

**Lech M. Grzesiak, Bartłomiej Ufnalski, Arkadiusz Kaszewski, Marek Michalczuk,  
Piotr Rumniak, Andrzej Galecki, Piotr Biernat**  
Politechnika Warszawska, Warszawa

## **PRZEKSZTAŁTNIKOWY UKŁAD NAPĘDOWY DLA MIEJSKIEGO POJAZDU ELEKTRYCZNEGO Z HYBRYDOWYM MAGAZYNEM ENERGII — EMULATOR FIZYCZNY ORAZ MAKIETA MOBILNA**

### **POWER ELECTRONIC DRIVE SYSTEM FOR AN URBAN ELECTRIC VEHICLE WITH A HYBRID ENERGY STORAGE — THE PHYSICAL EMULATOR AND THE MOBILE MOCKUP**

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono opis konstrukcji oraz testy kompaktowych przekształtników energo-elektronicznych przeznaczonych dla miejskiego pojazdu elektrycznego. Zaproponowany układ napędowy składa się z dwóch silników umieszczonych w kołach, trójpoziomowych falowników napięciowych i przekształtników DC/DC współpracujących z magazynem bateryjnym i ultrakondensatorowym. Na laboratoryjnym stanowisku badawczym wykonano testy dyferencjału elektronicznego wykorzystującego model Ackermanna. Zaproponowano również regulator fuzzy logic do zarządzania mocą w hybrydowym źródle energii. Badania symulacyjne wykazały zasadność wykorzystania w regulatorze informacji o nachyleniu terenu (np. z systemu GPS) do poprawy wydajności źródła. Algorytm będzie przedmiotem przyszłych badań na makiecie mobilnej, która aktualnie jest w trakcie budowy.

**Abstract:** This paper describes the design, construction and commissioning of compact converters for an urban electric vehicle. The proposed powertrain consists of two in-wheel outer-rotor motors, three-level inverters and interleaved converters interfacing the battery and the ultracapacitors. The electronic differential with the Ackermann steering model has been tested using a non-mobile experimental setup. A fuzzy logic controller for the onboard hybrid energy source is developed and discussed. Simulation studies point out the possibility to use slope information from the navigation system to improve performance of the source. This part of the research has been validated through extensive simulation tests on the real driving cycles. A mobile mockup is currently under the development and the algorithm is going to be the subject of future field tests.

**Słowa kluczowe:** *hybrydowy magazyn energii, dyferencjał elektroniczny, pojazd elektryczny*

**Keywords:** *hybrid energy storage, electronic differential, electric vehicle*

## **1. Wprowadzenie**

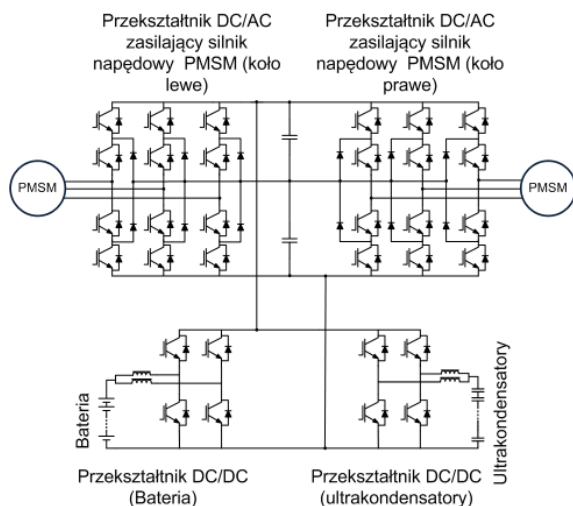
Jednym z zadań realizowanego projektu ECO-Mobilność jest zbudowanie specjalnego samochodu elektrycznego, z którego mogą korzystać osoby o ograniczonej sprawności ruchowej, dedykowanego dla obszaru silnie zurbanizowanego [1]. Podstawowe parametry projektowanego pojazdu przedstawiono w Tab. 1. W projektowanym samochodzie wykorzystano napęd bezpośredni, gdzie w każdym z tylnych kół jezdnych wbudowany zostanie silnik synchroniczny z magnesami trwałymi z zewnętrznym wirnikiem. Napęd bezpośredni jest jednym z obiecujących rozwiązań pojazdów elektrycznych m.in. ze względu na: mniejszą liczbę części mechanicznych, wyższą sprawność i niższe koszty utrzymania w porównaniu z rozwiązaniami wykorzystującymi przekładnie mechaniczne [2, 3].

*Tab. 1. Parametry projektowanego pojazdu*

<b>Parametr</b>	<b>Wartość</b>
Znamionowa moc pojazdu	12 kW
Zasięg	80 km
Prędkość maksymalna	60 km/h
Masa	1400 kg
Magazyn bateryjny	40 Ah/295 V
Znamionowa moc silnika	6 kW
Znamionowy moment silnika	146 Nm
Współczynnik przeciążenia momentem	3
Napięcie na głównej szynie DC	300-600 V

W pojeździe zainstalowany zostanie hybrydowy magazyn energii: zestaw ogniw elektrochemicznych i magazyn ultrakondensatorowy [4, 5]. Na Rys. 1 przedstawiono schemat ideowy układu przekształtnikowego dla pojazdu z hy-

brydowym magazynem energii. Układ przekształtnikowy składa się z dwóch falowników trójpoziomowych zasilających silniki napędowe oraz dwóch dwugąździowych przekształtników DC/DC, sterowanych z przepłotem, współpracujących odpowiednio z magazynem bateryjnym i ultrakondensatorowym.



Rys. 1. Schemat ideowy układu przekształtnikowego dla pojazdu z hybrydowym magazynem energii

W artykule przedstawiono opisy konstrukcji przekształtników energoelektronicznych dla pojazdu elektrycznego oraz zamieszczono wyniki badań komputerowych i laboratoryjnych układu sterowania realizującego algorytm różnicowania elektronicznego i zarządzania przepływem energii w hybrydowym magazynie energii.

## 2. Przekształtniki dla pojazdu elektrycznego

Dla samochodu elektrycznego zostały zaprojektowane dwa przekształtniki napędowe DC/AC i jeden układ przekształtników DC/DC współpracujący z hybrydowym magazynem energii. Układy te umieszczone zostaną w tylnej części pojazdu nad kołami. Wybrane parametry elektro-mechaniczne zaprojektowanych układów zostały przedstawione w Tab. 2 oraz Tab. 3.

