

dr inż. Andrzej Łebkowski
Katedra Automatyki Okrętowej
Wydział Elektryczny
Uniwersytet Morski w Gdyni

Gdynia, dnia 26.04.2019 r.

AUTOREFERAT

1. Imię i nazwisko: **Andrzej Łebkowski**

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

- 2006 – stopień naukowy doktor
Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki,
Dyscyplina: Automatyka i Robotyka
Tytuł rozprawy: „Hybrydowy system sterowania obiektem ruchomym
w środowisku dynamicznym”
- 2001 – tytuł zawodowy magister inżynier
Wyższa Szkoła Morska w Gdyni, Wydział Elektryczny,
kierunek Elektrotechnika, Elektroautomatyka.
Temat pracy: „Badania symulacyjne jakości regulacji okrętowych procesów sterowania w języku
Matlab/Simulink - układ regulacji prędkości obrotowej silnika głównego”
- 2000 – tytuł zawodowy inżynier
Wyższa Szkoła Morska w Gdyni, Wydział Elektryczny,
kierunek Elektrotechnika, Elektroautomatyka Okrętowa,
Temat pracy: „Opracowanie i badania symulacyjne algorytmu pozycyjnego sterowania
rozgrywającego z uwzględnieniem zmian prędkości statku w języku Matlab”

Inne dyplomy

Dyplom morski: Oficer Elektroautomatyk Okrętowy, Urząd Morski w Gdyni, 2013.

Tytuł zawodowy technik elektronik, Specjalność Elektryczna i Elektroniczna Automatyka Przemysłowa,
Zespół Szkół Elektrycznych w Wejherowie.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych.

- 2017 - 2019 – starszy wykładowca: Katedra Automatyki Okrętowej, Wydział Elektryczny,
Akademia Morska w Gdyni,
od 01.09.2018 r. zmiana nazwy uczelni na Uniwersytet Morski w Gdyni
- 2007 - 2017 – adiunkt: Katedra Automatyki Okrętowej, Wydział Elektryczny, Akademia Morska w Gdyni
- 2003 - 2006 – asystent: Katedra Automatyki Okrętowej, Wydział Elektryczny, Akademia Morska w Gdyni
- 2001 - 2003 – asystent stażysta: Katedra Automatyki, Wydział Elektrotechniki i Automatyki,
Politechnika Gdańska



4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. 2017 r. poz. 1789):

A) Tytuł osiągnięcia naukowego:

**Minimalizacja zużycia energii przez pojazdy z napędem elektrycznym
- wybrane zagadnienia**

Osiągnięcie naukowe obejmuje monografię oraz cykl złożony z 8 publikacji powiązanych tematycznie, których: łączny Impact Factor wynosi $IF = 11,86$; suma punktów MNiSW = 155

B) Publikacje lub inne prace wchodzące w skład osiągnięcia naukowego:

Monografia:

- [B1]. **Andrzej Łebkowski**: Minimalizacja zużycia energii przez pojazd z napędem elektrycznym - wybrane zagadnienia. Wydawnictwo Naukowe EXANTE, Gdynia 2019, (ISBN 978-83-66187-37-5, 172 strony, 12 ark. wyd.)

Cykl złożony z 8 publikacji powiązanych tematycznie:

- [B2]. **Łebkowski A.**, Temperature, Overcharge and Short-Circuit Studies of Batteries Used in Electric Vehicles, Przegląd Elektrotechniczny, 5/2017, DOI: 10.15199/48.2017.05.13 – (SCOPUS), **lista B MNiSW – 14 pkt.**
- [B3]. **Łebkowski A.**, Management System for Electric Vehicle Battery Pack, Przegląd Elektrotechniczny, 9/2017, DOI: 10.15199/48.2017.09.09 – (SCOPUS), **lista B MNiSW – 14 pkt.**
- [B4]. **Łebkowski A.**, Design, Analysis of the Location and Materials of Neodymium Magnets on the Torque and Power of In-Wheel External Rotor PMSM for Electric Vehicles. Energies 2018, 11, 2293. DOI:10.3390/en11092293 – **czasopismo z bazy JCR (WoS, SCOPUS), IF = 2,676, lista A MNiSW – 25 pkt.**
- [B5]. **Łebkowski A.**, A Way of Neodymium-Iron-Boron Magnets Regeneration in Surface-Mounted PMSM used in Electric Vehicles. Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences Vol. 65, No. 5, 2017, DOI: 10.1515/bpasts-2017-0081, WOS:000413896700021 – **czasopismo z bazy JCR (WoS, SCOPUS), IF = 1,156, lista A MNiSW – 20 pkt.**



- [B6]. **Lebkowski A.**, Steam and Oxyhydrogen Addition Influence on Energy Usage by Range Extender –Battery Electric Vehicles. *Energies* 2018, 11, 2403, DOI:10.3390/en11092403 – **czasopismo z bazy JCR (WoS, SCOPUS), IF = 2,676, lista A MNiSW – 25 pkt.**
- [B7]. **Lebkowski A.**, Reduction of Fuel Consumption and Pollution Emissions in Inland Water Transport by Application of Hybrid Powertrain. *Energies* 2018, 11, 1981. DOI:10.3390/en11081981– **czasopismo z bazy JCR (WoS, SCOPUS), IF = 2,676, lista A MNiSW – 25 pkt.**
- [B8]. **Lebkowski A.**, Rozwiązania technologiczne elektrycznego samochodu sportowego SMOK. *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe* 1/2016 p.89. **lista B MNiSW – 7 pkt.**
- [B9]. **Lebkowski A.**, Studies of Energy Consumption by a City Bus Powered by a Hybrid Energy Storage System in Variable Road Conditions. *Energies* 2019, 12, 951. DOI:10.3390/en12050951– **czasopismo z bazy JCR (WoS, SCOPUS), IF = 2,676, lista A MNiSW – 25 pkt.**

C) Omówienie celu naukowego wyżej wymienionych prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.

Podjęta przez wnioskodawcę tematyka naukowa pt. „Minimalizacja zużycia energii przez pojazdy z napędem elektrycznym - wybrane zagadnienia” dotyczy obszaru, który jest aktualny i ważny ze względu na zwiększającą się dynamikę rozwoju transportu elektrycznego. W wielu krajach przewiduje się wprowadzenie zakazu sprzedaży samochodów z silnikami spalinowymi już w 2030 roku [1]. Pomimo, iż napęd elektryczny zastosowano w pojazdach prawie 200 lat temu, technologia ta na początku XX wieku została zbagatelizowana i zapomniana. W ostatnich latach pojazdy z napędem elektrycznym przeżywają swoje odrodzenie, głównie z uwagi na swoją bezemisyjność.

Pomimo iż w Polsce, w 2018 roku weszła w życie Ustawa o Elektromobilności, to już w 2008 roku wnioskodawca zorganizował I Zlot Pojazdów Elektrycznych i Hybrydowych oraz konferencję naukową pod hasłem „Pożegnanie ropy”. W następnym roku wnioskodawca zorganizował II Zlot Pojazdów Elektrycznych i Hybrydowych, oraz konferencję naukową pod hasłem „Nowa era w motoryzacji”. Podczas obu konferencji zaprezentowane zostały rzeczywiste konstrukcje pojazdów z napędem elektrycznym oraz prace naukowe, mające na celu rozwój elektrycznych układów napędowych zmierzających ku minimalizacji zużycia energii. Zmniejszenie zużycia energii przez pojazd, ma korzystny wpływ na środowisko naturalne, poprzez redukcję toksycznych substancji i gazów cieplarnianych, które powstają podczas produkcji energii elektrycznej, szczególnie z paliw



kopalnych. Ponadto zmniejszenie zużycia energii przekłada się na zwiększenie możliwego do przejechania dystansu, co jednocześnie zwiększa poziom efektywności pojazdu.

Zgłoszony do oceny dorobek wnioskodawcy podsumowuje główny zakres prowadzonych badań, zrealizowanych po obronie doktoratu i związany jest z dyscypliną naukową Elektrotechnika. Prowadzone badania, przede wszystkim dotyczą zagadnień związanych z minimalizacją zużycia energii przez pojazdy z napędem elektrycznym, którą można uzyskać poprzez:

1. Zaprojektowanie, dobór oraz realizację efektywnych energetycznie elementów elektrycznego układu napędowego, takich jak magazyn energii, maszynę elektryczną wykorzystywaną do napędu pojazdu, przekształtnik energoelektroniczny sterujący pracą maszyny elektrycznej oraz przekształtnik energoelektroniczny do zaopatrywania w energię elektryczną magazynu energii.
2. Efektywną eksploatację pojazdu, poprzez stosowanie zasad techniki jazdy ekonomicznej, efektywne użytkowanie urządzeń i systemów pojazdu np. system kondycjonowania termicznego kabiny pojazdu i elementów elektrycznego układu napędowego; zamykanie okien i szyberdachów pojazdu w trakcie przemieszczania się z prędkościami powyżej 50 km/h.
3. Kontrolę stanu technicznego pojazdu (dobór i stan ogumienia pojazdu, wartość ciśnienia w kołach, stan techniczny zawieszenia, ustawienie zbieżności kół, stan techniczny elementów karoserii).
4. Optymalizację konstrukcji mechanicznej pojazdu mającej na celu ograniczenie masy pojazdu.
5. Optymalizację kształtów aerodynamicznych pojazdu wpływających na wartość współczynnika oporu aerodynamicznego pojazdu oraz poziom emitowanego przez pojazd hałasu.

Zgodnie z definicją Ustawy z dnia 11 stycznia 2018 r. o elektromobilności i paliwach alternatywnych [2], *pojazd elektryczny, to pojazd samochodowy w rozumieniu art. 2 pkt 33 ustawy z dnia 20 czerwca 1997 r. – Prawo o ruchu drogowym [3], wykorzystujący do napędu wyłącznie energię elektryczną akumulowaną przez podłączenie do zewnętrznego źródła zasilania*. Dodatkowo pojazdy poruszające się w środowisku wodnym, określa się, jako pojazdy wodne lub statki wodne. Zgodnie z powyższym pojazd elektryczny do napędu powinien wykorzystywać maszynę elektryczną, sterowaną z przekształtnika energoelektronicznego, zasilanego z magazynu energii. Z kolei zapas energii w magazynie może być uzupełniany, poprzez zastosowanie pokładowego przekształtnika energoelektronicznego nazywanego ładowarką lub przekształtnika stacjonarnego – ładowarki stacjonarnej. Istnieje też możliwość uzupełnienia zapasu energii, poprzez wymianę magazynu na inny i ładowanie go poza pojazdem. Wymienione elementy elektrycznego układu napędowego, stanowią nowy obszar w zakresie rozwoju Elektrotechniki. Prowadzone badania zmierzają w kierunku minimalizacji gabarytów urządzeń przy zachowaniu jak najwyższych parametrów, a przede wszystkim wysokiej sprawności, która przekłada się bezpośrednio na ogólny poziom zużycia energii przez pojazd.



