



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

DZIEDZINA NAUK INŻYNIERYJNO – TECHNICZNYCH

DYSCYPLINA: automatyka, elektronika i elektrotechnika

Autoreferat rozprawy doktorskiej pt.:

***Analiza wpływu super szybkiej alokacji
infrastruktury do ładowania samochodów elektrycznych
na rozwój elektromobilności, w scenariuszu implementacji
technologii Blockchain***

Autor: **mgr inż. Anna Zielińska**

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Andrzej Bień, prof. AGH
Promotor pomocniczy: dr inż. Mikołaj Skowron

Praca wykonana:

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej
Katedra Energoelektroniki i Automatyki Systemów Przetwarzania Energii

Kraków, 2022

1. Wstęp

Elektromobilność, Smart Grid, Blockchain – to pojęcia, które od pewnego czasu na stałe wpisały się w obraz gospodarki i jak słowa klucze, cieszą się niesłabnącym zainteresowaniem w ramach dyskursu naukowego, politycznego oraz w mediach. Rozwój elektromobilności jest ściśle związany ze wzrostem liczby zarejestrowanych pojazdów elektrycznych oraz ze zwiększeniem liczby dostępnych punktów ładowania, które to łączą się z wysokimi kosztami budowy i uruchomienia infrastruktury. Oznacza to, że potrzebne jest znalezienie nowych form finansowych dla tego typu działań. Blockchain poprzez m.in. mechanizm Initial Coin Offering (ICO) idealnie wpisuje się w potrzeby rynkowe. ICO jako metoda pozyskiwania finansowania wykorzystująca m.in. tokeny daje możliwość zdobycia środków kapitałowych do budowy ładowarek. Stąd pojawia się idea znalezienia rozwiązania i mechanizmów: rozliczania procesu ładowania oraz kontroli i zarządzania w systemie Smart Grid, z użyciem elementów blockchain, kalkulacji ilości pobranej w procesie energii elektrycznej, ekonomii pracy ładowarki, oraz alternatywnego sposobu finansowania punktów ładowania pojazdów elektrycznych.

Rozprawa doktorska porusza temat możliwości wykorzystania elementów technologii Blockchain do rozwoju rynku stacji ładowania dla pojazdów elektrycznych (EV). Tekst rozprawy podejmuje problematykę zagadnienia z dyscypliny jaką jest elektrotechnika i łączy ją z elementami informatyki, ekonomii i finansów. Elektrotechnicznego wymiaru pracy nadaje aspekt dostępu do energii elektrycznej podczas procesu ładowania pojazdu elektrycznego, osadzonego w obszarze elektryfikacji transportu drogowego. Elementami ekonomii są przepływy pieniężne oraz rentowność i opłacalność szybkiej alokacji infrastruktury do ładowania pojazdów elektrycznych (rozumianej jako zwiększenie liczby punktów ładowania), która to bezpośrednio wpływa na rozwój elektromobilności. Technologia Blockchain w pracy wykorzystana jest jako element nowoczesnej informatyki która może wkraczać w obszar produkcji, dystrybucji i odbioru energii elektrycznej.

2. Teza, cel i zakres pracy

2.1. Teza pracy

Jest możliwe zastosowanie technologii Blockchain w elektroenergetyce, na potrzeby realizacji procesu ładowania pojazdu elektrycznego opartego na analizie technologicznej i finansowej, oraz obserwacji procesów ładowania pojazdów elektrycznych w obszarze „Smart Grid”.

Technologię Blockchain można zastosować do rozwiązań biznesowych wspomagających rozwój sieci punktów ładowania samochodów elektrycznych, z korzyścią dla każdego uczestnika procesu, tj. inicjatora (beneficjenta), inwestora oraz użytkownika pojazdu elektrycznego.

2.2. Cel i zakres pracy

Celem pracy jest opracowanie metody do analizy przepływu, bilansowania i rozliczeń energii elektrycznej pobranej w procesie ładowania pojazdu elektrycznego w środowisku blockchain.

Analiza wykorzystania ICO jako możliwości dla rozwoju rynku punktów ładowania oraz zbadanie zależności, wzajemnych powiązań, możliwości współistnienia dwóch środowisk: elektroenergetyki i blockchain przy rozwoju sektora elektromobilności.

