

---

# WYBRANE PROBLEMY INŻYNIERSKIE

NUMER 2

INSTYTUT AUTOMATYZACJI PROCESÓW TECHNOLOGICZNYCH  
I ZINTEGROWANYCH SYSTEMÓW WYTWARZANIA

---

Gabriel KOST\*, Andrzej NIERYCHŁOK

Instytut Automatykacji Procesów Technologicznych i Zintegrowanych Systemów  
Wytwarzania, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska, Gliwice

\*gabriel.kost@polsl.pl

## WYKORZYSTANIE SUPERKONDENSATORÓW JAKO DODATKOWEGO ŹRÓDŁA ENERGII DLA SILNIKA ELEKTRYCZNEGO W HYBRYDOWYM POJEŹDZIE KOŁOWYM

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono układ sterowania spalinowo-elektrycznym pojazdem kołowym z napędem hybrydowym. Wykonano model pojazdu hybrydowego w oprogramowaniu MatLAB/Simulink, w którym wykorzystano podwójne źródło energii dla silnika elektrycznego. Zastosowanie akumulatorów elektrochemicznych oraz superkondensatorów pozwala na lepszy przepływ energii w układzie zarządzania energią hybrydowego pojazdu kołowego. Zastosowanie superkondensatorów jako źródła energii wspomagającej akumulatory elektrochemiczne przyczyniło się do poprawy dynamiki silnika elektrycznego w stanach przejściowych oraz zmniejszenia masy akumulatorów elektrochemicznych. W pracy opisano etap przyspieszania pojazdu kołowego – stan dynamiczny.

### 1. Wstęp

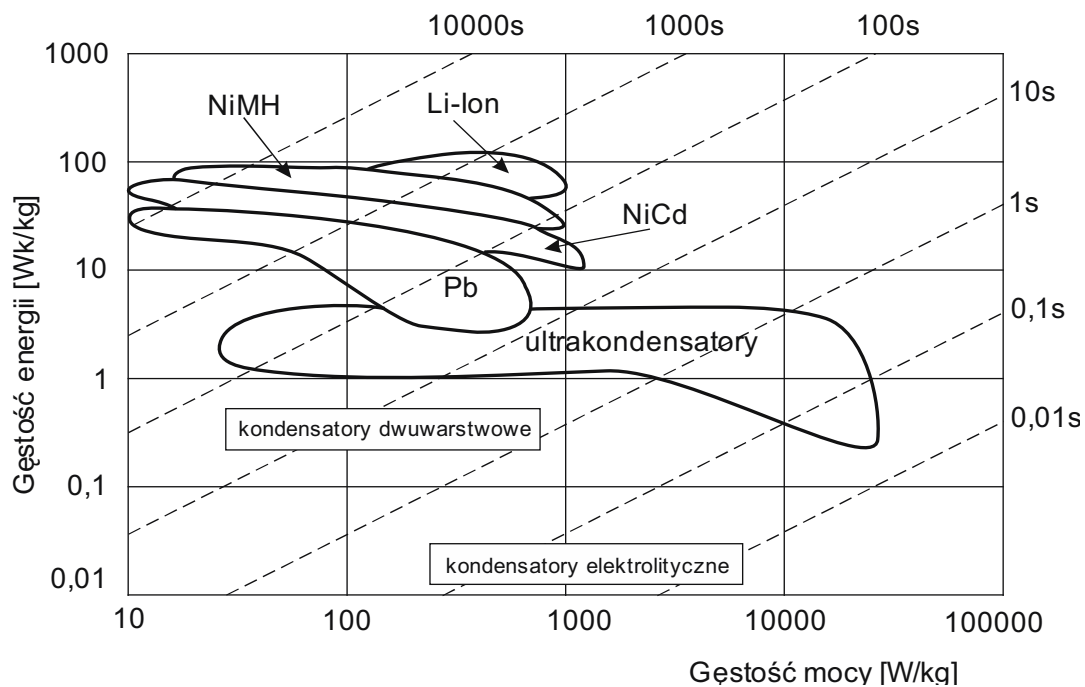
Wykorzystanie zalet każdego z silników trakcyjnych wymaga przyjęcia pewnych zasad ich współpracy. Najważniejszym kryterium jest dążenie do pracy przy maksymalnej sprawności każdej jednostki napędowej. Silnik spalinowy ocenia się także pod względem najmniejszego zanieczyszczenia środowiska (najmniejszej emisji substancji toksycznych). Taki proces podlega ciągłej kontroli pracujących jednostek napędowych oraz odpowiedniego sterowania elementami wykonawczymi (aktuatorami) czy też nastawnikami.

