

## APPLICATION OF BUFFER SECONDARY ENERGY SOURCE WITH SUPERCAPACITORS TO ELECTRIC PROPULSION OF VEHICLES

**Zdzisław Juda**

*Politechnika Krakowska, Pracownia Mechatroniki Samochodowej  
Kraków, ul. Warszawska 24, tel.: +48 12 6283371*

### **Abstract**

*The ability of secondary sources of energy to the storage of the energy is connected with essential parameters of hybrid vehicle (HEV - Hybrid Electric Vehicle) that is with the maximum range, with the ability to rise and the vehicle acceleration. The same parameters influence also on the durability of traditional secondary sources (SES - Secondary Energy Source)- electrochemical batteries (EB - Electrochemical Battery). The extension of the durability of the battery, and consequently the decrease of operating costs of HEV, makes possible the use of additional SES in the form the sets of super capacitors (SCAP - Super capacitor). These elements appear under names: super capacitor, ultra condenser, and pseudo condenser. In the English literature there is besides the name (EDLC - Electric Double Layer Capacitor). SCAP are characterized with very high capacities up to 2700 F for the single module, at the tension approx 2.5 V. In the relationship with large capacities, SCAP have also very high values of the specific power (PD - Power Density) expressed in W/ kg. The limited durability of the battery (CL - Cycle Life) is connected with a number and a depth of charges/discharges (DoD - Depth of Discharge). The time of the charge and the discharge of the battery are much longer than Super capacitors, because chemical reactions are dependent on time. Super capacitors can be loaded and unloaded almost without barred quantitative, and the time of the discharge can be very short - stored energy is accessible in the course milliseconds. The value of received current can be very high without the risk of the damage. One from cases of the SCAP use is the state of the applying of the brake of the regenerative vehicle during which gained over is the peck of the energy in the short time (several seconds). Other is by fortune the possibility of the aid of the basic source of energy during the start or accelerating of the vehicle. Then large quantity of the energy with controlled microprocessors energy electronic sets can be delivered to the vehicle drive in several seconds. The velocity of charge and discharge depends on low resistance of internal super capacitor. The association of the battery with the sets of super capacitors demands uses of computer drivers and energy electronic transforms for the proper management energy conversions. In the article one introduced {one represented} The idea of the super capacitors' use to the association with the battery and results of simulations of the energy brake salvage in the small vehicle with the electric drive intended mostly to the traffic in antique centres of cities is presented in the paper.*

## **BUFOROWE WTÓRNE ŹRÓDŁO ENERGII Z SUPERKONDENSATORAMI W ZASTOSOWANIU DO NAPĘDU ELEKTRYCZNEGO POJAZDÓW**

### **Streszczenie**

*Zdolność wtórnych źródeł energii do magazynowania energii jest związana z istotnymi parametrami pojazdu hybrydowego (HEV – Hybrid Electric Vehicle): maksymalnym zasięgiem, zdolnością pokonywania wzniesień i rozpędzaniem pojazdu. Te same parametry wpływają także na żywotność tradycyjnych wtórnych źródeł (SES – Secondary Energy Source) - baterii elektrochemicznych (EB – Electrochemical Battery). Wydłużenie żywotności baterii, a tym samym obniżenie kosztów eksploatacyjnych HEV, umożliwia zastosowanie dodatkowego SES w postaci zespołu superkondensatorów (SCAP – Supercapacitor). Elementy te występują pod nazwami: superkondensator, ultrakondensator, pseudokondensator. W literaturze angielskiej spotykana jest ponadto nazwa (EDLC - Electric Double Layer Capacitor). SCAP charakteryzują się bardzo wysokimi pojemnościami dochodzącymi do 2700 F dla pojedynczego modułu, przy napięciu rzędu 2.5 V. W związku z dużymi pojemnościami SCAP mają też bardzo wysokie wartości mocy jednostkowej (PD – Power Density) wyrażonej w W/kg. Ograniczona trwałość baterii (CL – Cycle Life) jest związana z liczbą i głębokością ładowań/rozładowań (DoD – Depth of Discharge). Czas ładowania i rozładowania baterii jest o wiele dłuższy niż superkondensatorów, ponieważ reakcje chemiczne są uzależnione czasowo. Superkondensatory mogą być*

