

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

UKŁAD NAPEĐDOWY ELEKTRYCZNEGO POJAZDU MIEJSKIEGO Z HYBRYDOWYM BATERYJNO-ULTRAKONDENSATOROWYM MAGAZYNEM ENERGII

AN ELECTRIC VEHICLE POWERTRAIN WITH A HYBRID BATTERY AND ULTRACAPACITOR ENERGY STORAGE FOR URBAN AREAS

Abstract: This paper presents a four-motor drive system designed within the frame of ECO-Mobility Project (ECO-Car subtask). A flexible non-mobile experimental set-up with an ultracapacitor energy storage for 2WD electric car powertrains testing is under development. Proposed topology with an active grid converter will allow to simulate electrochemical battery with any desired characteristics. This in turn will enable various experiment scenarios in terms of battery cells quality, wear level and thermal conditions. Our next target is to design a powertrain (power converters and controllers) for a mobile mockup, incl. an auxiliary energy storage and a converter that interfaces a LiFePO₄ battery pack. A control strategy for the hybrid onboard energy storage is presented in detail. Some decisions concerning system functionality are discussed. A mobile mockup is also under construction. The proposed vehicle has been designed as a city car suitable equally for disabled, elderly and fit people.

1. Uniwersalny zero-emisyjny pojazd miejski

Rosnące zainteresowanie pojazdami elektrycznymi [1], w tym jako alternatywnym środkiem transportu na obszarach silnie zurbanizowanych, wynika nie tylko z mody na pro-ekologiczne pojazdy, ale przede wszystkim z realnej potrzeby ograniczania emisji spalin i hałasu, istotnej szczególnie w centrach dużych miast. Należy mieć na uwadze, że zero-emisyjność pojazdu typu BEV (**B**attery **E**lectric **V**ehicle) dopiero w połączeniu z wytwarzaniem energii elektrycznej w oparciu o źródła odnawialne daje rozwiązanie ekologiczne zarówno po stronie użytkownika końcowego, jak i dostawcy energii elektrycznej wykorzystanej do ładowania baterii trakcyjnej tego pojazdu. Rozwijane są koncepcje typu V2G (**V**ehicle **t**o **G**rid), w których pojazdy typu BEV stanowią np. rozproszony magazyn energii dla energetyki odnawialnej (szczególnie w przypadku takich źródeł jak wiatr i promieniowanie słoneczne) [2, 3]. Układ napędowy z silnikiem elektrycznym jest rozwiązaniem pozwalającym na istotne zredukowanie liczby ruchomych elementów mechanicznych w stosunku do napędu z silnikiem spalinowym (ICE = **I**nternal **C**ombustion **E**ngine). Istotne uproszczenie konstrukcji mechanicznej dotyczy nie tylko samego silnika. Napęd taki, z uwagi na charakterystykę mecha-

niczną silnika elektrycznego, pozwalającą przy odpowiednim sterowaniu na wytworzenie pełnego momentu już przy zerowej prędkości, umożliwia wyeliminowanie skrzyni biegów. Przeszkodą na drodze do popularyzacji tego typu pojazdu są ograniczenia po stronie stosowanych w tego typu rozwiązaniach magazynach energii, w szczególności ich żywotność, gabaryty i cena [4]. Dlatego obecnie wysiłki wielu ośrodków badawczych skupiają się na poprawie efektywności tego magazynu zarówno pod względem jego żywotności, jak i gęstości energii oraz gęstości mocy. Obserwowany ciągły wzrost tych parametrów, wraz z planowaną masową produkcją magazynów energii dla samochodów elektrycznych, pozwala przypuszczać, że tego typu pojazdy zdobędą akceptację również odbiorcy indywidualnego. Obecnie jednak głównym odbiorcą tego typu pojazdów są firmy działające w obszarze wypożyczania i leasingu samochodów, np. [5], oraz firmy przewozowe, w tym kurierskie i transportu miejskiego, które coraz częściej uzupełniają swoją flotę o pojazdy typu BEV lub PHEV (**P**lug-in **H**ybrid **E**lectric **V**ehicle). Szczególnie pojawiające się ze strony wypożyczalni zapotrzebowanie na możliwie najbardziej uniwersalny pojazd, nie wykluczający z grona użyt-

kowników osób poruszających się na wózku inwalidzkim, leży u podstaw naszej motywacji do opracowania koncepcji przekształtnikowego układu napędowego dla takiego pojazdu. Nasze społeczeństwo starzeje się i stale rośnie odsetek osób niepełnosprawnych fizycznie. Z uwagi na wymóg płaskiej podłogi pozwalającej osobie niepełnosprawnej na dostawanie się do pojazdu z trzech stron, bez konieczności przesiadania się z wózka na fotel, zdecydowano o umieszczeniu silników wewnątrz kół (w aktualnie realizowanej koncepcji są to tylne koła). Będą to maszyny synchroniczne o magnesach trwałych (PMSM = **P**ermanent **M**agnet **S**ynchronous **M**otor) z zewnętrznym wirnikiem, do którego bezpośrednio mocowana będzie obręcz z oponą. Jednocześnie magazyn energii elektrycznej umieszczony zostanie w podłodze o orientacyjnej grubości 10cm. W naszym Instytucie opracowywany jest złożony przekształtnik napędowy wraz z dodatkowym magazynem energii wspierającym w stanach dynamicznych magazyn podstawowy. W dalszej części artykułu przedstawiony zostanie niemobilny układ przekształtnikowy budowany w celu zweryfikowania opracowanej koncepcji układu napędowego.

