

System sterowania dla przekształtnikowego układu napędowego miejskiego pojazdu elektrycznego z hybrydowym magazynem energii

Marek Michalczuk, Piotr Rumniak, Piotr Biernat, Andrzej Gałęcki, Lech Grzesiak, Bartłomiej Ufnalski, Arkadiusz Kaszewski

Wprowadzenie


W obszarach silnie zurbanizowanych coraz większy nacisk kładzie się na rozwiązania proekologiczne, w tym ograniczanie emisji spalin i hałasu. Elektryfikacja miejskiego transportu publicznego (tramwaje, metro) postrzegana jest jako efektywne rozwiązanie ograniczające zanieczyszczenie środowiska miejskiego. Jednakże ciągły wzrost liczby samochodów spalinowych ogranicza wpływ zalet związanych z wykorzystaniem transportu opartego o źródła energii elektrycznej. Od kilkudziesięciu lat polityka prowadzona przez władze dużych miast skupia się na ograniczaniu emisji spalin i hałasu. Wprowadzono m.in. strefy płatnego ruchu ulicznego, zamknięte centra miast w określonych godzinach lub dniach [1]. Dodatkowo właścicielom aut elektrycznych przyznano przywileje umożliwiające darmowe parkowanie w centrach miast oraz możliwość wjazdu do stref zamkniętych dla ruchu ulicznego [2].

Samochody elektryczne są często nazywane pojazdami zero-emisyjnymi ze względu na brak emisji spalin i znaczące ograniczenie hałasu. Z tego punktu widzenia pojazdy te mogą być traktowane jako sprzyjające środowisku. Należy jednak zauważyć, że w krajach, w których produkcja energii elektrycznej opiera się na konwencjonalnych elektrowniach węglowych, średnia emisja spalin samochodów elektrycznych może być niekiedy wyższa od emisji samochodów spalinowych [3]. Dopiero rozwiązanie polegające na ładowaniu baterii pojazdu energią opartą o odnawialne źródła daje rozwiązanie ekologiczne zarówno po stronie użytkownika końcowego, jak i dostawcy energii elektrycznej.

Przeszkodą na drodze do popularyzacji pojazdów elektrycznych są m.in. ograniczenia po stronie stosowanych w tego typu rozwiązaniach magazynach energii, w szczególności ich żywotność, gabaryty i cena [4]. Pomimo iż w ostatnich latach rozwój technologiczny magazynów energii znacząco poprawił ich efektywność pod względem żywotności oraz gęstości energii i mocy, to samochód elektryczny wciąż ustępuje pod względem zasięgu pojazdom spalinowym. Jednakże gdy rozpatrzmy użytkowanie takiego pojazdu w obszarach miejskich, jego zasięg możemy w dużej mierze uznać za wystarczający. Szacuje się, że około 80% podróży miejskich jest krótszych niż 25 km [5]. Kolejnym czynnikiem ograniczającym szeroką dystrybucję pojazdów elektrycznych jest ich wysoka cena, dlatego szacuje się, że w najbliższym czasie ich głównymi nabywcami mogą być firmy działające w obszarze miejskiego transportu publicznego [6] oraz wypożyczania i leasingu pojazdów [7].

Niezależnie od wzrastającego popytu na zero-emisyjne pojazdy miejskie, wciąż istnieje zapotrzebowanie na pojazdy,

Streszczenie: W artykule przedstawiono układ napędowy miejskiego pojazdu elektrycznego. Opracowane rozwiązanie składa się z hybrydowego źródła energii, zawierającego baterie elektrochemiczne i ultrakondensatory, oraz dwóch silników napędowych umieszczonych w kołach pojazdu, zasilanych za pomocą trójpoziomowych falowników napięcia. Omówiono realizację dyferencjału elektronicznego dla dwusilnikowego układu napędowego oraz sterowanie hybrydowym magazynem energii bazujące na regulatorze rozmytym. Przedstawiono wyniki symulacyjne wybranych algorytmów sterowania oraz ich weryfikację podczas badań eksperymentalnych na stanowisku laboratoryjnym.

 **Abstract:** A powertrain system for an urban electric vehicle is described. The presented system consists of a hybrid energy storage composed of batteries and ultracapacitors, and two in-wheel outer-rotor motors placed inside wheels controlled by three-level inverters. An electronic differential algorithms for two-motor propulsion, and a fuzzy logic based power management strategy for the hybrid energy storage are presented in detail. Simulation studies of proposed control structure have been performed then verified using a non-mobile experimental setup.

które będą mogły prowadzić również osoby poruszające się na wózku inwalidzkim. Koncepcja zbudowania takiego pojazdu (ECO-Samochód – rys. 1) została zrealizowana w ramach jednego z zadań projektu ECO-Mobilność [8, 9, 10]. Głównymi założeniami ECO-Samochodu było zapewnienie możliwości podróżowania osobie niepełnosprawnej na wózku inwalidzkim zarówno jako pasażer, jak i jako kierowca. Z uwagi na wymóg płaskiej podłogi, pozwalającej osobie niepełnosprawnej na dostawanie się do pojazdu z trzech stron, zastosowano napęd bezpośredni. Wykorzystano w tym celu dwa silniki synchroniczne o magnesach trwałych z zewnętrznym wirnikiem, umieszczone w tylnych kołach. Układ napędowy z silnikiem elektrycznym charakteryzuje się istotną redukcją elementów ruchomych w stosunku do napędu z silnikiem spalinowym. Ponadto możliwe jest wytworzenie pełnego momentu silnika już przy zerowej prędkości, co pozwala na wyeliminowanie skrzyni biegów. Jednocześnie magazyn energii elektrycznej umieszczono pomiędzy płytami podłogowymi. Zastosowano również przesuwane drzwi boczne, otwieraną tylną rampę wjazdową oraz wykorzystano



Rys. 1. ECO-Samochód

Tabela 1. Parametry zaprojektowanego pojazdu elektrycznego

Parametr	Wartość
Moc układu napędowego	12 kW
Zasięg	80 km
Prędkość maksymalna	60 km/h
Masa	1400 kg
Magazyn bateryjny	40 Ah / 295 V
Znamionowy moment silnika	146 Nm
Współczynnik przeciążenia momentem	3
Napięcie na głównej szynie DC	600 V

aktywne zawieszenie, dające możliwość opuszczania podwozia do poziomu gruntu. Dodatkowo samochód wyposażony jest w system dokowania wózka inwalidzkiego na stanowisku kierowcy. Pedale gazu i hamulca zastąpiono zadajnikami elektryczno-mechanicznymi przytwierdzonymi do kierownicy [11]. Wybrane parametry układu napędowego dla zaprojektowanego samochodu elektrycznego przedstawiono w tabeli 1.

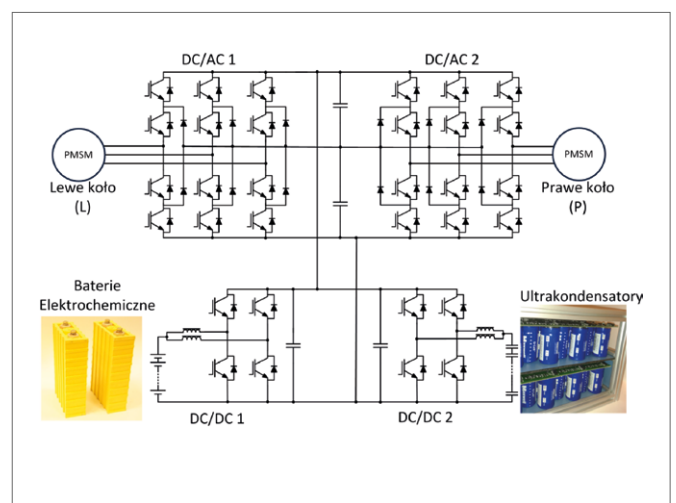
Układ napędowy ECO-Samochodu

W pojeździe zainstalowany został hybrydowy magazyn energii złożony z zestawu ogniw elektrochemicznych (rys. 2) i magazynu ultrakondensatorowego. Na rys. 3 przedstawiono schemat ideowy układu przekształtnikowego dla ECO-Samochodu. Układ przekształtnikowy składa się z dwóch falowników trójpoziomowych o topologii NPC (rys. 4) zasilających silniki napędowe oraz dwóch dwugałęziowych przekształtników DC/DC (rys. 5) sterowanych z przeplotem, współpracujących odpowiednio z magazynem bateryjnym i ultrakondensatorowym. Wybrane parametry przekształtników przedstawione zostały w tabeli 2.

