a wymaganą pojemnością energetyczną zasobnika.
11. Opracowanie zasadniczych rozwiązań obwodów elektrycznych dla zasobnika oraz sposobu jego włączenia do obwodu głównego pojazdów trakcyjnych.
12. Określenie metody regulacji napięcia silników trakcyjnych, zapewniającej rozwiązanie problemu zwiększenia przedziału prędkości, w którym następuje odzysk energii (aż do całkowitego zatrzymania).
13. Modelowanie matematyczne w celu walidacji przyjętych rozwiązań obwodów oraz badania procesów ładowania i rozładowywania pokładowego układu magazynowania energii dla autonomicznego trybu hamowania regeneracyjnego.

## 2.2. Ocena zawartości rozprawy

Oceniana rozprawa liczy łącznie 220 stron. Prezentowane treści Doktorant podzielił na 7 rozdziałów merytorycznych (w tym wprowadzenie i podsumowanie). Ponadto oceniana praca zawiera przydatny podczas lektury spis oznaczeń, bibliografię oraz wykazy rysunków (łącznie 74) oraz tabel (łącznie 26). Zasadnicze części rozprawy – to:

- Rozdział 1: Wprowadzenie (*Introduction*), w którym Doktorant przedstawił oparte na przeglądzie literaturowym wprowadzenie do problematyki rozprawy, zdefiniował przesłanki, uzasadniające wybór tematu rozprawy, określił zasadniczą tezę rozprawy, a także kluczowe zadania badawcze, zaplanowane do realizacji (str. 21 - 27).
- Rozdział 2, zatytułowany „Przegląd literatury i zagadnienia badawcze” (*Review of the literature and research questions*), zawierający ocenę aktualnych rozwiązań w zakresie rekuperacji energii w systemach transportu szynowego (kolej, metro, sieci tramwajowe i trolejbusowe) oraz akumulacji energii rekuperacji (str. 21 – 45). W rozdziale tym Doktorant przedstawił także przegląd metod ukierunkowanych na poprawę efektywności hamowania rekuperacyjnego (modyfikacje i modernizacje obwodów głównych pojazdów trakcyjnych, modyfikacje rozkładów jazdy, mające na celu synchronizację faz hamowania odzyskowego dla jednego pojazdu z fazą rozruchu dla innego pojazdu na tym samym odcinku zasilania, modyfikacje strategii sterowania i energooszczędnych technik jazdy, zastosowanie przekształtników DC/AC, umożliwiających zwrot energii rekuperacji do sieci przemysłowych zasilających podstacje trakcyjne). Doktorant trafnie ocenił możliwości implementacji, wady i zalety poszczególnych rozwiązań. Zdaniem Doktoranta korzystnym z punktu widzenia efektywności rekuperacji oraz możliwości stabilizacji napięcia w sieci trakcyjnej rozwiązaniem jest akumulacja energii w stacjonarnych magazynach energii, przy czym rozwiązanie to może się wiązać z większymi wahaniami prądów w sieci trakcyjnej i może powodować zakłócenia w pracy układów SRK. Doktorant w związku z tym uważa, że najkorzystniejszym rozwiązaniem będzie akumulacja energii bezpośrednio na pojeździe. Dokonując porównania poszczególnych typów akumulatorów stwierdza, że najkorzystniejszym rozwiązaniem są zasobniki kondensatorowe, z uwagi na ich wysoką moc właściwą (nawet  $10^4 \div 10^5$  W/kg) przy energii właściwej dochodzącej do 50 kJ/kg oraz bardzo wysoką liczbę cykli pracy ( $10^5 \div 10^6$ ). Doktorant w tym kontekście wskazuje na doświadczenia firm zagranicznych w zakresie zastosowania pokładowej akumulacji energii w tramwajach (Alstom, Kawasaki, CAF i Siemens) oraz efekty