Tab. 2. Wybrane parametry układów DC/AC

Przekształtnik napędowy – 2 szt.	
Moduły IGBT: (trójpoziomowe)	SK150MLI066T 150A, 600V – 3 szt.
DC-link:	B25655J4307K**1 (450V; 250µF) – 2 szt.
Wymiary: (z obudową)	Dł.: 321mm Wys.: 150mm

	Szer.: 211mm
Masa (z obudową):	7,5 kg
Objętość (z obudową):	10 dm <sup>3</sup>
Gęstość mocy:	5,07 kW/kg 3,8 kW/dm <sup>3</sup>

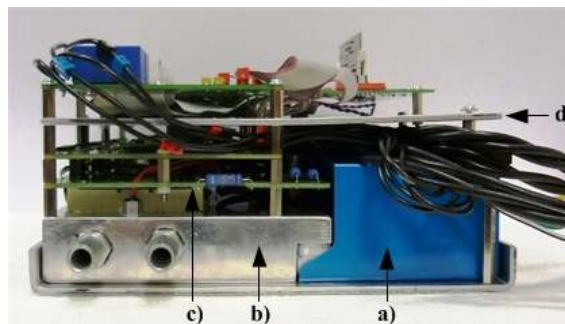
Tab. 3. Wybrane parametry układów DC/DC

Przekształtniki DC/DC – 1 szt.	
Moduły IGBT: (dwupoziomowe)	SK100GH12T4T 100A, 1200V – 4 szt.
DC-link:	ALS30A222MF4000 (400V; 2,2mF) – 4 szt.
Wymiary: (z obudową)	Dł.: 292mm Wys.: 210mm Szer.: 208mm
Masa, (z obudową)	8,5 kg
Objętość (z obudową):	12,75 dm <sup>3</sup>
Gęstość mocy:	6,35 kW/kg 4,23 kW/dm <sup>3</sup>

Gęstości mocy w odniesieniu do objętości (kW/dm<sup>3</sup>) są wynikiem zastosowanej średniej skali integracji umożliwiającej efektywne wykorzystanie dostępnej dla przekształtników przestrzeni. Otrzymana gęstość mocy w odniesieniu do masy (kW/kg) mieści się w obszarze współczesnych rozwiązań komercyjnych (moc przekształtników do 50kW) [6].

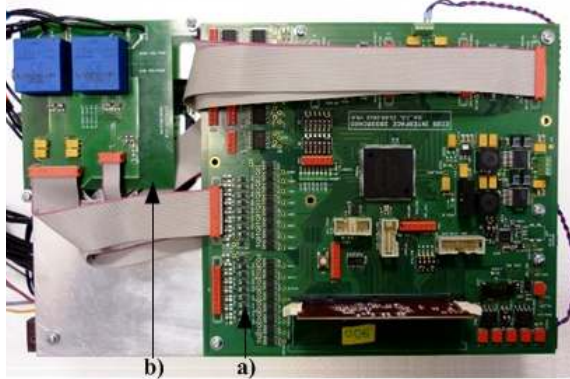
### 2.1. Przekształtniki napędowe DC/AC

Przedstawiony na Rys. 2 układ przekształtnikowy DC/AC ma budowę warstwową. Pierwszą dolną warstwą konstrukcji przekształtnika DC/AC jest podstawa z zamontowanym radiatorem oraz dwoma szeregowo połączonymi kondensatorami DC-linku. Kolejną warstwą konstrukcji jest płyta PCB (ang. Printed Circuit Board) obwodów silnopiędowych wraz z układami pomiaru prądów fazowych silnika. Nad nią znajdują się obwody drukowane ze sterownikami bramkowymi.



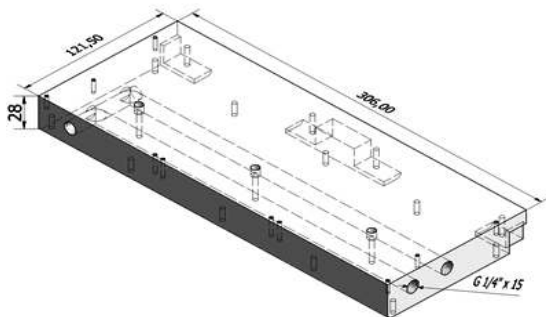
Rys. 2. Przekształtnik DC/AC – widok z przodu: a) kondensator DC-linku, b) radiator, c) płyta silnopiędowa, d) płyta montażowa

Część silnopiędową od układów realizujących sterowanie oddziela płyta montażowa. Zamontowano na niej interfejs opracowany dla mikrokontrolera TMS320F28335 wraz z układem programowalnym FPGA. Obok interfejsu umiejscowiono płytę z układami realizującymi pomiary napięć w obwodzie pośredniczącym (Rys. 3).



Rys. 3. Przekształtnik DC/AC – widok z góry: a) płyta interfejsu z mikrokontrolerem, b) płyta układów pomiarowych

Dla obydwu typów przekształtników opracowano radiatory chłodzone cieczą. Koncepcję radiatora dla przekształtnika DC/AC przedstawiono na Rys. 4. Inspiracją dla jego opracowania była nota aplikacyjna producenta modułów IGBT [7]. Geometria radiatora uwzględnia zastosowanie kondensatorów suchych dedykowanych dla rozwiązań z obszaru pojazdów Mild Hybrid [8]. Prostopadłościenna obudowa kondensatorów ułatwia ich integrację z pozostałymi komponentami przekształtnika.

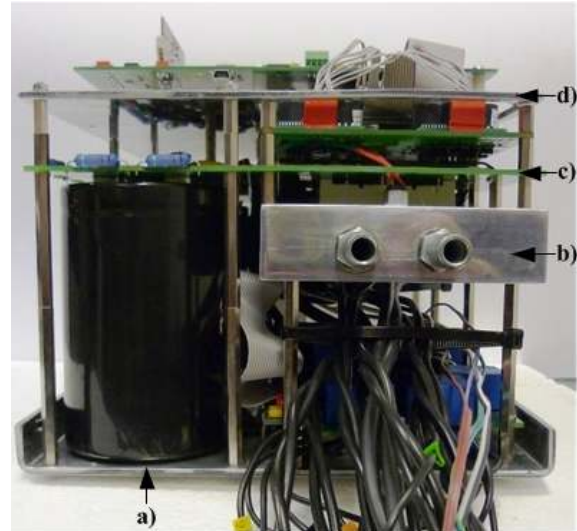


Rys. 4. Szkic radiatora chłodzonego cieczą

## 2.2. Przekształtniki DC/DC

Założony układ DC/DC przedstawiono na Rys. 5-6. Na radiatorze zamocowano dwa moduły IGBT dla dwóch przekształtników DC/DC zintegrowanych w ramach płyty silnopiędowej.