Cel pracy został osiągnięty poprzez wykonanie zadań:

- opracowanie analizy systemów ładowania pojazdów elektrycznych na potrzeby implementacji technologii Blockchain,
- zbudowanie modelu matematycznego pozwalającego na rozliczanie pobranej energii elektrycznej w procesie ładowania EV,
- zdefiniowanie warunków inteligentnego kontraktu odtwarzającego sposób przepływu wszystkich środków finansowych i energii elektrycznej pobieranej w procesie ładowania.

Za najważniejsze osiągnięcia uważam:

- zbudowanie modelu matematycznego który może służyć jako odzwierciedlenie rzeczywistości przy opisywaniu przedsięwzięcia w warunkach obecnego rynku pojazdów elektrycznych,
- opracowanie modelu matematycznego dla procesów ekonomiczno-technicznych związanych z inwestycją w stację ładowania, ich sterowaniem oraz rozliczaniem pobranej energii elektrycznej,
- wykazanie możliwości wykorzystania technologii Blockchain tj. mechanizmu ICO do finansowania i rozbudowy infrastruktury stacji ładowania dla pojazdów elektrycznych,
- opracowanie koncepcji rozliczania procesu ładowania pojazdów elektrycznych z wykorzystaniem tokenów (tzw. tokenomii procesu ładowania),
- analiza wpływu różnych scenariuszy inwestycji na rozwój stacji ładowania pojazdów elektrycznych, a tym samym na rozwój elektromobilności,
- wyznaczenie warunków aplikacji służącej do analizy przepływów finansowych oraz wyznaczania zysku dla inwestora oraz beneficjenta stacji ładowania pojazdów elektrycznych.

3. Opis rozprawy

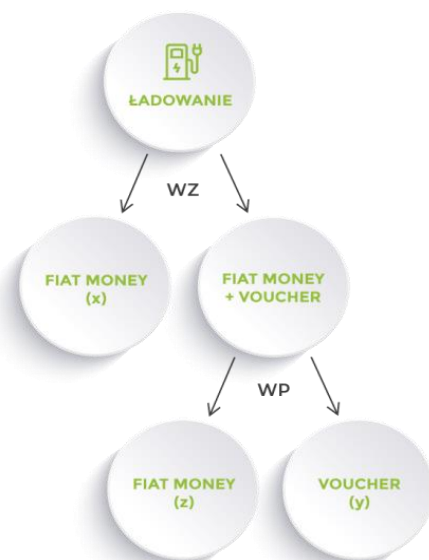
W niniejszej pracy zaprezentowany został model matematyczny służący do analizy przepływu, zapisu, bilansowania i rozliczeń energii elektrycznej pobranej w procesie ładowania pojazdu elektrycznego w środowisku blockchain. Model skupia się również na analizie wykorzystania ICO jako możliwości dla rozwoju rynku punktów ładowania oraz zbadaniu zależności, wzajemnych powiązań, możliwości współistnienia dwóch środowisk: elektroenergetyki i blockchain przy rozwoju sektora elektromobilności.

Zawartość pracy obejmuje rozdział wprowadzający, dotyczący on charakterystyki rynku pojazdów elektrycznych w Polsce. W tej części pracy na podstawie przeprowadzonej analizy, wybrano konkretne urządzenie ładujące wykorzystywane przy modelowaniu algorytmu. Kolejne rozdziały poświęcone są technologii Blockchain oraz ICO jako metodzie pozyskiwania kapitału. Rozdziały 5 i 6 to część merytoryczną pracy, w której opracowano i opisano zbudowany model matematyczny służący do rozliczania procesu ładowania EV, oraz zaprezentowano wyniki i analizę wyników pracy. W pracy znajduje się również opis predykcji rozwoju opracowanego modelu, oraz kierunki potencjalnych zastosowań. Rozprawa kończy się rozdziałem podsumowania w którym zawarto najważniejsze osiągnięcia i wnioski wynikające z pracy.