*ładowane i rozładowywane prawie bez ograniczeń ilościowych, a czas rozładowania może być bardzo krótki – zmagazynowana energia jest dostępna w ciągu milisekund. Wartość pobieranego prądu może być bardzo wysoka bez ryzyka uszkodzenia. Jednym z przypadków wykorzystania SCAP jest stan hamowania regeneracyjnego pojazdu, podczas którego pozyskiwana jest duża ilość energii w krótkim czasie (kilku sekund). Innym przypadkiem jest możliwość wspomagania podstawowego źródła energii w czasie startu lub rozpędzania pojazdu. Wówczas duża ilość energii za pośrednictwem sterowanych mikroprocesorowo układów energoelektronicznych może być dostarczona do napędu pojazdu w ciągu kilku sekund. Szybkość ładowania i rozładowania wynika z niskiej rezystancji wewnętrznej superkondensatora. Współpraca baterii z zespołem superkondensatorów wymaga zastosowania sterowników komputerowych i przekształtników energoelektronicznych dla właściwego zarządzania przemianami energii. W artykule przedstawiono koncepcję zastosowania superkondensatorów do współpracy z baterią oraz wyniki przeprowadzonych symulacji odzysku energii hamowania w małym pojeździe z napędem elektrycznym przeznaczonym głównie do ruchu w zabytkowych centrach miast.*

## **1. Wprowadzenie**

Osiągnięcie wystarczająco wysokich wartości takich parametrów jak zasięg pojazdu z napędem elektrycznym (bez zewnętrznego uzupełniania energii), zdolność pokonywania wzniesień i przyspieszania warunkują zapotrzebowanie rynku na tego typu pojazdy. Ponadto koszty ponoszone w ciągu całego okresu eksploatacji pojazdu zależą w dużej mierze od dojrzałości technicznej zastosowanych rozwiązań – szczególnie dotyczy to źródeł energii, urządzeń do przekształcania energii oraz systemów sterowania.

Jednostka napędowa każdego pojazdu, dla wywołania jego ruchu, musi wytwarzać moc na kołach w celu pokrycia oporu aerodynamicznego, oporów ruchu i sił grawitacji w czasie pokonywania wzniesień. Ponadto w trakcie przyspieszania pojazd musi pokonać siły bezwładności, a znacząca część energii dostarczonej do systemu podczas przyspieszania jest w konsekwencji bezpowrotnie tracona w czasie hamowania. Dodatkowo potrzebna jest pewna ilość energii na oświetlenie, klimatyzację czy układy wspomagania. Wszędzie tam, gdzie moment napędowy jest wytwarzany przez maszyny elektryczne (a tak jest zarówno w pojazdach elektrycznych jak i w pojazdach hybrydowych) możliwe jest ograniczenie strat energii podczas hamowania pojazdu poprzez skuteczną regenerację.

Energia kinetyczna pojazdu uwolniona podczas hamowania pojazdu konwencjonalnego jest zamieniana na ciepło i całkowicie tracona, podczas gdy w pojeździe z napędem elektrycznym lub hybrydowym może być zatrzymana w systemie, a konkretnie we wtórnym źródle energii (EB, SCAP). Zastosowanie podwójnego, wtórnego źródła energii na bazie EB oraz SCAP, w którym transfer energii z jednego źródła do drugiego odbywa się po kontrolą sterownika komputerowego podniesie energetyczną sprawność całego systemu oraz wydłuży czas eksploatacji baterii. Ładowanie i rozładowanie baterii podlega określonym ograniczeniom i powinno odbywać się według właściwej procedury, podczas gdy SCAP stanowi źródło o wysokim stopniu dostępności (szybkie ładowanie/rozładowanie przy praktycznie nieograniczonej liczbie cykli).

