

Częstochowa 10.07.2023 r.

Prof. dr hab. inż. Jerzy Szkutnik
Akademia Nauk Stosowanych
Angelusa Silesiusa
Instytut Przyrodniczo – Techniczny
ul. Zamkowa 4
58-300 Wałbrzych

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Franciszka Sidorskiego „Wykorzystanie odnawialnych źródeł i magazynów energii w stacjach ładowania autobusów elektrycznych”

Wstęp

Niniejsza recenzja została opracowana na podstawie Uchwały Rady Dyscypliny Inżynierii Środowiska, Górnictwa i Energetyki Politechniki Poznańskiej z dnia 20.06. 2023 roku - pismo WISIE.63.49.2023 z dnia 23.06.2023 r.

Recenzja zawiera następujące części:

1. Ogólną charakterystykę rozprawy,
2. Charakterystykę tematu oraz tez rozprawy,
3. Rozwiązanie postawionego problemu naukowego,
4. Uwagi i kwestie dyskusyjne,
5. Ocenę pracy jako rozprawy doktorskiej,
6. Wniosek końcowy.

1. Ogólna charakterystyka rozprawy

Rozprawa zawiera 112 stron tekstu podstawowego , podzielonego na 9 rozdziałów spisu treści ,streszczeń w języku polskim i angielskim (abstrakt), spisu rysunków oraz spisu tabel.

Pracę stanowi poważny wkład do badań nad zagadnieniem funkcjonowania osobowego transportu miejskiego w aspekcie ładowania baterii do autobusów, oaz analiz

doboru najlepszych rozwiązań stacji ładowczych pracujących w skojarzeniu z odnawialnymi źródłami energii oraz ich wpływu na pracę całego systemu elektroenergetycznego. Wszystko to, co zostało poddane badaniom przez Doktoranta jest niezmiernie ważne, bowiem pełne wdrożenie proponowanych rozwiązań przez Autora staje się koniecznością w dzisiejszych mocno niestabilnych czasach, gdzie sprawy ochrony środowiska wybijają się na pierwszoplanową pozycję. Wszystkie te aspekty zawiera prezentowana praca, składa się ona z następujących części :

Rozdział 1 – *Wprowadzenie* zawiera ogólne informacje o polskim systemie elektroenergetycznym , Autor stwierdza, że Jednym z czynników powodujących wzrost zapotrzebowania na moc jest rozwój elektromobilności, obecnie mający dosyć niskie znaczenie, natomiast zgodnie z obecnymi prognozami w najbliższych latach mogącym coraz bardziej wywierać wpływ na charakter i ilość energii pobieranej z sieci. W 2022 roku łączna moc stacji ładowania samochodów elektrycznych wyniosła około 98 MW, co stanowi wzrost o 44% w porównaniu do roku 2021. Zgodnie z aktualnymi scenariuszami oraz trendami rozwoju, liczba stacji ładowania na rzecz pojazdów elektrycznych w 2022 roku wynosiła około 5 tysięcy, natomiast do 2030 roku wzrośnie do około 100 tysięcy . Jednym ze znaczących czynników wspierających rozwój elektromobilności są plany dotyczące autobusów elektrycznych. Zeroemisyjny transport publiczny jest jednym z filarów poprawy jakości powietrza oraz zmniejszenia hałasu w aglomeracjach miejskich. Wiele miast europejskich takich jak m.in. Mediolan, Amsterdam, Bruksela, Oslo, Kopenhaga i Londyn, planuje wprowadzić całkowicie elektryczny tabor autobusowy . Warto podkreślić, że transport w dużych aglomeracjach miejskich odpowiada za 40% emisji CO₂ pochodzącej z transportu drogowego. W Polsce, zgodnie z zapisami ustawy o Elektromobilności i Paliwach Alternatywnych, obowiązuje prawo wskazujące, że „Jednostka samorządu terytorialnego, z wyłączeniem gmin i powiatów, których liczba mieszkańców nie przekracza 50 000, świadczy usługę lub zleca świadczenie usługi komunikacji miejskiej w rozumieniu ustawy z dnia 16 grudnia 2010 r. o publicznym transporcie zbiorowym (Dz. U. z 2021 r. poz. 1371 i 2445) podmiotowi, którego udział autobusów zeroemisyjnych we flocie użytkowanych pojazdów na obszarze tej jednostki samorządu terytorialnego wynosi co najmniej 30%.” Ponadto ustawa precyzuje znaczący wzrost udziału autobusów zeroemisyjnych do 2028 roku, co spowoduje , że punkty ładowania autobusów elektrycznych stanowiąc będą znaczące obciążenie dla sieci dystrybucyjnej w miastach, a ich zasilanie z OZE z nadbudową o magazyn energii korzystnie wpłynie na zmniejszenie negatywnego oddziaływania na środowisko,