Praca ma charakter badawczo–teoretyczny. Opracowany model matematyczny, symulujący proces rozliczania energii elektrycznej w procesie ładowania, skupia się na wpływie zwiększenia liczby stacji ładowania na rozwój elektromobilności. Głównymi funkcjami modelu są:

- generowanie tokenów w ramach inwestycji z ICO,
- wykorzystanie finansowania zebrane z ICO, symulując budowę infrastruktury 800 szt. ładowarek (2x22 kW z gniazdem ładowania Typ 2) dla EV,
- realizacja procesu ładowania EV z użyciem gotówki oraz gotówki i tokenów,
- dystrybucja energii elektrycznej w procesie,
- rozliczanie ilości pobranej energii w procesie ładowania, generacja i spalanie tokenów za zakupioną ilość energii elektrycznej,
- zarządzanie przepływem tokenów,
- prowadzenie giełdy handlu tokenami dla użytkowników EV i inwestorów (założenie),
- fluktuacja ceny energii, kosztów obsługi procesu,
- pokazanie możliwych przychodów dla inwestorów z ICO i beneficjenta (inicjatora procesu).

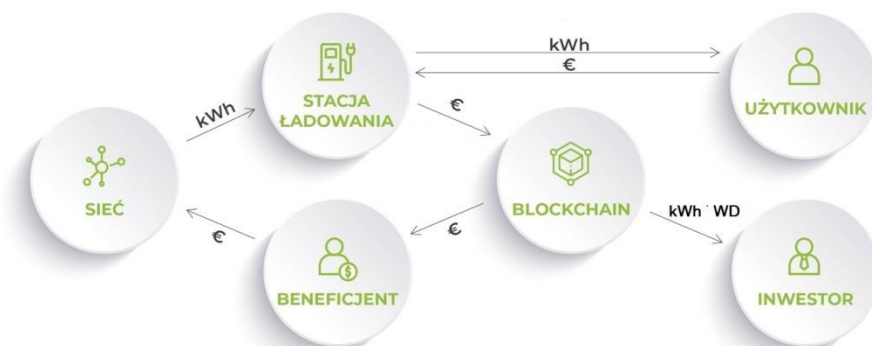
Symulowanie rozliczania procesu ładowania przebiega na dwa sposoby: a) z wykorzystaniem płatności gotówkowej (Fiat money) za pobraną ilość energii, oraz b) z wykorzystaniem płatności gotówką i voucherem (Rys.1).



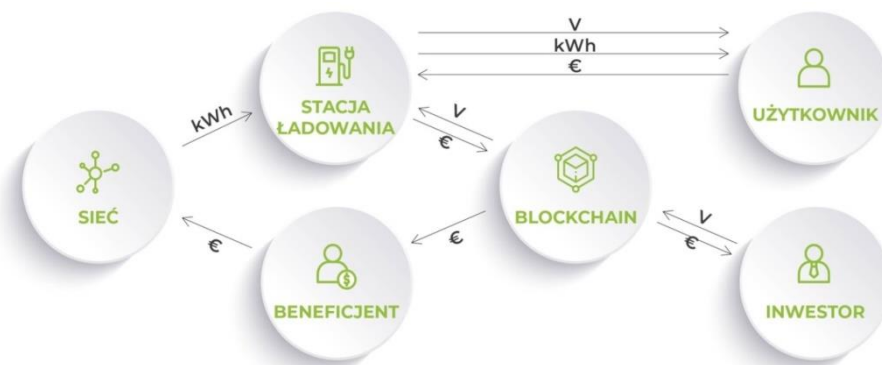
Rys.1. Specyfikę ładowania według dwóch scenariuszy a). i b).

Powstały algorytm działa w oparciu o: przepływ energii elektrycznej, przepływy finansowe i przepływ tokenów. Przepływy te nie są liniowe, działają w trzech płaszczyznach a uczestnicy modelu wzajemnie na siebie oddziałują. Wzajemne oddziaływania można zaprezentować w formie grafów (Rys.2).

a)



b)



Rys.2. Łańcuch połączeń w scenariuszu a) płatność gotówkowa (WD- współczynnik degradacji), b) płatność gotówką i voucherem (V-voucher)

