

doi:10.15199/48.2022.04.24

Dualny system zasobników energii w aucie hybrydowym: optymalizacja systemu zarządzania energią oraz analiza wpływu typu zasobnika na osiągi pojazdu

Streszczenie. W artykule przedstawiono badania dotyczące wpływu rodzaju zasobnika energii elektrycznej na osiągi oraz ekonomię pojazdu. Do tego celu opracowano autorski system zarządzania energią obsługujący dwa zasobniki w pojeździe z napędem hybrydowym. Analizie poddano trzy typy zasobników, akumulatory Ni-MH, akumulatory Li-Ion oraz baterię superkondensatorów. Otrzymane wyniki badań pozwalają stwierdzić, że odpowiedni dobór typów zasobników i prawidłowe zarządzanie energią w nich zmagazynowaną daje duże korzyści. Dzięki tym zabiegom udało się poprawić osiągi, obniżyć poziom zużycia paliwa, zmniejszyć emisję szkodliwych substancji oraz wydłużyć żywotność podstawowego zasobnika energii.

Abstract. This paper presents results of research on the impact of the type of energy storage on the performance and economy of a vehicle. For this purpose, a proprietary energy management system has been developed that uses two power sources in a hybrid vehicle. Three types of energy storages were analyzed: Ni-MH batteries, Li-Ion batteries and a supercapacitor battery. The results of the research show that the appropriate selection of these types of energy storages and the correct management of the energy stored in them bring great benefits. As a result, it was possible to improve performance, reduce level of fuel consumption, emission of harmful substances and extend the life of the primary energy storage. (*Dual system of energy storage in a hybrid vehicle: optimization of energy management system and analysis of the impact of the energy storage type on the vehicle performance*).

Słowa kluczowe: superkondensatory, li-ion, ni-mh, pojazdy hybrydowe, systemy zarządzania energią, zasobniki energii.

Keywords: supercapacitors, li-ion, ni-mh, hybrid vehicles, energy management systems, energy storage.

Wstęp

Pojazdy z napędem elektrycznym oraz hybrydowym z roku na rok stają się coraz bardziej popularne. Główną przyczyną są rosnące ceny paliwa oraz coraz trudniejsze do spełnienia wymogi dotyczące ochrony środowiska. Według oficjalnych statystyk w pierwszej połowie 2021 sprzedaż samochodów elektrycznych oraz hybrydowych przekroczyła 2,65 miliona egzemplarzy. W porównaniu do roku 2020 sprzedaż wzrosła o 68%, a łączna liczba zarejestrowanych na całym świecie tego typu pojazdów wyniosła ponad 16 milionów [1].

Aby nowo produkowane auta były dopuszczone do sprzedaży na terenie Unii Europejskiej muszą sprostać standardowi emisji spalin EURO. Obecnie obowiązująca norma dotycząca samochodów osobowych to EURO6d wprowadzona w roku 2018. Na horyzoncie widać już normę EURO7, która w drastyczny sposób zaostrzy wymogi dotyczące emisji szkodliwych substancji do tego stopnia, że spełnić będą ją w stanie wyłącznie pojazdy z napędem hybrydowym oraz w pełni elektryczne. Według informacji przedstawionych przez parlament europejski miałyby one wejść w życie w roku 2025 [2,3].

Rygorystyczne normy emisji spalin sprawiają, że producenci aut stosują silniki spalinowe o małej pojemności z doładowaniem za pomocą turbosprężarki lub kompresora mechanicznego. Dzięki takiemu rozwiązaniu moc silnika wzrasta, co przekłada się na lepsze osiągi pojazdu. Rozwiązanie tego typu ma niestety też wady. Jednostki napędowe pracują wówczas w warunkach dużego obciążenia przez co ulegają szybszemu zużyciu lub częstszym awariom. Auta z napędem hybrydowym (HEV) pozwalają wyeliminować ten problem. Silnik spalinowy jest wspomagany przez silnik elektryczny, który gwarantuje dużą moc oraz wysoki moment w całym zakresie pracy. Dzięki takiemu rozwiązaniu jednostka wolnossąca nie jest wysiłona, zużywa mniejsze ilości paliwa oraz pozwala uzyskać niską emisję szkodliwych substancji [4].

Napęd elektryczny stosowany w pojazdach EV oraz HEV wymaga zasilania energią elektryczną. Do magazynowania tej energii wykorzystuje się akumulatory.

Intensywne użytkowanie oraz upływ czasu sprawiają, że zasobniki te zmniejszają swoją pojemność. Wpływ na to ma wiele czynników. Głównie jest to duża liczba cykli ładowania/rozładowywania oraz zmiany temperatury pracy. Gwałtowne przyspieszenia pojazdu sprawiają, że wartości prądu rozładowania osiągają wysokie wartości. Podobna sytuacja występuje podczas gwałtownego hamowania rekuperacyjnego, prądy ładowania są na wysokim poziomie. Przepływ tak dużych ilości energii wiąże się z generowaniem proporcjonalnie dużych ilości ciepła, w wyniku czego wzrasta temperatura akumulatorów. Wszystkie te czynniki sprawiają, że wewnątrz akumulatora zachodzą nieodwracalne procesy chemiczne, w wyniku których następuje jego degradacja [5].