również z poziomu źródła zasilania dla wspomnianych stacji ładowania. Dla przeanalizowania tych wszystkich zagadnień Doktorant opracował model matematyczny nadbudowy stacji ładowania autobusów elektrycznych pracującej on-grid, o hybrydową jednostkę wytwórczą (HJW) składającą się z elektrowni fotowoltaicznej, elektrowni wiatrowej oraz baterijnego magazynu energii. Przy założeniu zakresów mocy oraz pojemności baterii dla trzech dostępnych w literaturze reprezentatywnych profili pracy stacji ładowania, wykonano długoterminową symulację działania układu. Na podstawie każdego z rozpatrywanych scenariuszy mocy zainstalowanej elektrowni fotowoltaicznej, elektrowni wiatrowej oraz pojemności magazynu energii dla wieloletniej pracy rozpatrywanego profilu stacji ładowania określono następujące kryteria oceny: pierwszym z nich jest kryterium LPSP (ang. *Loss of Power Supply Probability*) – czyli prawdopodobieństwo utraty zasilania ukazujące w jakim stopniu rozpatrywany układ jest niezależny od zasilania z sieci elektroenergetycznej, kolejnym kryterium jest LCOE (ang. *Levelized Cost of Electricity*) – wskaźnik ekonomiczny ukazujący uśredniony koszt energii elektrycznej, a ostatnim z kryteriów jest EEI (ang. *Environmental Emissions Impact*) – wskaźnik oceniający wpływ środowiskowy na podstawie ekwiwalentu emisji CO₂. Po wyznaczeniu wartości LPSP, LCOE i EEI przeprowadzono wielokryterialną analizę porównawczą (ang. MCDA – ang. *Multi-Criteria Decision Analysis*), co pozwoliło na wyznaczenie rankingu analizowanych układów HJW dla każdego z rozpatrywanych profili pracy stacji ładowania autobusów elektrycznych. Ponadto wskazano scenariusz Pareto-optimalny, który okazał się najlepszym w rankingu rozwiązań i jest rekomendowany przez Autora w pierwszej kolejności do wdrażania.

Rozdział 2 – *Teza, cel i zakres pracy*, zawiera on uzasadnienie wykorzystania i rozwoju technologii odnawialnych źródeł oraz bateryjnych magazynów energii w przyszłościowych rozwiązaniach sieciowych energii elektrycznej.. Głównym celem tych działań jest ograniczenie emisji zanieczyszczeń środowiskowych, zarówno w sektorze wytwórczym energii, jak i transporcie publicznym. W tym aspekcie zasadna wydaje się nadbudowa infrastruktury ładowania autobusów elektrycznych o OZE oraz magazyny energii co stanowi zasadniczy obszar badawczy autora niniejszej dysertacji, postawiona przez Niego teza stwierdza: „Dobór parametrów urządzeń hybrydowej jednostki wytwórczej HJW, tj. mocy zainstalowanej elektrowni fotowoltaicznej i wiatrowej oraz pojemności baterijnego magazynu energii, stanowiącej nadbudowę stacji ładowania autobusów elektrycznych pracującej on-grid, można rozpatrywać jako zadanie, które jest możliwe do rozwiązania za pomocą metod wielokryterialnego wspomaganie decyzji z uwzględnieniem aspektów

energetycznych, ekonomicznych i środowiskowych”. Uzpełnieniem tak sformułowanej tezy jest następujące twierdzenie: „Możliwe jest dobranie wartości wag kryteriów wielowariantowej analizy porównawczej, na podstawie których wartości parametrów urządzeń hybrydowej jednostki wytwórczej HJW, tj. mocy zainstalowanej elektrowni fotowoltaicznej i wiatrowej oraz pojemności baterijnego magazynu energii, stanowiącej nadbudowę do stacji ładowania autobusów elektrycznych o określonym profilu zapotrzebowania, będzie miało uzasadnienie energetyczne, ekonomiczne i środowiskowe”.

W celu zbadania tak postawionej tezy określono następujące cele pracy:

- opracowanie modelu matematycznego układu zasilania stacji ładowania autobusów elektrycznych, nadbudowanego o elektrownię fotowoltaiczną, elektrownię wiatrową oraz baterijny magazyn energii dla rozpatrywanych profili pracy stacji z uwzględnieniem pracy długoterminowej oraz spadku wydajności układów generacji oraz magazynowania;
- opracowanie algorytmu stanowiącego strategię zarządzania stacją;
- dla danych, charakterystycznych profili pracy stacji ładowania autobusów elektrycznych i założonych zakresów mocy zainstalowanej elektrowni fotowoltaicznej, elektrowni wiatrowej oraz pojemności zainstalowanych magazynów energii wykonanie długoterminowej symulacji pracy układu wraz z wyznaczeniem kryteriów oceny niezawodnościowych, ekonomicznych i środowiskowych dla każdej rozpatrywanej konfiguracji HJW;
- na podstawie wyznaczonych wartości kryteriów oceny, dla analizowanych charakterystycznych profili pracy stacji ładowania autobusów elektrycznych nadbudowanych o rozpatrywane konfiguracje HJW, wyznaczenie rankingów oraz rozwiązań Pareto-optymalnych za pomocą metody wielokryterialnego wspomaganie decyzji i obiektywnej oraz subiektywnej metodyki nadawania wag kryteriów;
- wykonanie analizy wrażliwości wybranych parametrów;
- w ramach dyskusji wyników, na podstawie wyznaczonych rankingów, określenie zależności dla danych, charakterystycznych profili pracy stacji ładowania autobusów elektrycznych.