## **2. Przepływy energii w pojazdach**

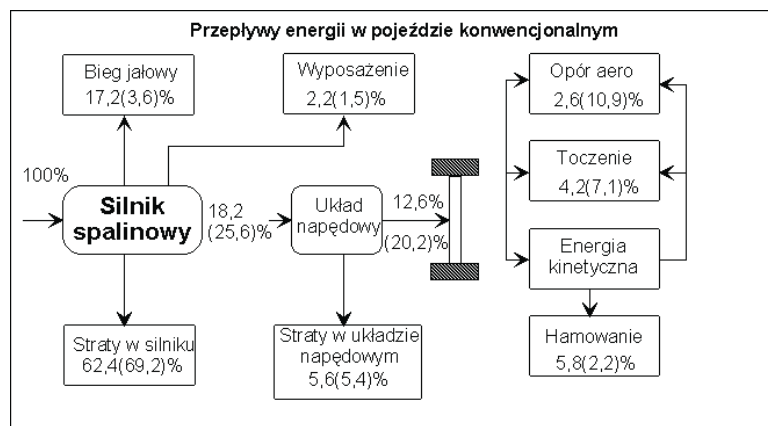
W pojazdach konwencjonalnych praca na kołach pojazdu jest uzyskiwana z paliwa za pośrednictwem silnika spalinowego jako rezultat procesu przetwarzania energii – w przypadku silnika spalinowego prowadzonego przy niskiej sprawności. Rysunek poniżej (Rys.1) pokazuje ujęte procentowo przepływy energii w średniej wielkości pojeździe dla dwu cykli jezdnych: miejskiego i autostradowego. Jak widać, większość energii paliwa jest tracona, a jedynie 12,6% całkowitej energii w cyklu miejskim jest dostarczane do kół pojazdu. W cyklu autostradowym ta ilość wzrasta do około 20%. Energia zapotrzebowana przez pojazd może być przedstawiona w funkcji czasu jako [10]:

$$E = mgf_t \int_0^t v dt + K \int_0^t v^3 + \frac{m}{2} (v_p^2 - v_k^2), \quad (1)$$

gdzie:

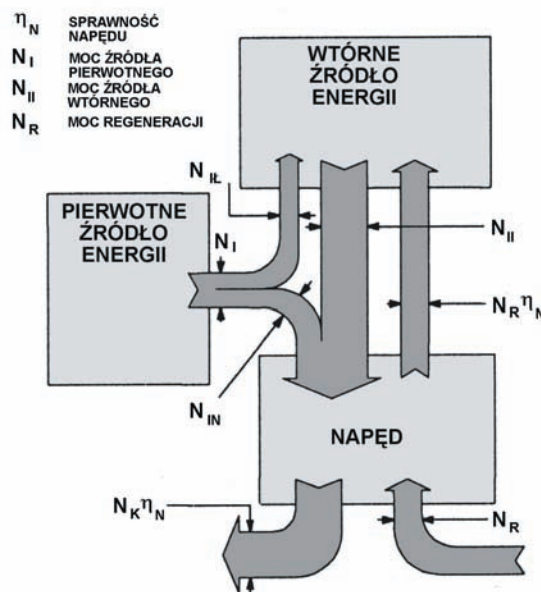
- $m$  - masa pojazdu [kg],
- $g$  - przyspieszenie ziemskie [ $m/s^2$ ],
- $f_t$  - współczynnik oporu toczenia (przyjęto  $f_t = 0.014$ ) [10],
- $v$  - prędkość pojazdu [m/s],
- $K$  - grupuje współczynniki oporu aerodynamicznego i powierzchnię czołową pojazdu,
- $v_p, v_k$  - odpowiednio początkowa i końcowa prędkość podczas hamowania [m/s].

Poszczególne człony równania oznaczają kolejno energię na pokonanie oporów toczenia, energię na pokonanie oporów powietrza i energię kinetyczną pojazdu, uzyskaną w czasie rozpędzania. Duża część energii kinetycznej (zwykle rozpraszanej i traconej podczas hamowania) może być odzyskana jeżeli pojazd jest wyposażony w system umożliwiający regenerację.