Jak wspomniane było wcześniej eksplikacja modelu matematycznego opisywanego w pracy, poprzedzona została analizą sposobów ładowania pojazdów elektrycznych skutkującą wyborem odpowiedniego rozwiązania technologicznego biorącego udział w modelowaniu. Po uwzględnieniu wyników analizy, zdecydowano się na wybór do modelowania ładowarki o mocy 2x22 kW z gniazdem ładowania Typ 2, czyli urządzenia umożliwiającego dostarczenie do 44 kW mocy za pomocą dwóch przewodów spiralnych ze złączem Typu 2. Na decyzję tę, oprócz faktu powszechności wybranego rozwiązania, wpłynęły takie aspekty jak łatwa instalacja i szybkie uruchomienie, inteligentne funkcje, usługi i aktualizacje wykorzystujące Internet, zintegrowane zarządzanie obciążeniem optymalizujące proces ładowania i oszczędzanie kosztów sieciowych oraz funkcje bezpieczeństwa, takie jak czujnik prądu DC, wewnętrzny czujnik temperatury, czujnik wstrząsów, czujnik przechyłu, automatyczne zwolnienie wtyczki w przypadku awarii zasilania i in..

Opis funkcjonalności technologii Blockchain, przyczynił się do wyboru w modelowaniu metody Initial Coin Offering (ICO), czyli systemu pozyskiwania kapitału do finansowania inwestycji, oraz tokenizacji jako części systemu płatniczego za pobraną energię elektryczną. ICO w prezentowanym modelu stanowi klucz do finansowania przedsięwzięcia szybkiej rozbudowy stacji (800 szt.) do ładowania samochodów napędzanych energią elektryczną. Opisany w pracy podmiot organizujący zbiórkę przedstawia swoje plany i założenia dotyczące rozbudowy stacji do ładowani w dokumencie zwanym White Paper, będącym zarazem wzorcem umownym. Po czym odpowiada za zorganizowanie infrastruktury i zapewnienie obsługi całej inicjatywy, poprzez oparty o blockchain, smart contract (inteligentny kontrakt/umowę) — w efekcie czego program komputerowy przypisuje inwestorom określoną liczbę tokenów w zamian za kapitał. Po spełnieniu określonego warunku, tokeny dają inwestorom pewne uprawnienia w postaci np. pierwszeństwa do dóbr lub usług świadczonych przez emitenta, jak również pozwalają użytkownikom brać udział w zyskach przedsięwzięcia.

Symulując proces ładowania, wykorzystano analizą rzeczywistych danych pomiarowych ilości pobranej energii elektrycznej w procesie ładowania (12 tys. pomiarów) oraz posłużono się szeregiem założeń i wytycznych opisanych w pracy. Zaprezentowano specyfikę realizacji procesu ładowania oraz opis wspomnianych założeń i ograniczeń. Opisane zostały takie wartości jak:

- ilość pobranej energii elektrycznej w procesie ładowania,
- roczna liczba ładowań,
- współczynniki: rozwoju (WR), podziału (WZ), proporcji (WP) i degradacji (WD),
- marża, koszty stałe, cena energii elektrycznej oraz vouchera,
- liczba i system generacji tokenów.

Wynikami pracy jest pokazanie pięciu scenariuszy symulacji, które różnią się od siebie założeniami początkowymi. Spośród wszystkich opracowanych scenariuszy, wybrano jeden,

który dał możliwie najlepsze wyniki finansowe dla wszystkich stron transakcji. Dobierając założenie, starano się wybrać możliwie najbardziej obrazowe przykłady, tj.:

- Scenariusz I – ładowanie pojazdów elektrycznych odbywa się tylko za pomocą gotówki (Fiat money),
- Scenariusz II – scenariusz odwrotny do scenariusza I, czyli 100% transakcji realizowanych jest z użyciem gotówki i voucherów,
- Scenariusz III – pokazujący ekonomię przy założeniu 50% podziału między transakcjami Fiat money, a transakcjami voucher i Fiat money,
- Scenariusz IV – pokazujący analizę przy tych samych założeniach co scenariusz III, ale przy założeniu, że współczynnik degradacji (WD) i jego wpływ zostanie zniwelowany do zera, co oznacza, że tokeny dla TO będą się generować przez 15 lat, czyli cały cykl życia algorytmu,
- Scenariusz V – zakładający, że tokeny będą się generowały jednokrotnie, tylko przy starcie projektu, po czym zostaną wykupione przez Beneficjenta pod koniec trwania modelu, czyli po 15 latach.

