

Dr hab. inż. Andrzej Wilk, prof. PG
Politechnika Gdańska
Wydział Elektrotechniki i Automatyki

WPLYNĘŁO
2023 - 10 - 16
dn.....

Gdańsk, 13.10.2023 r.

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Anatolija Nikitienko pt.: „Regenerative Braking Effectiveness Improvement of DC Supplied Electric Rolling Stock with DC Motors”

1. Podstawa formalna opracowania recenzji

Recenzja została opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej prof. dr. hab. inż. Tomasza Stareckiego z dnia 28.06.2023 r.

Praca doktorska została zrealizowana na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej. Promotorem pracy jest prof. dr. hab. inż. Adam Szelaża, a promotorem pomocniczym jest dr inż. Włodzimierz Jefimowski.

2. Ocena tematyki i celu rozprawy

Zastosowanie zasobników energii o różnych technologiach magazynowania i przetwarzania w trakcji elektrycznej jest bardzo istotne w aspekcie efektywności energetycznej elektrycznych pojazdów trakcyjnych. Praktyczne i coraz bardziej powszechne zastosowanie znalazły do tej pory zasobniki, w których energia kinetyczna pojazdu trakcyjnego jest przetwarzana na energię odwracalnych reakcji chemicznych (zasobniki elektrochemiczne - akumulatory) oraz energię pola elektrycznego (superkondensatory).

Rozprawa doktorska będąca przedmiotem niniejszej recenzji dotyczy analizy poprawy skuteczności hamowania odzyskowego pojazdów trakcyjnych napędzanych silnikami prądu stałego (ang. DC motors) z zasobnikami jakimi są superkondensatory zainstalowane w pojeździe trakcyjnym.

Ocena pracy dotyczy zatem układu elektromechanicznego pojazdu trakcyjnego zawierającego szeregowo silniki DC, superkondensatory (zasobnik zlokalizowany w pojeździe trakcyjnym), klucze energoelektroniczne, skupione elementy zachowawcze (cewki magnetyczne) oraz dyssypatywne (rezystory) które Autor analizował w kontekście rozplywu energii podczas hamowania odzyskowego.

Stopień przydatności superkondensatorów w zasobnikach energii w trakcji elektrycznej jest uzależniona od wypadkowej pojemności układu, zgromadzonej energii i zakresu napięcia w jakim układ może efektywnie pracować. Rozwój technologii superkondensatorów oraz zmniejszenie ceny jednostkowej sprawił, że warunki techniczne i ekonomiczne ich implementacji w stacjonarnych i mobilnych zasobnikach energii stają się coraz bardziej zasadne. Dobitne wskazują na to wyniki dotychczasowych prac badawczych realizowanych między innymi na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej – prace badawcze zespołu prof. Adama Szelaży.

Energie zasobników stacjonarnych z superkondensatorami stosowanymi w trakcji elektrycznej są rzędu kilkunastu/kilkudziesięciu kWh. Wyniki prac badawczych realizowanych w Politechnice Gdańskiej wskazują, że przy takim zakresie energii zasobnika stacjonarnego

możliwe jest zaoszczędzenie energii zużywanej przez elektryczny pojazd trakcyjny nawet o około 10% (praca doktorska Aleksandra Jakubowskiego). Autor słusznie zauważa, że implementacja superkondensatorów w charakterze zasobnika mobilnego warunkuje najbardziej efektywne zarządzanie energią z uwzględnieniem hamowania odzyskowego. Jest to możliwe ze względu na mniejsze wypadkowe wartości rezystancji na elementach dyssypatywnych w obwodzie elektrycznym pojazdu. Występują jednak pewne ograniczenia dotyczące zastosowania zasobników mobilnych wynikające z dostępnej objętości w istniejących już pojazdach trakcyjnych. Ponadto zasobniki sprzężone są w sensie elektrycznym z głównym obwodem pojazdu za pomocą przekształtników energoelektronicznych oraz ich układami wentylacyjnymi.