Zasobnikiem energii, częściowo pozbawionym wad wspomnianych wcześniej jest superkondensator. Niestety, nie może być stosowany jako główne źródło zasilania ponieważ w odróżnieniu do akumulatora ma małą gęstość energii. Ilość zmagazynowanej energii w superkondensatorze o zbliżonych gabarytach do akumulatora Li-Ion jest 20-krotnie mniejsza. Ponadto, podobnie jak w akumulatorach, występuje tu zjawisko samorozładowania, lecz prędkość utraty ładunku jest znacznie większa. Superkondensator może stracić nawet kilkanaście procent swojego ładunku w ciągu jednego dnia, dlatego nie nadaje się do długotrwałego magazynowania energii. W przeciwieństwie do akumulatorów superkondensatory posiadają znacznie większą gęstość mocy oraz możliwość ładowania/rozładowania w bardzo krótkim czasie. Dlatego doskonale spełniają swoją rolę w zastosowaniach, które wymagają dużej ilości cykli pracy oraz konieczności operowania dużymi wartościami prądów. Ponadto wysoka temperatura pracy nie wpływa negatywnie na ich żywotność.

W tabeli 1 przedstawiono porównanie parametrów typowego ogniwa superkondensatora oraz Li-Ion [6, 7, 8]. Fuzja tych dwóch typów zasobników sprawia, że niwelują nawzajem swoje słabe strony, a ich współpraca może dać wymierne korzyści. Podczas gwałtownych przyspieszeń lub hamowań superkondensatory będą w stanie operować

dużymi wartościami prądów, natomiast podczas spokojniej jazdy akumulatory dostarczają niezbędną energię. Dzięki takiemu układowi obydwie zasobniki będą pracowały w optymalnych warunkach co przełoży się pozytywnie na ich czas życia. Pomimo, iż idea wykorzystania dualnego systemu zasobników energii w postaci akumulatorów oraz superkondensatorów jest znana od dłuższego czasu to nadal jest to temat aktualny i obecny w światowej literaturze. Artykuł [9] przedstawia hybrydowy system zasobników zbudowany z akumulatora Li-Ion oraz superkondensatora. Uzyskane wyniki badań pokazują, że zamodelowany system sterowania tymi zasobnikami pozwolił obniżyć szczytowe zapotrzebowanie na moc oraz poprawić termiczne warunki pracy akumulatora. W pracy [10] przedstawiono metodologię optymalnego doboru hybrydowych zasobników energii w pojeździe miejskim. Zaproponowany system składał się z ognia paliwowego, akumulatorów oraz superkondensatora. W artykule [11] pojazd Toyota Prius został przystosowany do obsługi hybrydowego systemu zasobników co dało wymierne korzyści. Natomiast artykuł [12] podkreśla duże znaczenie systemów sterowania energią w pojazdach wyposażonych w napęd elektryczny. Autorzy dokonali przeglądu ponad 250 artykułów naukowych z ostatnich 25 lat i przedstawili obecne i przyszłe trendy w tym temacie. Jednym z głównych problemów poruszonych przez twórców tej pracy jest fakt, że większość badań jest skupiona wyłącznie na zmniejszeniu zużycia paliwa lub na minimalizacji emisji szkodliwych substancji. System zarządzania energią powinien również zapewnić zapotrzebowanie na moc pojazdu i kontrolować poziom naładowania akumulatora w dopuszczalnych granicach. Dzięki temu zachowamy komfort jazdy i minimalizujemy degradację zasobników energii. Ponadto strategia sterowania powinna być tak zaprojektowana, aby silnik spalinowy pracował prawie zawsze w jego optymalnym zakresie. Charakterystyka silnika spalinowego jest taka, że strefa pracy o maksymalnej wydajności zapewni oszczędność w zużyciu paliwa, lecz nie pozwoli osiągnąć minimalnej emisji zanieczyszczeń. W związku z tym układy sterowania w pojazdach hybrydowych są niezwykle istotne, a dobór odpowiednich zasobników energii do tych systemów ma ogromny wpływ na osiągi oraz ekonomię pojazdu.

Tabela 1. Parametry typowego ognia superkondensatora i Li-Ion

	Superkondensator	Li-Ion
Czas ładowania	1-10 sekund	10-60 minut
Cykle użytkowania	1000000	500
Napięcie ogniwa	2,3-2,75V	3,6-3,7V
Gęstość energii	5 Wh/kg	100-200 Wh/kg
Gęstość mocy	do 10000 W/kg	1000-3000 W/kg
Czas użytkowania	10-15 lat	5-10 lat
Temp. ładowania	-40-65°C	0-45°C
Temp. rozładowania	-40-65°C	-20-60°C

Symulator

Symulacje w pracy były przeprowadzone przy użyciu programu Matlab z nakładką ADVISOR [13]. Na rynku dostępnych jest wiele programów symulacyjnych, takich jak AMESim [14], AVL CRUISE [15], PSIM [16] i Autonomie [17], ale zakup licencji na nie wiąże się z wysokimi kosztami. Dlatego zdecydowano się na wykorzystanie oprogramowania typu open-source. Tego typu narzędzia są oferowane przez NREL (National Renewable Energy Laboratory). Do dyspozycji są dwa programy ADVISOR (Advanced Vehicle SimulatOR) oraz FASTsim (Future Automotive Systems Technology Simulator). FASTsim to nowszy program, ale w porównaniu do swojego poprzednika ADVISOR'a, został znacznie uproszczony. FASTsim zapewnia łatwy sposób porównywania układów napędowych pojazdów, w tym konwencjonalnych silników

spalinowych, aut hybrydowych, elektrycznych i pojazdów z ogniwami paliwowymi. Program ADVISOR jest znacznie bardziej zaawansowany, daje większe możliwości modyfikacji modeli i parametrów symulacji [18]. Chociaż ADVISOR jest starszy niż FASTsim, wyniki symulacji są prawie identyczne. Świadczą o tym badania przeprowadzone m.in. w artykule [19]. Opracowany kod open-source ADVISOR jest nadal popularny [18], ostatnie modyfikacje kodu i dokumentacji są z 2013 roku. Omawiany program daje możliwość oszacowania zużycia paliwa, emisji szkodliwych substancji dla różnych tras przejazdów jeszcze w fazie projektowania oraz obliczenie strat energii w układach napędowych w autach hybrydowych i pełni elektrycznych. Program ADVISOR jest wyposażony w przyjazny użytkownikowi interfejs graficzny co w znacznym stopniu ułatwia korzystanie z niego i przyspiesza proces symulacji. Dodatkową zaletą jest możliwość jego wykorzystania w trybie wsadowym, co m.in. wykorzystano w pracy w celu zautomatyzowania procesu optymalizacyjnego.

