



Politechnika Łódzka

Instytut Elektroenergetyki

Łódź, 27.05.2023 r.

Prof. dr hab. Irena Wasiak
Politechnika Łódzka
Instytut Elektroenergetyki
Ul. Stefanowskiego 18/22
90-537 Łódź

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Zagrajka

p.t. „Analiza koncepcji usług rozładowania pojazdów elektrycznych na potrzeby odbiorców końcowych (V2X) jako elementu powiększającego zasoby elastyczności systemu elektroenergetycznego”

- opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej, w piśmie z dnia 21.03.2023 r.

1. Wybór tematyki rozprawy

Integracja coraz większej liczby odnawialnych źródeł energii zmienia funkcjonowanie systemu elektroenergetycznego, wprowadza większą zmienność mocy generowanej i stwarza szereg problemów związanych z utrzymaniem wymaganego poziomu jakości i niezawodności zasilania. W tych warunkach wzrasta znaczenie magazynów energii w zapewnieniu stabilnej i bezpiecznej pracy systemu. Znajduje to odzwierciedlenie zarówno w europejskim, jak i krajowym prawodawstwie oraz jest widoczne w praktyce działania operatorów sieci dystrybucyjnych, którzy coraz częściej instalują systemy zasobnikowe do lokalnego bilansowania mocy i energii, a także do poprawy warunków napięciowych w sieciach z generacją rozproszoną.

Rozwój technologiczny oraz spadek cen magazynów energii wraz z wprowadzeniem odpowiednich instrumentów wsparcia, sprzyjać będzie szerszemu ich wykorzystaniu do zarządzania energią w instalacjach odbiorczych i prosumenckich. Powstaje możliwość realizacji usług regulacyjnych świadczonych przez odbiorców końcowych, polegających na zmianie mocy pobieranej z /oddawanej do sieci zasilającej na życzenie operatora sieci. Prace w tym zakresie są prowadzone, istnieją już przykłady rozwiązań pilotażowych, w których dla utrzymania wymaganej wartości napięcia zasilającego w sieciach z generacją rozproszoną wykorzystuje się zasobniki energii w instalacjach prosumenckich na zasadzie usługi. Można więc przewidywać wprowadzenie systemu usług zwiększających elastyczność pracy sieci, o ile stworzone zostaną w tym celu odpowiednie ramy prawne.

Wraz z rozwojem elektromobilności i wzrostem liczby pojazdów elektrycznych (EV) użytkowanych w kraju, pojawia się także możliwość wykorzystania baterii tych samochodów jako mobilnych magazynów energii, zarówno na potrzeby własne użytkowników, jak i na potrzeby



Instytut Elektroenergetyki

90-537 Łódź, ul. Stefanowskiego 20, budynek A11
tel. (+48) 42 631 25 96, 631 25 65, e-mail: w2i22@adm.p.lodz.pl



HR EXCELLENCE IN RESEARCH

systemu elektroenergetycznego. W tym drugim przypadku oznacza to świadczenie usług podmiotom zewnętrznym, takim jak operatorzy sieci dystrybucyjnych czy przesyłowych (usługi V2G), a także odbiorcy końcowi (usługi V2B – w budynkach oraz V2H – w domach jednorodzinnych), związanych z lokalnym bilansowaniem mocy i energii. W recenzowanej pracy usługi te zostały określone ogólnym mianem V2X. O potrzebie takich usług mówi się od dawna, ale nie powstały dotychczas żadne konkretne modele biznesowe w tym zakresie.