Rys. 1. Przepływy energii w średniej wielkości pojeździe konwencjonalnym  
Fig. 1. Medium size conventional vehicle energy flow

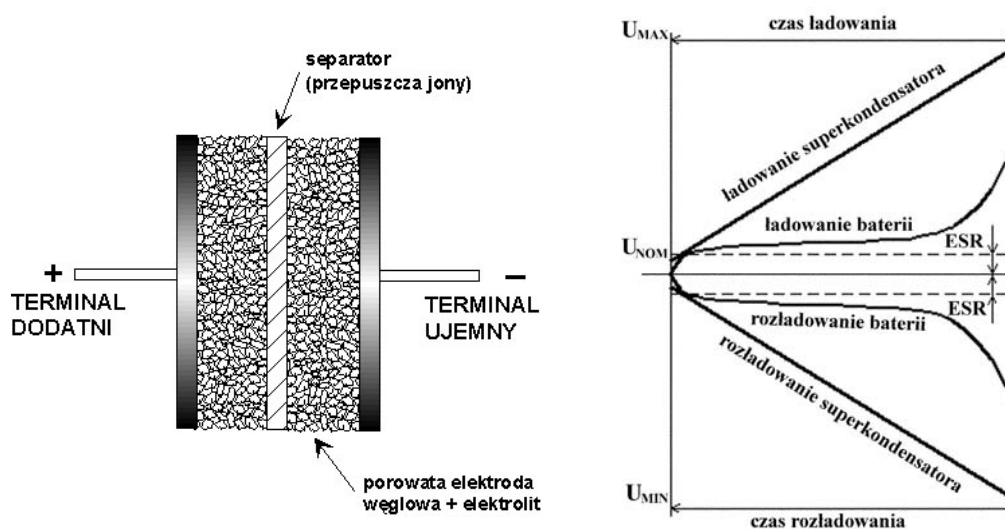
W pojazdach z napędem elektrycznym i hybrydowym część energii kinetycznej pojazdu może być odzyskana w trakcie hamowania pojazdu (Rys. 2).



Rys. 2. Przepływy energii w pojeździe hybrydowym  
Fig. 2. Hybrid Electric Vehicle energy flow

### 3. Superkondensatory

Elektrochemiczne elementy do magazynowania energii występują pod nazwami: superkondensator, ultrakondensator, pseudokondensator. W literaturze anglojęzycznej spotykana jest ponadto nazwa Electric Double Layer Capacitor (EDLC). SCAP charakteryzują się bardzo wysokimi pojemnościami dochodzącymi do 2700 F dla pojedynczego modułu, przy napięciu rzędu 2.5 V (obecnie zaawansowane technologicznie elementy osiągają napięcie 2.7 V). Wysoka pojemność jest osiągana dzięki specjalnej konstrukcji kondensatora. W typowym kondensatorze energia jest magazynowana w postaci ładunku elektrycznego na dwu okładzinach metalowych przedzielonych cienką warstwą dielektryka. W typowej baterii elektrochemicznej energia jest magazynowana w postaci chemicznej jako aktywny materiał wypełniający płyty kratowe stanowiące elektrody. Co do budowy SCAP przypomina EB. SCAP zbudowany jest z dwu elektrod nasączonych elektrolitem oraz separatora umieszczonego pomiędzy nimi. Dla uzyskania bardzo dużej powierzchni czynnej, elektrody są wykonane z materiału porowatego o średnicach porów rzędu nanometrów. Jednostkowa powierzchnia czynna elektrod osiąga 2300 m<sup>2</sup>/g [1,2]. Energia w superkondensatorze jest magazynowana w postaci ładunku elektrycznego, gromadzącego się w mikroporach oraz na granicy pomiędzy stałym materiałem elektrod a elektrolitem. Separator zbudowany z materiału przepuszczającego jony, rozdziela elektrody o różnoimiennych ładunkach elektrycznych. Charakterystyki napięciowe SCAP i EB różnią się, wobec czego konieczne jest zastosowanie sterowanych komputerowo przetworników DC/DC w celu transferu energii pomiędzy źródłami o różnych napięciach (Rys.3).