Istota zagadnienia nie polega obecnie na tym, czy stosować zasobnik z superkondensatorami, ale jak zaprojektować, zlokalizować i sterować tym zasobnikiem, aby uzyskać pewne kompromisowe optimum polegające na jak największej wartości zaoszczędzonej energii elektrycznej przy jak najmniejszych kosztach inwestycyjnych, serwisowych i operacyjnych takiego zasobnika. Autor przedstawił w rozprawie doktorskiej stosunkowo obszerną dawkę wyników eksperymentalnych (przebiegów napięć, prądów oraz prędkości) kilku różnych pojazdów trakcyjnych: lokomotywy towarowe (VL11M i VL8), wieloczołowego pociągu (EPL2T) oraz tramwaju T4D. Wyniki te były uzyskane na wybranych liniach kolejowych/tramwajowych Ukrainy na odcinkach o odpowiedniej do potrzeb analiz długościach. Odpowiedniość ta dotyczyła zwłaszcza warunków występowania stanów hamowania dynamicznego.

Autor przeprowadził analizę przebiegów z wykorzystaniem narzędzi statystyki matematycznej. Podejście to w mojej ocenie ma znamiona oryginalności. Aczkolwiek niektóre założenia do przeprowadzenia autokorelacji lub korelacji wzajemnej mogą być dyskusyjne. Wyniki analiz statystycznych wskazują na stosunkowo dużą złożoność procesu przepływu energii w obwodach elektrycznych pojazdu zwłaszcza podczas hamowania odzyskowego. Autor wyznaczył rozkłady prawdopodobieństwa pomierzonych sygnałów przyjętych jako zmienne losowe i porównywał do rozkładu normalnego (rozkład Gaussa). Warto byłoby porównać te rozkłady do innych opisanych w literaturze rozkładach: chi-kwadrat, Studenta lub F-Snedecora.

Tematyka rozprawy jest bardzo ważna i aktualna w aspekcie poprawy efektywności energetycznej elektrycznych pojazdów trakcyjnych. **Zasadniczym celem pracy rozwiązany przez Autora jest zaproponowanie metody poprawy skuteczności hamowania odzyskowego wybranych pojazdów trakcyjnych napędzanych silnikami prądu stałego (ang. DC motors) zawierające mobilne zasobniki superkondensatorowe.** Znajduję w tej pracy szereg zagadnień prowadzących do realizacji powyższego celu. Pierwsze z tych zagadnień to analiza probabilistyczno-statystyczna i korelacyjno-spektralna napięcia na odbieraku prądu i prądu w głównym obwodzie układu napędowego pojazdu w trybie hamowania odzyskowego. Drugie zagadnienie to zaproponowanie sposobu sterowania przepływem energii w obwodzie elektrycznym pojazdu z superkondensatorami, który będzie efektywny nawet dla stosunkowo niskich prędkości pojazdu. Trzecie z tych zagadnień to dobór zasobnika superkondensatorowego w kontekście możliwości zastosowania w lokomotywie towarowej, pociągu pasażerskiego i tramwaju. W mojej ocenie zagadnienia te zostały opracowane w sposób poprawny.

Teza, którą Autor sformułował w pracy jest następująca:

A significant increase in the electric power effectiveness and quality of energy recovery of the DC railway electric transport with DC traction motors is possible based on the development and application of autonomous phase modes of regenerative braking of an electric rolling stock equipped with an on-board supercapacitor energy storage system. The use of the theory of random processes allows us to consider the stochastic nature of changes in the recovered voltage and current and, based on the experimental measurement results, makes it possible to estimate accurately the parameters of the on-board supercapacitor energy storage system, as well as the volume, quality and technological losses of electrical energy recovered by electric rolling stock.

W mojej ocenie teza została sformułowana w sposób jasny i zrozumiały. Pierwsza część tezy może wydawać się trywialna, ale kluczowe jest tutaj stwierdzenie o autonomicznej pracy zasobnika w zależności od kilku trybów hamowania odzyskowego pojazdu.

W drugiej części tezy Autor stwierdza, że podczas hamowania odzyskowego analiza przebiegów napięć i prądów jako dyskretnych zmiennych losowych pozwala na oszacowanie parametrów mobilnego zasobnika superkondensatorowego, strat mocy na elementach dyssypacyjnych i jakości energii rekuperacji.