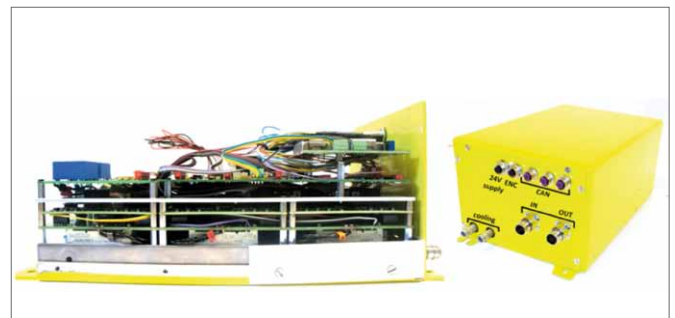
Schemat ideowo-blokowy układu napędowego przedstawiono na rys. 6. Algorytmy sterowania silnikami napędowymi oraz hybrydowym źródłem energii zostały zaimplementowane w mikrokontrolerach DSC (*Digital Signal Controller*). W systemie można wyróżnić dwie niezależne magistrale CAN: zewnętrzną CAN1 i wewnętrzną CAN2. Magistrala CAN1 służy do skomunikowania układu napędowego z komputerem pokładowym i systemem zarządzania baterii (BMS, *Battery Management System*). Magistrala CAN2 wykorzystywana jest do wymiany



Rys. 2. Baterijny magazyn energii umieszczony w ramie podwozia pojazdu



Rys. 3. Schemat ideowy układu przekształtnikowego dla pojazdu z hybrydowym magazynem energii



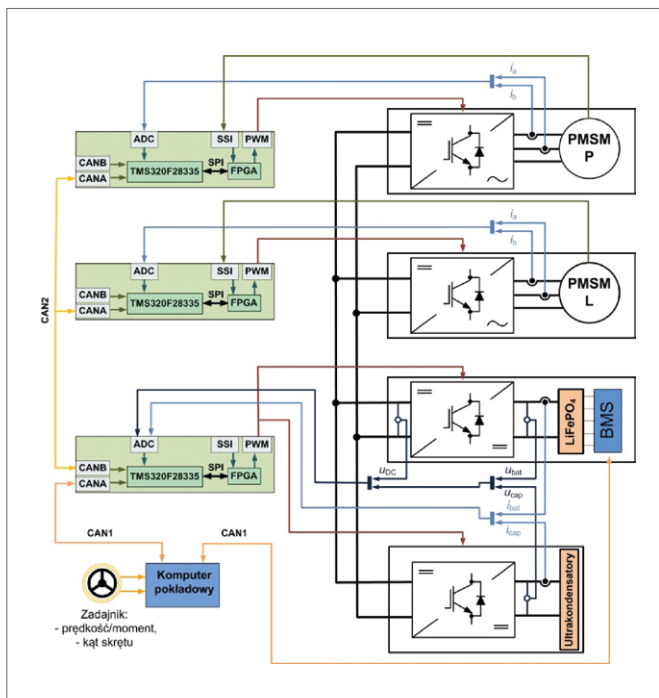
Rys. 4. Konstrukcja przekształtnika napędowego



Rys. 5. Konstrukcja przekształtników napięcia stałego

Tabela 2. Parametry przekształtników ECO-Samochodu

	Przekształtniki DC/AC	Przekształtniki DC/DC
Wymiary	321×150×211 mm	292×210×208 mm
Waga	7,5 kg	8,5 kg
Objętość	10 dm ³	12,75 dm ³
Stosunek mocy do masy	5,07 kW/kg	6,35 kW/kg
Stosunek mocy do objętości	3,8 kW/dm ³	4,23 kW/dm ³
Znamionowe napięcie wspólnej szyny DC	650 V DC	650 V DC

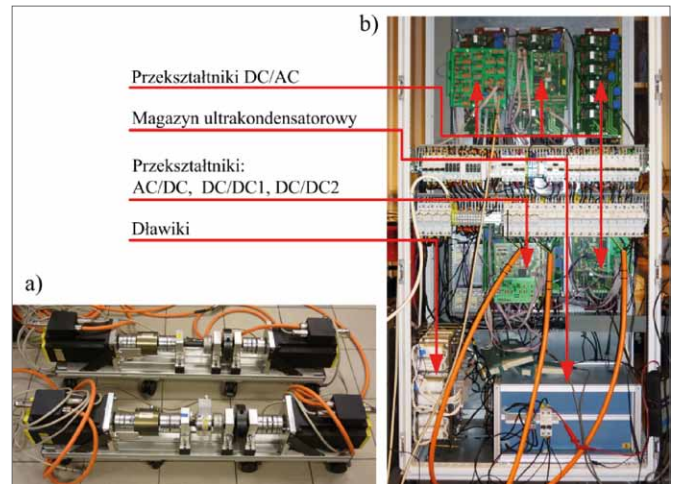


Rys. 6. Schemat ideowo-blokowy układu napędowego ECO-Samochodu

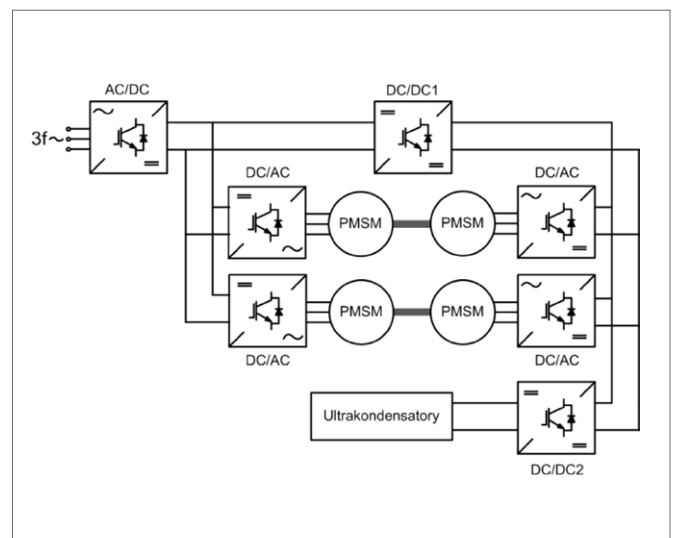
informacji wewnątrz układu napędowego, pomiędzy dwoma sterownikami falowników napędowych i sterownikiem magazynu energii.

Laboratoryjny układ badawczy

Wstępna weryfikacja algorytmów sterowania dla układu napędowego ECO-Samochodu została przeprowadzona na laboratoryjnym stanowisku badawczym (rys. 7). Układ laboratoryjny składa się z dwóch zespołów maszynowych, układów energoelektronicznych oraz magazynu ultrakondensatorowego (rys. 8). W skład każdego zespołu maszynowego wchodzi dwa silniki synchroniczne o magnesach trwałych, sprzęgnięte na jednym wale. Jeden z silników pracuje jako maszyna napędowa, a drugi pełni rolę aktywnego obciążenia. Każdy z silników elektrycznych zasilany jest z trójpoziomowego przekształtnika DC/AC. Przekształtnik sieciowy AC/DC, dwa przekształtniki DC/DC i magazyn ultrakondensatorowy stanowią w pełni aktywne hybrydowe źródło energii.



Rys. 7. Laboratoryjne stanowisko badawcze: a) zespoły maszynowe z silnikami PMSM; b) układy energoelektroniczne wraz z magazynem ultrakondensatorowym



Rys. 8. Topologia układu przekształtnikowego dla laboratoryjnego układu badawczego

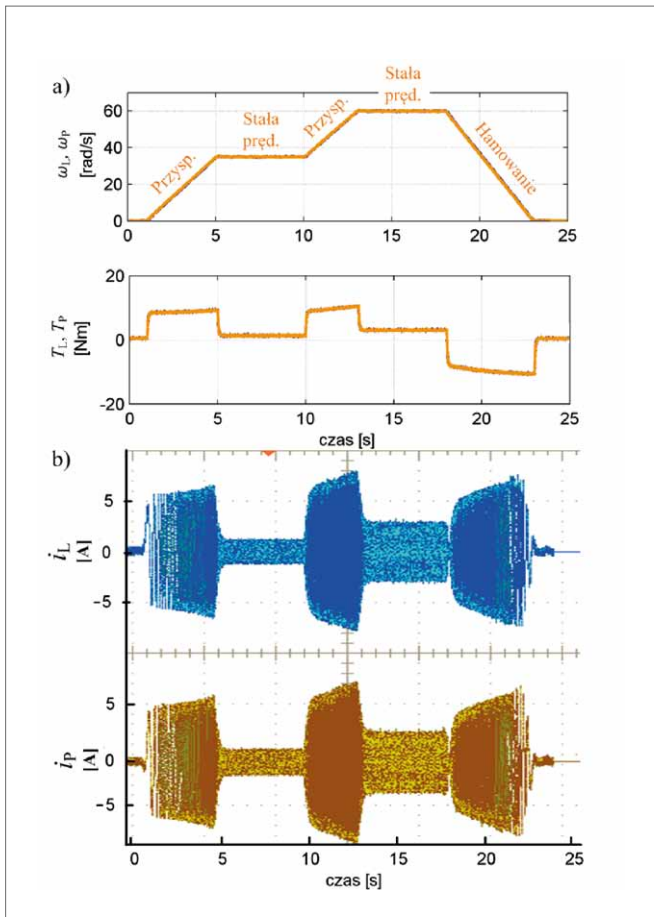
Układ badawczy pozwala na emulację obciążenia napędu odpowiadającego siłom oporów występujących podczas jazdy w warunkach rzeczywistych. Siły oporów opisane są zależnością

$$F_{op} = \frac{1}{2} C_x A \rho v^2 + ma + mgf_t + mgsina \quad (1)$$

gdzie:

- C_x – współczynnik oporu powietrza;
- A – powierzchnia czołowa pojazdu [m²];
- ρ – gęstość powietrza [kg/m³];
- m – masa pojazdu [kg];
- a – przyspieszenie pojazdu [m/s²];
- f_t – współczynnik tarcia tocznego;
- α – kąt nachylenia drogi;
- v – prędkość pojazdu [m/s];
- g – przyspieszenie ziemskie [m/s²].