Mgr inż. Krzysztof Zagrajek w swojej rozprawie doktorskiej podjął się opracowania koncepcji programu usług udostępniania pojemności baterii pojazdów elektrycznych na potrzeby odbiorców końcowych i przeprowadził analizę technicznych możliwości realizacji takich usług oraz ich opłacalności ekonomicznej. Tematyka pracy jest interesująca, nowoczesna i bardzo aktualna, bowiem bardzo dobrze wpisuje się w aktualny nurt badań poświęconych rozwojowi systemu elektroenergetycznego. Chociaż w chwili obecnej obserwuje się w kraju dość powolny rozwój elektromobilności, ponadto brak jest odpowiednich przepisów prawnych, w dalszej perspektywie czasowej można przewidywać zmianę tej sytuacji i zwiększenie potencjału wykorzystania pojazdów elektrycznych do świadczenia usług V2X. **Zatem, przedmiot rozprawy oraz cele postawione przez Doktoranta uważam za całkowicie uzasadnione.**

2. Ocena merytoryczna rozprawy

Opiniowana praca obejmuje 274 strony i została zredagowana w 9 rozdziałach, uzupełniona spisem rysunków i tabel oraz 6 załącznikami. Spis literatury wykorzystanej w rozprawie zawiera 162 pozycje, głównie literatury zagranicznej. W mojej ocenie praca tworzy logiczną całość i zawiera wszystkie elementy istotne dla rozprawy doktorskiej; omawiam je poniżej.

a. Cel i teza rozprawy

Pierwszy rozdział pracy stanowi wprowadzenie do dalszych rozważań i zawiera konieczne wyjaśnienia dotyczące technologii V2X oraz uzasadnienie wyboru tematu rozprawy. Autor przekonująco zaprezentował znaczenie i potencjał wykorzystania pojazdów elektrycznych na potrzeby szeroko rozumianego systemu elektroenergetycznego, przywołując obszerną literaturę, w tym akty prawne UE i krajowe, dane dotyczące rozwoju rynku pojazdów, jak również informacje na temat projektów naukowych w tym zakresie. Teza rozprawy została sformułowana w brzmieniu: *„Do zabezpieczenia dostaw energii elektrycznej do odbiorców końcowych można wykorzystać energię zgromadzoną w akumulatorach pojazdów elektrycznych, tworząc odpowiedni program świadczenia usług V2X oraz kompleksową metodykę oceny opłacalności ekonomicznej zarówno dla odbiorcy, właściciela pojazdu elektrycznego, jak również przedsiębiorstwa energetycznego, w której mogą być wykorzystane wskaźniki operacyjnej efektywności gospodarczej EBIT i EBITDA oraz wskaźniki wartości energii niedostarczonej VoLL lub VoLA”*. **Teza ta jest jasna i dobrze określa zarówno rozpatrywane zagadnienie badawcze, jak i cel pracy.**

b. Analiza źródeł

Doktorant szczegółowo przeanalizował publikacje dotyczące integracji pojazdów elektrycznych z siecią zasilającą oraz akty prawne europejskie i krajowe, w których znajdują się zapisy dotyczące elektromobilności. Krytycznie odniósł się do istniejących zapisów Ustawy o elektromobilności i paliwach alternatywnych oraz ustawy Prawo energetyczne, które praktycznie uniemożliwiają wprowadzenie rynku usług V2X w chwili obecnej, a następnie zaproponował zmiany legislacyjne w tym zakresie z uwzględnieniem priorytetu ich wprowadzania. **Uważam, że analiza źródeł jest wyczerpująca, a jej wyniki stanowią właściwą podstawę do rozwiązania postawionych zagadnień.**

c. Rozwiązanie postawionego zagadnienia

Zakres badań, jakie Autor wykonał dla wykazania słuszności postawionej tezy jest bardzo obszerny i obejmuje zarówno zagadnienia o charakterze technicznym, jak i ekonomicznym. W zagadnieniach technicznych mieści się opracowanie koncepcji programu świadczenia usług rozładowania baterii EV

na potrzeby odbiorców końcowych, opracowanie modeli procesu realizacji tych usług i wyznaczenie parametrów tych modeli. Zagadnienia ekonomiczne dotyczą sposobu rozliczania wszystkich podmiotów biorących udział w procesie realizacji usług oraz oceny opłacalności ekonomicznej tego przedsięwzięcia.