W celu udowodnienia postawionej tezy Autor postawił sobie szereg następujących celów badawczych i zadań koniecznych do przeprowadzenia tego dowodu:

- 2.1. Przeprowadzenie stosunkowo obszernej dawki eksperymentów w celu akwizycji istotnych przebiegów następujących systemów transportowych: elektryczne lokomotywy towarowe, zespoły trakcyjne i tramwaje.
- 2.2. Wykonanie analizy probabilistyczno-statystycznej i korelacyjno-spektralnej przebiegów napięć i prądów.
- 2.3. Opracowanie korelacyjno-dyspersyjnej metody wyznaczania składowych mocy całkowitej oraz ocena tych składowych dla badanych pojazdów trakcyjnych w trybie hamowania odzyskowego.
- 2.4. Ocena jakości odzyskanej energii i jej wpływ na parametry energii w podstacji trakcyjnej w rzeczywistych warunkach eksploatacji badanych lokomotyw elektrycznych i zespołów trakcyjnych.
- 2.5. Opracowanie metody sterowania kluczami energoelektronicznymi w pojeździe trakcyjnym do potrzeb adaptacyjnego trybu pracy zasobnika superkondensatorowego podczas hamowania odzyskowego.
- 2.6. Dobór pojemności, napięcia i energii zasobnika dla badanych typów pojazdów oraz wskazanie ich lokalizacji i niezbędnej modyfikacji głównego obwodu elektrycznego.
- 2.7. Opracowanie topologii energoelektronicznego układu napędowego z mobilnym zasobnikiem superkondensatorowym dla pojazdu z szeregowymi silnikami DC i pojazdu z dedykowanym układem regulacji prądu wzbudzenia.

Podsumowując: Stwierdzam, że podjęta przez Autora tematyka badawcza ma znamiona oryginalności i jej wybór jest bardzo zasadny pod względem naukowym jak też technicznym. Zdefiniowane przez Autora cele uznaję za właściwe pod względem tematyki rozprawy i bardzo ważne w kontekście efektywności energetycznej.

3. Treść rozprawy i jej zakres

Rozprawa liczy 220 stron. Składa się z 7 rozdziałów zasadniczych, spisu literatury, listy rysunków oraz listy tabel. Praca rozpoczyna się od streszczeniem (w języku polskim i angielskim), spisem treści i wykazem ważniejszych oznaczeń. Tytuły zasadniczych rozdziałów są następujące:

- 3.1. Wprowadzenie (s.21-27), w którym zawarto cele i tezę pracy.
- 3.2. Przegląd literatury dotyczącej efektywności energetycznej elektrycznych pojazdów trakcyjnych z uwzględnieniem hamowania odzyskowego (s.28-39).
- 3.3. Charakterystyka pojazdów trakcyjnych analizowanych w tej pracy (s.40-48).
- 3.4. Analiza probabilistyczno-statystyczna i korelacyjno-spektralna napięcia i prądu w trybie hamowania odzyskowego. (s.49-89).
- 3.5. Teoretyczne podstawy i metody estymacji składowych mocy oraz estymacji energii w stanach hamowania odzyskowego (s.90-127).
- 3.6. Implementacja mobilnego zasobnika superkondensatorowego do poprawy efektywności energetycznej pojazdu (s.128-183).
- 3.7. Podsumowanie (s.184-190).

Spis literatury obejmuje 271 pozycji uporządkowanych zgodnie z kolejnością cytowań. Dorobek publikacyjny Anatola Nikitenko jak na wymagania pracy doktorskiej jest bardzo duży. Jest współautorem 6 publikacji z listy JCR. Jest współautorem 12 publikacji w innych czasopismach – niemniej ważnych dla tematyki pracy doktorskiej. Jest współautorem 7 publikacji, które ukazały się w międzynarodowych materiałach konferencji naukowych, w tym pod patronatem IEEE. Realizował szereg projektów badawczych w Ukrainie i w Polsce – Politechnika Warszawska. Odnośniki, do których odwołuje się Autor, to prace w większości opublikowane w czasopismach w latach 2010 do 2022. Świadczy to o dynamicznym rozwoju tej tematyki i jej ważności.

