

doi:10.15199/48.2024.01.61

# Analiza porównawcza systemów zasilania aut niskoemisyjnych - akumulatorowego oraz hybrydowego opartego o akumulator i superkondensator

**Streszczenie.** W niniejszym opracowaniu dokonano analizy porównawczej wybranych elementów dwóch kluczowych systemów napędowych, które znajdują zastosowanie w pojazdach o charakterze niskoemisyjnym. Pierwszym z systemów jest konwencjonalny system oparty na akumulatorze, natomiast drugim to system hybrydowy, który wykorzystuje zarówno akumulator, jak i superkondensator. Celem analizy było rozpoznanie różnic pomiędzy tymi dwoma podejściami oraz określenie ich zalet, wad i potencjalnych obszarów zastosowań.

**Abstract.** This study provides a detailed comparative analysis of two key propulsion systems that are used in low-emission vehicles. The first of the systems studied is a conventional battery-based system, while the second is a hybrid system that uses both a battery and a supercapacitor. The aim of the analysis was to understand the differences between the two approaches and identify their advantages, disadvantages and potential areas of application. **Comparative analysis of powering low-emission cars.**

**Słowa kluczowe:** samochody elektryczne, super kondensator, odzyskiwanie energii, hybrydowy system magazynowania energii HESS  
**Keywords:** Electric vehicles, super capacitor, e-car battery, energy recovery, hybrid energy storage system HESS

## Wstęp

Wobec współczesnych wyzwań związanych z ochroną środowiska i wzrastającym zapotrzebowaniem na bardziej ekologiczne rozwiązania transportowe pojazdy niskoemisyjne zasilane energią elektryczną lub hybrydowe stają się nie tylko popularne, ale także niezbędne w przekształcającym się świecie mobilności. Coraz bardziej rosnące ceny paliwa oraz rygorystyczne przepisy dotyczące emisji szkodliwych gazów cieplarnianych skłaniają kierowców i producentów do poszukiwania bardziej zrównoważonych i przyjaznych dla środowiska alternatyw.

Dane statystyczne z ostatnich lat wskazują na wyraźny wzrost sprzedaży samochodów elektrycznych, w 2022 roku na świecie sprzedano 10 mln tego typu pojazdów. Według szacunków Międzynarodowej Agencji Energii w 2023 ma to być o cztery miliony więcej. Samochody elektryczne mogą stanowić 18% całkowitej sprzedaży samochodów. To wyraźny wzrost o 68% w porównaniu do roku poprzedniego. Globalnie liczba zarejestrowanych pojazdów tego typu przekroczyła już 26,8 milionów. To wyraźny sygnał, że transport elektryczny odgrywa coraz ważniejszą rolę w transformacji rynku motoryzacyjnego.

Warto przyjrzeć się bliżej przyczynom tego zjawiska, które kształtują obecny trend wzrostu popularności pojazdów niskoemisyjnych. Przede wszystkim rosnące ceny paliwa stanowią kluczowy motywator dla konsumentów, by rozważyć przejście na bardziej ekologiczne pojazdy. W miarę jak ceny paliwa na światowych rynkach idą w górę, kierowcy coraz bardziej odczuwają ciężar wydatków związanych z tankowaniem tradycyjnych pojazdów spalinowych. W takim kontekście pojazdy niskoemisyjne, takie jak elektryczne i hybrydowe, stają się atrakcyjnym wyborem.

Jednak to nie tylko wzrost cen paliwa stanowi przyczynę tego trendu. Również znacząco niższe koszty eksploatacji pojazdów elektrycznych i hybrydowych odgrywają kluczową rolę w przyciąganiu kierowców. Przede wszystkim koszty związane z ładowaniem elektrycznych pojazdów są często znacznie niższe niż wydatki na paliwo.

Dodatkowo, koszty konserwacji pojazdów niskoemisyjnych są również niższe. Silniki elektryczne mają znacznie mniej ruchomych części niż tradycyjne silniki spalinowe, co oznacza, że potrzeba mniej napraw i wymian

części. To przekłada się na długoterminowe korzyści finansowe dla właścicieli pojazdów niskoemisyjnych.