Proponowana topologia układu przekształtnikowego umożliwia także emulowanie elektrochemicznego magazynu energii.



Rys. 9. Przebiegi prędkości rzeczywistych, momentów elektromagnetycznych (a) oraz prądów fazowych (b) silników napędowych koła lewego i prawego podczas jazdy po linii prostej

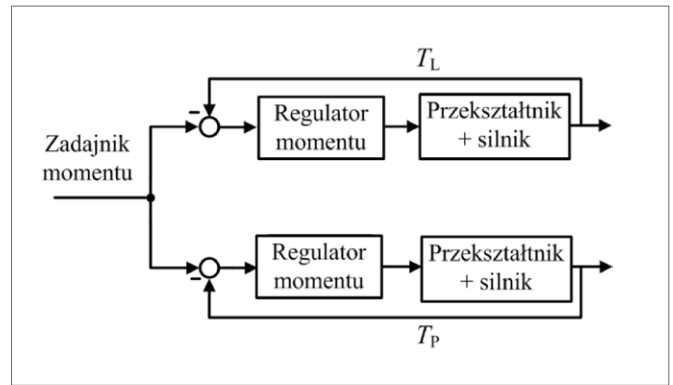
W takim przypadku przekształtnik DC/DC1 pełni rolę emulatora charakterystyk napięciowych baterii. Możliwe jest wówczas odwzorowanie pracy układów napędowych podłączonych bezpośrednio do zacisków baterii [12, 13].

Przykładowe wyniki badań przeprowadzonych na stanowisku badawczym dla przypadku emulowanej jazdy po powierzchni poziomej w linii prostej przedstawiono na rys. 9. W trakcie przyspieszania i hamowania na przebiegach momentów elektromagnetycznych T_L , T_P oraz prądów fazowych i_L , i_P silników napędowych koła lewego i prawego zauważalny jest wpływ sił bezwładności działających na pojazd. W trakcie jazdy ze stałą prędkością układ napędowy pokonuje opory aerodynamiczne proporcjonalne do kwadratu prędkości liniowej pojazdu oraz opory toczenia.

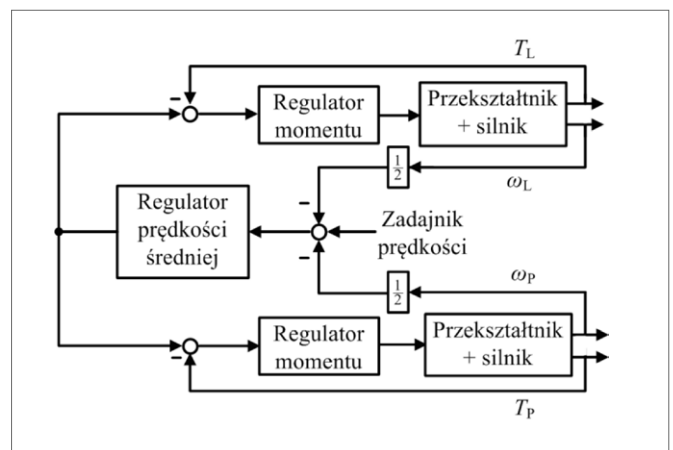
Dyferencjał elektroniczny

Dyferencjał umożliwia obracanie się kół napędowych z różną prędkością kątową występującą podczas ruchu pojazdu po łuku. Ze względu na brak mechanicznego dyferencjału, wynikający z wykorzystania w pojeździe napędu bezpośredniego, należy zastosować dyferencjał elektroniczny, który zapewnia odpowiednie kształtowanie prędkości kół napędowych.

Jednym z najprostszych rozwiązań dyferencjału elektronicznego jest wykorzystanie układu regulacji ze sterowaniem momentowym (rys. 10). W układzie tym sygnałem referencyjnym



Rys. 10. Schemat blokowy układu regulacji ze sterowaniem momentowym



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

jest moment napędowy [14]. Alternatywnym rozwiązaniem jest algorytm sterowania z regulatorem prędkości średniej [8] (rys. 11). Sygnałem wejściowym układu jest wtedy prędkość kątowa kół napędowych wyznaczona na podstawie zadajników z interfejsu kierowcy. Wymienione algorytmy wykorzystujące układ ze sterowaniem momentowym lub z regulatorem prędkości średniej charakteryzują się utratą efektywnego przenoszenia momentu napędowego przy całkowitym poślizgu jednego z kół. Pozbawiony tej wady jest układ z oddzielnymi regulatorami prędkości dla koła lewego i prawego (rys. 12). Pojawia się jednak konieczność odpowiedniego kształtowania różnicy prędkości podczas pokonywania zakrętów. Modelem pozwalającym na wyznaczenie tej różnicy jest model Ackermanna [15]. W modelu tym uwzględniane są wymiary pojazdu, prędkość liniowa i kąt skrętu kierownicy:

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

$$\omega_P^{\text{ref}} = \frac{v}{R_d} \cdot \left(1 - \frac{D}{2W} \cdot \text{tg}(\delta)\right) \quad (3)$$

$$\Delta\omega = \frac{1}{2(\omega_L^{\text{ref}} - \omega_P^{\text{ref}})} \quad (4)$$

gdzie:

ω_L^{ref} – zadana prędkość kątowna lewego tylnego koła [rad/s];
 ω_P^{ref} – zadana prędkość kątowna prawego tylnego koła [rad/s];
 W – rozstaw osi samochodu [m];
 δ – kąt skrętu środka przedniej osi (kierownicy) [rad];
 D – rozstaw kół samochodu [m];
 R_d – promień dynamiczny opony [m].

Zmiana kąta skrętu kierownicy powoduje, że sygnał $\Delta\omega$ ma wartość różną od zera. Sygnały prędkości ω_L , ω_P są modyfikowane o wartość $\Delta\omega$ z odpowiednim znakiem. W konsekwencji tej operacji w czasie skrętu prędkości zadane koła lewego i prawego są różne.

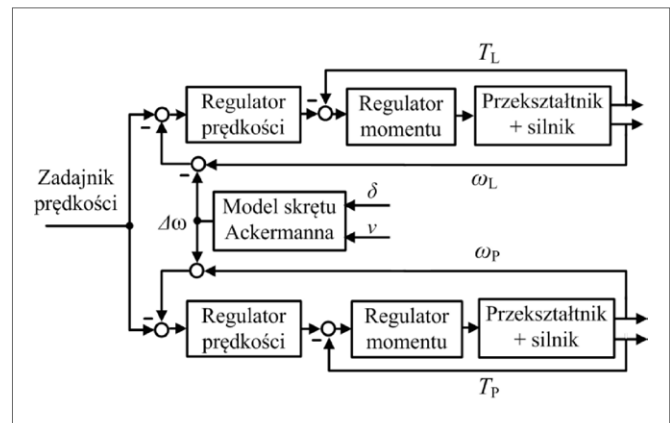
Badania eksperymentalne zostały przeprowadzone dla układu regulacji wykorzystującego model Ackermanna. Na rys. 13 przedstawiono przebiegi czasowe kąta skrętu kierownicy, prędkości rzeczywistych oraz prądów jednej fazy silników napędowych. W trakcie zadanego cyklu jazdy (rys. 13 a) wykonano skręt w lewo w chwili czasowej $t = 6$ s oraz skręt w prawo w chwili czasowej $t = 15$ s.