W tym przypadku radiator znajduje się w centralnej części urządzenia z uwagi na wysokość kondensatorów elektrolitycznych. Przestrzeń pomiędzy podstawą, a radiatorem wykorzystano do umieszczenia układów pomiarowych napięć i prądów oraz wyprowadzenia przewodów.



Rys. 5. Przekształtniki DC/DC – widok z przodu: a) kondensator DC-linku, b) radiator, c) płyta silnopiędowa, d) płyta montażowa

Nad płytą z obwodami silnopiędowymi umieszczone są sterowniki bramkowe, a następnie płyta montażowa. Na niej zamocowano interfejs z mikrokontrolerem realizującym sterowanie dla zaprojektowanego złożonego układu dwóch przekształtników DC/DC.



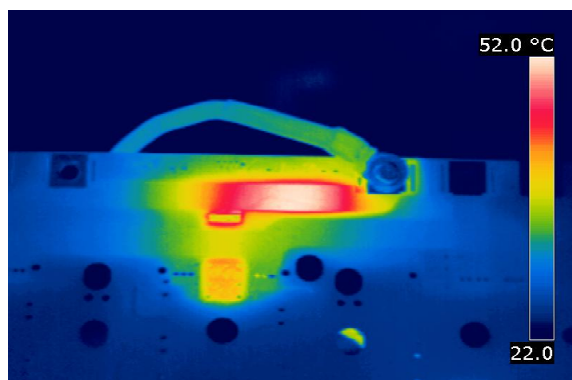
Rys. 6. Przekształtniki DC/DC – widok z boku: a) płyta układów pomiarowych, b) płyta interfejsu z mikrokontrolerem

## 2.3. Testy elektryczne i termiczne

Obwody drukowane zaprojektowanych przekształtników poddano testom obciążalności prądowej ścieżek. Na Rys. 7 przedstawiono przykładowy rozkład temperaturowy płyty PCB



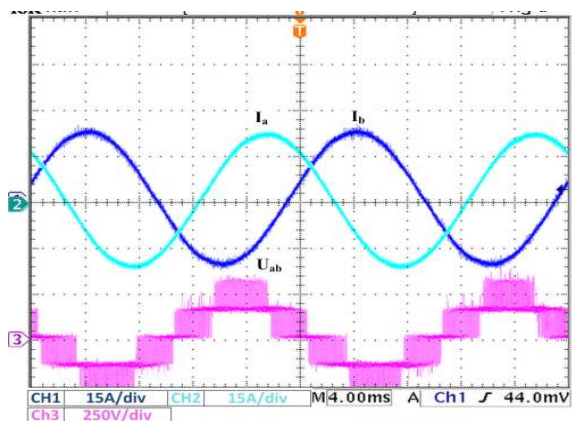
dla przypadku, kiedy wymuszony został przepływ prądu stałego o wartości 40A przez jeden z obwodów. Zaobserwowano 30°C wzrost temperatury obwodu.



Rys. 7. Rozkład temperatury ścieżki silnopiędowej dla wartości prądu 40A

Przeprowadzono również badania dla prądów 60A oraz 80A, dla których maksymalna temperatura ścieżki w czasie 30 minutowych testów osiągnęła wartość odpowiednio 90°C oraz 135°C.

Testy uruchomieniowe falownika z obciążeniem typu RL wykonano przy znamionowym napięciu (600V) i prądzie wyjściowym (14A). Przebiegi prądów fazowych i napięcia przewodowego przedstawia Rys. 8.

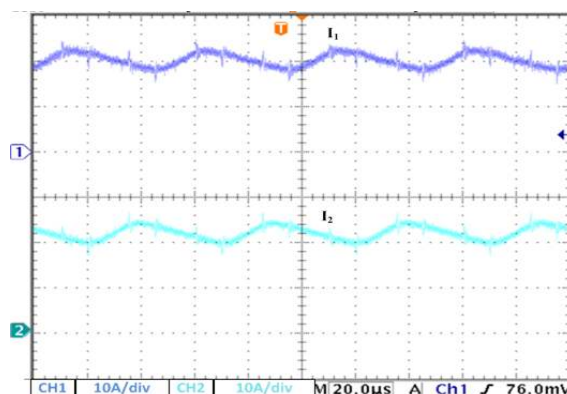


Rys. 8. Przebiegi prądów (kanał 1, 2) i napięcia przewodowego (kanał 3) przekształtnika DC/AC

Wykonano również test symulujący awarię układu chłodzenia w sytuacji trzykrotnego prądowego przeciążenia silnika. Po 5 minutach, od momentu zatrzymania obiegu cieczy w układzie chłodzenia, zarejestrowano wzrost temperatury radiatora o ok. 30°C.

Przykładowy oscylogram z przebiegami prądów w obu gałęziach przekształtnika DC/DC obniżającego napięcie przedstawiono na Rys. 9. Test przekształtnika DC/DC odbył się dla na-

pięcia 600V w obwodzie pośredniczącym napięcia stałego oraz znamionowym prądzie obciążenia 40A (suma prądów dwóch gałęzi).



Rys. 9. Przebiegi prądów przekształtnika DC/DC w dwóch gałęziach ( $I_1$ ,  $I_2$ )

Wykonane projekty obwodów elektrycznych uwzględniają możliwość wystąpienia chwilowych przeciążeń układów przekształtników bez ryzyka ich uszkodzenia. W przypadku awarii układu chłodzenia duża pojemność cieplna radiatorów umożliwia bezpieczne zatrzymanie się pojazdu.

### 3. Dyferencjał elektroniczny

Zadaniem dyferencjału jest zróżnicowanie prędkości obrotowej kół napędowych pojazdu na zakręcie, kiedy jedno z kół napędowych musi przebyć dłuższą drogę, niż drugie koło w tym samym czasie. W przypadku projektowanego samochodu elektrycznego nie ma możliwości zastosowania dyferencjału mechanicznego, z uwagi na to, że wykorzystano niezależny napęd bezpośredni. Należy zatem w pojeździe zastosować dyferencjał elektroniczny zapewniający odpowiednie kształtowanie różnicy prędkości koła zewnętrznego i wewnętrznego.