2. Wybór topologii - koncepcja hybrydowego magazynu energii dla pojazdu elektrycznego

Instalowanie w pojeździe dwóch różnych źródeł/magazynów energii (określane mianem hybrydyzacji) wynika z ograniczeń danego źródła uniemożliwiających spełnienie wszystkich założeń technicznych. Coraz częściej pojawiają się też pojazdy określane mianem trybrydowych (*ang.* tribrids, tribrid cars). Termin HEV (**H**ybrid **E**lectric **V**ehicle) najczęściej kojarzony jest z rozwiązaniami zakładającymi obecność ICE oraz silnika/generatora elektrycznego wraz z EES (**E**lectric **E**nergy **S**torage) w układzie napędowym. Topologie, w których dodatkowo istnieje możliwość doładowywania EES z zewnętrznego źródła energii, określa się mianem PHEV (**P**lug-in **H**EV) lub EREV (**E**xtended-**R**ange **E**lectric **V**ehicle). Hybrydowymi nazywane są również czasami pojazdy, które mają w układzie napędowym tylko jeden typ silnika, ale dwa różne źródła/magazyny energii, np. ICE przystosowany do spalania benzyny i etanolu zmieszanych w dowolnych proporcjach lub tylko silnik elektryczny, ale dwa różne źródła energii elektrycznej, np. ogniwo paliwowe (FC = **F**uel **C**ell) i elektrochemiczne. Przykładem

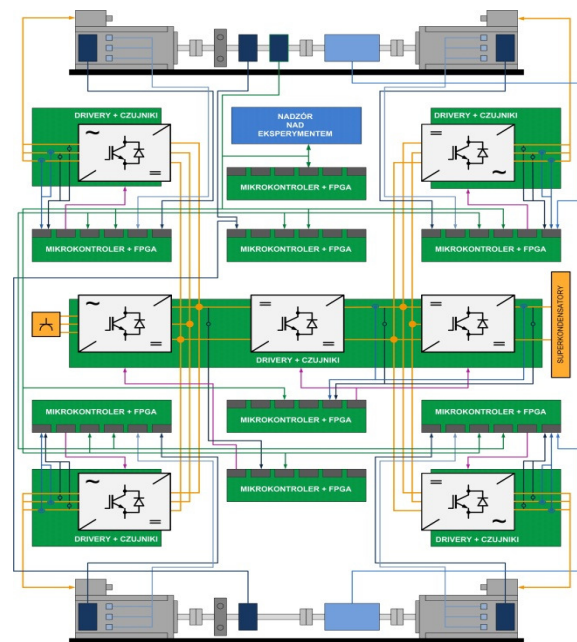
trybrydy może być pojazd ICE+FC+EES. Do grupy trybryd można też zaliczyć topologie typu ICE+HEES (**H**ybrid **E**lectric **E**nergy **S**torage) łączące zalety np. ogniw elektrochemicznych i ultrakondensatorów [6]. Przykładem takiego pojazdu miejskiego jest autobus Urbino 18 Hybrid Vossloh Kiepe [7]. Wymagania stawiane przed pojazdem rzadko jednoznacznie definiują typ układu napędowego. Podstawowym ograniczeniem po stronie BEV jest stosunkowo mały zasięg, wynikający z gęstości energii oferowanych przez dostępne na rynku akumulatory oraz ich ceny. Istotnym ograniczeniem jest też brak odpowiedniej infrastruktury stacji szybkiego ładowania (dopiero tworzona w wybranych aglomeracjach) lub wymiany baterii akumulatorów trakcyjnych (wymaga standaryzacji EES i obecnie budowane systemy mają raczej charakter demonstracyjny) [8]. W przypadku rozważanego pojazdu zdecydowano, że będzie to zero-emisyjny pojazd z hybrydowym magazynem energii elektrycznej. Podstawowy magazyn energii złożony z ogniw LiFePO₄ będzie wspierany w stanach dynamicznych pojazdu magazynem ultrakondensatorowym. Podstawową zaletą takiego połączenia jest wzrost żywotności magazynu podstawowego, wzrost sprawności procesu odzyskiwania energii mechanicznej oraz zapewnienie wymaganej mocy w stanach dynamicznych w szerokim zakresie temperatur magazynu podstawowego [9].