Rozdział 1 zawiera zwięzły kontekst dotyczący aktualnego stanu wiedzy dotyczącej rozplywu energii w obwodzie pojazdu i w obwodzie jego zasilania zwłaszcza w trybie hamowania odzyskowego. Podane są w sposób zwięzły wartości względne wartości rekuperacji energii w odniesieniu do różnych pojazdów trakcyjnych. Po wskazaniu stanu techniki podane są cele i teza pracy. Zdefiniowane przez Autora cele są jasno określone i właściwe w kontekście udowodnienia postawionej tezy. Przytoczone są także zadania/zagadnienia, które Autor rozwiązał w celu udowodnienia postawionej tezy.

Rozdział 2 jest zasadniczo kwerendą dotyczącą aktualnego stanu techniki w kontekście poprawy efektywności energetycznej z uwzględnieniem hamowania odzyskowego. Kwerenda ta obejmuje takie zagadnienia jak: modernizacja istniejącej struktury pokładowej pojazdów trakcyjnych do potrzeb implementacji zasobników energii, optymalne planowanie rozkładu i profilu jazdy, rozwój metod strategii zarządzania energią w obwodzie napędowym pojazdu, zmniejszenie dyssypacji energii elektrycznej, implementacji przekształtników DC-DC w strukturze pojazdu, poprawa jakości energii, integracja wielu zasobników do potrzeb poprawy



efektywności energetycznej. Podano także wybrane przykłady zasobników superkondensatorowych pracujące w sieciach trakcyjnych na terenie Polski.

Autor zwraca szczególną uwagę na złożoność struktury obwodu elektrycznego w procesie rekuperacji energii podczas hamowania odzyskowego. Przytacza wyniki publikowanych badań naukowych odnoszących się do przytoczonych powyżej zagadnień zarówno przy uwzględnieniu zasobników stacjonarnych jak i mobilnych. Podejmuje dyskusje dotyczącą optymalnego rozkładu i profilu jazdy oraz strategii zarządzania energią podczas hamowania odzyskowego. Analizowany przez Autora katalog prac badawczych jest wystarczający do tej dyskusji, aczkolwiek liczba publikacji w tej tematyce jest znacznie większa.

Zgadzam się tutaj z Autorem, że implementacja układu superkondensatorów w charakterze zasobnika mobilnego poprawia efektywność energetyczną, ale należy liczyć się z pewnymi ograniczeniami wynikającymi z dostępnej przestrzeni w pojeździe. Autor słusznie podkreśla, że strategia zarządzania przepływem energii w pojeździe trakcyjnym i podstacji trakcyjnej jest kluczowym zagadnieniem w procesie efektywności energetycznej zwłaszcza przy stosunkowo małych prędkościach pojazdu trakcyjnego.

W rozdziale 3 przedstawiono charakterystyczne cechy i wybrane parametry badanych pojazdów trakcyjnych. Autor przeprowadził badania na dwóch lokomotywach towarowych (VL11M6, VL8), wieloczołowego pociągu pasażerskiego (EPL2T) oraz tramwaju (T4D). Dobór tych pojazdów jest wystarczająco reprezentatywny do celów postawionych w pracy doktorskiej. Wskazano ponadto zastosowane układy pomiarowe do akwizycji danych i częstotliwości próbkowania danych. Nie wnoszę uwag do tego rozdziału.

Rozdział 4 zawiera analizę probabilistyczno-statystyczną i korelacyjno-spektralną napięcia na odbieraku prądu pojazdu oraz prądu płynącego w obwodzie głównym pojazdu podczas procesu hamowania odzyskowego. Autor przy przyjęciu pewnych założeń upraszczających do potrzeb analizy statystycznej względem pomierzonych przebiegów wyznaczył: wartości minimalne, maksymalne, wartości oczekiwane, wariancje, odchylenia standardowe, miary asymetrii i miary koncentracji rozkładu. Wyznaczono także wybrane parametry jakości napięcia po stronie DC (obwód pojazdu) oraz po stronie AC (obwód podstacji trakcyjnej). Wyniki autokorelacji i korelacji wzajemnej (inaczej mówiąc splotu funkcji) wykazały stosunkowo duży stopień przypadkowości. Konkluzja Autora, że przebiegi prądów i napięć mogą być reprezentowane jako zmienne losowe procesu nie-ergodycznego jest dla badanych przypadków zasadna. Zalecam jednak pewną ostrożność w uogólnieniu tej konkluzji na inne przypadki transportu zelektryfikowanego. To wymaga szerszych badań na różnych liniach kolejowych/tramwajowych.