Jednym z najprostszych rozwiązań dyferencjału elektronicznego jest wykorzystanie układu regulacji ze sterowaniem momentowym (Rys. 10). W układzie tym podczas skręcania w sposób naturalny powstaje różnica prędkości kół [9]. Alternatywą do tego rozwiązania jest układ regulacji z regulatorem prędkości średniej (Rys. 11), gdzie sygnałem zadanym jest prędkość. Wadą rozwiązania sterowania momentowego i układu z regulatorem prędkości średniej jest utrata efektywnego przenoszenia momentu napędowego przy całkowitym poślizgu jednego z kół. Układ z oddzielnymi regulatorami prędkości dla koła lewego i prawego nie posiada tej

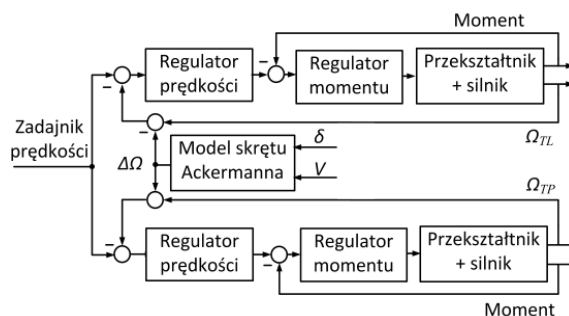
wady (Rys. 12). Wymagana jest jednak informacja o różnicy tych prędkości. Modelem pozwalającym na wyznaczenie tej różnicy w funkcji m.in. kąta obrotu kierownicy jest model Ackermanna [10]:

$$\Omega_{TL}^{ref} = \frac{v}{R_d} \cdot \left(1 + \frac{D}{2L} \cdot \text{tg}(\delta)\right) \quad (1)$$

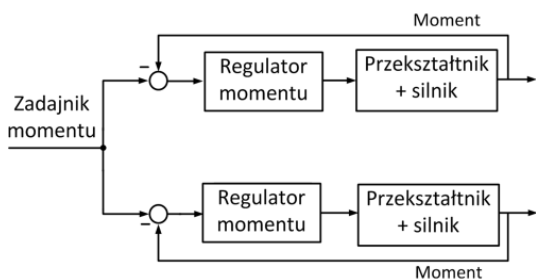
$$\Omega_{TP}^{ref} = \frac{v}{R_d} \cdot \left(1 - \frac{D}{2L} \cdot \text{tg}(\delta)\right) \quad (2)$$

$$\Delta\Omega = \frac{1}{2}(\Omega_{TL}^{ref} - \Omega_{TP}^{ref}) \quad (3)$$

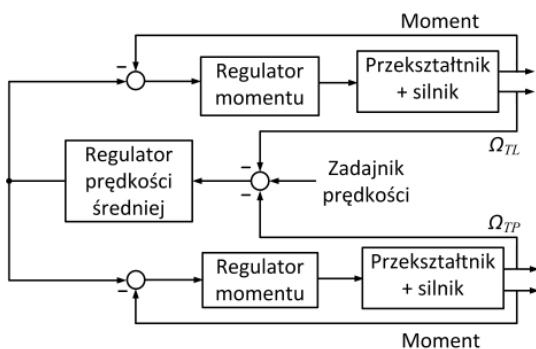
gdzie:  $\Omega_{TL}^{ref}$  – zadana prędkość kątowna lewego tylnego koła [rad/s],  $\Omega_{TP}^{ref}$  – zadana prędkość kątowna prawego tylnego koła [rad/s],  $L$  – rozstaw osi samochodu [m],  $\delta$  – kąt skrętu środka przedniej osi (kierownicy) [rad],  $D$  – rozstaw kół samochodu [m],  $R_d$  – promień dynamiczny opony [m],  $v$  – prędkość pojazdu [m/s],  $\Delta\Omega$  – połowa różnicy zadanych prędkości kątowych. Poprawna praca układu uwarunkowana jest odpowiednio dokładną identyfikacją modelu skrętu przyjętego przy realizacji konstrukcji mechanicznej. Na Rys. 12 wyjściem z bloku „Model skrętu Ackermanna” jest połowa różnicy zadanych prędkości kątowych  $\Delta\Omega$ .



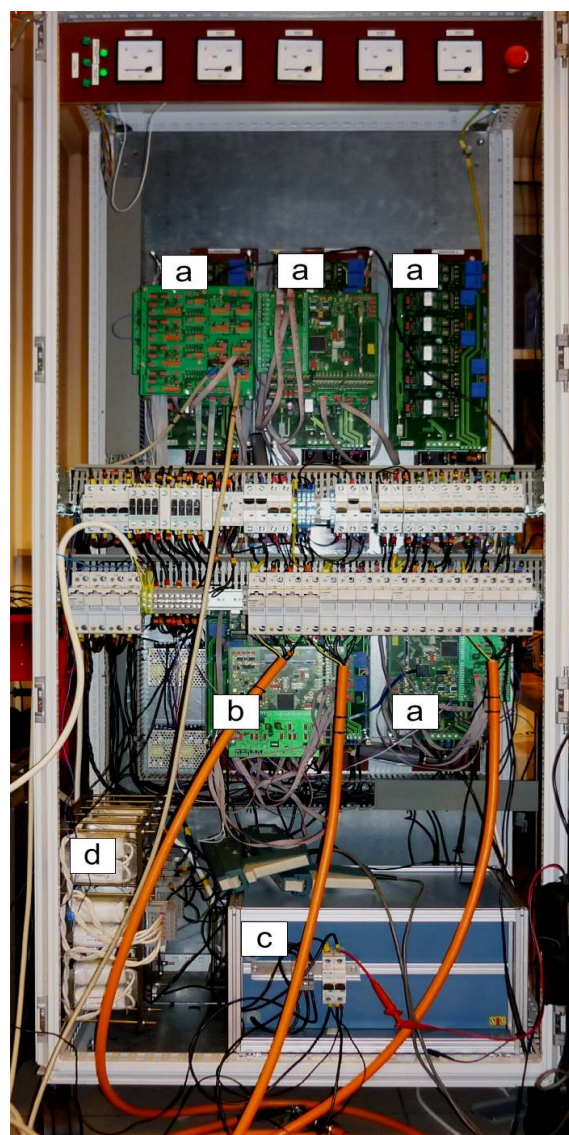
Rys. 12. Schemat blokowy układu regulacji z modelem Ackermanna