W celu weryfikacji postawionej tezy oraz realizacji celu rozprawy doktorskiej Autor opracował stosowny zakres pracy złożony z 9 rozdziałów – każdy z nich został skrótowo omówiony.

Rozdział 3 – *Przegląd literatury*, Autor omawia w nim kolejno najbardziej reprezentatywne dla pracy materiały źródłowe związanych z nowoczesną energetyką. Dotyczą one zarówno tematyki związanej ze stacjami ładowania autobusów elektrycznych, rozwojem wykorzystania odnawialnych źródeł i magazynów energii oraz wymiarowaniem hybrydowych jednostek wytwórczych.

Tematyka stacji ładowania autobusów elektrycznych jest aktualna i podejmowana w literaturze naukowej na przestrzeni ostatnich lat. Ze względu na znaczący przyrost liczby autobusów elektrycznych, jak również pracujących na ich rzecz stacji ładowania, coraz częściej poruszana jest kwestia ich oddziaływania na sieć elektroenergetyczną oraz możliwość współpracy z nią. Znacząco też rośnie wykorzystanie odnawialnych źródeł oraz magazynów energii na świecie, obserwowany jest szczególny postęp w produkcji odnawialnych źródeł energii po akceptowalnych cenach na poziomie komercyjnym, takich jak elektrownie fotowoltaiczne, elektrownie wiatrowe jak również elektrownie wykorzystujące biomasę. Zwraca się szczególną uwagę na fakt potrzeby rozwoju hybrydowych systemów energii odnawialnej, z rozwiniętymi systemami zarządzania, w celu zbilansowania produkcji różnych OZE oraz konsumpcji, z równoległą koniecznością współpracy z systemami magazynowania energii, magazyny energii instalowane na wszystkich poziomach sieci dystrybucyjnej oraz bezpośrednio u odbiorców końcowych są kluczowym elementem, koniecznym do wprowadzenia wraz z dynamiczną zmianą struktury wytwórczej systemu elektroenergetycznego, a wykorzystanie systemów magazynowania energii jest nieuniknione w celu przewyciężenia niepożądanych skutków wpływu na parametry i bezpieczeństwo pracy sieci układów generacji energii z odnawialnych źródeł. Konieczna jest rekonstrukcja sieci w oparciu o HJW, biorąc pod uwagę odnawialne źródła energii oraz systemy magazynowania energii elektrycznej.

Praca doktorska mgr inż. Franciszka Sidorskiego stanowi uzupełnienie aktualnego stanu wiedzy, rozszerzając go o tematykę nadbudowy układu zasilania stacji ładowania autobusów elektrycznych pracującej on-grid, o znanym profilu pracy, o elektrownię fotowoltaiczną, wiatrową oraz baterijny magazyn energii stanowiących hybrydową jednostkę wytwórczą HJW. Biorąc pod uwagę założone konfiguracje mocy zainstalowanej generacji OZE i pojemności magazynowania dokonano analizy rozpatrywanych układów HJW na podstawie energetycznych, ekonomicznych i środowiskowych kryteriów oceny. Na podstawie wartości wspomnianych kryteriów oraz nadanych im w sposób subiektywny i obiektywny wag, wyznaczono z wykorzystaniem wielokryterialnego wspomaganie decyzji

rankingi pracy stacji ładowań autobusów oraz Pareto-optymalne konfiguracje tych dla charakterystycznych profili ich pracy. Zagadnienie to dotychczas nie było kompleksowo podejmowane w literaturze.

Rozdział 4 – *Stacje ładowania autobusów elektrycznych*, zawiera on kompendium wiedzy nt. systemów ładowania autobusów, stacja ładowania, stanowi zewnątrz źródło zasilania dla autobusów elektrycznych. Energia doprowadzona do pojazdu jest następnie magazynowana w baterii, a w czasie eksploatacji pobierana przez urządzenia pokładowe oraz jednostkę napędową. Stacje ładowania można podzielić na :

- stacje ładowania plug-in – ładowanie wolne,
- stacja ładowania pantografowa – ładowanie szybkie,
- stacje ładowania indukcyjne – ładowanie zarówno szybkie, jak i wolne.

Ładowarki plug-in oraz pantografowe stanowią zdecydowaną większość wśród praktycznych zastosowań funkcjonalnych biorąc pod uwagę wykorzystanie na rzecz doprowadzania energii do autobusów elektrycznych na całym świecie, w rozdziale dokonano szczegółowej charakterystyki poszczególnych metod a opis układów rozszerzono o ładowanie indukcyjne, z którym obecnie wiązane są duże nadzieje , prowadzone są prace nad możliwym ich szerszym zastosowaniem.

Rozdział 5 – *Model matematyczny hybrydowej jednostki wytwórczej pracującej na rzecz stacji ładowania autobusów elektrycznych*, zawarto w nim sposób modelowania matematycznego stacji ładowania autobusów elektrycznych on-grid z nadbudową o elektrownię fotowoltaiczną, wiatrową oraz magazyn energii. Aby zrealizować ten cel zebrano charakterystyczne obciążenia układu w postaci profili poboru energii ze stacji ładowania. Następnie przedstawiono profile nasłonecznienia oraz wietrzności dla symulacji pracy odnawialnych źródeł energii w celu wyznaczenia ich zdolności wytwórczych oraz charakterystyki pracy. Profile pracy stacji ładowania autobusów elektrycznych są zróżnicowane pod względem czasu oraz mocy ładowania.