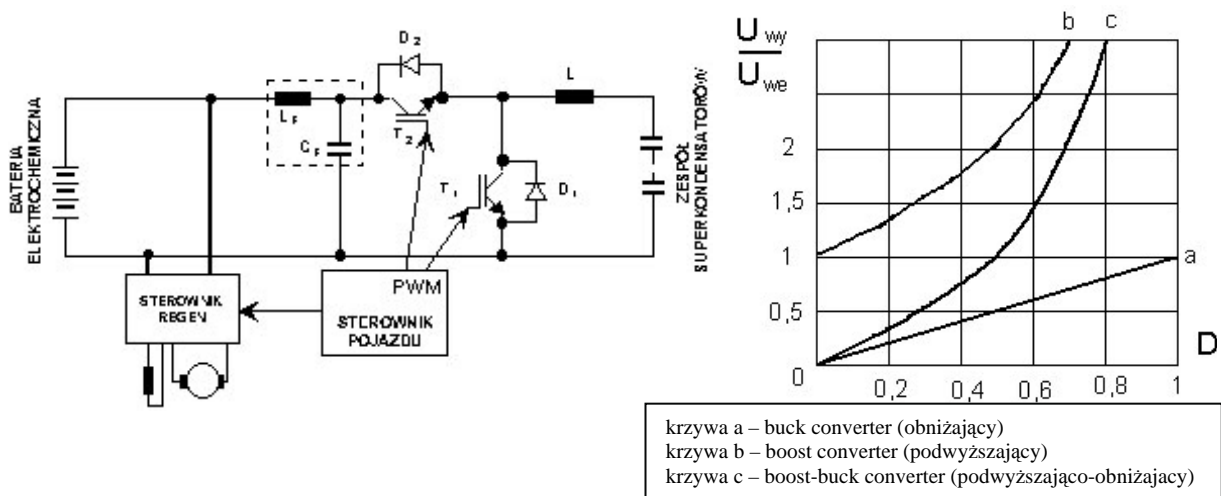


Rys. 3. Budowa SCAP (z lewej) oraz charakterystyki napięciowe baterii i SCAP w funkcji czasu (z prawej)  
Fig. 3. SCAP structure and voltage curves for EB and SCAP

### 4. Układy napędowe pojazdów elektrycznych z odzyskiem energii

Energia uwolniona podczas hamowania pojazdu konwencjonalnego jest całkowicie tracona, podczas gdy w elektrycznym pojeździe hybrydowym może być zatrzymana w systemie (Rys.2), a konkretnie we wtórnym źródle energii (EB, SCAP, koło zamachowe) [12]. Odzysk energii jest możliwy, bo maszyna elektryczna może pracować w sposób odwracalny, a więc jako silnik elektryczny napędowy lub jako generator w trybie regeneracyjnym podczas hamowania. Szacuje się, że w intensywnym ruchu miejskim w wyniku hamowania regeneracyjnego można oszczędzić do 15% energii. Ilość możliwej do