W opisie koncepcji programu sformułowano podstawowe zasady działania rynku usług V2X (w rozprawie określane jako Program V2X). Zgodnie z przyjętymi założeniami, w programie mogą być realizowane 2 rodzaje usług: usługa harmonogramowana i interwencyjna, świadczone na rzecz odbiorcy końcowego lub operatora sieci (usługobiorcy) przez uczestników programu (usługodawcy) za pośrednictwem dostawcy usług, w trybie obowiązkowym lub opcjonalnym, w procesie ofertowania early-bid oraz ofertowania strefowego. Przedstawiono role poszczególnych uczestników Programu i powiązania pomiędzy nimi. Przyjęte założenia nawiązują do istniejących mechanizmów rynkowych usług systemowych i nie budzą zastrzeżeń. Pewien niedosyt może budzić zbyt powierzchowne omówienie technicznej strony integracji pojazdów EV z infrastrukturą do ładowania (EVSE) w kontekście założeń do Programu.

Doktorant opracował model usług V2X i przedstawił proces ich realizacji w opisie relacji pomiędzy uczestnikami programu, zachodzącymi w kolejnych odcinkach czasu. Zaletą modelu jest jego ogólny charakter, zarówno w odniesieniu do zainteresowanych podmiotów, jak i charakteru usługi. Zastosowano podejście probabilistyczne, w którym oczekiwana ilość energii przepływająca pomiędzy baterią pojazdu, a siecią elektroenergetyczną lub instalacją odbiorcy końcowego jest wyznaczana z uwzględnieniem prawdopodobieństwa wykonania usługi. Prawdopodobieństwo to zależy od szeregu czynników determinujących losowy charakter procesu, uwzględniających dostępność infrastruktury do ładowania oraz dostępność pojazdów do wykonania usługi, a jego określenie jest istotną trudnością w wyznaczeniu energii dostępnej dla usługobiorcy, ze względu na brak danych statystycznych odnośnie do sposobu użytkowania pojazdów, potrzeb i zachowań użytkowników. Ten problem Doktorant rozwiązał wykorzystując wyniki badań ankietowych, które przeprowadził w grupie celowej. Można stwierdzić, że badania takie stanowią w chwili obecnej najbardziej wiarygodne źródło informacji pozwalających ocenić realność założeń koncepcji Programu V2X w warunkach polskich.

W rozprawie przedstawiony został szczegółowo proces kontraktowania dla obu rozpatrywanych typów usług, harmonogramowanych i interwencyjnych. Doktorant opisał kolejne etapy tego procesu i zaproponował odpowiednie czasy dla ich realizacji. W koszyku usług umieścił usługi świadczone dla odbiorcy końcowego oraz dla operatora sieci dystrybucyjnej.

Uwzględnienie prawdopodobieństwa realizacji usługi V2X komplikuje proces kontraktowania usługi pomiędzy jej odbiorcą, dostawcą, a właścicielem pojazdu i oznacza konieczność poszukiwania większej liczby pojazdów wymaganych do świadczenia usługi, niż wynikałoby to w prosty sposób z zapotrzebowania usługobiorcy i średniej energii dostępnej w pojazdach. Do opracowania algorytmów poszukiwania pojazdów zaproponowano metodę siatki kwadratowej, pozwalającą określić lokalizacje pojazdów w obrębie zdefiniowanych stref w obszarze działania dostawcy usług. Metoda i opracowane zgodnie z nią algorytmy są autorską propozycją Doktoranta i nie budzą zastrzeżeń. Interesujące byłoby porównanie skuteczności działania tej metody z innymi rozwiązaniami, o których wspomniano w rozprawie (wykorzystanie meta-heurystycznych algorytmów WOA).

W modelu ekonomicznym zaprezentowany został sposób wyznaczenia opłaty za usługę V2X dla usługobiorcy, wynagrodzenia dla usługodawcy oraz rozliczenia dostawcy usługi. Wprowadzono odpowiednie składniki stałe i zmienne opłat/wynagrodzenia oraz zdefiniowano wielkości konieczne dla wyznaczenia tych składników. Przedstawiona argumentacja odnośnie do struktury rozliczeń i opisu poszczególnych składników, uzależniającego ich wartości nie tylko od zamówionej/dostarczonej energii, ale także od czynników o charakterze losowym, m.in. stopnia trudności realizacji usługi wynikającego z możliwości zakontraktowania określonej ilości energii w danym momencie czasowym, jest przekonująca, pewne wątpliwości może natomiast budzić możliwość pozyskania wiarygodnych danych do obliczeń. Doktorant, mając to na uwadze, zaproponował dodatkowe metody weryfikacji użytkowników.

