

AUTOREFERAT

opis kariery zawodowej oraz istotnej aktywności naukowej

Magdeburg / Wrocław

1. Imię i Nazwisko

Przemysław Komarnicki

2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytuł rozprawy doktorskiej

1. Magister inżynier. Kierunek: Elektrotechnika. Wydział Elektryczny, Politechnika Wrocławska, Wrocław, Polska, 2004 (Program Podwójny Dyplom).
2. Master of Science. Kierunek: Systemy elektroenergetyczne. Wydział Elektrotechnika i Techniki Informacyjne, Uniwersytet Otto-von-Guericke, Magdeburg, Niemcy, 2004 (Program Podwójny Dyplom).
3. Doktor nauk technicznych w dyscyplinie Elektrotechnika, specjalność Sieci elektroenergetyczne; stopień nadany uchwałą Rady Wydziału Elektrotechniki i Technik Informacyjnych Uniwersytetu Otto-von-Guericke, Magdeburg, Niemcy z dnia 17 grudnia 2007; tytuł rozprawy: *Zastosowanie pomiarów synchronicznych w celu usprawnienia pracy sieci dystrybucyjnych*; promotor: dr hab. inż. Zbigniew Antoni Styczynski, prof. OvGU Magdeburg.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

- Od 01.05.2004 do 31.05.2008 – pracownik naukowy w Instytucie Fraunhofera IFF (Fraunhofer Institute for Factory Operation and Automation IFF, Magdeburg, Niemcy).
- Od 01.06.2008 do 31.01.2018 – kierownik projektów oraz lider zespołu w Departamencie Procesów i Urządzeń Technicznych w Instytucie Fraunhofera IFF, Magdeburg, Niemcy.
- Od 01.04.2008 do 31.01.2018 – wykładowca na Uniwersytecie Otto-von-Guericke, Magdeburg, Niemcy, prowadzenie wykładów dla kursów Elektromobilność, SmartGrid oraz Odnawialne źródła energii.
- Od 01.04.2012 do 31.12.2016 – zastępca dyrektora w Centrum Kompetencji dla Sieci Energetycznych i Systemów Energii Odnawialnej w Instytucie Fraunhofera IFF oraz Uniwersytecie Otto-von-Guericke, Magdeburg, Niemcy.
- Od 01.07.2012 do 31.12.2016 – zastępca dyrektora Departamentu Procesów i Urządzeń Technicznych w Instytucie Fraunhofera IFF w Magdeburgu, Niemcy.
- Od 01.01.2017 – dyrektor Departamentu Systemy i Infrastruktury Energetyczne w Instytucie Fraunhofera IFF, Magdeburg, Niemcy.
- Od 01.04.2018 do 31.12.2022 – prezes zarządu w Zentrum für Regenerative Energien Sachsen Anhalt, ZERE e.V. (Centrum Energii Odnawialnych Saksonii-Anhalt, ZERE e.V. Magdeburg, Niemcy).
- Od 01.03.2018 – profesor inżynierii urządzeń i systemów elektroenergetycznych na Wydziale Inżynierii i Wzornictwa Przemysłowego, Hochschule Magdeburg Stendal (University of Applied Science), Magdeburg, Niemcy, powołanie na stanowisko profesora w imieniu Landu Sachsen-Anhalt w ramach dożywotniego mianowania na urzędnika służby cywilnej.
- Od 01.10.2021 – profesor uczelni na Wydziale Elektrycznym, Politechnika Wrocławska, w niepełnym wymiarze czasu pracy.

- 4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.). Omówienie to winno dotyczyć merytorycznego ujęcia przedmiotowych osiągnięć, jak i w sposób precyzyjny określać indywidualny wkład w ich powstanie, w przypadku, gdy dane osiągnięcie jest dziełem współautorskim, z uwzględnieniem możliwości wskazywania dorobku z okresu całej kariery zawodowej:**

3 monografie naukowe, zgodnie z art. 219 ust. 1. pkt 2a ustawy oraz cykl powiązanych tematycznie 4 artykułów naukowych, zgodnie z art. 219 ust. 1. pkt 2b ustawy.

4a) tytuł osiągnięcia naukowego

„Modele i optymalna integracja mobilnych i stacjonarnych zasobników energii z siecią elektroenergetyczną”.

4b) monografie, publikacje i inne prace wchodzące w skład osiągnięcia naukowego (po uzyskaniu stopnia doktora)

Monografie naukowe, zgodnie z art. 219 ust. 1. pkt 2a ustawy

[A1] Komarnicki, P.; Lombardi, P.; Styczynski, Z. Electric energy storage systems: Flexibility options for smart grids (2017) Electric Energy Storage Systems: Flexibility Options for Smart Grids, pp. 1-211. Cytowania SCOPUS: 39. Punktacja MNiSW: 80.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu trójwarstwowego modelu matematycznego zasobników energii ze szczególnym uwzględnieniem warstwy fizycznej (powiązania parametrów fizycznych w jednym modelu) oraz interfejsu sprzężenia do warstwy wewnętrznej BMS (system zarządzania zasobnikiem) i zewnętrznej, w tym sieci elektroenergetycznej. Opracowałem wielowariantowe symulacje testowe dla metody optymalnego wymiarowania i doboru zasobników energii elektrycznej. Zaproponowałem i przedstawiłem zastosowania magazynów dla układów sieci izolowanych, w tym zaprojektowałem metodykę optymalizacji opartą na iteracyjnej analizie krzywych obciążeń w węzłach sieci, jak również metodykę wyznaczania wartości funkcji kosztów bazującej na wielokryterialnym wyborze optimum dla ekonomicznej, środowiskowej i technicznej funkcji celu. W rozdziale dotyczącym elektromobilności przedstawiłem opracowane interfejsy oraz protokoły komunikacyjne, w tym zaproponowałem koncept modeli danych, wymaganych oraz dodatkowych parametrów poszczególnych procesów jako elementu niezbędnego do niezawodnej integracji pojazdów elektrycznych z siecią. W części dotyczącej planowania przedstawiłem metodologię, opracowałem model symulacyjnej sieci i dokonałem analizy wyników dla niezawodności sieci elektrycznej z zasobnikami energii bazującej na wyznaczaniu ścieżki krytycznej dostaw energii. Byłem odpowiedzialny za opracowanie rozdziałów 2, 6 i 8, a w ramach innych rozdziałów opracowałem niektóre fragmenty. Przygotowałem koncepcję merytoryczną książki z uwzględnieniem ustrukturyzowanej metodologii dla zastosowania modeli zasobników energii. Mój udział w tej publikacji szacuję na 50%.

[A2] Komarnicki, P.; Haubrock, J.; Styczynski, Z. Elektromobilität und Sektorenkopplung - Infrastruktur- und Systemkomponenten. 2. Auflage, Hardcover ISBN 978-3-662-62035-9, Springer Verlag, 2018 wydanie I i 2020 wydanie II. Cytowania SCOPUS: 13. Punktacja MNiSW: 80.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu modelu samochodu elektrycznego jako odbiornika energii ze szczególnym uwzględnieniem roli akumulatorowych zasobników energii (AZaE) wykorzystywanych do jego napędu, opracowaniu koncepcji standardowej stacji ładowania z uwzględnieniem wymagań elektrycznych, informatycznych i mechanicznych. Opracowałem architekturę łańcucha systemu elektromobilności, jak i interfejsów komunikacyjno-informacyjnych poszczególnych elementów, opracowałem modele wymiany danych wewnętrznego protokołu samochodu wykorzystującego dane protokołu CAN z otoczeniem, w tym wypadku siecią elektryczną poprzez stacje ładowania oraz bezpośrednio z użytkownikiem końcowym za pomocą protokołów IEC 61851, ISO/IEC 15118 oraz IEC 61850. Architekturę systemu elektromobilności opracowałem metodą tzw. usecase, czyli definiowania przypadku i sekwencji możliwych zastosowań. Determinując pochodną tych przypadków wyznaczyłem parametry i dane, a także możliwe ścieżki komunikacji w celu zapewnienia niezawodnej realizacji danej sekwencji. Opracowane przeze mnie interfejsy zostały poddane optymalizacji poprzez mapowanie danych poszczególnych interfejsów oraz opracowanie tzw. zbioru parametrów wspólnych oraz ich sposobu konwersji poprzez poszczególne elementy układu elektromobilności. Opracowałem programy obliczeniowe do optymalizacji użytkownika AZaE wykorzystujące zamodelowane przeze mnie układy zastępcze w celu usprawnienia pracy centrali zarządzania systemem elektromobilności. Dokonałem analizy uwarunkowań, opracowałem koncepcję i wielowątkowe scenariusze testowania i oceny poszczególnych elementów, jak i całego systemu elektromobilności. Współpracowałem przy implementacji 10-ciu stacji ładowania oraz integracji 10-ciu pojazdów elektrycznych. Koordynowałem rozwój i współpracowałem w implementacji aplikacji centralnego zarządzania stacjami ładowania jak i pojazdami elektrycznymi oraz indywidualnymi aplikacjami przeznaczonymi na telefony komórkowe użytkowników pojazdów na podstawie zaprojektowanej przeze mnie architektury systemu. Zaprojektowane przeze mnie pilotażowe wdrożenia pozwoliły zebrać mi dane pomiarowe z szeregu eksperymentów i badań. Dokonana analiza wyników pomiarów i badań którą wykonałem, potwierdziły słuszność przyjętych koncepcji i modeli oraz dały podstawy do opracowania i wdrożenia zmian w normach i przepisach technicznych przez gremia, których byłem członkiem. Byłem odpowiedzialny za opracowanie rozdziałów 4 i 5 książki, a w ramach innych rozdziałów opracowałem wybrane fragmenty, przygotowałem koncepcję merytoryczną książki z uwzględnieniem systemowego podejścia do elektromobilności. Mój udział w tej publikacji szacuję na 60%.

[A3] Komarnicki, P.; Kranhold, M.; Styczynski, Z. Sector Coupling - Energy-Sustainable Economy of the Future: Fundamentals, Model and Planning Example of a General Energy System (GES). ISBN: 978-3-658-38110-3, Springer Verlag, 2022. Punktacja MNiSW: 80.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu koncepcji systemu dotyczącego łączenia poszczególnych sektorów w kontekście dalszego rozwoju sieci elektrycznych, jako centralnego elementu całościowego systemu energetycznego (GES – General Energy System). Do metodycznego opisu GES posłużyłem się zaprojektowanym modelem węzła energetycznego (Energy Hub), który zakłada multimedialne połączenie źródeł i odbiorców energii w każdym węźle sieci. Opracowałem koncepcję rozwinięcia do modelu MES (Multimedia Energy System) uwzględniającego różne formy energii i różnego rodzaju

odbiorców, producentów oraz zasobniki energii. Dokonałem analiz dla wybranych przykładów, ze szczególnym uwzględnieniem procesów optymalizacji przy zastosowaniu następujących metod: metoda scenariuszy, metoda programowania dynamicznego wg. Bellmana i metoda całkowito-liczbowego programowania liniowego (MILP). Opracowałem metody nowego, elastycznego po względem energetycznym, kształtowania procesów technologicznych (w różnych zakładach produkcyjnych, z wykorzystaniem metodologii flex-grafów). Opracowałem koncepcję transformacji procesów technologicznych oraz modeli danych sprzęgających procesy oraz sektory, które są niezbędne do parametryzacji modeli węzłów energetycznych w zaprojektowanym modelu Energy Hub. Opracowanie zaproponowanych przeze mnie modeli odbywało się metodą blackbox pierwszego i drugiego stopnia. Opracowałem również przegląd aktualnych działań w tym zakresie na świecie, a w szczególności opisałem adekwatną metodykę w procesie organizacji rynku energii. Byłem odpowiedzialny za opracowanie rozdziałów II, III, IV i VII, a w ramach innych rozdziałów opracowałem wybrane fragmenty. Mój udział w tej publikacji szacuję na 60%.

Cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych, zgodnie z art. 219 ust. 1. pkt 2b ustawy

[A4] Komarnicki, P. Energy storage systems: power grid and energy market use cases, Archives of Electrical Engineering, vol. 65(3), pp. 495-511, 2016. Liczba cytowań SCOPUS: 32. Liczba cytowań WoS: 27. Artykuł indeksowany w bazach: Web of Science, Scopus. Punkty MNiSW = 100.

W pracy przedstawiłem opracowaną przeze mnie metodologię optymalnego wymiarowania i doboru magazynu energii przy iteracyjnym uwzględnieniu warunków przepływu energii bazującym na analizie krzywej obciążenia/zasilania, możliwości technologicznych spełniających optymalnie wymogi techniczne oraz ocenie parametrów ekonomicznych rozwiązań (zdyskontowane koszty zasobnika). Zaproponowałem dodanie oceny wrażliwości kosztów w stosunku do stopnia użytkowania magazynu, która została zrealizowana jako metoda za pomocą zaprojektowanego i zaimplementowanego programu obliczeniowego. Dokonałem analizy skuteczności opracowanej metody doboru wielkości magazynu energii oraz zamodelowanych algorytmów optymalnego sterowania magazynem dzięki przeprowadzonym przeze mnie pomiarom na zainstalowanym magazynie energii (1MW, 0,5 MWh) przy farmie fotowoltaicznej (140 MWp). W ramach badań opracowałem scenariusze testowania oraz opracowałem kryteria oceny. Dokonałem analizy wyników, które potwierdziły słuszność zaproponowanych przeze mnie metod i rozwiązań. Opracowałem katalog i omówiłem potencjalne nowe przypadki użytkowania i zbiór scenariuszy eksploatacji dla systemów magazynowania energii w inteligentnych sieciach ze względów technicznych jak również ekonomicznych, w tym scenariusze dla możliwych uczestników rynku energii. Dokonałem przeglądu literatury dotyczącej różnego rodzaju technologii magazynowania energii, gdzie opisano ich parametry i właściwości techniczne. Mój udział w tej publikacji wynosi 100%.

[A5] Komarnicki, P.; Wenge, C.; Pietracho, R. Electromobility - integration of electric vehicles with the power grid infrastructure. Przegląd Elektrotechniczny, 96(5), pp. 1-13, 2020. Liczba cytowań SCOPUS: 3. Liczba cytowań WoS: 3. Artykuł indeksowany w bazach: Web of Science, Scopus. Punktacja MNiSW: 70.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu zintegrowanego i wielopoziomowego konceptu wymiany danych i informacji dla inteligentnego systemu elektromobilności przy uwzględnieniu poszczególnych elementów: pojazd – stacja ładowania – sieć, jak i funkcji pomiarowej, sterującej i zabezpieczającej. Opracowałem metodę optymalnego rozmieszczenia i doboru infrastruktury ładowania dla danego rozmiaru floty pojazdów bazującej na wielokryterialnym wyborze parametrów technicznych (instalacja/technologia) oraz ekonomicznych (opłaty za przyłączenie, ilość zużytej energii). Dokonałem analizy możliwości wykorzystania pojazdów elektrycznych do realizacji usług sieciowych wraz z rozwiązaniami wdrożeniowymi w ramach rozbudowy sieci elektroenergetycznej. Dokonałem analizy dostępnych możliwości technicznych pojazdów elektrycznych, w tym poszczególnych ich komponentów (silniki, energoelektronika, baterie), jak również dostępne technologie ładowania i aktualnie stosowane złącza zasilania pojazdów elektrycznych. Przeprowadziłem również analizę literatury i opracowałem koncepcję artykułu. Współredagowałem artykuł – przygotowałem oryginalną wersję roboczą. Mój udział w tej publikacji szacuję na 80%.

[A6] Pelzer, A.; Lombardi, P.; Arendarski, B.; Komarnicki, P. An innovative energy management system for the integration of volatile energy into industrial processes (2016) International Journal of Energy Production and Management, 1 (4), pp. 339-348. Cytowania SCOPUS: 6. Punktacja MNiSW: 20.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu metody doboru magazynu energii dopasowanego technologicznie do potrzeb i procesów przedsiębiorstwa, która bazuje na wielokryterialnej optymalizacji. Przyjęta funkcja celu ma za zadanie minimalizację wartości mocy znamionowej oraz pojemności magazynu, a co za tym idzie - minimalizację kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych. Opracowałem architekturę inteligentnego EMS (Energy Management System) wraz z interfejsami komunikacyjnymi elementów systemu, w tym magazynów, obciążeni oraz generacji, opracowałem koncepcję modeli informacyjnych i bazy danych korzystając z metody modelowania za pomocą use cases i diagramów sekwencyjnych, wykonałem obliczenia dla przedstawionego w artykule układu OZE – zakład przemysłowy – magazyn, współpracowałem w sformułowaniu wniosków i redakcji tekstu. Mój udział w tej publikacji szacuję na 50%.

[A7] Richter, M.; Komarnicki, P.; Hauer, I. Improving state estimation in smart distribution grid using synchrophasor technology: A comparison study (2018) Archives of Electrical Engineering, 67 (3), pp. 469-483. Liczba cytowań SCOPUS: 6. Liczba cytowań WoS: 4. Artykuł indeksowany w bazach: Web of Science, Scopus. Punkty MNiSW = 100.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu algorytmu optymalnego rozmieszczenia urządzeń do pomiarów synchronicznych bazujący na zdekomponowanej analizie przepływu mocy metodą Newtona-Raphsona i iteracyjnej analizie wrażliwości poszczególnych punktów instalacji PMU w celu realizacji pełnej obserwowalności dynamicznej sieci elektrycznej z dużym udziałem OZE i magazynów energii, przy

minimalnych, niezbędnych kosztach instalacyjnych. Zaproponowałem nastawy dla urządzeń PMU i opracowałem koncepcję transmisji i przesyłu danych do systemu SCADA. Współpracowałem w pilotażowej instalacji, składającej się z 10-ciu urządzeń PMU wraz z zaprojektowaną przeze mnie bazą danych dla sieci 110 kV. Ponadto opracowałem model symulacyjny fragmentu sieci i zaproponowałem wielowariantowe scenariusze do symulacyjnego testowania algorytmu. Współpracowałem w sformułowaniu wniosków i redakcji tekstu. Mój udział w tej publikacji szacuję na 60%.

Łączna ilość punktów MNiSW dla przedstawianych monografii i cyklu publikacji wynosi 530 punktów.

Artykuły naukowe wspomagające niewchodzące w skład osiągnięcia habilitacyjnego

[B1] Winkler, T.; Komarnicki, P.; Mueller, G.; Heideck, G.; Heuer, M.; Styczynski, Z.A. Electric vehicle charging stations in Magdeburg (2009) 5th IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC '09, art. no. 5289871, pp. 60-65. Cytowania SCOPUS: 52. Punktacja MNiSW: 5.

[B2] Lipiec, K.; Komarnicki, P. Modeling storage characteristics of electric vehicles in the grid (2010) 2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2010, art. no. 5729107. Cytowania SCOPUS: 3. Punktacja MNiSW: 5.

[B3] Geske, M.; Komarnicki, P.; Stötzer, M.; Styczynski, Z.A. Modeling and simulation of electric car penetration in the distribution power system Case study (2010) Proceedings - International Symposium: Modern Electric Power Systems, MEPS'10, art. no. 6007188. Cytowania SCOPUS: 16. Punktacja MNiSW: 5.

[B4] Wenge, C.; Stötzer, M.; Winkler, T.; Komarnicki, P. Power Quality Measurements of Electric Vehicles in the Low Voltage Power Grid. EPQU 11 International Conference, Lissabon, Portugal, ISBN: 978-1-4673-0379-8, October 2011. Cytowania SCOPUS: 13. Punktacja MNiSW: 5.

[B5] Stötzer, M.; Komarnicki, P.; Styczynski, Z. A.; Belmans, R.; Driesen, J.; Hansen, A. B.; Lopes, J. P.; Hatzigiorgiou, N. Challenges and barriers of integrating e-cars into a grid with a high penetration of renewable generation, in 44th CIGRE Session Papers, Paris, France, August 2012. Cytowania SCOPUS: 5. Punktacja MNiSW: 5.