Rys. 10. Schemat blokowy układu regulacji ze sterowaniem momentowym



Rys. 11. Schemat blokowy układu regulacji z regulatorem prędkości średniej



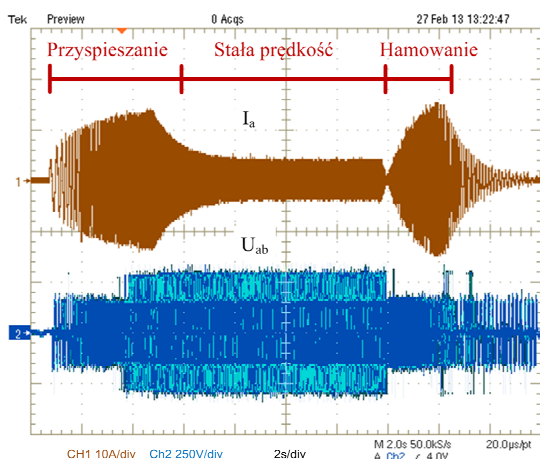
Rys. 13. Laboratoryjne stanowisko badawcze: a) przekształtnik DC/AC, b) przekształtnik AC/DC, dwa przekształtniki DC/DC, c) magazyn ultrakondensatorowy, d) dławiki

Wstępne testy dyferencjału elektronicznego wykorzystującego model Ackermanna wykonano na laboratoryjnym stanowisku badawczym

(Rys. 13, Rys. 14). W zespole maszynowym na wspólnym wale sprzęgnięte są dwa silniki. Silnik napędowy obciążony jest silnikiem emulującym siły oporowe występujące w rzeczywistym pojeździe. Zamodelowano dwie składowe siły. Pierwsza składowa jest funkcją kwadratu prędkości obrotowej napędu (opory aerodynamiczne). Natomiast druga składowa ma wartość proporcjonalną do przyspieszenia (siły bezwładności). Na Rys. 15 i Rys. 16 przedstawiono przykładowe przebiegi prądu, napięcia przewodowego oraz prędkości kątowej dla jednego z silników napędowych w trakcie jazdy ze stałym przyspieszeniem i stałą prędkością.

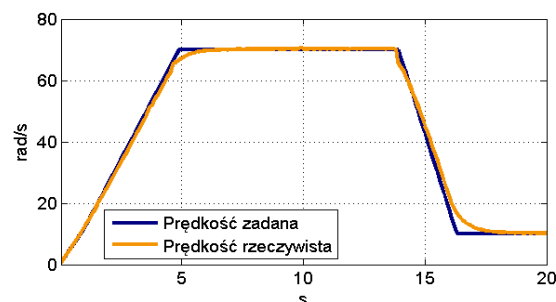


Rys. 14. Zespoły maszynowe z silnikami PMSM



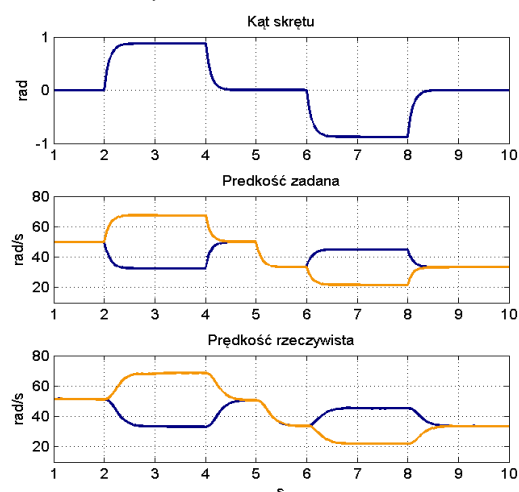
Rys. 15. Przebiegi prądu  $I_a$  oraz napięcia przewodowego  $U_{ab}$  silnika napędowego w trakcie przyspieszania, jazdy ze stałą prędkością i hamowania

Dyferencjał elektroniczny został zrealizowany w formie rozproszonej (dwa sterowniki). Na jednym ze sterowników zaimplementowano sterowanie prędkościowe wraz z algorytmem realizującym funkcję zwracającą wartość wyjścia modelu skrętu.



Rys. 16. Przebieg prędkości kątowej silnika napędowego

Aktualną wartość  $\Delta\Omega$  przesyłano, wykorzystując magistralę CAN, do sterownika, na którym zrealizowano algorytm sterowania prędkościowego drugiego silnika napędowego [11, 12]. W badanym układzie prędkość magistrali wynosiła 250kb/s przy częstotliwości wysyłania komunikatu 100Hz. Rysunek 17 przedstawia przebiegi kąta skrętu kierownicy, prędkości zadanej oraz prędkości silników napędowych. Zadawanie dużego kąta skrętu miało na celu uwypuklić działanie algorytmu. W typowych pojazdach samochodowych maksymalny kąt skrętu wynosi około 0,5 rad.



Rys. 17. Przebiegi zadanego kąta skrętu kierownicy, prędkości zadanej oraz prędkości rzeczywistej kół lewego (żółty) i prawego (niebieski)

#### 4. Zarządzanie mocą w hybrydowym źródle energii

Główny zasobnik energii pojazdu stanowią ogniwa  $\text{LiFePO}_4$  o użytecznej pojemności 9,5 kWh (przy głębokości rozładowania do 80%). Poprawę wydajności źródła energii można uzyskać wspierając elektrochemiczny magazyn ultrakondensatorowym magazynem energii.



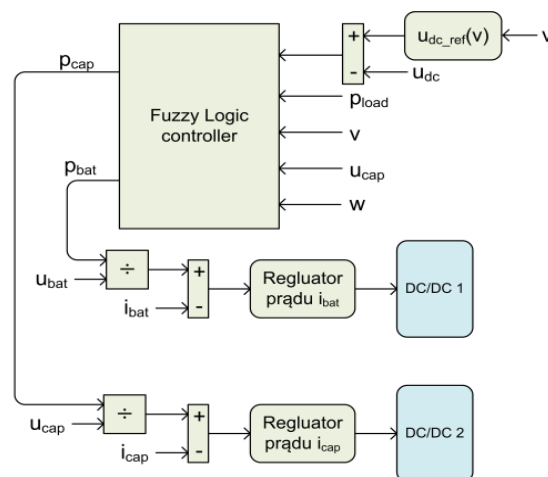
Zasadność takiej hybrydyzacji źródła energii dla miejskiego pojazdu elektrycznego została zaprezentowana w [1, 4, 5]. Parametry źródła energii przedstawiono w Tab. 4. Proponowane hybrydowe źródło energii zawiera dwa przekształtniki DC/DC (Rys. 1). Umożliwiają one kontrolę podziału mocy pomiędzy zasobniki oraz pozwalają utrzymać, niezależnie od ich stanu naładowania, żądany poziom napięcia wyjściowego na głównej szynie DC, do której dołączone są przekształtniki napędowe.