Najistotniejszym czynnikiem jest zwiększająca się presja na redukcję emisji szkodliwych substancji i gazów cieplarnianych. Obecnie obowiązująca w Unii Europejskiej norma emisji spalin EURO6d, wprowadzona w 2018 roku, stanowi tylko krok w kierunku coraz bardziej restrykcyjnych regulacji. Norma EURO7, zaplanowana do wprowadzenia w roku 2025, narzuci jeszcze ostrzejsze wymagania dotyczące emisji. Planowane jest, że tylko pojazdy hybrydowe i elektryczne będą spełniały te nowe wymagania, co ma na celu ograniczenie wpływu transportu na zmiany klimatyczne oraz jakość powietrza. Wobec wizji rygorystycznych norm emisji spalin producenci samochodów skupiają się na poszukiwaniu innowacyjnych rozwiązań. W przypadku pojazdów hybrydowych (HEV), połączenie silników spalinowych z elektrycznymi pozwala na osiągnięcie lepszych osiągnięć przy niższym zużyciu paliwa i mniejszej emisji szkodliwych substancji. Jednak wydajność i trwałość pojazdów hybrydowych zależy w dużej mierze od systemu zasilania i zarządzania energią, co stawia pod znakiem zapytania, jakie technologie będą najlepiej spełniać te wymagania [1,3].

Nie można również pominąć roli akumulatorów, które stanowią kluczowy element napędu pojazdów elektrycznych. Jednak ich ograniczenia związane z degradacją w wyniku intensywnego użytkowania oraz zmian temperatury pracy skłaniają do poszukiwania alternatywnych rozwiązań. W tym kontekście warto bliżej przyjrzeć się superkondensatorom (skrót, SC.), które, choć posiadają swoje ograniczenia, mogą stanowić ciekawą opcję jako uzupełnienie akumulatorów. Dzięki wyższej gęstości mocy i zdolności do szybkiego ładowania oraz rozładowywania superkondensatory mogą zwiększyć wydajność i trwałość systemu zasilania pojazdów elektrycznych.

Celem tego artykułu jest przeprowadzenie analizy i porównania dwóch głównych systemów zasilania pojazdów niskoemisyjnych: systemów opartych na akumulatorach i hybrydowych systemów zasilania wykorzystujących zarówno różne typy akumulatorów, jak i superkondensatory. Ponadto przeanalizujemy się na znaczeniu odpowiedniego zarządzania energią w tych

pojazdach, aby zapewnić ich optymalną wydajność i ekonomię.

W procesie rozładowywania akumulator dostarcza energię elektryczną do urządzeń w pojeździe, a reakcje redoks na elektrodach zostają odwrócone. Czterotlenek ołowiu (PbO<sub>4</sub>) jest redukowany do ołowiu (Pb), a ołów (Pb) na anodzie jest utleniany do czterotlenku ołowiu (PbO<sub>4</sub>).

Wprowadzenie superkondensatorów do pojazdów elektrycznych miało swoje początki pod koniec lat dziewięćdziesiątych dwudziestego wieku. Wówczas to zainstalowano jednostkę SC, która składała się z 40 modułów o parametrach 2,3 V i 1800 F każdy. Ten zestaw pochodził z firmy Panasonic i został zamontowany w pojeździe Mazda Bongo Friendee. Głównym celem tego eksperymentu było zbadanie wydajności SC w kontekście akumulacji energii podczas hamowania i zjazdów oraz dostarczania natychmiastowej energii podczas przyspieszania [19].

W tym samym czasie eksperymentowano również z hybrydą SC z różnymi rodzajami akumulatorów stosowanych w pojazdach elektrycznych. Obejmowało to kwasowo-olowiowe akumulatory z regulacją zaworową (VRLA), niklowo-wodorkowe (Ni-MH), litowo-jonowe (Li-Ion) i akumulatory ołowiowo-kwasowe (PbA) [7-10]. Wyniki badań sugerują, że ze względu na swoje unikalne właściwości SC stały się preferowaną alternatywą dla tradycyjnych akumulatorów w pojazdach elektrycznych

### System HESS (akumulator Lit-ion + superkondensator)

Podstawowym celem Hybrid Energy Storage System (HESS) jest połączenie superkondensatorów (SC) i akumulatorów w celu osiągnięcia doskonałej ogólnej wydajności. Ten system łączy w sobie urządzenia magazynujące energię o dużej gęstości mocy, takie jak superkondensatory, oraz te o dużej gęstości energii, jak baterie litowo-jonowe (Li-Ion). Baterie litowo-jonowe, choć charakteryzują się wysoką energią właściwą, mają ograniczoną moc właściwą oraz krótką żywotność, co ogranicza ich efektywne zastosowanie. Superkondensatory natomiast wyróżniają się dłuższą żywotnością oraz wyższą mocą właściwą [1-3]. W rezultacie, dobrze zaprojektowany HESS o dużej gęstości energii, długim cyklu życia i znacznie lepszym niż sam zespół akumulatorów o dużej gęstości mocy, może mieć duży wpływ na ogólne osiągi pojazdów elektrycznych [28].