[B6] Wenge, C.; Pietracho, R.; Balischewski, S.; Arendarski, B.; Lombardi, P.; Komarnicki, P.; Kasprzyk, L. Multi usage applications of li-ion battery storage in a large photovoltaic plant: A practical experience (2020) Energies, 13 (18), art. no. 4590. Cytowania SCOPUS: 12. Punktacja MNiSW: 140. IF: 3.004.

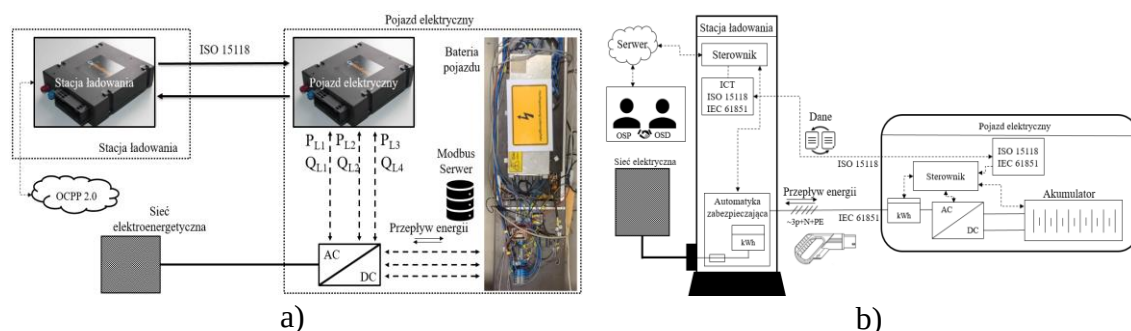
[B7] Pietracho, R.; Wenge, C.; Balischewski, S.; Lombardi, P.; Komarnicki, P.; Kasprzyk, L.; Burzyński, D. Potential of using medium electric vehicle fleet in a commercial enterprise transport in germany on the basis of real-world gps data (2021) Energies, 14 (17), art. no. 5327. Cytowania SCOPUS: 5. Punktacja MNiSW: 140. IF: 3.252.

[B8] Hallmann, M.; Wenge, C.; Komarnicki, P.; Balischewski, S. Methods for lithium-based battery energy storage SOC estimation. Part I: Overview (2022) Archives of Electrical Engineering, 71 (1), pp. 139-157. Cytowania SCOPUS: 1. Punktacja MNiSW: 100.

Baza laboratoryjno-badawcza - niewchodząca w skład osiągnięcia habilitacyjnego

Stanowisko badawcze nr 1 – laboratorium elektromobilności i infrastruktury ładowania pojazdów elektrycznych

Laboratorium mobilności i infrastruktury ładowania pojazdów elektrycznych zacząłem tworzyć w instytucie IFF Fraunhofera w roku 2009. Laboratorium to rozszerzono sukcesywnie do 5-ciu pojazdów elektrycznych, które dysponują różnym zasięgiem i pojemnością akumulatorów (50-200 km, 5-33 kWh), w tym technologii ich wykonania (ołowiane, żelowe, NaS oraz litowo-jonowe). Laboratorium składa się również z 7 stacji ładowania (5 prototypów skonstruowanych przez zespół autora wniosku i 2 komercyjnych stacji ładowania), centrali sterowania i zarządzania systemem elektromobilności. Stanowisko testowe składa się z dwóch niezależnych układów/interfejsów elektrycznego oraz komunikacyjnego (patrz rysunek 1) i umożliwia testowanie pojedynczych elementów, jak i pełnych systemów elektromobilności (pojazd, energoelektronika, stacja ładowania, integracja do sieci elektrycznej). Stanowisko to zostało zaprojektowane przeze mnie i jest wykorzystywane zarówno na potrzebę nauczania studentów oraz w celu realizacji badań naukowych. Badania naukowe, opisane w części c4 autoreferatu dotyczące zrealizowanych projektów naukowo-badawczych, koncentrują się na opracowaniu nowych interfejsów i algorytmów dla dynamicznego zarządzania obciążeniem/generacją i zarządzaniu infrastrukturą ładowania, a także z związanymi tym technologiami informacyjnymi i komunikacyjnymi. Układ obejmował badanie poszczególnych komponentów, jak również całego badanego systemu.



Rysunek 1. Schemat elektryczny a) i informacyjno-komunikacyjny b) stanowiska nr 1.

Energy Operation Center (EOC) - środowisko programowania i rozwoju aplikacji oraz funkcjonalności dla elektromobilności w systemie SPECTRUM 5 firmy Siemens

Rosnąca dynamika systemów energetycznych wymaga precyzyjnej wiedzy o aktualnym stanie systemu. Jest to warunek konieczny do zainicjowania skutecznych środków zaradczych, jak i zapobiegawczych. W tym zakresie środowisko rozwojowe EOC (rysunek 2), które zostało zaprojektowane przez autora wniosku, użytkowane jest do rozwoju i testowania koncepcji oraz opracowywania mechanizmów monitorowania, zarządzania oraz prognozy stanu inteligentnych sieci wraz z ich elementami składowymi jak OZE, magazyny energii, stacje ładowania i pojazdy elektryczne. EOC zawiera podzespoły i elementy takie jak centrum dyspozytorskie sieci i operatora dystrybucyjnego na bazie SPECTRUM 5 firmy Siemens, centrum operacyjne E-Car do monitorowania i kontroli infrastruktury ładowania pojazdów, symulator punktów ładowania do emulacji wielu jednostek i grup ładujących poprzez OCPP 1.6 oraz system symulacji w czasie rzeczywistym sieci energetycznych z funkcją hardware-in-the-loop, z obsługą protokołów

IEC 60870-5-104 i C37.118, które użytkowane są do dalszego rozwoju funkcjonalności dla różnych aspektów i elementów systemu elektroenergetycznego. EOC było i jest wykorzystane w wielu projektach naukowo-badawczych, patrz część 4d autoreferatu.



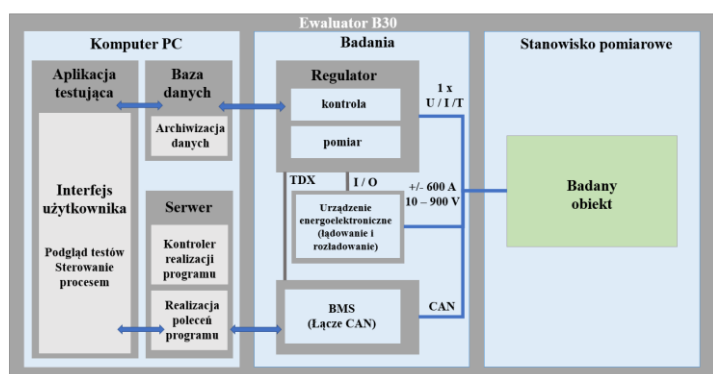
Rysunek 2. Widok na centralny system monitoringu i sterowania EOC.

Zaprojektowano i opracowano na nim wiele aplikacji w zakresie elektromobilności, m.in. dynamiczne zarządzanie obciążeniami E-Car OC dla grup jednostek ładujących z zewnętrznymi wartościami zadanymi w Spectrum Power 5 (automatyczna konfiguracja i parametryzowanie systemu), Open Charging Station Simulator (OCSS) – tworzenie wirtualnych stacji ładowania i symulowanie ich na potrzeby sesji demonstracyjnych i testowych E-Car OC, jak i zaprojektowanie symulatora stacji ładowania OCPP (OCSS).

Stanowisko badawcze nr 2 - układ do testowania akumulatorów oraz mobilnych magazynów energii

Laboratorium zorganizowałem w 2012 roku na terenie Instytutu IFF organizacji Fraunhofera w Magdeburgu, a w 2018 roku (po powołaniu mnie na stanowisko profesora) przeniesione ono zostało do University for Applied Science Magdeburg-Stendal.

W skład tego laboratorium, które zaprojektowałem oraz przy współpracy z moim zespołem badawczym zintegrowałem, wchodzi stanowiska badawcze dla różnego rodzaju akumulatorów wyposażone w elektroniczny, programowalny układ obciążeniowy, układy pomiarowe (jak sondy, mierniki i rejestratory) oraz 3 systemy akumulatorowego magazynowania energii jako systemy testowe o pojemności 25 kWh, 27 kWh oraz 478 kWh. Laboratorium to zapewnia środowisko techniczne dla procedur testowych różnego rodzaju akumulatorów. Składa się ono z pomieszczenia kontrolnego, w którym znajdują się urządzenia teleinformatyczne i elektronika zasilająca (zakres regulacji napięcia 10 V do 900 V, prądu od 1 A do 600 A, maksymalna moc po stronie DC 200 kW), oraz z izolowanego i ekranowanego kontenera testowego. Kontener testowy zapewnia zasilanie i połączenia pomiarowe dla DUT (device under the test) oraz bezpieczne środowisko dla DUT, patrz schemat blokowy – rysunek 3. Stanowisko testowe umożliwia porównanie, ocenę i optymalizację modułów akumulatorowych, pakietów i elementów układów wraz z elektroniką dużej mocy, jak również symulację różnych wymagań dla mobilnych i stacjonarnych rozwiązań. Stanowisko to było wykorzystane w wielu projektach naukowo-badawczych, patrz opis w części 4d autoreferatu. W celu oceny właściwości testowanego akumulatora wykonywane są standardowe procedury testowe, przy czym istnieje możliwość implementacji i realizacji testów niestandardowych, które były przeze mnie opracowane i implementowane w ramach projektów przemysłowych z uwzględnieniem konkretnych wymagań zleconodawcy.



Rysunek 3. Schemat blokowy laboratorium do testów akumulatorów (2014).

Do standardowych testów zaliczamy m.in. pomiary elektryczne akumulatora przy obciążeniu statycznym i dynamicznym, pomiar wydajności na cykl ładowania/rozładowania, przy różnych wartościach prądu oraz określenie aktualnego stanu akumulatora. Stanowisko laboratoryjne nr 2 służy do badania baterii z predefiniowanymi parametrami technicznymi i wykorzystywane jest ono do następujących badań:

- funkcjonowanie akumulatorów opartych na różnych technologiach, sprawdzanie funkcjonalności i parametrów nominalnych akumulatorów (wykorzystywane również w procesie dydaktycznym),
- algorytmów zarządzania i sterowania magazynami energii,
- walidacji produktu i jego właściwości (praca statyczna oraz dynamiczna, jakość parametrów elektrycznych, dokładność monitorowania i sterowania, bezpieczeństwo).

Wymienione obszary i możliwości stanowiska wykorzystywane są przez różnych partnerów przemysłowych, w szczególności producentów akumulatorów dla zastosowań mobilnych (producentów samochodów elektrycznych, urządzeń energoelektronicznych powszechnego zastosowania, producentów systemów przemysłowych, np. UPS), a także producentów i operatorów stacjonarnych magazynów energii (operatorzy sieci przesyłowej, dystrybucyjnej, zakłady energetyczne, firmy z branży energetycznej).

4c) omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

Główne cele badawcze i osiągnięcia habilitanta

Głównym celem przeprowadzonych badań było opracowanie modeli matematycznych i koncepcji architektury komunikacyjno-informacyjnych umożliwiających niezawodną i efektywną integrację mobilnych i stacjonarnych zasobników z dynamicznie eksploatowanymi sieciami elektroenergetycznymi, z dużym udziałem zainstalowanych źródeł energii odnawialnej. Opracowana metodologia uwzględnia zarówno warunki techniczne, regulacyjne i ekonomiczne, jak i zawiera opracowane w tym celu algorytmy służące do optymalnego wymiarowania systemu oraz efektywnej i niezawodnej pracy magazynów w systemie. W pracach obejmujących pojazdy elektryczne autor wniosku koncentrował się na możliwości zastosowania opracowanych metod modelowania magazynów energii w nowej dziedzinie, jaką jest elektromobilność oraz opracowaniu jednolitego i zintegrowanego systemu elektromobilności sprzęgającego sektor energetyczny, transportowy i informatyczny.

Habilitant może wykazać się następującymi osiągnięciami:

1. Opracowano modele magazynów energii stacjonarnych i mobilnych dla różnorodnych zastosowań, w tym planowanie i wsparcie sieci podczas eksploatacji (modele statyczne i dynamiczne) [A1][A2][A4].
2. Opracowano metody planowania i projektowania architektury łańcucha systemu elektromobilności: interfejsów komunikacyjno-informacyjnych poszczególnych elementów (pojazd elektryczny – stacja ładowania – sieć elektroenergetyczna – użytkownik końcowy), jak i całego systemu oraz centralnej dyspozytorni monitoringu, sterowania i zabezpieczenia oraz metod projektowania i rozmieszczenia infrastruktury ładowania [A2][A3][A5].
3. Opracowano metody oceny techniczno-ekonomicznej zastosowania magazynów energii w sieci elektroenergetycznej [A4][A6] jako elementu sprzężenia sektorowego [A3] z wykorzystaniem opracowanej metody opierającej się na dynamicznej estymacji stanu sieci elektrycznej z dużym udziałem OZE [A7].

Przedstawione osiągnięcia opisane są szczegółowo w części 4c.3-4c.5, w odniesieniu do opisanych w części 4c.1-4c.2 problemów i wyzwań naukowych jak i technologicznych oraz przyjętej metodyki badań.

4c.1. Wprowadzenie

Wzrost emisji gazów cieplarnianych pod koniec XX wieku spowodował konieczność ograniczania wykorzystania surowców kopalnych (węgla i gazu) do produkcji energii elektrycznej. Przejście na energetykę z tzw. źródeł odnawialnych (OZE) rozpoczęło się w latach 90. XX wieku. Głównym wyzwaniem było wówczas uczynienie tych technologii opłacalnymi do konkurencyjnych technologii konwencjonalnych opartych na paliwach kopalnych. Oczekiwany efekt ekonomiczny można było osiągnąć poprzez udoskonalenie technologii OZE (głównie elektrowni wiatrowych i fotowoltaicznych) oraz zwiększenie liczby produkowanych jednostek, a co za tym idzie efektu skali na rynku. Postępy te osiągnięto m.in. dzięki bezpośrednim dotacjom celowym i wprowadzeniu korzystnych dla OZE modeli na rynku energii, które przyczyniły się w końcu do redukcji kosztów produkcyjnych. To spowodowało w długoterminowej perspektywie zwiększenie konkurencyjności OZE w stosunku do innych technologii i wzrost udziału OZE w miksie energetycznym. Początkowo wzrost ten w dużej mierze był zauważalny tylko w niektórych krajach (np. Dania, Niemcy). W późniejszym okresie zmiana ta wymusiła głębokie przemiany w systemie elektroenergetycznym i wykreowała nowe podmioty na rynku energii jakim są prosumenci, a także rozpoczęła proces elektryfikacji w sektorze transportu. Początki elektromobilności bardzo szybko uwypukliły wady starej i sztywnej struktury sieci elektrycznej, w której przesył energii odbywał się tylko od wytwórców (głównie dużych elektrowni) do odbiorców. Strukturze tej podporządkowana była cała strategia planowania i eksploatacji sieci, która okazała się nieelastyczna dla wielkoskalowej generacji OZE. Nie tylko bowiem odbiorca określa w sieciach z OZE przepływy energii, ale także OZE jako źródło zależne od warunków pogodowych ma znaczny wpływ na te przepływy. Zaistniała potrzeba magazynowania nadmiaru energii produkowanej przez OZE i wykorzystania jej w okresach niedoboru produkcji bądź do regulacji pracy sieci [A1]. Z drugiej strony, początkowy okres elektromobilności, który w założeniu miał być zasilany z OZE, ujawnił także powszechne braki w systemowym

spojrzeniu na tę nową gałąź gospodarki. Absolutnie nie rozpoznano bowiem nie tylko problemów konstrukcyjnych i technicznych samego samochodu elektrycznego, ale także problemów infrastruktury niezbędnej do ładowania akumulatorów samochodów elektrycznych, a także związanych z tym przesyłem i przetwarzaniem informacji i danych w ciągu: użytkownik – samochód elektryczny – stacja ładowania – sieć elektryczna – rynek energii [A2].

4c.2. Systemowe ujęcie problemu zasobników energii oraz metodyka badań

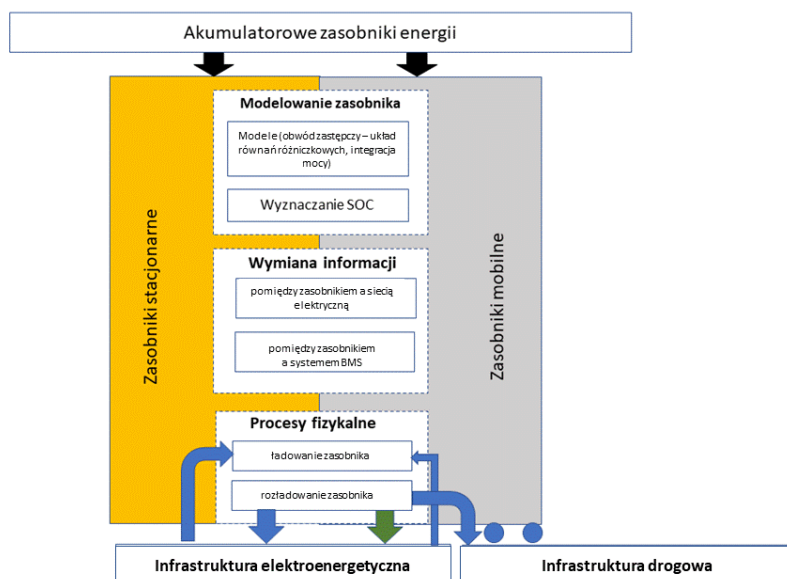
Akumulatorowe zasobniki energii (AZaE) znane są i używane jako element sieci elektrycznej od początku istnienia systemu elektroenergetycznego, to znaczy od lat 1880-tych. Początkowo stosowane magazyny energii ładowane były w ciągu dnia, gdyż energia elektryczna była wykorzystywana głównie w nocy do oświetlenia ulic. Na początku XIX wieku zastosowanie magazynów energii ograniczało się do roli zasilania rezerwowego i awaryjnego wrażliwych infrastruktur, takich jak sieć telekomunikacyjna lub zasilanie awaryjne statków i obiektów specjalnych. W latach 80. i 90. XX wieku nastąpił powrót zainteresowania akumulatorowymi magazynami energii zwłaszcza w kontekście nowych technologii wysokotemperaturowych – baterii NAS (siarko-sodowych), ale także zaawansowanych baterii ołowiowych. Jednak dopiero deregulacja rynku energetycznego pod koniec lat 90-tych i rozwój energetyki odnawialnych źródeł energii spowodowały pojawienie się szerszego zainteresowania akumulatorami do zastosowań stacjonarnych i mobilnych. Coraz większe zanieczyszczenie środowiska spalinami oraz rosnące znaczenie efektu cieplarnianego na klimat Ziemi doprowadziły do wzrostu produkcji energii z OZE i do rozwoju elektromobilności, jako alternatywy do redukcji emisji wynikających z transportu. Towarzyszyły temu odpowiednie zmiany struktur na rynku energetycznym. Bateriajne magazyny energii, do których zaliczają się samochody elektryczne, stały się nie tylko niezbędne, ale i ekonomicznie uzasadnione w przypadku wykorzystania energii z OZE (np. poprzez akumulację nadwyżek wytwarzania) lub samochodów elektrycznych ze względu na dekarbonizację transportu (np. gdy energia elektryczna do napędu samochodu elektrycznego pochodzi z OZE) [A1]. Zastosowanie magazynów energii stacjonarnych i mobilnych wymagało rozwiązania szeregu szczegółowych problemów naukowych, ale także technicznych, gdyż na przykład jedne z pierwszych projektów realizowanych w Niemczech - RegModHarz (2008-2012) oraz HarzEEmobility (2009-2011), których autor wniosku był uczestnikiem (patrz również opis projektów w punkcie 4d autoreferatu), miało jedynie charakter badawczy i pilotażowy.