Pierwszy przyjęty profil ładowania został określony jako „dzienny – małej mocy”. Przedstawia rzeczywisty pobór mocy ze stacji pantografowej znajdującej się w Warszawie przy ulicy Spartańskiej. Ładowarka wyprodukowana przez firmę EkoEnergetyka obsługuje jedną linię autobusową oznaczoną numerem 222, na której kursują autobusy wyposażone w baterie trakcyjne o łącznej pojemności 200 kWh. Maksymalna moc stacji wynosi 200 kW. Trasa linii to 10 km, a średni pobór energii w czasie kursu mieści się na poziomie 1,5 kWh/km.

Drugi profil ładowania został określony jako „dzienny – dużej mocy” i reprezentuje model poboru energii elektrycznej z projektowanej stacji Wilanów w Warszawie. Ładowarka ta obsługuje trzy linie autobusowe 116, 180 i E-2, ładując pojazdy wyposażone w baterie trakcyjne o pojemności 240 kWh, przy średnim zużyciu energii elektrycznej na poziomie 1,8 kWh/km. W tym przypadku, maksymalna moc pobierana ze stacji pantografowej mieści się na poziomie 800 kW, co stanowi czterokrotność maksymalnej mocy profilu pierwszego

Trzeci profil ładowania został określony jako „nocny”. Reprezentuje pobór energii elektrycznej przez ładowarki plug-in w zajezdni autobusowej na przykładzie symulacji przewoźnika Bus Rapid Transport w Bogocie. Stacja ta obsługuje dziesięć ładowarek, których moc znamionowa wynosi łącznie 1000 kW.

W celu dokładnego scharakteryzowania poszczególnych profili energetycznych posłużono się wybranymi wskaźnikami energetycznymi: roczny pobór energii elektrycznej, moc średnia roczna oraz średni roczny stopień obciążenia.

Rozdział prezentuje także model matematyczny generacji z odnawialnych źródeł oraz pracę magazynu energii. Hybrydowa jednostka wytwórcza stanowi integralny system kombinowany, w skład którego wchodzi co najmniej dwa źródła generujące energię elektryczną. Układy tego typu stają się coraz bardziej popularne dla odnawialnych źródeł energii ze względu na ich stochastyczny charakter generacji, zmienny w różnych okresach doby, miesiąca i roku. Opracowany model pozwala na wyznaczenie generacji z elektrowni fotowoltaicznej, wiatrowej, dodatkowo nadbudowanych o baterijny magazyn energii elektrycznej. Modelowany układ pracuje w trybie on-grid, co umożliwia sprzedaż nadwyżek generacji bezpośrednio do sieci elektroenergetycznej. Ponadto sieć umożliwia kompensację niedoborów energii przy niewystarczającej generacji z obydwu rozpatrywanych odnawialnych źródeł energii oraz przy pełnym rozładowaniu baterijnego magazynu energii. Opracowano kolejno dedykowane modele: model elektrowni fotowoltaicznej, potrzebna jest tutaj znajomość profilu natężenia promieniowania słonecznego oraz parametrów modułu fotowoltaicznego. Dokładniejsze odwzorowanie wytwarzania energii elektrycznej ze źródła otrzymywane jest poprzez uwzględnienie wartości temperatury modułu PV, wyznaczonej na podstawie aktualnej temperatury otoczenia oraz temperaturowego współczynnika rezystancji. Moc generowana przez elektrownię fotowoltaiczną wyznaczana jest na podstawie następującej określonej zależności, model elektrowni wiatrowej, posłużono się bazą charakterystyk producentów, których wykorzystanie pozwala na wyznaczenie wartości mocy wytwarzanej przez turbinę o danej mocy znamionowej P_{NEW}

w funkcji prędkości wiatru $P(v_{ew})$, model bateryjnego magazynu energii- zasadniczym celem wykorzystania baterii w rozpatrywanym układzie hybrydowej jednostki wytwórczej jest magazynowanie nadmiaru energii z odnawialnych źródeł w czasie nadwyżki generacji względem obciążenia oraz jej wtórne wykorzystanie w przypadku deficytu energii z OZE. Parametrem określającym stan baterii jest SOC (ang. *State of Charge*) stanowiący stosunek energii możliwej do pobrania z baterii w danej chwili odniesiony do znamionowej pojemności magazynu. Wskaźnik został zapisany na podstawie stosownej zależności.

Rozdział kończy prezentacja algorytmu zarządzania stacją ładowania, dotyczącego w szczególności procesu ładowania i rozładowania bateryjnego magazynu energii. W ten sposób, z wykorzystaniem równań matematycznych, przedstawiono współpracę hybrydowego systemu wytwórczego on-grid, pracującego na rzecz stacji ładowania autobusów elektrycznych, podlegającego dalszej analizie. Program wykonuje obliczenia dla 15 lat pracy układu hybrydowego. Dla każdego roku wykonanych zostało 8760 iteracji stanowiących obliczenia dla każdej godziny. Po pierwszy roku i po każdym kolejnym, uwzględniany jest proces spadku wydajności elektrowni wiatrowej, fotowoltaicznej oraz bateryjnego magazynu energii stanowiących dane wejściowe dla danego roku obliczeniowego.