- zastosowania zasobników superkondensatorowych w Polsce (II linia metra w Warszawie, tramwaje w Warszawie i Elblągu, trolejbusy w Gdyni).
- Rozdział 3, zatytułowany „Warunki, metody i urządzenia wykorzystane do badań eksperymentalnych” (*Conditions, methods and devices of experimental research*), zawiera opis badań eksperymentalnych, przeprowadzonych na kilku odcinkach Kolei Naddnieprzańskiej oraz Kolei Lwowskiej, a w przypadku pojazdów tramwajowych - w mieście Dniepr (str. 40 -48 rozprawy). W rozdziale opisano zastosowane metody pomiarowe oraz użyty sprzęt i oprogramowanie do rejestracji mierzonych parametrów (prądy, napięcia i prędkość pojazdów w funkcji czasu) dla lokomotyw VL11M6 i VL11M5, zespołu trakcyjnego EPL2T, tramwaju T4D oraz prądów i napięć mierzonych w podstacji trakcyjnej z przekształtnikiem 3,3 kV DC/35 kV AC. Doktorant wskazał także na zależności, określające niezbędne czasy trwania pomiarów oraz określił niezbędny czas kwantyzacji sygnałów rejestrowanych sygnałów analogowych, zgodnie z twierdzeniem o próbkowaniu Whittakera – Kotelnikova - Shannona.
  - W rozdziale 4 (str. 49 – 89), zatytułowanym „Analizy probabilistyczno-statystyczne i korelacyjno-spektralne napięcia i prądu w trybie hamowania regeneracyjnego” (*Probabilistic-statistical and correlation-spectral analyses of voltage and current in the regenerative braking mode*), Doktorant przedstawił przebiegi prądów i napięć uzyskane w wyniku opisanych w rozdziale 3 pomiarów oraz opracowane na tej podstawie histogramy napięć oraz charakterystyki probabilistyczne napięć w reżimie hamowania odzyskowego (wartości maksymalne, minimalne, wartości średnie, odchylenia standardowe wartości skośności i kurtozy). Następnie zostały wyznaczone wartości  $m_U(t)$ ,  $D_U(t)$  i  $\sigma_U(t)$ , uzyskane w wyniku uśrednienia 12 przebiegów zmienności napięć dla tych samych wartości czasu  $t$ . Ww. przebiegi czasowe posłużyły do wyliczenia wartości oczekiwanych, wariancji i odchylenia standardowego napięć, opisujących, zdaniem Doktoranta, stacjonarny proces losowy. Na tej podstawie została wyznaczona funkcja autokorelacji procesu  $C_U(\tau)$ , co pozwoliło Doktorantowi na wydzielenie składowej ergodycznej procesu z nieergodycznego procesu losowego  $U(t)$  i wyznaczenie funkcji autokorelacji napięć na odbieraku prądu dla analizowanych typów pojazdów trakcyjnych oraz współczynników  $D_U$  i  $\alpha_U$ , występujących w funkcji autokorelacji opisanej zależnością (4.2.2). Uzyskane przebiegi zmienności funkcji autokorelacji, zawierające składowe subharmoniczne, umożliwiły wyznaczenie w oparciu o transformatę Fouriera funkcji gęstości spektralnej napięć dla otrzymanych w wyniku pomiarów przebiegów napięć. W punkcie 4.3 Doktorant, w oparciu o przedstawioną wyżej metodę, wyznaczył charakterystyki probabilistyczne prądów, otrzymanych dla fazy rekuperacji. Na rys. 4.3.9 przedstawiono wyniki obliczeń funkcji gęstości spektralnej prądów dla fazy rekuperacji dla ww. typów pojazdów trakcyjnych. W punkcie 4.4 zostały przedstawione wyniki obliczeń wskaźników charakteryzujących odchylenia napięć oraz wskaźników przepięć ( $U_{max}/U_{nom}$ ) dla stanu ustalonego dla reżimu hamowania odzyskowego. Wyliczono także wskaźniki  $THD$ ,  $TDD$  i  $DPF$  dla prądów i napięć po stronie AC podstacji w fazie rekuperacji (zgodnie z ANSI/IEEE Std. 519-2014), wykazując, że przebiegi napięć są odkształcone (uzyskano wartość  $TDD = 16,86\%$ ), co oznacza niską jakość rekuperowanej energii i uzasadnia celowość akumulacji energii rekuperacji na pokładzie pojazdu trakcyjnego.
  - Rozdział 5, zatytułowany „Podstawy teoretyczne i metody oceny mocy i energii w trybie hamowania odzyskowego” (*Theoretical backgrounds and methods for estimation of power and energy behaviours in the regenerative braking mode*), zawiera opis metody oszacowania mocy rekuperacji w oparciu o przebiegi czasowe napięć i prądów, analizowane w poprzednim rozdziale oraz opracowaną przez Doktoranta metodę, bazującą na dekompozycji czasowych przebiegów niestacjonarnego procesu losowego (str. 90 – 127). W oparciu o wyznaczone