Silnik spalinowy najefektywniej pracuje w pewnym obszarze obciążenia (ciśnienia użytecznego) i pewnej prędkości obrotowej, w których wykazuje największą sprawność, czyli najmniejsze jednostkowe zużycie paliwa – najmniej zanieczyszcza środowisko. Z kolei sprawność silnika elektrycznego zależy od sprawności samej jednostki napędowej, jak również układu sterowania (przemiennika częstotliwości) oraz samego źródła zasilania. Silnik elektryczny musi zostać zasilony prądem, co wiąże się bezpośrednio z następującymi rozwiązaniami [1,2,3]:

- silnik spalinowy napędza generator elektryczny, który wytwarza energię potrzebną do napędu silnika elektrycznego, a jej nadmiar służy do doładowywania akumulatorów

elektrochemicznych. Taką koncepcję rozwiązania nazywaną szeregowym połączeniem jednostek napędowych w hybrydowym układzie napędowym powszechnie stosuje się w kolejnictwie. Ważnym aspektem jest praca silnika spalinowego, czyli źródło energii pierwotnej w wąskim przedziale prędkości obrotowej (przy wysokiej sprawności jednostki spalinowej);

- silnik spalinowy służy do napędu pojazdu kołowego oraz do napędu generatora. Jest to rozwiązanie typu równoległego, które znacznie częściej występuje w pojazdach kołowych. Dzięki synergii energii możliwa jest praca obu jednostek napędowych napędzających pojazd kołowy, co przyczynia się do zwiększenia ogólnej sprawności oraz elastyczności układu napędowego.



Rys. 1. Porównanie parametrów superkondensatorów i wybranych typów akumulatorów [3]

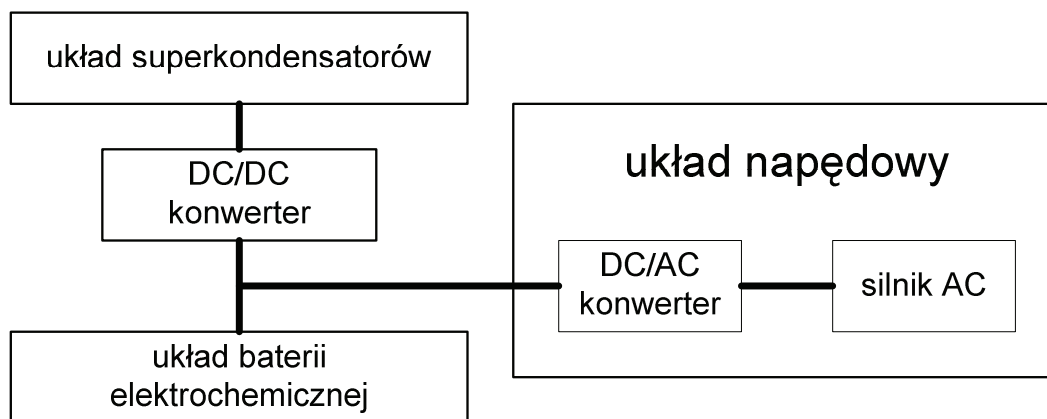
Fig. 1. Comparison of supercapacitors and some types of batteries [3]

W obu przypadkach konieczne jest wykorzystanie akumulatorów elektrochemicznych, służących jako bufor energii elektrycznej dla silnika elektrycznego. Akumulatory elektrochemiczne mają niestety pewną zasadniczą wadę: są bardzo wrażliwe na zbyt głębokie rozładowanie i przeładowanie. Proces ten kontrolowany jest obecnie za pomocą kontrolera sterującego ładowaniem baterii, który w zależności od rozładowania reguluje prąd ładowania. Obecnie stosowane pojazdy kołowe o napędzie hybrydowym wykorzystują rekuperację energii kinetycznej pojazdu. Proces ten polega na odzysku energii kinetycznej poprzez pracę prądnicową jednostki elektrycznej – przepływ energii przebiega od kół pojazdu poprzez przekładnię i silnik napędowy do akumulatorów. Właśnie tutaj napotykanym jest problem z przyjmowaniem przez akumulatory elektrochemiczne dużych wartości prądów, często w bardzo krótkim czasie. Można rozwiązać ten problem, stosując podwójny magazyn energii elektrycznej w postaci akumulatorów i superkondensatorów mogących w bardzo krótkim czasie przyjmować duże wartości prądu (energii kinetycznej), przekraczające nieraz wartość