Zarówno w stacjonarnych jak i w mobilnych akumulatorowych magazynach energii można wyróżnić merytoryczne części wspólne oraz części charakterystyczne dla każdej z technologii. Część wspólna zawiera następujące elementy:

- modelowanie akumulatorowego magazynu energii,
- modelowanie współdziałania akumulatorowego magazynu energii z siecią podczas ładowania (oba systemy) i rozładowania (oba systemy, jeżeli system mobilny ma funkcjonalności pozwalające na oddanie energii do sieci),
- obliczanie rozptyłów mocy z uwzględnieniem magazynów akumulatorowych i wyznaczanie ich oddziaływania na sieć.

Na rysunku 4 przedstawiono zakres badań naukowych prowadzony przez autora wniosku w latach 2008-2023 w zakresie zastosowania akumulatorowych magazynów energii. Przedstawiona grafika przedstawia spójność dziedzin badawczych (elektromobilność i magazyny stacjonarne), ich systemowy charakter oraz ich

wpływ/udział w łączeniu sektorów (w tym przypadku energetycznego, transportowego i informacyjnego), który szczególnie uwypuklony jest obecnie poprzez znaczący udział OZE w generacji energii elektrycznej w wielu krajach Europy, w tym również w Polsce.



Rysunek 4. Spójność zakresu tematycznego prac autora wniosku w dziedzinach elektromobilności i stacjonarnych zasobników energii.

4c.3. Modelowanie zasobników energii

Obliczenia i planowanie dla systemów elektroenergetycznych dzieli się ogólnie na dwa rodzaje [A1]:

- obliczenia i planowanie statyczne,
- obliczenia i planowanie dynamiczne.

W obliczeniach statycznych nie stosuje się skali czasu. Jako informacje wykorzystuje się dane odnośnie maksymalnego zapotrzebowania energii w celu zbilansowania produkcji energii w ciągu jednej godziny lub jednej doby. Modele magazynów energii (ZaE) o różnej dokładności są niezbędne do przeprowadzenia obliczeń w procesie planowania systemu elektroenergetycznego. Powinny one odpowiadać dokładności i szczegółowości używanych powszechnie modeli urządzeń systemu elektroenergetycznego, na przykład generatorów i transformatorów.

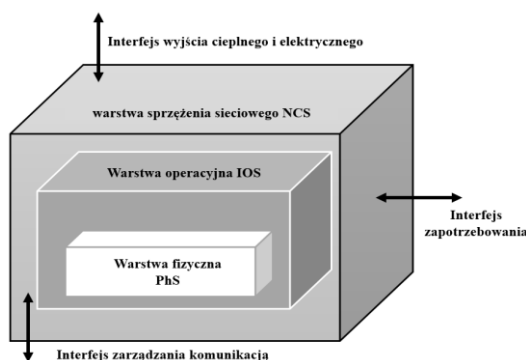
Do obliczeń dynamicznych niezbędne są modele opisujące dynamiczne właściwości obiektów za pomocą równań różniczkowych cząstkowych [A1]. Bardziej adekwatne modele ZaE oparte np. na układach zastępczych przedstawione zostały w [A1][B2][B3] i są wymagane do szczegółowego planowania magazynów energii oraz np. wymiarowania falownika. W zależności od skali czasowej obliczeń, modele ZaE mogą być również uproszczone. Dane pomiarowe i właściwości fizyczne urządzeń są wykorzystywane do parametryzacji modeli opisanych matematycznie. Dokładność modeli należy w kolejnym kroku dostosować do symulacji dużych (wielowęzłowych) sieci elektroenergetycznych w taki sposób, aby główne parametry i charakterystyki pojedynczych urządzeń (tutaj również ZaE) zostały uwzględnione bez zbędnego zwiększania czasu obliczeń.

Jeśli chodzi o ogólne wymagania dotyczące modelowania należy zauważyć, iż magazyn energii może być zintegrowany do obliczeń w systemie elektroenergetycznym jako tzw.

prosumer (rola łącząca generację i obciążenie). Urządzenia wytwórcze (generatory) muszą być w pełni uwzględnione w takim modelu, jeśli system magazynowania wyposażony jest w jedno takie urządzenie w rzeczywistości. Ma to miejsce w przypadku elektrowni szczytowo-pompowych, kół zamachowych i magazynów CAES (Compressed-air energy storage). W przypadku magazynów elektrochemicznych, gdy podczas konwersji nie jest wykorzystywana masa wirująca tylko wydajność procesów elektrochemicznych, to w modelu należy uwzględnić jedynie wydajność tych procesów i właściwości falownika [A1].

Ogólna struktura modelu ZaE powinna mieć co najmniej trzy warstwy, aby spełnić wymienione wcześniej wymagania. Ponadto powinna uwzględnić warunki zastosowania modelu (patrz rysunek 5). Warstwa fizyczna (PhS) modelu jest połączona z warstwą drugą, tzn. z poszczególnymi otaczającymi elementami (IOS). Warstwa ta stanowi integralną część warstwy 3. Trzecia warstwa tego modelu – warstwa sprzężenia sieciowego (NCS) ZaE, zrealizowana jest głównie jako uproszczony model inwertera wraz z transformatorem. Uzupełnia ona strukturę modelu jednostki ZaE dla rozległych w czasie symulacji. Warstwa NCS posiada trzy interfejsy: wyjście ciepłne i elektryczne, zapotrzebowania na energię z ZaE oraz zarządzania komunikacją (dostępny do zewnętrznych parametrów układu). Zasilanie ZaE w energię oraz wymiana energii pomiędzy ZaE a systemem energetycznym jest realizowana za pomocą interfejsów: termicznego i elektrycznego. Interfejsy te muszą być odpowiednio dopasowane (zwymiarowane) do parametrów PhS (np. moc nominalna). Interfejs zapotrzebowania określa wymaganą moc wyjściową, a interfejs zarządzania komunikacją umożliwia optymalne sterowanie pracą ZaE [A1].

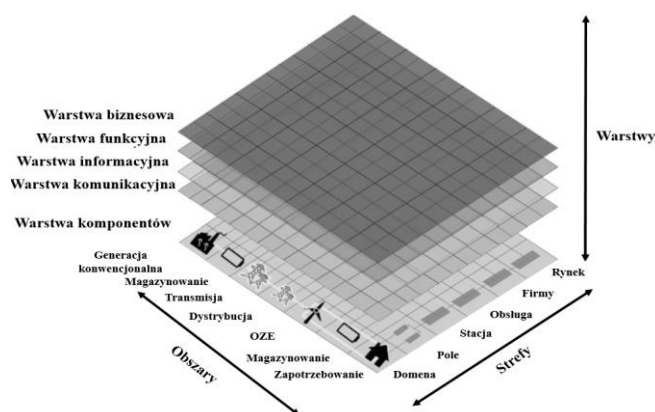
Opracowany model ma charakter ogólny i pozwala opisać magazyny energii dla różnych ich typów począwszy od elektrowni szczytowo-pompowych, poprzez magazyny energii ze sprężonym powietrzem, a skończywszy na akumulatorowych zasobnikach energii. Model ten był podstawą jednolitego podejścia do algorytmizacji szczegółowych zadań optymalizacyjnych, które prowadziły do włączania opracowanych przeze mnie lub mój zespół algorytmów w postaci własnych skryptów obliczeniowych do programów komercyjnych, PSSNetomac czy Digsilent, pozwalających na wykonywanie obliczeń rozptyłu mocy dla sieci elektroenergetycznych. Wspomniany powyżej model dobrze odpowiada ogólnej architekturze systemu elektroenergetycznego podanej w standardzie IEC CIM 61970 (Common Information Model), patrz rysunek 6.



Rysunek 5. Opracowany przez autora ogólny trójwarstwowy model ZaE obejmujący opisaną strukturę interfejsów [A1].

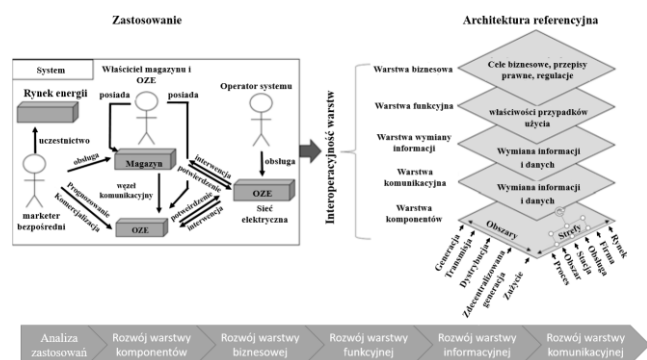
Korzystając z CIM ten sam rodzaj standardowego opisu może być używany dla różnych urządzeń (np. magazynów, urządzeń przesyłowych i dystrybucyjnych), a także dla różnych

obszarów realizacji (np. rynek energii, eksploatacja i praca systemu) [A1]. Ustandaryzowany opis CIM pozwala na szybkie generowanie modelu danego systemu elektroenergetycznego wraz z jego elementami przy uwzględnieniu właściwości fizycznych jak i informacji dostarczonych za pomocą interfejsu teleinformatycznego. W prezentowanym modelu CIM występuje pięć płaszczyzn (poziomów). Poziomem bazowym jest poziom komponentów (fizyczny) na który nakładane są kolejne: płaszczyzna komunikacyjna, informacyjna, funkcyjna i biznesowa (przepływy finansowe).



Rysunek 6. Struktura architektury systemu elektroenergetycznego a płaszczyzny możliwych funkcjonalności [A1].

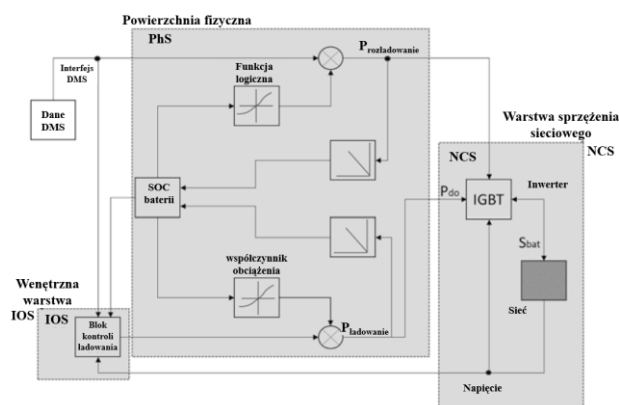
Rozpatrywanie różnych zastosowań magazynów energii jest możliwe w sposób systematyczny za pomocą modelowania tzw. use cases (przypadków zastosowania). Use case opisuje aktorów, relacje oraz zależności między nimi, diagramy oraz parametry wymiany informacji, a także przepływ informacji i danych w ramach każdego konkretnego zastosowania. Przykład takiego rozwiązania został przedstawiony na rysunku 7.



Rysunek 7. Przykładowy Use case dla magazynu energii [A1].

Jako przykład posłużyć może zastosowanie ZaE jako dostawcy usług systemowych, w którym uczestnikami są ZaE, operatorzy VPP (wirtualnej elektrowni), operatorzy systemu elektroenergetycznego, sieć elektroenergetyczna, system zarządzania energią (EMS) oraz odbiorcy. W początkowym okresie zainteresowania akumulatorowymi magazynami energii brano pod uwagę zarówno dla zastosowań stacjonarnych jak i mobilnych [A1][A2][A4][B6] szereg technologii takich jak: akumulatory ołowiowe, wysokotemperaturowe i inne. Dopiero z czasem, gdy technologia litowo-jonowa stała się opłacalna i bardziej dostępna nastąpiła jej wszechobecna dominacja. Pierwsze prace i opracowane modele zaproponowane przez autora były więc początkowo parametryzowane na innych technologiach. Jednak ogólne, systemowe podejście do

problemu modelowania magazynów pozwoliło z sukcesem zastosować większość zdobytej wiedzy dla technologii litowo-jonowej. Przykładowo w latach 2008 opracowałem sparametryzowany model ZaE dla baterii ołowiowej, która wtedy była używana zarówno w stacjonarnych jak i mobilnych zasobnikach energii [A1][A4][A6]. Jako podstawową strukturę wykorzystano uproszczony model integracji baterii stacjonarnej jako jednostki magazynującej. Opiera się on na głównym założeniu, że bateria, wykorzystywana głównie do oszczędzania energii w szczycie (peak shaving), zostanie doprowadzona do stanu pełnego naładowania po cyklu 24-godzinny. W związku z tym straty na przemianę energii chemicznej w elektryczną oraz straty związane z samorozładowaniem mogą być połączone. Najważniejszym parametrem fizycznym modelu baterii jest jej stan naładowania (SOC). Wewnętrzny stan baterii opiera się na zależności pomiędzy mocą ładowania i rozładowania, a wartością SOC i jest kontrolowane przez jednostkę sterującą ładowaniem (BMS – Battery Management System). Dwukierunkowy przepływ energii jest zapewniony przez inwerter, który wraz z zespołem transformatora stanowi NCS (warstwę sprzężenia sieciowego) dla jednostki akumulatorów. Zapotrzebowanie na moc czynną jest przekazywane przez interfejs wewnątrz modelu baterii, co oznacza, że bateria przechodzi do procesu rozładowania (dostarczanie energii do sieci). Opracowany model analizuje SOC i w zależności od niego dostarcza pożądaną i/lub możliwą do uzyskania ilość energii. Moc czynna podczas rozładowywania jest prawie stała aż do regulowanej wartości progowej, np. 30% SOC. Po osiągnięciu tego poziomu akumulator wyłącza proces rozładowywania, aby uniknąć nadmiernego rozładowania. Model baterii zarządza jednostką sterującą ładowaniem, budującą jej powierzchnię IOS. Proces ładowania jest jednak możliwy tylko wtedy, gdy spełnione są wszystkie warunki: akumulator nie jest w pełni naładowany bądź rozładowany poniżej granicy bezpieczeństwa (w praktyce około 10-15% SOC), amplituda napięcia na węźle przyłączeniowym sieci mieści się w dopuszczalnym paśmie oraz nie ma zapotrzebowania na energię ze strony EMS (Energy Management System). W trakcie tego procesu zmienia się m.in. ładowanie, które odzwierciedla zachowanie rezystancji wewnętrznej baterii [A2][A5][B2][B3]. W zaprojektowanym modelu akumulator jest sprzężony z siecią za pomocą falownika i transformatora – powierzchnia NCS jednostki. Falownik zawiera układ kontroli napięcia, co pozwala na regulację amplitudy napięcia za pomocą mocy biernej i/lub czynnej. Regulacja ta odbywa się w różnych granicach, wynikających z mocy pozornej transformatora, maksymalnej mocy biernej i/lub czynnej, która może być dostarczona przez akumulator oraz $\cos\phi$ modułu inwertera. Straty w inwerterze wynoszą ok. 3,5 % mocy pozornej. Opracowany model został przedstawiony na rysunku 8.

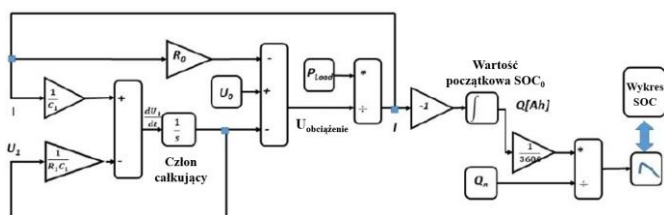


Rysunek 8. Zintegrowany model ZaE z bateriami ołowiowymi [A1].

Głównymi parametrami magazynów energii, w tym również akumulatorowych ZaE, są:

- moc magazynu,
- pojemność magazynu,
- poziom naładowania (SOC) magazynu,
- koszty magazynu.

Przeznaczenie zasobnika definiuje w zasadzie jego pojemność (energia) i moc. Bieżący jego stan naładowania określa jego możliwości w wykonywaniu wyznaczonych funkcji w danym czasie (np. wspomaganie regulacji częstotliwości, zasilanie napędu pojazdu elektrycznego). Koszty magazynu są głównie pochodną jego parametrów technicznych i wybranej technologii wykonania przy czym wypadkową kosztów jest jego zależność mocy od pojemności [A1][A2][A4][A6]. Określanie SOC jest definiowane niezależnie od rodzaju zasobnika i jego przeznaczenia. Stan naładowania akumulatora określa ogólnie jego zdolność do dostarczania energii. Wartość SOC akumulatora określa się jako stosunek jego aktualnej pojemności $Q(t)$ do początkowej, nominalnej pojemności Q_n . Producent podaje pojemność nominalną, która stanowi maksymalną ilość energii, jaka może być przechowywana w akumulatorze. W zależności od zastosowania należy odpowiednio dobrać wartość SOC i odpowiadające jej parametry, które autor opisał w [A1], jak i wybrać odpowiednią metodę wyliczenia bądź pomiaru SOC, które zostały opisane w [B8]. W przypadku dużych ZaE w aplikacjach sieciowych zastosowano bezpośrednią definicję energii, a pojemność ZaE wyrażana jest w kWh lub w MWh dla bardzo dużych baterii. Praca tych urządzeń charakteryzuje się powolną dynamiką, dzięki czemu można z dużą dokładnością zmierzyć rzeczywisty prąd i napięcie oraz obliczyć moc rozładowania lub ładowania. Jeśli ZaE jest pusty (SOC = 0, wartość teoretyczna, ponieważ w praktyce SOC nie powinno przekroczyć 10-15% aby nie uszkodzić akumulatora), nie ma możliwości zasilania z niego żadnego obciążenia. Jeśli ZaE jest w pełni naładowany, to zasilanie odbiorników jest możliwe, a jego parametry zależą od mocy znamionowej, która jest jednocześnie mocą znamionową całego układu. Zależna jest ona od samego akumulatora jak i od wymiarów układów przyłączeniowych (np. prostowników). Dla wyznaczania stanu naładowania ZaE stosować można bezpośrednio metodę całkowania mocy. Ponieważ taka metoda prowadzi do błędów, należy co pewien czas kalibrować wynik poprzez porównanie ze stanem np. pełnego naładowania. Autor wniosku szczegółowo opisuje w [A1] oraz [B8] istniejące możliwości obliczania i oceny SOC. Inna ostatnio rozpowszechniana metoda, którą autor stosował w swoich badaniach od roku 2008, jest metoda tzw. bliźniaka cyfrowego (digital twin). Opracowany model takiego bliźniaka wykonany w programie Matlab Simulink daje się łatwo zaimplementować do wszelkiego rodzaju profesjonalnego oprogramowania w postaci skryptu programowalnego typu makro [A1][A2][B2][B3]. Schemat stosowanego bliźniaka dla AZaE pokazano na rysunku 9.



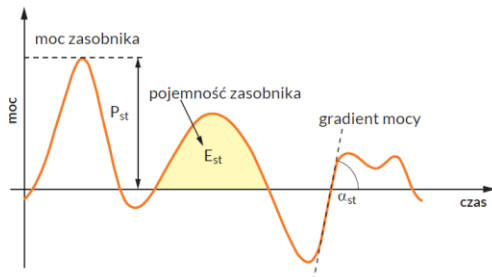
Rysunek 9. Model AZaE jako digital twin [A2].

Autor stosował w swoich badaniach głównie zaprojektowane bliźniaki cyfrowe oparte na modelu Thevenina. W przypadku najnowszych obliczeń dla magazynów mobilnych autor wniosku stosuje również bardziej dokładne układy zastępcze zalecane przez PNGV (Partnership for a New Generation of Vehicle) podane w [B8]. Parametryzacja i symulacja modeli odbywa się głównie w oparciu na pomiarach modeli fizycznych lub na samym obiekcie ZaE. W pracach autora wniosku [A1][A2][A4][A5] wszystkie opracowane modele parametryzowane były na modelach fizycznych i weryfikowane na obiektach rzeczywistych, które zostały przedstawione w następnych częściach autoreferatu, w szczególności w części 4c.5. Przy określaniu maksymalnej mocy i pojemności magazynu autor zastosował opracowaną przez siebie metodę opartą na analizie wyników symulacji. Wraz z opracowaniem laboratoriów do badań magazynów utworzył on również symulator pozwalający na oszacowanie przebiegów procesów ładowania i rozładowania idealnych magazynów ZaE dla rozpatrywanych przypadków zastosowania, patrz opis stanowiska laboratoryjnego C2. Analizując przebieg ładowania i rozładowania magazynu w określonym czasie (np. w ciągu 24 godzin) można określić jego energię i moc maksymalną jak również określić oczekiwane maksymalne gradienty mocy, co zostało przedstawione na rysunku 10. Parametry te potrzebne są do wymiarowania falownika i innych aparatów pomocniczych akumulatora (np. wyłączników), jak również do określenia kosztów ZaE [A1][A4]. Równania (1) do (3) opisują ten proces matematycznie.