3. Niemobilny układ badawczy

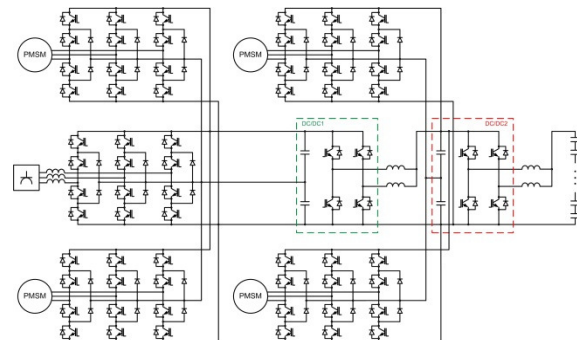
Zaprojektowano stanowisko do badania układów sterowania dla napędów pojazdów 2WD. Schemat blokowy układu niemobilnego przedstawiający topologię układu sterowania zaprezentowano na Rys. 1. Układ składa się z dwóch zespołów maszynowych. Każdy zespół składa się z: dwóch silników PMSM wyposażonych w hallotrony (możliwość sterowania jak BLDC) i enkoder absolutny, momentomierza, enkodera inkrementalnego oraz dodatkowej masy wirującej symulującej moment bezwładności koła. Pozostałe siły (np. siły bezwładności, oporów powietrza, składowej siły ciężkości) występujące w rzeczywistym pojeździe symulowane są przez hamownię. Każdy silnik zasilany jest z indywidualnego przekształtnika trójpoziomowego. W obwodzie napięcia stałego znajduje się trójpoziomowy prostownik aktywny połączony z siecią trójfazową oraz dwa przekształtniki DC/DC. Pierwszy z nich (obniżający na-

pięć wyjściowe prostownika aktywnego) umieszczono pomiędzy szyną DC napędów pełniących funkcję hamowni, a szyną DC badanych napędów. Pozwala on na kontrolowanie przepływu energii pomiędzy tymi grupami napędów, co z kolei umożliwia testowanie drugiego przekształtnika DC/DC (podwyższającego napięcie), wchodzącego w skład ultrakondensatorowego magazynu energii, w warunkach zbliżonych do rzeczywistych warunków trakcyjnych. Ze względów bezpieczeństwa oraz częściowo również ekonomicznych, zdecydowano o modelowaniu charakterystyk akumulatora poprzez odpowiednie kształtowanie sygnałów zadanych dla przekształtnika obniżającego napięcie. Topologię przekształtnika przedstawia Rys. 2. Do sterowania pracą wszystkich przekształtników wykorzystano opracowane w Instytucie sterowniki składające się z mikrokontrolera zmiennoprzecinkowego oraz układu programowalnego FPGA. Rozwiązania takie, łączące zalety przetwarzania szeregowego i równoległego, są coraz częściej wykorzystywane przy realizacji układów sterowania z uwagi na dużą ich elastyczność sprzętowo-programową wymaganą w procesie szybkiego prototypowania [10]. Na Rys. 3 przedstawiony jest schemat funkcjonalno-blokowy płyty głównej sterownika widocznej na Rys. 4. Rolę podstawowej jednostki obliczeniowej pełni zmiennoprzecinkowy procesor DSP, na którym realizowane są algorytmy sterowania poszczególnymi przekształtnikami. Jednostka centralna może się komunikować z urządzeniami zewnętrznymi z wykorzystaniem magistrali CANbus (2 niezależne linie), komunikacji szeregowej RS232, USB i protokołem I2C. Wszystkie interfejsy, z wyjątkiem USB, mają pełną izolację galwaniczną. Dodatkowa pamięć EEPROM podłączona do procesora ma posłużyć do zapisywania parametrów urządzenia bez potrzeby przeprogramowywania samego procesora. Układ DSP ma możliwość odczytania 16 wielkości analogowych. W torach analogowych zastosowano także układy porównujące (komparatory), wyjścia których podłączone są do układu FPGA. Informacja z wyjścia komparatora będzie przetwarzana niezależnie przez układ FPGA i w stanach awaryjnych będzie stanowiła zabezpieczenie sprzętowe tranzystorów IGBT. Sygnały PWM, wytwarzane przez DSP, z wykorzystaniem układu FPGA i bufora, doprowadzone są do sterowników tranzystorowych. Matryca logiczna FPGA jest wykorzy-