Funkcjonowanie Programu V2X według zaprezentowanej koncepcji Autor zilustrował na przykładzie realizacji usługi rezerwowego zasilania odbiorców końcowych RZOK (dla której w pracy dokonano parametryzacji modeli), dla dwóch wybranych odbiorców z grupy obiektów usługowo-biurowych. Zakres przeprowadzonych symulacji obejmuje kilka wariantów, w których odwzorowano różne warunki jakie mogą zaistnieć w procesie kontraktowania pojazdów, ze względu na ich lokalizację oraz niepewność związaną ze świadczeniem usługi w trybie opcjonalnym. Analiza wyników wskazuje na poprawność zaproponowanych rozwiązań.

Ocenę poprawności modelu ekonomicznego Doktorant przeprowadził również dla usług RZOK metodą analizy wielowariantowej dla rocznego horyzontu czasowego i realizacji obu typów usług, harmonogramowanych i interwencyjnych. Do określenia stawek za pozyskanie energii przez usługobiorcę zaproponował wskaźniki wartości niedostarczonej energii, wykorzystywane w ocenie niezawodności zasilania, tj. VoLL i VoLA. W ocenie efektywności gospodarczej dostawcy usług, przy przyjętych założeniach odnośnie do stawek za pozyskanie energii dla usługobiorców oraz stawek wynagrodzeń dla świadczących usługi, wykorzystano wskaźniki operacyjnej efektywności gospodarczej przedsiębiorstw, tj. EBIDTA i EBIT. Badania obejmują dużą liczbę wariantów, wynikającą z uwzględnienia różnej liczby odbiorców końcowych, różnego stopnia rozwoju elektromobilności i wynikającej stąd liczby EV świadczących usługi V2X, a także prognozowanego czasu trwania usługi, determinującego ilość dostarczanej energii przy różnym stopniu wykorzystania programu V2X.

Doktorant przeprowadził szczegółową i krytyczną analizę otrzymanych wyników. Dla każdego wariantu określił obszar, w którym usługa jest nierealizowalna ze względów technicznych, przyjmując jako kryterium realizowalności rozładowanie pojedynczego EV jeden raz dziennie. Przedstawił też szczegółową analizę ponoszonych kosztów i uzyskiwanych zysków uczestników Programu dla różnych wariantów, wskazując na zależność stawki za udostępnianą energię od liczby usługobiorców i EV świadczących usługi. Rozszerzając analizę ekonomiczną, Doktorant przeprowadził obliczenia optymalizacyjne wykazując, że jednostkowa opłata za udostępnianą energię może być zmniejszona przy zachowaniu opłacalności gospodarczej przedsiębiorstwa, co jest istotne z punktu widzenia odbiorców końcowych i ich uczestnictwa w Programie. Należy podkreślić duży stopień złożoności przeprowadzonej analizy oraz wnikliwość Doktoranta.

W mojej ocenie przedstawiona w rozprawie kompleksowa propozycja programu świadczenia usług V2X została opracowana przy przyjęciu uzasadnionych założeń i zastosowaniu właściwych metod badawczych. Weryfikacja programu na podstawie badań symulacyjnych i zaprezentowane w pracy analizy techniczne i ekonomiczne stanowią dowód słuszności postawionej tezy.

Wybrane uwagi dyskusyjne zamieściłam w dalszej części recenzji.

d. Oryginalność rozprawy

Rozprawa doktorska mgr inż. Krzysztofa Zagrajka jest prawdopodobnie pierwszą pracą, według wiedzy recenzentki, dotyczącą tematyki wykorzystania pojazdów elektrycznych do świadczenia usług sieciowych, która całościowo prezentuje koncepcję funkcjonowania rynku usług V2X, jako nowego obszaru rynku usług elastyczności w krajowym systemie elektroenergetycznym. Przedstawione rozwiązanie jest w sensie całościowym oryginalnym dorobkiem Autora, choć niektóre jego elementy przyjęto na podstawie literatury, a inne nawiązują do istniejących rozwiązań funkcjonujących na rynkach energii. Nie jest to oczywiście zarzut do Autora, stanowi raczej dowód uznania dla umiejętności integracji rozproszonej wiedzy i dostosowania proponowanych rozwiązań do warunków polskich.