Najdroższym i zarazem najbardziej wrażliwym elementem elektrycznego układu napędowego wpływającym na parametry osiągane przez pojazd jest magazyn energii. W pojazdach z napędem elektrycznym, jako magazyny energii wykorzystuje się ogniwa elektrochemiczne, superkondensatory, wodorowe ogniwa paliwowe, panele fotowoltaiczne, lub różnego rodzaju konfiguracje wyżej wymienionych nośników, jako hybrydowe magazyny energii. Wybór określonego typu ogniw elektrochemicznych wpływa na sposób eksploatacji pojazdu oraz uzyskiwane parametry.

W pracy [B2] wnioskodawca przedstawił wyniki prowadzonych badań dla kilku typów ogniw elektrochemicznych, które są najczęściej wykorzystywane w magazynach energii stosowanych w pojazdach elektrycznych. Badaniom poddano ogniwa elektrochemiczne w zakresie temperatur od -30°C do 55°C . Prowadzone badania miały na celu określenie charakterystyki rezystancji wewnętrznej danego typu ogniwa w zależności od temperatury ogniwa i stanu jego naładowania. Znajomość wymienionej charakterystyki umożliwia opracowanie modelu matematycznego danego typu ogniwa elektrochemicznego, który może być zastosowany do modelowania całego magazynu energii. Dodatkowo wiedza na temat wymienionej charakterystyki, umożliwia opracowanie wytycznych dla użytkownika pojazdu lub systemów zarządzania pracą magazynu energii, przy jakich warunkach może on być bezpiecznie eksploatowany. Przepływ dużego prądu (ładowanie/rozładowanie) w obecności niskich temperatur może spowodować gwałtowne nagrzewanie się ogniw szczególnie litowo-jonowych, wywołanie egzotermicznej reakcji łańcuchowej i w konsekwencji pożar magazynu energii.

W celu uniknięcia opisanych powyżej sytuacji, wnioskodawca opracował system termicznego kondycjonowania magazynu energii dla pojazdu z napędem elektrycznym MSEV (*ang. Management System for Electric Vehicle Battery Pack*), który został zaprezentowany w pracy [B3]. Opracowany system może być użyty zarówno w pojazdach produkowanych seryjnie, jak też konwertowanych z pojazdów spalinowych na elektryczne. System MSEV operując na urządzeniach elektrotechnicznych zastosowanych w pojeździe, może być używany do zdalnego monitorowania i sterowania pracy ładowarki pokładowej pojazdu oraz systemu kondycjonowania termicznego. Dzięki wykorzystaniu technologii GSM/GPS możliwe jest rejestrowanie danych w celu ich późniejszej analizy oraz sterowanie pracą urządzeń za pośrednictwem dowolnego telefonu komórkowego lub komputera podłączonego do sieci internetowej. Opracowane przez wnioskodawcę algorytmy, na podstawie zebranych doświadczeń związanych z codzienną eksploatacją pojazdów z napędem elektrycznym, umożliwiają realizację sterowania temperaturą magazynu energii, w szczególności w okresie, gdy temperatury otoczenia spadają poniżej zera stopni Celsjusza. Oprócz zaprojektowanych przez wnioskodawcę układów elektronicznych umożliwiających zdalny monitoring i rejestrację parametrów, opracowano też rozwiązania konstrukcyjne związane z systemem kondycjonowania termicznego kabiny pojazdu oraz magazynu energii. Główne funkcje realizowane przez opracowany system obejmują możliwość monitorowania parametrów istotnych z punktu widzenia użytkownika,



takich jak utrzymywanie odpowiedniej temperatury magazynu energii oraz pomiar zużycie energii podczas ładowania i/lub termicznego kondycjonowania magazynu energii. MSEV umożliwia także zdalne sterowanie podsystemami, na przykład systemem ładowania magazynu energii, który poprzez zastosowanie ładowarki dwukierunkowej ma możliwość współpracy z inteligentnymi sieciami (*V2G, ang. Vehicle to Grid* – tryb zwrotu energii do sieci; tryb *V2G, ang. Grid to Vehicle* – tryb ładowania magazynu energii z sieci elektroenergetycznej). Dzięki temu użytkownik pojazdu z systemem MSEV ma możliwość ograniczenia kosztów eksploatacji pojazdu, na przykład poprzez ładowanie pojazdu w godzinach, gdy ceny energii są niższe lub uruchomienie podgrzewania magazynu energii i przedziału pasażerskiego przed planowaną podróżą, kiedy pojazd jest podłączony do sieci elektroenergetycznej. Możliwość zdalnego sterowania pracą systemu termicznego kondycjonowania magazynu energii oraz przedziału pasażerskiego, jest według wnioskodawcy bardzo istotnym elementem wpływającym zarówno na ograniczenie kosztów eksploatacji magazynu energii, a także jego żywotności, poprzez utrzymanie jego odpowiedniej temperatury pracy. Opracowany przez wnioskodawcę system MSEV, posiada także funkcje związane z alarmowaniem (przez SMS) użytkownika pojazdu elektrycznego w sytuacji, gdy dojdzie do przekroczenia wartości nominalnej parametrów, na przykład poziomu rozładowania magazynu energii, rozładowania akumulatora instalacji pokładowej 12 VDC lub wystąpienia niedopuszczalnej wartości temperatury magazynu energii. W przedstawionych wypadkach, system MSEV może żądać od użytkownika podjęcia określonych działań, na przykład podłączenia pojazdu do sieci energetycznej po sprawdzeniu prognoz pogody w celu zasilania systemu termicznego kondycjonowania magazynu energii, lub realizacji jego doładowania. Dzięki możliwości rejestracji parametrów przez system MSEV, użytkownik ma możliwość analizy danych związanych z aktualnym poziomem stanu magazynu energii (*SOH, ang. State Of Health*) i podejmowania ewentualnej decyzji o jego wymianie. W pracy [B3] omówiona została struktura systemu termicznego kondycjonowania magazynu energii dla pojazdu z napędem elektrycznym, z przedstawieniem wszystkich elementów i komponentów wchodzących w skład jego budowy. Wnioskodawca zaprezentował również wyniki badań związanych z zastosowaniem systemu MSEV w pojeździe z napędem elektrycznym i korzyści z tego wynikające, związane z minimalizacją zużycia energii oraz wydłużeniem zasięgu pojazdu w szczególności, gdy temperatura otoczenia spadła poniżej zera stopni Celsjusza.

Tematyka związana z elektrochemicznymi magazynami energii elektrycznej jest bardzo istotna, gdyż bezpośrednio wpływa na koszty eksploatacji pojazdu z napędem elektrycznym oraz parametry przez niego rozwijane, z których głównym jest zasięg pojazdu. W monografii [B1], w podrozdziale 1.3, wnioskodawca zaprezentował główne typy ogniw wykorzystywanych aktualnie do budowy elektrochemicznych magazynów energii, takie jak: ogniwa kwasowo-ołowiowe PbA (*ang. Lead Acid*, gęstość energii 30-50 Wh/kg), ogniwa niklowo-metalowo-wodorkowe NiMH (*ang. Nickel Metal Hydride*, gęstość energii 120 Wh/kg), ogniwa litowo-kobaltowe LCO (*ang. Lithium Cobalt Oxide, LiCoO₂*, gęstość energii 150-200 Wh/kg), ogniwa litowo-niklowo-kobaltowo-aluminiowe



NCA (*ang. Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide, LiNiCoAlO₂*, gęstość energii 200-260 Wh/kg), ogniwa litowo-manganowe LMO (*ang. Lithium Manganese Oxide, LiMn₂O₄*, gęstość energii 100-150 Wh/kg), ogniwa niklowo-manganowo-kobaltowe NMC (*ang. Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide, LiNiMnCoO₂*, gęstość energii 150-220 Wh/kg), ogniwa litowo-żelazowo-fosforowe LFP (*ang. Lithium Iron Phosphate, LiFePO₄*, gęstość energii 90-120 Wh/kg), ogniwa litowo-tytanowe LTO (*ang. Lithium Titanate, Li₄Ti₅O₁₂*, gęstość energii 50-80 Wh/kg). Dla zaprezentowanych typów ogniw elektrochemicznych omówiono ich właściwości wpływające na sposób ich eksploatacji. Wnioskodawca przeprowadził analizę wyboru typu akumulatorów do pojazdu z napędem elektrycznym, na podstawie przyjętych kryteriów obejmujących: bezpieczeństwo eksploatacji, żywotność, osiągi, koszt, gęstość energii oraz wydolność energetyczną. W wyniku przeprowadzonej analizy, mając na uwadze dostępność rynkową i wymienione parametry, wnioskodawca wybrał ogniwa litowo-żelazowo-fosforowe LFP. Bardzo dobre notowania praktycznie na równi z ogniwami LFP, otrzymały ogniwa litowo-tytanowe LTO, z uwagi na bardzo dużą żywotność na poziomie przekraczającym 30000 cykli ładowania. Wnioskodawca zaprezentował także kierunki rozwoju badań na świecie w zakresie poszukiwań elektrochemicznych magazynów energii, które dotyczą możliwości zastosowania akumulatorów grafenowo-polimerowych (*ang. graphene polymer batteries*) oferujących gęstość energii na poziomie 1000 Wh/kg [4], litowo-jonowych z niepalnym ciekłym elektrolitem wykonanym w całości z materiałów nieorganicznych oferowanych przez firmę INNOLITH [5], litowo-powietrznych LOB (*ang. Lithium Oxygen Batteries*), litowo-siarkowych LSB (*ang. Lithium Sulfur Battery*) o gęstościach energii na podobnym poziomie lub wyższym [6, 7].

Akumulatory elektryczne są jednym z najważniejszych elementów elektrycznego układu napędowego pojazdu. Wybór określonego typu ogniw elektrochemicznych zastosowanych do budowy magazynu energii, określa późniejsze parametry i warunki eksploatacyjne pojazdu. Jednocześnie materiały wykorzystywane do budowy magazynów energii stosowanych w pojazdach z napędem elektrycznym powinny spełniać określone wymagania mechaniczne i elektrotechniczne zawarte w normach. Stawiane wymagania mają na celu zapewnienie bezawaryjnej pracy w jak najdłuższym czasie eksploatacji, maksymalnej gęstości energii i bezpieczeństwa użytkowania.