Rozdział 6 – *Wielokryterialne wspomaganie decyzji*, zdefiniowano wielokryterialne wspomaganie decyzji (WWD) oraz przedstawiono wybraną metodę, z wykorzystaniem której porównano kryteria oceny dotyczące mocy zainstalowanej elektrowni fotowoltaicznej, wiatrowej oraz bateryjnego magazynu energii, stanowiących nadbudowę dla pracujących on-grid stacji ładowania autobusów elektrycznych. Wielokryterialne wspomaganie decyzji (WWD) określane również jako analiza wielokryterialna (ang. MCA – *Multi-Criteria Analysis*) lub analiza wielokryterialna rozwiązań (ang. MCDA – *Multi-Criteria Decision Analysis*) jest dziedziną, która wywodzi się bezpośrednio z badań operacyjnych. Zasadniczym zadaniem WWD jest wyposażenie decydenta (ang. DM – *Decision Maker*) w takie procedury, modele matematyczne i narzędzia informatyczne, które umożliwią rozwiązanie bardzo złożonych problemów decyzyjnych przy uwzględnieniu wielu, czasem przeciwstawnych, punktów widzenia. Metody WWD pozwalają na poszukiwanie pożądanego rozwiązania przy uwzględnieniu wielu różnorodnych celów, które stawia sobie decydent w procesie podejmowania decyzji. Doktorant do tego celu korzystał metodę TOPSIS.

Zostały także sprecyzowane trzy kryteria służące do oceny danego scenariusza mocy zainstalowanej elektrowni fotowoltaicznej, wiatrowej oraz bateryjnego magazynu energii pracujących na rzecz stacji ładowania autobusów elektrycznych.

1) LPSP – ang. *Loss of Power Supply Probability* – prawdopodobieństwo utraty zasilania:

2) LCOE – ang. *Levelized Cost of Electricity* – uśredniony koszt energii elektrycznej

3) EEI – ang. *Environmental Emissions Impact* – wpływ środowiskowy

Rozdział zawiera także zapis matematyczny poszczególnych faz wykonywanych obliczeń w metodzie analizy wielokryterialnej rozwiązań TOPSIS, są one następujące

Faza 1 – wyznaczenie scenariuszy i kryteriów oceny oraz wskazanie czy dane kryteria są stymulantami czy de stymulantami,

Faza 2 – wyznaczenie macierzy decyzyjnej X , biorąc pod uwagę zróżnicowane kryteria i scenariusze,

Faza 3 – sprowadzenie wartości wszystkich kryteriów do ujednocionej skali (0;1) określane jako normalizacja. Przeliczenie to wykonywane jest w celu osiągnięcia porównywalności pomiędzy poszczególnymi kryteriami,

Faza 4 – wyznaczenie znormalizowanej macierzy decyzyjnej,

Faza 5 – wyznaczenie wag kryteriów. Wagi mogą być określone w sposób subiektywny na podstawie wskazań decydenta, np. scenariusz energetyczny (największa waga dla LPSP), scenariusz ekonomiczny (największa waga dla LCOE) lub scenariusz środowiskowy (największa waga dla EEI). Wagi te zostały również wyznaczone w sposób obiektywny, do tego celu została wykorzystana metoda entropii,

Faza 6 – wyznaczenie znormalizowanych wartości kryteriów z uwzględnieniem ich wagi,

Faza 7 – wyznaczenie ważonej, znormalizowanej macierzy decyzyjnej V ,

Faza 8 – wyznaczenie rozwiązania idealnego (A^+) oraz anty-idealnego (A^-) dla otrzymanego modelu,

Faza 9 – wyznaczenie dla każdego wariantu decyzyjnego odległości od rozwiązania idealnego (d^+) oraz anty-idealnego (d^-),

Faza 10 - obliczenie wartości współczynnika względnej bliskości RC_i do rozwiązania idealnego dla każdego rozważanego układu hybrydowego,

Faza 11 – wskazanie rankingu wariantów decyzyjnych oraz rozwiązania Pareto-optymalnego.

Rozdział 7- *Dobór hybrydowej jednostki wytwórczej z wykorzystaniem metody wielokryterialnego wspomaganie decyzji*, zawiera on rankingi opracowane na podstawie metodologii WWD. Zostały one wykonane w trakcie doboru mocy hybrydowej jednostki

wytwórczej w układzie elektrownia fotowoltaiczna, elektrownia wiatrowa, bateryjny magazyn energii pracujące on-grid na rzecz zasilania stacji ładowania autobusów elektrycznych.