800A. Superkondensatory mają zastosowanie tam, gdzie potrzebny jest duży wydatek prądowy, co tyczy się nagłego zapotrzebowania wysokich wartości prądów dla silnika elektrycznego, którego akumulatory elektrochemiczne mogą nie spełnić tego warunku, oraz w trakcie rekuperacji energii kinetycznej pojazdu kołowego. Akumulatory elektrochemiczne mają wówczas za zadanie dostarczanie energii elektrycznej wspomagającej superkondensatory oraz w trakcie poruszania się pojazdu kołowego w warunkach pracy ustalonej (w miarę ze stałą prędkością).

## 2. Koncepcja rozwiązania

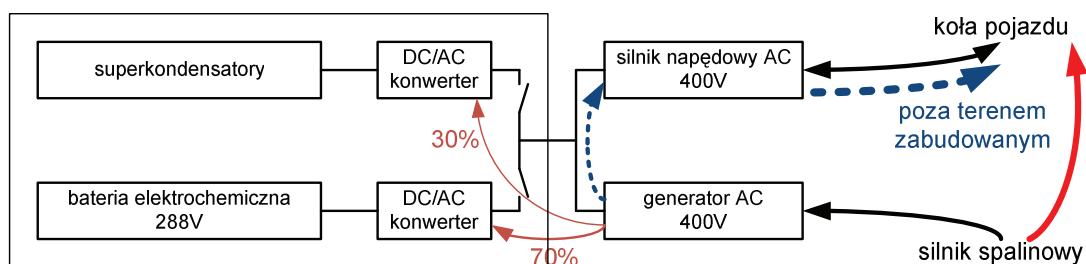
Konwencjonalny sposób zarządzania przepływem energii w podwójnym magazynie energii przedstawiono na rys. 2. Napięcie na zaciskach układu złożonego z superkondensatorów przekształcane jest na wartość napięcia równą napięciu baterii elektrochemicznej. Następnie to napięcie przekształcane jest w układzie DC/AC na napięcie przemienne wymagane do zasilania silnika trójfazowego. Niestety, układ taki ma pewne wady: praktycznie nie ma możliwości sterowania przesyłem prądu z silnika napędowego do konkretnego źródła w magazynie energii elektrycznej. Prąd wytworzony w generatorze lub prąd z odzysku energii dostarczany jest zarówno do superkondensatorów jak i baterii elektrochemicznej. Rozwiązaniem problemu jest sterowanie przepływem energii w którym wykorzystano dwa różne konwertery DC/AC. Przykład takiego rozwiązania zaprezentowano na rys. 3, gdzie przedstawiono przesył energii elektrycznej od źródła energii pierwotnej, poprzez generator do baterii elektrochemicznej, superkondensatorów oraz do napędu silnika elektrycznego [4,5].



Rys.2. Konwencjonalny sposób zarządzania podwójnym źródłem energii  
 Fig.2. The conventional way to manage a dual source of energy