Tab. 4. Parametry hybrydowego źródła energii

Parametr	LiFePO <sub>4</sub>	Ultrakondensatory
Napięcie nominalne	295 V	485 V
Pojemność ogniwa	40 Ah	310 F
Liczba ogniw	92	176
Całkowita zmagazynowana energia	12 kWh	55Wh
Masa	155kg	11kg
Moc nominalna	6kW	8kW
Moc maksymalna	35kW	70kW

Zapotrzebowanie na moc w stanach ustalonej prędkości pokrywane jest przez magazyn baterijny, natomiast w stanach dynamicznych podstawowy magazyn wspierany jest przez magazyn ultrakondensatorowy. Algorytm zarządzania hybrydowym źródłem powinien zapewniać prawidłowy podział mocy oraz stan naładowania ultrakondensatorów umożliwiające odbiór energii podczas hamowania. Utrzymanie odpowiedniego poziomu naładowania jest szczególnie istotne ze względu na fakt, iż energia użyteczna magazynu wspierającego (41Wh przy rozładowaniu do połowy napięcia nominalnego) jest mniejsza od energii kinetycznej pojazdu przy maksymalnej prędkości 60km/h (55Wh). W przypadku gwałtownego przyspieszania do dużych prędkości zbyt wczesne wsparcie baterii elektrochemicznych przez magazyn wspomagający powoduje rozładowanie ultrakondensatorów i brak ich udziału w końcowej fazie przyspieszania, gdy zapotrzebowanie na moc jest największe. Z drugiej strony wsparcie tylko największych impulsów mocy (przy największych prędkościach) skutkuje nieefektywnym wykorzystaniem magazynu ultrakondensatorowego. Jako przykład może posłużyć sytuacja hamowania, gdy poruszamy się z prędkością zbliżoną do połowy prędkości maksymalnej, a magazyn wspierający jest naładowany i nie byłoby dopuszczalne zgromadzenie w nim energii możliwej do odzyskania podczas hamowa-

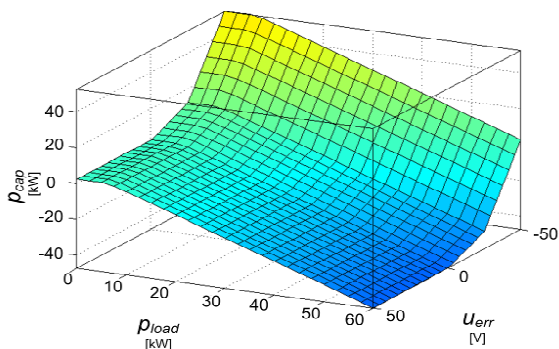
nia. Algorytm zarządzania hybrydowym źródłem energii zrealizowano w oparciu o logikę rozmytą. Jest on rozwinięciem struktury regulacji opisanej w [1]. Regulator rozmyty cechuje się łatwiejszym dla projektanta doбором praw sterowania, co jest istotne zwłaszcza przy przetwarzaniu wielu informacji wejściowych. Pozwala on łatwo implementować złożone procesy sterowania za pomocą prostych reguł logicznych.



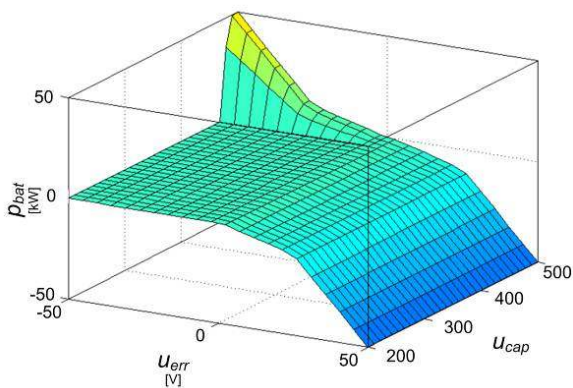
Rys. 18. Schemat układu sterowania bazującego na logice rozmytej dla hybrydowego źródła energii

W przedstawionej na Rys. 18 strukturze regulacji utrzymanie zadanego napięcia wyjściowego oraz właściwy podział mocy dokonywany jest przy użyciu regulatora rozmytego. Kontrola mocy każdego źródła odbywa się pośrednio przez wewnętrzną pętlę regulacji prądu źródła. W prezentowanym rozwiązaniu regulator rozmyty ma siedem zmiennych wejściowych i dwie wyjściowe. Sygnałami wejściowymi są: uchyb napięcia wyjściowego źródła ( $u_{err}$ ), moc obciążenia ( $p_{load}$ ), prędkość pojazdu ( $v$ ), napięcie magazynu ultrakondensatorowego ( $u_{cap}$ ), oraz kwadrat prędkości ( $v^2$ ) i kwadrat napięcia ultrakondensatorów ( $u_{cap}^2$ ). Opcjonalnie wykorzystana może zostać także zmienna niosąca informację o wzniesieniu terenu ( $w$ ). Zmiennymi wyjściowymi są moc magazynu baterijnego ( $p_{bat}$ ) i moc magazynu ultrakondensatorowego ( $p_{cap}$ ). Moc magazynu baterijnego i moc magazynu ultrakondensatorowego w funkcji wybranych zmiennych wejściowych przedstawiono na Rys. 19-23. Wartości  $v^2$  i  $u_{cap}^2$  znormalizowano względem  $v_{max}^2$  ( $v_{max}=60\text{km/h}$ ) i  $u_{max}^2$  ( $u_{max}=485\text{V}$ ). Zmienne  $u_{err}$ ,  $p_{load}$ ,  $v$ ,  $u_{cap}$  determinują przepływ mocy pomiędzy poszczegól-

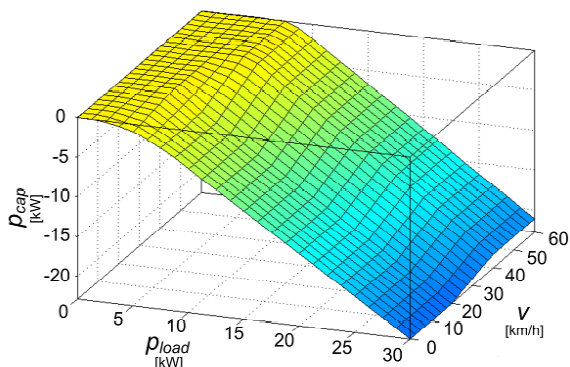
nymi zasobnikami, a układem napędowym. Natomiast na podstawie zmiennych  $u_{cap}^2$ ,  $v^2$  i  $w$  obliczana jest składowa mocy odpowiedzialna za wymianę energii pomiędzy magazynami. Oznacza to, iż moc obliczona dla obydwu zasobników na podstawie tych zmiennych jest jednakowa co do wartości, lecz z przeciwnym znakiem. Dodatnie wartości mocy oznaczają ładowanie magazynu.