Lista szczegółowych osiągnięć, które można uznać za oryginalny dorobek Doktoranta została przedstawiona w rozdziale 9.2 rozprawy i nie budzi wątpliwości. Zdaniem recenzentki do najważniejszych należą:

- opracowanie koncepcji realizacji usług V2X z uwzględnieniem losowego charakteru procesu, w tym opis usługi za pomocą modelu matematycznego, opracowanie mechanizmu kontraktowania usługi przez uczestników procesu oraz algorytmów poszukiwania pojazdów do realizacji usługi
- opracowanie modelu ekonomicznego realizacji usług V2X,

- parametryzacja usługi rezerwowego zasilania odbiorców końcowych,
- obszerne badania symulacyjne, ilustrujące działanie zaproponowanych algorytmów oraz wielowariantowa analiza ekonomiczna usługi RZOK.

Praca jest nowatorska w zakresie rynku usług zwiększających elastyczność sieci elektroenergetycznych, a jej wyniki są wartościowe z naukowego oraz praktycznego punktu widzenia.

e. Redakcja i strona formalna pracy

Rozprawa napisana jest precyzyjnym i klarownym językiem. W opisie modeli usług V2X Autor posługuje się zdefiniowanymi przez siebie pojęciami i wielkościami, których liczba jest duża. Należy podkreślić, że definicje są precyzyjne, a sposób oznaczania wielkości jest logiczny i konsekwentnie stosowany. Zatem, pomimo złożoności zagadnienia, opis pozostaje czytelny. Styl i swoboda wypowiedzi Autora wskazują na bardzo dobrą znajomość tematu. Wyniki przedstawione są w zwięzły, ale uporządkowany i jasny sposób. Jedyne zastrzeżenie może budzić mała czytelność niektórych rysunków, np. rys. 1.2, czy 4.1.

Praca jest zredagowana bardzo starannie. Uchybienia formalne są nieliczne, pomijam je w recenzji. **Autor wykazał się umiejętnością redagowania rozpraw naukowych i prezentowania wyników swojej pracy na wysokim poziomie merytorycznym.**

f. Przydatność rozprawy dla nauk inżynierjno-technicznych

Jest wiele czynników, od których zależy możliwość implementacji programu V2X w krajowej elektroenergetyce. Rozwój elektromobilności charakteryzuje się dużą niepewnością i trudno jest przewidzieć, kiedy pojawią się odpowiednie warunki do wprowadzenia usług udostępniania baterii pojazdów elektrycznych, jednakże można sądzić, że wykorzystanie rozproszonych zasobów magazynowania energii jest właściwym kierunkiem rozwoju systemu elektroenergetycznego. W tym kontekście rozprawa doktorska mgr inż. Krzysztofa Zagrajka stanowi ciekawą i konkretną propozycję modelu biznesowego na rynku usług sieciowych, którego przyszłościowe uruchomienie może wpłynąć na zwiększenie elastyczności systemu elektroenergetycznego. Sposób rozwiązania postawionego zagadnienia daje możliwość praktycznego wykorzystania, ale wymaga skorygowania przyjętych założeń, po uzyskaniu doświadczeń z działania Programu. Praca powinna zainteresować zarówno przedsiębiorstwa energetyczne, operatorów sieci dystrybucyjnych i przesyłowych, jak i użytkowników pojazdów elektrycznych.