Obok wyboru ogniw elektrochemicznych, kolejnym elementem, jaki ma znaczący wpływ na minimalizację zużycia energii w pojazdach, jest wyselekcjonowanie odpowiedniej maszyny elektrycznej. Zagadnienia związane z zaprojektowaniem oraz realizacją silnika, jaki może być potencjalnie zastosowany do napędu w pojazdach, zostało zaprezentowane przez wnioskodawcę w monografii [B1] oraz pracy [B4]. W podrozdziale 1.1.1 przedstawiono klasyfikację maszyn elektrycznych, które są już stosowane lub wykazują potencjał do zastosowania w pojazdach, należą do nich w szczególności: silniki prądu stałego DC (*ang. Direct Current Motor*), silniki reluktancyjne przełączalne SRM (*ang. Switched Reluctance Motor*); silniki indukcyjne IM (*ang. Induction Motor*); silniki synchroniczne osiowe AF (*ang. Axial Flux Permanent Magnet Motor*), silniki prądu stałego z komutatorem elektronicznym BLDC (*ang. BrushLess Direct Current Motor*), silniki synchroniczne z



magnesami trwałymi montowanymi powierzchniowo SPM (*ang. Surface-Mounted Permanent Magnet*), silniki synchroniczne z magnesami trwałymi umieszczonymi pod powierzchnią wirnika IPM (*ang. Internal-Mounted Permanent Magnet*), oraz silniki synchroniczne z uzwojonymi wirnikami AM (*ang. Synchronous Motor*). Na podstawie przyjętych kryteriów przez wnioskodawcę, takich jak: sprawność maszyny elektrycznej, gęstość energii, sposób sterowania, złożoność technologiczna, serwisowanie, niezawodność, generowany hałas, koszt zakupu, możliwość przeciążania, rozwijane prędkości obrotowe, tętnienia momentu, wytrzymałość konstrukcji, wnioskodawca przeprowadził ocenę właściwości maszyn elektrycznych. Najwyższą notę uzyskały równolegle silnik indukcyjny i synchroniczny. Do dalszych badań wnioskodawca wytypował silnik synchroniczny o klasycznej konstrukcji z magnesami trwałymi montowanymi na powierzchni wirnika SPM (*ang. Surface-Mounted Permanent Magnet*) obracającego się wewnątrz stojana (*ang. Inrunner*). Dla wybranej konstrukcji przedstawiono sposób projektowania w oparciu o metodologię zaproponowaną przez wnioskodawcę. Głównym założeniem związanym z zaprojektowaniem i realizacją konstrukcji silnika SPM, było uzyskanie jak największej sprawności. Wysoka sprawność maszyny elektrycznej, ogranicza lub zupełnie wyklucza potrzebę zastosowania cieczowego układu chłodzenia, generującego dodatkowe straty związane z jego obsługą. Wyniki badań symulacyjnych silnika SPM wraz z charakterystykami mechanicznymi i mapą sprawności zostały przedstawione w końcowej części rozdziału 1.1.1 monografii [B1].

Jednym ze sposobów minimalizacji zużycia energii przez pojazd, związanym z tematyką zastosowanych do napędu maszyn elektrycznych, jest możliwość użycia napędu bezpośredniego montowanego w kole pojazdu. Dzięki bezpośredniemu zastosowaniu silnika napędowego w kole, wyklucza się pośredniczące układy przeniesienia napędu takie jak przekładnie i skrzynie biegów, które z jednej strony zwiększają efektywność napędu poprzez zastosowanie przekładni, ale z drugiej strony są źródłem strat. Straty związane są z przekazywaniem momentu i w zależności od typu zastosowanej przekładni lub skrzyni biegów, mogą wynosić nawet 25%. W pracy [B4] wnioskodawca przedstawił sposób projektowania silnika synchronicznego z magnesami trwałymi, który może być zastosowany do napędu pojazdu po zamontowaniu go bezpośrednio w kole (*ang. Outrunner, In-wheel*). Dla projektowanej konstrukcji typu *outrunner*, wnioskodawca zaproponował przyjęcie metodologii projektowania, którą przedstawił w pracy [B4]. Główne cele związane z zaprojektowaniem zarówno silnika synchronicznego typu *inrunner* [B1] jak i *outrunner* [B4], związane były z koniecznością uzyskania zakładanych parametrów w postaci mocy, momentu obrotowego i prędkości obrotowej, przy jednoczesnym uwzględnieniu ograniczonych wymiarów silnika, liczby cewek i magnesów w obwodzie elektromagnetycznym, kształcie geometrycznym magnesów oraz cewek, sposobie mocowania magnesów, doborze materiałów konstrukcyjnych silnika, oraz minimalizacji momentu zaczepowego i tętnień momentu. Do analizy numerycznej pola elektromagnetycznego zastosowano oprogramowanie ANSYS Maxwell oraz MotorAnalysis



współpracujące z środowiskiem Matlab. Obie zaprojektowane jednostki napędowe po realizacji fizycznej, znalazły swoje zastosowanie w pojazdach elektrycznych.

Silnik SPM typu *inrunner* został wykonany w różnych odmianach konstrukcyjnych i wdrożony do eksploatacji w kilkudziesięciu pojazdach takich jak: łódzie, jachty, samochody osobowe oraz motocykl z napędem elektrycznym. Dzięki zastosowaniu odpowiednich materiałów konstrukcyjnych, zaprojektowaniu kształtów silnika i weryfikacji z użyciem oprogramowania wykorzystującego metodę elementów skończonych, udało się skonstruować maszynę elektryczną o sprawności sięgającej 97%. W wyniku uzyskania wysokiego poziomu sprawności, wyeliminowano konieczność zastosowania cieczowego układu chłodzenia silnika. Silnik SPM typu *outrunner*, zupełnie w innej wersji obwodu elektromagnetycznego niż przedstawiono w pracy [B4] został zrealizowany i zaadaptowany do napędu pojazdu testowego o dopuszczalnej masie całkowitej do 3,5 tony.

Minimalizacja zużycia energii przez maszyny elektryczne stosowane w pojazdach, jest możliwa do uzyskania w sytuacji, gdy do kontroli silnika zastosuje się właściwy układ sterujący. Zadaniem tego układu jest kształtowanie charakterystyki trakcyjnej zapewniającej minimalne zużycie energii przez pojazd oraz realizacja sterowania nadrzędnego, związanego na przykład z przewidywaniem zmian w natężeniu ruchu, czy też zmian profilu drogi. Na podstawie zgromadzonych doświadczeń związanych z eksploatacją elektrycznych układów napędowych, wnioskodawca opracował nadrzędny układ sterowania pracą elektrycznego układu napędowego pojazdu. Opracowany układ został nazwany optymalizatorem zużycia energii i zaprezentowany w rozdziale drugim monografii [B1]. Przedstawione rozwiązanie zostało zaprojektowane dla pojazdu z napędem elektrycznym wykorzystującym skrzynię biegów oraz silnik z możliwością sterowania wzbudzeniem. Przyjęty sposób sterowania wzbudzeniem silnika, polega na zastosowaniu odwzbudzenia [8–13], w celu zwiększenia prędkości obrotowej silnika i sterowania w drugiej strefie regulacji, jak i dowzbudzenia silnika [14–19] w celu zwiększenia momentu obrotowego i dynamiki pojazdu w szczególności przy ruszaniu.

W celu minimalizacji zużycia energii przez pojazd, wnioskodawca opracował optymalizator zużycia energii, który uwzględnia mapę drogi na zadanej trasie przejazdu, nachylenie podłoża aktualne i przewidywane, oraz ograniczenia prędkości, a także mapę sprawności silnika trakcyjnego. Zadaniem optymalizatora zużycia energii, jest wymuszanie pracy elektrycznego układu napędowego w takim punkcie pracy, w którym układ napędowy osiąga maksymalną sprawność dla aktualnych ograniczeń będących wielkościami zakłócającymi (nachylenie terenu, prędkość pojazdu, moment obrotowy napędzający koła pojazdu, temperatura magazynu energii). Jednocześnie na podstawie wielkości zakłócających i opracowanej kognitywnej bazy wiedzy przez wnioskodawcę, z użyciem metod wnioskowania rozmytego i elementów sterowania predykcyjnego, optymalizator zużycia energii ustala wejścia sterujące, czyli odpowiednią wartość przełożenia w skrzyni biegów [20–26], prędkości obrotowej oraz prądu wzbudzenia silnika w osiach d i q . Optymalizator, który został zaprojektowany przez wnioskodawcę, realizując sterowanie pracą skrzyni biegów oraz wzbudzeniem



silnika, uwzględnia przyjętą funkcję kosztów, związaną z prądem pobieranym z akumulatorów oraz aktualnym stanem naładowania magazynu energii. Równocześnie uwzględniane są ograniczenia wynikające z fizycznych parametrów elementów elektrycznego układu napędowego pojazdu, takich jak: dostępna liczba przełożeń oraz dopuszczalny prąd wzbudzenia silnika.

Aby zweryfikować przyjęte założenia związane z optymalizatorem zużycia energii, na podstawie rzeczywistych testów drogowych pojazdu Fiat Panda II EV, zarejestrowanych przy wykorzystaniu rejestratora przedstawionego w pracy [27], wnioskodawca opracował matematyczny model pojazdu z użyciem którego przeprowadzono badania symulacyjne w środowisku Modelica [28]. Symulacyjny model układu napędowego pojazdu Fiat Panda II EV zaprezentowany został w rozdziale trzecim monografii [B1]. Model ten składa się z bloku odzwierciedlającego opory ruchu pojazdu, modelu silnika napędowego, modelu falownika z układem sterowania połowo zorientowanego i nadrzędnym regulatorem prędkości liniowej pojazdu, modelu magazynu energii z termicznym systemem kondycjonowania, modelu skrzyni biegów, optymalizatora zużycia energii, modelu trasy przejazdu oraz urządzeń pomocniczych zainstalowanych w pojeździe. Dodatkowo mając na uwadze, iż na poziom zużycia energii przez pojazd ma wpływ wartość ciśnienia powietrza w ogumieniu [29] oraz otwarcie okien pojazdu [30], wnioskodawca przeprowadził badania weryfikacyjne, których wyniki zostały zamieszczone w podrozdziale 2.3 monografii [B1]. Do prowadzenia badań z użyciem symulacyjnego modelu układu napędowego pojazdu Fiat Panda II EV wytypowano znormalizowane cykle testowe WLTP, NEDC, UDDS, HWFET, LA92, a także trzy trasy testowe oznaczone skrótami GGG, GF, GH, które zostały opracowane na podstawie rzeczywistych warunków panujących na drogach Trójmiejskich. Badania optymalizatora zużycia energii, zrealizowano dla opracowanych sześciu konfiguracji elektrycznego układu napędowego pojazdu Fiat Panda II EV składających się z silnika synchronicznego, umożliwiającego sterowanie jego wzbudzeniem oraz skrzyni biegów różniących się liczbą przełożeń (2, 5 i 10 biegów). Za układ referencyjny oznaczony 5MANUAL, przyjęty został model pojazdu opracowany na podstawie badań rzeczywistego pojazdu Fiat Panda II EV. W badaniach symulacyjnych układ 5MANUAL nie wykorzystywał możliwości, jakie oferuje optymalizator zużycia energii. Pozostałe układy napędowe oznaczone symbolami 2AUTOMAT i 5AUTOMAT, wykorzystywały predykcyjne informacje o kształcie trasy przejazdu i ograniczeniach prędkości na poszczególnych odcinkach. Układy napędowe oznaczone symbolami 2FULL, 5FULL i 10FULL, do sterowania prędkością obrotową silnika i zmianą przełożeń w skrzyni biegów, wykorzystywały pełen potencjał oferowany przez optymalizator zużycia energii w postaci predykcyjnego uwzględnienia informacji o kształcie trasy przejazdu i ograniczeniach prędkości oraz możliwości sterowania wzbudzeniem silnika.