W rozdziale 5 przedstawiono wyniki analiz uzyskanych przy zastosowaniu metody korelacyjno-dyspersyjnej względem dyskretnych wartości napięć i prądu. Przeprowadzone obliczenia numeryczne pozwoliły na estymację składowych mocy (moc pozorna, czynna i bierna), współczynnika mocy ($\cos(\varphi)$) i tangensa kąta mocy ($\operatorname{tg}(\varphi)$) w procesie hamowania odzyskowego badanych pojazdów trakcyjnych. Autor wyznaczył także charakterystyki liczbowe zmiennych losowych estymowanych składników. Wśród przytoczonych znajdują się: miary położenia (wartość oczekiwana), istotne miary rozrzutu (wariancja, odchylenie standardowe, rozstęp) oraz miary asymetrii i skupienia. Podano także numeryczną estymację wartości energii, którą można zakumulować w zasobniku superkondensatorowym podczas hamowania odzyskowego. Porównano te energie z energiami koniecznymi do potrzeb

trakcyjnych podczas ruszania pojazdu z określonym przyspieszeniem. Podjęto także dyskusję dotyczącą strat mocy w elementach dyssypatywnych pojazdów trakcyjnych. Wyznaczono te straty dla lokomotywy towarowej, pociągu wielosegmentowego oraz tramwaju na określonych liniach o wystarczającej długości do wystąpienia procesów hamowania odzyskowego i estymacji liczbowych charakterystyk zmiennych losowych. Przytoczone wyniki nie budzą moich zastrzeżeń.

Rozdział 6 zawiera zagadnienia implementacji metody tzw. autonomicznego trybu odzyskiwania energii i jej akumulacji w zasobniku superkondensatorowym. Autor wyróżnia w tej metodzie dwa stany (dwie fazy) zależne od zakresu prędkości pojazdu. Pierwszy stan dotyczy hamowania w zakresie stosunkowo dużych prędkości, drugi w zakresie stosunkowo małych prędkości. Na wstępie Autor przedstawił teoretyczne podstawy tych dwóch stanów z dyskusją jakie obwody, jakie klucze energoelektroniczne i zakresy charakterystyk silników trakcyjnych są w tych stanach uwikłane. Podano ponadto sposób sterowania kluczami energoelektronicznymi w obu tych stanach. Przedstawiono wyniki obliczeń numerycznych odzyskanej energii w procesie hamowania dla przypadku pociągu wieloczołowego EPL2T i tramwaju T4D. Obwody elektryczne, które Autor analizował powinny być jednak doprecyzowane. Odnoszę wrażenie, że podane na niektórych rysunkach oczka elektryczne nie są właściwe do opisów w treści pracy.

W podrozdziale 6.6 Autor przeprowadził także analizę możliwej dostępnej objętości i lokalizacji zasobnika superkondensatorowego każdego z analizowanych pojazdów trakcyjnych. Na tej podstawie zaprojektował zasobniki superkondensatorowe do każdego z badanych pojazdów i podał ich istotne parametry techniczne: napięcie, pojemność, energię i rezystancję zastępczą. Wyróżniam tę aktywność Autora, gdyż wskazuje ona na realny wzrost poprawy efektywności energetycznej w istniejących pojazdach trakcyjnych.