Warto podkreślić, że ograniczona dostępność na rynku technologii magazynowania energii o znacznie wyższej wydajności jest kluczowym czynnikiem hamującym rozwój pojazdów elektrycznych, które muszą spełniać oczekiwania klientów pod względem osiągnięć, szczególnie zasięgu, przy jednoczesnym zachowaniu przystępnych cen. Wspomniane źródła energii muszą spełniać szereg rygorystycznych warunków, takich jak wysoka sprawność, duża moc i gęstość energii, długa żywotność, niezawodność oraz efektywne działanie w różnych warunkach temperaturowych [27,29].

### Wykorzystanie technologii HESS (Hybrid Energy Storage System) w pojazdach elektrycznych

Wykorzystanie technologii HESS nie jest jedynie ograniczone do ochrony przed skokami prądu docierającymi do akumulatorów. Dodatkowo HESS stanowi efektywny system przechowywania energii w pojazdach elektrycznych. Może on znacząco podnieść wydajność pojazdów elektrycznych poprzez gromadzenie energii pochodzącej z hamowania podczas jazdy.

Kiedy HESS zostaje włączony do konstrukcji pojazdów elektrycznych, energia wydzielana podczas hamowania (zwana BE, czyli Brake Energy) jest magazynowana

zarówno w superkondensatorach (SC) jak i w akumulatorach. Energię z superkondensatorów można następnie wykorzystać do przyspieszania pojazdu, podczas gdy energia zgromadzona w akumulatorach może być później używana do różnych celów, takich jak podgrzewanie wnętrza, zasilanie klimatyzacji czy zasilanie różnych urządzeń elektronicznych w samochodzie. Dlatego dobrze zaprojektowany HESS, który cechuje się wysoką gęstością energii, długim cyklem życia [11], oraz jest znacznie lepszy niż zestaw akumulatorów o dużej mocy, może znacząco wpłynąć na ogólną wydajność pojazdów elektrycznych, przyczyniając się tym samym do ich większej popularności na rynku.

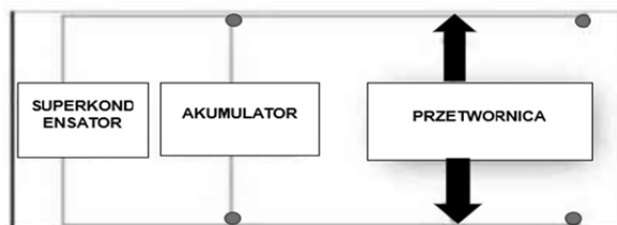
Zastosowanie technologii HESS jest szczególnie ekonomiczne w przypadku odzyskiwania energii podczas hamowania (oznaczanej jako RBE, czyli Regenerative Braking Energy) w pojazdach używanych w transporcie miejskim, takich jak autobusy miejskie.

### Możliwe konfiguracje systemu HESS

Na podstawie analizy różnych systemów opisanych w literaturze można wyodrębnić trzy główne typy hybrydowych systemów energii (HESS): pasywny, półaktywny i w pełni aktywny. Każdy z tych typów ma swoje charakterystyczne cechy i wpływ na działanie systemu. W kontekście pierwszego typu, czyli HESS pasywnego, akumulatory i moduły kondensatorów o superkondensatorach (SC) są połączone równolegle i bezpośrednio podłączone do szyny DC [1,7,13,14,15,16,21,22]. Jest to wariant, który, charakteryzuje się niższymi kosztami, jednakże nie wykorzystuje pełnego potencjału SC.

### Pasywny system HESS

HESS pasywny - to ekonomiczny system hybrydowy energii. Wykorzystuje akumulatory i superkondensatory, połączone równolegle z szyną prądu stałego (DC), bez zaawansowanych algorytmów sterujących. Jest prostszy w konstrukcji i tańszy w produkcji [23,8,20,21,22].