Na potrzeby symulacji ustalono następujący zakresy graniczne: moc elektrowni fotowoltaicznej od 50 do 2050 kWp, z krokiem co 200 kWp, moc elektrowni wiatrowej od 0 do 2000 kW, z krokiem co 200 kW, pojemność bateryjnego magazynu od 50 do 2050 kWh, z krokiem co 200 kWh. Wielkości na tym poziomie zostały uznane za umożliwiające szeroki zakres oceny wspomnianego układu pod kątem rozpatrywanych kryteriów oceny, przy zachowaniu zasadności z poziomu ekonomicznego oraz biorąc pod uwagę powierzchnię zajmowaną przez potencjalną instalację. Ponadto dobór zakresu wielkości wynika z doświadczenia autora niniejszej dysertacji, zdobytego w realizowanych projektach związanych z tego typu instalacjami. Warto podkreślić, że prezentowane podejście pozwala na dalsze wykorzystanie zaproponowanej metodologii obliczeń oraz modelu matematycznego dla konkretnych lokalizacji inwestycji, przy znajomości jej ograniczeń m.in. powierzchniowych i ekonomicznych, wynikających z miejscowego planu zagospodarowania przestrzennego lub warunków określonych przez operatora sieci dystrybucyjnej.

Przeprowadzono następnie obliczenia symulacyjne, zgodnie z opracowanym przez Doktoranta algorytmem, otrzymując 1331 rozwiązań dla przyjętych scenariuszy konfiguracji potencjalnego układu hybrydowego. Obliczenia przeprowadzono w oparciu o dane wejściowe do symulacji (Tabela 7.3). Kolejno zestawiono w tabelach podsumowania wyników dla poszczególnych profili, badania objęły także analizę wrażliwości w celu sprawdzenia w jakim stopniu dany parametr wejściowy przyjęty do symulacji, wpływa na wyniki końcowe.

Rozdział 8- Podsumowanie, zawiera on syntezę wszystkich badań Autora w ramach dysertacji, ponadto zakreślono zakres dalszych możliwych prac w obszarach poruszonych w rozprawie. Należą do nich badania różnorodnych kryteriów oceny tego typu układów m.in. związanych z funkcjonowaniem sieci dystrybucyjnej. Ponadto autor w przyszłych pracach planuje rozpatrywać pracę tego typu układów w trybie off-grid, badając wykorzystanie w ramach HJW ogniw paliwowych i magazynów wodorowych. Kolejnym obszarem dalszych prac jest wykorzystanie w stacjach ładowania autobusów elektrycznych magazynów energii bez nadbudowy o jednostki generacji, takie jak elektrownie fotowoltaiczne i wiatrowe. Dodatkowo, ze względu na spodziewane wprowadzenie dynamicznych taryf energii elektrycznej, w swych pracach autor zamierza wykorzystać predykcyjne zarządzanie

baterijnym magazynem energii oraz procesem ładowania autobusów elektrycznych, uzależnione od spodziewanej generacji z OZE, jak również cen energii. Kolejnym obszarem jest rozbudowana analiza możliwości oddawania energii do sieci zarówno z baterijnego magazynu energii, jak również z baterii trakcyjnych autobusu elektrycznego (ang. V2G – *Vehicle to Grid*).

Rozdział 9- Bibliografia, zawiera spis wszystkich opracowań źródłowych, wykorzystanych w rozprawie, w tym opublikowanych prac własnych Autora rozprawy.

2. Charakterystyka tematu oraz celu rozprawy

Tematyka rozprawy doktorskiej pt. *„Wykorzystanie odnawialnych źródeł i magazynów energii w stacjach ładowania autobusów elektrycznych”* jest istotna zarówno z naukowego jak i praktycznego punktu widzenia. Dotyczy rozwiązań mających bezpośredni związek z wytycznymi Europejskiego Zielonego Ładu zarówno w obszarze rozwoju mobilności jak i zrównoważonego rozwoju oraz ochrony środowiska. Badania Autora mieszczą się w tym obszarze, a problem naukowy rozważany w pracy jest bardzo aktualny i ważny szczególnie w tym okresie, kiedy nieodzowne stają się działania ochrony klimatu. Badania nad problematyką rozważania w rozprawie zarówno w kraju jak i zagranicą są już prowadzone od pewnego czasu, niemniej jednak ta praca stanowi istotny wkład w nowe spojrzenie wykorzystanie najlepszych strategii zarządzania energią w stacjach ładowania autobusów elektrycznych przy wykorzystaniu odnawialnych źródeł i magazynów energii. Rozwiązania opracowane przez Doktoranta są właściwą propozycją dla wielu organizacji gospodarczych w obszarze transportu oraz energetyki. Pozwalają one na osiągnięcie przez jednostki samorządu terytorialnego zakładanych celów sprecyzowanych w ustawodawstwie odnoszącej się do elektromobilności i paliw alternatywnych. Problem naukowy, cele pracy oraz tezy pracy zostały trafnie i jasno sformułowane. Pozytywnie więc oceniam fakt, że Doktorant podjął tak złożony i bardzo aktualny problem, zajmując się w rozprawie przedstawieniem w sposób kompleksowy, uwzględniający zarówno podstawy teoretyczne, metody statystyczno-ekonometryczne pozwalające na określenie stanu faktycznego oceny poziomu efektywnej pracy stacji ładowania autobusów dla szerokiego spektrum możliwych wariantów. Takie holistyczne spojrzenie daje pozytywny impuls do dalszych badań w tym obszarze, a przedstawione w pracy rozwiązania stanowią wartościowy element rozwoju elektromobilności w Polsce w najbliższej przyszłości.