funkcje autokorelacji napięć  $C_U(t_k, \tau = 0)$  i prądów  $C_I(t_k, \tau = 0)$  oraz wartości oczekiwane  $m_U(t_k)$  i  $m_I(t_k)$ . Doktorant wyznaczył moc procesu określoną zależnością  $S(t_k) = U(t_k) \cdot I(t_k)$ , a po uśrednieniu  $n$  przebiegów napięć i prądów dla chwil  $t_1, t_2, \dots, t_k, \dots, t_m$  uzyskał zależność (5.1.12) dla mocy oraz zależność (5.1.12) dla korelacji wzajemnych napięć i prądów i na tej podstawie sformułował formuły umożliwiające wyznaczenie mocy pozornej, czynnej i biernej oraz współczynnika mocy. W punkcie 5.2 przedstawiono wyniki obliczeń ww. mocy w procesie rekuperacji energii oraz uzasadniono celowość instalacji zasobnika energii, również dla pojazdów trakcyjnych z hamowaniem rezystorowym, bowiem zasobnik może być doładowywany w fazie wybiegu i rozładowywany w fazie rozruchu pojazdu. W kolejnym punkcie Doktorant przedstawił opis metody wyznaczania oraz wyniki obliczeń energii rekuperowanej w fazie hamowania odzyskowego, wskazując jednocześnie na niską dokładność metod oszacowania strat energii, związanych z mocą bierną, opartych na bezpośrednich pomiarach prądów i napięć, szczególnie w fazie rekuperacji i formułując zależności umożliwiające ich oszacowanie. Wyznaczone zależności zostały zilustrowane za pomocą wyników obliczeń strat energii dla dwóch odcinków linii kolejowej (Nyzhnodniprovsk-Vuzol – Ilarionove oraz Lavochne – Volovets) oraz przedstawionych w tabeli 5.4.4 charakterystyk strat energii rekuperowanej dla 4 typów pojazdów trakcyjnych.