Hybrydowy magazyn energii

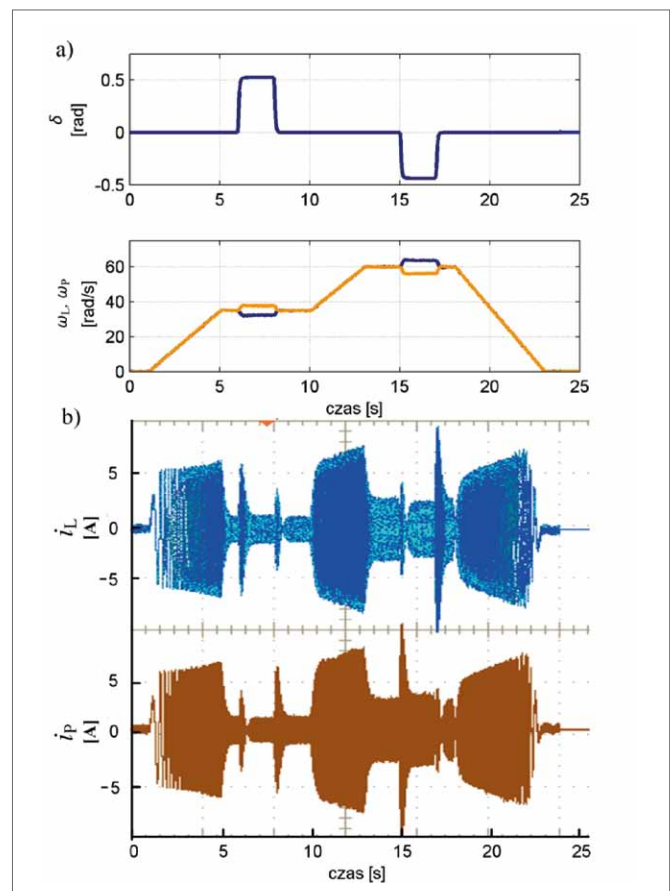
Główny zasobnik energii pojazdu stanowią ogniwa litowo-jonowe o użytecznej pojemności 9,5 kWh (przy głębokości rozładowania do 80%). Ogniwa li-ion cechują się zadowalającymi właściwościami w temperaturach zbliżonych do 25°C oraz przy natężeniach prądu do 0,5 C. Niskie temperatury powodują spadek sprawności, utratę pojemności baterii oraz spadek dostępnej mocy, co skutkuje między innymi zmniejszeniem zasięgu pojazdu [16]. Wysoka temperatura i duże wartości prądów rozładowczych znacząco skracają żywotność baterii [17, 18]. Poprawę wydajności źródła energii można uzyskać, wspierając elektrochemiczny magazyn ultrakondensatorowym magazynem energii. Ultrakondensatory, gromadzące energię na zasadzie ładowania i rozładowania kondensatora elektrycznego, pozwalają na uzyskanie dużych gęstości mocy. Jednak ze względu na stosunkowo niską gęstość energii zastosowanie ich jako samodzielnego źródła energii dla samochodu elektrycznego byłoby niepraktyczne. Niemniej jednak ultrakondensatory mogą z powodzeniem pełnić rolę magazynu wspomagającego. Zasadność hybrydyzacji źródła energii została potwierdzona na przykładzie wielu aplikacji napędowych [12, 19, 20]. Parametry hybrydowego magazynu energii przedstawiono w tabeli 3. Proponowane hybrydowe źródło energii zawiera dwa przekształtniki DC/DC (rys. 3), współpracujące z zasobnikami energii. Umożliwiają one kontrolę podziału mocy pomiędzy zasobniki oraz pozwalają utrzymać, niezależnie od stanu naładowania poszczególnych magazynów, żądany poziom napięcia wyjściowego na głównej szynie DC.

Napięciowy zakres pracy magazynu ultrakondensatorowego został ograniczony do połowy napięcia nominalnego. Taki próg rozładowania pozwala na wykorzystanie 75% całkowitej energii zgromadzonej w ultrakondensatorach. Rozładowanie poniżej założonego progu napięciowego nie jest szkodliwe dla ultrakondensatorów, lecz utrzymanie pożądanej mocy wyjściowej wiąże się ze wzrostem prądu wyjściowego.

Wielkość magazynu wpierającego dopasowano, mając na uwadze możliwość zgromadzenia w nich energii kinetycznej pojazdu podczas hamowania odzyskowego. Uwzględniając



Rys. 12. Schemat blokowy układu regulacji z modelem Ackermanna



Rys. 13. Przebiegi kąta skrętu kierownicy, prędkości rzeczywistych (a) oraz prądów fazowych (b) silników napędowych koła lewego i prawego w układzie z modelem Ackermanna

Tabela 3. Parametry hybrydowego źródła energii

Parametr	Baterie LiFePO ₄	Ultrakondensatory
Napięcie nominalne	295 V	485 V
Pojemność magazynu energii	40 Ah	1,76 F
Całkowita zmagazynowana energia	12 kWh	55 Wh
Masa	155 kg	11 kg
Moc nominalna	6 kW	8 kW
Moc maksymalna	35 kW	70 kW

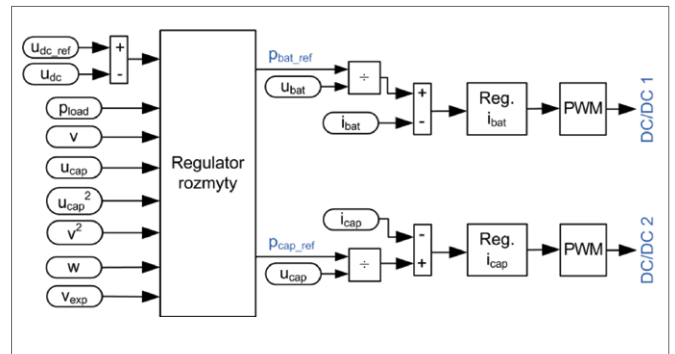
pracę sił oporów ruchu i sprawność układu napędowego, zdecydowano się wykorzystać magazyn ultrakondensatorowy pozwalający na zgromadzenie 75% energii kinetycznej pojazdu przy maksymalnej prędkości.

Zarządzanie mocą w hybrydowym źródle energii

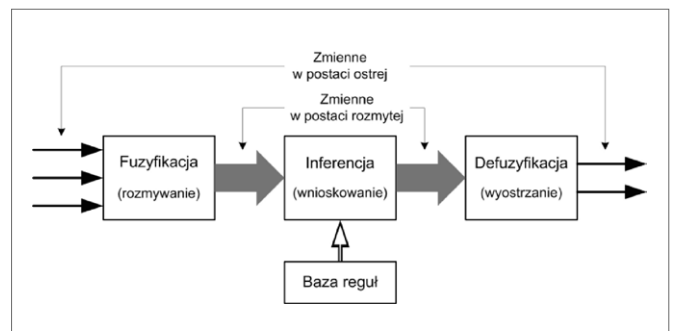
Zadaniem algorytmu zarządzania jest nadzór nad podziałem mocy obciążenia pomiędzy poszczególne źródła, przy równoczesnej kontroli stanu naładowania ultrakondensatorów. Za potrzebowanie na moc w stanach ustalonej prędkości pojazdu pokrywane jest z magazynu baterijnego, natomiast w stanach dynamicznych podstawowy magazyn wspierany jest przez magazyn ultrakondensatorowy. Utrzymanie odpowiedniego poziomu naładowania ultrakondensatorów jest szczególnie istotne ze względu na fakt, że energia użyteczna magazynu wspierającego (41 Wh przy rozładowaniu do połowy napięcia nominalnego) jest mniejsza od energii kinetycznej pojazdu przy maksymalnej prędkości (55 Wh). Oznacza to, iż podczas przyspieszania pobór mocy nie może następować wyłącznie z magazynu pomocniczego. Ultrakondensatorowy magazyn wspierający służy ograniczeniu impulsów mocy pobieranych z baterii.

Schemat struktury sterowania dla hybrydowego źródła energii przedstawiono na rys. 14. W dwóch wewnętrznych pętlach sterowania znajdują się regulatory prądu dla poszczególnych źródeł. Utrzymanie zadanego napięcia wyjściowego oraz właściwy podział mocy dokonywane są przy użyciu nadrzędnego regulatora rozmytego. Pozwala on stosunkowo łatwo implementować złożone procesy sterowania za pomocą reguł logicznych odwzorowujących ekspercki sposób wnioskowania. Struktura wewnętrzna regulatora rozmytego przedstawiona została na rys. 15.