Rys.1. Schemat pasywnego systemu HESS. Sporządzony na podstawie [28].

Zalety takiego układu to: niekomplikowana konstrukcja oraz brak zaawansowanych algorytmów sterujących. Układ tego typu nie potrzebuje zaawansowanego zarządzania energią. Z tego powodu jest tańszy niż bardziej zaawansowane systemy HESS.

Jednak takie rozwiązanie jest obciążone pewnymi wadami do których możemy zaliczyć:

- niewykorzystany potencjał SC. Superkondensatory nie są wykorzystane w pełni, przez co traci się na wydajności,
  - ograniczona ilość energii przemieszczająca się między akumulatorami a superkondensatorami,
  - mniejsza wydajność w przypadku wysokich prądów.
- W przypadku dużych prądów może być mniej wydajny niż bardziej zaawansowane systemy.

### Półaktywny system HESS.

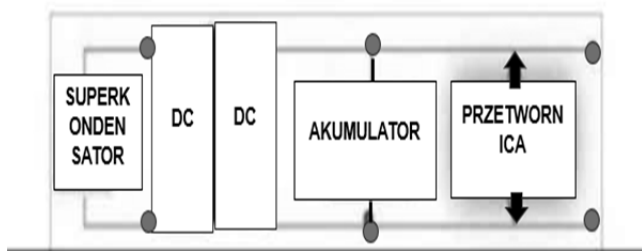
W odróżnieniu od HESS aktywnego, HESS półaktywny ma pewne ograniczone zdolności zarządzania energią.

Charakterystyka HESS półaktywnego:

- w półaktywnym systemie HESS akumulatory i superkondensatory są połączone równolegle,
- brak zaawansowanych algorytmów sterujących. HESS półaktywny nie wykorzystuje skomplikowanych algorytmów sterujących do dokładnej kontroli przepływu energii między akumulatorami a superkondensatorami, co odróżnia go od HESS aktywnego,
- kompromis między prostotą a wydajnością.

Ten rodzaj systemu jest kompromisem między prostotą HESS pasywnego a zaawansowaniem HESS aktywnego. Oferuje pewną kontrolę nad zarządzaniem energią, ale nie jest tak zaawansowany jak HESS aktywny.

Stosowanie w pojazdach elektrycznych: HESS półaktywny może być stosowany w samochodach elektrycznych, w których producenci chcą zapewnić kontrolę przepływu energii, ale niekoniecznie potrzebują pełnej kontroli oferowanej przez aktywny układ HESS [24-26]



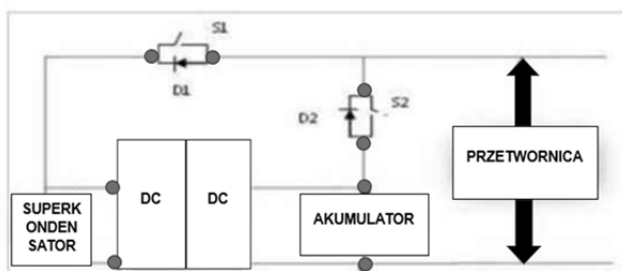
Rys.2. Schemat półaktywnego systemu HESS. Sporządzony na podstawie [28].

Zalety półaktywnego systemu HESS:

- jest prostszy niż HESS aktywny, co może przekładać się na niższe koszty produkcji.
  - oferuje pewną elastyczność w zarządzaniu energią.
- Do wad półaktywnego systemu HESS możemy zaliczyć:
- ma ograniczoną zdolność do dokładnego dostosowywania przepływu energii w porównaniu do HESS aktywnego.
  - nie wykorzystuje pełnego potencjału superkondensatorów.

### Aktywny system HESS

Cechuje go precyzyjne zarządzanie energią w celu optymalizacji wydajności pojazdu elektrycznego.



Rys.3. Schemat aktywnego systemu HESS. Sporządzony na podstawie [28].