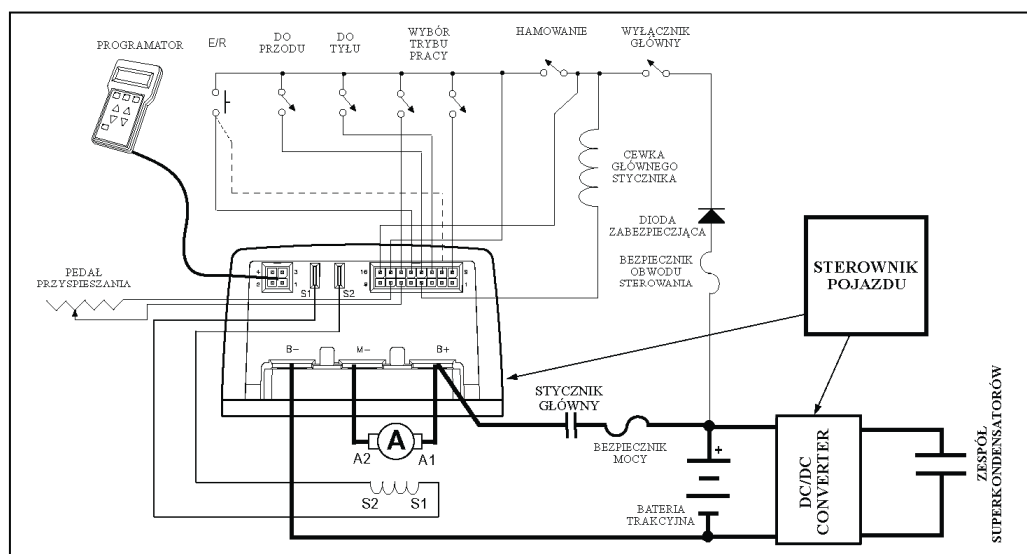
odzysku energii jest ograniczona ponieważ proces hamowania odbywa się zazwyczaj w krótkim okresie, przy bardzo dużej ilości energii, która się wówczas wydziela. Wielkość (moc) elektrycznego silnika napędowego jest określana dla danego pojazdu z punktu widzenia parametrów trakcyjnych pojazdu, a ilość energii możliwej do odzysku w trakcie hamowania wymagałaby znacznie większej (i cięższej) maszyny, zdolnej do przetworzenia w krótkim czasie dużej ilości energii mechanicznej na energię elektryczną. Przewymiarowanie silnika napędowego jest nieuzasadnione technicznie i ekonomicznie. O ilości przejętej energii decyduje sterownik komputerowy w oparciu o przyjętą strategię sterowania. Pewna część energii może być potrzebna w przypadku użycia mechanicznego systemu hamowania pojazdu w celu szybkiego zatrzymania [9]. Program sterujący kontrolera podejmuje decyzje na podstawie sygnałów pomiarowych z sensorów kąтового położenia pedału przyspieszania i hamulca, a także szybkości zmian tych kątów (Rys.4).



Rys. 4. Współpraca baterii i superkondensatorów za pośrednictwem przetwornika DC/DC podwyższająco-obniżającego (z ang. Buck-Boost)

Fig. 4. EB and SCAP cooperation with Buck-Boost DC/DC converter

Zastosowanie przetwornika DC/DC obniżająco-podwyższającego (Buck-Boost Converter – krzywa „c” na rys. 5) umożliwi przekazywanie energii pomiędzy źródłami o różnych napięciach [3, 4].