Zasobniki energii

W pracy badania przeprowadzono dla 3 typów zasobników energii elektrycznej.

Akumulatory Ni-MH (niklowo-metalowo-wodorkowe)

Są to akumulatory, w których katoda wykonana jest w postaci płytki niklowej, anodę tworzy porowaty stop metali, a elektrolit stanowi wodorotlenek potasu. Napięcie pojedynczego ogniwa ma wartość 1.2V. Konstrukcja akumulatorów Ni-MH nie różni się od konstrukcji wypartych przez nie akumulatorów Ni-Cd. Jedyną różnicą to konstrukcja anody, toksyczny kadm zastąpiono stopem metali (tj. tytan, wanad, nikiel, cyrkon, chrom, kobalt i żelazo). Dzięki temu pojemność akumulatorów Ni-MH jest 2-3 większa od akumulatorów Ni-Cd o tych samych wymiarach. W związku z tym znalazły szerokie zastosowanie w pojazdach elektrycznych oraz hybrydowych [20].

Akumulatory Li-Ion (litowo-jonowe)

W akumulatorach tego typu anoda przeważnie wykonana jest z grafitu, katodę tworzą tlenki metalu, zaś elektrolit to ciecz, w skład której wchodzi sole litowe. Napięcie znamionowe ogniwa tego typu wynosi 3.6-3.7 V. Akumulatory tego typu są w stanie zmagazynować dwa razy więcej energii w porównaniu do omawianych wcześniej zasobników Ni-MH o tych samych gabarytach. Akumulatory wykonane w tej technologii mogą mieć kształt prostopadłościenny co jest dużą zaletą, ponadto mogą być bardzo cienkie. Z tego właśnie powodu akumulatory te stosowane są we wszelkiego rodzaju urządzeniach elektronicznych. Ogniwa tego typu są niestety bardzo wrażliwe na zmiany temperatury oraz dopuszczalne wartości napięć. Bardzo ważne jest utrzymanie optymalnej temperatury pracy oraz właściwego napięcia ogniwa. Praca w nieodpowiednich warunkach może doprowadzić do uszkodzenia, a nawet pożaru. W ciągu ostatnich lat koszty produkcji tych akumulatorów obniżyły się przez co stosowane są coraz częściej również w pojazdach z napędem elektrycznym i zaczynają wypierać zasobniki Ni-MH [21].

Superkondensatory

Ostatni z zasobników, jak już wcześniej wspomniano, ma odmienny charakter. Służy jako dodatkowe źródło zasilania które ma za zadanie wspomagać główny zasobnik w postaci akumulatora. Gęstość energii, mierzona w Wh/kg, ma małe wartości, natomiast gęstość mocy (W/kg) duże. Superkondensatory nazywane mogą być również ultrakondensatorami. Ich konstrukcja jest zbliżona do kondensatorów elektrolitycznych lecz wartości pojemności

są kilka tysięcy razy większe. Technologia wykonania elektrod tego typu kondensatorów jest oparta na porowatych węglach aktywnych dzięki czemu możliwe jest uzyskanie okładzin o bardzo dużych powierzchniach właściwych co przekłada się tak duże pojemności. Napięcie znamionowe typowego superkondensatora wynosi 2.7 V [22], w najnowszych rozwiązaniach osiąga 3 V (przy pojemności do 3400 F). Zasobniki energii wykorzystane do badań w tej pracy, zostały zaimplementowane w programie ADVISOR.

Parametry modeli poszczególnych modułów przedstawiono w tabeli nr 2. W przypadku akumulatorów pojedyncze ogniwa łączone są w moduły. Moduł akumulatora Ni-MH zawiera 6 ogniw o napięciu 1.2 V połączonych szeregowo. Akumulator Li-Ion tworzą 3 ogniwa o napięciu 3.7 V również połączone szeregowo.

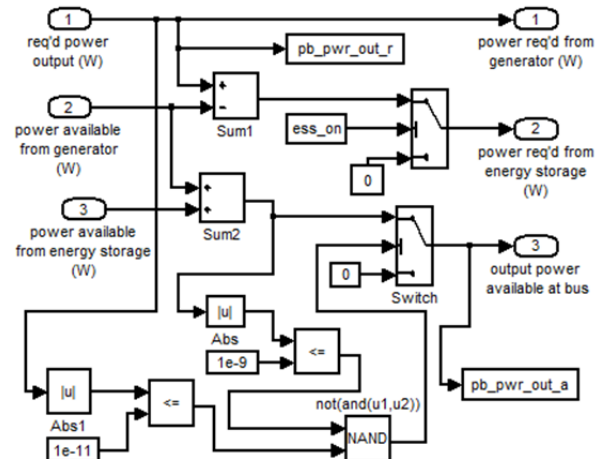
Tabela 2. Parametry zasobników

	Ni-MH	Li-Ion	UC
Napięcie	7.2 V	11.1 V	2.85 V
Pojemność	6 Ah	6 Ah	3400 F
Masa	1 kg	1.13 kg	0.52 kg