- W rozdziale 6 (str. 128 – 183), zatytułowanym „Wykorzystanie magazynowania energii do poprawy hamowania regeneracyjnego” (*Application of energy storage for regenerative braking improvement*), przedstawiono warunki, jaki musi spełniać zasobnik energii instalowany na pojeździe (m.in. duża energia właściwa, duża liczba cykli ładowania/rozładowywania, dostatecznie długi czas magazynowania energii, krótki czas przejścia z trybu akumulacji do trybu zwrotu energii, niska masa i rozmiary zasobnika, niskie nakłady inwestycyjne, związane z instalacją, niskie koszty operacyjne, stałość parametrów itp.). Zdaniem Doktoranta dwoma najbardziej odpowiednimi typami zasobników energii, są: zasobnik elektromechaniczny inercyjny i pojemnościowy magazyn energii. Za wyborem zasobnika pojemnościowego przemawia brak elementów ruchomych, większa gęstość mocy i większe prądy operacyjne, a także niska wartość rezystancji wewnętrznej i jej stabilność, co potwierdzają wyniki badań laboratoryjnych superkondensatorów, wykonane przez Autora rozprawy i przedstawione w pracy. W punkcie 6.2 przedstawiono schemat obwodu głównego elektrycznego zespołu trakcyjnego prądu stałego z superkondensatorowym pokładowym systemem magazynowania energii i opisano sposób pracy układu dla fazy hamowania odzyskowego, zapewniający maksymalne możliwe wykorzystanie rekuperowanej energii poprzez jej akumulację i wykorzystanie w kolejnej fazie rozruchu. Zaproponowany w rozprawie autonomiczny tryb hamowania fazowego z odzyskiem energii, z pokładowym zasobnikiem energii, umożliwia zastosowanie zasobnika o minimalnej niezbędnej pojemności, masie i wymiarach, przy tym nie różni się co do zasady działania od trybu hamowania odzyskowego i, zdaniem Doktoranta, jest to odrębny rodzaj hamowania elektrodynamicznego, tak, jak w przypadku hamowania rezystorowego. Doktorant zaproponował cykl pracy pojazdów trakcyjnych, obejmujący hamowanie odzyskowe z akumulacją energii w zasobniku na pokładzie pojazdu i ewentualny postój na przystanku, rozruch z wykorzystaniem energii zgromadzonej w zasobniku oraz fazę jazdy wybiegiem (w przypadku zespołów trakcyjnych i tramwajów), po której cykl się powtarza. W przypadku, gdy faza hamowania jest zbyt krótka, aby możliwe było naładowanie zasobnika, podczas postoju na przystanku zasobnik doładowywany jest z sieci trakcyjnej. W przypadku rozładowania zasobnika energia elektryczna, zasilająca silniki, pobierana jest z sieci trakcyjnej. Opisany sposób pracy układu napędowego w fazie hamowania Doktorant nazwał „trybem autonomicznego hamowania odzyskowego” i scharakteryzował w punkcie 6.3 rozprawy jego zalety (energooszczędność

pracy układu napędowego, możliwość zwiększenia przepustowości linii). W kolejnym punkcie rozdziału Doktorant przedstawił metodę szacowania parametrów pokładowego zasobnika energii pracującego w opisanym wyżej cyklu, opierając rozważania na równaniu ruchu pociągu – wzór (6.4.5) i analizując opory zasadnicze i opory dodatkowe dla odcinka linii. Na tej podstawie Doktorant sformułował zależność, określającą wartość energii, niezbędną do uzyskania przez pociąg prędkości  $V$  - wzór (6.4.10). Energia ta powinna być dostarczona w fazie rozruchu przez zasobnik, przy uwzględnieniu minimalnego poziomu naładowania zasobnika. Na bazie tego rozumowania sformułowano zależność funkcyjną – wzór (6.4.14) – niezbędnej pojemności zasobnika od prędkości końca rozruchu, a następnie przeprowadzono obliczenia niezbędnej pojemności zasobnika dla zespołu trakcyjnego EPL2T dla dwóch wariantów napięć w pełni naładowanej baterii superkondensatorów ( $U_c = 3700$  i  $1500$  V) i dla dwóch wariantów końcowego poziomu naładowania zasobnika ( $50\% U_c$  i  $25\% U_c$ ). Przedstawiono także wyniki obliczeń energii niezbędnej w fazie rozruchu do osiągnięcia założonej prędkości maksymalnej dla odcinka linii kolejowej Dnipropetrovsk – Piatykhatky. Analogiczne obliczenia przeprowadzono dla tramwaju T4D. W punkcie 6.5 Doktorant opisał opracowaną przez siebie metodę szacowania ilości energii rekuperowanej w fazie hamowania odzyskowego oraz przeprowadził obliczenia dla zespołu trakcyjnego EPL2T, a w kolejnym punkcie wskazał na możliwe miejsca instalacji modułów zasobnika w lokomotywie VL11M6, zespole trakcyjnym EPL2T i w tramwaju T4D. Na podstawie danych technicznych baterii superkondensatorów (ich dostępnych danych katalogowych) Doktorant oszacował liczbę superkondensatorów połączonych szeregowo i w gałęziach równoległych, aby uzyskać możliwą do uzyskania pojemność energetyczną i maksymalne napięcie pracy baterii. Dane te zestawiono z wynikami analiz statystycznych dla wartości energii rekuperowanej podczas hamowania, co, np. w przypadku lokomotywy VL11M6, prowadzi do wniosku, że wobec niewystarczającej dostępnej przestrzeni i w konsekwencji pojemności zasobnika konieczne będzie wykorzystanie dodatkowego hamulca elektrodynamicznego (zespołu rezystorów) lub nadmiarowa energia zostanie przekazana do sieci trakcyjnej, aby zapewnić odbiór energii hamowania, natomiast w przypadku zespołu trakcyjnego EPL2T zasobnik jest w stanie przyjąć całą energię rekuperacji. W końcowej części rozdziału zostały przedstawione opracowane przez Doktoranta modele matematyczne opisujące procesy ładowania i rozładowywania pokładowego zasobnika energii oraz schematy obwodów głównych pojazdów z urządzeniami magazynującymi energię. Ponadto Doktorant wykazał, że dodatkowa rezystancja czynna w obwodzie akumulacji energii z zasobnikiem kondensatorowym maleje liniowo w funkcji czasu, a czas trwania spadku wartości rezystancji zależy od wartości napięcia  $U_c$  zasobnika pojemnościowego, zgodnie z worem (6.9.14).