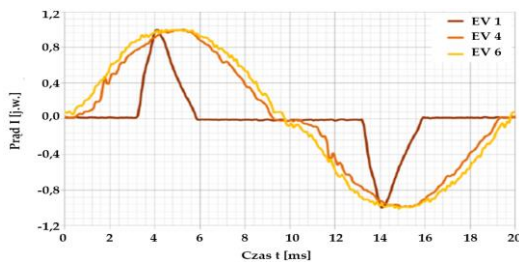
$$P_{st} = \max |P_{res}| \quad (1)$$

$$C_{st} = \max(E_{st}) = \max_{t=1}^{t_{max}} \begin{cases} t_i + 1 & (P_{res} = 0) \\ \int P_{res} dt & \\ t_i + (P_{res} = 0) \end{cases} \quad (2)$$

$$\alpha_{st} = \max_{k=1}^{k_{max}} \left(\frac{\Delta P_k}{\Delta t_k} \right) \quad (3)$$



Rysunek 10. Wyznaczanie parametrów ZaE w celu zbilansowania obciążeń rezydualnych [A4].



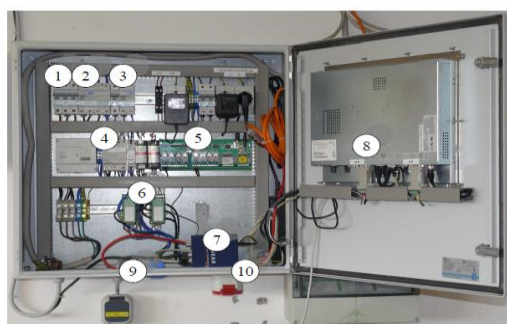
Rysunek 11. Zarejestrowany przebieg prądu dla 3 różnych pojazdów elektrycznych podłączonych do stacji ładowania [A5].

4c.4. Elektromobilność – nowa dziedzina modelowania

Podstawowymi elementami systemu elektromobilności, szczegółowo opisanymi w [A2] są:

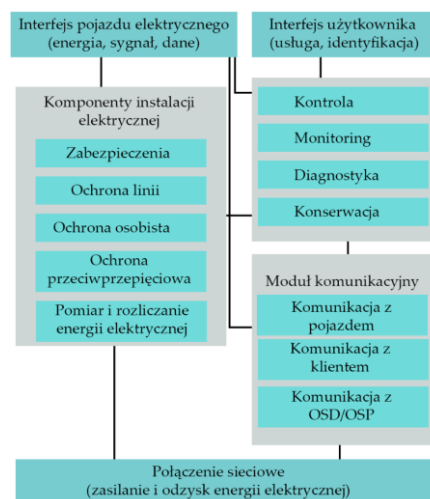
- pojazd elektryczny do przewozu osób bądź towarów,
- infrastruktura ładowania, sprzężona z systemem elektroenergetycznym,
- system interfejsów pomiędzy samochodem elektrycznym, a infrastrukturą ładowania oraz nadrzędnymi infrastrukturami, np. infrastrukturą transportową,
- interfejsy fizyczne (złącza) dla przesyłania energii elektrycznej i informacji,
- interfejsy informatyczne – protokoły, modele danych.

Podstawowym elementem samochodu elektrycznego jest magazyn energii (akumulator). Jego pojemność definiuje zarówno zasięg, jak i jego koszt. Proces ładowania AZaE (akumulatorowego magazynu energii) dokonywany jest poprzez stację ładowania, która połączona jest z systemem elektroenergetycznym [A2][A5]. W czasie ładowania samochód elektryczny może być traktowany jako odbiornik energii elektrycznej, a więc jako punkt przyłączenia do sieci, który musi spełniać niezbędne warunki odnośnie mocy i napięcia, zdefiniowane w warunkach przyłączeniowych do sieci elektroenergetycznej. Dodatkowo stacja ładowania wyposażona jest w układy prostownikowe a w przypadku możliwości rozładowania, w układy falownikowe, które mogą powodować przenoszenie zakłóceń powstałych w wyniku komutacji do sieci (głównie powstawanie przepływów prądów harmonicznych). Tą problematyką autor wniosku zajmował się w ramach szeregu projektów badawczych i zajmuje się do dziś, patrz projekty w punkcie 4d autoreferatu. Autor wniosku modelował różne magazyny ZaE znajdujące się w samochodach elektrycznych i badał dokładność ich skalowalności podczas badań na modelach fizycznych i obiektach rzeczywistych w oparciu o pomiary przeprowadzane z dużą dokładnością. Na rysunku 11 przedstawiono przykładowy przebieg ładowania samochodu elektrycznego z bateriami ołowiowymi, opracowany przez autora wniosku na stanowisku C1.



a)

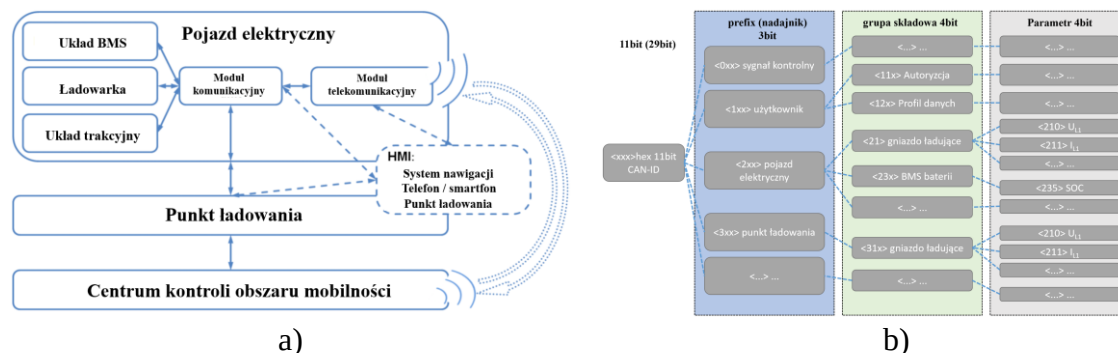
1 – Bezpiecznik główny, 2 – RCD, 3 – Bezpieczniki, 4 – Wyłącznik, 5 – USB, 6 – układy pomiarowe jedno- i trójfazowe, 7 – router, 8 – komputer panelowy, 9 – gniazdko jednofazowe, 10 – gniazdko trójfazowe.



b)

Rysunek 12. Prototypowa stacja ładowania wykonana w Instytucie IFF (2008) oraz schemat elementów i interfejsów standardowej stacji ładowania [A2][B1]. a) prototypowa stacja ładowania, b) schemat elementów i interfejsów standardowej stacji ładowania.

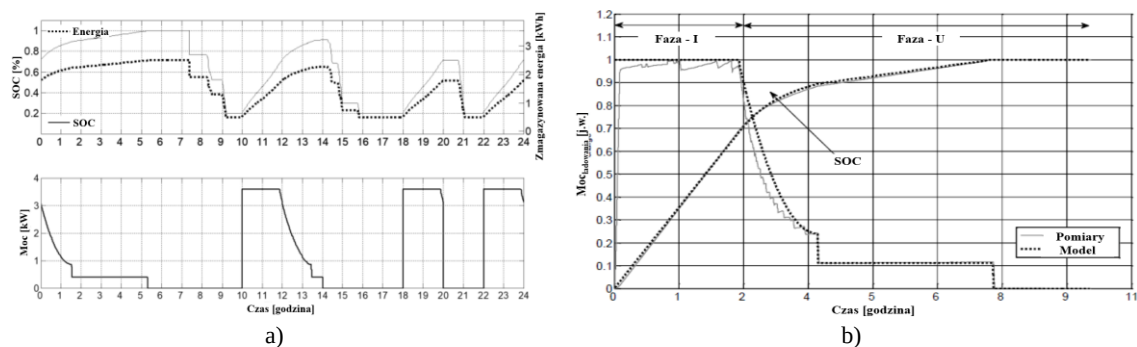
Tego rodzaju procesy ładowania są dopasowywane automatycznie do specyfikacji auta ładowanego poprzez inteligentny system oprogramowania w BMS magazynu. Aby kontrolować proces ładowania, zakres prądowo-napięciowy, niezbędne parametry akumulatora samochodu elektrycznego muszą być na bieżąco przekazywane do stacji ładowania, którą zaprojektował i pilotażowo zaimplementował autor wniosku w 2008 roku, rysunek 12a [B1]. Odbywa się to w ramach procesu identyfikacji podłączonego do stacji pojazdu. System zarządzania magazynem identyfikuje na podstawie pomiarów i obliczeń aktualne parametry baterii takie jak: temperaturę, napięcie, prąd, ale i wartość SOC, które są niezbędne do prognozowania zasięgu pojazdu.



Rysunek 13. System komunikacji i akwizycji danych o stanie magazynu energii w samochodzie elektrycznym i ich udostępnianie. a) ogólny schemat, b) fragment zaadaptowanego protokołu CAN [A2].

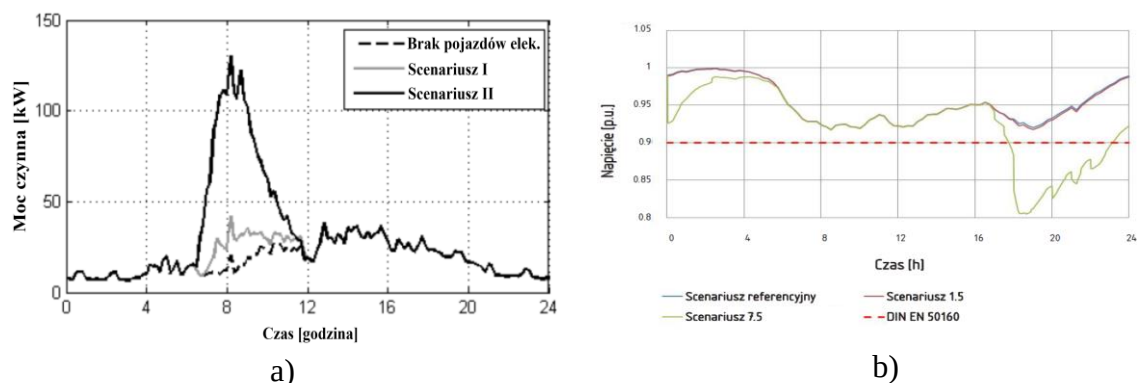
Wartości tych parametrów przekazywane są do stacji ładowania i mają wpływ na kształtowanie optymalnego przebiegu procesu ładowania, przy czym decydującymi wielkościami są maksymalna moc ładowania oraz ilość energii, którą można naładować magazyn. W ten sposób wpływa się na wielkość i kierunek przepływu energii, gdy samochód jest podłączony do stacji [A5]. Proces ten niezależnie od technologii odbywa się dzięki zaprojektowanej przez autora wniosku standardowej stacji ładowania, składającej się z niezbędnych elementów i interfejsów przedstawionych na rysunku 12b. Na rysunku 13 pokazane są główne elementy systemu akwizycji danych i komunikacji pomiędzy samochodem elektrycznym, stacją ładowania, a systemem nadzorowania floty aut oraz przykład zaprogramowanych i opracowanych wewnętrznych protokołów komunikacyjnych. W początkowej fazie rozwoju elektromobilności (2010-2015) sposób wymiany danych, ich rodzaj i format nie był ustandaryzowany, co wymagało opracowania własnych prototypowych protokołów, które umożliwiły zbudowanie systemu sterowania oraz systemu zarządzania flotą pojazdów elektrycznych, które autor opracował i szczegółowo opisał w [A2] [B7].

Ważnym elementem systemu elektromobilności są charakterystyki obciążenia magazynu w zależności od pokonywanych tras jazdy przy uwzględnieniu parametrów wewnętrznych (charakterystyki jazdy), jak i zewnętrznych (temperatura, wilgotność, natężenie ruchu drogowego). Charakterystyki te służą do weryfikacji opracowanych modeli magazynu energii, ale również do określania zasięgu samochodów elektrycznych i przez to ustalanie niezbędnych punktów ładowania w sieci dystrybucyjnej. Zwiększone zużycie energii podczas jazdy wynika z licznych przyspieszeń i szybkiej jazdy. Również jazda trasami o różnym nachyleniu jest przyczyną podwyższonego zużycia energii. Przykładowy przebieg profilu jazdy przedstawiono na rysunku 14, a szczegółowe opisy opracowanych modeli i wyników symulacji opisane są w [B2].



Rysunek 14. Wyniki symulacji dla służbowego pojazdu elektrycznego [B2] oraz przykładowa charakterystyka ładowania akumulatora samochodu elektrycznego z akumulatorami ołowiowymi [B2]. a) Wyniki symulacji dla służbowego pojazdu elektrycznego, b) przykładowa charakterystyka ładowania akumulatora samochodu elektrycznego z akumulatorami ołowiowymi.

Parametry pojazdu oraz schematy dziennego wykorzystania zostały dopasowane w celu odtworzenia dwóch powszechnych charakterystyk, tj. charakterystyki samochodu dojeżdżającego do pracy oraz samochodu służbowego. Samochód służbowy charakteryzuje się wielokrotnym pokonywaniem tras/odcinków w ciągu dnia.



Rysunek 15. a) wpływ procesu ładowania samochodów elektrycznych na rozpięty mocy w sieci, moc w węźle nr 6 (parking) [B3] oraz b) wpływ procesu ładowania samochodów elektrycznych na poziomy napięcie w sieci średniego napięcia [B5].

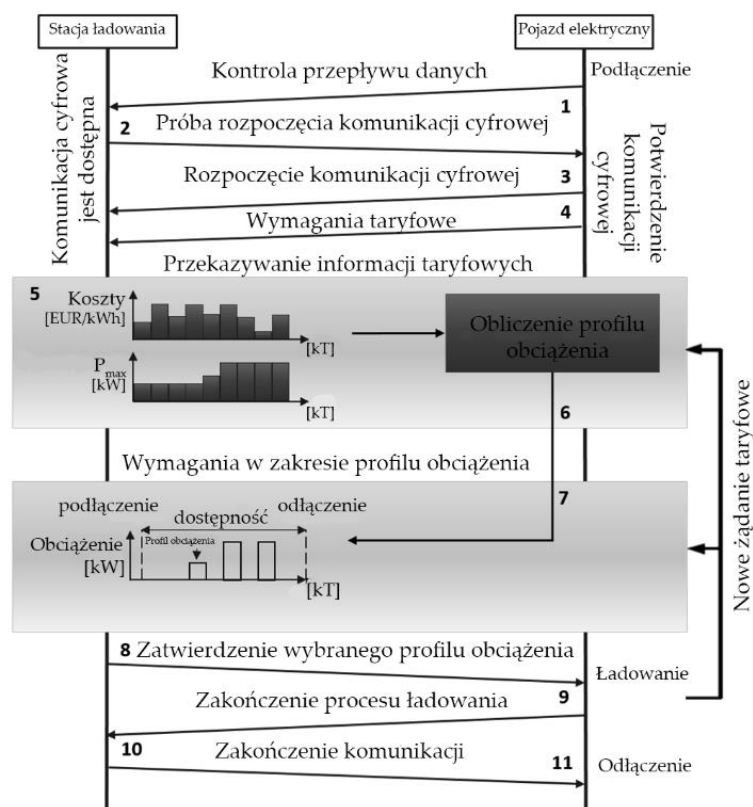
Pojazd na rysunku 14a pokonał 9 odcinków jazdy, które obejmowały zarówno przemieszczanie się po mieście, jak i po terenach podmiejskich. Masa pojazdu wynosiła 1300 kg, a pojemność akumulatora 25 kWh. Obciążenie dodatkowego wyposażenia dla tego typu pojazdu elektrycznego oszacowano na 1,65 kW. Symulowany pojazd przejechał łączny dystans 91,3km i zużył średnio 22 kWh/100 km. W trakcie eksploatacji, akumulator trzykrotnie osiągnął poziom 20% SOC, ale nie przeszkodziło to pojazdowi w realizacji zaplanowanego harmonogramu jazdy. Dostępność pojazdu dla sieci wynosiła 58% czasu w ciągu jednej doby. W ciągu 24 godzin pojazd zużył 28 kWh. Zostało to dokładniej przedstawione na wykresie umieszczonym na rysunku 14a. Wykres 14b przedstawia szczegółowo jeden cykl pełnego ładowania. Pokazane są zarówno pomiary rzeczywiste jak i wyniki symulacji tego procesu za pomocą opracowanych modeli. W drugiej fazie ładowania uzyskuje się wartość SOC 100% po czasie ok. 3 godzin. Na rysunku 14b widać bardzo wysoką zgodność wyników otrzymanych w wyniku opracowanych modeli

z wynikami pomiarowymi, a co za tym idzie bardzo wysokiej dokładności stworzonych modeli. Wnioski wynikające z tych opracowań miały wpływ na ewaluację i ulepszenie finałowych modeli akumulatorowych magazynów energii oraz udoskonalenie architektury systemu elektromobilności w celu zapewnienia efektywnego energetycznie oraz niezawodnego procesu ładowania, które autor wniosku opisał w [A2] i [A5]. Ponadto w ramach badań opracowano modele dla różnych rodzajów akumulatorowych magazynów energii, np. ZEBRA10 lub akumulatorów litowo-żelazowo-fosforanowych (LiFePO_4) które stanowiły wyposażenie aut elektrycznych biorących udział w badaniach. Ich charakterystyki ładowania i rozładowania zostały również zaimplementowane w modelu, aby umożliwić późniejszy wybór właściwych akumulatorów poprzez stworzenie warunków do symulacji profili dla całej floty pojazdów elektrycznych biorących udział w badaniach.

Ważnym elementem wpływającym na rozpowszechnienie się samochodów elektrycznych jest wpływ procesu ładowania samochodów elektrycznych na rozpływy mocy w sieci, który został opisany i oceniony w [A5] oraz [B3]. Samochód elektryczny jako odbiornik energii różni się od tradycyjnych odbiorników tym, że jego lokalizacja w sieci ulega zmianie. Również moce i czasy ładowania są uzależnione od użytkowania pojazdu (warunków na drodze). Lokalne warunki sieciowe prowadzić mogą do ładowania kontrolowanego, które w przypadku dwukierunkowych układów dostaw energii może prowadzić również do kontrolowanego rozładowywania akumulatora pojazdu. Wszystkie funkcjonalności, w tym sterowanie flotą przez centrum zarządzania lub przez zakład energetyczny i użytkownika pojazdu były uwzględniane w badaniach [A2][A5][A6] oraz [B2][B4][B5]. Na rysunku 15a [B3] przedstawiono rozpływy mocy (obciążenia) związane z ładowaniem pojazdów elektrycznych w wybranych, rozpatrywanych węzłach systemu elektroenergetycznego. Na podstawie analizy wyników symulacji można wyciągnąć wniosek, że obciążenie w węźle w szczególnych sytuacjach przekroczyć może znacznie dopuszczalną wartość obciążenia maksymalnego (np. 60 kW). Odpowiednie wnioski na podstawie tych badań stanowią podstawę do analizy wyboru miejsca lokalizacji punktów ładowania, konieczności wzmocnienia sieci, czy też są podstawą programów nadzorujących procesy ładowania, ograniczających okresowo moce ładowania, które autor wniosku sformułował i opisał w [A5]. Badania wpływu procesu ładowania na rozpływ mocy obejmować powinny również sieci średniego napięcia. W tym przypadku prowadzić je można na sieciach testowych opracowanych specjalnie w tym zakresie i zamodelowanych przez autora wniosku w tym celu. Przykładowe wyniki opisanych w [B5] symulacji przedstawione są na rysunku 15b. W tym przypadku badane były profile napięciowe. Widać, że dla niektórych scenariuszy dopuszczalne przedziały zmian napięcia są przekraczane zwłaszcza w godzinach wieczornych, kiedy to prywatne pojazdy elektryczne są podłączane do sieci w celu ich naładowania. Badania symulacyjne na sieci testowej pogłębione były badaniami na konkretnych sieciach lokalnych [B4]. Dla tych sieci została przeprowadzona symulacja, a analiza ich wyników prowadziła głównie do określenia elastyczności tych sieci w ramach zwiększenia obciążenia związanego z ładowaniem aut elektrycznych. Na podstawie tych symulacji i pomiarów autor wniosku zaproponował ulepszoną architekturę łańcucha elektromobilności, która umożliwia elastyczne oraz zgodne z aktualnymi warunkami sieci ładowanie pojazdów elektrycznych, opisane w [A2] oraz [A5].