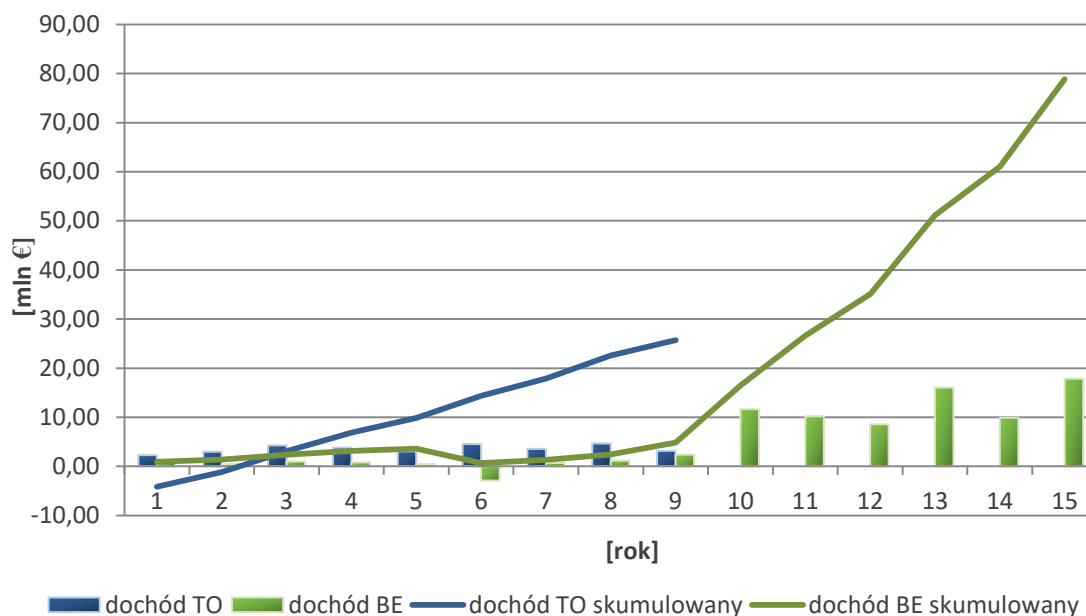
Aby zaprezentować i przeanalizować wyniki pracy, wykorzystano wskaźniki ekonomiczne. Pokazują one dochodowość inwestycji a tym samym, chęć inwestowania w rozwój infrastruktury. Do odpowiedzi na pytanie o wspomnianą dochodowość i opłacalność, posłużono się wielkościami opisującymi wartości przepływów finansowych. Skupiono się głównie na takich wskaźnikach jak NPV (ang: Net Present Value; to jest wartość bieżąca netto, wartość zaktualizowana netto) oraz IRR (ang: Internal Rate of Return; wewnętrzna stopa zwrotu).

Tab.1. Scenariusz III. Wartości zmiennych w algorytmie dla roku $t=1$

Zmienna	Symbol	Jednostka	Wartość
Cena energii elektrycznej w ładowarce dla $t1$	$C_{1(1)}$	[€/kWh]	0,45
Cena zakupu energii elektrycznej w sieci dla $t1$	$C_{2(1)}$	[€/kWh]	0,3
Cena sprzedaży vouchera dla $t1$	$C_{3(1)}$	[€/kWh]	0,36
Wzrost ceny sprzedaży energii elektryczne	Δ	[%/rr]	3
Liczba ładowarek dla $t1$	L	[szt.]	800
Liczba ładowań dla $t1$	$L_{L(1)}$	[szt.]	584 000
Kapitał początkowy	$W_{pocz.}$	[mln €]	6,4
Współczynnik rozwoju	WR	[%/rr]	5
Współczynnik degradacji dla $t1$	$WD_{(1)}$		0,8
Współczynnik podziału	WZ		0,5
Współczynnik proporcji	WP		0,5

Modelowaniem które dało najlepsze wyniki finansowe był Scenariusz III (Tab.1). Zakłada on podział procesów między a) i b) w centralnym punkcie rozkładu WZ, czyli wynoszącym 0,5. Znaczący to tyle, że połowa użytkowników pojazdów elektrycznych korzysta tylko z płatności gotówkowych, a druga połowa korzysta z Fiat money i voucher dzieląc ją również po połowie na Fiat money i voucher (tj. $WZ = 0,5$, $WP = 0$).