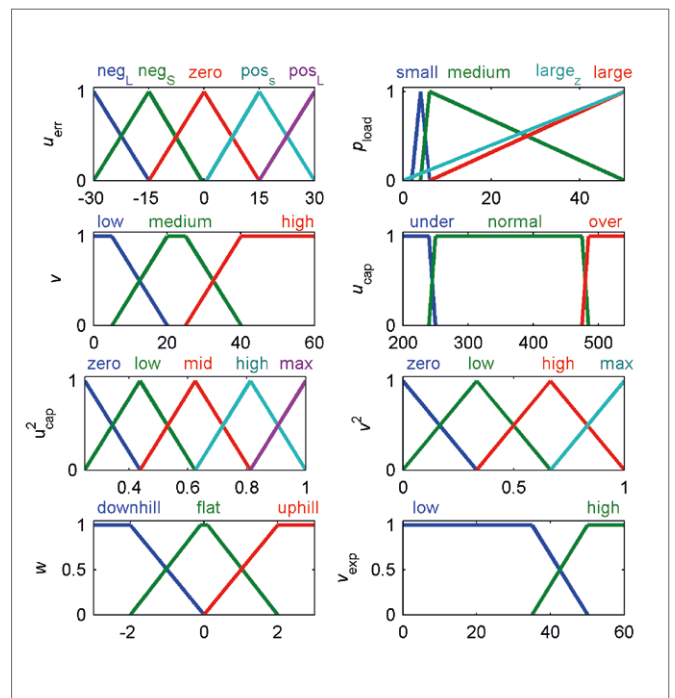
W prezentowanym rozwiązaniu regulator rozmyty ma osiem zmiennych wejściowych i dwie wyjściowe. Sygnałami wejściowymi są: uchyb napięcia wspólnej szyny DC (u_{err}), moc obciążenia (p_{load}), prędkość pojazdu (v), napięcie magazynu ultrakondensatorowego (u_{cap}) oraz sygnały proporcjonalne do energii pojazdu – kwadrat prędkości pojazdu (v^2) i energii zgromadzonej w magazynie pomocniczym – kwadrat napięcia ultrakondensatorów (u_{cap}^2). Opcjonalnie wykorzystana może zostać także zmienna niosąca informację o wzniesieniu terenu (w) i spodziewanej prędkości pojazdu (v_{exp}). Funkcje przynależności sygnałów wejściowych dla regulatora nadrzędnego pokazano na rys. 16. Ujemne wartości w oznaczają jazdę ze wzniesienia. Wartość v_{exp} zostaje odwzorowana na dwóch zbiorach rozmytych. Zbiór *low* określa zakres prędkości pojazdu, dla którego zapotrzebowanie na moc podczas etapu przyspieszania może być dostarczone wyłącznie z magazynu ultrakondensatorowego. Zbiór *high* określa natomiast zakres prędkości pojazdu, dla którego wymagany jest w stanach dynamicznych podział mocy pomiędzy obydwa zasobniki energii ze względu na niewystarczający zapas energii zgromadzonej w ultrakondensatorach. W trybie pracy niekorzystającym z sygnałów w i v_{exp} na wejścia regulatora podawane są domyślne wartości liczbowe równe odpowiednio 0 i 60 km/h. Zmiennymi wyjściowymi są zadane moce chwilowe magazynu baterijnego (p_{bat_ref}) i magazynu ultrakondensatorowego (p_{cap_ref}). Wartości funkcji wyjściowych określone w kW wynoszą odpowiednio: $neg_L = -50$, $neg_S = 20$, $zero = 0$, $pos_S = 20$, $pos_L = 50$.



Rys. 14. Schemat układu sterowania bazującego na logice rozmytej dla hybrydowego źródła energii



Rys. 15. Struktura regulatora rozmytego



Rys. 16. Funkcje przynależności sygnałów wyjściowych regulatora rozmytego

Chwilowe zapotrzebowanie na moc podczas jazdy w znacznym stopniu zależy od nachylenia pokonywanej trasy. Informacja o nachyleniu trasy dostarczana do układu regulacji pozwala na efektywniejsze zarządzanie mocą hybrydowego magazynu energii. W przypadku spodziewanej jazdy pod wzniesienie należy zwiększyć stan naładowania magazynu wspierającego ze względu na zwiększony pobór mocy i mniejszy odzysk energii

w przypadku hamowania. Z kolei jazda ze wzgórz obniża zapotrzebowanie na moc i zwiększa energię odzyskiwaną podczas hamowania. Informacja o nachyleniu trasy może być dostarczana przez system nawigacji wykorzystujący mapy topograficzne.

Nowym trendem w obszarze pojazdów drogowych jest rozwój technologii komunikacyjnych służących wymianie informacji pomiędzy pojazdami na drodze (V2V, *Vehicle to Vehicle*) oraz pomiędzy pojazdami i infrastrukturą drogową (I2V/V2I, *Infrastructure to Vehicle/Vehicle to Infrastructure*) [21, 22, 23]. Systemy te dedykowane są w szczególności podniesieniu bezpieczeństwa na drodze i zarządzaniu ruchem drogowym. Informacje płynące z infrastruktury drogowej lub pojazdów poruszających się przed nami mogą także posłużyć podniesieniu efektywności układów zarządzania mocą w hybrydowym źródle energii dla pojazdu elektrycznego. Systemy komunikacyjne rozwijane i coraz częściej komercjalizowane we współczesnych pojazdach stwarzają możliwości dostarczenia informacji m.in. o spodziewanej prędkości pojazdu. Informacja ta może posłużyć lepszemu dopasowaniu poziomu naładowania ultrakondensatorów i efektywniejszej redukcji impulsów mocy pobieranych ze źródła baterijnego.

Bazę reguł wykorzystaną w procesie wnioskowania przedstawiają relacje wynikania:

1. Jeżeli (u_{err} jest pos_L) to (p_{bat_ref} jest neg_L), a także (p_{cap_ref} jest zero) (1).
2. Jeżeli (u_{err} jest pos_S) to (p_{bat_ref} jest neg_S), a także (p_{cap_ref} jest zero) (0.5).
3. Jeżeli (u_{err} jest zero) to (p_{bat_ref} jest zero), a także (p_{cap_ref} jest zero) (1).
4. Jeżeli (u_{err} jest neg_S) i (u_{cap} nie jest $over$), to (p_{bat_ref} jest zero), a także (p_{cap_ref} jest pos_S) (1).
5. Jeżeli (u_{err} jest neg_L) i (u_{cap} nie jest $over$), to (p_{bat_ref} jest zero), a także (p_{cap_ref} jest pos_L) (1).
6. Jeżeli (u_{err} jest neg_S) i (u_{cap} jest $over$), to (p_{bat_ref} jest pos_S), a także (p_{cap_ref} jest zero) (0.5).
7. Jeżeli (u_{err} jest neg_L) i (u_{cap} jest $over$), to (p_{bat_ref} jest pos_L), a także (p_{cap_ref} jest zero) (1).
8. Jeżeli (p_{load} jest $large_z$) i (u_{cap} nie jest $under$), i (v_{exp} jest low), to (p_{bat_ref} jest zero), a także (p_{cap_ref} jest neg_L) (1).
9. Jeżeli (p_{load} jest $large$) i (u_{cap} nie jest $under$), i (v_{exp} jest $high$), to (p_{bat_ref} jest zero), a także (p_{cap_ref} jest neg_L) (1).
10. Jeżeli (p_{load} jest $medium$) i (v nie jest $high$), i (u_{cap} nie jest $under$) to (p_{bat_ref} jest zero), a także (p_{cap_ref} jest neg_S) (0.15).
11. Jeżeli (p_{load} jest $small$) i (v jest low), i (u_{cap} nie jest $under$), to (p_{bat_ref} jest zero), a także (p_{cap_ref} jest neg_S) (0.05).
12. Jeżeli (u_{cap}^2 jest max) i (v^2 jest zero), i (w jest $downhill$), to (p_{bat_ref} jest pos_L), a także (p_{cap_ref} jest neg_L) (0.042).
13. Jeżeli (u_{cap}^2 jest max) i (v^2 jest low), i (w nie jest $uphill$) to (p_{bat_ref} jest pos_L), a także (p_{cap_ref} jest neg_L) (0.125).
14. Jeżeli (u_{cap}^2 nie jest zero lub low lub mid) i (v^2 jest $high$), i (w nie jest $uphill$), to (p_{bat_ref} jest pos_L), a także (p_{cap_ref} jest neg_L) (0.125).
15. Jeżeli (u_{cap}^2 nie jest zero lub low) i (v^2 jest max), i (w nie jest $uphill$), to (p_{bat_ref} jest pos_L), a także (p_{cap_ref} jest neg_L) (0.125).
16. Jeżeli (u_{cap}^2 jest $high$) i (v^2 jest zero), to (p_{bat_ref} jest neg_L), a także (p_{cap_ref} jest pos_L) (0.125).
17. Jeżeli (u_{cap}^2 jest zero lub low lub mid) i (v^2 jest low), to (p_{bat_ref} jest neg_L), a także (p_{cap_ref} jest pos_L) (0.125).