Zwiększenie możliwości trakcyjnych elektrycznego układu napędowego pojazdu poprzez sterowanie silnikiem synchronicznym z użyciem dowzbudzenia, może jednocześnie być potencjalną przyczyną uszkodzenia zastosowanych magnesów trwałych. W sytuacji, gdy wartość prądu wzbudzenia I_d będzie zbyt duża, może dojść do rozmagnesowania magnesów trwałych przez



strumień elektromagnetyczny pochodzący od cewek stojana. Do demagnetyzacji magnesów trwałych, może dojść także w sytuacji, gdy temperatura silnika, z uwagi na warunki eksploatacyjne, osiągnie wartość, przy której wartość strumienia elektromagnetycznego od uzwojeń stojana spowoduje przekroczenie punktu pracy magnesu. Całkowitą demagnetyzację magnesów można osiągnąć po przekroczeniu temperatury Curie dla danego typu magnesu. Innym czynnikiem, jaki może doprowadzić do demagnetyzacji magnesów trwałych, jest mechaniczne uszkodzenie magnesów spowodowane tarciem, uderzeniem lub rozwarstwieniem w wyniku działania wilgoci i korozji magnesu. Aby zapobiec zjawisku demagnetyzacji magnesów trwałych i osłabieniu wartości natężenia pola magnetycznego, wnioskodawca zaproponował zastosowanie metody regeneracji magnesów trwałych stosowanych w maszynach elektrycznych. Metoda ta została przedstawiona w pracy [B5], gdzie zaprezentowano opracowany przez wnioskodawcę model matematyczny obwodu elektromagnetycznego, dla którego przeprowadzono symulacje w środowisku ANSYS-MAXWELL oraz badania z użyciem modelu rzeczywistego. W celu przywrócenia właściwości magnetycznych magnesów wykorzystywanych w wirnikach silników synchronicznych wnioskodawca zaproponował zastosowanie najprostszego, a zarazem bardzo skutecznego rozwiązania, jakim jest zastosowanie cewki powietrznej zasilanej poprzez tyrystor z baterii kondensatorów. Dla analitycznego oszacowania, w celu weryfikacji poprawności modelu, indukcyjność własną cewki wnioskodawca wyznaczył na podstawie równań analitycznych. Przyjęto też, że cewka składa się z N zwojów kołowych, które to zwoje mają również przekrój kołowy. Z tego względu indukcyjność cewki składać się będzie z sumy indukcyjności własnych poszczególnych zwojów oraz indukcyjności wzajemnych pomiędzy nimi, które można określić analitycznie. Dla opracowanego modelu matematycznego przeprowadzono szereg symulacji, które umożliwiły ustalenie wartości napięcia na baterii kondensatorów zapewniającej możliwość regulacji indukcji magnetycznej magnesów neodymowych w zakresie od najmniejszego poziomu namagnesowania do zmiany kierunku biegunowości. Dzięki zastosowaniu zaproponowanej przez wnioskodawcę prostej konstrukcji cewki powietrznej, w bardzo prosty sposób można przywrócić wymaganą wartość indukcji magnetycznej magnesów neodymowych wykorzystywanych do budowy wirników silników synchronicznych.

Niewątpliwą wadą aktualnie użytkowanych pojazdów z napędem elektrycznym jest ich ograniczony zasięg wynoszący średnio około 200 km. W celu zwiększenia zasięgu pojazdu z elektrycznym układem napędowym, w pracy [B6] wnioskodawca zaproponował zastosowanie dodatkowego magazynu energii lub agregatu prądotwórczego, które mogą być dołączone do pojazdu na przyczepce. Dodatkowo w celu zmniejszenia zużycia energii i emisji toksycznych gazów przez agregat prądotwórczy, wnioskodawca zastosował technikę dodawania pary wodnej lub mieszankę wodoru i tlenu w kolektorze dolotowym powietrza silnika cieplnego. W pracy [B4] wnioskodawca przedstawił konfiguracje znanych oraz własnych rozwiązań technologicznych układów zwiększania zasięgu dla pojazdów elektrycznych. Takie rozwiązanie nazywane z *ang.* *Range Extender* (REX), lub zamiennie *Range Extending Trailer – Generator, Long Ranger, Gen Set Trailers*, pozwala na



eksploatację pojazdu elektrycznego na dalekich dystansach, na przykład w podróży pomiędzy miastami. Natomiast na terenach zabudowanych zawsze można odstawić zestaw *Range Extender'a* (REX) i korzystać z pakietu akumulatorów zamontowanych na pokładzie pojazdu. Dla zaproponowanych metod służących obniżeniu emisji szkodliwych gazów do atmosfery oraz minimalizacji zużycia energii poprzez obniżenie poziomu spalania paliwa przez silniki spalinowe agregatów prądotwórczych, wnioskodawca zbudował dwa stanowiska badawcze służące do badania wpływu dodawania pary wodnej oraz badania wpływu dodawania mieszanki wodoru i tlenu do kolektora dolotowego powietrza silnika ciepłego. W jednym ze stanowisk prądnica napędzana była przez silnik benzynowy, w drugim stanowisku przez silnik Diesla. Prowadzone badania z dodatkami pary wodnej oraz mieszanki wodoru i tlenu silników spalinowych wykazały zmniejszone zużycie paliwa oraz emisji szkodliwych gazów do atmosfery. Dla silnika benzynowego wspomaganego dodawaniem wodoru i tlenu do kolektora dolotowego powietrza zanotowano zmniejszone zużycie paliwa o ok. 10%, spadek emisji CO i CO₂ o ok. 3% oraz wzrost emisji NO_x oraz o ok. 15%. Dla silnika benzynowego wspomaganego dodawaniem pary wodnej do kolektora dolotowego powietrza zanotowano spadek emisji CO₂ o ok. 3%, wzrost emisji NO_x o ok. 35% oraz wzrost emisji CO o ok. 4,5%. Dla silnika Diesla zasilanego na dolocie powietrza mieszanką wodoru i tlenu zanotowano spadek zużycia paliwa na poziomie 5%, spadek emisji CO o ok. 19%, spadek emisji CO₂ o ok. 17%, oraz wzrost emisji NO_x o ok. 22%. Podawanie do silnika Diesla pary wodnej na kolektorze dolotowym powietrza skutkowało wzrostem zużycia paliwa na poziomie 0,35%, wzrostem emisji CO o ok. 4%, spadkiem emisji CO₂ o ok. 3%, oraz spadkiem emisji NO_x o ok. 35%.

Na podstawie omówionych badań z użyciem rzeczywistych urządzeń, wnioskodawca przeprowadził badania w rzeczywistym ruchu drogowym, pojazdu z elektrycznego z układem zwiększania zasięgu wyposażonym w agregaty prądotwórcze zasilane odpowiednio benzyną i olejem napędowym. Przeprowadzone badania z rzeczywistymi obiektami, umożliwiły opracowanie modeli matematycznych, które zostały zaimplementowane w środowisku Modelica. Opracowany model matematyczny zespołu pojazdów przez wnioskodawcę, składa się z modelu pojazdu wraz z ciągniętą przez niego przyczepą oraz sił na nie działających, modelu elektrycznego układu napędowego (silnik, falownik, magazyn akumulatorów), modelu skrzyni biegów, modelu układu przeniesienia momentu napędowego, oraz modeli zespołów prądotwórczych. Dla opracowanych modeli symulacyjnych, uwzględniających obciążenia dynamiczne działające na zespół pojazdów w ruchu oraz elektryczny układ napędowy wspomagany pracą zespołów prądotwórczych, wnioskodawca opracował różne konfiguracje współpracy agregatów prądotwórczych. Prowadzone badania przez wnioskodawcę dla różnych konfiguracji pracy zespołów prądotwórczych, wykazały ograniczenie zużycia energii nawet o 60% pomiędzy różnymi konfiguracjami zespołów prądotwórczych oraz ustawieniami poziomu włączeń zespołów prądotwórczych w zależności od stanu naładowania magazynu energii SOC_{ON-OFF} (ang. *State Of Charge*).



Kolejnym zagadnieniem, jakie wnioskodawca porusza w pracy [B7] w ramach jednotematycznego cyklu publikacji, a które związane jest z minimalizacją zużycia energii przez pojazdy z elektrycznym układem napędowym, jest możliwość zastosowania napędu elektrycznego dla pojazdów wodnych, jakimi są barki. Ten zapomniany w ostatnich latach środek transportu, stanowił w latach 80-tych XX wieku, ponad 20 procent udziału przewozów towarowych w Polsce [B7]. Zdaniem wnioskodawcy, zagadnienie związane z możliwością elektryfikacji barek, jest istotne z uwagi na możliwość znacznej redukcji zużycia energii konsumowanej na przemieszczanie oraz emisji gazów cieplarnianych związanych z branżą transportową. Zgodnie z założeniami planów rozwoju śródlądowych dróg wodnych na lata 2016-2020 z perspektywą do roku 2030 [31], w Polsce planowane jest przeniesienie do 2030 roku około 30% drogowego transportu towarów na odcinkach większych niż 300km, na transport wodny lub kolejowy, a do 2050 roku 50% tego transportu. Ponadto w tym samym dokumencie, zaakceptowanym do realizacji w styczniu 2018, przedstawiono plan rozwoju dróg śródlądowych w Polsce, na podstawie ratyfikacji konwencji AGN [32]. Konwencja AGN obejmuje sieć dróg śródlądowych o łącznej długości ponad 27 000 km, łącząc 37 portów krajów europejskich. Na terenie Polski znajdują się trzy odcinki międzynarodowych dróg wodnych o oznaczeniu: E30 – łączący Morze Bałtyckie od portu w Świnoujściu poprzez Odrę, przyszlę Kanał Dunaj-Odra-Laba przez Dunaj do Bratysławy, E40 – łączący Morze Bałtyckie od Gdańska przez Wisłę do Warszawy, Narew oraz Bug do Brześcia i dalej przez Dniepr po Morze Czarne w Odessie, a także E70 – łączący Odrę od ujścia Kanału Odra-Hawela do ujścia Warty w Kostrzynie, przez Bydgoszcz dolną Wisłę i Szkarpawę lub Wisłę Gdańską z Zalewem Wiślanym, tworząc europejski szlak wodny pomiędzy Rotterdamem a Kłajpedą. Jednocześnie z uwagi na niezadowalający stan dróg wodnych w Polsce, zgodnie z danymi Głównego Urzędu Statystycznego, w ciągłej eksploatacji znajduje się około 200 pchaczy i holowników, 90 barek z własnym napędem oraz ok. 500 barek bez własnego napędu. Większość użytkowanego taboru powstała w latach 1949–1979 [33].