Do głównych cech aktywnego układu HESS możemy zaliczyć:

- inteligentne zarządzanie energią.
- system jest wyposażony w zaawansowane algorytmy sterujące, które umożliwiają precyzyjne zarządzanie przepływem energii między akumulatorami a superkondensatorami. Pozwala to na optymalizację wykorzystania obu źródeł energii,
- dokładna regulacja prądu ładowania i rozładowania oraz napięcia na poziomie pojedynczych ogniw w akumulatorach

i superkondensatorach. Dzięki temu można dokładnie dostosowywać przepływ energii w zależności od potrzeb pojazdu, wysoka wydajność: dzięki zaawansowanemu zarządzaniu energią, HESS aktywny może dostarczać duże ilości energii w krótkim czasie, co jest istotne w przypadku pojazdów elektrycznych wymagających szybkiego przyspieszenia.

- zastosowanie w pojazdach o dużej mocy: HESS aktywny jest często stosowany w samochodach elektrycznych o dużej mocy, takich jak samochody sportowe lub luksusowe, gdzie osiągi i kontrola przepływu energii są kluczowe.

Zalety aktywnego systemu HESS:

system oferuje pełną kontrolę przepływu energii, co przekłada się na zwiększenie wydajności pojazdu, oszczędność energii i poprawę żywotności akumulatorów.

Wady: jako bardziej zaawansowany technicznie jest bardziej kosztowny w produkcji niż HESS pasywny lub półaktywny, co może wpłynąć na cenę pojazdu.

Ostatecznie wybór między HESS aktywnym a półaktywnym zależy od specyfikacji i wymagań dla danego pojazdu elektrycznego oraz priorytetów dotyczących zarządzania energią i wydajności.

W wielu pracach ich autorzy zwracają uwagę na to, że dopiero zastosowanie systemu zarządzania energią (EMS) umożliwi maksymalizowanie korzyści z systemu HESS w pojazdach EV/HEV. Chodzi o właściwe zarządzanie energią płynącą z i do systemu HESS. Znaczenie EMS i jego konstrukcję opisano w literaturze [30-35].

W projektach EMS najczęściej stosowanymi parametrami wejściowymi są: stan naładowania SOC akumulatorów i wyjścia, prędkość pojazdu i przyspieszenie, zapotrzebowanie na prąd, napięcie obciążenia, stan zdrowia SOH akumulatora [31], SOC SC czyli stan naładowania superkondensatora, stopień degradacji akumulatora w ujemnych temperaturach [33,37,38]. Armenta i in. [36] zaproponowali oparty na regułach EMS, który pozwala na osiągnięcie wysokiego stopnia wykorzystania energii hamowania regeneracyjnego RB i duże przyspieszenie w dowolnym momencie. Z analizy wynika, że wdrożenie EMS może zwiększyć wydajność pojazdów elektrycznych w zakresie wykorzystania energii regeneracji RE o 8–25%. Proponowany EMS steruje w oparciu o SC rozładowaniem zgromadzonej energii w taki sposób, aby minimalna moc była dopasowana do występującego obciążenia, oraz aby można było uzyskać wystarczającą, niezbędną przestrzeń do magazynowania energii z hamowania regeneracyjnego RB. W ten sposób realizowany jest nowy cykl przyspieszania pojazdu EV.

### Podsumowanie

Zastosowanie hybrydowego systemu magazynowania energii (HESS), który łączy akumulatory litowo-jonowe (Li-Ion) i superkondensatory, przynosi liczne korzyści, zwłaszcza w przypadku pojazdów niskoemisyjnych. Ta synergia technologii przekłada się na wiele pozytywnych aspektów.

Przede wszystkim, możliwość szybkiego ładowania i rozładowywania superkondensatorów stanowi klucz do przyspieszenia procesu ładowania pojazdów elektrycznych o niskiej emisji. Wykorzystanie energii kinetycznej podczas hamowania doładowuje superkondensatory, które mogą później dostarczyć tę energię do przyspieszenia pojazdu. To zwiększa efektywność i oszczędność energii, co jest niezwykle istotne dla pojazdów niskoemisyjnych.

Kolejnym korzystnym aspektem jest możliwość równomiernego rozkładania obciążeń między akumulatorami Li-Ion, co przyczynia się do wydłużenia ich żywotności. Superkondensatory pomagają wyrównać

zużycie energii, co zwiększa trwałość akumulatorów i ogólną wydajność pojazdów niskoemisyjnych.

Dodatkowo, w przypadku awarii zasilania z sieci elektrycznej, superkondensatory mogą działać jako awaryjne źródło energii, dostarczając ją przez krótki okres czasu. To kluczowe dla pojazdów niskoemisyjnych, gdzie niezawodność jest priorytetem.