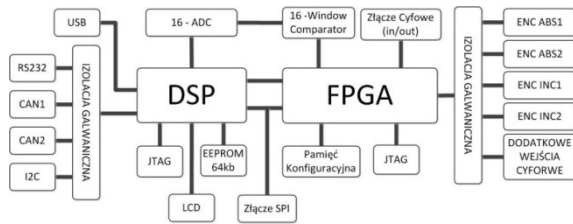
stywana m.in. do obsługi czujników położenia wału (dwóch enkoderów absolutnych SSI) i czujników przemieszczenia (dwóch enkoderów inkrementalnych QEP). Komunikacja pomiędzy FPGA i DSP zrealizowana została przy użyciu interfejsu SPI (Serial Peripheral Interface). Zastosowany procesor DSP posiada sprzętowo obsługę SPI. Nadzór nad eksperymentem odbywa się przy użyciu konwertera CAN-to-USB podpiętego do głównej magistrali CAN łączącej wszystkie przekształtniki. Panel operatorski opracowano w środowisku LabVIEW. Dodatkowo w układzie zaproponowano wydzieloną magistralę CAN zarezerwowaną do przesyłania informacji wykorzystywanych do realizacji sterowania w pętli zamkniętej, tj. informacji o bieżących prędkościach i obliczonych na tej podstawie momentach zadanych. Wybrane parametry układu niemobilnego zebrano w Tab. 1.



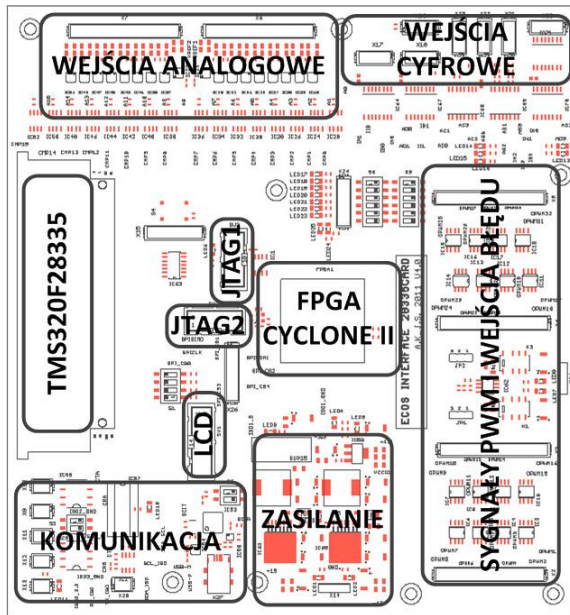
Rys. 1. Schemat poglądowy niemobilnego stanowiska badawczego



Rys. 2. Topologia przekształtnika dla niemobilnego układu badawczego



Rys. 3. Schemat funkcjonalny sterownika opartego o mikroprocesor DSP i matrycę FPGA



Rys. 4. Rozmieszczenie elementów na płycie głównej sterownika

Tab. 1. Wybrane parametry niemobilnego układu badawczego

Nazwa	Parametry
Prostownik aktywny	Typ modułu: SK75MLI066T $I_C = 75A$ $V_{CES} = 600V$ Indukcyjność filtra $L_f = 0.5 \dots 1.5mH$ (możliwość zmiany co 0.5mH) $I_{sk} = 30A$ $U_{zas} = 230/400V AC$ Pojemność DC-linku 1 $C_{DC1} = 4mF$
Przekształtniki napędowe	Typ modułu: SK75MLI066T Pojemność DC-linku 2 $C_{DC2} = 3.5mF$
Przekształtniki DC/DC	Typ modułu: SK100GH12T4T $I_C = 100A$ $V_{CES} = 1200V$ $L_f = 1mH$
Bank ultrakondensatorów	$U_{max} = 324V$ $C_{lkond} = 310F$

	$n = 120$ (szeregowo) $E = 38Wh$ Masa: ok. 7kg
Silniki	Typ: PMSM z dodatkowo zamontowanymi hallotronami $P_n = 3.5kW$ $M_n = 14.2Nm$ $n_n = 2400$ obr/min $n_{max} = 7000$ obr/min Liczba par biegunów: 4
Dodatkowa demontowalna masa wirująca	$0.01kgm^2$ (ok. dwukrotny wzrost momentu bezwładności)

4. Algorytmy sterowania

Główny zasobnik energii projektowanego pojazdu stanowi pakiet litowych ogniw elektrochemicznych. Bateria, w skład której wchodzi 92 szeregowo połączone ogniwa typu $LiFePO_4$, stanowi źródło energii o napięciu nominalnym 300V i zgromadzonej energii równej 12kWh, co pozwala uzyskać zasięg pojazdu ok. 80km przy 70% DOD (Depth of Discharge). Badania statystyczne pokazują, że w Europie 80% podróży samochodem jest krótsza niż 25km [11]. Oznacza to, że nawet taki stosunkowo niewielki zasięg pojazdu miejskiego, podyktowany z naszej strony założeniami ekonomicznymi i dostępną przestrzenią w podłodze, może być w pełni funkcjonalny. Jednocześnie strategie biznesowe wielu wypożyczalni zakładają dysponowanie liczną flotą stosunkowo tanich pojazdów. Akumulatory elektrochemiczne zasilają obwód pośredniczący napięcia stałego poprzez dwukierunkowy przekształtnik energoelektroniczny podbijający napięcie wyjściowe do 600V. Dwugałęziowy przekształtnik zwiększa niezawodność systemu zasilania. W sytuacji wykrycia uszkodzenia tranzystora lub jego sterownika bramkowego następuje próba podjęcia pracy w trybie przekształtnika jednogałęziowego. Ponadto przesunięcie impulsów sterujących pomiędzy dwoma gałęziami o 180° elektrycznych zmniejsza amplitudę tętnień prądu baterii oraz zwiększa dwukrotnie ich częstotliwość w porównaniu do przekształtnika jednogałęziowego.