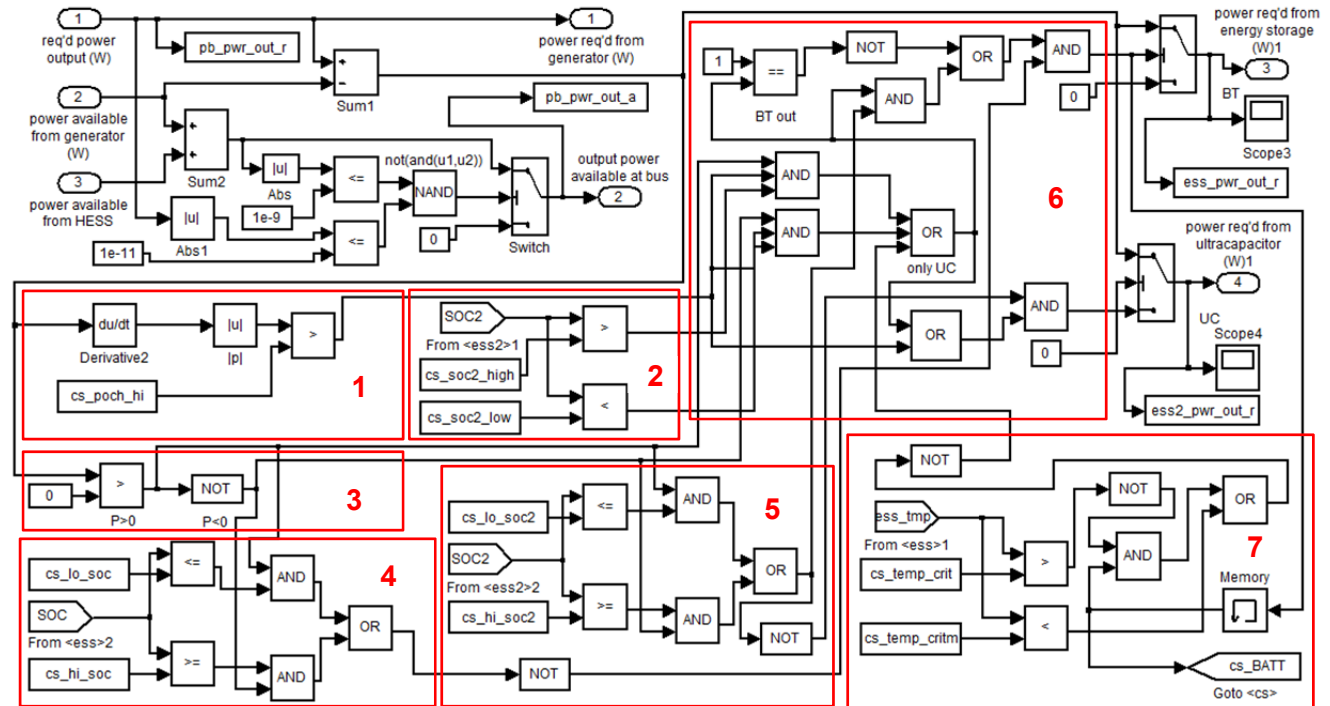
Opis testowanego pojazdu

Testowany pojazd hybrydowy to klasyczny model równoległy z jednym sprzęgłem wbudowany w program symulacyjny ADVISOR. Zaimplementowany model pojazdu jest wyposażony w silnik spalinowy o pojemności 1.0 l i mocy 41 kW oraz elektryczny o mocy 75 kW. Wbudowana w symulator magistrala zasilająca jest przystosowana do współpracy z jednym zasobnikiem energii i jest przedstawiona na rysunku nr 1. Na potrzeby badań magistrala zasilająca została zmodyfikowana

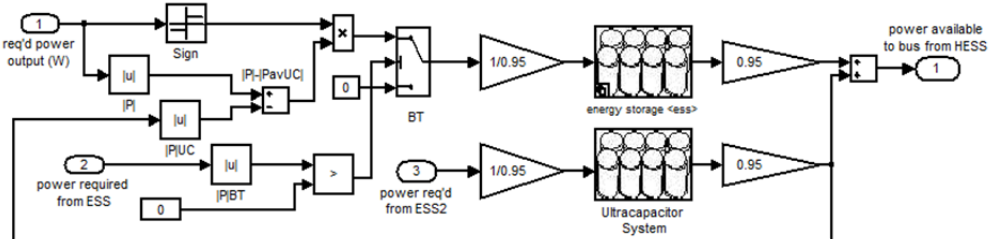
i przystosowana do współpracy z systemem złożonym z dwóch różnych zasobników. Dodatkowe źródło zasilania zwiększyło masę pojazdu co zostało to uwzględnione w zmodyfikowanym modelu. Dodatkowo zastosowano dwie przetwornice DC/DC, zakładając ich sprawność na poziomie 95% oraz masę (2x8 kg). Wartości tych parametrów uwzględniono w modelu. Na schematach oraz w opisie zasobnik w postaci akumulatora będzie oznaczany skrótowo jako BT, a superkondensator jako UC.



Rys. 1. Magistrala sterująca obsługująca jeden zasobnik energii



Rys. 2. Magistrala zasilająca obsługująca dwa zasobniki energii



Rys. 3. Hybrydowy system zasobników

Rysunek 2 przedstawia magistralę zasilającą w zmodyfikowanej wersji. Wejście nr 3 "power available from energy storage" zastąpiono wejściem "power available from HESS" (Hybrid Energy Storage System) oraz dodano wyjście nr 4 „power req'd from ultracapacitor”. Rysunek 3 przedstawia hybrydowy system zasobników wraz z układem kontroli mocy pobieranej/dostarczanej z/do zasobników aby jej wartość nie przekraczała wymaganego poziomu. Zmodyfikowana wersja systemu sterowania opisana w tym artykule opiera się na sterowaniu bazą reguł.