W pracy [B7] przedstawiono strukturę elektrycznego układu napędowego, jaki może być zastosowany do napędu barek. Rozważania zastosowania elektrycznego układu napędowego przeprowadzono dla barki o długości 110 m, szerokości 11 m, zanurzeniu 2,5 m, o wyporności około 2680 ton. Dla przyjętej konstrukcji barki, wnioskodawca opracował modele symulacyjne sześciu układów napędowych wyposażonych w silnik Diesla (DP), silnik dwupaliwowy zasilany olejem napędowym i ciekłym gazem ziemnym LNG (DLP), układ z silnikiem elektrycznym zasilanym z spalinowego zespołu prądotwórczego (DEP), układ z silnikiem elektrycznym zasilanym z spalinowego zespołu prądotwórczego wykorzystującego do pracy olej napędowy lub ciekły gaz ziemny LNG (DLEP), układ z silnikiem elektrycznym zasilanym z spalinowego zespołu prądotwórczego poprzez obwód pośredniczący składający się magazynu akumulatorów elektrochemicznych (DBEP) oraz układ z silnikiem elektrycznym zasilanym z spalinowego zespołu prądotwórczego wykorzystującego do pracy olej napędowy lub ciekły gaz ziemny LNG, poprzez



obwód pośredniczący składający się z magazynu akumulatorów elektrochemicznych (DLBEP). Dla przedstawionych konfiguracji układów napędowych, wnioskodawca przeprowadził badania symulacyjne, które wykazały, że dzięki zastosowaniu elektrycznego układu napędowego wspomagane pracą zespołów prądotwórczych, możliwa jest redukcja zużycia energii przez napęd DLBEP w stosunku do klasycznego napędu z silnikiem Diesla o ok. 13%, co przekłada się na redukcję kosztów eksploatacji barki z elektrycznym układem napędowym o ok. 50%, oraz odpowiednio dla układów napędowych DLEP o 49,5%, DLP o 44,3%, DBEP o 13,1% i DEP o 9,3%. Zastosowanie opracowanego elektrycznego układu napędowego DLBEP przez wnioskodawcę do napędu barki, w praktyce, przy założeniach początkowych obejmujących koszt inwestycji związany z zakupem elektrycznego układu napędowego na poziomie 250 tys. Euro, a następnie jego eksploatację przez 250 dni w roku, może zwrócić się w ciągu 3 lat eksploatacji. Dzięki zastosowaniu elektrycznego układu napędowego do napędu barki, możliwa jest też redukcja emisji dwutlenku węgla do atmosfery na poziomie ok. 29%.

W pracy [B8] wnioskodawca przedstawił autorskie rozwiązania technologiczne, które znalazły zastosowanie w układzie napędowym, pierwszego w Polsce, sportowego samochodu elektrycznego SMOK. Do budowy elektrycznego układu napędowego wnioskodawca zaprojektował i zrealizował elementy elektrycznego układu napędowego takie jak: silnik synchroniczny z magnesami trwałymi o mocy 270 kW; falownik napięcia o mocy 350 kW; magazyn energii wraz z systemem kondycjonowania termicznego oraz BMS (*ang. Battery Management System*); instalacje pokładowe pojazdu wraz z systemami wspomagania układu kierowniczego i hamulcowego; system kondycjonowania termicznego, składający się z układu podgrzewania magazynu energii oraz układu klimatyzacji, który napędzany jest silnikiem bezszczotkowym z magnesami trwałymi BLDC. Poziom mocy występujących w elektrycznym układzie napędowym, stanowił zupełnie inny zakres wyzwań w stosunku do omawianych wcześniej konstrukcji. Zrealizowany elektryczny układ napędowy poddano badaniom weryfikacyjnym na niezależnej zewnętrznej hamowni podwoziowej. Podczas badań z ustawieniami napędu ograniczonych ze względu na wytrzymałość mechaniczną półosi napędowych do 70% możliwości układu napędowego, uzyskano dla silnika synchronicznego moment obrotowy na poziomie 490 Nm oraz moc na poziomie 220 kW (300 KM). Podczas badań z uwagi na ograniczenia hamowni podwoziowej nie przekraczano prędkości 310 km/h. Zasięg pojazdu zarejestrowany w trakcie testów drogowych przy zastosowaniu zasad jazdy ekonomicznej w cyklu mieszanym wyniósł ok. 180 km. Średnie zużycie energii wyniosło 183 Wh/km. Czas przyspieszania do 100 km/h wyniósł poniżej 5 s, do 200 km/h – 12 s, a do 300 km/h – 20 s. Budowa pojazdu z elektrycznym układem napędowym o mocy przekraczającej 250 kW, pozwoliła na prowadzenie badań związanych z minimalizacją zużycia energii zarówno na poziomie projektowania elementów elektrycznego układu napędowego, stosowaniu algorytmów wspomagających zasady jazdy ekonomicznej, ale również badanie wpływu stanu technicznego pojazdu, optymalizacje masy i kształtów aerodynamicznych pojazdu wpływających na wartość zużycia energii. Wyniki zdobytych analiz i



doświadczeń znalazły swoje zastosowanie dla pojazdów dysponujących znacznie większymi gabarytami i masami.

W pracy [B9] wnioskodawca zaprezentował wyniki badań związanych z analizą wpływu zastosowania: różnych magazynów energii; obciążenia pojazdu; warunków klimatycznych oraz topograficznych; na poziom zużycia energii przez autobus miejski z napędem elektrycznym. Na podstawie danych eksploatacyjnych zarejestrowanych dla trolejbusu miejskiego, wnioskodawca opracował modele matematyczne pojazdów w środowisku symulacyjnym Modelica. Opracowane modele dotyczyły autobusu wyposażonego w elektryczny układ napędowy, zasilany w zależności od wersji magazynu: z ogniw litowo-żelazowo-fosforowych oznaczonego symbolem LFP; ogniw litowo-tytanowych oznaczonego symbolem LTO; oraz samych superkondensatorów, oznaczonego symbolem SUPCAP. Dodatkowo opracowano dwie konfiguracje, wykorzystujące hybrydowe magazyny energii elektrycznej składające się z ogniw LFP i superkondensatorów. Pierwszy z magazynów składa się z dużego pakietu akumulatorów z mniejszym pakietem superkondensatorów, o stosunku masowym 78%/22% oraz stosunku zgromadzonej energii na poziomie 99%/1%, oznaczony został symbolem BEV-SUPCAP. Drugi z magazynów, składający się z dużego pakietu superkondensatorów i mniejszego pakietu ogniw LFP o stosunku masowym 64%/36% oraz stosunku zgromadzonej energii na poziomie 8%/92%, oznaczono symbolem SUPCAP-BEV. Dla układów z superkondensatorami przewidziano możliwość ich doładowania podczas postoju na przystankach. Jako referencyjny układ odniesienia, na bazie zarejestrowanych danych dla rzeczywistego pojazdu, wnioskodawca opracował model matematyczny autobusu z silnikiem spalinowym Diesla.

Opracowane modele symulacyjne elektrycznych układów napędowych przedstawione w pracy [B9], zawierają takie elementy jak: model karoserii pojazdu wraz z działającymi na nią siłami; model elektrycznego układu napędowego składającego się z modułu silnika synchronicznego, modułu falownika napięcia, oraz modułu magazynu energii elektrycznej w zależności od wybranej konfiguracji; model mechanizmu różnicowego służącego do przeniesienia napędu; a także moduł zadawania trasy przejazdu dla pojazdu; moduł zadawania parametrów temperaturowych środowiska zewnętrznego; moduł zadawania stanu załadowania pojazdu; moduł systemu kondycjonowania termicznego dla elementów elektrycznego układu napędowego oraz przedziału pasażerskiego wraz z systemem wentylacji, składający się głównie z modułu pompy ciepła, magistrali zaworów sterujących przepływem energii cieplnej i wymienników; oraz moduł symulujący pracę pomocniczych urządzeń pokładowych (instalacja niskonapięciowa pojazdu, układ oświetlenia pojazdu, system informacji dla pasażerów, system kasowników biletowych, system wspomagania pracy układu kierowniczego, system wspomagania pracy układu hamulcowego). Do prowadzenia badań z użyciem opracowanych przez wnioskodawcę modeli symulacyjnych autobusu miejskiego z napędem elektrycznym wytypowano znormalizowane cykle testowe (SORT 1, SORT 2, SORT 3, MBC, OCBC, UDDS-HD, BCDC, a także dwie trasy testowe Gdynia-Flat i Gdynia-Hills, które zostały opracowane na podstawie rzeczywistych warunków panujących na drogach Trójmiejskich.



Dodatkowo dla układu napędowego z magazynem energii składającym się z ogniw LFP, przeprowadzono badania związane z zużyciem energii przez pojazd, w zależności od stanu jego załadowania, temperatury otoczenia oraz konfiguracji systemu kondycjonowania elementów elektrycznego układu napędowego oraz przedziału pasażerskiego. Prowadzone badania przez wnioskodawcę wykazały, iż najmniejsze zużycie energii wykazuje układ napędowy zasilany z magazynu energii zbudowanego z użyciem ogniw litowo-tytanowych LTO. Dzięki zastosowaniu elektrycznego układu napędowego do autobusu miejskiego, uzyskano minimalizację zużycia energii w stosunku do układu napędowego z silnikiem Diesla, na poziomie od 27% do 83% w zależności od przyjętego cyklu testowego i konfiguracji magazynu energii.