Biorąc pod uwagę powyższe aspekty, należy stwierdzić, że praca doktorska mgr inż. Franciszka Sidorskiego jest aktualna i dotyczy ważnych problemów w jednostkach gospodarczych – przedsiębiorstwach energetycznych, transportowych oraz jednostkach samorządu terytorialnego.

Doktorant podjął się trudnego zadania, polegającego na udowodnieniu, że istnieje korelacja pomiędzy mocą wszystkich elementów składowych Hybrydowej Jednostki Wytwórczej (HJW) a wielkością wskaźników kryterialnej oceny: LPSP, LCOE, EEI, uwzględniających aspekty energetyczne, ekonomiczne oraz środowiskowe.

Postawione przez Doktoranta cele pracy są oryginalne a zobrazowany problem naukowy został rozwiązany w sposób skuteczny, ponadto uwypuklono wyraźny jego potencjał wdrożeniowym. Zagadnienia naukowe przedstawione w pracy są w ogólności sprecyzowane w sposób zadowalająco jasny i jednoznaczny, a postawione na wstępie hipotezy badawcze zostały w trakcie pracy definitywnie udowodnione i zweryfikowane

Dodatkowo należy podkreślić, że wyniki badań oraz wnioski płynące z przeprowadzonych badań, charakteryzują się bardzo wysokim potencjałem ich praktycznego zastosowania w obszarze znacznie szerszym tym w którym przeprowadzono badania, np. w przyszłościowych bazach transportowych stosujących samochody elektryczne. Ponadto Doktorat przeprowadził weryfikację hipotez, stwierdzając, że istnieje podstawa do tego, aby wyrazić pełne ich potwierdzenie w trakcie przeprowadzonej pracy doktorskiej, co pozwoliło rozstrzygnąć problemy badawcze oraz uznać, że cele dysertacji zostały w pełni zrealizowane.

3. Rozwiązanie postawionego problemu naukowego

Problem naukowy przedstawiony przez Autora rozwiązany został w rozdziałach: piątym, szóstym i siódmym gdzie kolejno sprecyzowano główne założenia metodyczne i twórczo rozwinięto metodykę analityczną, która została dobrana adekwatnie do problemu. Pozwoliło to na wielowarstwowe spojrzenie badawcze, umożliwiające przeprowadzenie wnioskowania syntetycznego. Podejście takie uważam za bardzo właściwe i nowatorskie, można bowiem w tak skomponowany sposób stosować ją także przy innych obszarach dotyczących elektromobilności.

Katalog innowacyjnych prac wykonanych przez Doktoranta w rozprawie jest imponujący, za najbardziej oryginalne osiągnięcia Autora pracy uznałbym:

- usystematyzowanie wiedzy na temat systemów ładowania autobusów elektrycznych,

- opracowanie autorskiej kompozycji realizacji procesu badawczego pracy,
- opracowanie autorskiego modelu matematycznego hybrydowej jednostki wytwórczej pracującej na rzecz stacji ładowania autobusów elektrycznych,
- opracowanie autorskiego algorytmu zarządzania układem-stacją ładowania autobusów elektrycznych, nadbudowaną o elektrownię fotowoltaiczną, elektrownię wiatrową oraz baterijny magazyn energii,
- wykorzystanie do badań metodologii wielokryterialnego wspomaganie decyzji, ze szczególnym uwzględnieniem metody TOPSIS,
- wykonanie analiz zmierzających do sprecyzowania mocy poszczególnych elementów składowych (instalacja fotowoltaiczna, instalacja wiatrowa, bateria) hybrydowej jednostki wytwórczej,
- opracowanie rankingu proponowanych rozwiązań, opracowanie rekomendacji co do stosowania systemu referencyjnego pracy stacji ładowczej
- nakreślenie kierunków przyszłych badań.

4. Uwagi i kwestie dyskusyjne

Jako recenzent rozprawy zgłaszam następujące uwagi i kwestie dyskusyjne:

A. Uwagi ogólne:

Analizując pracę wielokryterialnie, recenzent pozytywnie ocenia pozytywnie: trafność doboru tematu i poprawność sformułowanego problemu badawczego, stan wiedzy doktoranta o podjętym temacie w literaturze przedmiotowej krajowej i zagranicznej, przyjętych celów pracy, zastosowanych metod badawczych, poprawności budowy hipotez badawczych i sposobu ich weryfikacji, umiejętność prezentowania wyników przeprowadzonych badań i trafności wnioskowania, dobór oraz znajomość źródeł informacji, natomiast ma duże zastrzeżenia w zakresie: poprawności struktury pracy, szczególnie w stosunku do wstępu oraz techniki pisania pracy , w szczególności poprawności językowej oraz w zakresie wymagań edytorskich.

Generalnie recenzent nie wnosi poważnych merytorycznych uwag, uważając pracę wykonaną na dobrym poziomie naukowo – badawczym.

Niemniej jednak recenzent chce w trakcie obrony pracy prosić Doktoranta o ustosunkowanie się do następujących zagadnień:

1. Przyjęta powszechnie sekwencja badawcza to : określenie przedmiotu badań → sprecyzowanie celu pracy i problemu badawczego → postawienie tezy, hipotezy.

Doktorant podaje najpierw tezę i do niej dopisuje cele, czy można prosić Autora o uzasadnienie dla takiego postępowania.