W podrozdziale 6.8 Autor przedstawił sposób obliczenia prądu ładowania zasobnika superkondensatorowego w stanie tzw. dużej prędkości pojazdu i w stanie tzw. małej prędkości pojazdu. Opracowano do tych analiz modele matematyczne w postaci układu równań różniczkowych o stałych parametrach (założenie upraszczające). To uproszczenie pozwoliło na analityczne wyznaczenie przebiegu prądu ładowania oraz napięcia na zasobniku w obu stanach prędkości pojazdu. Niektóre wzory wymagają poprawek edytorskich – uwagi do tej kwestii podano w punkcie 5.

Podsumowując: Stwierdzam, że treść oraz zakres pracy jest zgodna z jej tytułem. Układ pracy należy uznać za poprawny. Redakcja pracy nie budzi większych zastrzeżeń. Pomimo staranności Autora w redagowaniu tej pracy pojawiły się pewne uchybienia i niejasności, które pozwoliłem sobie wymienić w punkcie 5 niniejszej recenzji. Uważam, że wnioski sformułowane przez Autora wyprowadzone na podstawie badań eksperymentalnych i symulacyjnych są poprawne. Dobór literatury oraz odwołania do pozycji bibliograficznych wskazują, że Autor ma dobre rozeznanie w najnowszych pracach badawczych prowadzonych w temacie poprawy efektywności energetycznej pojazdów trakcyjnych, którą się zajmuje w niniejszej pracy.



4. Najważniejsze osiągnięcia badawcze

Należy uznać, że rozprawa zawiera oryginalne podejście do analizy zjawisk zachodzących w obwodzie elektrycznym Zelektryfikowanego Transportu Szynowego (ZTS) z mobilnym zasobnikiem superkondensatorowym (SC). Zaproponowane cele badawcze i uzyskane wyniki wnoszą istotny wkład w poszerzeniu stanu wiedzy w kontekście poprawy efektywności energetycznej ZTS z zasobnikami mobilnymi. Do istotnych osiągnięć Autora należy zaliczyć:

- Przeprowadzenie stosunkowo dużej dawki eksperymentów różnych typów pojazdów trakcyjnych: lokomotywy towarowe, pociąg wieloskładowy, tramwaj.
- Przeprowadzenie analizy probabilistyczno-statystycznej i korelacyjno-spektralnej napięcia na odbieraku prądu pojazdu oraz prądu płynącego w obwodzie głównym pojazdu podczas procesu hamowania odzyskowego w celu wyznaczenia liczbowych charakterystyk zmiennych losowych.
- Wykorzystanie metody korelacyjno-dyspersyjnej względem dyskretnych wartości napięć i prądu w celu wyznaczenia składowych mocy oraz wybranych wskaźników energii w pojeździe trakcyjnym.
- Estymacja wartości energii podczas hamowania odzyskowego w każdym badanym pojeździe trakcyjnym.
- Opracowanie strategii zarządzania rozplywem energii w pojeździe z mobilnym zasobnikiem superkondensatorowym podczas hamowania dynamicznego zasadniczo w pełnym zakresie prędkości pojazdu.
- Zaprojektowanie zasobnika superkondensatorowego w kontekście doboru jego parametrów (napięcia, pojemności, energii) oraz lokalizacji dla każdego z badanych pojazdów trakcyjnych.
- Przeprowadzenie symulacji obwodowej w celu wyznaczenia prądów i napięć w obwodzie głównym pojazdu podczas procesu ładowania zasobnika.
- Wpływ parametrów zasobnika na prędkość pojazdu w trybie autonomicznego rozruchu.

Realizacja pracy obejmuje pełny cykl badawczy składający się ze studium teoretycznego, badań eksperymentalnych oraz badań symulacyjnych prowadzących do weryfikacji przyjętej metody poprawy efektywności energetycznej pojazdu trakcyjnego z zasobnikiem mobilnym i udowodnienia postawionej tezy. Biorąc ponadto pod uwagę wysiłek Autora włożony w realizację stosunkowo obszernej dawki eksperymentów na rzeczywistych pojazdach trakcyjnych oraz wiedzę w zakresie wyznaczania liczbowych charakterystyk zmiennych losowych oraz implementacji metod analizy probabilistyczno-statystycznej i korelacyjno-spektralnej do realizacji postawionego celu należy uznać, że Autor jest w pełni dojrzałym badaczem.