Wnioski z badań i symulacji przeprowadzone przez autora wniosku w [A5] i [B3] na poziomie niskiego napięcia, wskazują, iż poprzez podłączenie do niej odbiorników

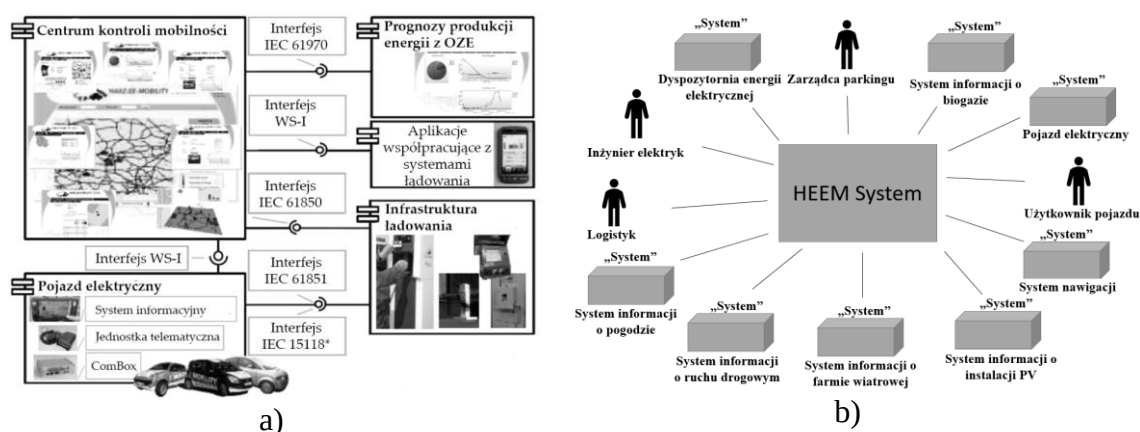
sterowanych elektronicznie, w tym wypadku stacji ładowania, sieć narażona jest na zakłócenia wynikające z przepływu prądów o częstotliwości harmonicznej generowanych przez układy energoelektroniczne. Analizie wyników badań tego zjawiska poświęcone było szereg moich publikacji [B3][B4][B5]. Badania te doprowadziły do ustalenia niezbędnych zmian w konstrukcjach układów stacji ładowania pozwalających na spełnienie wymaganych norm (m.in. EN 50160) oraz umożliwieniu za pomocą interfejsów komunikacyjnych, zaproponowanych przez autora w [A2] tzw. kontrolowanego procesu ładowania/rozładowania, który minimalizuje możliwość przeciążenia sieci elektrycznej, do której podłączone są pojazdy elektryczne.



Rysunek 16. Algorytm Smart Charging według ISO/IEC 15118 [A2].

Dzięki wykorzystaniu istniejących standardów, takich jak IEC61851 bądź powstający wtedy ISO/IEC15118, którego współautorem był autor wniosku (patrz uczestnictwo w gremiach naukowych), możliwe było również zaprojektowanie interfejsów, które miały być wykorzystywane do integracji pojazdów elektrycznych z siecią. Ponadto okazało się, że w wielu obszarach obecnie dostępne standardy są niewystarczające do zastosowania w dziedzinie elektromobilności. W tych przypadkach dokonano sensownych rozszerzeń analogicznych do istniejących definicji, które zostały opisane w [A2] i [A5]. Metodą użytą do realizacji tego zadania było zamodelowanie tzw. przypadków zastosowania (use cases), którą autor opracował, zaproponował i wykorzystał do realizacji całej architektury systemu elektromobilności, jak w [A2] oraz [A5]. Opracowana metoda definiuje różnego rodzaju przypadki zastosowania, jak na przykład: inteligentne ładowanie, uczestnika procesu, diagramy sekwencyjne (kolejności kroków) oraz opisuje parametry niezbędne do realizacji procesów, a następnie tworzy modele danych i opisuje sposoby ich wymiany – protokoły. Przykład takiego algorytmu przedstawiony jest na rysunku 16.

Podsumowaniem 4-letnich prac w latach 2008-2012 było opracowanie i uruchomienie pilotażowego systemu elektromobilności w regionie Harz w Niemczech. Na rysunku 17a i 17b przedstawiona została jego finałowa architektura. Elementy tego systemu, jak modele magazynowania dla różnych typów akumulatorów, algorytmy sterowania procesem ładowania i rozładowania samochodów elektrycznych oparte na bliźniakach cyfrowych w lokalnej sieci elektrycznej oraz szczegółowe protokoły komunikacyjne, zostały w dużej mierze opracowane przez autora wniosku lub z jego znaczącym udziałem i wdrożone w rozwiązaniach prototypowych. Szczegóły tych prac opisane zostały w [A2] i [A5]. Należy tutaj zwrócić uwagę, iż w początkowych latach rozwoju systemu elektromobilności zarówno technologia ładowania AC lub DC, moce (od 3,7kW do 200KW) oraz złącza i wtyczki (typ 1,2,3 oraz Chademo, Mennekes), a także protokoły komunikacji pomiędzy stacją ładowania i pojazdem nie były ustandaryzowane. W celu realizacji funkcji pełnego monitorowania i sterowania elementami systemu elektromobilności, w tym szczególnie pojazdów elektrycznych i stacji ładowania, opracowany został układ połączeń komunikacyjnych, który uwzględnia istniejące standardy dla dziedziny elektromobilności (np. IEC 61851, ISOIEC15118 lub IEC 61850). W pracach [B4][B5][B6] opisano również niezbędne szczegółowe informacje podsumowujące wykonane prace.

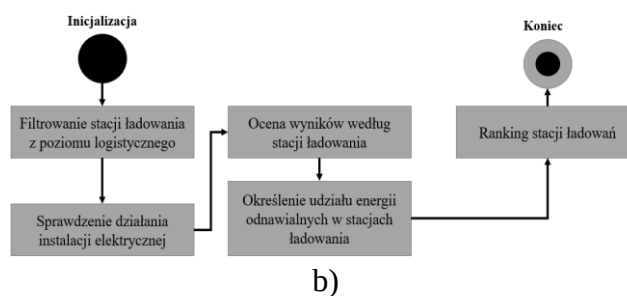


Rysunek 17. Końcowa wersja prototypowego systemu elektromobilności opracowanego przy udziale autora autoreferatu w ramach projektu pilotażowego uwzględniająca interfejsy oraz wszystkie elementy i uczestników systemu HarzEE mobility [A2]. a) architektura blokowa wraz z interfejsami dla systemu elektromobilności, b) uczestnicy systemu elektromobilności.

Dla każdego uczestnika systemu zostały zdefiniowane i opisane przypadki zastosowania (use case) oraz sekwencje kroków, które zostały opisane i przedstawione na rysunku 18a, w tym diagram dla „poszukuj najbliższej stacji ładowania” na rysunku 18b. Z wielu indywidualnych komponentów, z których część była już dostępna na początku projektu, opracowano kompleksowy system, który pozwala na realizację koncepcji mobilności elektrycznej na wszystkich rozważanych poziomach. Powstał w ten sposób całościowy system, który został przetestowany w warunkach terenowych. W szczególności autor wniosku przebadął skuteczność zaprojektowanych modeli, funkcjonalność poszczególnych elementów (pojazdy, stacje, interfejsy), akceptację użytkowników oraz interakcję całego systemu (dyspozytornia) z sąsiednimi sektorami (np. transportowym). Test na układzie rzeczywistym został uzupełniony o test laboratoryjny i symulację pojazdów elektrycznych wchodzących w interakcję z całym systemem.

Przypadek użycia	Wyznaczenie stacji ładowania
Opis	Inżynier logistyki powinien wspierać użytkownika (kierowcę) w znalezieniu odpowiedniej stacji ładowania, przy czym kierowca może wyszukiwać stacje zarówno w pobliżu swojej lokalizacji, jak i w innej lokalizacji. Stacja ładowania może zostać zaproponowana, jeżeli spełnia niezbędne warunki, w szczególności w zakresie: - dostępna na niezbędny czas ładowania, - dopuszczalny jest pożądany profil ładowania, - jest dopuszczona w odniesieniu do obciążenia sieciowego.
Uczestnik	Inżynier logistyki, inżynier elektryk
Impuls wyzwalający	Pojazd potrzebuje energii elektrycznej
Zadanie	Poszukiwanie możliwej, bezpłatnej stacji ładowania
Specyfikacja	Lokalizacja i zasięg samochodu, profile ładowania, status stacji ładowania
Wymagania	Połączenie między samochodami, profile ładowania, status stacji ładowania
Wynik	Wykaz stacji ładowania
Lokalizacja	Kierowca samochodu może wybrać stację ładowania
Niezbędne kroki	1. Zapytanie o parametry kierowcy samochodu 2. Odpytanie informacji od inżyniera elektryka 3. Ustalenie listy optymalnych stacji ładowania

a)



b)

Rysunek 18. Przykładowy tabelaryczny opis i diagram dla przypadku zastosowania: „poszukuj najbliższej stacji ładowania” [A2].

W tym celu w teście wykorzystano około 20-stu pojazdów, pochodzących od różnych producentów i przypisano je do użytkowników testowych (ponad 300 000 przejechanych i opomiarowanych km) [A2]. Użytkownicy testowi mieli również dostęp online do portalu mobilności w celu przeglądania swoich danych osobowych i procesów ładowania oraz do smartfonu zawierającego aplikację do kontroli bieżących procesów ładowania, a także dostęp do forum wymiany doświadczeń między użytkownikami pojazdów elektrycznych. W ten sposób można było sprawdzić praktyczną przydatność systemu. Akceptacja użytkowników została zbadana za pomocą ankiet [A2]. Dzięki wykorzystaniu pojazdów w rzeczywistym środowisku testowym można było zarejestrować profile jazdy, które stanowiły podstawę do prognozowania oraz ewaluacji opracowanych przez autora wniosku modeli magazynów energii, jak i służyły do proponowania metody rozmieszczenia stacji ładowania opisanej w [A5]. Oprócz mobilności (zachowanie pojazdów elektrycznych, harmonogram tras, profile jazdy), uwzględniono również prognozę pogody i obciążeń elektrycznych w celu jak najbardziej optymalnego skoordynowania czasu ładowania pojazdów elektrycznych z generacją z źródeł energii odnawialnej. W tym celu przeprowadzono odpowiednie obliczenia optymalizacyjne ze sprzężonymi obliczeniami bezpieczeństwa, które autor wniosku opisuje w [A2]. W pewnych granicach użytkownik może kontrolować ceny poszczególnych taryf ładowania, które mają być zastosowane w procesie ładowania.

W różnych badaniach laboratoryjnych przeanalizowano wykorzystanie pojazdów jako urządzenia do magazynowania energii elektrycznej z możliwością oddawania zmagazynowanej energii do sieci elektrycznej. Opracowane i wdrożone w ramach projektu stacje ładowania wspierają dwukierunkowy przepływ energii zarówno pod względem elektrycznym, jak i informatycznym, chociaż dostępne dziś na rynku pojazdy elektryczne nie oferują tej funkcji w standardzie.

W okresie ostatnich lat jako najbardziej preferowana dla samochodowych akumulatorów okazała się technologia litowo-jonowa. Zdecydowały o tym trzy podstawowe elementy jak: wysoka gęstość energii gromadzonej w tych akumulatorach, ich niezawodność i zmniejszenie ceny jednostkowej w wyniku postępu prac w wytwarzaniu samych ogniw (wysoki stopień automatyzacji) [A2][B6]. W opublikowanym ostatnio artykule [B8] zostały omówione metody modelowania litowo-jonowych magazynów energii [A1][A2][A4][A5], jak i wnioski wynikające z dotychczasowego ich zastosowania. Widoczne jest, że w zakresie mobilnych zasobników, uzyskano wysoką dokładność

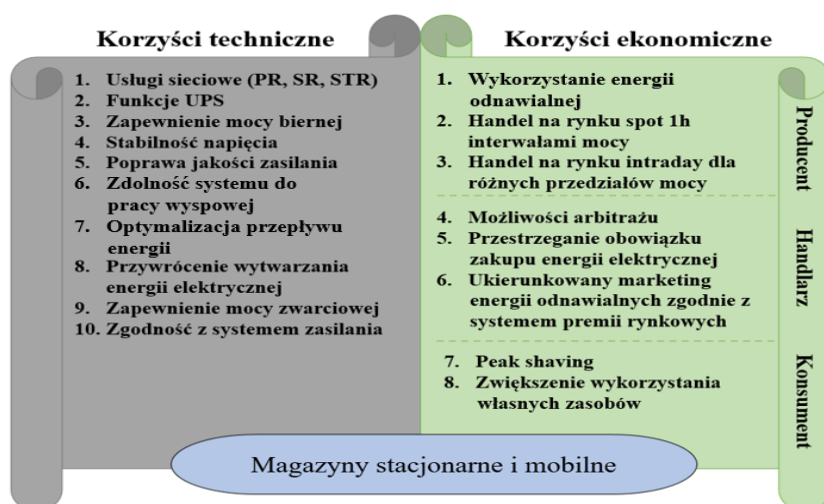
opracowanych modeli w wyniku stosowania nowych metod modelowania (np. opartych na sztucznej inteligencji), co nie zwiększa wydatnie dokładności oceny wartości SOC [A2].

Magazyny stacjonarne są coraz częściej wykorzystywane i instalowane w sieciach elektrycznych, aczkolwiek ich wykorzystanie musi być ekonomicznie uzasadnione w przypadku, gdy łączą ze sobą szereg funkcji wspomagania pracy sieci [A4], a ich wymiarowanie musi być dokładnie dopasowane do wybranych zakresów zastosowań (use cases).

4c.5. Zdecentralizowane zasobniki energii – modele, funkcje i przypadki zastosowań (use cases)

Zastosowanie AZaE jako stacjonarnych elementów wspomagania pracy systemu elektroenergetycznego ma długą tradycję. W moich badaniach zajmowałem się zarówno aspektami modelowania tych zasobników dla celów planowania eksploatacji jak i prowadzenia pracy operacyjnej (metody wspólne dla zasobników mobilnych i stacjonarnych) oraz problematyką ich zastosowań. Znalezienie zastosowań decyduje o przydatności danej technologii, a co za tym idzie i o jej dalszym rozwoju.

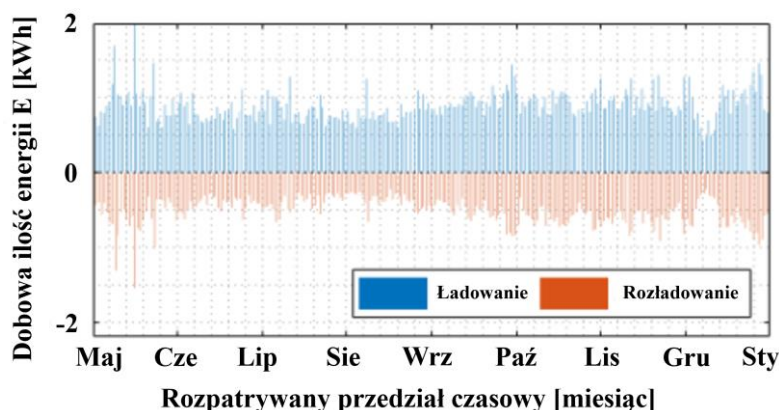
Głównym elementem decyzyjnym w zastosowaniu zasobników stacjonarnych jest analiza techniczno-ekonomiczna. Ocena ekonomiczna dokonywana jest z zastosowaniem obliczania kosztów zdyskontowanych cyklu użycia AZaE tzw. LCC (liberie cross) [A4]. Jeżeli wartość kosztów zdyskontowanych podzielimy przez ilość wyprodukowanej energii (lub prognozę ilości wyprodukowanej energii) uzyskujemy w wyniku tego działania uśrednione koszty pozyskania energii (LCOE). Ten wskaźnik jest często używany do charakteryzowania technologii, również technologii ZaE [A1][A4].



Rysunek 19. Możliwości zastosowania magazynów energii [A4].

Opracowania oparte na obliczeniach ekonomicznych prowadzone przeze mnie wykazywały zalety różnego rodzaju technologii ZaE i służyły do ich doboru w różnych rozwiązaniach. Niemniej jednak należy tutaj rozpatrywać możliwość użytkowania magazynu energii do celów czysto komercyjnych lub szeroko rozumianego wsparcia sieci, które przedstawiłem w [A4], jak również na rysunku 19. W wyniku przeprowadzenia wielu obliczeń symulacyjnych dla różnych przypadków zastosowania AZaE sprawdzono, że obecnie tylko wielofunkcyjne zastosowanie zasobnika energii, np. jednocześnie do celów

przesuwania szczytów obciążeń i funkcji systemowych (jak na przykład regulacja napięcia) jest w szczególnych warunkach ekonomicznie uzasadniona.



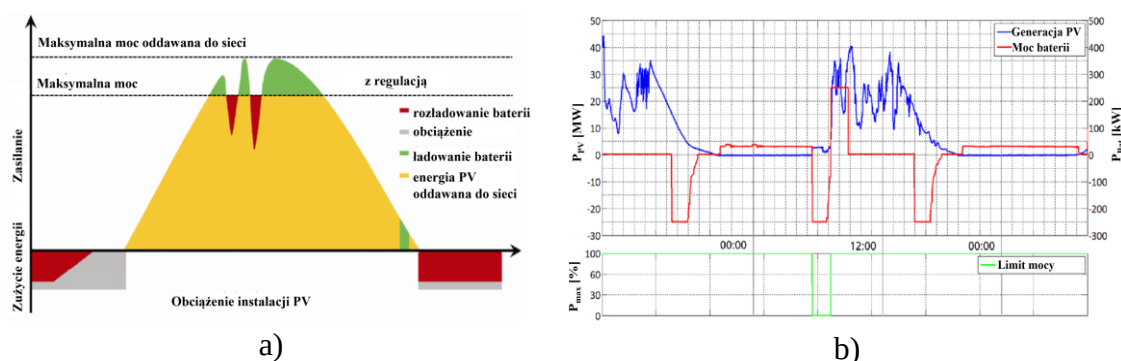
Rysunek 20. Bilans AZaE pracującego w reżimie wygładzania szczytów mocy [B6].

Głównym elementem wpływającym negatywnie na wiele analizowanych przez mnie scenariuszy biznesowych są jednostkowe koszty inwestycyjne magazynów energii oraz aktualnie istniejące ramy regulacyjno-rynkowe, które w znaczny sposób ograniczają bądź czasem wręcz uniemożliwiają ekonomiczne użytkowania magazynów [A1] [A4] oraz [B6]. W ramach projektów badawczych, ale również przy wykorzystaniu wyposażenia laboratorium C1, wykonałem szereg pomiarów dla różnych scenariuszy wykorzystania dużych zasobników energii poprzedzonych systematycznymi badaniami symulacyjnymi. Obejmowały one takie scenariusze jak [A1][A4][A7][B6]:

- współpraca zasobnika z OZE (farmy PV lub farmy wiatrowe),
- zastosowanie zasobników energii do stabilizacji napięcia w sieci,
- zastosowanie zasobników energii do poprawy jakości energii,
- zastosowanie zasobników energii w funkcji FFR (fast frequency response) oraz jako układów awaryjnego zasilania,
- optymalna współpraca magazynu energii z lokalnym systemem EMS jako elementu zwiększenia efektywności energetycznej w zakładach produkcyjno-przemysłowych.

