

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

Gdańsk, 15.04.2021 r.

Recenzja

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

1. Podstawa formalna opracowania recenzji

Recenzja została opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej prof. dr. hab. inż. Tomasza Stareckiego z dnia 23.02.2021 r.

Praca doktorska została zrealizowana na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej. Promotorem pracy jest dr hab. inż. Mirosław Lewandowski, prof. PW, a promotorem pomocniczym jest dr inż. Marcin Steczek.

2. Ocena tematyki i celu rozprawy

W trakcji elektrycznej stosuje się zasobniki energii o różnych technologiach jej magazynowania i przetwarzania. Praktyczne zastosowanie znalazły do tej pory zasobniki, w których energia elektryczna pojazdu trakcyjnego jest przetwarzana na energię odwracalnych reakcjach chemicznych (zasobniki elektrochemiczne - akumulatory), energię kinetyczną (wirujące elementy bezwładnościowe) oraz energię pola elektrycznego (superkondensatory).

Rozprawa doktorska będąca przedmiotem niniejszej recenzji dotyczy analizy wpływu zasobników energii zgromadzonej w polu elektrycznym superkondensatorów na wybrane istotne parametry układu zasilania metra na określonym odcinku o ustalonej lokalizacji podstacji zasilających. Ocena pracy zatem dotyczy układu złożonego z przekształtnika DC/DC oraz zespołu superkondensatorów (SC), które Autor analizował w trybie pracy stacjonarnej (zasobnik zlokalizowany w stacji zasilającej) i mobilnej (zasobnik zlokalizowany w pojeździe trakcyjnym). Przydatność superkondensatorów w zasobnikach energii w trakcji elektrycznej jest uzależniona od wypadkowej pojemności układu, zgromadzonej energii i zakresu napięcia w jakim układ może właściwie pracować. Rozwój technologii superkondensatorów oraz zmniejszenie ceny jednostkowej sprawiło, że warunki techniczne i ekonomiczne ich implementacji w zasobnikach stacjonarnych mogą być zatwierdzone przez zarządcę infrastruktury kolejowej. Pierwsze względnie dobrze udokumentowane prace badawcze nad zasobnikami z superkondensatorami w trakcji elektrycznej pochodzą z pierwszej dekady XXI wieku. Moce zasobników stacjonarnych z superkondensatorami stosowane w trakcji elektrycznej są rzędu kilku MV a energia zgromadzana jest rzędu kilku/kilkunastu kWh. Wyniki prac badawczych jednoznacznie wskazują, że przy powyższych zakresach mocy i energii zasobnika możliwe jest zaoszczędzenie energii elektrycznej rzędu kilkuset MWh w okresie jednego roku. 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.

Z tego punktu widzenia tematyka rozprawy jest bardzo ważna i aktualna w aspekcie poprawy efektywności energetycznej źródeł zasilania miejskiej trakcji elektrycznej. **Zasadniczym celem pracy rozwiązanej przez Autora było przeprowadzenie analizy wpływu zastosowania zasobnika SC na wartość zaoszczędzonej energii w układzie zasilania miejskiej sieci trakcyjnej i wartość redukcji mocy szczytowej (15 minutowej) podstacji trakcyjnej. Analiza ta została przeprowadzona z uwzględnieniem aspektów ekonomicznych zawierających składniki inwestycyjne, operacyjne a także redukcji CO₂.** Teza, którą Autor sformułował w pracy jest następująca:

Zastosowanie zasobników energii w zelektryfikowanym miejskim transporcie szynowym pozwala na zmniejszenie 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.