Uważam, że wyniki tej pracy wnoszą wkład w rozwój dyscypliny Elektrotechnika (obecnie należącej do dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne) w zakresie badań nad efektywnością energetyczną i pojazdów trakcyjnych z mobilnymi zasobnikami zasobników S.C.



5. Uwagi ogólne i szczegółowe

Podczas lektury i analizy tej rozprawy pojawiły się następujące uwagi ogólne o charakterze dyskusyjnym:

1. Czy Autor rozważał porównanie wyznaczonych z pomiarów rozkładów zmiennych losowych napięć i prądów z innymi teoretycznymi rozkładami opisanych w literaturze takimi jak: chi-kwadrat, Studenta lub F-Snedecora?
2. Czy Autor rozważał analizę przedziałów ufności dla wartości oczekiwanej i odchylenia standardowego założonych przebiegów jako zmiennych losowych?
3. Proszę o wyjaśnienie jakie są przyczyny stosunkowo niemałej wartości składowej mocy biernej w obwodzie głównym pojazdu podczas hamowania odzyskowego? Tabela 5.2.2.
4. Proszę o podanie możliwych przyczyn zmniejszenia się wartości zastępczej rezystancji układu superkondensatorów w funkcji liczby przeprowadzonych testów ładowania? Rysunki 6.1.1, 6.1.2.
5. Opis przepływu prądu w oczkach podany w tekście rozdziału 6.2 na stronie 137 jest w mojej opinii niezgodny z obwodem elektrycznym pokazanym na rys.6.2.1. Proszę o wyjaśnienie lub doprecyzowanie.
6. Co wymusza przepływ prądu w obwodzie 2-3-4-5-VD2-2 pokazanym na rys.6.2.1?
7. W jakim zakresie charakterystyki magnesowania (rys.6.8.2) realizowane są stany ładowania zasobnika superkondensatorowego w stanie względnie dużej i względnie małej prędkości pojazdu trakcyjnego. Pytanie to ma związek ze stałym parametrem indukcyjności występującej w równaniach różniczkowych modelu symulacyjnego.
8. Czy dobierając lokalizację mobilnego zasobnika superkondensatorowego uwzględniano sposoby chłodzenia tego układu i sprzęgającego go z głównym obwodem pojazdu przekształtnika energoelektronicznego? Problem wentylacji elementów układu napędowego (przekształtników oraz silników) pojazdu jest krytyczny z punktu widzenia eksploatacji.
9. Czy analizowana w niniejszej pracy metoda poprawy efektywności energetycznej pojazdu trakcyjnego z zasobnikiem mobilnym może sprawiać podczas jej implementacji problemy kompatybilności elektromagnetycznej? Pojazd trakcyjny to obiekt o stosunkowo dużej gęstości mocy, co stwarza problemy EMC.

Podczas lektury pracy pojawiły się także następujące uwagi szczegółowe dotyczące nazewnictwa, uchybień językowych i formalizmów niektórych zapisów:

1. Str. 136: w2d (wiersz 2 od dołu strony) – „...1-2-3-4-Sw4-R_n-6-Sw2-R_c-C-1...”. W mojej opinii powinno być: „...1-2-3-4-Sw4-R_n-5-Sw2-R_c-C-1...”.
2. Str. 165: w13g (wiersz 13 od góry) – „...of EMR without...”. Brak definicji skrótu EMR.
3. Str. 166: w9g. Brak zdefiniowania stałej C_e we wzorze. Brak numeracji wzoru w tym wierszu.

4. Str.166, rys.6.8.1. Czy ten rysunek jest właściwy dla omawianej analizy?

5. Str. 169. W równaniu

$$\frac{d^2 u_c}{dt^2} + \frac{R_\Sigma + R_{\text{add}}(t)}{L_\Sigma} \cdot \frac{du_c}{dt} + \frac{1}{L_\Sigma \cdot C} = n E_{\text{arm}} = E_{\text{gen}} = \text{const}, \quad (6.8.2)$$

występują błędy o charakterze edytorskim: w pierwszym członie równania 6.8.2 powinno być: $\frac{d^2 u_c}{dt^2}$; w trzecim członie tego równania powinno być: $\frac{u_c}{L_\Sigma C}$

6. Str.170: Czy w równaniu

$$u_c(t) = E_{\text{gen0}} + \frac{(E_{\text{gen0}} - U_{C0})p_2}{p_1 - p_2} e^{p_1 t} - \frac{(E_{\text{gen0}} - U_{C0})p_1}{p_1 - p_2} e^{p_2 t}, \quad (6.8.13)$$

występuje znak minus przed ostatnim wyrażeniem po prawej stronie?