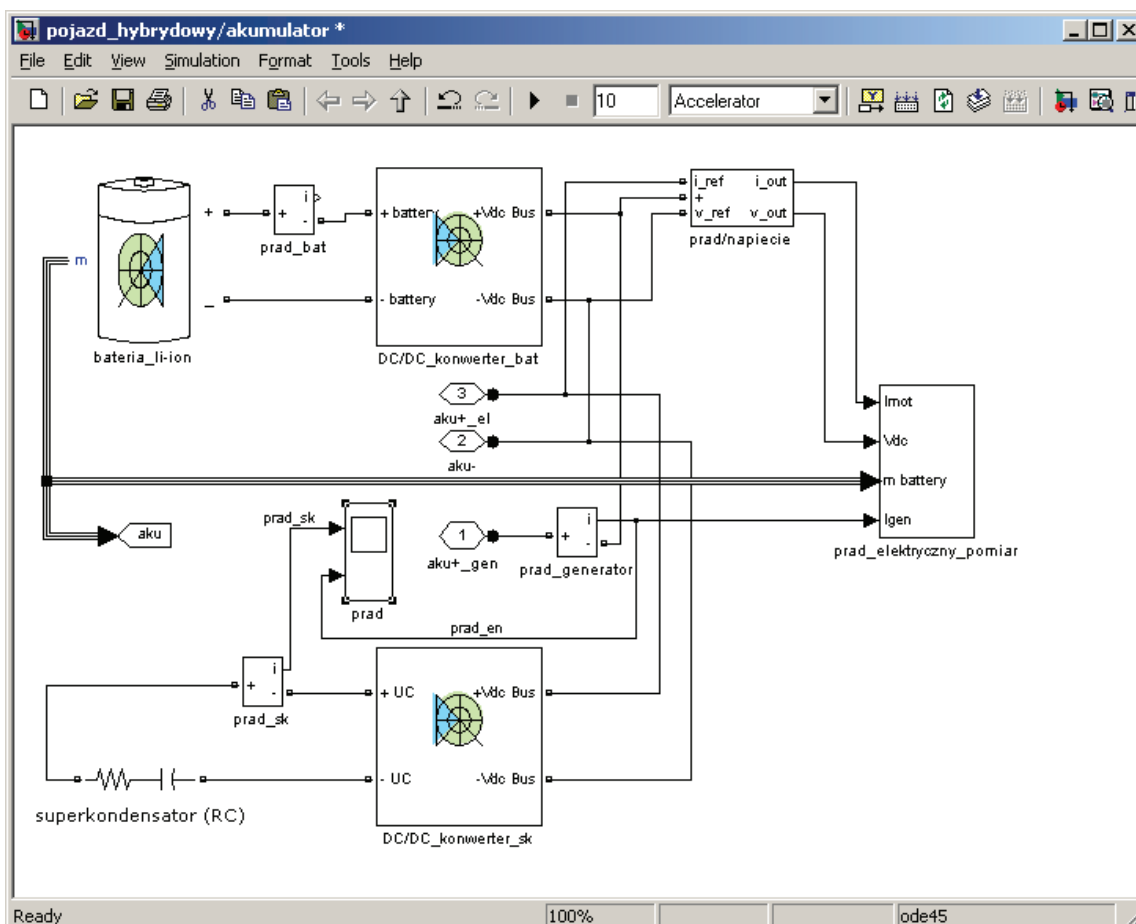
Schemat takiego rozwiązania (rys. 3) stosowany jest w warunkach, w których samochód porusza się poza terenem zabudowanym, w którym silnik spalinowy napędza pojazd kołowy. W takich warunkach silnik spalinowy, napędzając pojazd, może także służyć do napędu generatora, doładowując baterię elektrochemiczną oraz superkondensatory. Układ sterowania hybrydowym układem napędowym może rozdzielić ilość energii elektrycznej. W omawianym przykładzie 30% energii elektrycznej zostaje przesłana do superkondensatorów. W rzeczywistości wartość ta powinna być regulowana w zależności od stopnia rozładowania

akumulatorów elektrochemicznych oraz od stopnia poboru prądu przez silnik elektryczny (wspomaganie jednostki spalinowej silnikiem elektrycznym, przerywane linie).



Rys.3. Koncepcja zarządzania podwójnym źródłem energii – poza terenem zabudowanym  
Fig.3. The concept of managing dual power source – driving outside built-up areas

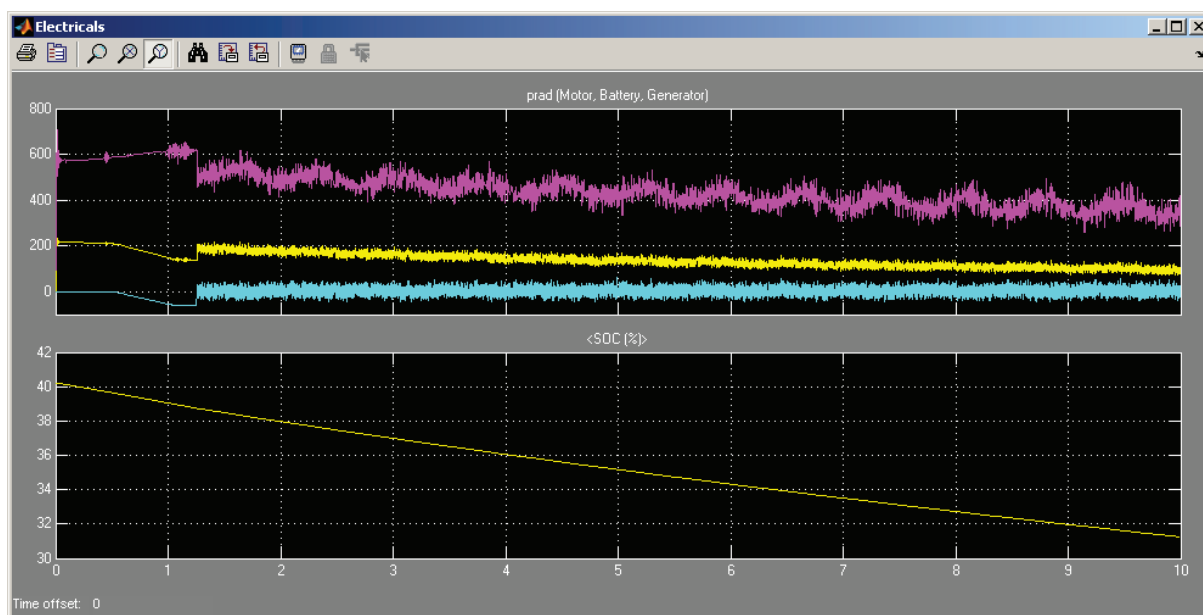
W środowisku MatLab/Simulink zbudowano model pojazdu kołowego wraz z podwójnym zasobnikiem energii elektrycznej (rys. 4), w skład którego wchodzi bateria Li-Ion i zestaw superkondensatorów.