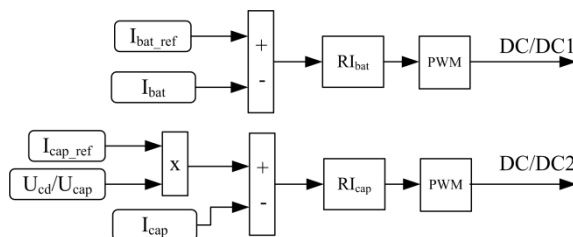
Wydajność magazynu elektrochemicznego jest uzależniona od warunków użytkowania, a te w przypadku napędu samochodu są pod wieloma względami niekorzystne (ujemne temperatury otoczenia, duże zmiany mocy chwilowej podczas hamowania i przyspieszania). Ogniwa litowe prezentują dobre właściwości wyłącznie

w temperaturach zbliżonych do 25°C oraz przy natężeniach prądu do 0.5C (C-rate). Duże natężenia prądów oraz niskie temperatury powodują spadek sprawności oraz dostępnej mocy, co skutkuje zmniejszeniem zasięgu pojazdu oraz spadkiem maksymalnego przyspieszenia [12, 13, 14, 15]. Z kolei wysoka temperatura i duże wartości prądów rozładowczych znacząco skracają żywotność baterii [16, 17].

Poprawę efektywności źródła energii można uzyskać wspierając podstawowy magazyn ultrakondensatorowym magazynem energii. Ogniwa ultrakondensatorowe charakteryzują się wysoką gęstością mocy (na poziomie 5kW/kg), dużą liczbą cykli ładowania i rozładowania oraz małymi zmianami pojemności i rezystancji wewnętrznej pod wpływem temperatury w porównaniu do głównego magazynu energii.

Dodatkowy magazyn energii dołączony jest do wspólnej szyny DC przekształtników napędowych poprzez przekształtnik dwukierunkowy. Zastosowanie dwóch przekształtników, współpracujących z każdym zasobnikiem energii, umożliwia kontrolę podziału mocy pomiędzy zasobniki oraz pozwala utrzymać żądany poziom napięcia wyjściowego niezależnie od stanu naładowania poszczególnych magazynów [18, 19, 20, 21].

Główna idea zarządzania mocą w hybrydowym magazynie energii polega na pokryciu z magazynu akumulatorowego zapotrzebowania na moc w stanach ustalonych, natomiast w stanach dynamicznych podstawowy magazyn wspierany jest przez magazyn ultrakondensatorowy. Rysunek 5 przedstawia dwie wewnętrzne pętle regulacji prądu źródła. Utrzymanie zadanego napięcia wyjściowego oraz właściwy podział mocy dokonywany jest poprzez wyznaczenie odpowiedniej wartości zadanej prądu dla poszczególnych magazynów energii (I_{cap_ref} , I_{bat_ref}).



Rys. 5. Wewnętrzna pętla regulacji hybrydowego magazynu energii

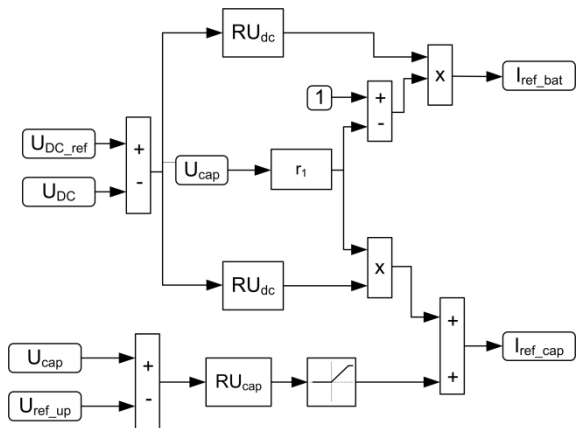
Schemat blokowy wyznaczania zadanych wartości prądów w przypadku, gdy następuje zwrot