Rys. 5. Schemat układu napędowego z maszyną obcowzbudną

Fig. 5. Propulsion system with separately excited motor

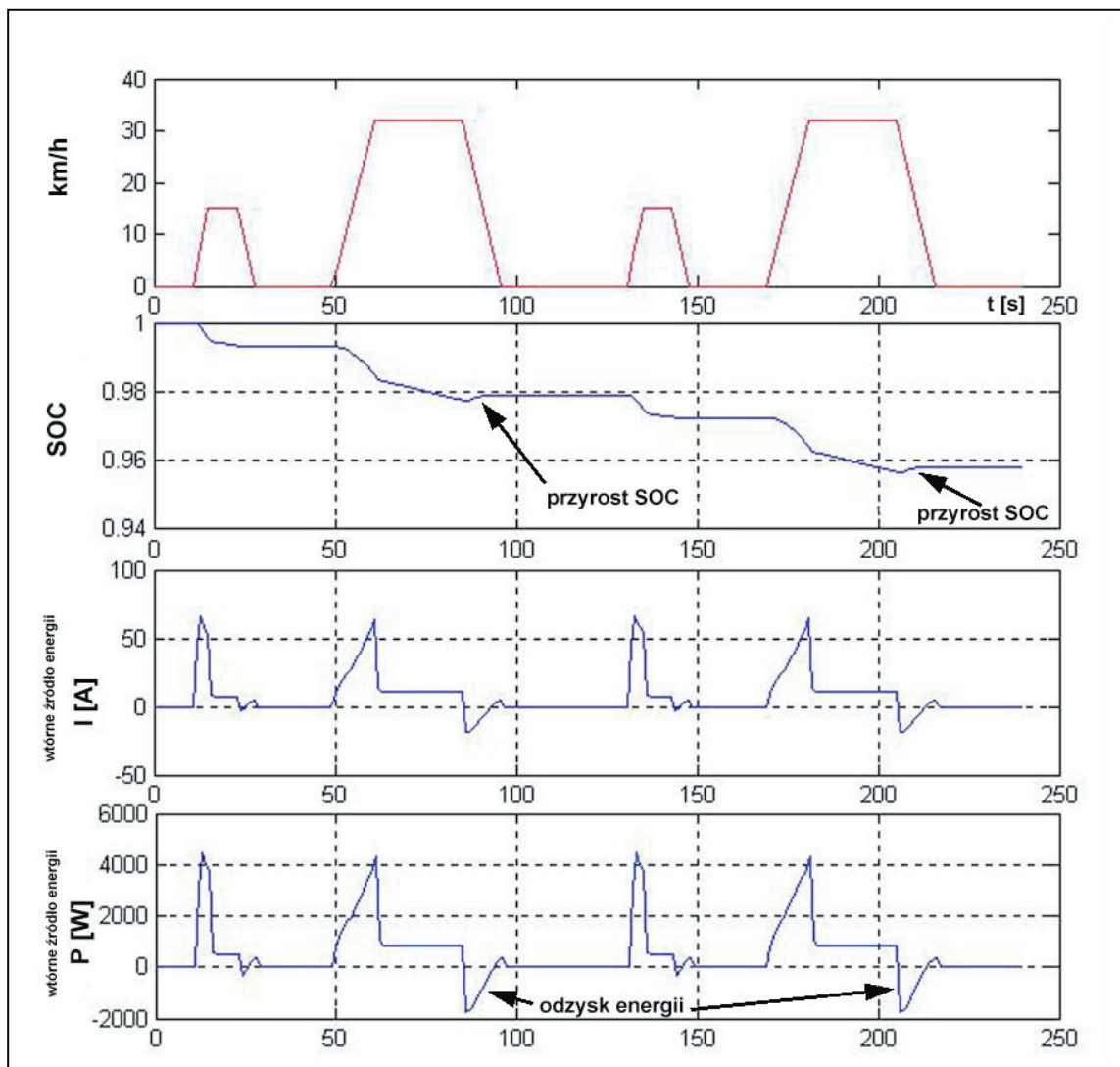
## 5. Miejski pojazd elektryczny – symulacja przepływu energii

### Założenia do projektu systemu odzysku energii

Parametry pojazdu koncepcyjnego:

1. Masa (wraz z ładunkiem) ok. 500 kg., silnik el. o mocy  $P = 2.1 \text{ kW}$  ( $U = 36\text{V}$ ).
2. Prędkość pojazdu 25 km/h, średni czas hamowania pojazdu 10 s.
3. Obliczona maksymalna ilość energii kinetycznej możliwej do odzysku 12.5 kJ.
4. Ilość ogniw SCAP (2.5 V) –  $42\text{V}/2.5\text{V} = 17$  ogniw (3 moduły BPAK0350 po 6 ogniw), pojemność ogniwa – 350 F, stała czasowa  $t = 2.5 \text{ s}$ .
5. Moc obliczona z energii kinetycznej i czasu hamowania  $P = 12.5 \text{ kJ}/10 \text{ s} = 1.25 \text{ kW}$ .

Dobry typ SCAP spełnia wymogi co do pojemności, a także co do rozkładu napięcia na pojedyncze ogniwa. Dobrane zestawy są wyposażone w system aktywnego wyrównywania napięć poszczególnych ogniw SCAP Maxwell BPAK0350 są produkowane z przeznaczeniem do systemów energetycznych pojazdów i charakteryzują się co najmniej 10 letnim okresem eksploatacji, bardzo niską rezystancją wewnętrzną i dużą liczbą cykli przekraczającą 500 000. Masa pojedynczego pakietu  $m = 0.5 \text{ kg}$ , a wymiary dł. =216 mm, sz. = 69 mm, a wys.=38 mm. Całkowita masa stosu wynosi 2.0 kg.