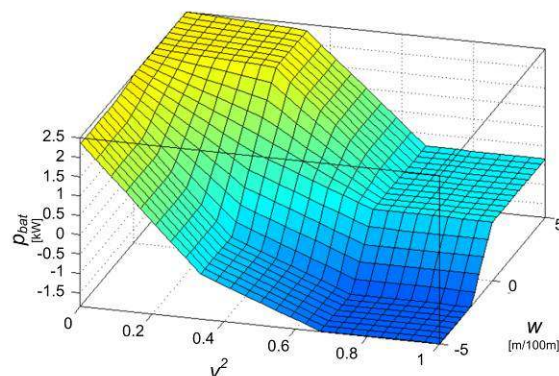
Rys. 19. Moc magazynu ultrakondensatorowego ( $p_{cap}$ ) w funkcji mocy obciążenia ( $p_{load}$ ) i uchybu napięcia wyjściowego ( $u_{err}$ ) przy  $v=30\text{km/h}$ ,  $u_{cap}=350\text{V}$



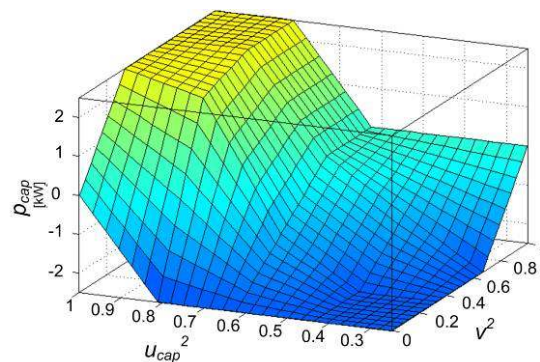
Rys. 20. Moc magazynu baterijnego ( $p_{bat}$ ) w funkcji uchybu napięcia wyjściowego ( $u_{err}$ ) i napięcia ultrakondensatorów ( $u_{cap}$ )



Rys. 21. Moc magazynu ultrakondensatorowego ( $p_{cap}$ ) w funkcji mocy obciążenia ( $p_{load}$ ) i prędkości pojazdu ( $v$ ) przy  $u_{err}=0$ ,  $u_{cap}=350\text{V}$



Rys. 22. Moc magazynu baterijnego ( $p_{bat}$ ) w funkcji prędkości pojazdu ( $v$ ) i wzniesienia terenu ( $w$ ) przy  $u_{cap}^2=0.625$



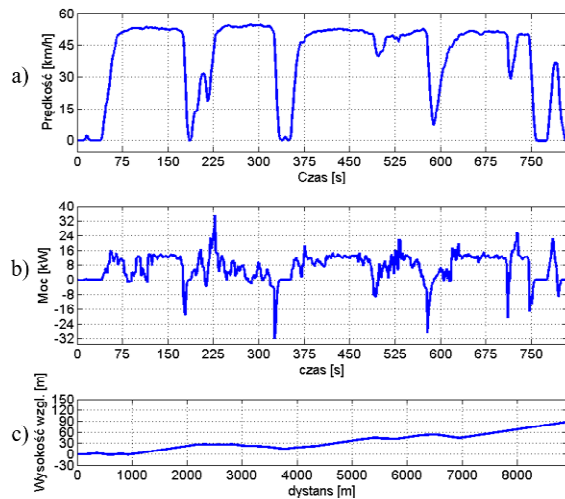
Rys. 23. Moc magazynu ultrakondensatorowego ( $p_{cap}$ ) w funkcji kwadratu napięcia ultrakondensatorów ( $u_{cap}^2$ ) i kwadratu prędkości pojazdu ( $v$ ) przy  $w=0$

Nachylenie trasy w znacznym stopniu wpływa na moc pobieraną lub dostarczaną do źródła. Jazda pod wzniesienie wymaga utrzymywania większego zapasu energii w magazynie wspierającym ze względu na zwiększony pobór mocy i mniejszy odzysk energii. Z kolei jazda ze wzgórza obniża zapotrzebowanie na moc i zwiększa energię odzyskiwaną podczas hamowania, należy zatem obniżyć stan naładowania ultrakondensatorów. Informacja o nachyleniu trasy może być dostarczana przez system nawigacji wykorzystujący ogólnodostępne mapy topograficzne (DEM – digital elevation model) dla odbiorników GPS [13].

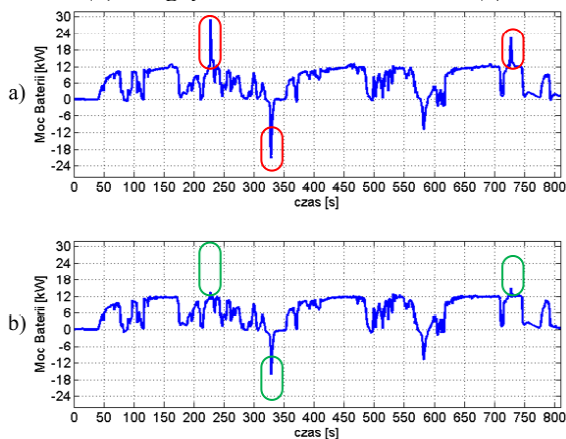
Rysunek 24 przedstawia przebiegi czasowe prędkości i mocy dla podmiejskiego cyklu jazdy oraz względną zmianę wysokości trasy. Rysunek 25 przedstawia pobór mocy dla dwóch przypadków: gdy system nawigacji nie jest wykorzystywany oraz, gdy informacja o nachyleniu terenu jest dostępna. Zarówno dodatnie jak i ujemne impulsy mocy zostały znacząco ogra-



niczone w przypadku, gdy topografia trasy jest znana. Przykład ten pokazuje zasadność wykorzystania danych topograficznych do predykcji zmian mocy pobieranej ze źródła.