W mojej ocenie teza została sformułowana w sposób jasny i zrozumiały. Mam jednak uwagi do niektórych elementów tezy, które można uznać, że są już znane na podstawie dotychczasowych prac badawczych. Dotyczy to stwierdzenia, że zastosowanie zasobników energii w zelektryfikowanym miejskim transporcie szynowym pozwala na zmniejszenie zapotrzebowanej energii elektrycznej. Wydaje się oczywiste, że zastosowanie zasobnika ma właśnie prowadzić do zmniejszenia zużycia energii z sieci zasilającej. Należy jednak stwierdzić, że Autor w pierwszym zdaniu tezy sformułował także dodatkowe wielkości, na które ma wpływ zastosowanie zasobnika energii. Są to zapotrzebowanie na wartość mocy szczytowej (15 minutowej) oraz poprawę warunków napięciowych. Rozumiem, że Autor w pierwszym zdaniu tezy wskazał pewien kompletny zbiór wielkości, których wartości zależne są od zasobnika energii i byłoby niewłaściwe przytaczać ten zbiór jako niekompletny.

W drugim zdaniu tezy Autor wskazuje, że możliwy jest dobór odpowiedniej lokalizacji zasobnika w sensie uzyskania założonej funkcji celu. Moja uwaga dotyczy tutaj sformułowania „...dobór odpowiedniej lokalizacji...”. Sformułowanie to wymagałoby uściślenia, co oznacza odpowiednia lokalizacja. Autor w swojej pracy rozwiązuje problem optymalizacji lokalizacji zasobnika. Zdefiniował zmienne decyzyjne i dwa kryteria optymalizacyjne. Zatem, w mojej opinii można byłoby pokusić się o sformułowanie „...dobór optymalnej lokalizacji...”. Zakładam, że pojęcie „odpowiedniej lokalizacji” odpowiada pojęciu „optymalnej lokalizacji”, co wynika pośrednio z treści rozprawy doktorskiej.

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

- 2.1. Opracowanie modeli matematycznych superkondensatorów, przekształtników DC/DC, przejazdu teoretycznego i systemu zasilania trakcyjnego DC.
- 2.2. Implementację zaproponowanych modeli matematycznych w środowisku programistycznym DEV C++.
- 2.3. Opracowanie i implementację algorytmów sterowania parametrami zasobnika energii.



- 2.4. Weryfikację modelu matematycznego analizowanego systemu trakcyjnego na podstawie porównania z wybranymi wynikami eksperymentalnymi.
- 2.5. Przeprowadzenie analizy wpływu zasobnika stacjonarnego S.C. na napięcie sieci trakcyjnej i przeciążalność prądową zespołu transformatorowo-prostownikowego podstacji oraz zasilania pojazdów metra w warunkach awaryjnych – studium przypadku.
- 2.6. Przeprowadzenie analizy ekonomicznej zastosowania zasobników S.C. pracujących w charakterze układów mobilnych i stacjonarnych.
- 2.7. Zdefiniowanie zmiennych decyzyjnych (moc, energia i lokalizacja zasobnika) oraz kryteriów optymalizacji (minimum zapotrzebowanej energii przez podstację oraz minimum kosztów zasobnika stacjonarnego) w celu wyznaczenia optymalnego rozwiązania dla założonego studium przypadku.

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

3. Treść rozprawy i jej zakres

Rozprawa liczy 170 stron. Składa się z 9 rozdziałów zasadniczych, spisu literatury, załącznika, listy rysunków oraz listy tabel. Redakcja pracy rozpoczyna się od streszczenia (w języku polskim i angielskim), spisu treści i wykaz ważniejszych oznaczeń. Tytuły zasadniczych rozdziałów są następujące:

- 3.1. Wprowadzenie (s.23-28), w którym zawarto cele i tezę pracy.
- 3.2. Przegląd literatury dotyczącej zasobników (s.29-50).
- 3.3. Opis matematyczny WESD z S.C. stosowanych w układach zasilania trakcji elektrycznej (s.51-54).
- 3.4. Model matematyczny systemu trakcyjnego DC z WESD (s.55-66).
- 3.5. Implementacja modelu matematycznego systemu zasilania trakcyjnego DC z WESD oraz algorytmów sterowania WESD w środowisku programowym (s.67-81).
- 3.6. Weryfikacja rezultatów z programu symulacyjnego z wynikami pomiarów przeprowadzonych na linii metra (s.82-105).
- 3.7. Analiza wpływu WESD na układ zasilania metra (s.106-117).
- 3.8. Optymalizacja parametrów zastosowania WESD z S.C. (s.118-144).
- 3.9. Podsumowanie (s.145-147).