W tej symulacji całość tokenów generowanych podczas procesów wypalona zostaje po 9 latach i naturalnie nie występuje tu forma wykupu tzw. buyout. Wartość wewnętrznej stopy zwrotu dla 9-letniej inwestycji dla właścicieli tokenów (inwestorów) wynosi 48%, a NPV jest równe 13,6 mln Euro. To ponad dwukrotność wkładu na inwestycję, a dziewięć lat to stosunkowo dobry czas jeśli chodzi o elastyczność w sprzedaży tokenów. Wyniki finansowe dla właściciela systemu cash flow (beneficjent) również wydają się być mocno zadowalające, pomimo że w roku szóstym, kiedy zakładana jest modernizacja całej infrastruktury na nową (co oczywiście nie musi się zadziać w jednej chwili i za gotówkę) pojawia się ujemny przepływ o wartości 3 mln Euro, to w perspektywie całych 15 lat inwestycji Beneficjent wypracowuje NPV równe 55 mln Euro (stopa dyskonta 3%), przy zerowej inwestycji (wartość IRR dąży do nieskończoności). Widać to również na wykresie (Rys.3.) gdzie poziom dochodów skumulowanych beneficjenta wynosi ok. 78 mln € (Rys.3). Oczywiście więc jest, że zadowolenie uczestników modelu (zwanymi aktorami) i perspektywa zysków z prezentowanego scenariusza pozytywnie wpływa na decyzyjność wejścia w ICO. Przy takich założeniach i wynikach symulacji można upatrywać utworzenie nowych miejsc infrastruktury do ładowania pojazdów elektrycznych, skutkujących tym samym wzrostem liczby samochodów elektrycznych co pozytywnie przekłada się na rozwoju elektromobilności.



Rys.3. Skumulowany dochód Beneficjenta (BE) i Inwestora (TO) dla symulacji Scenariusz III

4. Podsumowanie

Wymagania kapitałowe do stworzenia sieci ładowarek obsługiwanych przez prezentowany w pracy model, wykorzystujący technologię Blockchain bez wątpienia są bardzo duże. Dlatego też, rozwijanie sieci dzięki systemowi Initial Coin Offering wydaje się jednym z lepszych sposobów finansowania tego typu przedsięwzięcia. Na przewagę tego rozwiązania wpływa aspekt ekonomiczny, związany z ryzykiem inwestycji względem innych instrumentów finansowych. Dlatego że nie wiemy jak szybko, z jaką dynamiką i intensywnością będzie następować elektryfikacja transportu. Dla funduszy inwestycyjnych, infrastrukturalnych czy banków inwestycyjnych brak jest możliwości akceptacji ryzyka którego nie da się oszacować, co dosłownie eliminuje możliwość pozyskania funduszy na realizację tego typu projektów jak rozbudowa sieci ładowarek dla EV. Wykorzystanie więc mechanizmu ICO daje więc większą możliwość i przewagę na skokowe zwiększenie liczby ładowarek a tym samym pozwala stwierdzić, że zniwelowanie ograniczenia jakim jest mała liczba stacji ładowania, pozytywnie przyczyni się do skokowego wzrostu liczby pojazdów elektrycznych.

Podsumowując pracę wysnuto wnioski, że opracowany model matematyczny może służyć jako odzwierciedlenie rzeczywistości przy opisywaniu przedsięwzięcia w warunkach obecnego rynku pojazdów elektrycznych. Za sprawą zawartych w silniku modelu rzeczywistych danych pomiarowych procesu ładowania, może być wykorzystany do symulacji rozliczania ładowania pojazdu elektrycznego przy implementacji elementów protokołu blockchain. Opisane warunki inteligentnego kontraktu odtwarzają rzeczywistość i sposób przepływu wszystkich środków finansowych i energii elektrycznej pobieranej w procesie. W rozprawie podkreślony jest więc fakt, że opisane wyniki modelowania procesu ładowania, mogą być przyczynkiem do pozyskiwania kapitału do uruchomienia modelu w rzeczywistości, gdzie inwestorem może być dowolny podmiot prawny lub prywatny. Pozyskanie kapitału to jedno z realnych wyzwań przy rozwijaniu projektu, dlatego też zaproszenie do udziału w biznesie, niekiedy jest jedynym sposobem jego realizacji. Możliwość pozyskania kapitału w ramach ICO jest niebywałym walorem przedsięwzięcia, a zapis wpłat i rozliczeń na blockchain gwarantem bezpieczeństwa i wypłacalności.