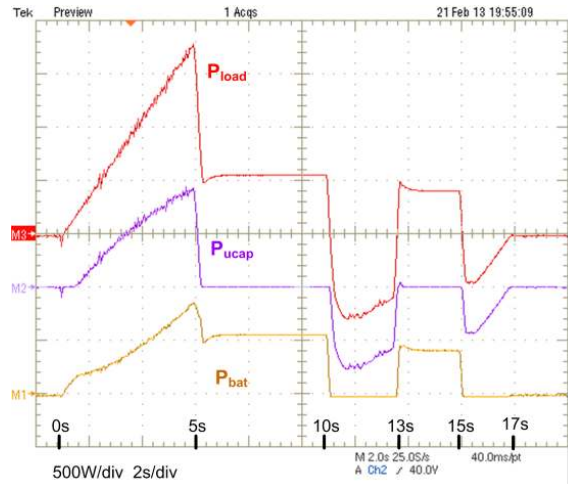


Rys. 24. Prędkość pojazdu (a), Pobór mocy ze źródła (b), względne wzniesienie terenu (c)



Rys. 25. Chwilowe wartości mocy magazynu elektrochemicznego: informacja o topografii trasy niedostępna (a), informacja o topografii trasy dostępna (b)

Układ rozdziału mocy w hybrydowym źródle energii przetestowano na laboratoryjnym stanowisku napędowym (Rys. 13). Główny elektrochemiczny magazyn energii został na stanowisku zastąpiony źródłem sieciowym z prostownikiem aktywnym [1]. Przykładowe wyniki dla teoretycznego cyklu jazdy przedstawiono na Rys. 26.



Rys. 26. Podział mocy pobieranej przez układ napędowy ( $P_{load}$ ), pomiędzy główne źródło energii ( $P_{bat}$ ) oraz źródło ultrakondensatorowe ( $P_{ucap}$ ), 0-5s przyspieszanie, 5-10s i 13-15s jazda ze stałą prędkością, 10-13s i 15-17s hamowanie

## 5. Podsumowanie

W artykule przedstawiono zaprojektowane i wykonane układy przekształtnikowe współpracujące z hybrydowym źródłem energii dla pojazdu elektrycznego. Efektywność zaproponowanych rozwiązań zilustrowano wybranymi testami elektrycznymi i termicznymi.

Na stanowisku badawczym zrealizowano rozproszony system sterowania realizujący rozdział momentów napędowych z uwzględnieniem modelu skrętu.

Opracowano rozmyty algorytm zarządzania mocą w bateryjno-ultrakondensatorowym źródle energii. Wyniki przeprowadzonych badań dla rzeczywistego cyklu jazdy pokazują celowość wykorzystania danych z systemu nawigacji w celu ograniczenia impulsów mocy pobieranych z magazynu elektrochemicznego.

## 6. Literatura

- [1]. Grzesiak L. M., Ufnalski B., Kaszewski A., Gąbka G., Michalczyk M., Gałęcki A., Biernat P., Rumniak. P.: *Układ napędowy elektrycznego pojazdu miejskiego z hybrydowym bateryjno-ultrakondensatorowym magazynem energii*. Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne nr 95, 2012, wyd. BOBRME KOMEL, s. 13-20.
- [2]. Xiao F., Deng Q.L., Liu J.C.: *Design of direct-drive axial flux permanent magnet in-wheel machine for electric vehicle*. IEEE Electrical International Conference on Machines and Systems, ICEMS, 2011, s. 1-4.
- [3]. Rudnicki T.: *Koszty eksploatacyjne pojazdu elektrycznego*. Zeszyty Problemowe - Maszyny Ele-

tryczne nr 97, 2012, wyd. BOBRME KOMEL, s. 49-52.

[4]. Michalczuk M., Grzesiak L.M., Ufnalski B.: *A lithium battery and ultracapacitor hybrid energy source for an urban electric vehicle*. Przegląd elektrotechniczny, nr. 4b, 2012, s. 158-162.

[5]. Fice M., Setlak R.: *Napęd hybrydowy pojazdów miejskich z podwójnym zasobnikiem energii elektrycznej*. Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne nr 79, 2008, wyd. BOBRME KOMEL, s. 139-144.

[6]. Gover J.: *A Tutorial on Hybrid Electric Vehicles: EV, HEV, PHEV and FCEV*. Mid-Michigan SAE tutorial, 2009, ([www.midmichigansae.org/documents/DrGoverPresentationSAEApril20.pdf](http://www.midmichigansae.org/documents/DrGoverPresentationSAEApril20.pdf)).

[7]. *Hybrid Kit for HybridPACK™ Evaluation Kit for Applications with HybridPACK™ Module*. Application Note V2.5, 2012, ([www.infineon.com](http://www.infineon.com)).

[8]. *Film capacitors – Power electronic capacitors. PCC series for Mild HEV HybridPACK™*. 2009, ([www.epcos.com](http://www.epcos.com)).

[9]. You S., Lee H., Lee D., Mok H., Lee Y.: Han S.: *Speed ratio control for electronic differentials*. IEEE Electronics Letters, ISSN: 0013-5194, vol. 47, 2011, s. 933-934.

[10]. Szumanowski A.: *Projektowanie dyferencjałów elektromechanicznych elektrycznych pojazdów drogowych*. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji, Warszawa-Radom, 2007.

[11]. Grzesiak L. M., Ufnalski B., Gąbka G.: *Magistrala CAN w sprzężeniu zwrotnym układu regulacji prędkości dla pojazdu elektrycznego – badania*

*techniką HIL*. Przegląd Elektrotechniczny, nr. 11a, 2012, s. 1-7.

[12]. Lewandowski D., Łukasiak P., Szyller B.: *Zdalna diagnostyka napędu elektrycznego współpracującego z siecią CAN*. Przegląd Elektrotechniczny, nr 4b, 2012, s. 140-145.

[13]. Earth Resources Observation and Science (EROS) Center ([eros.usgs.gov](http://eros.usgs.gov)).

### Autorzy

dr hab. inż. Lech M. Grzesiak, prof. PW  
tel. 022 234 7362

email: [lech.grzesiak@ee.pw.edu.pl](mailto:lech.grzesiak@ee.pw.edu.pl)

dr inż. Bartłomiej Ufnalski, tel. 022 234 6138

email: [bartlomiej.ufnalski@ee.pw.edu.pl](mailto:bartlomiej.ufnalski@ee.pw.edu.pl)

dr inż. Arkadiusz Kaszewski

mgr inż. Marek Michalczuk

mgr inż. Piotr Rumniak

mgr inż. Andrzej Gałęcki

mgr inż. Piotr Biernat

Politechnika Warszawska, Wydział Elektryczny, Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa

### Informacje dodatkowe

Praca finansowana z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach projektu ECO-Mobilność WND POIG.01.03.01-14-154/09, 2009-2013



INNOVATIVE ECONOMY  
NATIONAL COHESION STRATEGY



EUROPEAN UNION  
EUROPEAN REGIONAL  
DEVELOPMENT FUND