Spis literatury obejmuje 124 pozycji uporządkowanych zgodnie z kolejnością cytowań. Publikacje Autora (współautor) to 5 pozycji opublikowanych w czasopiśmie i w międzynarodowych konferencjach. Dwie z tych pozycji współautorskich zostały opublikowane w wysoko punktowanych czasopiśmie. Pozostałe odnośniki, do których odwołuje się Autor, to prace w większości opublikowane w czasopiśmie w latach 2010 do 2020. Świadczy to o dynamicznym rozwoju tej tematyki i jej ważności.

W dodatku A1 znajdują się tabele i schematy dotyczące analizowanego studium przypadku.

Rozdział 1 zawiera zwięzły kontekst dotyczący systemu zasilania miejskiej sieci trakcyjnej, ogólnego modelu systemu zasilania prądu stałego na potrzeby trakcji elektrycznej, cele oraz tezę pracy. Autor zwraca szczególną uwagę na zagadnienie optymalizacji wskazując na zmienne optymalizacyjne i kryteria optymalizacyjne. Zgadzam się z Autorem, że w kwestii optymalizacji należy uwzględnić również wpływ inflacji, redukcję CO₂ i redukcję zapotrzebowanej mocy szczytowej (15 minutowej) podstacji trakcyjnej. Zdefiniowane przez Autora cele są jasno określone i właściwe w kontekście udowodnienia postawionej tezy.

Rozdział 2 jest zasadniczo kwerendą dotyczącą różnych zasobników pracujących w układach stacjonarnych i mobilnych stosowanych w trakcji elektrycznej. Kwerenda ta dotyczy także technik optymalizacji ze wskazaniem zmiennych decyzyjnych, funkcji celu i metod rozwiązania problemu optymalizacyjnego. Podano w tym rozdziale również informacje o dostępnych obecnie na rynku programów do symulacji układu zelektryfikowanego transportu szynowego ZTS. Zgadzam się z Autorem, że optymalizacja wielokryterialna miejskiego systemu trakcyjnego ze stacjonarnym zasobnikiem energii z uwzględnieniem zmiennego w ciągu doby rozkładu jazdy, profilu prędkości trasy, sterowania adaptacyjnego zasobnikiem nie jest jeszcze w pełni zbadana. To wskazuje także na zasadność realizacji tej pracy doktorskiej. Autor stwierdza, że opracowane przez niego narzędzie symulacyjne posłuży w pracach projektowych nowych lub modernizowanych linii kolejowych z użyciem zasobników energii. Byłbym w tej kwestii nieco bardziej ostrożny, gdyż nie wszystkie czynniki będą znane, zwłaszcza w dłuższym okresie eksploatacji: np. inflacja, koszty emisji CO₂, koszty serwisowania itp. Tym nie mniej opracowywanie jak najbardziej dokładnych narzędzi symulacyjnych dla ZTS jest konieczne. Autor przytacza także zbiór założeń upraszczających modelu matematycznego ZTS, które stosowane są w różnych programach symulacyjnych lub analizach badawczych. Byłoby jednak wskazane, aby wymienić te najbardziej krytyczne założenia upraszczające na dokładność wyników symulacji.

W rozdziale 3 przedstawiono zwięzłe modele obwodowe superkondensatorów i przekształtników DC/DC. Są to znane z literatury modele zbudowane z elementów skupionych zachowawczych (idealne kondensatory) dyssypatywnych (rezystory rzeczywiste i zastępcze). Autor stwierdza jednak, że modele te mogą być rozszerzone o wpływ temperatury, stanu naładowania zasobnika i tętnienia prądu na parametry obwodowe. Model matematyczny przekształtnika DC/DC mógłby być nieco szerzej opisany chociażby w aspekcie uwzględnienia sprawności przekształtnika i wartości tego parametru w zakresie pracy przekształtnika.