7. Str.171: Czy w równaniu

$$i_{1\text{st}}(t) = \frac{n \cdot C_e \Phi \cdot V(t)}{nL_{\text{TEM}} + L_{\text{ish}}}, \quad (6.8.17)$$

jest poprawnie zdefiniowany mianownik? W mojej opinii powinny tam występować rezystancje.

8. Str.172: W równaniu

$$[R_\Sigma + R_{\text{add}}(t)] \cdot C \frac{du_c}{dt} + du_c(t) = n \cdot C_e \Phi \cdot \left(V_{\text{fn1}}(t) + \frac{dV}{dt} \cdot t \right) + E_L(t), \quad (6.8.21)$$

drugi wyraz po lewej stronie $du_c(t)$ jest niejasny. Należy doprecyzować

9. Str.172: Jest niefortunny zapis $I_{1\text{max}} - I_{1\text{min}} = I_1 = \text{const}$. Lepiej byłoby zdefiniować $\Delta I_1 = \text{const}$.

10. Str.173: Wskazane wyjaśnienie w jaki sposób uzyskano to równanie

$$\eta = \frac{U_{\text{cfn}} + U_{\text{cin}}}{2 \cdot U_{\text{TEM}}}, \quad (6.9.1)$$

Autor nie podaje źródła wyprowadzenia tego równania.

11. Str.175: w4g: Jest „... Fig. 6.9.1...”. Powinno być: Fig.6.9.2.

12. Str.198: Niejasne oznaczenie 3 F w podpisie rysunku

Fig. 6.9.4. Results of numerical calculations for 3 F OSSS and different residual voltages: (a) 25%, (b) 50% and (c) 75% [219].

Czy to oznacza pojemność $C=3F$ kondensatora?

of electrodynamic braking, analogically to rheostatic braking.

13. Str.182: w18g: Jest:

Niepotrzebny znak 0 w tym stwierdzeniu.

Uwagi ogólne o charakterze dyskusyjnym, jak i uwagi szczegółowe w większości o charakterze redakcyjnym nie wnoszą istotnych zmian do oceny merytorycznej pracy. Błędy redakcyjne nie wpływają na ogólny przekaz treści pracy.

6. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa wnosi istotny wkład do problematyki poprawy efektywności energetycznej elektrycznych pojazdów trakcyjnych z mobilnymi zasobnikami superkondensatorowymi. Jest to praca wartościowa o znamionach oryginalności. Jej realizacja to wynik samodzielnych studiów teoretycznych oraz badań symulacyjnych i badań eksperymentalnych prowadzonych przez Autora. Świadczy to o zdolności Autora do prowadzenia samodzielnych badań naukowych.

Treść rozprawy jest zrozumiała i zgodna z tytułem. Zastosowana terminologia jest prawidłowa. Zakres przeprowadzonych badań symulacyjnych, eksperymentalnych oraz analiz potwierdza osiągnięcie celu.

Uważam, że przedstawiona rozprawa „*Regenerative Braking Effectiveness Improvement of DC Supplied Electric Rolling Stock with DC Motors*” 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. **Wnioskuje o przyjęcie przez Radę Naukową Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej rozprawy doktorskiej mgr inż. Anatolija Nikitenko i dopuszczenie jej do publicznej obrony.**

Biorąc pod uwagę wysoki poziom naukowy, osiągnięcia naukowe i dorobek naukowy Autora uzyskane podczas realizacji tej pracy, oraz aktywność naukową Autora w szeregu projektach badawczych wnioskuje o wyróżnienie opiniowanej rozprawy.



Dr hab. inż. Andrzej Wilk, prof. PG