Za swój wkład do rozwoju nauki w obszarze dyscypliny elektrotechnika uważam:

- opracowanie optymalizatora zużycia energii elektrycznej dla elektrycznych układów napędowych stosowanych w pojazdach, wraz z regułami kognitywnej bazy wiedzy, metod wnioskowania rozmytego i sterowania predykcyjnego, którego zadaniem jest sterowanie przełożeniem skrzyni biegów oraz prądem wzbudzenia silnika trakcyjnego PMSM, w sposób wpływający na ograniczenie poboru mocy z magazynu energii, co korzystnie wpływa na wydłużenie okresu eksploatacji akumulatorów
- rozwój elektrotechniki polegający na użyciu koncepcji dowzbudzania silnika PMSM stosowanego do napędu pojazdów, w celu zwiększenia momentu napędowego przy ruszaniu oraz realizacji przyspieszeń przy współpracy ze skrzynią biegów,
- opracowanie konstrukcji silnika synchronicznego z magnesami trwałymi typu inrunner z przeznaczeniem do zastosowania w elektrycznych układach napędowych pojazdów,
- opracowanie reguł sterowania pracą silnika synchronicznego, które umożliwiają zastosowanie koncepcji sterowania wzbudzeniem maszyny, a w szczególności jej dowzbudzania, w sposób niepowodujący demagnetyzacji magnesów trwałych,
- opracowanie konstrukcji silnika synchronicznego typu outrunner wraz z sposobem montażu magnesów trwałych wpływającym na minimalizację zużycia energii,
- opracowanie modelu symulacyjnego elektrycznego układu napędowego rzeczywistego samochodu elektrycznego o bardzo dużej zgodności z rzeczywistością,
- opracowanie złożonego modelu symulacyjnego elektrycznego układu napędowego autobusu miejskiego o bardzo dużej zgodności z rzeczywistością,
- opracowanie złożonego modelu symulacyjnego elektrycznego układu napędowego barki,
- opracowanie modeli elementów elektrycznego układu napędowego takich jak silnik synchroniczny i falownik napięcia,
- opracowanie modelu magazynu energii elektrycznej składającego się z ogniw litowo-żelazowo-fosforowych, uwzględniającego: zmienną siłę elektromotoryczną ogniw w zależności od obciążenia; ilość ładunku elektrycznego w ogniwach i związany z tym stan naładowania (SOC);



zmienną rezystancję wewnętrzną, zależną od temperatury ogniw oraz stanu ich naładowania; zmienną temperaturę ogniw zależną od energii traconej na rezystancji wewnętrznej, wymianę ciepła pomiędzy magazynem energii a otoczeniem oraz zależną od strumienia ciepła (chłodzenie/ogrzewanie) pochodzącego z układu kondycjonowania termicznego magazynu energii.

- opracowanie trzech cykli testowych na podstawie rzeczywistych warunkach drogowych dla prowadzenia badań na potrzeby testowania elektrycznych układów napędowych stosowanych w pojazdach,
- opracowanie kognitywnej bazy wiedzy wykorzystywanej w pracy optymalizatora zużycia energii do sterowania pracą maszyny elektrycznej z uwzględnieniem predykcji nachylenia trasy przejazdu do realizacji przyspieszenia pojazdu w celu zgromadzenia energii kinetycznej wykorzystywanej przy wjeżdżaniu na kolejne wzniesienie,
- opracowanie oraz realizacja pojazdu Fiat Panda II EV z elektrycznym układem napędowym,
- opracowanie oraz realizacja pierwszego polskiego elektrycznego samochodu sportowego SMOK,
- przeprowadzenie obszernych badań symulacyjnych dla wybranych konfiguracji układów napędowych ze skrzynią biegów o 2, 5 i 10 przełożeniach, jakie mogą być zastosowane w pojeździe elektrycznym Fiat Panda II EV,
- przeprowadzenie obszernych badań symulacyjnych dla wybranych potencjalnych konfiguracji magazynów energii elektrycznej, jakie mogą mieć zastosowane w autobusie miejskim,
- przeprowadzenie badań symulacyjnych dla wybranych potencjalnych konfiguracji elektrycznego układu napędowego, jaki może znaleźć zastosowanie do napędu barki,
- przeprowadzenie rzeczywistych badań na ogniwach elektrochemicznych mających zastosowanie w elektrycznych układach napędowych pojazdów, obejmujących proces: eksploatacji ogniw w ekstremalnie wysokich i niskich temperaturach; przeładowania ogniw; podgrzewania oraz stanu zwarcia,
- opracowanie dla wybranych typów ogniw stosowanych w pojazdach elektrycznych, charakterystyk przedstawiających zależność rezystancji wewnętrznej danego typu ogniw od temperatury ogniw i stanu jego naładowania,
- opracowanie systemu termicznego kondycjonowania magazynu energii MSEV dla pojazdu z napędem elektrycznym,
- opracowanie reguł sterowania i funkcji dla systemu termicznego kondycjonowania magazynu energii zastosowanego w pojeździe z napędem elektrycznym,
- opracowanie metody regeneracji magnesów trwałych stosowanych na wirnikach silników synchronicznych,
- opracowanie modelu symulacyjnego w środowisku ANSYS Maxwell na potrzeby metody regeneracji magnesów trwałych stosowanych na wirnikach maszyn synchronicznych,
- opracowanie stanowiska do regeneracji magnesów trwałych,



- opracowanie oraz realizacja rzeczywistego stanowiska badawczego z silnikiem benzynowym do badania wpływu dodawania pary wodnej lub wodoru i tlenu do kolektora powietrza dolotowego silnika,
- opracowanie oraz realizacja rzeczywistego stanowiska badawczego z silnikiem Diesla do badania wpływu dodawania pary wodnej lub wodoru i tlenu do kolektora powietrza dolotowego silnika,
- opracowanie oraz realizacja układu zwiększającego zasięg pojazdu z napędem elektrycznym tzw. range extender'a, z wykorzystaniem zespołów prądotwórczych,
- realizacja badań w rzeczywistym ruchu drogowym z wykorzystaniem układu zwiększającego zasięg pojazdu z napędem elektrycznym,
- opracowanie modelu symulacyjnego dla zespołu pojazdów składającego się z samochodu elektrycznego i przyczepki z układem zwiększania zasięgu,
- realizacja badań symulacyjnych dla wybranych konfiguracji układu zwiększania zasięgu dla pojazdu z napędem elektrycznym.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

Zakres prac naukowo-badawczych prowadzonych przez wnioskodawcę zarówno przed doktoratem jak i po, obejmował tematykę związaną z systemami kierowania ruchem statku. Wraz z rozwojem prac naukowo-badawczych oraz koniecznością budowy modeli statków do prowadzenia badań, pojawiła się potrzeba opracowania elektrycznego układu napędowego. W związku z licznymi zainteresowaniami wnioskodawcy związanymi z dyscypliną elektrotechnika, część z badań związanych z elektrycznymi układami napędowymi prowadzono na pojazdach samochodowych. Mając na uwadze powyższe, osiągnięcia naukowo-badawcze wnioskodawcy, podzielone zostały na dwie części związane z systemami kierowania ruchem statku oraz z elektrycznymi układami napędowymi pojazdów.

5.1. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych związanych z systemami kierowania ruchem statku

Zakres prac naukowo-badawczych, jakie wnioskodawca podejmował przed doktoratem, obejmował opracowanie systemów wspomagania decyzji dla nawigatorów statków morskich oraz systemów autonomicznego kierowania statkiem. W obu przypadkach prowadzone badania dotyczyły:

- planowania trasy przejścia dla statku,
- sterowania wzdłuż tej trasy w morskim środowisku dynamicznym,
- unikania kolizji – wyznaczania manewru antykolizyjnego,
- podporządkowania się pod polecenia wydawane przez systemy nadzoru ruchu statków VTS (ang. Vessel Traffic Service) na akwenach o wzmożonym ruchu.

Mając na uwadze powyższe kryteria, wnioskodawca w swojej rozprawie doktorskiej pt. „Hybrydowy system sterownia obiektem ruchomym w środowisku dynamicznym”, przedstawił kompletny system do kierowania ruchem statku, obejmujący: wyznaczenie globalnej trasy przejścia dla statku pomiędzy



portem wyjściowym a portem docelowym; prowadzenie nawigacji poprzez sterowanie statkiem na każdym odcinku zadanej trasy przejścia, pomiędzy punktami zwrotu statku; unikanie kolizji w postaci opracowania manewru antykolizyjnego; precyzyjne manewrowanie ruchem statku związane z osiągnięciem zadanej pozycji docelowej.

W latach 2004-2006 wnioskodawca uczestniczył w realizacji projektu badawczego w ramach środków MNiSW, dotyczącego ewolucyjnego planowania ścieżek przejść obiektu ruchomego w środowisku dynamicznym. Prowadzone prace bezpośrednio związane były z tematyką rozprawy doktorskiej wnioskodawcy i dotyczyły opracowania struktury inteligentnego systemu kierowania statkiem [E.II.1– E.II.3, L.9–L.11], opracowania metod i algorytmów realizujących sterowanie po zadanej trasie przejścia [E.II.4, E.II.5, L.9], opracowanie metod wyznaczania trasy przejścia oraz manewrów antykolizyjnych z użyciem algorytmów ewolucyjnych [E.II.6, L.13, L.14]. Prowadzone były też prace związane z modelowaniem morskiego środowiska nawigacyjnego [E.II.7, L.15– L.17] oraz badania weryfikacyjne opracowanych metod i algorytmów sterowania z wykorzystaniem symulatora morskiego środowiska nawigacyjnego [E.II.8, E.II.9].

Dalsze prace związane były z opracowaniem nowych konfiguracji algorytmów ewolucyjnych, wykorzystywanych do wyznaczania trasy przejścia dla statku i manewrów antykolizyjnych oraz dla systemów autonomicznych [E.II.10, L.18]. W 2007 roku wnioskodawca, jako pierwszy zaproponował zastosowanie systemu agentowego do kierowania ruchem statków, obejmującym zarówno pojedyncze jednostki jak i większą ilość na danym akwenu (VTS) [L.19]. Idea z zastosowaniem systemu agentowego obejmowała prowadzenie negocjacji przez platformy agentowe składające się z pojedynczych agentów umieszczonych odpowiednio na statkach, jak i w centrach nadzoru ruchu statków (VTS) [A.2, E.II.11, E.II.12, L.20, L.21]. W kolejnych latach wnioskodawca rozwijał koncepcję zastosowania systemu agentowego do sterowania ruchem statków na akwenach o dużym nasileniu ruchu [E.II.13, L.22, L.23]. Do weryfikacji opracowanych algorytmów i systemów wnioskodawca opracował sieciowy symulator morskiego środowiska nawigacyjnego oraz model statku wykonany w skali 1:30 [A.1, E.II.14]. Wśród prac związanych z tematyką kierowania ruchem statków, znalazły się publikacje, w których wnioskodawca zaprezentował możliwość wykorzystania rzeczywistości rozszerzonej do prowadzenia nawigacji w postaci okularów z systemem 3D [E.II.15, L.24].