W rozdziale 4 omówiono model matematyczny systemu trakcyjnego DC z zasobnikiem stacjonarnym zlokalizowanym w podstacji trakcyjnej. Podano równania modelu matematycznego przejazdu teoretycznego: opory ruchu pojazdu, dynamika ruchu pojazdu i zależności wynikające z bilansu mocy oraz energii pojazdu trakcyjnego. Dalej podano obwodowe modele matematyczne jednostki trakcyjnej (pociągu), podstacji trakcyjnej, sieci trakcyjnej i powrotnej, pakietu superkondensatorów oraz przekształtnika DC/DC współpracującego z pakietem S.C. W modelach obwodowych zastosowano elementy zachowawcze i dyssypatywne o parametrach skupionych. Wymuszenia elektryczne są aproksymowane źródłami prądowymi. Autor pominął indukcyjności obwodów, co dla



efektywności energetycznej i ekonomicznej jest słuszne, ale może mieć wpływ na chwilowe wartości napięć w sieci trakcyjnej. Do rozwiązania modelu matematycznego ZTS w pracy doktorskiej przyjęto metodę potencjałów węzłowych, gdzie parametry obwodowe o wartościach zmiennych wynikających z dynamiki pojazdu zastępowano wartościami stałymi w danym kroku obliczeniowym. Jest to założenie zasadne, gdyż krok całkowania można regulować i dobrać, tak aby zmienność wartości parametrów pomiędzy kolejnymi krokami nie była istotna. Należy stwierdzić, że opracowanie modelu matematycznego miejskiej sieci trakcyjnej z zasobnikami S.C. z uwzględnieniem sterowania przekształtnikiem DC/DC ma znamiona nowości. Model ten jest ważnym elementem pracy, gdyż uzyskane z niego wyniki mają wpływ na konkluzje zawarte w kolejnych rozdziałach.

W rozdziale 5 przedstawiono opis implementacji modelu matematycznego systemu trakcyjnego z zasobnikiem S.C. z uwzględnieniem algorytmów sterowania tym zasobnikiem w środowisku programistycznym DEV C++. W mojej opinii rozdział ten raczej przedstawia opis algorytmów, które Autor zaimplementował w programie komputerowym z elementami implementacji w tymże programie. Moja uwaga ma charakter dyskusyjny, ale w moim mniemaniu proces implementacji dotyczy opisu sposobu przełożenia algorytmów (równań matematycznych, reguł, itp.) na konkretny model programowania (paradygmat programowania) z wykorzystaniem konkretnego języka programowania – w tym przypadku C++. Zakładam, że Autor zaimplementował algorytmy z wykorzystaniem paradygmatu programowania zorientowanego obiektowo, gdyż wspominał o utworzeniu tzw. obiektu głównego. Jeśli tak, to zostały wykorzystane mechanizmy tego programowania, takie jak: dziedziczenie, hermetyzacja i polimorfizm funkcji. Dodanie kilku informacji w tym rozdziale na temat klas i obiektów w aplikacji komputerowej „Modeltrack” byłoby wskazaniem uzupełnieniem. Nie ma uwag do opisu algorytmów. Nie mam także żadnych wątpliwości odnośnie do implementacji algorytmów w aplikacji „Modeltrack”, co wynika z przedstawionych przykładów symulacji w niniejszej pracy, oraz wcześniej prezentowanych wyników na konferencjach naukowych i w publikacjach naukowych.