3. Uwagi dyskusyjne

1. Pomijając kwestie prawne, które w szczegółowy sposób zostały przeanalizowane w rozprawie, jak zdaniem Autora wygląda w chwili obecnej realna możliwość realizacji usług V2X z punktu widzenia technicznego (interoperacyjność EVSE-EV, systemy pomiarowo-komunikacyjne, i sterujące, dostępność danych, etc.)? Które z tych czynników w największym stopniu mogą utrudnić wdrożenie rynku usług elastyczności i jak Autor ocenia perspektywę zmiany tej sytuacji?
2. W definicji Programu V2X Doktorant wymienia jako cel wykorzystania pojazdów elektrycznych, obok poprawy ciągłości dostawy energii, także poprawę parametrów pracy sieci elektroenergetycznej. Z opisu wynika, że chodzi o parametry napięcia zasilającego, takie jak wartość skuteczna lub częstotliwość. Wykorzystanie zasobników energii, w tym baterii pojazdów elektrycznych do poprawy jakości napięcia jest tematem coraz częściej podejmowanym w literaturze. Jak mógłby wyglądać proces realizacji usługi regulacji napięcia przy wykorzystaniu opracowanego programu?
3. W przypadku odbiorcy końcowego zastosowanie zasobników wynika zwykle z chęci ograniczenia kosztów ponoszonych za energię przy taryfie 2-strefowej i polega na przesuwaniu obciążenia szczytowego. W takim przypadku zasobnik jest źródłem mocy i energii i pełni jedynie rolę wspomagającą. Podobnie będzie w przypadku ograniczenia mocy pobieranej sieci. W rozprawie Autor proponuje usługę rezerwowego zasilania odbiorcy końcowego „w celu zapewnienia

odbiorcy końcowemu ciągłości dostaw energii elektrycznej". Proszę o wyjaśnienie co jest źródłem napięcia referencyjnego dla sieci odbiorcy przy przerwie w zasilaniu i jaką rolę pełni zasobnik w takim przypadku.

4. W analizie ekonomicznej Doktorant założył, że usługami RZOK w równym stopniu mogą być zainteresowani wszyscy odbiorcy, także odbiorcy indywidualni „*tworzący gospodarstwa jednorodzinne*”. Wydaje się, że przyjęte w pracy założenia, według których infrastruktura umożliwiająca realizację usługi (dwukierunkowy punkt ładowania) powinna z zasady być zainstalowana u odbiorcy końcowego, jak również wymagania dotyczące parametrów produktu, trudne do określenia dla odbiorców indywidualnych, będą istotnym ograniczeniem dla wykorzystania usług V2X w tej grupie odbiorców. Czy nie należy się spodziewać, że dla tych odbiorców łatwiejsze będzie zainstalowanie rezerwowego źródła zasilania, takiego jak agregat prądotwórczy? Proszę o komentarz w tej sprawie.

4. Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska mgr. inż. Krzysztofa Zagrajka w sposób kompleksowy prezentuje koncepcję funkcjonowania rynku usług V2X jako nowego obszaru rynku usług elastyczności w krajowym systemie elektroenergetycznym i stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

Sposób przedstawienia i rozwiązania problemu oraz wnikliwa analiza łącząca aspekty techniczne i ekonomiczne świadczą o szerokiej wiedzy w obszarze objętym tematem rozprawy i wskazują na umiejętność samodzielnego prowadzenia badań oraz dojrzałość naukową Autora. Osiągnięcia Doktoranta mieszczą się całkowicie w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

Rozprawę doktorską mgr inż. Krzysztofa Zagrajka oceniam wysoko, jako „wybitnie dobrą, zasługującą na wyróżnienie”. Na ocenę tę składają się: innowacyjność tematu, bogata zawartość rozprawy, skala przeprowadzonych analiz i dojrzały sposób prezentacji. Uważam, że praca z wyraźnym nadmiarem spełnia wymagania Ustawy z dnia 20.07.2018 Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dziennik Ustaw z 2018 r., poz. 1668 ze zm.) i wnoszę o dopuszczenie jej do dalszych etapów postępowania przewidzianego w przewodach doktorskich.

Jednocześnie wnioskuję o wyróżnienie rozprawy z uwagi na jej walory merytoryczne, a także aktywność badawczą i publikacyjną Doktoranta.