18. Jeżeli (u_{cap}^2 jest zero lub low) i (v^2 jest $high$), to (p_{bat_ref} jest neg_L), a także (p_{cap_ref} jest pos_L) (0.125).
19. Jeżeli (u_{cap}^2 jest zero lub low lub mid) i (v^2 jest max), to (p_{bat_ref} jest neg_L), a także (p_{cap_ref} jest pos_L) (0.125).
20. Jeżeli (u_{cap}^2 jest zero lub low) i (v^2 jest max), i (w nie jest $uphill$), to (p_{bat_ref} jest pos_L), a także (p_{cap_ref} jest neg_L) (0.055).
21. Jeżeli (u_{cap}^2 jest mid) i (v^2 jest $high$), i (w nie jest $downhill$), i (v_{exp} jest $high$), to (p_{bat_ref} jest neg_L), a także (p_{cap_ref} jest pos_L) (0.083).
22. Jeżeli (u_{cap}^2 jest $high$) i (v^2 jest low) i (w nie jest $downhill$), i (v_{exp} jest $high$), to (p_{bat_ref} jest neg_L), a także (p_{cap_ref} jest pos_L) (0.083).
23. Jeżeli (u_{cap}^2 jest $high$) i (v^2 jest low), i (w jest $uphill$), to (p_{bat_ref} jest neg_L), a także (p_{cap_ref} jest pos_L) (0.083).
24. Jeżeli (u_{cap}^2 jest mid) i (v^2 jest $high$), i (w jest $uphill$), to (p_{bat_ref} jest neg_L), a także (p_{cap_ref} jest pos_L) (0.125).
25. Jeżeli (u_{cap}^2 jest $high$) i (v^2 jest $high$), i (w jest $uphill$), to (p_{bat_ref} jest neg_L), a także (p_{cap_ref} jest pos_L) (0.1).
26. Jeżeli (u_{cap}^2 jest low) i (v^2 jest max), i (w jest $downhill$), to (p_{bat_ref} jest pos_L), a także (p_{cap_ref} jest neg_L) (0.083).
27. Jeżeli (u_{cap}^2 jest zero lub low lub mid) i (v^2 jest zero), to (p_{bat_ref} jest neg_L), a także (p_{cap_ref} jest pos_L) (0.225).
28. Jeżeli (u_{cap}^2 jest zero lub low) i (v^2 jest low) to (p_{bat_ref} jest neg_L), a także (p_{cap_ref} jest pos_L) (0.1).
29. Jeżeli (u_{cap}^2 jest zero) i (v^2 jest $high$) to (p_{bat_ref} jest neg_L), a także (p_{cap_ref} jest pos_L) (0.1).
30. Jeżeli (u_{cap}^2 jest mid) i (v^2 jest low), i (w jest $uphill$), to (p_{bat_ref} jest neg_L), a także (p_{cap_ref} jest pos_S) (0.1).
31. Jeżeli (u_{cap}^2 jest low) i (v^2 jest $high$), i (w jest $uphill$), to (p_{bat_ref} jest neg_L), a także (p_{cap_ref} jest pos_L) (0.1).
32. Jeżeli (u_{cap}^2 jest $high$) i (v^2 jest max), i (w jest $uphill$), to (p_{bat_ref} jest neg_L), a także (p_{cap_ref} jest pos_L) (0.083).
33. Jeżeli (u_{cap}^2 jest $high$) i (v^2 jest low), i (w jest $downhill$), to (p_{bat_ref} jest pos_L), a także (p_{cap_ref} jest neg_L) (0.125).
34. Jeżeli (u_{cap}^2 jest mid) i (v^2 jest max), i (w jest $downhill$), to (p_{bat_ref} jest pos_L), a także (p_{cap_ref} jest neg_L) (0.125).
35. Jeżeli (u_{cap}^2 jest $high$) i (v^2 jest zero), i (v_{exp} jest low), to (p_{bat_ref} jest pos_L), a także (p_{cap_ref} jest neg_L) (0.083).
36. Jeżeli (u_{cap}^2 jest $high$) i (v^2 jest low), i (v_{exp} jest low), to (p_{bat_ref} jest pos_L), a także (p_{cap_ref} jest neg_L) (0.042).
37. Jeżeli (u_{err} jest pos_S) i (u_{cap} nie jest $under$), i (v_{exp} jest low), to (p_{bat_ref} jest pos_S), a także (p_{cap_ref} jest neg_S) (0.5).
38. Jeżeli (u_{err} jest pos_L) i (u_{cap} nie jest $under$), i (v_{exp} jest low), to (p_{bat_ref} jest pos_L), a także (p_{cap_ref} jest neg_L) (1).

Wartość liczbowa podana w nawiasach na końcu reguły oznacza jej wagę w procesie wnioskowania.

Badania symulacyjne rozmytego regulatora dla hybrydowego magazynu energii

Efektywność proponowanego algorytmu zarządzania mocą została zweryfikowana w testach symulacyjnych. Regulator rozmyty przetestowano przy użyciu komputerowego modelu bateryjno-ultrakondensatorowego źródła energii [24]. Podział mocy pomiędzy zasobniki energii dla standaryzowanego cyklu jazdy Artemis [25] dla obszarów miejskich pokazano na rys 17. Maksymalna moc źródła baterijnego w stosunku do maksymalnej mocy obciążenia została ograniczona trzykrotnie. Jednocześnie bilans energii wymienionej z magazynem ultrakondensatoro-

wym w całym cyklu, rozpoczynającym i kończącym się tym samym stanem pojazdu, jest równy zeru, zatem moc średnia pobierana z baterii jest zbliżona do średniej mocy obciążenia. Różnica pomiędzy średnią mocą z baterii a średnią mocą obciążenia jest wynikiem pokrycia przez magazyn baterijny strat energii występujących w hybrydowym magazynie energii.

Na przykładzie cyklu jazdy Artemis UDE opracowanego dla dużego natężenia ruchu drogowego (rys. 18) zademonstrowano podział mocy pomiędzy źródła energii dla dwóch scenariuszy. Pierwszy przypadek, przedstawiony na rys. 19 a, pokazuje podział mocy dla podstawowego trybu pracy regulatora niewykorzystującego informacji od infrastruktury drogowej czy innych pojazdów. Drugi scenariusz, przedstawiony na rys. 19 b, zakłada dostępność informacji o spodziewanej prędkości pojazdu. Przebiegi czasowe mocy dla tego scenariusza wskazują na wykorzystanie magazynu ultrakondensatorowego w większym stopniu, co jeszcze efektywniej ogranicza amplitudę impulsów mocy pobieranej z magazynu elektrochemicznego.

Badania eksperymentalne rozmytego regulatora dla hybrydowego magazynu energii

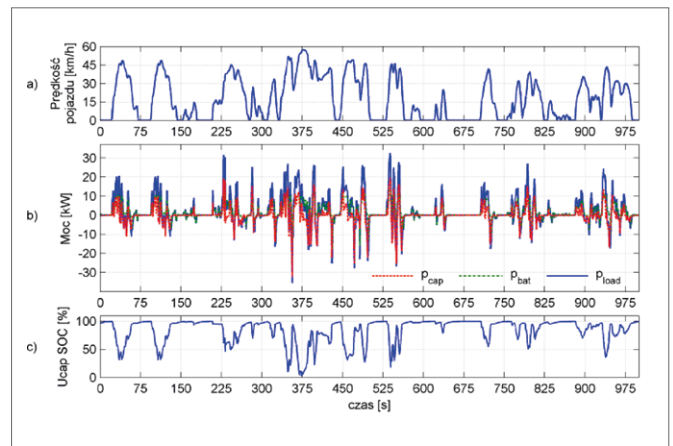
Badania laboratoryjne podziału mocy w hybrydowym źródle energii przeprowadzono na laboratoryjnym stanowisku badawczym (rys. 7), w którym elektrochemiczny magazyn energii zastąpiono trójfazowym źródłem napięcia przemiennego z prostownikiem aktywnym, umożliwiającym dwukierunkowy przepływ energii. Badania te, mające na celu weryfikację realizacji algorytmu sterowania na mikrokontrolerach TMS320F28335, zostały przeprowadzone dla układu napędowego o dziesięciokrotnie obniżonej mocy w stosunku do mocy zaprojektowanego pojazdu. Weryfikacji oprogramowania dla mikrokontrolerów dokonano dla różnych scenariuszy jazdy z uwzględnieniem teoretycznych profili prędkości pojazdu. Porównano tryb jazdy zakładający dostępność wyłącznie podstawowego zestawu informacji wejściowych (u_{err} , P_{load} , v , u_{cap} , v^2 , u_{cap}^2), z sytuacją, gdy sygnały v_{exp} i w były dostępne. Podział mocy pomiędzy źródła dla przykładowego profilu prędkości przedstawiono na rys. 20. Prędkość napędu równa 100 rad/s odpowiada maksymalnej prędkości pojazdu. Poziom naładowania ultrakondensatorów SOC_{cap} (State of Charge), wyznaczony z zależności (5), określa ilość dostępnej energii zgromadzonej w ultrakondensatorach.

$$SOC_{cap} = [u_{cap}^2 - u_{(min)}^2] / [u_{(max)}^2 - u_{(min)}^2] 100\% \quad (5)$$

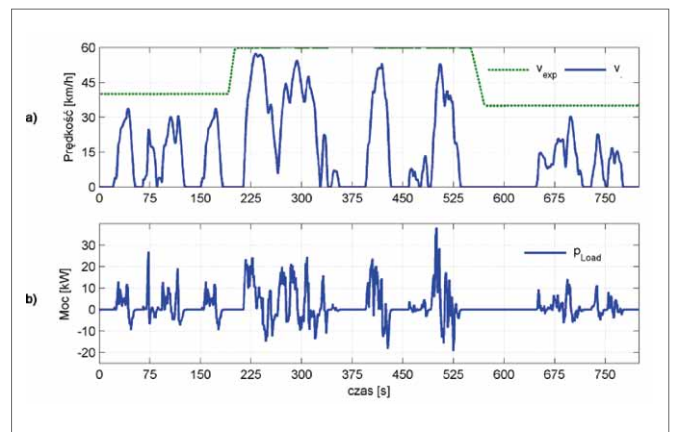
gdzie:

- u_{cap} – napięcie magazynu ultrakondensatorowego;
- $u_{(min)}$ – minimalne napięcie magazynu ultrakondensatorowego;
- $u_{(max)}$ – maksymalne napięcie magazynu ultrakondensatorowego.