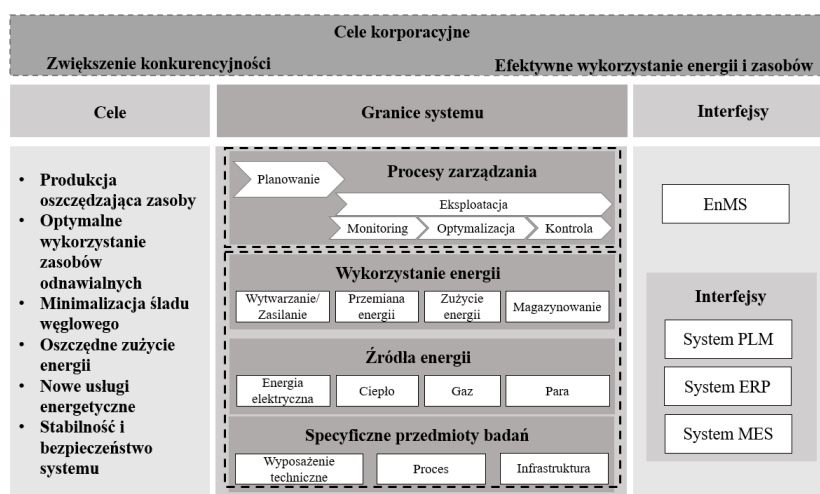
Wynika z nich, że dzisiejsze technologie AZaE są dostatecznie niezawodne i mogą być w pełni technicznie używane w zastosowaniach sieciowych. Na rysunku 20 pokazano wielomiesięczną pracę AZaE o mocy 10 MW [B6].

Założenia do badań współpracy AZaE z farmą fotowoltaiczną o mocy 144 MWp, do której podłączony był magazyn o mocy 1 MW i pojemności 500 kWh, została opisana w [A4]. Farma fotowoltaiczna miała ograniczoną moc przyłączenia, która leżała poniżej mocy maksymalnej farmy. Założono, że część energii, która nie mogła zostać sprzedana do sieci, może być wykorzystana dla ładowania zastosowanego AZaE. Energia zgromadzona w zasobniku będzie wykorzystywana w nocy jako zasilanie potrzeb własnych farmy PV, co jest przykładem wielozadaniowego i jednoczesnego zastosowania magazynu energii i jest jednym z głównych wniosków zawartych w [A4] oraz przedstawione przykładowo na rysunku 21.

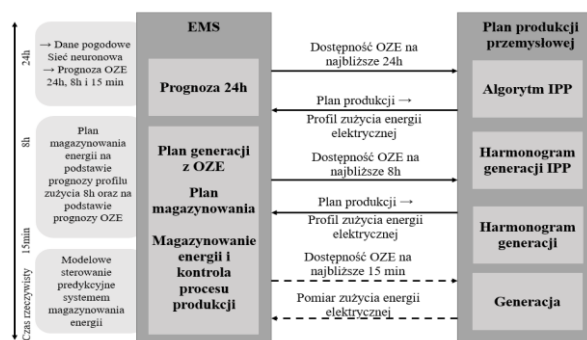


Rysunek 21. Współpraca AZaE z farmą fotowoltaiczną o mocy 144 MWp. a) zasada gromadzenia nadwyżki energii produkowanej przez farmę PV w ciągu dnia w celu wykorzystania jej na potrzeby własne w nocy, b) rzeczywisty przebieg współpracy AZaE z farmą fotowoltaiczną [A4].

Integracja magazynów energii jest bardzo istotna ze względu na transformację energetyczną różnych sektorów, w tym przemysłu. Wiele zakładów przemysłowo-produkcyjnych decyduje się na instalację OZE w celu zmniejszenia emisji, a w dalszej perspektywie uniezależnienia się choć w pewnej części od systemu elektroenergetycznego. Instalacje microgridowe przy zakładach przemysłowych charakteryzują się jednak zdecydowanie inną krzywą obciążenia w stosunku do gospodarstw domowych. Często różnią się one między sobą w zależności od procesu technologicznego (produkcja ciągła, okresowa, produkcja towarów na sztuki) lub systemem pracy (24/7 lub tryby wielozmianowe). Warunki te, jak i rosnąca potrzeba transformacji również sektora transportu towarów, spowodowały, iż mamy do czynienia ze wzrostem zastosowania stacjonarnych i mobilnych magazynów energii w zakładach przemysłowych, które to zagadnienie opisane zostało w [A6] i [A4] oraz [A1]. Realizacja tego rodzaju układów OZE – magazyn – obiorca energii wymaga integracji i sprzężenia nie tylko aspektów technicznych prowadzenia sieci elektroenergetycznych, ale również różnego rodzaju energii jak gaz czy ciepło, ale też procesów technologicznych [A6], które są realizowane w ramach inteligentnego systemu zarządzania energią i mediami (EMS) [A6], patrz rysunek 22.



Rysunek 22. Cele inteligentnego systemu EMS [A6].



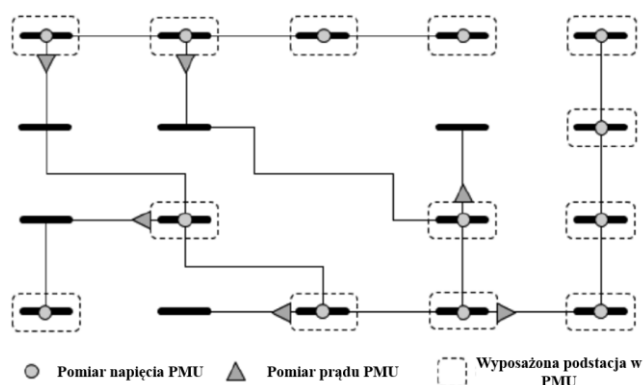
Rysunek 23. Harmonogram i schemat wymiany danych dla inteligentnego EMS [A6].

W ramach [A6] opracowana została również architektura wymiany danych i informacji niezbędna do realizacji inteligentnego EMS w połączeniu z ciągiem produkcyjnym, oraz zrealizowany został układ pilotażowy integrujący instalację fotowoltaiczną, magazyn energii oraz aplikację umożliwiającą efektywne i ekonomicznie optymalne monitorowanie, prognozowanie oraz sterowanie każdym elementem systemu zgodnie z automatycznie generowanym harmonogramem i schematem wymiany danych, przedstawionym na rysunku 23. W ramach dalszych badań nad integracją zasobników energii do procesów produkcyjnych opracowałem koncepcję systemu dotyczącego łączenia poszczególnych sektorów w kontekście pełnionej roli i dalszego niezbędnego rozwoju sieci elektrycznych, jako całościowego systemu energetycznego (GES – General Energy System). Do metodycznego opisu GES posłużyłem się zaprojektowanym modelem węzła energetycznego (Energy Hub), który zakłada multimedialne połączenie źródeł i odbiorców energii w każdym węźle sieci. Koncepcja może być rozwinięta do modelu MES (Multimedia energy system), który również został szczegółowo opisany w [A3]. Zastosowanie opracowanych modeli, jak i opracowane przeze mnie rozwinięcie omówiłem i analizowałem na konkretnych przykładach ze szczególnym uwzględnieniem procesów optymalizacji i przy uwzględnieniu następujących metod: metody scenariuszów, metody programowania dynamicznego wg Bellmana i metody całkowito-liczbowego programowania liniowego (MILP). Opracowałem metody nowego, elastycznego pod względem energetycznym kształtowania procesów technologicznych w różnych zakładach produkcyjnych z wykorzystaniem metodologii flex-grafów. Zaproponowana przeze mnie metoda umożliwia optymalizację użytkowania nie tylko zróżnicowanych źródeł energii, ale i zasobników energii w optymalizacji energetycznej procesów produkcyjnych. Opracowałem koncepcję transformacji procesów technologicznych oraz modeli danych sprzęgających procesy oraz sektory, które niezbędne są do parametryzacji modeli węzłów energetycznych w modelu Energy Hub. Opracowanie zaproponowanych przeze mnie modeli odbywało się metodą blackbox pierwszego i drugiego stopnia [A3].

Bardzo ważnym warunkiem integracji ZaE do systemu elektroenergetycznego było zapewnienie dokładnego i niezawodnego systemu monitoringu dynamicznie pracującej sieci elektroenergetycznej. Spełnienie tego wymogu możliwe jest m.in. dzięki użyciu pomiarów synchronicznych oraz optymalizacji algorytmu estymacji stanu, tak aby dzięki szybkim pomiarom w dokładny sposób określać potrzeby, ale i możliwości systemu elektroenergetycznego (stabilność, rynek energii) [A7]. Jest to niezbędne w systemie elektroenergetycznym z dużym udziałem OZE jak i innych dynamicznie zarządzanych elementach sieci, jak magazyny energii, czy też uczestnicy rynku energii [A6]. Historycznie, sieci dystrybucyjne, w których dziś jest najwięcej zainstalowanych OZE, projektowane były jako systemy rozdzielcze i jako takie nie podlegały szczegółowemu

opomiarowaniu (poza pomiarem zużycia energii). Pojawienie się prosumentów i powstanie kompleksowych rozplądów mocy również ze względu na zmienne obciążenie (w miejscu i czasie) poprzez ładowanie samochodów elektrycznych skierowało uwagę na opracowanie specjalnych metod monitoringu sieci rozdzielczej. Opracowane z moim udziałem metody bazujące na rozszerzeniu estymacji stanu systemu w oparciu o pomiary synchroniczne i umożliwiające szybkie, dokładne i dynamiczne monitorowanie sieci zostały wdrożone w ramach pilotażowego systemu 110 kV [A7]. Urządzenia typu PMU zostały zainstalowanych w wyznaczonych uprzednio preferowanych miejscach w sieci, a pomiary z nich pozwoliły określić stan tej sieci w czasie rzeczywistym z wykorzystaniem bliźniaka cyfrowego. Na rysunku 24 schematycznie przedstawiono badany system.

Konwencjonalne algorytmy estymacji stanu wykorzystują pomiary asynchroniczne, natomiast algorytm liniowej estymacji stanu (LSE) może być zastosowany, gdy wykorzystywane są tylko pomiary z PMU. Bezpośrednia relacja pomiędzy pomiarami a zmiennymi stanu tworzy układ równań liniowych, co upraszcza i przyspiesza obliczenia. W celu usprawnienia estymacji stanu (zwiększenia jej dokładności i skrócenia czasu obliczeniowego) opracowana została w moim zespole hybrydowa metoda estymacji stanu, która została następnie zaimplementowana na wspomnianym wyżej systemie rzeczywistym. Porównanie podstaw matematycznych algorytmów konwencjonalnego, liniowego i nowo opracowanego algorytmu hybrydowego podano w tabeli 1.

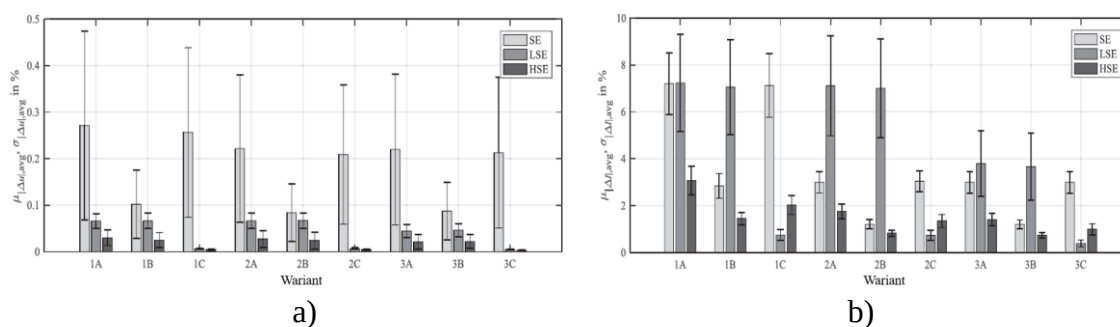


Rysunek 24. Sieć dystrybucyjna 110 kV z konfiguracją pomiarową PMU [A7].

Tabela 1. Konwencjonalny, liniowy i hybrydowy opis estymacji stanu.

Konwencjonalna estymacja stanu	Liniowa estymacja stanu	Jednoetapowa hybrydowa estymacja stanu
$z_{kon.} = \mathbf{h}_{kon.}(x) + \varepsilon_{kon.}$	$z_{PMU} = \mathbf{H}_{PMU}(x) + \varepsilon_{PMU}$	$\begin{bmatrix} z_{kon.} \\ z_{PMU} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_{kon.}(x) \\ \mathbf{H}_{PMU}(x) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{kon.} \\ \varepsilon_{PMU} \end{bmatrix}$

Jak wynika z przedstawionych na rysunku 25 wyników obliczeń, nowa metoda wykazuje najlepszą dokładność w przypadku wszystkich testowanych scenariuszy. Opracowana metoda pozwala na dokładny monitoring stanu sieci elektroenergetycznej zawierającej wiele dynamicznych elementów jak OZE czy stacjonarne bądź mobilne magazyny energii.



Rysunek 25. Porównanie błędów w estymacji prądu i napięcia dla testowanych metod [A7].
 a) porównanie błędów w estymacji napięcia i statystycznym jego rozkładzie dla testowanych metod, b) porównanie błędów w estymacji prądu i statystycznym jego rozkładzie dla testowanych metod.

4c.6. Podsumowanie

Prowadzone przez autora wniosku prace koncentrowały się na udoskonaleniu istniejących metod modelowania, planowania i eksploatacji stacjonarnych magazynów energii oraz opracowaniu nowych, efektywnych algorytmów, dopasowanych do aktualnej dynamiki pracy sieci elektroenergetycznej z dużym udziałem OZE i magazynów energii oraz nowych warunków rynkowych i metod ich integracji. W dziedzinie elektromobilności autor wniosku koncentrował się na możliwości zastosowania metod modelowania magazynów energii w nowej dziedzinie jaką jest elektromobilność oraz opracowaniu jednolitego i zintegrowanego systemu elektromobilności sprzęgającego z sobą sektor energetyczny, transportowy i informatyczny.

Prace autora wniosku w zakresie tematu przedstawionego do oceny jako dorobek habilitacyjny scharakteryzować można jako teoretyczno-koncepcyjne o silnym charakterze wdrożeniowym. Większość prowadzonych przez autora wniosku badań wymagała opracowania szeregu autorskich koncepcji, metod oraz algorytmów, które w istotnej części były ewaluowane za pomocą programów symulacyjnych, testów laboratoryjnych oraz praktycznych pilotażowych instalacji do analizy planowania oraz eksploataowania stacjonarnych i mobilnych magazynów energii przy uwzględnieniu aspektów technicznych oraz ekonomicznych.

Do najważniejszych osiągnięć badań autora wniosku należą:

1. Opracowanie modeli magazynów energii stacjonarnych i mobilnych dla różnorodnych zadań planowania i wsparcia w czasie eksploatacji sieci elektroenergetycznej (modele statyczne i dynamiczne) [A1][A2][A4], w tym:
 - opracowanie modeli statycznych i dynamicznych stacjonarnych magazynów energii dla różnych technologii,
 - opracowanie modeli statycznych i dynamicznych akumulatorów samochodowych wykorzystywanych do zasilania ich napędu w kontekście optymalnego wymiarowania i użytkowania.
2. Opracowanie metod planowania i projektowania łańcucha systemu elektromobilności: interfejsów komunikacyjno-informacyjnych poszczególnych elementów (pojazd elektryczny – stacja ładowania – sieć elektroenergetyczna – użytkownik końcowy) jak i całego systemu oraz centralnej dyspozytorni monitoringu, sterowania i zabezpieczenia oraz metod projektowania i rozmieszczenia infrastruktury ładowania [A2][A5], w tym:

- opracowanie algorytmu optymalnego ładowania i rozładowania akumulatorów samochodowych w kontekście zastosowanych technologii,
 - opracowanie metody optymalnego rozmieszczenia i koncepcji standardowej stacji ładowania uwzględniając wymagania elektryczne, informatyczne i mechaniczne (moce, sygnały kontrolne i sterujące, standaryzacja złączy, interfejs użytkownika, interfejs dla sieci elektroenergetycznej, wymogi uwzględniające miejsce i rodzaj użytkowania),
 - opracowanie architektury informacyjno-komunikacyjnej (interfejsy, modele i protokoły wymiany danych i informacji) dla poszczególnych elementów systemu jak i całości oraz opracowania koncepcji centralnej dyspozytorskiej sterowania systemem elektromobilności wraz z katalogiem funkcji.
3. Opracowanie metody oceny techniczno-ekonomicznej zastosowania magazynów energii w sieci elektroenergetycznej [A4][A6] jako elementu sprzężenia sektorowego [A3] z wykorzystaniem opracowanej metody opierającej się na dynamicznej estymacji stanu sieci elektrycznej z dużym udziałem OZE [A7]. Do opracowań zaliczyć można:
- opracowanie metod optymalnego planowania i algorytmów sterowania magazynów energii w zależności od rodzaju jego zastosowania,
 - opracowanie metod oceny ekonomicznej zastosowania magazynów energii w sieci elektroenergetycznej,
 - opracowanie modelu łączenia poszczególnych sektorów jako całościowego systemu multienergetycznego oraz współpracowanie hybrydowego algorytmu estymacji stanu sieci z dużą ilością zainstalowanych OZE.

4d) Projekty, wzory użytkowe, patenty, przeprowadzone ekspertyzy, zlecenia dla przemysłu.

Projekty zrealizowane:

- (1) Projekt NEWAG – Pojazd elektryczny jako magazyn energii dla sieci elektrycznej, projekt badawczo-rozwojowy na zlecenie Krebs&Aulich GmbH, Derenburg, realizowany w latach 2008-2010. Charakter udziału autora wniosku w projekcie: współpracownik. Opracowanie koncepcji integracji aut elektrycznych z siecią elektroenergetyczną, analiza wymogów technicznych.
- (2) Projekt E-Charger – stacja ładowania, projekt badawczo-rozwojowy zrealizowanych z wewnętrznych środków finansowych Fraunhofer IFF, Magdeburg, realizowany w latach 2008-2009. Charakter udziału autora wniosku w projekcie: koordynator, współpracownik. Opracowanie koncepcji stacji ładowania pojazdów elektrycznych, oraz współudział w realizacji testów i ocena wyników.
- (3) Projekt RegModHarz – Zrównoważone i efektywne zaopatrzenie w energię poprzez skoordynowane wytwarzanie energii ze źródeł odnawialnych i dostosowane do tego zużycie na rynkach regionalnych, projekt badawczo-rozwojowy w ramach wygranego konkursu Ministerstwa Gospodarki i Ochrony Klimatu Niemiec, realizowany w latach 2008-2012. Charakter udziału autora wniosku w projekcie: koordynator pakietu roboczego Elektromobilność a wirtualna elektrownia, współpracownik. Opracowanie koncepcji integracji elektromobilności do wirtualnej elektrowni, a także koncepcji i budowy stacji ładowania typu Wallbox.