Możemy tutaj wyszczególnić kilka bloków. Blok nr. 1 oblicza wartości pochodnej mocy, jeżeli $\left| \frac{dP}{dt} \right|$ większe od zadanej wartości cs_poch_hi wówczas na wyjściu stan wysoki. Blok nr. 2 kontroluje wartość SOC2 (SOC dla ultrakondensatora), w przypadku gdy tylko bateria superkondensatorów jest użyta. Blok nr. 3 określa wartość bezwzględnej mocy, w sytuacji gdy $P > 0$ występuje zapotrzebowanie na moc (rozładowywanie zasobników) natomiast $P < 0$ występuje nadmiar mocy (ładowanie zasobników). Blok nr. 4 odpowiada za ograniczenie SOC podstawowego zasobnika, stan wysoki na wyjściu gdy $cs_lo_soc < SOC < cs_hi_soc$. Blok nr. 5 odpowiada za analogiczne ograniczenie SOC2 dodatkowego zasobnika, stan wysoki na wyjściu gdy $cs_lo_soc2 < SOC2 < cs_hi_soc2$.

Blok nr. 6 realizuje sterowanie ładowaniem i rozładowaniem zasobnika/ów według reguł (jeżeli $BT = 1$ wówczas wykorzystywany akumulator, jeżeli $UC = 1$ używany jest superkondensator). Wprowadzając oznaczenie w postaci dwóch zmiennych logicznych A oraz B określonych następująco:

$$A = \left[(P > 0) \wedge \left(\left| \frac{dP}{dt} \right| > cs_poch_hi \right) \wedge (SOC2 > cs_soc2_high) \right]$$

$$\vee \left[(P < 0) \wedge \left(\left| \frac{dP}{dt} \right| > cs_poch_hi \right) \wedge (SOC2 < cs_soc2_low) \right]$$

$$\vee \left[\begin{array}{l} (ess_tmp > cs_temp_critm) \\ (cs_temp_crit < ess_tmp < cs_temp_critm) \\ \wedge (BT_{memory} = 0) \end{array} \right]$$

$$B = \left(\left| \frac{dP}{dt} \right| > cs_poch_hi \right)$$

zaproponowano następujące reguły:

- reguła 1: jeżeli $A=1$ oraz stan logiczny 1 na wyjściu boku 6) $\Rightarrow UC=1, BT=0$
- reguła 2: jeżeli $(\bar{A}=1$ lub $(A=1$ oraz stan logiczny 0 na wyjściu boku 6)) oraz (stan logiczny 1 na wyjściu boku 5) $\Rightarrow UC=0, BT=1$
- reguła 3: jeżeli $B = 1 \Rightarrow UC=1, BT=0 / 1$ (zależnie od reguł 1 i 2)

Blok nr. 7 to pętla histerezy, której celem jest ograniczenie temperatury pracy akumulatora głównego.

Układ sterowania uwzględniała możliwość pracy każdego zasobnika energii osobno, a w sytuacji gdy występuje duże zapotrzebowanie na moc możliwa jest jednoczesna praca obu zasobników.

Symulacje

We wbudowanym modelu równoległym obsługującym jeden zasobnik przeprowadzono symulacje dla dwóch typów akumulatorów Ni-MH oraz Li-Ion. Przyjęto, że liczba modułów poszczególnych akumulatorów będzie zapewniać

napiecie znamionowe całej baterii, które ustalono na poziomie około 300V. W przypadku akumulatorów Ni-MH było to 40 modułów o całkowitej masie 40 kg, natomiast Li-Ion 29 modułów o masie 33 kg. Dla zmodyfikowanej wersji obsługującej dwa zasobniki przeprowadzono badania dla dwóch konfiguracji zasobników BT(Ni-MH)+UC oraz BT(Li-Ion)+UC. Ilość modułów obu zasobników oraz pozostałych parametrów systemu zarządzania została zoptymalizowana przy wykorzystaniu algorytmu DIRECT [23]. Ponadto część wyników zweryfikowano za pomocą metody NSGA-II, umożliwiającej przeprowadzenie procesu selekcji w kierunku jednolicie rozpiętego frontu Pareto-optymalnego, uzyskując podobne wyniki. Dodatkowo ten sam system po odpowiedniej optymalizacji zastosowano z powodzeniem w modelu pojazdu hybrydowego w konfiguracji mieszanej. Głównym założeniem podczas ustalania parametrów zmodyfikowanej wersji pojazdu było polepszenie osiągow dla tras miejskich. W związku z tym na potrzeby optymalizacji stworzono trasę zagregowaną o nazwie TRAFFIC która była kombinacją modeli dostępnych w programie ADVISOR oraz trasy Lodz2 (TRAFFIC = 3x(Lodz2) + INDIA_URBAN + 3x(Manhattan) + 5x(NYCC) + 2x(sc03) + UNIF01 + UDDS). Czas przejazdu trasy TRAFFIC wynosił 14846 s, całkowity dystans 76.46 km, prędkość średnia 18,54 km/h, liczba zatrzymań pojazdu 269. Funkcję celu wybrano jako funkcję ważoną zużycia paliwa, emisji wszystkich typów spalin zdolności pokonywania wzniesień oraz czasów przyspieszeń a następnie wartości te odniesiono do wyznaczonych wcześniej tych samych parametrów dla modelu wbudowanego. Optymalizowano pięć parametrów: N_{BT} – liczba modułów akumulatorów, N_{UC} – liczba superkondensatorów, P_F - wartość graniczna pochodnej mocy (cs_poch_hi) oraz wartości graniczne SOC2 dla bloku nr. 3 - S_L (cs_soc2_low) i S_H (cs_soc2_high). W celu przeprowadzenia optymalizacji algorytmem DIRECT stworzono wektor parametrów ($v = [N_{BT}, N_{UC}, P_F, S_L, S_H]^T$, T – oznacza transpozycję) oraz określono funkcję celu. Dolna granica wektora v_L oraz górna granica v_U dla wektora v przyjęto następująco: $v_L = [20 \ 15 \ 100 \ 0.05 \ 0.05]^T$, $v_U = [35 \ 80 \ 15000 \ 0.95 \ 0.95]^T$ w przypadku zasobnika HESS zawierającego akumulatory Ni-MH oraz $v_L = [15 \ 15 \ 100 \ 0.05 \ 0.05]^T$, $v_U = [25 \ 80 \ 15000 \ 0.95 \ 0.95]^T$ w przypadku zasobnika HESS zawierającego akumulatory Li-Ion. Funkcja celu miała następującą postać:

$$f = w_1 \frac{F_c}{F_{c1}} + w_2 \frac{E_{HC}}{E_{HC1}} + w_3 \frac{E_{CO}}{E_{CO1}} + w_4 \frac{E_{NOX}}{E_{NOX1}} + w_5 \frac{g_1}{g} + w_6 \frac{a_{c1}}{a_1} + w_7 \frac{a_{c2}}{a_2} + w_8 \frac{a_{c3}}{a_3}$$

gdzie: $w_i, i=1, \dots, 8$, oznaczają odpowiednie wagi, F_c - zużycie paliwa, F_{c1} - zużycie paliwa w modelu wbudowanym, E_y - emisja szkodliwych substancji ($y = HC, CO$ i NOx), E_{y1} - emisja szkodliwych substancji w modelu wbudowanym ($y_1 = HC, CO$ i NOx), g - zdolność pokonywania wzniesień, g_1 - zdolność pokonywania wzniesień w modelu wbudowanym, $a_{cx}, x=1, \dots, 3$, czasy przyspieszenia (0-40 km/h, 40-60 km/h, 0-60 km/h), a_x - czasy przyspieszenia dla w modelu wbudowanym.

Tabela 3. Parametry tras testowych

Trasa	Czas [s]	Dystans [km]	Prędkość śr. [km/h]	Prędkość maks. [km/h]	Liczba zatrzymań pojazdu
CYC_INDIA_URBAN	2689	17.49	23.41	62.56	52
CYC_MANHATTAN	1089	3.32	10.98	40.72	20
CYC_NYCC	598	1.9	11.41	44.58	18
CYC_WVUCITY	1408	5.32	13.59	57.65	14
CYC_NurembergR36	1084	4.32	14.33	53.7	24
CYC_LODZ	636	3.56	20.1	71.97	8
CYC_WLTC_CLASS_1	1022	8.07	28.41	64.26	6

Tabela 4. Wyniki symulacji – zużycie paliwa oraz emisja szkodliwych substancji

Trasa	Ni-MH				Li-Ion				Ni-MH+UC				Li-Ion+UC			
	Fc [l/km]	HC [g/km]	CO [g/km]	NOx [g/km]	Fc [l/km]	HC [g/km]	CO [g/km]	NOx [g/km]	Fc [l/km]	HC [g/km]	CO [g/km]	NOx [g/km]	Fc [l/km]	HC [g/km]	CO [g/km]	NOx [g/km]
CYC_INDIA_URBAN x 2	9.3	0.247	0.960	0.250	9.0	0.242	0.932	0.240	8.768	0.239	0.932	0.235	8.656	0.235	0.919	0.227
CYC_MANHATTAN x 8	14.0	0.360	1.463	0.351	13.8	0.355	1.411	0.341	13.22	0.346	1.497	0.319	13.02	0.342	1.420	0.313
CYC_NYCC x 15	15.3	0.380	2.088	0.374	14.9	0.373	1.987	0.364	13.78	0.352	1.899	0.337	13.58	0.348	1.814	0.331
CYC_WVUCITY x 5	11.9	0.311	1.314	0.295	11.6	0.308	1.278	0.285	10.97	0.297	1.225	0.261	10.83	0.294	1.203	0.255
CYC_NurembergR36 x 6	12.0	0.323	1.398	0.297	11.7	0.317	1.323	0.289	11.11	0.307	1.277	0.275	10.91	0.303	1.211	0.271
CYC_LODZ x 8	9.8	0.274	2.389	0.268	9.5	0.269	2.204	0.264	9.085	0.261	2.292	0.247	8.977	0.259	2.190	0.246
CYC_WLTC_CLASS_1 x 3	6.4	0.218	0.826	0.167	6.3	0.215	0.821	0.162	6.271	0.217	0.820	0.163	6.205	0.215	0.816	0.159

Zmiana wag pozwala zwiększyć znaczenie odpowiedniej wielkości w funkcji celu. Przyjęto następujące wagi dla obydwu zestawów Ni-MH+UC oraz Li-Ion+UC: 0.75, 0.03, 0.03, 0.03, 0.04, 0.04, 0.04, 0.04. Parametry pojazdu uzyskane wyniku przeprowadzonych optymalizacji dla zestawu zasobników Ni-MH+UC: $N_{BT} = 35$, $N_{UC} = 72$, $P_F = 2665$, $S_L = 0.2852$, $S_H = 0.4$ (masa całkowita obydwu zasobników 72 kg), natomiast dla Li-Ion+UC: $N_{BT} = 24$, $N_{UC} = 25$, $P_F = 2583$, $S_L = 0.5$, $S_H = 0.5$ (masa całkowita obydwu zasobników 40 kg). Pojazd z magistralą przystosowaną do obsługi jednego oraz dwóch zasobników opisywany w tym artykule został przetestowany na 7 trasach.