Rys.4. Model podwójnego zasobnika energii dla pojazdu hybrydowego w oprogramowaniu  
MatLAB/Simulink

Fig.4. Model of dual-energy accumulator for a hybrid vehicle in the MatLAB/Simulink software

Na rys. 5 przedstawiono wyniki badań pojazdu kołowego podczas etapu ruszania pojazdu kołowego i jego przyspieszania – stan ustalony. Energia zasilająca silnik elektryczny dostarczana jest ze źródła akumulatorów elektrochemicznych jak również superkondensatorów. Zauważyć można dużą wartość rozładowywania baterii elektrochemicznej (SoC – State of Charge) w trakcie przyspieszania oraz dużą wartość prądów pobieranych ze źródła energii elektrycznej.



Rys.5. Wartości prądów oraz wielkość rozładowania baterii elektrochemicznej dla trybu przyspieszania

Fig.5. Currents and SoC of the electrochemical battery in acceleration mode

### 3. Podsumowanie

Zastosowanie w układzie podwójnego źródła energii pochodzącej zarówno od baterii elektrochemicznej jak i superkondensatorów pozwala na zwiększenie sprawności źródła energii poprzez wykorzystanie rekuperacji energii kinetycznej pojazdu. Stosowanie superkondensatorów uwarunkowane jest przyjmowaniem dużych wartości prądów, co do tej pory było rozwiązywane za pośrednictwem rezystorów hamujących i tym samym przyczyniało się do marnotrawienia energii w trakcie hamowania. Jazda w aglomeracjach miejskich przyczynia się do krótkiego czasu i stosunkowo dużej częstotliwości cykli „hamowanie-przyspieszanie”, co wymusza częste zmiany przepływu energii i wiąże się z częstymi „ładowaniami-rozładowaniami” źródeł energii. Stosowane obecnie akumulatory elektrochemiczne nie są w stanie przyjmować takich wartości prądów, a sam proces częstego ładowania i rozładowania niekorzystnie wpływa na ich trwałość, tak więc superkondensatory doskonale uzupełniają magazyn energii w pojazdach elektrycznych lub hybrydowych.

## Literatura

1. Jastrzębska G.: Odnawialne źródła energii i pojazdy proekologiczne. Warszawa: WNT, 2007.
2. Larminie J., Lowry J.: Electric vehicle technology explained. John Wiley & Sons, 2003.
3. Merkisz J., Pielecha I.: Alternatywne napędy pojazdów. Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2006.
4. Hadartz M., Julander M.: Battery-supercapacitor energy storage. Chalmers University of Technology, 2008.
5. Dixon J., Ortuzar M.: Supercapacitors + DC/DC converters in regenerative braking system. IEEE AESS Systems Magazine, 2002.

## **SUPER-CAPACITOR APPLICATION AS AN EXTRA ENERGY SOURCE FOR ELECTRIC MOTOR IN THE HYBRID POWERTRAIN SYSTEM**

**Summary:** The paper presents the control system of petroleum-electric vehicle with hybrid drivetrain. A model of hybrid vehicle made in the MATLAB/Simulink software, which uses dual power source for an electric motor. Application of electrochemical batteries and super-capacitors allows better flow of energy in hybrid power management system of a wheeled vehicle. The use of super-capacitors as an energy source supporting electrochemical batteries contributed to the increasing dynamics of the electric motor and to reducing weight of electrochemical batteries.