Rys. 6. Wyniki symulacji pojazdu z regeneracją energii podczas hamowania  
Fig. 6. Results of simulation of vehicle with energy recuperation

Wyniki wstępnych symulacji przeprowadzonych w środowisku programowym MATLAB/SIMULINK wykazują zdolność układu napędowego do odzysku pewnej ilości energii w czasie hamowania pojazdu. Symulacja została przeprowadzona dla niestandardowego cyklu jezdny o czasie trwania 240 s i maksymalnej prędkości 32 km/h. W trakcie cyklu występują 4 okresy rozpędzania oraz 4 okresy hamowania pojazdu (górna część rys. 6. Podczas realizacji cyklu stan naładowania wtórnego źródła energii (SOC) systematycznie maleje (za wyjątkiem okresów hamowania odzyskowego – punkty zaznaczone na wykresie SOC). Rozpatrując wykresy prądu oraz mocy buforowego wtórnego źródła energii (dolne wykresy), można zaobserwować przedziały czasowe, w których prąd i moc przyjmują wartości ujemne, co w tym przypadku oznacza przepływ energii do źródła, a więc regenerację energii [6, 7, 8].

## 6. Konkluzja

Małe pojazdy elektryczne zbudowane na bazie wózków golfowych, ale wyposażone w niezbędne do ruchu na drogach publicznych, wymagane prawnie zespoły bezpieczeństwa mogą rozwijać prędkości do 25 km/h. Nawet przy tak niskich prędkościach możliwy jest odzysk pewnej ilości energii, która normalnie jest całkowicie zamieniana na ciepło i tracona w czasie hamowania pojazdu. Idealnym wtórnym źródłem energii do magazynowania i oddawania energii w okresach hamowania i rozpędzania pojazdu jest superkondensator, jako element o następujących cechach:

- wysoka żywotność przy wielokrotnych cyklach ładowanie/rozładowanie,
- zdolność przyjmowania i oddawania dużej ilości energii w krótkim czasie,
- wysoka wartość gęstości mocy [W/kg],
- wydłużenie żywotności baterii poprzez przejmowanie obciążeń chwilowych,
- krótkim czasie ładowania/rozładowania.

Dla prawidłowego działania całego systemu napędowego z odzyskiem energii niezbędne są wydajne urządzenia sterujące, pracujące w czasie rzeczywistym.

## Literatura

- [1] Burke, Review of Ultracapacitor Technologies for Vehicle Application,
- [2] Maher, Ultracapacitors and the Hybrid Electric Vehicle, White Paper, Maxwell Technologies.
- [3] Chan C. C., Chau K. T., Modern Electric Vehicle Technology, Oxford University Press, 2001.
- [4] Husain I., Electric and Hybrid Vehicles Design Fundamentals, CRC Press, 2003.
- [5] Miller J. M., Smith R., Ultracapacitor Assisted Electric Drives for Transportation, Maxwell Technologies
- [6] Juda Z., Simulation of Energy Conversion in Advanced Automotive Vehicles, SAE Paper 2001-01-3341, ATTCE Congress Barcelona 2001.
- [7] Juda Z., Hybrid Electric City Car – Simulation of Coceptual Solutions, SAE Paper 2002-1-2145, ATT Congress Paris 2002.
- [8] Juda Z., Hybrid-Electric City Car Simulation, Journal of KONES, Warszawa 2003, ISSN 1231-4005.
- [9] Juda Z., Współpraca baterii elektrochemicznych i superkondensatorów w pojazdach hybrydowych, Konmot-Autoprogres 2004, Zakopane.
- [10] Siłka W., Energochłonność ruchu samochodu, WNT Warszawa, 1997, ISBN 83-204-2037-7.



- [11] Maxwell Technologies, Application Note, How To Determine The Appriopriate Size Ultracapacitor For Your Application.
- [12] Szumanowski A., “ Fundamentals of Hybrid Vehicle Drives”, Wydawnictwo Warsaw-Radom, ISBN 83-7204-114-8, Radom 2000.