W rozdziale 6 przedstawiono porównanie wybranych wyników symulacji z danymi eksperymentalnymi, które Autor mógł zmierzyć lub uzyskać od zarządcy miejskiej sieci trakcyjnej. Porównanie czasów jazdy wykazało, że względne różnice osiągały wartość kilku procent, co należy uznać jako dobrą zbieżność, zwłaszcza gdy sterowanie pojazdu trakcyjnego było realizowane przez operatorów, a nie przez dedykowany program komputerowy. Porównanie wyników symulacji i eksperymentu dla energii ładowania zasobnika dla okresu 1h dało względne różnice o wartości 1%. Większe różnice (8%) uzyskano dla porównania energii rozładowania, ale także należy uznać, że zbieżność jest dobra. W pracy przedstawiono również porównanie przebiegów napięcia zmierzonego i obliczonego na zaciskach zasobnika. Trudno oczekiwać, że przebiegi te nałożą się idealnie na siebie ze względu na pewną nieregularność rzeczywistego ruchu pociągów, ale analizy wykazały silną korelację pomiędzy tymi przebiegami. Dodatkową weryfikację Autor przeprowadził na podstawie porównania obliczonego napięcia na odbieraku pojazdu i pomierzonego napięcia podstacji. Uzyskano bardzo dobrą zgodność.



W rozdziale 7 przedstawiono analizę wpływu zasobnika stacjonarnego S.C. na wybrane parametry układu zasilania metra – pierwsze studium przypadku. Analizowano wpływ zasobnika na napięcie na odbieraku prądu i przeciążalność prądową zespołu transformatorowo-prostownikowego. Wykazano poprawę warunków napięciowych (średnie napięcie użyteczne i napięcie chwilowe) w sieci trakcyjnej. Wykazano także redukcję maksymalnych obciążeń prądowych zespołu transformatorowo-prostownikowego. Badano także studium przypadku polegające na wystąpieniu warunków awaryjnych: awaria jednej z podstacji i zanik zasilania we wszystkich podstacjach. Studium przypadku awarii w sieci trakcyjnej może nie wystąpić, ale należy mieć świadomość, jakie scenariusze ruchu pojazdów mogą być realizowane z wykorzystaniem energii zgromadzonej w zasobniku S.C.

W rozdziale 8 przedstawiono analizę ekonomiczną zastosowania zasobników S.C. pracujących w charakterze układu mobilnego i stacjonarnego. Model „ekonomiczny” uwzględnia nakłady inwestycyjne CAPEX, nakłady operacyjne OPEX, korzyści wynikające z redukcji emisji CO₂ oraz korzyści wynikające z redukcji wartości mocy szczytowej (15 minutowej) podstacji trakcyjnej. Tak kompleksowe podejście do analizy ekonomicznej jest zasadne, zwłaszcza w dłuższym okresie eksploatacji zasobnika, gdzie takie czynniki jak koszty emisji CO₂, inflacja i wzrost kosztów energii będą się zmieniać w dłuższym okresie czasu. Zasadniczy wniosek jaki wynika z analizowanego studium przypadku zasobnika stacjonarnego i mobilnego wskazuje, że dodatnia efektywność ekonomiczna może być uzyskana przed 10 letnim okresem eksploatacji, gdy weźmie się pod uwagę redukcję kosztów emisji CO₂ i redukcję kosztów mocy szczytowej podstacji trakcyjnej.