energii do źródła podczas hamowania lub jazdy w dół ($I_{load} < 0$) przedstawia Rys. 6. Współczynnik r_1 , zależny od stanu naładowania ultrakondensatorów (Rys. 7), określa podział mocy pomiędzy oba zasobniki. W pierwszej kolejności energia gromadzona jest w ultrakondensatorach, lecz w miarę zbliżania się do maksymalnego napięcia, dalsze ich doładowanie jest ograniczane i następuje wzrost energii przekazywanej do baterii. Dla nieujemnych prądów obciążenia schemat algorytmu wyznaczania wartości zadanych prądu przedstawiono na Rys. 8. Prąd magazynu ultrakondensatorowego wyznaczany jest na podstawie odfiltrowanej górnoprzepustowo wartości prądu obciążenia wymnożonej przez współczynnik r_2 (Rys. 7), który uniemożliwia nadmierne rozładowanie ultrakondensatorów. W celu uniknięcia sytuacji, w której w stanach dynamicznych osiągnięto by graniczną wartość napięcia magazynu ultrakondensatorowego i cała wymagana moc zapewniana byłaby wyłącznie przez baterię, określono przedział pożądanego napięcia ultrakondensatorów w zależności od prędkości pojazdu. Górna granica spodziewanego przedziału naładowania ultrakondensatorów U_{ref_up} (1) określana jest na podstawie zakładanej minimalnej ilości energii odzyskanej podczas hamowania. Przekroczenie tej wartości powoduje dodanie składowej dodatniej do wartości I_{cap_ref} (Rys. 6). Dolna granica spodziewanego poziomu naładowania U_{ref_down} (2) wyznaczana jest powyżej stanu maksymalnego rozładowania tak, aby dysponować zakładaną ilością energii potrzebnej przy przyspieszaniu do maksymalnej prędkości pojazdu. Stan naładowania poniżej wyznaczonego poziomu powoduje obniżenie wartości prądu rozładowania ultrakondensatorów (Rys. 8). Podczas postoju pojazdu, jeżeli istnieje taka potrzeba, dodatkowy magazyn zostaje doładowany (Rys. 9).

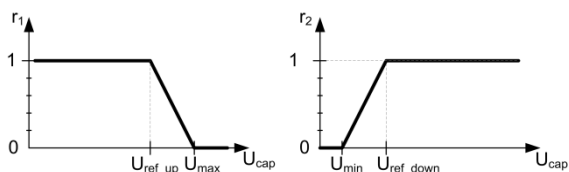
$$U_{ref_up} = \sqrt{U_{max}^2 - \frac{m \cdot v^2 \cdot \eta}{C}} \quad (1)$$

$$U_{ref_down} = \sqrt{U_{min}^2 + \frac{m(v_{max}^2 - v^2)}{C}} \quad (2)$$

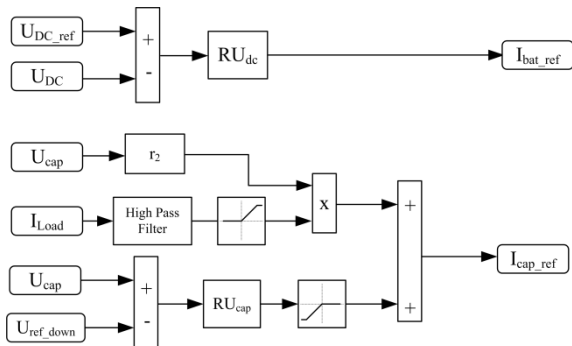
gdzie: C – pojemność ultrakondensatorów, U_{max} , U_{min} – maksymalne i minimalne napięcie ultrakondensatorów, m – masa pojazdu, v – prędkość pojazdu, η – stosunek energii odzyskanej do energii kinetycznej, v_{max} – prędkość maksymalna



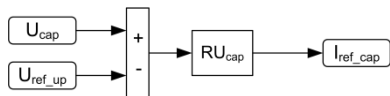
Rys. 6. Zewnętrzna pętla regulacji hybrydowego magazynu energii – tryb ładowania



Rys. 7. Współczynniki r_1 oraz r_2 w funkcji napięcia magazynu ultrakondensatorowego

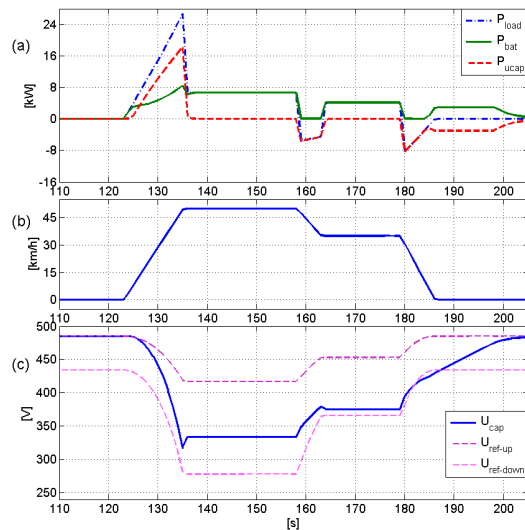


Rys. 8. Zewnętrzna pętla regulacji hybrydowego magazynu energii – tryb rozładowania