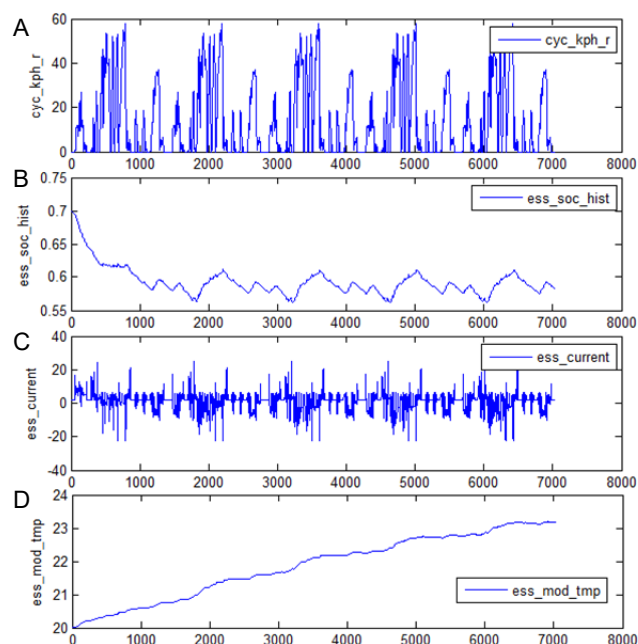
Tabela 5. Wyniki symulacji – zdolność pokonywania wzniesień oraz czasy przyspieszeń

Typ zasobnika	Zdolność pokonywania wzniesień [%]	Przyspieszenie 0-40km/h [s]	Przyspieszenie 40-60km/h [s]	Przyspieszenie 0-60km/h [s]
Ni-MH	23.4	2.7	2.7	5.4
Li-Ion	46.4	2.3	1.8	4.0
Ni-MH+UC	20.7	2.25	1.44	3.69
Li-Ion+UC	41.1	2.25	1.64	3.89

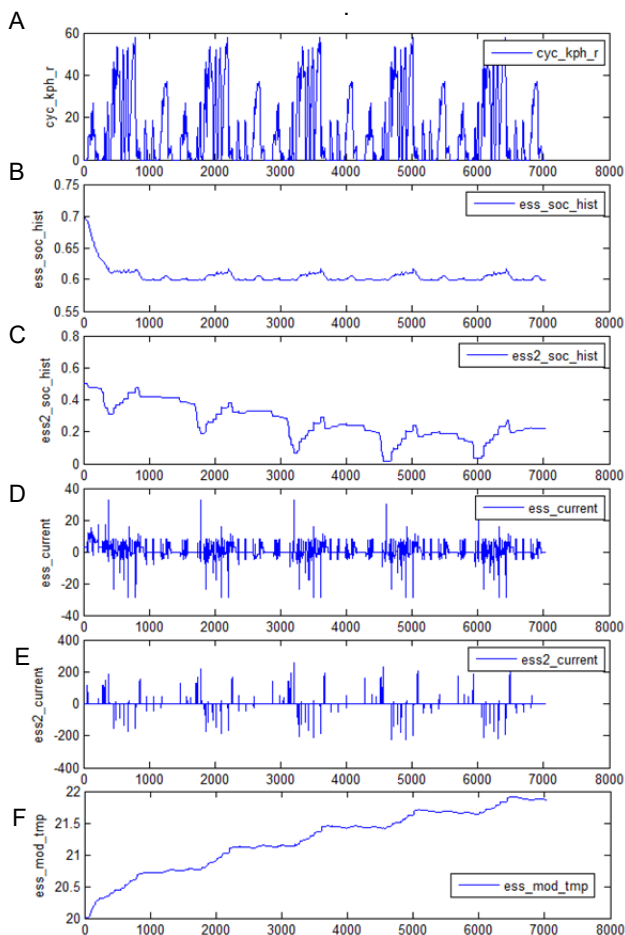
Tabela 3 zawiera parametry wszystkich przejazdów. Pięć z nich to standardowe modele dostępne w symulatorze ADVISOR. Trasa CYC_LODZ została opracowana przez autora dla aglomeracji miasta Łodzi, akwizycję parametrów przejazdu dokonano przy wykorzystaniu danych odczytanych z interfejsu OBD pojazdu, a sam przejazd zrealizowano w godzinach szczytu. Ostatnia trasa o oznaczeniu CYC_WLTC_CLASS_1 została zaimplementowana na podstawie danych globalnego zharmonizowanego standardu określania poziomów zanieczyszczeń, emisji CO₂ i zużycia paliwa samochodów tradycyjnych i hybrydowych, a także zasięgu pojazdów w pełni elektrycznych (WLTC – Worldwide harmonized Light-duty vehicles Test Cycles). A by dokładnie zaobserwować wszystkie procesy rozładowywania/ładowania zasobników oraz ich parametry, trasa musi być odpowiednio długa. Dlatego w celu wydłużenia czasu przejazdu, cykle powtarzano kilkakrotnie. We wszystkich symulacjach występowały te same warunki początkowe: temp=20°C; SOC=0.7; SOC2=0.5. Wyniki przeprowadzonych obliczeń zestawiano w tabeli 4 oraz 5. Jak widać dla pojazdu obsługującego pojedynczy zasobnik, zmiana akumulatora Ni-MH na Li-Ion daje pozytywne wyniki. Zużycie paliwa oraz emisja szkodliwych substancji zostało obniżone. Wymagana ilość modułów w akumulatorze Li-Ion jest mniejsza przez co masa oraz gabaryty całego pakietu ulegają redukcji.