Na stronach 191 - 212 Doktorant zamieścił bibliografię, obejmującą 271 pozycji literatury, ułożonych w kolejności cytowania, z czego 26 - to źródła internetowe, 13 – to akty prawne, 19 – to standardy techniczne, a 6 pozycji – to sprawozdania z przeprowadzonych prac B+R. W bibliografii Doktorant wymienia 33 pozycje, których jest autorem lub współautorem. 32 spośród tych pozycji literatury dotyczą bezpośrednio zagadnień, stanowiących przedmiot rozprawy, sześć zostało opublikowane w wysokopunktowanych czasopismach z listy A Ministerstwa. Przedstawiony przegląd literatury należy uznać za aktualny i adekwatny do tematyki rozprawy.



### 3. Ocena osiągnięć badawczych Doktoranta

Po zapoznaniu się z treścią rozprawy uznaję, że zawartość pracy odpowiada tytułowi pracy, a układ pracy jest poprawny. Sformułowane przez Doktoranta wnioski odzwierciedlają wyniki przeprowadzonych badań, są prawidłowe i potwierdzają poprawność zdefiniowanej i przedstawionej wyżej 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 aglomeracyjnych, obsługujących ruch pasażerski, Doktorant wykazał biegłość w zakresie statystyki matematycznej, metod probabilistycznych i teorii procesów stochastycznych. Za najważniejsze osiągnięcia Doktoranta uznaję:

- przeprowadzenie przez Doktoranta eksperymentów pomiarowych dla 5 różnych typów pojazdów szynowych (dla 3 typów lokomotyw, zespołów trakcyjnych i tramwajów) oraz na ich podstawie wykonanie analiz statystycznych i probabilistycznych zarejestrowanych chwilowych wartości napięć, prądów, i prędkości oraz w związku z tym stwierdzenie, że klasyczne układy hamowania odzyskowego mają istotny wpływ na sposób funkcjonowania układów zasilania trakcji elektrycznej, negatywnie wpływając na jakość energii elektrycznej, stabilność systemu i powstawanie dodatkowych strat energii;
- wykazanie, że rekuperacja energii może spowodować wahania napięcia w sieci trakcyjnej o amplitudach znacznie przekraczających dopuszczalne wartości (w warunkach kolei ukraińskich dla lokomotyw i zespołów trakcyjnych na poziomie ponad 31%, a dla sieci tramwajowych nawet ponad 45%);
- wykazanie konieczności rozszerzenia zakresu prędkości, przy którym realizowane jest hamowanie odzyskowe, w przypadku analizowanych pojazdów trakcyjnych ograniczone do przedziału od prędkości maksymalnej do 50 km/h;
- opracowanie metody definiowania mocy pozornej, czynnej i biernej dla pojazdów trakcyjnych, zasilanych prądem stałym, z silnikami prądu stałego, dla stochastycznych przebiegów zmienności napięć i prądów;
- oszacowanie wielkości odzyskiwanej energii elektrycznej i strat energii w oparciu o opracowaną przez Doktoranta metodę analizy przebiegów czasowych o charakterze stochastycznym;
- wykonanie pomiarów i analiz jakości energii odzyskiwanej podczas hamowania odzyskowego przekazywanej z sieci prądu stałego do sieci prądu przemiennego przy wykorzystaniu falowników usytuowanych w podstacji trakcyjnej. Zaproponowanie schematu pomiarów, zaplanowanie przebiegu eksperymentu oraz kwestii bezpieczeństwa i ich uzgodnienie z Kolejami Ukraińskimi;
- sformułowanie koncepcji magazynowania całości odzyskiwanej energii w zasobnikach energii zainstalowanych na pokładzie pojazdu trakcyjnego ze względu na niską jakość rekuperowanej energii, czego konsekwencją będzie poprawa jakości energii w całej systemie zasilania linii kolejowej;
- zaproponowanie metody minimalizacji pojemności magazynu poprzez sekwencyjną realizację trybu trakcji i hamowania odzyskowego, tj. dobór pojemności magazynu odpowiadającej czasowi trwania ww. faz ruchu, dzięki czemu istnieje możliwość doboru pojemności zasobnika na podstawie wyników pomiarów. Rozruch pojazdu będzie się odbywał przy wykorzystaniu całego zasobu energii zgromadzonej w zasobniku, z późniejszym przełączeniem układu napędowego na pobór energii z sieci trakcyjnej;

- zdefiniowanie kryteriów, jakie musi spełniać pokładowy zasobnik energii, aby mógł być zastosowany w układzie hamowania odzyskowego w fazie autonomicznej. Doktorant zaproponował wykorzystanie baterii superkondensatorów w fazie autonomicznej hamowania odzyskowego do momentu osiągnięcia maksymalnego napięcia dla zasobnika;
- oszacowanie dostępnego miejsca usytuowania baterii superkondensatorów na pokładzie pojazdu trakcyjnego;
- przedstawienie metody szacowania pojemności pokładowego zasobnika energii;
- wyznaczenie związku pomiędzy pojemnością energetyczną zasobnika energii a możliwą do uzyskania prędkością pojazdu trakcyjnego w trybie rozruchu autonomicznego;
- opracowanie schematów rozwiązań oraz przeprowadzenie analiz i modelowania procesów ładowania i rozładowywania pokładowego zasobnika energii dla autonomicznych trybów hamowania odzyskowego i traksji.

Rozprawa obejmuje, zatem, studium literaturowe, opis, prezentację i ocenę wyników przeprowadzonych pomiarów parametrów opisujących przebieg hamowania odzyskowego, ich analizę statystyczną i opis modelu probabilistycznego wykorzystującego aparat matematyczny funkcji losowych, badanie procesów przepływu energii w obwodzie głównym pojazdu trakcyjnego, sieci trakcyjnej i falowniku podstacji trakcyjnej, opis metody wyznaczania minimalnej pojemności pokładowego superkondensatorowego zasobnika energii, przeprowadzenie analiz pracy zasobnika energii dla fazy ładowania i rozładowywania zasobnika. Doktorant potwierdził zaawansowane umiejętności we wszystkich wskazanych wyżej obszarach i wykazał się dojrzałością w zakresie formułowania problemów badawczych i ich samodzielnego rozwiązywania.