W rozdziale 9 przedstawiono problem optymalizacji wielokryterialnej, gdzie zdefiniowano zmienne decyzyjne (lokalizacja zasobnika, moc przekształtnika DC/DC i energię pakietu S.C.) oraz kryteria optymalizacyjne (minimum zapotrzebowanej energii przez podstację i minimum kosztów zasobnika stacjonarnego). Do rozwiązania zdefiniowanego zagadnienia optymalizacji Autor zastosował algorytm programowania dynamicznego. Moim zdaniem opis tego algorytmu mógłby być w pracy bardziej szczegółowo przytoczony. Analizowano dwa przypadki studialne. Pierwsze dotyczyło rozwiązania problemu optymalizacji doboru parametrów sterowania zasobnika zlokalizowanego w podstacji P6 badanej linii metra. Wykazano jak rozkład jazdy i dobór minimalnego napięcia rozładowania przy stałej mocy zasobnika wpływa na efektywność ekonomiczną oraz wyznaczono rozwiązania optymalne. Zbadano również jak zmiana mocy zasobnika w podstacji P6 wpływa na efektywność ekonomiczną zasobnika. Drugie studium przypadku dotyczyło wyznaczenia optymalnej lokalizacji zasobnika na badanej linii metra, mocy przekształtnika i energii pakietu S.C. Wykazano, że lokalizacja zasobnika ma znaczący wpływ na wskaźnik efektywności ekonomicznej.

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 dziedzinie badawczej, którą się zajmuje.

4. Najważniejsze osiągnięcia badawcze

Należy uznać, że rozprawa zawiera oryginalne podejście do analizy ZTS ze stacjonarnym zasobnikiem S.C. Zaproponowane cele badawcze i uzyskane wyniki wnoszą istotny wkład w poszerzeniu stanu wiedzy w kontekście efektywności energetycznej i ekonomicznej zasobników stacjonarnych. Do istotnych osiągnięć Autora należy zaliczyć:

- Opracowanie modelu matematycznego układu zasilania miejskiej sieci trakcyjnej z uwzględnieniem zasobnika S.C. oraz mobilnych pojazdów trakcyjnych.
- Implementacja opracowanego modelu matematycznego opartego o metodę potencjałów węzłowych w programie komputerowym „Modeltrack”.
- Implementacja metod numerycznych do rozwiązania modelu matematycznego – metoda iteracyjna Newtona-Raphsona.
- Opracowanie i implementacja w programie komputerowym algorytmów sterowania zasobnikiem energii.
- Weryfikacja modelu symulacyjnego z wynikami pomiarów uzyskanych na drodze eksperymentalnej i wykazanie względnie dobrej zgodności wyników.
- Przeprowadzenie szeregu analiz symulacyjnych na opracowanym modelu pod względem efektywności energetycznej i ekonomicznej zastosowania zasobnika S.C. i wykazanie optymalnych lub najbardziej korzystnych rozwiązań.

Realizacja pracy obejmuje pełny cykl badawczy składający się ze studium teoretycznego, badań symulacyjnych oraz badań eksperymentalnych prowadzących do weryfikacji przyjętego modelu i udowodnienia postawionej tezy. Biorąc ponadto pod uwagę wiedzę w zakresie programowania w środowisku DEV C++ oraz implementacji w tym środowisku algorytmów dedykowanych do realizacji 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 i Elektrotechnika) w zakresie badań nad efektywnością energetyczną i ekonomiczną zasobników S.C. w ZTS.

5. Uwagi ogólne i szczegółowe

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

1. W modelu matematycznym przekształtnika DC/DC (równanie 4.13) Autor uwzględnił sprawność tego układu w bilansie mocy. Czy w przeprowadzonych symulacjach wartość sprawności przekształtnika była stała? Jeśli nie, to w jakim zakresie i według jakiej funkcji/reguły występowała ta zmienność.
2. Jaki paradygmat programowania Autor zastosował do implementacji modelu matematycznego i metod numerycznych? Czy był to paradygmat programowania strukturalnego, czy zorientowanego obiektowo? Jeśli było to programowanie zorientowane

obiektywno, to jakie ważniejsze klasy w sensie programistycznym Autor zdefiniował w celu dalszego rozwoju aplikacji „Modeltrack” i jej serwisowania?