Połączenie akumulatorów Li-Ion i superkondensatorów przyczynia się do uzyskania lepszych osiągnięć i efektywności. Akumulatory dostarczają energię na dłuższe trasy, podczas gdy superkondensatory wspierają przy rozruchu i przyspieszaniu, co redukuje obciążenie akumulatorów i zwiększa ich żywotność.

W kontekście pojazdów niskoemisyjnych połączenie tych technologii ma potencjał do zwiększenia efektywności energetycznej i ograniczenia emisji szkodliwych substancji, co jest zgodne z ideą zrównoważonego transportu. Jest to krok w kierunku bardziej zaawansowanych i wydajnych rozwiązań dla pojazdów o niskiej emisji.

*mgr Adam Komarnicki,*

*adam.komarnicki@onet.pl;*

*dr hab. Dariusz Szafrowski prof. PWR*

*Politechnika Wroclawska, Katedra Energoelektryki, ul. Wybrzeże*

*Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, E-mail:*

*dariusz.szafrowski@pwr.edu.pl.*

## LITERATURA

- [1] Johnson B., D. Cericola, R. Kötz, Hybridization of rechargeable batteries and electrochemical capacitors: principles and limits, *Electrochim. Acta* 72 (2012) 1–17
- [2] S. Manzetti, F. Mariasiu, Electric vehicle battery technologies: from present state to future systems, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 51 (2015) 1004–1012
- [3] M. Hannan, F. Azidin, A. Mohamed, Hybrid electric vehicles and their challenges: a review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 29 (2014) 135–150
- [4] K. Chau, Y. Wong, C. Chan, An overview of energy sources for electric vehicles, *Energy Convers. Manage* 40 (1999) 1021–1039, [http://dx.doi.org/10.1016/S0196-8904\(99\)00021-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0196-8904(99)00021-7).
- [5] B. Owens, T. Osaka, Panel discussion future prospects of lithium batteries, *J. Power Sources* 68 (1997) 173–186,
- [6] G. Gutmann, Hybrid electric vehicles and electrochemical storage systems — a technology Push–pull couple, *J. Power Sources* 84 (1999) 275–279, [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7753\(99\)00328-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7753(99)00328-6).
- [7] L. Lam, R. Louey, Development of ultra-battery for hybrid-electric vehicle applications, *J. Power Sources* 158 (2006) 1140–1148,
- [8] A. Shukla, A. Aricò, V. Antonucci, An appraisal of electric automobile power sources, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 5 (2001) 137–155.
- [9] S.F. Tie, C.W. Tan, A review of energy sources and energy management system in electric vehicles, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 20 (2013) 82–102.
- [10] M. Hannan, M. Hoque, A. Mohamed, A. Ayob, Review of energy storage systems for electric vehicle applications: issues and challenges, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 69 (2017) 771–789.
- [11] A. Burke, Ultracapacitors: why, how, and where is the technology, *J. Power Sources* (2000) 37–50.
- [12] P. Bentley, D.A. Stone, N. Schofield, The parallel combination of a VRLA cell and supercapacitor for use as a hybrid vehicle peak power buffer, *J. Power Sources* 147 (2005) 288–294.
- [13] G. Wight, H. Garabedian, B. Arnet, J. Morneau, Integration and testing of a DC/DC controlled supercapacitor into an electric vehicle, 18th International Electric Vehicle Symposium: Proceedings, 2001 October 20–24, Berlin, Germany.
- [14] C. Ashtiani, R. Wright, G. Hunt, Ultracapacitors for automotive applications, *J. Power Sources* 154 (2006) 561–566.
- [15] C. Holland, J. Weidner, R. Dougal, R. White, Experimental characterization of hybrid power systems under pulse current loads, *J. Power Sources* 109 (2002) 32–37.
- [16] A. Kuperman, I. Aharon, Battery–ultracapacitor hybrids for pulsed current loads: a review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15 (2011) 981–992.
- [17] N. Omar, M. Daoud, O. Hegazy, P. Bossche, T. Coosemans, J. Mierlo, Electrical double-layer capacitors in hybrid topologies — assessment and evaluation of their performance, *Energies* 5 (2012) 4533–4568.