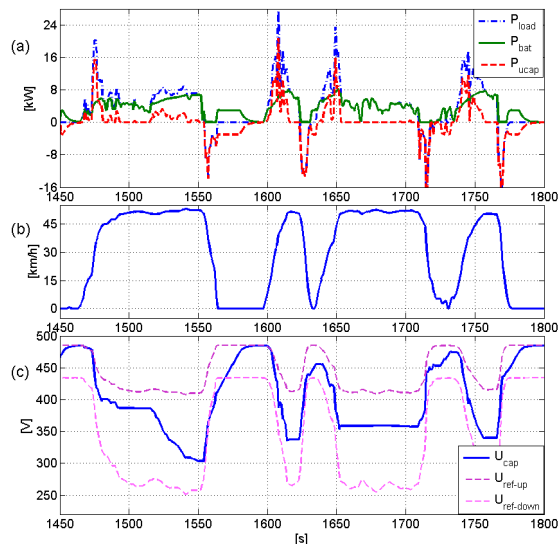


Rys. 9. Zewnętrzna pętla regulacji napięcia magazynu ultrakondensatorowego podczas postoju pojazdu

Przebiegi czasowe mocy, prędkości pojazdu oraz napięcia magazynu ultrakondensatorowego pokazano na Rys. 10 i Rys. 11 odpowiednio dla: teoretycznego profilu prędkości samochodu osobowego i rzeczywistego profilu prędkości samochodu osobowego, zarejestrowanego odbiornikiem GPS w obszarze miejskim.



Rys. 10. Pobór mocy z zasobników energii (a), prędkość pojazdu (b) oraz napięcie magazynu ultrakondensatorowego (cykl teoretyczny)



Rys. 11. Pobór mocy z zasobników energii (a), prędkość pojazdu (b) oraz napięcie magazynu ultrakondensatorowego (cykl rzeczywisty)

Tab. 2. Zasięg pojazdu podczas wybranych eksperymentów symulacyjnych

Typ magazynu energii	Zużycie ogniw	Zasięg [km]		
		Temp. 25°C	Temp. 0°C	Temp. -5°C
Elektrochemiczny	0%	151	117	- *
Elektrochemiczny	50%	133	-	-
Hybrydowy	0%	164	151	148
Hybrydowy	50%	146	132	129

(*) oznacza brak możliwości poruszania się z dynamiką występującą w cyklu ECE15

Prezentowany algorytm pozwala na adaptacyjne sterowanie przepływem energii w układzie z bateriami elektrochemicznymi i ultrakondensatorami. Wybrane wzmocnienia w układzie regulacji przestrajane są na podstawie chwilowej wartości napięcia na ultrakondensatorach i aktualnej wartości prędkości pojazdu. Przeprowadzone badania komputerowe wskazują na możliwość ograniczenia maksymalnych wartości prądu baterii elektrochemicznej oraz zmniejszenia liczby cykli pracy (ładowanie-rozładowanie).

Hybrydyzacja magazynu energii pozwala zwiększyć jego sprawność i wydłużyć zasięg pojazdu. Wyniki porównawcze czysto baterijnego źródła z hybrydowym źródłem zasilania, dla znormalizowanego cyklu jazdy ECE15, pokazano w Tab. 2. Wpływ hybrydowego magazynu zwiększa się wraz ze spadkiem temperatury oraz starzeniem się akumulatorów. Spadek mocy baterii w niskich temperaturach może znacząco wpływać na możliwości dynamiczne pojazdu. W przypadku czysto baterijnego źródła zasilania spadek mocy w niskich temperaturach jest na tyle znaczący, że uniemożliwia jazdę zgodną ze znormalizowanym cyklem ECE15. Hybrydyzacja magazynu energii pozwala utrzymać nominalną moc w szerokim zakresie temperatur oraz niezależnie od procesów starzenia się baterii. Ponadto współpraca zasobników energii zwiększa żywotność ogniwo elektrochemicznych poprzez zmniejszenie natężenia prądów rozładowczych oraz zmniejszeniu liczby mikrocykli oraz pełnych cykli.

5. Podsumowanie

W ramach podzadania Projektu ECO-Mobilność zaprojektowano układ do badania przekształtnikowych napędów dla pojazdów elektrycznych. Czteromaszynowe stanowisko z prostownikiem aktywnym i ultra-kondensatorowym zasobnikiem energii aktualnie jest na etapie realizacji praktycznej. Opracowano algorytm sterowania dla układu napędowego pojazdu elektrycznego z hybrydowym magazynem energii. Przygotowano koncepcję układu napędowego dla demonstracyjnej makiety mobilnej w skali 1:1, która będzie budowana na przełomie 2012/2013 roku. Zaprojektowano komplet przekształtników potrzebnych do zrealizowania obydwu układów. Układy sterowania oparto o autorski sterownik wykorzystujący połączenie DSP+FPGA. Autorzy są przekonani, że hybrydowe akumulatorowo-ultrakondensato-

rowe zasobniki energii elektrycznej, coraz częściej stosowane w pojazdach komunikacji miejskiej, przy obecnym stanie techniki są również uzasadnione w miejskich elektrycznych samochodach osobowych.