Głównym wyznacznikiem podczas prowadzenia badań przez wnioskodawcę z zakresu systemów kierowania ruchem statku, była minimalizacja zużycia energii. Wyznaczając trasę przejścia statku najważniejszym kryterium było zawsze uwzględnienie długości trasy przejścia statku i związane z nią zużycie paliwa, przy zachowaniu warunków bezpieczeństwa w postaci bezpiecznego mijania obiektów występujących w morskim środowisku nawigacyjnym [E.II.16].

Zaproponowane przez wnioskodawcę rozwiązania związane z systemami kierowania ruchem statku, mogą w znacznym stopniu przyczynić się do zmniejszenia liczby wypadków w światowej żegludze, podniesienia poziomu bezpieczeństwa na morzach, a także ograniczenia kosztów eksploatacyjnych statków.



5.2. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych związanych z elektrycznymi układami napędowymi pojazdów

Prace badawcze i projekty realizowane przez wnioskodawcę po doktoracie, znacząco rozszerzyły obszar zainteresowań naukowych. Obecnie realizowane zainteresowania związane są z projektowaniem i realizacją kompleksowych elektrycznych układów napędowych dla różnego typu pojazdów. Podejmowane działania obejmują projektowanie maszyn elektrycznych oraz algorytmów i metod sterujących ich pracą. Ponadto z uwagi na specyficzny sposób zasilania maszyn elektrycznych wykorzystywanych do napędu pojazdów – źródeł autonomicznych, część z badań poświęcona jest temu zagadnieniu. Aby eksploatacja elektrycznych układów napędowych była efektywna, prowadzone są prace związane z projektowaniem i badaniami układów pomocniczych, wspierających działanie pojazdu, jako całości.

Zagadnienia związane z opracowaniem narzędzi pomiarowych wykorzystywanych do gromadzenia, przechowywania i analizy parametrów elektrycznego układu napędowego pojazdu, przedstawione zostały w pracy [E.I.1]. Wnioskodawca przedstawił problematykę związaną z tak bardzo istotnym zagadnieniem, jakim jest akwizycja danych pomiarowych podczas prowadzenia badań, na podstawie której, można przeprowadzić analizę właściwości badanego układu napędowego i oszacować w jakim stopniu wprowadzane zmiany wpływają na zwiększenie jego efektywności. Przedstawiono konstrukcje zaprojektowanego i wykonanego urządzenia, zakres mierzonych parametrów oraz przykładowe wyniki zarejestrowanych pomiarów. Kolejne z narzędzi, jakie zdaniem wnioskodawcy jest niezbędne do prowadzenia badań związanych z elektrycznymi układami napędowymi, a w szczególności dotyczącymi magazynów energii elektrycznej, jest urządzenie do testowania akumulatorów przedstawione w pracy [E.I.2]. Wnioskodawca zaprezentował strukturę zaprojektowanego i wykonanego urządzenia do testowania akumulatorów w pojazdach z napędem elektrycznym, którego celem jest możliwość określenia stanu żywotności akumulatorów SOH (*ang. State Of Health*) wchodzących w skład magazynu energii. W pracy przedstawiono możliwości i funkcje zrealizowanego urządzenia, a także wyniki badań weryfikacyjnych przeprowadzonych na pakiecie akumulatorów LiFePO₄ pojazdu elektrycznego Fiat Panda II EV. Z uwagi na pojawiające się informacje w mediach, dotyczące możliwości wystąpienia pożaru magazynu energii w pojeździe elektrycznym, a przede wszystkim ze względu na bezpieczeństwo osób korzystających z tego typu środków transportu, wnioskodawca opracował system gaśniczy dla pojazdu z napędem elektrycznym. W pracy [E.I.3] omówiono konstrukcję, właściwości a także sposób działania opracowanego systemu. Zaprezentowano zagrożenia, jakie mogą wynikać z tytułu eksploatacji pojazdów elektrycznych oraz korzyści wynikające z zastosowania systemu gaśniczego dla pojazdów elektrycznych. Aby użytkowanie pojazdu z napędem elektrycznym było w pełni kontrolowane przez użytkownika, wnioskodawca w pracy [E.I.4] zaprezentował konstrukcję prostego układu do monitorowania i sterowania pracą ładowarki pokładowej pojazdu z użyciem technologii GSM.



Wnioskodawca przedstawił zakres realizowanych funkcji przez układ, jego konstrukcję oraz możliwości techniczne.

Mając do dyspozycji przedstawione narzędzia pomiarowe i diagnostyczne działania wnioskodawcy skupiły się wokół elektrycznych układów napędowych, jakie mogą znaleźć zastosowanie w pojazdach wodnych. W pracy [E.I.5] wnioskodawca zaproponował zastosowanie metody związanej z napowietrzaniem kadłuba statku, w celu zmniejszenia oporów hydrodynamicznych kadłuba i minimalizacji zużycia energii związanej z przemieszczaniem się jednostki. Do weryfikacji zaproponowanej metody, wnioskodawca zaprojektował i wykonał instalację napowietrzającą kadłub jednostki pływającej, z udziałem której przeprowadzono badania w rzeczywistym środowisku morskim. Prowadzone badania potwierdziły, iż zastosowanie metody napowietrzania kadłuba statku może zmniejszyć zapotrzebowanie na energię związaną z przemieszczaniem się jednostki. Badania i właściwości elektrycznego układu napędowego, opracowanego i zrealizowanego przez wnioskodawcę dla ośmioosobowej łodzi transportowej, przedstawione zostały w pracy [E.I.6]. W pracy omówiono elementy, jakie zostały zaprojektowane i wykonane na potrzeby elektrycznego układu napędowego łodzi. Przedstawiono uzyskane wyniki badań prowadzonych na akwenie Zatoki Gdańskiej, które potwierdziły, iż zastosowanie elektrycznego układu napędowego w stosunku do adekwatnego napędu spalinowego, pozwoliło na trzydziestokrotne zmniejszenie zużycia energii. W pracach [E.I.7–E.I.9, L.2] wnioskodawca zaprezentował możliwości zastosowania elektrycznego układu napędowego w takich jednostkach jak barki i małe statki. Omówione zostały podstawowe założenia konstrukcyjne i parametry urządzeń elektrycznego układu napędowego, jakie mogłyby znaleźć zastosowanie na tego typu jednostkach. Opracowana konstrukcja została wdrożona do eksploatacji.

Eksploatacja pojazdów z napędem elektrycznym oprócz korzyści związanych z minimalizacją zużycia energii i kosztów eksploatacji, przyczynia się także do redukcji hałasu emitowanego przez pojazd w trakcie użytkowania. W pracach [E.I.10–E.I.11] wnioskodawca zaprezentował zagadnienia związane z emisją hałasu w transporcie. Przedstawiono wyniki rzeczywistych badań porównawczych przeprowadzonych dla dziewięciu samochodów elektrycznych i spalinowych, dla różnych nawierzchni, po których poruszały się pojazdy. Przegląd konstrukcji elektrycznych układów napędowych stosowanych w pojazdach zaprezentowano w pracy [E.I.12]. W pracy [E.I.13] wnioskodawca zaprezentował wyniki badań porównawczych związanych z przekazywaniem momentu obrotowego z maszyny elektrycznej na koła pojazdu, za pośrednictwem skrzyni manualnej i skrzyni automatycznej starszego typu. Przedmiotowe badania prowadzone były w rzeczywistych warunkach drogowych oraz na hamowni podwoziowej. Wyniki prowadzonych badań potwierdziły, iż zastosowanie skrzyni biegów zwiększa efektywność i wydajność elektrycznego układu napędowego przyczyniając się do zwiększenia zasięgu pojazdu, uzyskania lepszych parametrów jezdnych (lepsze przyspieszenia, większe wartości prędkości maksymalnej, lepsze właściwości pokonywania wzniesień), przy jednoczesnym zmniejszeniu zużycia energii wpływającym na ograniczenie emisji CO₂ oraz kosztów eksploatacyjnych. Jednocześnie zastosowanie przekładni umożliwia zmniejszenie mocy elektrycznego układu napędowego (mniejszy i



tańszy silnik oraz falownik), przez co pojazd może być tańszy, niestety kosztem przestrzeni zajmowanej przez skrzynię biegów.

W pracach [E.I.14–E.I.18] wnioskodawca przedstawił wyniki badań rzeczywistych układów napędowych pojazdów Fiat Panda II EV, MIA Electric oraz MEGA e-City. Analizie poddano elementy elektrycznego układu napędowego takie jak silnik synchroniczny, silnik indukcyjny oraz falowniki sterujące ich pracą. Na podstawie przeprowadzonych badań przeprowadzono ocenę zużycia energii przez poszczególne układy napędowe. Opracowane konstrukcje pojazdów Fiat Panda II EV zostały wdrożone do eksploatacji.

Badania prowadzone przez wnioskodawcę nie ograniczyły się tylko do układów napędowych stosowanych w pojazdach dwuśladowych i wodnych. Wnioskodawca zaprojektował i zrealizował także konstrukcje układów napędowych, które znalazły zastosowanie w motocyklu czy gokarcie. W pracy [E.I.19] zaprezentowano elektryczny układ napędowy motocykla, który poddano badaniom w rzeczywistych warunkach drogowych i na hamowni podwoziowej. Wyniki prowadzonych badań wskazały na ponad dziesięciokrotnie niższe zużycie energii w stosunku do napędu spalinowego.

Kolejnym pojazdem, jaki poddano badaniom był gokart z napędem elektrycznym. Wyniki badań elektrycznego układu napędowego zaprojektowanego przez wnioskodawcę zostały zaprezentowane w pracy [E.I.20]. Prowadzone badania wykazały zasadność zastosowania elektrycznego układu napędowego w tego typu pojazdach, przyczyniając się do znacznego obniżenia zużycia energii oraz kosztów eksploatacyjnych. Opracowana konstrukcja została wdrożona do eksploatacji.