- [18] K. Chau, Y. Wong, C. Chan, An overview of energy sources for electric vehicles, *Energy Convers. Manage* 40 (1999) 1021–1039.
- [19] C. Xiang, Y. Wang, S. Hu, W. Wang, A new topology and control strategy for a hybrid battery-ultracapacitor energy storage system, *Energies* 7 (2014) 2874–2896.
- [20] Z. Song, J. Li, X. Han, L. Xu, L. Lu, M. Ouyang, Health Hofmann multi-objective optimization of a semi-active battery/supercapacitor energy storage system for electric vehicles, *Appl. Energy* 135 (2014) 212–224.
- [21] S. Pay, Y. Baghzouz, Effectiveness of BAT-supercapacitor combination in electric vehicles, *IEEE Bologna Power Tech Conference, 2003 June 23rd -26th, Bologna, Italy.*
- [22] B. Wang, J. Xu, B. Cao, X. Zhou, A novel multimode hybrid energy storage system and its energy management strategy for electric vehicles, *J. Power Sources* 281 (2015) 432–443.
- [23] M. Wei, M. Marei, M. Salama, S. Lambert, Designing energy storage systems for hybrid electric vehicles, 2nd International Conference, 2005 Kaninaskis, Alberta.
- [24] J. Cao, A. Emadi, A new battery/ultracapacitor hybrid energy storage system for electric, hybrid, and plug-in hybrid electric vehicles, *IEEE Trans. Power Electron* 27 (2012) 122–132.
- [25] Z. Song, J. Li, X. Han, L. Xu, L. Lu, M. Ouyang, Health Hofmann multi-objective optimization of a semi-active battery/supercapacitor energy storage system for electric vehicles, *Appl. Energy* 135 (2014) 212–224.
- [26] Y. Bin, A. Réama, A. Cela, A. Hammar, Optymalne zarządzanie energią w hybrydowym systemie elektrycznym pojazdu z wykorzystaniem informacji o trasie z wyprzedzeniem, *IFAC Proc. Tom. 43* (2010) 30–35.
- [27] Kouchachvili, Lia, Wahiba Yaïci i Evgeniy Entchev. „Hybrid battery/supercapacitor energy storage system for the electric vehicles”. *Journal of Power Sources* 374 (2018): 237-248.
- [28] Mariasiu, Florin, and Edmond A. Kelemen. "Analysis of the Energy Efficiency of a Hybrid Energy Storage System for an Electric Vehicle." *Batteries* 9.8 (2023): 419.
- [29] K. Mikkelsen, Design and Evaluation of Hybrid Energy Storage Systems for Electric Powertrains, a Thesis Presented to the University of Waterloo in Fulfillment of the Thesis Requirement for the Degree of Master of Applied Science in Mechanical Engineering Waterloo, Ontario, Canada (2010).
- [30] H. Jung, H. Wang, T. Hu, Control design for robust tracking and smooth transition in power systems with battery/supercapacitor hybrid energy storage devices, *J. Power Sources* 267 (2014) 566–575
- [31] T. Kutrašnik, Hybridization of powertrain and downsizing of IC engine – analysis and parametric study – Part 2, *Energy Convers. Manage* 48 (2007) 1424–1434.
- [32] C. Forgez, D. Vinh Do, G. Friedrich, M. Morcrette, C. Delacourt, Thermal modeling of a cylindrical LiFePO<sub>4</sub>/graphite lithium-ion battery, *J. Power Sources* 195 (2010) 2961–2968.
- [33] Z. Song, H. Hofmann, J. Li, J. Hou, X. Zhang, M. Ouyang, The optimization of a hybrid energy storage system at subzero temperatures: energy management strategy design and battery heating requirement analysis, *Appl. Energy* 159 (2015) 576–588.
- [34] H. Yu, D. Tarsitano, X. Hu, F. Cheli, Real time energy management strategy for a fast charging electric urban bus powered by hybrid energy storage system, *Energy* 112 (2016) 322–333.
- [35] J. Armenta, C. Núñez, N. Visairo, I. Lázaro, An advanced energy management system for controlling the ultracapacitor discharge and improving the electric vehicle range, *J. Power Sources* 284 (2015) 452–458.
- [36] P. Clarke, T. Muneer, K. Cullinane, Cutting vehicle emissions with regenerative braking, *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* 15 (2010) 160–167.
- [37] M.A. Sakka, H. Gualous, J.V. Mierlo, H. Culcu, Thermal modeling and heat management of supercapacitor modules for vehicle applications, *J. Power Sources* 194 (2009) 581–587.