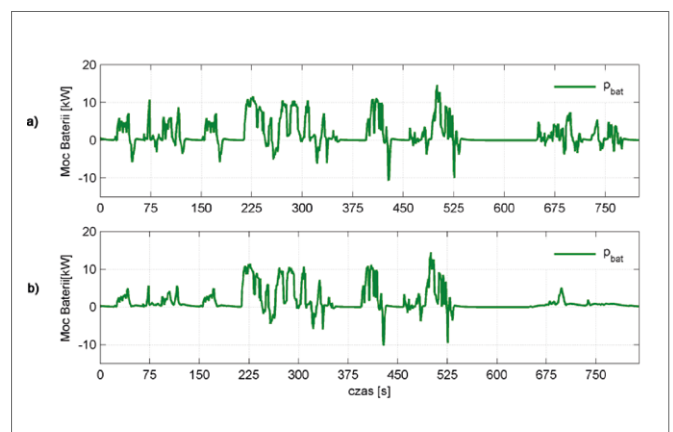
SOC_{cap} równy 0% odpowiada dolnej granicy napięciowego zakresu pracy ultrakondensatorów. Zakres ten został ustalony tak, aby energia zgromadzona w ultrakondensatorach odpowiadała sytuacji pełnowymiarowego pojazdu. Moc szczytowa dla testowego profilu prędkości pobierana ze źródła przez laboratoryjny układ napędowy jest równa 1,8 kW. Wsparcie podstawowego źródła zasobnikiem ultrakondensatorowym pozwala na około czterokrotne zmniejszenie wartości szczytowej impulsów mocy podstawowego zasobnika energii bez pogorszenia dynamiki pojazdu.



Rys. 17. Prędkość pojazdu (a), podział mocy pomiędzy zasobniki energii (b) i stan naładowania magazynu ultrakondensatorowego (c) dla cyklu jazdy Artemis

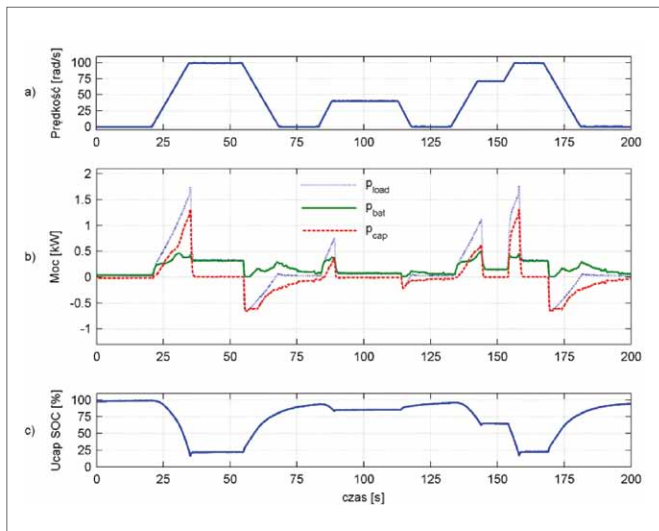


Rys. 18. Chwilowa i teoretyczna spodziewana prędkość pojazdu (a) oraz pobór mocy ze źródła (b) w cyklu jazdy Artemis UDE

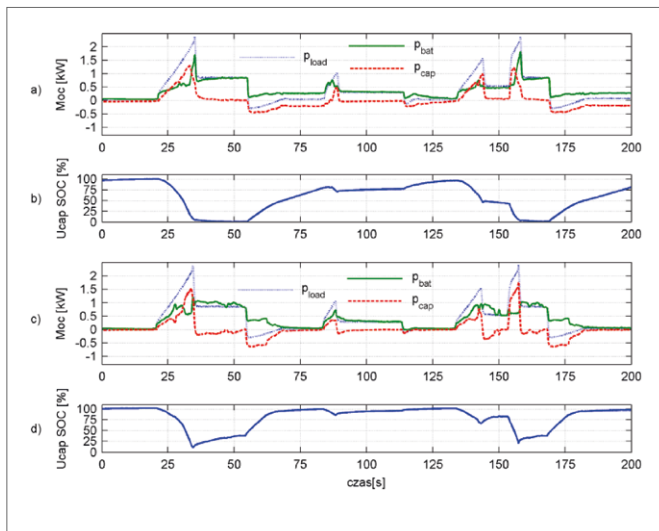


Rys. 19. Moc magazynu baterijnego w przypadku niewykorzystania sygnału v_{exp} (a) i przy wykorzystaniu sygnału v_{exp} (b)

Na rys. 21 przedstawiono podział mocy podczas jazdy pod wznieśnienie zgodnie z profilem prędkości z rys. 20. Zwiększony pobór mocy podczas jazdy pod wznieśnienie skutkuje brakiem możliwości wspierania baterii przez ultrakondensatory w tym samym stopniu, co w przypadku jazdy po płaskim terenie. Brak informacji o wznieśnieniu (rys. 21 a i 21 b) prowadzi do pojawienia się impulsu mocy pobranej z baterii w końcowym etapie przyspieszania (ok. 35 s i 155 s). Jednak pomimo zwiększonego



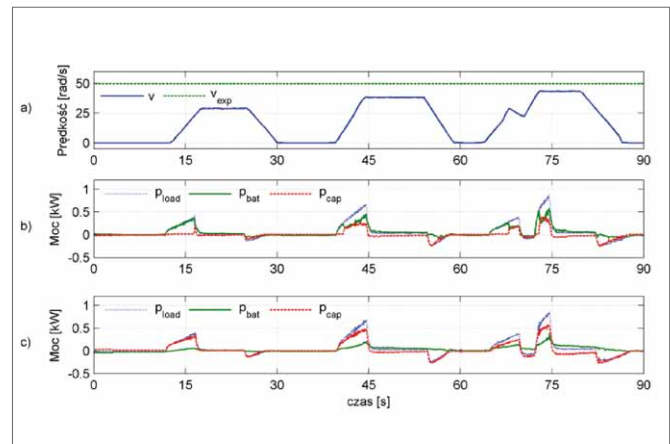
Rys. 20. Prędkość kątowa silników napędowych (a), podział mocy pomiędzy źródła energii (b) oraz napięcie magazynu ultrakondensatorowego w sytuacji poruszania się po płaskim terenie (c)



Rys. 21. Podział mocy pomiędzy oba źródła energii oraz napięcie magazynu ultrakondensatorowego w sytuacji poruszania się pod wzniesienie

poboru mocy algorytm nie dopuszcza do całkowitego rozładowania pomocniczego magazynu energii przed uzyskaniem przez pojazd największej prędkości. W następstwie tego także w końcowym etapie przyspieszania zapotrzebowanie na moc zostało częściowo pokryte z zasobnika ultrakondensatorowego. W przypadku, gdy informacja o topografii trasy jest wykorzystana w układzie sterowania przepływem mocy (rys 21 c i 21 d), impulsy mocy magazynu baterijnego zostały znacząco zredukowane. Eliminacja impulsów mocy pobieranych z baterii odbywa się kosztem relatywnie niewielkiego zwiększenia poboru mocy w początkowej fazie przyspieszania (25 s – 30 s i 135 s – 140 s).

Zasadność wykorzystania informacji o spodziewanej prędkości pojazdu sprawdzono na przykładzie cyklu jazdy, w którym prędkość chwilowa pojazdu nie przekracza połowy prędkości maksymalnej (rys. 22 a). Tryb pracy regulatora bez wykorzystania informacji o spodziewanej prędkości pojazdu nie ogranicza impulsów mocy baterii o niskiej wartości (rys. 22 b). Dostęp-



Rys. 22. Podział mocy pomiędzy oba źródła energii bez wykorzystania sygnału v_{exp} (b) i przy wykorzystaniu sygnału v_{exp} (c)

ność informacji o obniżonej prędkości pojazdu skutkuje niemal całkowitym pokryciem z magazynu ultrakondensatorowego mocy chwilowej pobieranej przez układ napędowy (rys. 22 c).