6. Literatura

- [1]. Ombach G., Junak J.: *Kierunki rozwoju napędów elektrycznych w samochodach osobowych w zakresie mocy do 10kW*. Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne nr 91, 2011, wyd. BOBRME KOMEL, s. 163-169.
- [2]. Tomić J., Kempton W.: *Using fleets of electric-drive vehicles for grid*. Journal of Power Sources, vol. 168, ELSEVIER 2007, s. 459-468.
- [3]. Ota Y., Taniguchi H., Nakajima T., Liyanage K. M., Baba J., Yokoyama A.: *Autonomous Distributed V2G (Vehicle-to-Grid) Satisfying Scheduled Charging*. IEEE Transactions on Smart Grid, vol.3, no.1, pp.559-564, March 2012.
- [4]. Rudnicki T.: *Pojazdy z silnikami elektrycznymi*. Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne nr 80, 2008, wyd. BOBRME KOMEL, s. 245-250.
- [5]. www.electrictmobility.pl.
- [6]. 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.
- [7]. www.solarisbus.pl/hybrid.html.
- [8]. www.betterplace.com/the-solution-switch-stations.
- [9]. Michalczyk M., Grzesiak L., Ufnalski B.: *A lithium battery and ultracapacitor hybrid energy source for an urban electric vehicle*. X Konferencja Naukowa Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym, SENE, Łódź 2011.
- [10]. Dębowski L.: *Elastyczny system sterowania przekształtników energoelektronicznych – architektura, wybrane zastosowania badawcze i dydaktyczne*. Przegląd Elektrotechniczny, nr 2, 2010, s. 125-130.
- [11]. Fulton L.: *Technology roadmap: electric and plug-in hybrid electric vehicles*. International Energy Agency www.iea.org, updated June 2011.
- [12]. Jiayuan W., Zechang S., Xuezhong W.: *Performance and Characteristic Research in LiFePO4 Battery for Electric Vehicle Applications*. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC, 2009, s. 1657 – 1661.
- [13]. Gao L., Liu S., Dougal R. A.: *Dynamic lithium-ion battery model for system simulation*, IEEE Transactions on Components and Packaging, vol. 25 2002, s. 495–505.
- [14]. Marongiu A., Damiano A., Heuer M.: *Experimental analysis of lithium iron phosphate battery performances*. IEEE International Symposium on Industrial Electronic, 2010, s. 3420 – 3424.
- [15]. Zhang Y., Chao-Yang W., Tang X.: *Cycling degradation of an automotive LiFePO4 lithium-ion*

battery. Journal of Power Sources, nr 196, 2011, s. 1513–1520.

[16]. Erdinc O., Vural B., Uzunoglu M.: *A dynamic lithium-ion battery model considering the effects of temperature and capacity fading*. International Conference on Clean Electrical Power, 2009, s. 383 – 386.

[17]. Wanga J., Liua P., Hicks-Garnera J., Shermana E., Soukiaziana S., Verbrugge M., Tatariab M., Musserc J., Finamorec P.: *Cycle-life model for graphite-LiFePO4 cells*. Journal of Power Sources nr 196, 2011, s. 3942–3948.

[18]. Kohler T. P., Buecherl D., Herzog H.-G.: *Investigation of Control Strategies for Hybrid Energy Storage Systems in Hybrid Electric Vehicles*. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC, 2009.

[19]. Lukic S. M., Wirasingha S. G., Rodriguez F., Cao J., Emadi A.: *Power Management of an Ultracapacitor/Battery Hybrid Energy Storage System in an HEV*. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC, 2006.

[20]. Kuperman A., Aharon I.: *Battery-ultracapacitor hybrids for pulsed current loads: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 15, 2011, s. 981–992.

[21]. Khaligh A., Zhihao Li: *Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage Systems for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles: State of the Art*. IEEE Transactions On Vehicular Technology, Vol. 59, No. 6, July 2010.

Autorzy

Dr hab. inż. Lech M. Grzesiak, prof. PW, tel. 022 234 6025, email: lmg@isep.pw.edu.pl

Dr inż. Bartłomiej Ufnalski, tel. 022 234 6138 email: b.ufnalski@isep.pw.edu.pl

Mgr inż. Arkadiusz Kaszewski

Dr inż. Grzegorz Gąbka

Mgr inż. Marek Michalczyk

Mgr inż. Andrzej Gałeczki

Mgr inż. Piotr Biernat

Mgr inż. Piotr Rumniak

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

Informacje dodatkowe



Publication part-financed by the European Union within the European Regional Development Fund (the ECO-Mobility project WND POIG.01.03.01-14-154/09, 2009-2013).