W związku z powyższym uznaję, że Dyplomant wniósł istotny wkład w rozwój dyscypliny elektrotechnika, będącej przedmiotem dotychczasowej działalności naukowej kandydata – a także aktualnej dyscypliny automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

#### 4. Uwagi

W wyniku lektury rozprawy pojawiły się następujące uwagi/pytania, które zasługują na ich wyjaśnienie przez Doktoranta:

- Na str. 36 Doktorant przedstawia parametry charakteryzujące akumulację energii w zasobnikach pojemnościowych (superkondensatorach), formułując konkluzję, że jest to najlepszy typ zasobnika energii dla zastosowań pokładowych. Proszę o porównanie parametrów tych zasobników z zasobnikami Li-Ion, szczególnie ich odmian aktualnie stosowanych w środkach transportu i wyjaśnienie, dlaczego Doktorant uważa zasobniki pojemnościowe za najlepszy wybór (podobne stwierdzenie Doktorant przedstawił na str. 130).
- Str. 46 – Doktorant opisując symbol  $\sigma^2[X]$  używa określenia „dispersion” – zdaniem recenzenta chodzi raczej o jedną z miar dyspersji – wariancję.
- Odnosząc się do zależności (3.6.6) na str. 46 Autor używa określenia „Kotelnikov’s theorem” – w Polsce częściej używa się określenia „twierdzenie Kotielnikowa–Shannona”.
- Str. 49 i dalej: Autor konsekwentnie używa określenia „korelacja” („correlation”) dla funkcji  $C_U(\tau)$  i  $C_V(\tau)$ , podczas gdy w tym przypadku, zdaniem recenzenta, chodzi o funkcje autokorelacji.
- Str. 51 – rys. 4.2.1 a, b, c – przebiegi napięć i prądów odnoszą się wyłącznie do fazy rekuperacji – proszę wyjaśnić, w jaki sposób te wykresy zostały utworzone.

- Str. 54: proszę o wyjaśnienie, jak rozumieć określenie „the insignificant values of coefficients of skewness  $As_U = -0.98$  and kurtosis  $Ex_U = -0.6$ ”.
- Str. 58: w związku z zależnością (4.2.6) Doktorant stwierdza: „if the sinusoidal components are presented in the random process of voltage and current, the “tail” of the correlation function is the sum of cosines of the same frequencies, where amplitudes are equal to half of the square of the sinusoidal amplitudes’ components of voltage and current characteristics”. Proszę o uzasadnienie, zwłaszcza odnośnie stwierdzenia o sumie kwadratów cosinusów tych samych częstości.
- Str. 60: proszę o wyjaśnienie, jaki jest sens linii kropkowanych przedstawionych na rys. 4.2.9. Czy można uznać, że wykresy funkcji autokorelacji na tych rysunkach potwierdzają, że zanika ona wraz ze wzrostem  $\tau$  i oscyluje wokół osi  $x$ ?
- Str. 61: Pisząc o funkcji autokorelacji funkcji  $C_U(\tau)$  Doktorant stwierdza, że w „ogonie” tej funkcji występują „słabo” periodyczne, składniki, które określa jako „interharmonics” (interharmoniczne). Czy składników tych nie byłoby lepiej określać w tym przypadku jako „podharmoniczne”?
- Str. 62: Proszę o wyjaśnienie, w jaki sposób zostały wyznaczone amplitudy przedstawione na rys. 4.2.10 – 4.2.13.
- Str. 98: Proszę wyjaśnić, jak rozumieć stwierdzenie poniżej wzoru (5.2.2): „The probability is 0.17 according to Pearson’s criterion”. W jaki sposób ta wartość prawdopodobieństwa została uzyskana?
- Str. 108 (tabela 5.3.1): Proszę uzasadnić, że wskazane w tabeli wartości skośności ( $As$ ) oraz kurtozy ( $Ex$ ) potwierdzają, że rozkłady statystyczne  $W_b$  są normalne.
- Str. 109: Proszę wyjaśnić sens wykresów na rys. 5.3.1, bowiem np. z rys. a) wynika, że rekuperacja trwa nieprzerwanie przez ponad 7000 s.
- Str. 146: Czy poprawne jest przyjęcie założenia, że przyspieszenie w fazie rozruchu jest stałe i wynosi  $a = 0.75 \text{ m/s}^2$ ?
- Str. 151: Czy we wzorze (6.5.2) założono stałość oporów ruchu w funkcji prędkości?
- Str. 163: Proszę wyjaśnić, w jaki sposób otrzymano histogramy i rozkłady statystyczne przedstawione na rys. 6.6.9 a) i c).