2. Omawiając stacje ładowania indukcyjnego Autor pokazuje jedynie rozwiązanie stacjonarne, proszę o przedstawienie rozwiązania ładowania w czasie jazdy autobusu, wg recenzenta ten rodzaj zasilania w przyszłości będzie dominujący.
3. W pracy nie ma wzmianki o zasilaniu trakcyjnym (trolejbusy) jak wyglądałaby analiza porównawcza kosztów zasilania trakcyjnego i ładowania plug-in dla profilu ładowania „dzienny – małej mocy” ?
4. Czy Doktorant spotkał się z rozwiązaniem ładowania samych baterii samochodowych i wymianę ich w zajezdni, jeżeli tak to proszę o uszczegółowienie sprawy.
5. W badaniach wykorzystano metodę TOPSIS, czy nie lepsza byłaby metoda taksonomii Hellwiga, która od razu określa rozwiązanie optymalne oraz wskazuje na udział poszczególnych czynników na ostateczny wynik – proszę o opinię w tym zakresie.
6. Na rys 6.2 Autor przedstawia metodologię prowadzonych badań, na ich podstawie są wskazywane najlepsze rozwiązania (ranking) , - Tabela 7.10, Tabela 7.17, Tabela 7.24. Ponieważ w tych tabelach nie ma wartości wskaźnika, który decyduje o takiej czy innej kolejności proszę Doktoranta o wyjaśnienie w tej kwestii. Recenzent domyśla się, że tym wskaźnikiem jest wartość współczynnika względnej bliskości RC_i
7. Praca zawiera wizję dalszych badań, zatem recenzent prosi o wskazanie ewentualnych ulepszeń w stosunku do opracowanych modeli, czy widzi tutaj Autor miejsce np. dla sztucznej inteligencji ?

B . Uwagi szczegółowe:

1. Wprowadzenie znacznie odbiega od standardów przyjętych w zakresie opracowywania prac doktorskich, w związku z tym spis treści jest niepoprawny.
2. Skrót Odnawialne Źródła Energii to OZE.
3. Rozdział Przegląd literatury niezbyt fortunny , czy nie lepiej by było: Systemy i układy zasilania elektrycznych pojazdów ?
4. Rys.5.9 , brak źródła, podobnie Rys.7.1 – 7.9
5. Spis literatury wykonany bez porządku alfabetycznego, niezgodny ze standardem.

C. Uwaga generalna do uwag szczegółowych : przy licznych uwagach redakcyjnych, praca napisana niestarannie , o niezbyt dobrej stylistyce .

5. Ocena pracy jako rozprawy doktorskiej

Biorąc pod uwagę zawartość pracy stwierdzam, że: Doktorant w sposób wystarczająco jednoznaczny sformułowała problem naukowy , który następnie rozwiązał właściwie przy użyciu metod naukowych. Zakres i stopień wiedzy Doktoranta w zakresie dyscypliny naukowej, której dotyczy praca, jest wystarczający zarówno w zakresie teoretycznym jak również aplikacyjnym, na zaawansowanym poziomie o charakterze podstawowym dla dziedziny nauk technicznych oraz o charakterze szczegółowym odpowiadającej obszarowi prowadzonych badań naukowych. Na szczególną uwagę zasługuje duża wiedza i znajomość zagadnień przez Doktoranta zebrana na podstawie dużej liczby pozycji literaturowych, związanych z koncepcjami pracy urządzeń elektroenergetycznych, ze szczególnym uwzględnieniem stacji do ładowania samochodów elektrycznych, rozszerzonej o własne rozwiązania aplikacyjne, obejmujące najnowsze osiągnięcia nauki. Doktorant posiada również dobre opanowanie techniki pisania prac naukowych oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej w oparciu o właściwie dobrane metody i metodologię. Krytyczne uwagi recenzenta obniżają w jakimś stopniu ostateczną ocenę pracy, zostały one przedstawione, jako wskazówki przy opracowywaniu kolejnych publikacji przez Doktoranta.

6. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Franciszka Sidorskiego „Wykorzystanie odnawialnych źródeł i magazynów energii w stacjach ładowania autobusów elektrycznych”, **spełnia ustawowe wymagania dotyczące rozpraw doktorskich** zawarte w art. 13 Ustawy O stopniach i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki z 14.03.2003 r.(Dz.U.nr 65,poz.595) w zgodzie z Ustawą Prawo o szkolnictwie wyższym z 27.07.2005r.(Dz. U. nr 164, poz.1365 z późniejszymi zmianami), oraz zgodnie z § 6 ust.3 rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19.stycznia 2018 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzenia czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz.U. z dnia 30 stycznia 2018 r poz.261). Jest ona oryginalnym rozwiązaniem postawionego przez Autora zagadnienia naukowego. Potwierdza opanowanie przez Niego wiedzy w dyscyplinie naukowej:

inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka. Biorąc pod uwagę wszystkie aspekty dysertacji recenzent zalicza ją do kategorii *zadawalająco spełniająca wymagania*, w związku z powyższym wnioskuję o **dopuszczenie mgr inż. Franciszka Sidorskiego do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.**

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Jerzy Skutnawski". The signature is written in a cursive style with a large initial 'J' and 'S'.