W pracy pokazano również, że wykorzystanie wskaźników finansowych jakimi są NVP i IRR jest odzwierciedleniem opłacalności stron algorytmu do uczestnictwa w inwestycji budowania stacji ładowania dla EV. Wraz z wyższymi wartościami wskaźników finansowych można zakładać większą chęć do inwestycji w budowę infrastruktury a tym samym wzrostem liczby samochodów elektrycznych. Wyniki pokazują, że proponowany model rozliczania procesu ładowania jest wysoce atrakcyjny finansowo i godny uwagi potencjalnych inwestorów projektu.

Reasumując, w pracy wskazano, że cele pracy zostały osiągnięte a postawiona teza udowodniona. Dzięki posiadanej przez model funkcji aplikacyjnej, może on odzwierciedlić warunki rzeczywiste sektora elektromobilności i energii elektrycznej, przez co kolejnym etapem planowanych prac naukowych jest chęć przeniesienia modelu do innego środowiska

programistycznego, prowadzenie dalszych symulacji oraz analiza przepływów finansowych w modelach o różnych założeniach jak również w różnych technologiach.

Wykaz dziesięciu ważniejszych publikacji doktoranta:

1. A. Zielińska, „Bezpieczeństwo współpracy instalacji fotowoltaicznej z siecią elektroenergetyczną”, *Biuletyn Techniczny Oddziału Krakowskiego Stowarzyszenia Elektryków Polskich*, nr. 1, s. 32-37, 2017.
2. A. Zielińska, A. Bień, „Analiza prawna i ekonomiczna efektywności eksploatacji mikroinstalacji fotowoltaicznej”, *Wiadomości Elektrotechniczne : miesięcznik naukowo-techniczny Stowarzyszenia Elektryków Polskich*, nr 8, s. 12–16, 2018.
3. A. Zielińska, M. Skowron, i A. Bień, “Modelling of photovoltaic cells in variable conditions of temperature and intensity of solar insolation as a method of mapping the operation of the installation in real conditions”, *I2PhDW 2018 : 8th International Interdisciplinary PhD Workshop*, Świnoujście, Poland, m. 2018, s. 28–299.
4. A. Zielińska, M. Skowron, i A. Bień, „Cooperation of the Process of Charging the Electric Vehicle With the Photovoltaic Cell”, *Applications of Electromagnetics in Modern Techniques and Medicine (PTZE)*, Raclawice, Poland, wrz. 2018, s. 285–288. doi: 10.1109/PTZE.2018.8503159.
5. A. Zielińska, „Charging infrastructure and testing of the electric vehicle energy battery decline”, *Przegląd Elektrotechniczny*, t. 1, nr 1, s. 151–154, sty. 2019, doi: 10.15199/48.2019.01.38.
6. A. Zielińska, M. Skowron, i A. Bień, „The concept of the blockchain technology model use to settle the charging process of an electric vehicle”, w *2019 Applications of Electromagnetics in Modern Engineering and Medicine (PTZE)*, Janow Podlaski, Poland, cze. 2019, s. 271–274. doi: 10.23919/PTZE.2019.8781739.
7. A. Zielińska, „Model for settlement electric vehicles charging and financing infrastructure for charging them with the support of blockchain environment”, *Przegląd Elektrotechniczny*, t. 1, nr 12, s. 239–243, grudz. 2019, doi: 10.15199/48.2019.12.54.
8. A. Zielińska, „Application possibilities of blockchain technology in the energy sector”, *E3S Web Conf.*, t. 154, s. 07003, 2020, doi: 10.1051/e3sconf/202015407003.
9. A. Zielińska, „Electromobility research: the impact of using renewable energy solutions on the development of electromobility”, *Przegląd Elektrotechniczny*, t. 1, nr 12, s. 125–128, grudz. 2020, doi: 10.15199/48.2020.12.24.
10. A. Zielińska, „Possibilities of using blockchain technology in the area of electricity trade settlements”, *Przegląd Elektrotechniczny*, t. 1, nr 12, s. 159–162, grudz. 2021, doi: 10.15199/48.2021.12.32.