3. Autor stwierdził, że środowisko programistyczne DEV C++ nie zawiera narzędzi w sensie programistycznym do operacji na macierzach oraz nie ma zaimplementowanych szeregu metod numerycznych. Zgadza się z Autorem, że tak jest, ale istnieje możliwość zaimplementowania dynamicznie dołączanych do programu bibliotek (ang. Dynamic Link Library), które taką funkcjonalność mają – niektóre są komercyjne. Istnieje też szereg książek z dziedziny informatyki z przykładowymi kodami zaawansowanych operacji na macierzach i metod numerycznych – np. „An Introduction to Numerical Method” autorstwa B.H.Flowers. Czy Autor rozważał zastosowanie bibliotek DLL w celu szybszego opracowania programu „Modeltrack”. Jeśli takie biblioteki zastosowano, to proszę o wskazanie do jakiej funkcjonalności się przyczyniły?

4. Opory tarcia są bardzo istotne w modelu przejazdu teoretycznego. Określenie wartości sił oporu wymaga określenia szeregu współczynników – w tym współczynników Davisa. W jaki sposób Autor dobrał te współczynniki?

5. Zaimplementowane przez Autora modele elektryczne i modele ekonomiczne do badań efektywności energetycznej i ekonomicznej wykorzystują szereg współczynników. Na które współczynniki jest najbardziej wrażliwa wartość efektywności energetycznej a na które efektywności ekonomicznej? Inaczej mówiąc, które współczynniki wymagają większej staranności w ich doborze.

6. Proszę o szersze wyjaśnienia dotyczące algorytmu programowania dynamicznego w zagadnieniu optymalizacji zawartej w rozprawie.

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

1.Str. 23: w4d (wiersz 4 od dołu strony) – „...dane wejściowe powinny być...”. W mojej opinii jest tutaj mowa o danych wyjściowych.

2.Str.29: Brak odwołania w tekście do rysunku 3.

3.Str.30: w7g (wiersz 7 od góry) – „...zajmuje mało powierzchni...”. Lepszym sformułowanie byłoby stwierdzenie, że „zajmuje małą objętość”.

4.Str.46: w18g: „...to...”. Powinno być „do” .

5.Str.56: w11d, Tab.5: „ $s_a = (vt) \cdot \left(\frac{at^2}{2}\right)$ ”. Powinno być $s_a = (vt) + \left(\frac{at^2}{2}\right)$.

6. Str.56: w6d, Tab.5: „ $s_a = (vt) \cdot \left(\frac{at^2}{2}\right)$ ”. Powinno być $s_a = (vt) + \left(\frac{at^2}{2}\right)$.

8.Str.56: w1d: $E_a = P_a t_a$. Równanie słuszne dla $P=\text{const}$. Czy tak jest istotnie w obliczeniach?

9.Str.58: Rys.9: „...napięcie zależne od rezystancji...(R=f(U))”. Poprawne sformułowanie to rezystancja zależna od napięcia.

10.Str.72: w2g: „...środowisko programistyczne C++...”. Raczej język programowania C++. Środowisko zastosowane to DEV.

11.Str.81. w3d: „...ilości...”. Raczej „liczby”.

12.Str.88: w3d: „...wejściowy...”. Powinno być „wyjściowych”.

13.Str.89: w1g: „...w akceptowanej...”. Powinno być „w akceptowanej”.

14.Str.91: Tabela 15: Złe nagłówki kolumn „Rzędna”, „Lokata”. Powinno być odwrotnie.

15.Str.97: Rys.32 i Rye.33: Położenie wyrażone jest w [m], powinno być w [km].

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.

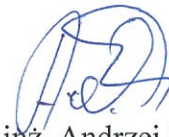
6. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa wnosi istotny wkład do problematyki efektywności energetycznej i ekonomicznej zasobników stacjonarnych z superkondensatorami w zelektryfikowanym transporcie szynowym. 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 „*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. **Wniosuję 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.**

Biorąc pod uwagę wysoki poziom naukowy i osiągnięcia Autora uzyskane podczas realizacji tej pracy, oraz aktywność naukową Autora wniosuję o wyróżnienie opiniowanej rozprawy.



Dr hab. inż. Andrzej Wilk, prof. PG