W pracy [E.I.21] wnioskodawca zaprezentował wyniki badań elektrycznego układu napędowego pojazdu ciężarowego z interesującym typem akumulatorów, które do prawidłowej pracy wymagają podgrzania do temperatury w zakresie 245–300°C. Ponadto zaprezentowano podstawowe parametry elektrycznego układu napędowego pojazdu ciężarowego oraz jego właściwości eksploatacyjne zgromadzone podczas zrealizowanych badań w ruchu rzeczywistym oraz na hamowni podwoziowej. Wnioskodawca przeprowadził analizę porównawczą badanego układu napędowego z konstrukcjami innych elektrycznych pojazdów ciężarowych.

Podsumowując działalność naukowo-badawczą po zakończeniu doktoratu, wnioskodawca zaprojektował, przeprowadził badania, zrealizował i wdrożył do eksploatacji kilkadziesiąt konstrukcji pojazdów z napędem elektrycznym. Prowadzone badania zostały potwierdzone realizacją **57** publikacji, dla których sumaryczny **Impact Factor** zgodny z rokiem publikacji wyniósł **13,498** punktów, a łączna liczba punktów MNiSW z uwzględnieniem współautorów **370,51**. Jednocześnie zrealizowane **wdrożenia** i wzory użytkowe wraz z zastosowaniami pozwoliły na zgromadzenie **367,91** punktów MNiSW, przeliczonych zgodnie z datą realizacji wdrożenia. Sumaryczna liczba punktów MNiSW wyniosła **738,42**.

Sumaryczny **Indeks Hirscha** zgodnie z bazą **Web of Science 4**, **Google Scholar 7**.

W latach 2007–2019 wnioskodawca był promotorem ponad **280** magistrów i inżynierów.

Lebkowski Andrzej



Bibliografia związana z osiągnięciem naukowym – pozycje wybrane

- [1] REA - Renewable Energy Association, EV FORWARD VIEW jobs, infrastructure, and a vision for the growth of Electric Vehicles in the UK. Dostępny pod adresem: <https://www.r-e-a.net/>. Dostęp: 2019-02.
- [2] SEJM Rzeczypospolitej Polskiej, *Ustawa z dnia 11 stycznia 2018 r. o elektromobilności i paliwach alternatywnych*, Dz.U. 2018 poz. 317. Dostępny pod adresem: <http://prawo.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20180000317>. Dostęp: 2019-02.
- [3] Obwieszczenie Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej, *Ustawa - Prawo o ruchu drogowym*. Dostępny pod adresem: <http://prawo.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20180001990>. Dostęp: 2019-03.
- [4] *Graphenano | Grabat Graphenano Energy | Celdas de polímero de grafeno*. Dostępny pod adresem: <https://www.grabat.es/>. Dostęp: 2019-03.
- [5] INNOLITH, *Innolith Energy Technology Brings 1000km EV Within Range - Innolith Science and Technology GmbH*. Dostępny pod adresem: <https://innolith.com/innolith-energy-technology-brings-1000km-ev-within-range/>. Dostęp: 2019-04.
- [6] M. Langridge and L. Edwards, *Future batteries, coming soon: Charge in seconds, last months and power over the air*. Dostępny pod adresem: <https://www.pocket-lint.com/gadgets/news/130380-future-batteries-coming-soon-charge-in-seconds-last-months-and-power-over-the-air>. Dostęp: 2019-03.
- [7] T. Kim, W. Song, D.-Y. Son, L. K. Ono, and Y. Qi, "Lithium-ion batteries: outlook on present, future, and hybridized technologies," *J. Mater. Chem. A*, vol. 7, no. 7, pp. 2942–2964, 2019.
- [8] W. Xu, M. M. Ismail, Y. Liu, and M. R. Islam, "Parameter Optimization of Adaptive Flux-Weakening strategy for Permanent-Magnet Synchronous Motor Drives Based on Particle Swarm Algorithm," *IEEE Trans. Power Electron.*, p. 1, 2019.
- [9] Y. Zou *et al.*, "Arrangement of Transition Process for PMSM in the Field Weakening Region," in *ICEMS 2018: 2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS) : October 7Sun-10Wed, 2018, Ramada Plaza Jeju Hotel, Jeju, Korea, Jeju*, 2018, pp. 1369–1373.
- [10] Z. Xingming, W. Xuhui, Z. Feng, Z. Huawei, and Z. Baocang, "A robust field weakening method for direct torque controlled PMSM drive system," in *2011 International Conference on Electrical Machines and Systems*, Beijing, China, 2011, pp. 1–5.
- [11] P. Vaclavek and P. Blaha, "Field weakening in PMSM model based predictive control," in *2010 IEEE International Conference on Power and Energy*, Kuala Lumpur, Malaysia, Nov. 2010, pp. 330–335.
- [12] K. Renu, N. K. Kumari, and D. R. Kumar, "Flux Weakening Operation of PMSM with Hysteresis PWM Current Controller," in *INDICON 2017: IEEE INDICON : 15-17 December 2017, IIT Roorkee, Roorkee, India*, Roorkee, 2017, pp. 1–6.
- [13] L. Kefsi, Y. Touzani, and M. Gabsi, "Hybrid Excitation Synchronous Motor control with a new flux weakening strategy," in *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2010: 1-3 Sept. 2010, Lille, France*, Lille, France, 2010, pp. 1–5.
- [14] X. Zhu, J. Huang, L. Quan, Z. Xiang, and B. Shi, "Comprehensive Sensitivity Analysis and Multiobjective Optimization Research of Permanent Magnet Flux-Intensifying Motors," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 66, no. 4, pp. 2613–2627, 2019.
- [15] D.-K. Ngo, M.-F. Hsieh, and T. A. Huynh, "Torque Enhancement for a Novel Flux Intensifying PMSynRM Using Surface-Inset Permanent Magnet," *IEEE Trans. Magn.*, pp. 1–8, 2019.
- [16] F. Liu, L. Quan, X. Zhu, L. Ge, and W. Wu, "Reverse Saliency Optimization of Flux-Intensifying Hybrid Permanent Magnet Machine for Variable Speed Applications," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 29, no. 2, pp. 1–5, 2019.
- [17] N. Limsuwan, T. Kato, K. Akatsu, and R. D. Lorenz, "Design and Evaluation of a Variable-Flux Flux-Intensifying Interior Permanent-Magnet Machine," *IEEE Trans. on Ind. Applicat.*, vol. 50, no. 2, pp. 1015–1024, 2014.
- [18] M. Aoyama and T. Noguchi, "Flux Intensifying PM-Motor with Variable Leakage Magnetic Flux Technique," in *2018 International Power Electronics Conference*, pp. 718–725.
- [19] A. M. Aljehaimi and P. Pillay, "Braking a Variable Flux-Intensifying IPMSM in Minimal Time," *IEEE Trans. Transp. Electrific.*, vol. 4, no. 4, pp. 867–876, 2018.



- [20] J. Liang *et al.*, “Gearshift and brake distribution control for regenerative braking in electric vehicles with dual clutch transmission,” *Mechanism and Machine Theory*, vol. 133, pp. 1–22, 2019.
- [21] P. J. Kollmeyer, J. D. McFarland, and T. M. Jahns, “Comparison of class 2a truck electric vehicle drivetrain losses for single- and two-speed gearbox systems with IPM traction machines,” in *IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC): Proceedings : Coeur d'Alene Resort, Coeur d'Alene, ID, U.S.A., 11-13 May 2015*, Coeur d'Alene, ID, 2015, pp. 1501–1507.
- [22] H. Laitinen, A. Lajunen, and K. Tammi, “Improving Electric Vehicle Energy Efficiency with Two-Speed Gearbox,” in *2017 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC): Proceedings : 14-17 December 2017, Belfort, France*, Belfort, 2017, pp. 1–5.
- [23] S. Li *et al.*, “Controller-free ratio-variable gearbox for hybrid powertrain: Implementation and testing,” in *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2014: 5-10 Dec. 2014, Bali, Indonesia*, Bali, Indonesia, 2014, pp. 2333–2337.
- [24] A. Sornioti *et al.*, “Analysis and simulation of the gearshift methodology for a novel two-speed transmission system for electric powertrains with a central motor,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, vol. 226, no. 7, pp. 915–929, 2012.
- [25] M. Roozegar and J. Angeles, “Gear-shifting in a novel modular multi-speed transmission for electric vehicles using linear quadratic integral control,” *Mechanism and Machine Theory*, vol. 128, pp. 359–367, 2018.
- [26] M. U. Karaoğlu, N. S. Kuralay, and C. O. Colpan, “The effect of gear ratios on the exhaust emissions and fuel consumption of a parallel hybrid vehicle powertrain,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 210, pp. 1033–1041, 2019.
- [27] A. Lebkowski, “Electric Vehicle Data Recorder,” *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, ISSN 0033-2097*, vol. 1, no. 2, pp. 286–290, DOI:10.15199/48.2017.02.62, 2017.
- [28] *The Modelica Association — Modelica Association*. Dostępny pod adresem: <https://modelica.org/>. Dostęp: 2019-03.
- [29] N. Sina, S. Nasiri, and V. Karkhaneh, “Effects of resistive loads and tire inflation pressure on tire power losses and CO2 emissions in real-world conditions,” *Applied Energy*, vol. 157, pp. 974–983, 2015.
- [30] J. Thomas, S. Huff, and B. West, “Fuel Economy and Emissions Effects of Low Tire Pressure, Open Windows, Roof Top and Hitch-Mounted Cargo, and Trailer,” *SAE Int. J. Passeng. Cars - Mech. Syst.*, vol. 7, no. 2, pp. 862–872, 2014.
- [31] Ministerstwo Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej, *Założenia do planów rozwoju śródlądowych dróg wodnych w Polsce na lata 2016-2020 z perspektywą do roku 2030.: Monitor Polski, Dziennik Urzędowy Rzeczypospolitej Polskiej, Poz. 711, Uchwała Nr 79 Rady Ministrów z dnia 14 czerwca 2016 r.* Dostępny pod adresem: <https://mgm.gov.pl/pl/zegluga-srodladowa/srodladowe-drogi-wodne/publikacje-i-materialy-informacyjne/>.
- [32] Ministerstwo Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej, *Prezydent podpisał ustawę o ratyfikacji konwencji AGN - Ministerstwo Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej*. Dostępny pod adresem: <https://www.gov.pl/web/gospodarkamorska/prezydent-podpisal-ustawe-o-ratyfikacji-konwencji-agn>. Dostęp: Apr. 21 2019.
- [33] Główny Urząd Statystyczny, *Transport wodny śródlądowy w Polsce w 2017 r.* Dostępny pod adresem: https://stat.gov.pl/files/gfx/portalinformacyjny/pl/defaultaktualnosci/5511/4/8/1/transport_wodny_srodladowy_w_polsce_w_2017.pdf. Dostęp: 2019-01.