- (4) Projekt Harz.RenewableEnergies-mobility, projekt badawczo-rozwojowy w ramach wygranego konkursu Ministerstwa Gospodarki i Ochrony Klimatu Niemiec, realizowany w latach 2009-2011. Charakter udziału autora wniosku w projekcie: współkoordynator całego projektu (konsorcjum złożone z 16 partnerów z różnych krajów), współpracownik. Opracowanie architektury komunikacji, wymiany danych oraz centrali monitorowania i sterowania systemu elektromobilności.
- (5) Projekt Net2Storage – Studium wykonalności – Integracja magazynów wielkoskalowych w strukturach sieci dystrybucyjnej, projekt badawczo-rozwojowy na zlecenie RWE AG, Essen, realizowany w latach 2012-2013. Charakter udziału autora wniosku w projekcie: koordynator, współpracownik. Opracowanie modeli magazynów energii, opracowanie modelu symulacyjnego, opracowanie scenariuszy testowych oraz opracowanie katalogu optymalnych warunków współpracy magazynu z siecią dystrybucyjną.
- (6) Projekt eNterop – Drive international standardization to enter V2G operation on a broad basis, projekt badawczo-rozwojowy w ramach wygranego konkursu Ministerstwa Gospodarki i Ochrony Klimatu Niemiec, realizowany w latach 2012-2014. Charakter udziału autora wniosku w projekcie: współpracownik. Opracowanie koncepcji układu do testowania komunikacji pomiędzy pojazdem elektrycznym a stacją ładowania zgodnie ze standardem ISO/IEC15118-4.
- (7) Projekt E-Infra – studium wykonalności i zastosowania pojazdów elektrycznych do transportu towarów i osób wewnątrz zakładu przemysłowego, projekt badawczo-rozwojowy na zlecenie InfraLeuna GmbH, Leuna, realizowany w 2012. Charakter udziału autora wniosku w projekcie: koordynator, współpracownik. Opracowanie koncepcji zastosowania pojazdów elektrycznych na terenie zakładu przemysłowego oraz opracowanie przewodnika wymiany floty na pojazdy elektryczne, dokonanie analizy wykonanych pomiarów.
- (8) Projekt SGEES – SmartGridEnergyStorageSystem, projekt badawczo-rozwojowy w ramach wygranego konkursu Ministerstwa Nauki, Energii, Ochrony Klimatu i Środowiska Landu Saksonii-Anhalt, realizowany w latach 2013-2014. Charakter udziału autora wniosku w projekcie: koordynator, współpracownik. Opracowanie koncepcji oraz określenie właściwości oraz sposobów użytkowania badawczego magazynu energii elektrycznej o mocy 1 MW, pojemności użytkowej 500kWh, opracowanie koncepcji przyłączenia i realizacji całego układu, współudział w testach pracy SGEES oraz dokonanie analizy otrzymanych wyników pomiarowych.
- (9) Projekt Storage Technical Due Diligence, projekt badawczo-rozwojowy na zlecenie Upside GmbH, Berlin, realizowany w latach 2013-2014. Charakter udziału autora wniosku w projekcie: koordynator, współpracownik. Opracowanie katalogu wymagań technicznych i analiza możliwości ekonomicznych zastosowania magazynu energii do udziału w regulacji pierwotnej systemu elektroenergetycznego.

- (10) Projekt GreenChain – łańcuch ekologicznej mobilności, projekt badawczo-rozwojowy w ramach wygranego konkursu Ministerstwa Gospodarki i Ochrony Klimatu Niemiec, realizowany w latach 2013-2015. Charakter udziału autora wniosku w projekcie: koordynator, współpracownik. Opracowanie koncepcji integracji pojazdów elektrycznych z infrastrukturą budynków wielorodzinnych współudział w implementacji pilotażowego systemu integracji pojazdów elektrycznych z infrastrukturą budynków mieszkalnych.
- (11) Projekt Storage – Studium wykonalności – analiza potencjału użytkowania magazynowania energii elektrycznej w obszarze sieci elektroenergetycznej, projekt badawczo-rozwojowy na zlecenie EWE GmbH, Hamburg, realizowany w latach 2014-2015. Charakter udziału autora wniosku w projekcie: koordynator, współpracownik. Dokonana analiza możliwości technicznego oraz rynkowego zastosowania magazynów energii zainstalowanych w sieciach dystrybucyjnych oraz opracowanie optymalnych przykładów integracji i współpracy magazynu z siecią dystrybucyjną.
- (12) Projekt ENERPARC – Opracowanie i testowanie optymalnych rynkowo strategii operacyjnych na przykładzie systemu magazynowania opartego na technologii akumulatorowej o mocy 1 MW, projekt badawczo-rozwojowy na zlecenie Enerparc GmbH, Hamburg realizowany w latach 2014-2015. Charakter udziału autora wniosku w projekcie: koordynator, współpracownik. Zakres prac obejmował opracowanie modeli integracji magazynu energii do farmy fotowoltaicznej o mocy 144 MWp, opracowanie koncepcji algorytmów współpracy magazynu i farmy fotowoltaicznej wraz z rynkiem energii, współudział w praktycznej implementacji i dokonanie analizy współpracy instalacji z siecią dystrybucyjną.
- (13) Projekt RENplus – Naukowo-techniczny monitoring, pomiary i ocena systemu magazynowania baterii LiFe o mocy 5 MW, projekt badawczo-rozwojowy na zlecenie Upside GmbH, Berlin, realizowany w latach 2014-2019. Charakter udziału autora wniosku w projekcie: koordynator, współpracownik. Opracowanie algorytmu monitorowania parametrów pracy magazynu energii i ocena jego właściwości. Wykonana została analiza dokładności sterowania systemem przez algorytmy nadrzędne.
- (14) Projekt RIGRID Inteligentne Sieci Elektroenergetyczne na obszarach wiejskich, projekt badawczo-rozwojowy w ramach wygranego konkursu europejskiego ERA Net SmartGrid Plus, realizowany w latach 2016-2018. Charakter udziału autora wniosku w projekcie: koordynator, współpracownik. Opracowanie metod oraz algorytmów użytkowania magazynu energii z OZE na obszarach wiejskich w celu podniesienia niezawodności zasilania oraz zwiększenia integracji OZE z sieciami dystrybucyjnymi.
- (15) Projekt RELINK – Technologia inwerterów oparta na energoelektronice jako połączenie między zdecentralizowanymi systemami AC i DC w celu integracji odnawialnych źródeł energii i magazynów energii oraz zapewnienia przyszłych usług sieciowych, projekt badawczo-rozwojowy w ramach wygranego konkursu Ministerstwa Gospodarki i Ochrony Klimatu Niemiec, realizowany w latach 2016-2018. Charakter udziału autora wniosku w projekcie: koordynator, współpracownik. Opracowanie metody oraz wymogów bezpośredniej integracji magazynów energii do sieci DC, ocena możliwości technicznych oraz ekonomicznych współpracy magazynów energii z OZE w sieciach DC.

- (16) Projekt RKWH – Implementacja dużego systemu akumulatorów w farmie wiatrowej celu realizacji ekologicznej i ekonomiczno-technicznej zoptymalizowanej pracy operacyjnej, projekt badawczo-rozwojowy na zlecenie RKWH GmbH, Dardesheim, realizowany w latach 2017-2018. Charakter udziału autora wniosku w projekcie: koordynator, współpracownik. Opracowanie modelu i algorytmu wymiarowania magazynu energii do współpracy z farmą wiatrową, wykonana została analiza technicznych warunków przyłączeniowych oraz modelu biznesowego.
- (17) Projekt E-Mobility4GridService – rozwój i testowanie obecnych i przyszłych koncepcji i usług typu "vehicle for grid" w lokalnych sieciach energetycznych, projekt badawczo-rozwojowy w ramach wygranego konkursu Ministerstwa Nauki, Energii, Ochrony Klimatu i Środowiska Landu Saksonii-Anhalt, realizowany w latach 2018-2021. Charakter udziału autora wniosku w projekcie: koordynator, współpracownik. Opracowanie algorytmów sterowania, opracowanie programu sterującego dla świadczenia usług sieciowych przez pojazdy elektryczne.
- (18) Projekt ACES – Rozwój i testowanie technologii pomiarowych i logiki sterowania dla magazynów energii oraz dla ich efektywnej kosztowo integracji z siecią elektryczną, projekt badawczo-rozwojowy w ramach wygranego konkursu europejskiego ERA Net SmartGrid Plus, realizowany w latach 2018-2021. Charakter udziału autora wniosku w projekcie: współpracownik. Opracowanie układu testującego szybką metodę pomiarową dla wewnętrznego systemu zarządzania baterią (BMS), opracowanie wielowymiarowych scenariuszy testowych i dokonanie analizy wyników.
- (19) Projekt RELflex – Energie odnawialne i elastyczność obciążenia w przemyśle, projekt badawczo-rozwojowy w ramach wygranego konkursu europejskiego ERA Net SmartGrid Plus, realizowany w latach 2018-2021. Charakter udziału autora wniosku w projekcie: koordynator, współpracownik. Opracowanie algorytmów sterowania, oraz integracji stacjonarnych oraz mobilnych magazynów energii do procesów przemysłowych oraz współrealizacja pilotażowej instalacji.
- (20) Projekt Kielflex – Kiel jako miasto wzorcowe dla instalacji infrastruktury ładowania w elastycznej sieci elektroenergetycznej w celu realizacji redukcji emisji w sektorze transportu, projekt badawczo-rozwojowy w ramach wygranego konkursu Ministerstwa Gospodarki i Ochrony Klimatu Niemiec, realizowany w latach 2018-2021. Charakter udziału autora wniosku w projekcie: współpracownik. Opracowanie algorytmów optymalnej integracji OZE do ładowania pojazdów elektrycznych w budynkach mieszkalnych oraz opracowanie konceptu algorytmu sterowania flot autobusów elektrycznych zgodnie z wymogami i możliwościami sieci elektroenergetycznej.
- (21) Projekt eUP – Aplikacja Emobility Control Center, projekt badawczo-rozwojowy na zlecenie Siemens AG, Monachium, realizowany w latach 2019-2022. Charakter udziału autora wniosku w projekcie: koordynator, współpracownik. Opracowanie koncepcji nowych funkcjonalności elektromobilności do aplikacji dyspozytorskiej (monitorowanie, sterowanie, ochrona) oraz opracowanie koncepcji integracji ponadsektorowej (transport, sieci elektroenergetyczne), zaproponowanie katalogów przypadków zastosowania, współudział w implementacji pilotażowego systemu.

- (22) Projekty Mobility4U – aplikacja dla przyszłych użytkowników pojazdów elektrycznych, projekt badawczo-rozwojowy w ramach wygranego konkursu Ministerstwa Nauki, Energii, Ochrony Klimatu i Środowiska Landu Saksonii-Anhalt, realizowany w latach 2019-2020. Charakter udziału autora wniosku w projekcie: koordynator, współpracownik. Opracowanie aplikacji umożliwiającej użytkownikowi końcowemu uwzględnienie jego specyficznych wymagań związanych z elektromobilnością w celu zaplanowania optymalnego systemu i komponentów dla własnych potrzeb oraz możliwości ich oceny pod względem technicznym i ekonomicznym.
- (23) Projekt Net-Zero Out: Badanie rynku dotyczące technicznej i ekonomicznej wykonalności fabryki o zerowej emisyjności przy udziale magazynów energii oraz OZE, projekt badawczo-rozwojowy na zlecenie AUDI AG, Ingolstadt, realizowany w latach 2020-2021. Charakter udziału autora wniosku w projekcie: koordynator, współpracownik. Opracowanie modelu optymalnych magazynów energii dopasowanych do procesów produkcyjnych.
- (24) Projekt Ambu eStore – Opracowanie i badanie niezawodnych i trwałych systemów magazynowania energii o dużej pojemności dla elektrycznych karet pogotowia ratunkowego oraz transportu medycznego, projekt badawczo-rozwojowy na zlecenie Ambulanzmobile, Schoenebeck, realizowany w latach 2019-2022. Charakter udziału autora wniosku w projekcie: koordynator, współpracownik. Opracowanie koncepcji magazynu energii z uwzględnieniem wymagań i potrzeb dla karet pogotowia ratunkowego, opracowanie katalogu wielowątkowych testów, testowanie i pomiary w celu ewaluacji zaproponowanego konceptu oraz dokonanie analizy otrzymanych wyników.
- (25) Projekt E-HUB – OZE i źródła magazynujące zapewniające autonomiczne dostawy energii dla inteligentnych urządzeń w publicznych przestrzeniach miejskich, realizowany w latach 2020-2021, projekt badawczo-rozwojowy w ramach wygranego konkursu Ministerstwa Nauki, Energii, Ochrony Klimatu i Środowiska Landu Saksonii-Anhalt. Charakter udziału autora wniosku w projekcie: koordynator, współpracownik. Opracowanie konceptu systemu E-HUB, jego technicznych, ekonomicznych wymagań oraz współrealizacja pilotażowego systemu.

Projekty obecnie realizowane (wybrane):

- (26) Projekt Mesh4You – Multi-zadaniowy magazyn energii do niezawodnego i komercyjnego wykorzystania w sprzężonym systemie energetycznym, projekt badawczo-rozwojowy w ramach wygranego konkursu europejskiego ERA Net SmartGrid Plus, realizowany w 2021-2023. Charakter udziału autora wniosku w projekcie: współpracownik. Opracowanie koncepcji zastosowania różnych rodzajów magazynów energii w multi-sektoralnym systemie energetycznym.
- (27) Projekt DIEGO – Cyfrowa Ścieżka dla Planowania i Eksploatacji Zrównoważonych Sieci Elektroenergetycznych, Produktów i Społeczności (Digital energy path for planning and operation of sustainable grid, products and society), projekt badawczo-rozwojowy w ramach wygranego konkursu europejskiego ERA Net SmartGrid Plus, realizowany w 2022-2024, Charakter udziału autora wniosku w projekcie: koordynator, współpracownik. Opracowanie i testowanie spójnych metod i aplikacji dla cyfrowego zintegrowanego systemu i sieci komponentów.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych (okres po uzyskaniu stopnia naukowego doktora)

5a) Do pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych, niewchodzących w skład osiągnięcia wymienionego w części 4b autor zalicza publikacje:

- (1) Pietracho, R.; Wenge, C.; Komarnicki, P.; Kasprzyk, L. Multi-Criterial Assessment of Electric Vehicle Integration into the Commercial Sector—A Case Study. *Energies* 2023, 16, 462. Liczba cytowań SCOPUS: 0. Liczba cytowań WoS: 0. Artykuł indeksowany w bazach: Web of Science, Scopus. Punkty MNiSW = 140; IF = 3.252.
- (2) Parol, M.; Wasilewski, J.; Wojtowicz, T.; Arendarski, B.; Komarnicki, P. Reliability Analysis of MV Electric Distribution Networks Including Distributed Generation and ICT Infrastructure. *Energies* 2022, 15, 5311. Liczba cytowań SCOPUS: 2. Liczba cytowań WoS: 1. Artykuł indeksowany w bazach: Web of Science, Scopus. Punkty MNiSW = 140; IF = 3.252.
- (3) Hallmann, M.; Wenge, C.; Komarnicki, P. Methods for lithium-based battery energy storage SOC estimation. Part II: Application and accuracy. *Archives of Electrical Engineering*, 2022, 71(2), pp. 311–323. Liczba cytowań SCOPUS: 1. Liczba cytowań WoS: 0. Artykuł indeksowany w bazach: Web of Science, Scopus. Punkty MNiSW = 100.
- (4) Richter, M.; Lombardi, P.; Arendarski, B.; Naumann, A.; Hoepfner, A.; Komarnicki, P.; Pantaleo, A. A vision for energy decarbonization: Planning sustainable tertiary sites as net-zero energy systems. *Energies*, 2021, 14(17), 5577. Liczba cytowań SCOPUS: 5. Liczba cytowań WoS: 2. Artykuł indeksowany w bazach: Web of Science, Scopus. Punkty MNiSW = 140; IF = 3.252.
- (5) Sokolnikova, P.; Lombardi, P.; Arendarski, B.; Suslov, K.; Pantaleo, A.M.; Kranhold, M.; Komarnicki, P. Net-zero multi-energy systems for Siberian rural communities: A methodology to size thermal and electric storage units. *Renewable Energy*, 2020, 155, pp. 979–989. Liczba cytowań SCOPUS: 42. Liczba cytowań WoS: 37. Artykuł indeksowany w bazach: Web of Science, Scopus. Punkty MNiSW = 140; IF = 8.001.
- (6) Caro-Ruiz, C.; Lombardi, P.; Richter, M.; Pelzer, A.; Komarnicki, P.; Pavas, A.; Mojica-Nava, E. Coordination of optimal sizing of energy storage systems and production buffer stocks in a net zero energy factory. *Applied Energy*, 2019, 238, pp. 851–862. Liczba cytowań SCOPUS: 19. Liczba cytowań WoS: 18. Artykuł indeksowany w bazach: Web of Science, Scopus. Punkty MNiSW = 200; IF = 8.848.
- (7) Lombardi, P.A.; Moreddy, K.R.; Naumann, A.; Komarnicki, P.; Rodio, C.; Bruno, S. Data centers as active multi-energy systems for power grid decarbonization: A technical and economic analysis. *Energies*, 2019, 12(21), 4182. Liczba cytowań SCOPUS: 6. Liczba cytowań WoS: 2. Artykuł indeksowany w bazach: Web of Science, Scopus. Punkty MNiSW = 140; IF = 2.702.
- (8) Richter, M.; Trojan, P.; Naumann, A.; Komarnicki, P. Distributed Ancillary Services in Smart Distribution Grids: Demand, Requirements and Benefits. *Energy Systems Research*, 2019, 1(4), pp. 5 - 14.

- (9) Alemany, J.M.; Arendarski, B.; Lombardi, P.; Komarnicki, P. Accentuating the renewable energy exploitation: Evaluation of flexibility options. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2018, 102, pp. 131–151. Liczba cytowań SCOPUS: 40. Liczba cytowań WoS: 35. Artykuł indeksowany w bazach: Web of Science, Scopus. Punkty MNiSW = 100; IF = 4.418.
- (10) Arendarski, B.; Rabe, S.; Heineken, W.; Komarnicki, P. Measurement accuracy verification of phasor measurement unit with dynamic phasor estimation. *Archives of Electrical Engineering*, 2018, 67(3), pp. 529–543. Liczba cytowań SCOPUS: 1. Liczba cytowań WoS: 1. Artykuł indeksowany w bazach: Web of Science, Scopus. Punkty MNiSW = 100.
- (11) Lombardi, P.; Hänsch, K.; Arendarski, B.; Komarnicki, P. Information and power terminals: A reliable microgrid infrastructure for use in disaster scenarios. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 2017, 19, pp. 49–58. Liczba cytowań SCOPUS: 6. Liczba cytowań WoS: 4. Artykuł indeksowany w bazach: Web of Science, Scopus. Punkty MNiSW = 140; IF = 2.150.
- (12) Alemany, J.; Magnago, F.; Lombardi, P.; Arendarski, B.; Komarnicki, P. Multiobjective Optimization Model for Wind Power Allocation. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017, 2017, 1876934. Liczba cytowań SCOPUS: 7. Liczba cytowań WoS: 5. Punkty MNiSW = 40; IF = 1.145.
- (13) Alemany, J.; Komarnicki, P.; Lin, J.; Magnago, F. Exploiting symmetry in unit commitment solutions for a large-scale electricity market. *Electric Power Systems Research*, 2016, 140, pp. 363–377. Liczba cytowań SCOPUS: 2. Artykuł indeksowany w bazach: Web of Science, Scopus. Liczba cytowań WoS: 3. Punkty MNiSW = 100; IF = 2.688.

5b) Działalność autora wniosku w środowisku naukowym związana jest m.in. z aktywnym uczestnictwem w międzynarodowych i krajowych organizacjach oraz towarzystwach naukowych

Uczestnictwo w niemieckich organizacjach i towarzystwach naukowych:

- Od 2022 – Przewodniczący DAK SC6 CIGRE Active distribution systems and distributed energy resources.
- Od 2020 – Członek Komisji Landu Saksonia-Anhalt do spraw wspierania strategicznych i operacyjnych procesów transformacyjnych, Niemcy.
- Od 2020 – Członek Komisji do spraw bezemisijnej gospodarki energetycznej i środowiska Ministerstwa Środowiska, Gospodarki Rolnej i Energii Landu Saksonia-Anhalt, Niemcy.
- Od 2019 – Członek Rady Naukowej ITES, Bielefeld University of Applied Sciences, Wydział Systemy Elektroenergetyczne, Bielefeld, Niemcy.
- Od 2019 – Członek Rady Naukowej do spraw wspierania i realizacji koncepcji klimatycznych i energetycznych Landu Saksonia-Anhalt, Ministerstwa Środowiska, Gospodarki Rolnej i Energii Landu Saksonia-Anhalt, Niemcy.
- Od 2019 – Członek Rady Naukowej Agencji Energetycznej Landu Saksonia-Anhalt LENA, Niemcy.