Przedstawione wyniki pokazują efektywność opisanego algorytmu w ograniczaniu szczytowej wartości impulsów mocy pobieranych z magazynu elektrochemicznego. Uzyskana wysoka zgodność wyników symulacyjnych i eksperymentalnych wskazuje na możliwość wykorzystania opracowanego stanowiska badawczego do efektywnej wstępnej weryfikacji algorytmów sterowania jeszcze przed ich implementowaniem w docelowym pojeździe.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono oryginalne rozwiązanie układu sterowania zastosowanego przy realizacji napędu pojazdu elektrycznego. Pojazd ten przeznaczony jest w równym stopniu dla osób pełnosprawnych jak i osób z niepełnosprawnością ruchową, w tym w szczególności dla osób poruszających się na wózku inwalidzkim. Opracowany system napędowy składa się z hybrydowego źródła energii oraz dwóch silników synchronicznych umieszczonych w kołach pojazdu i zasilanych za pomocą trójpoziomowych falowników napięcia. Przedstawiono i omówiono wyniki badań komputerowych oraz laboratoryjnych układu sterowania realizującego algorytmy dyferencjału elektronicznego i zarządzania przepływem energii w hybrydowym magazynie energii.

Opracowany algorytm, wykorzystujący technikę wnioskowania rozmytego, pozwala na nieliniowe sterowanie przepływem energii w układzie z bateriami elektrochemicznymi i ultrakondensatorami. Użyte reguły wnioskowania uwzględniają informację o przyszłym wzniesieniu terenu oraz spodziewanej prędkości pojazdu. Pokazano, że odpowiednie rozbudowanie wektora zmiennych wejściowych systemu decyzyjnego pozwala na efektywne ograniczenie szczytowej wartości mocy pobieranej z magazynu elektrochemicznego bez jednoczesnego pogarszania możliwości dynamicznych pojazdu. Uzyskuje się dzięki temu podniesienie wydajności hybrydowego źródła, w tym wydłużenie czasu użytkowania baterii elektrochemicznej oraz możliwość efektywniejszego doboru pojemności magazynu pomocniczego. Należy przy tym podkreślić, że hybrydowe

magazyny energii elektrycznej wykorzystywane są obecnie z powodzeniem w pojazdach konstruowanych na potrzeby transportu miejskiego. Jednocześnie rośnie liczba wdrażanych systemów zapewniających komunikację pomiędzy pojazdami oraz pojazdami i infrastrukturą. Stwarza to możliwość syntezy w niedalekiej przyszłości układów regulacji dla hybrydowych magazynów energii uwzględniających np. zachowanie się pojazdów poruszających się z przodu lub stan najbliższego skrzyżowania. Z kolei zastosowanie systemu wnioskowania rozmytego pozwoli na stosunkowo łatwe modyfikowanie obecnego algorytmu regulacji poprzez aktualizowanie zbioru reguł i wzbogacanie go o dodatkowe informacje o stanie otoczenia pojazdu, których dostępność będzie konsekwentnie rosła wraz z rozwojem telemetrii pojazdowej oraz sieci V2V i I2V/V2I.

Aktualnie trwają prace nad przygotowaniem makiety mobilnej umożliwiającej przetestowanie opracowanych algorytmów rozdziału momentów napędowych oraz zarządzania rozpięciem mocy w hybrydowym magazynie energii w stanach występujących podczas rzeczywistej eksploatacji pojazdu.

Informacje dodatkowe

Badania współfinansowane przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego (projekt ECO-Mobilność WND POIG.01.03.01-14-154/09, 2009-2013) oraz ze środków na działalność statutową Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej.



Literatura

- [1] <http://www.transportenvironment.org/news/paris-trial-first-city-centre-car-ban> (odczyt z dn. 20.02.14).
- [2] <http://moto.wp.pl/kat,55194,title,Kolejne-miasta-z-przywilejami-dla-aut%20elektrycznych,wid,15514571,wiadomosc.html?ticaid=1125ac> (odczyt z dn. 20.02.14).
- [3] SHUGUANG J., CHERRY C., BECHLE M., WU Y., MARSHALL J.: *Electric vehicles in China: Emissions and health impacts*. Environmental Science & Technology, 46/2012, pp. 2018–2024.
- [4] RUDNICKI T.: *Pojazdy z silnikami elektrycznymi*. Zeszyty Problematyczne „Maszyny Elektryczne” 80/2008, wyd. BOBRME Komel, s. 245–250.
- [5] FULTON L.: *Technology Roadmap: Electric and Plug-in Hybrid Electric Vehicles*. International Energy Agency, www.iea.org, updated June 2011.
- [6] Solaris – producent autobusów miejskich, międzymiastowych i specjalnych oraz trolejbusów i tramwajów. http://www.solarisbus.com/vehicles_group/urbino-electric (odczyt z dn. 20.02.14).
- [7] <http://goparis.about.com/od/transportation/a/Autolib-electric-cars-Paris.htm> (odczyt z dn. 20.02.14).
- [8] KOZŁOWSKI M., CHOROMAŃSKI W.: *Dynamics simulation studies on the electric city car with an electromechanical differential and the rear wheels drive*. Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences, Volume 61, No. 3, 2013.
- [9] CHOROMAŃSKI W., GRABAREK I., KOZŁOWSKI M., UFNALSKI B., BARWICKI M.: *A new concept of electric ECO-Car*. Selected proceedings 13th WCTR, Rio de Janeiro, Brazil, 15–18 July 2013.
- [10] KOZŁOWSKI M., TOMCZUK K., SZCZYPIOR J.: *Methodology of determining basic technical parameters of electric-drive car*. „Przegląd Elektrotechniczny” 10/2011, s. 299–304.
- [11] GRABAREK I., CHOROMAŃSKI W.: *Innovative environment at design in means and systems of transport with particular emphasis on the human factor*. Advances in Human Aspects of Road and Rail Transportation, edited by Neville A. Stanton, CRS Press Taylor&Francis Group, 2012, pp. 273–282.
- [12] MICHALCZUK M., GRZESIAK L.M., UFNALSKI B.: *Hybridization of the lithium energy storage for an urban electric vehicle*. Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences, Volume 61, Issue 2, 2013, pp. 325–333.
- [13] ZHANG, XI, AND CHRIS MI.: *Management of Energy Storage Systems in EV, HEV and PHEV*. Vehicle Power Management. Springer. London 2011, pp. 259–286.
- [14] YOU S., LEE H., LEE D., MOK H., LEE Y., HAN S.: *Speed ratio control for electronic differentials*. IEEE Electronics Letters, vol. 47, 2011, pp. 933–934.
- [15] SZUMANOWSKI A.: *Projektowanie dyferencjałów elektromechanicznych elektrycznych pojazdów drogowych*. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji, Warszawa–Radom 2007.
- [16] WANG JIAYUAN, SUN ZECHANG, WEI XUEZHE: *Performance and characteristic research in LiFePO4 battery for electric vehicle applications*. Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009. VPPC 09. IEEE, September 2009, p. 1657–1661.
- [17] JIEXUN LIU, DAWEI GAO, JIANHUA CAO: *Study on the effects of temperature on LiFePO4 battery life*. Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2012 IEEE, 9–12 Oct. 2012, pp. 1436–1440.
- [18] SHEN, JUNYI, SERKAN DUSMEZ, ALIREZA KHALIGH: *An advanced electro-thermal cycle-lifetime estimation model for LiFePO4 batteries*. Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), 2013 IEEE. IEEE, 2013.
- [19] HE YIN, CHEN ZHAO, MIAN LI, CHENGBIN MA: *Optimization Based Energy Control for Battery/Super-capacitor Hybrid Energy Storage Systems*. IECON 2013 – 39th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 2013.
- [20] LEŚNIEWSKI W., LITWIN W.: *Napęd i zasilanie hybrydowe niewielkich jednostek pływających*. „Napędy i Sterowanie” 5/2013, s. 76–81.
- [21] COELINGH E., SOLYOM S.: *All aboard the robotic road train*. Spectrum, IEEE, vol. 49, no. 11, 2012, pp. 34–39.
- [22] http://media.gm.com/media/us/en/gm/news.detail.html/content/Pages/news/us/en/2012/Aug/0821_V2V_Pilot_Program.html (odczyt z dn. 20.02.14).
- [23] <http://corporate.ford.com/doc/sr10-section-issues-vehicle.pdf> (odczyt z dn. 20.02.14).
- [24] MICHALCZUK M., GRZESIAK L.M., UFNALSKI B.: *A lithium battery and ultracapacitor hybrid energy source for an urban electric vehicle*. „Przegląd elektrotechniczny” 4b/2012, pp. 158–162.
- [25] ANDRE M.: *Real-world driving cycles for measuring cars pollutant emissions – Part A: The ARTEMIS European driving cycles*. Report INRETS-LTE 0411, June 2004.

Marek Michalczuk, Piotr Rumniak, Piotr Biernat, Andrzej Gałęcki, Lech Grzesiak, Bartłomiej Ufnalski, Arkadiusz Kaszewski

artykuł recenzowany