Ponadto w związku z lekturą rozprawy nasuwają się następujące uwagi o charakterze redakcyjnym:

Str. 29: “... the overhead contact system and distributed could be distributed in different parts...” – błędna składnia zdania.

Str. 34: “... and bremsstrahlung loss in block brakes...” -- brak sugestii.

Str. 44: “The EPL2T multiple-unit trail” – powinno być „train”, przy czym w literaturze angielskojęzycznej używa się raczej określenia „electric multiple unit”.

Str. 49/50: „...effectiveness of energy recovery depends on general on the receptivity of the supply system...” – powinno być “in general”.

Str. 72: na rys. 4.3.5 a) wartość prądu  $\bar{m}_I$  powinna być ujemna (zgodnie ze skalą na osi pionowej).

Str. 75: „...the trams with DC/DC converters have **automagical** switching...” – powinno być “automatic”.

Str. 81: “...time of the impulse should not be **higher** than 5 ms...” – powinno być “longer”.

Str. 105: "...this power factor is not always sufficiently obvious energy **indices**..." – powinno być "index".

Str. 106: "...system of differential equations for a **concrete** structural scheme..." – powinno być "specific".

Str. 117: we wzorze (5.4.17) powinno być  $\Delta P_{TII} = 0.02 \cdot P_{rbi}$ .

Str. 138: „...Therefore, the flux  $\Phi$  must be regulated...” – powinno być "flux".

Str. 154: w ostatniej kolumnie parametrów dla superkondensatorów KYOCERA powinno być n/s zamiast m/s.

Str. 188: „...electric rolling **stop**...” – powinno być "stock"

Str. 203: pozycja bibliografii [145]: poprawna pisownia nazwiska autora – to E. S. Wenzel (<https://archive.org/details/ProbabilityTheoryfirstSteps/page/n3/mode/2up>)

Przedstawione wyżej uwagi mają na celu doprecyzowanie/drobne korekty stwierdzeń przedstawionych w rozprawie i nie mają istotnego wpływu na jej wartość merytoryczną. Uwagi szczegółowe wynikają w większości przypadków z problemów związanych z redakcją końcową pracy, która generalnie została przeprowadzona bardzo starannie. Drobne i nieliczne mankamenty językowe były, moim zdaniem, nieuniknione z uwagi na fakt, że dla Autora rozprawy język angielski nie jest językiem ojczystym. Nie miały one wpływu na zrozumiałość przekazu treści pracy.

## 5. Wnioski końcowe

W opinii recenzenta rozprawa stanowi bardzo istotne osiągnięcie naukowe Doktoranta i wnosi poważny wkład w rozwój wiedzy w zakresie systemów zasilania trakcji elektrycznej i ich efektywności energetycznej oraz rozwiązań mających na celu jej poprawę. Należy podkreślić oryginalność rozwiązań, przedstawionych przez Autora rozprawy, szczególnie w zakresie implementacji zagadnień teoretycznych do modeli matematycznych, przedstawionych w pracy oraz walory użytkowe pracy – opracowane metody obliczeniowe umożliwiają dobór parametrów pokładowego zasobnika superkondensatorowego. Wprawdzie przedstawione w rozprawie rozważania odnoszą się do napędów trakcyjnych z silnikami szeregowymi prądu stałego, stosowanymi w Ukrainie, ale należy sądzić, że tego typu napędy będą jeszcze przez wiele lat w eksploatacji, zarówno w Ukrainie, jak i w Polsce, a ponadto przedstawione w rozprawie metody obliczeniowe mogą być łatwo adaptowane dla napędów trakcyjnych z silnikami prądu przemiennego, co jak należy sądzić, będzie przedmiotem dalszych prac Doktoranta.

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.

Oceniana rozprawa 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 Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej rozprawy doktorskiej mgr. inż. Anatolija Nikitenko i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