- Od 2013 – Członek Komisji DKE/K 261 Systemaspekte der elektrischen Energieversorgung (Systemowe aspekty dostaw energii elektrycznej), DKE (Niemiecka Komisja ds. Elektrotechniki, Elektroniki i Technologii Informacyjnych DIN i VDE), Niemcy.
- Od 2013 - Członek Komisji TF Smart Cities VDE ETG, VDE (Stowarzyszenie Elektrotechniczne i Informatyczne.), Niemcy.
- Od 2011 – Członek Komisji DKE/STD_1911.5 Netzintegration Elektromobilität (integracja elektromobilności z siecią elen.), DKE (Niemiecka Komisja ds. Elektrotechniki, Elektroniki i Technologii Informacyjnych DIN i VDE), Niemcy.
- Od 2011 – Członek Komisji PG Netzanalyse-Szenarien 2015 -2030 (Scenariusze analizy sieci w latach 2015 -2030), FNN (Forum Technologia i eksploatacja sieci) VDE, Niemcy.
- Od 2008 – Członek Energietechnische Gesellschaft (ETG - Towarzystwo Technologii Energetycznych) VDE.

Uczestnictwo w międzynarodowych organizacjach i towarzystwach naukowych:

- Od 2022 – niemiecki delegat do CIGRE Study Committee C6 - Active Distribution Systems and Distributed Energy Resources (Aktywne systemy dystrybucji i rozproszone źródła energii).
- Od 2020 – Członek Konwentu Wydział Elektryczny na Politechnice Wrocławskiej, Polska.
- Od 2019 – Członek Komisji "WG Europe" IEEE PES, Energy Development and Power Generation Committee (Komisja Rozwoju Energetyki i Wytwarzania Energii), International Practices Subcommittee (Podkomitet ds. praktyk międzynarodowych).
- Od 2013 – Członek IEC TC8/WG7 General Planning, Design, Operation and Control of the Micro-Grid (Planowanie ogólne, projektowanie, eksploatacja i kontrola mikrosieci).
- Od 2012 – Członek IEEE P2030.4 Draft Guide for Control and Automation Installations Applied to the Electric Power Infrastructure (Przewodnik po instalacjach sterowania i automatyki stosowanych w infrastrukturze elektroenergetycznej), IEEE, USA.
- Od 2012 – Członek grupy Smart Grid Coordination Group in the work of EU Commission Mandat M/490 (Grupa koordynacyjna Smart Grid w pracach Komisji Europejskiej).
- Od 2009 – Członek IEEE Standards Development Working Group C37.118 WG-H11 (Grupa robocza ds. opracowania norm IEEE C37.118 WG-H11), Synchrophasor Standard Working Group, IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers (Grupa robocza ds. standardu synchrofazorów, Instytut Inżynierów Elektryków i Elektroników IEEE), USA.

Autor wniosku w ramach działalności naukowej i dydaktycznej (projektów naukowych, artykułów naukowych, wykładów dla studentów) współpracował i/lub współpracuje z wieloma instytucjami naukowymi, przemysłem i uczelniami wyższymi:

Uczelnie:

- Politechnika Warszawska, Warszawa, Polska;
- Politechnika Poznańska, Poznań, Polska;
- AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków, Polska;
- Politechnika Śląska, Gliwice, Polska;
- Otto-von-Guericke University Magdeburg, Niemcy;
- Technische Universität Ilmenau, Ilmenau, Niemcy;
- Technische Universität Stuttgart, Stuttgart, Niemcy;
- Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Kiel, Niemcy;
- Università degli studi di Bari Aldo Moro, Bari, Włochy;
- University of Rome "Tor Vergata", Rzym, Włochy;
- Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, Belgia;
- School of Engineering and Architecture of Fribourg, Fribourg, Szwajcaria;
- National Technical University of Athens, Ateny, Grecja;
- University of Porto, Porto, Portugalia;
- National University of Río Cuarto, Río Cuarto, Argentyna;
- Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, USA;
- Ben Gurion University of the Negev, Beer-Sheva, Izrael;
- Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Rosja.

Instytucje naukowe:

- Instytut Energetyki w Warszawie, Polska;
- Fraunhofer Gesellschaft, Niemcy;
- Salzburg Research Forschungsgesellschaft mbH, Austria;

Przemysł:

- Siemens AG;
- AUDI AG;
- BMW AG;
- T-System AG;
- Polskie Siecie Energetyczne PSE, Polska;
- Tauron, Polska;
- Tauron Dystrybucja, Polska;
- Avacon AG, Niemcy;
- ENSO, Niemcy;
- 50Hertz Transmission GmbH, Niemcy;
- Electrum Sp.z.o.o, Polska;
- EMS Energie mit Service, Niemcy.

Autor wniosku jest także recenzentem artykułów w renomowanych czasopismach naukowych, w tym będących na liście JCR, np. recenzował prace dla takich czasopism jak: IEEE Transaction on Power Delivery (MNSiW 140 pkt.), Journal of AEE Archives of Electrical Engineering (MNSiW 100 pkt.), Journal of Power Electronics and Drives (MNSiW 20 pkt.), Emerging Electric Power Systems (MNSiW 20 pkt.), wydawnictwa

MDPI jak i prace publikowane na renomowanych konferencjach zagranicznych: IEEE PES General Meeting, PowerTech, CIRED oraz CIGRE.

Autor od wielu lat jest koordynatorem projektów w ramach przyznanych grantów w wyniku konkursów międzynarodowych i krajowych (suma 50 projektów naukowo badawczych jak i przemysłowych z łączną kwotą dofinansowania wynoszącą ponad 25 mln. €) w tym: Horyzont2020, ERA NET SES, jak i projektów finansowanych przez ministerstwa Republiki Niemiec: Federalne Ministerstwo Gospodarki i Ochrony Klimatu (BMWK), Ministerstwo Środowiska, Ochrony Przyrody i Bezpieczeństwa Reaktorów Atomowych (BMUV), Federalne Ministerstwo Oświaty i Badań Naukowych (BMBF), Ministerstwo Nauki, Środowiska i Energii Landu Saksoni Anhalt, Ministerstwo Gospodarki i Turystyki Landu Saksoni Anhalt, Bank Inwestycyjny Sachsen-Anhalt (IB). Lista wybranych projektów, których autor był lub jest koordynatorem znajduje się w punkcie 4d. Lista uczelni, instytucji naukowych oraz partnerów przemysłowych, z którymi autor współpracował podana jest w części 5b.

5c) Opieka naukowa nad studentami

Od roku 2019 autor wniosku pełni funkcję wydziałowego pełnomocnika ds. międzynarodowych wymian studenckich na kierunkach magisterskich i sprawuje opiekę nad studentami zagranicznymi studiującymi na University of Applied Science w Magdeburgu w ramach międzynarodowej wymiany z zagranicznymi uczelniami. Ponadto w ramach pełnionych obowiązków autor wniosku pomaga studentom w wyborze zajęć oferowanych na uczelni, nadzorując ich pobyt.

Niemieckojęzyczne zajęcia dydaktyczne:

- *Regenerative Energien*, wykład, ćwiczenia, laboratorium, Department of Engineering and Industrial Design, University of Applied Science, Magdeburg, Niemcy.
- *SmartGrid 1*, wykład, ćwiczenia, Department of Engineering and Industrial Design, University of Applied Science, Magdeburg, Niemcy.
- *SmartGrid 2*, wykład, Department of Engineering and Industrial Design, University of Applied Science, Magdeburg, Niemcy.
- *Elektromobilität und Sektorenkopplung*, wykład, ćwiczenia, Department of Engineering and Industrial Design, University of Applied Science, Magdeburg, Niemcy.
- *Energiespeichersysteme*, wykład, ćwiczenia, Department of Engineering and Industrial Design, University of Applied Science, Magdeburg, Niemcy.
- *Regenerative Systeme*, seminarium, Department of Engineering and Industrial Design, University of Applied Science, Magdeburg, Niemcy.

Anglojęzyczne zajęcia dydaktyczne:

- *Renewable Energy Sources*, wykład, Wydział Elektryczny, Politechnika Wrocławska, Wrocław, Polska.
- *Renewable Energy Sources*, seminarium, Wydział Elektryczny, Politechnika Wrocławska, Wrocław, Polska.
- *Energy Storage Systems*, wykład, Wydział Elektryczny, Politechnika Wrocławska, Wrocław, Polska.

- *Renewable Energy Systems*, wykład, Department of Engineering and Industrial Design, University of Applied Science, Magdeburg, Niemcy.

Ponadto autor wniosku pragnie wykazać, że:

- był opiekunem kilkudziesięciu prac inżynierskich i magisterskich w tym również opracowanych w języku angielskim,
- był opiekunem stażystów z zagranicy (Polska, Niemcy, Włochy, Hiszpania, Indie, Bangladesz, Pakistan, Ukraina) w ramach wymiany studenckiej,
- był organizatorem i opiekunem licznych krajowych i zagranicznych wyjazdów dydaktycznych dla studentów,
- organizował wykłady dla studentów przez profesorów z innych uczelni w kraju i zagranicy oraz przedstawicielami przemysłu (m.in. operator systemu przesyłowego w Niemczech – 50Hz Transmission).

Ponadto autor chciałby podkreślić, iż współpracował z Politechniką Poznańską w ramach programu europejskiego kierunku zamawianego „Energetyka z przyszłością” (projekt NCBiR POKL 04.01.02-00-088/12 w 2012-2015 roku), gdzie pełnił rolę opiekuna studentów odbywających staż w Fraunhofer Institute for Factory Operation and Automation IFF w Niemczech. Gościł on również naukowców z Wydziału Automatyki, Robotyki i Elektrotechniki w ramach programu Erasmus + Staff Mobility for Training.

5d) Opieka naukowa nad doktorantami w charakterze promotora, opiekuna naukowego lub promotora pomocniczego

1. Marcel Hallmann, 2019 – rozprawa w przygotowaniu, *KI-basierte Betriebsführung von Batteriespeichersystemen im Micro Grid* (Zastosowanie sztucznej inteligencji do zarządzania magazynami energii w sieciach MicroGrid), Department of Engineering and Industrial Design, University of Applied Science, Magdeburg, Niemcy, promotor pracy.
2. Robert Pietracho, 2020 – rozprawa w przygotowaniu, *Integration and operation of electric vehicles and their provision of system services to the electricity grid as part of the energy transformation* (Integracja i wykorzystanie pojazdów elektrycznych oraz świadczenie przez nie usług systemowych dla sieci elektroenergetycznej w ramach transformacji energetycznej), Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, Politechnika Poznańska, Poznań, Polska, opiekun naukowy.
3. Andreas Höpfner, 2017-2022 – *Methodik der integrierten Raum- und Energieplanung in Industrieparks und in industriellen Standorten* (Metodyka zintegrowanego planowania przestrzennego i energetycznego w parkach przemysłowych i terenach przemysłowych), Faculty of Mechanical Engineering, Otto-von-Guericke University Magdeburg, Niemcy, opiekun naukowy.
4. Stephan Balischewski, 2015-2020 – *Multifunktionaler Einsatz von Batteriespeichern in elektrischen Verteilnetzen, Optimale Auslegung und Betrieb* (Wielofunkcyjne wykorzystanie magazynów bateryjnych w elektrycznych sieciach dystrybucyjnych, optymalne projektowanie i eksploatacja) Faculty of Electrical Engineering and Information Technology, Otto-von-Guericke University Magdeburg, Niemcy, opiekun naukowy.

5. Illia Bielchev, 2012-2016 – *Adaptiver Distanzschutz im Standard IEC 61850* (Adaptacyjny system zabezpieczenia odległościowego w standardzie IEC 61850), Faculty of Electrical Engineering and Information Technology, Otto-von-Guericke University Magdeburg, Niemcy, opiekun naukowy.
6. Bartłomiej Arendarski, 2010-2015 – *Reliability Assessment of Smart Grids* (Ocena niezawodności inteligentnych sieci energetycznych). Faculty of Electrical Engineering and Information Technology, Otto-von-Guericke University Magdeburg, Niemcy, opiekun naukowy.
7. Christoph Wenge, 2009-2014 – *Optimaler Betrieb von mobilen Speichern im Smart Grid -Mobilitätsleitwarte-* (Optymalna praca mobilnych magazynów w inteligentnej sieci - centrum sterowania elektromobilnością). Faculty of Electrical Engineering and Information Technology, Otto-von-Guericke University Magdeburg, Niemcy, opiekun naukowy.
8. Michał Powalko, 2006-2011 – *Beobachtbarkeit eines elektrischen Verteilungsnetzes. Ein Beitrag zum Smart Grid* (Obserwowalność elektrycznej sieci dystrybucyjnej. Wkład do Smart Grid), Faculty of Electrical Engineering and Information Technology, Otto-von-Guericke University Magdeburg, Niemcy, opiekun naukowy.

6. Informacje naukometryczne

Baza Scopus (stan na 08.03.2023) indeksuje **78** publikacje autora wniosku, z czego **71** publikacji jest cytowanych **744** razy (w tym 594 cytowań bez autocytowań); **H-index** = **14**. Ponadto baza zawiera **41** publikacji nieindeksowanych w bazie Scopus (pobranych z pola View References artykułów cytujących - secondary documents) cytowanych **66** razy (w tym **18** cytowań obcych). Publikacje te są cytowane w **52** artykułach cytujących. Publikacje indeksowane są cytowane w **578** artykułach cytujących. Sumarycznie wynikiem przeszukania bazy Scopus jest **810** cytowań (w tym **612** cytowań bez autocytowań) **119** publikacji autora wniosku. Publikacje te są cytowane w **630** artykułach cytujących.

Baza Web of Science Core Collection (WoS) (stan na 08.03.2023) indeksuje **53** publikacje autora wniosku, z czego **42** publikacji jest cytowanych **234** razy (w tym **202** cytowań bez autocytowań); **H-index** = **7**. Publikacje indeksowane są cytowane w **198** artykułach cytujących (w tym **183** artykułach obcych, bez autocytowań). Sumaryczny Impact Factor dla czasopism z listy publikacji autora według Journal Citation Reports zgodnie z rokiem opublikowania wynosi: **45.964**.

Dorobek naukowy autora wniosku po uzyskaniu doktora nauk technicznych obejmuje **130** artykułów. W czasopismach z listy Journal Citation Report zostało opublikowanych **12** artykułów, a **118** opublikowano w czasopismach specjalistycznych (w monografiach i materiałach renomowanych konferencji naukowych międzynarodowych i krajowych) nieposiadających współczynnika IF (Impact Factor).

Suma punktów MNiSW publikacji autora wniosku w ramach wykazu czasopism wynosi: **2630 punktów**.

Zestawienie osiągnięć po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych			Razem
Opublikowane prace naukowe po uzyskaniu stopnia doktora			
Czasopisma	Międzynarodowe (z JCR)		15 (12)
	Krajowe (z JCR)		8 (0)
Materiały konferencyjne	Międzynarodowe		78
	Krajowe		14
Monografie naukowe			11
Rozdziały w książkach i monografiach			4
Recenzowanie artykułów dla czasopism	Międzynarodowych	18	33
	Krajowych	15	
Recenzowanie materiałów konferencyjnych	Międzynarodowych	40	50
	Krajowych	10	
Członkostwo w komitetach konferencyjnych (IEEE General Meeting USA, CIGRE, EPQU)			3
Uczestnictwo w programach Europejskich (kierowanie)			27 (14)
Członkostwo w towarzystwach naukowych			18
Prace dyplomowe inżynierskie/magisterskie			25/35
Nagrody i wyróżnienia			3
Liczba instytucji naukowych/ uczelni/ jednostek przemysłowych w ramach których realizowana była/jest współpraca			3/18/12
Zestawienie wskaźników naukometrycznych			
Sumaryczny Impact Factor (IF) publikacji z listy JCR			45.964
Indeks Hirscha według bazy WoS			7
Liczba cytowań publikacji według bazy WoS (bez autocytowań)			234 (202)
Indeks Hirscha według bazy Scopus			14
Liczba cytowań publikacji według bazy Scopus (bez autocytowań)			810 (612)
Sumaryczna liczba punktów MNiSW			2630

.....
(podpis wnioskodawcy)

Rysunek 1. Schemat elektryczny a) i informacyjno-komunikacyjny b) stanowiska nr 1.....	8
Rysunek 2. Widok na centralny system monitoringu i sterowania EOC.	9
Rysunek 3. Schemat blokowy laboratorium do testów akumulatorów (2014).....	10
Rysunek 4. Spójność zakresu tematycznego prac autora wniosku w dziedzinach elektromobilności i stacjonarnych zasobników energii.	13
Rysunek 5. Opracowany przez autora ogólny trójwarstwowy model ZaE obejmujący opisaną strukturę interfejsów [A1].	14
Rysunek 6. Struktura architektury systemu elektroenergetycznego a płaszczyzny możliwych funkcjonalności [A1].....	15
Rysunek 7. Przykładowy Use case dla magazynu energii [A1].	15
Rysunek 8. Zintegrowany model ZaE z bateriami ołowiowymi [A1].	16
Rysunek 9. Model AZaE jako digital twin [A2].	17
Rysunek 10. Wyznaczanie parametrów ZaE w celu zbilansowania obciążeń rezydualnych [A4].	18
Rysunek 11. Zarejestrowany przebieg prądu dla 3 różnych pojazdów elektrycznych podłączonych do stacji ładowania [A5].	18
Rysunek 12. Prototypowa stacja ładowania wykonana w Instytucie IFF (2008) oraz schemat elementów i interfejsów standardowej stacji ładowania [A2][B1]. a) prototypowa stacja ładowania, b) schemat elementów i interfejsów standardowej stacji ładowania.	19
Rysunek 13. System komunikacji i akwizycji danych o stanie magazynu energii w samochodzie elektrycznym i ich udostępnianie. a) ogólny schemat, b) fragment zaadaptowanego protokołu CAN [A2].	20
Rysunek 14. Wyniki symulacji dla służbowego pojazdu elektrycznego [B2] oraz przykładowa charakterystyka ładowania akumulatora samochodu elektrycznego z akumulatorami ołowiowymi [B2]. a) Wyniki symulacji dla służbowego pojazdu elektrycznego, b) przykładowa charakterystyka ładowania akumulatora samochodu elektrycznego z akumulatorami ołowiowymi.	21
Rysunek 15. a) wpływ procesu ładowania samochodów elektrycznych na rozpiętość mocy w sieci, moc w węźle nr 6 (parking) [B3] oraz b) wpływ procesu ładowania samochodów elektrycznych na poziomy napięcie w sieci średniego napięcia [B5].....	21
Rysunek 16. Algorytm Smart Charging według ISO/IEC 15118 [A2].	23
Rysunek 17. Końcowa wersja prototypowego systemu elektromobilności opracowanego przy udziale autora autoreferatu w ramach projektu pilotażowego uwzględniająca interfejsy oraz wszystkie elementy i uczestników systemu HarzEEmobility [A2]. a) architektura blokowa wraz z interfejsami dla systemu elektromobilności, b) uczestnicy systemu elektromobilności.	24
Rysunek 18. Przykładowy tabelaryczny opis i diagram dla przypadku zastosowania: „poszukuj najbliższej stacji ładowania”[A2].	25
Rysunek 19. Możliwości zastosowania magazynów energii [A4].	26
Rysunek 20. Bilans AZaE pracującego w reżimie wygładzania szczytów mocy [B6].	27
Rysunek 21. Współpraca AZaE z farmą fotowoltaiczną o mocy 144 MWp. a) zasada gromadzenia nadwyżki energii produkowanej przez farmę PV w ciągu dnia w celu wykorzystania jej na potrzeby własne w nocy, b) rzeczywisty przebieg współpracy AZaE z farmą fotowoltaiczną [A4].	28
Rysunek 22. Cele inteligentnego systemu EMS [A6].	28
Rysunek 23. Harmonogram i schemat wymiany danych dla inteligentnego EMS [A6].	29
Rysunek 24. Sieć dystrybucyjna 110 kV z konfiguracją pomiarową PMU [A7].	30
Rysunek 25. Porównanie błędów w estymacji prądu i napięcia dla testowanych metod [A7]. a) porównanie błędów w estymacji napięcia i statystycznym jego rozkładzie dla testowanych metod, b) porównanie błędów w estymacji prądu i statystycznym jego rozkładzie dla testowanych metod.	31