Ponadto pojazd z zasobnikiem typu Li-Ion ma lepsze osiągi. Czasy przyspieszeń uległy skróceniu, a ką

nachylenia wzniesienia, które pojazd jest w stanie pokonać przy prędkości 50 km/h wzrósł dwukrotnie. W przypadku zmodyfikowanej wersji pojazdu przystosowanej do współpracy z dwoma zasobnikami energii zaobserwować można też inne korzyści. Zużycie paliwa oraz emisja szkodliwych substancji została obniżona bardziej. Różnice między konfiguracjami Ni-MH+UC oraz Li-Ion+UC są nieznaczące. Zestaw Li-Ion+UC ma jednak przewagę nad Ni-MH+UC ponieważ pozwala osiągnąć podobne wyniki przy o połowę mniejszej liczbie baterii superkondensatorów. Dodatkowy zasobnik w postaci superkondensatora zwiększa masę całego pojazdu ale równocześnie jest możliwa redukcja liczby modułów akumulatora. Rys. 4 oraz 5 przedstawia przykładowe przebiegi poziomu naładowania zasobników, wartości prądów oraz temperatury BT. Analizując charakterystyki z rys. 4 oraz 5 widać że zastosowanie dualnego systemu zasobników pozwoliło odciążać akumulator. Porównując przebiegi prądów BT widzimy znaczną redukcję w przypadku zmodyfikowanej wersji. Również poziom zmian naładowania akumulatora uległ zmniejszeniu. W przypadku dużych przyspieszeń oraz hamowań superkondensator wspomaga podstawowe źródło zasilania. Mniejsze obciążenie akumulatora spowodowało również nieznaczące, w przypadku tej trasy, obniżenie jego temperatury.



Rys. 4. Wyniki symulacji dla trasy CYC_WVUCITYx5 (pojedynczy zasobnik Li-Ion); A – prędkość pojazdu, B – SOC BT, C – wartości prądów BT, D – temperatura BT



Rys. 5. Wyniki symulacji dla trasy CYC_WVUCITYx5 (podwójny zasobnik Li-Ion+UC); A – prędkość pojazdu, B – SOC BT, C – SOC UC, D - wartości prądów BT, E - wartości prądów UC, F – temperatura BT

Wnioski

Uzyskane na drodze symulacji wyniki pokazują, że typ zasobnika ma duży wpływ na osiągi pojazd, zużycie paliwa oraz emisję szkodliwych substancji układu wydechowego. Znacząca poprawa jest widoczna zarówno dla modelu pojazdu wbudowanego, przystosowanego do obsługi jednego zasobnika, jak również w zmodyfikowanej wersji obsługującej dualny system zasobników. Najlepsze efekty uzyskano dla konfiguracji zawierającej pakiet akumulatorów Li-Ion współpracujący z zestawem superkondensatorów. Kooperacja tych dwóch typów zasobników pozwoliła w niektórych przypadkach obniżyć zużycie paliwa o ponad 11%. Ogniwa typu Li-Ion osiągają mniejsze temperatury podczas pracy, a ponadto zaproponowana strategia zarządzania energią na bieżąco kontroluje temperaturę pakietu akumulatorów i odpowiednio nimi zarządza tak, aby nie przekroczyć założonych wartości granicznych. Dzięki temu temperatura utrzymywana jest na zadanym poziomie co na pewno wydłuża czas życia ogniw akumulatorów. Dodatkowy zasobnik w postaci baterii superkondensatorów w dużym stopniu odciąża standardowe akumulatory i obniżył wartości prądu pobieranego z tego zasobnika. Zmniejszyła się również ilość cykli ładowania i rozładowania, co również wpływa korzystnie na cykl życia zasobnika akumulatorowego. Superkondensatory mają znacznie dłuższy czas życia w porównaniu do akumulatorów. Ilość cykli ładowania i rozładowania deklarowana przez producentów osiąga wartości na poziomie miliona. Otrzymane wyniki badań świadczą, że odpowiedni dobór tych dwóch typów zasobników i

prawkidłowe zarządzanie energią w nich zmagazynowaną daje duże korzyści. Dzięki rozwojowi technologii materiałów w niedalekiej przyszłości możemy spodziewać się rewolucji w dziedzinie magazynowania energii. Naukowcy z Toyota Research Institute of North America oraz University of Houston pracują nad rozwojem technologii baterii magnezowych. Gęstość energii tych zasobników ma być dwa razy większa w porównaniu do baterii Li-Ion. Akumulatory magnezowe mają potencjał aplikacji w przemyśle samochodowym jako bezpieczniejsza i tańsza alternatywa dla technologii litowo-jonowej.

Autorzy: mgr inż. Piotr A. Woźniak, Politechnika Łódzka, Instytut Systemów Inżynierii Elektrycznej, ul. Stefanowskiego 18, 90-537 Łódź, E-mail: piotr.wozniak.1@p.lodz.pl.

LITERATURA

- [1] Irle R., Global EV Sales for 2021 H1, <https://www.ev-volumes.com/>
- [2] Pielecha J., Skobiej K., Kurtyka K., Exhaust Emissions and Energy Consumption Analysis of Conventional, Hybrid, and Electric Vehicles in Real Driving Cycles, *Energies* 2020, 13(23), 6423
- [3] Upcoming Euro 7 Emission Regulations to Drive Europe's Zero-Emission Mobility Goal, <https://dieselinformation.aecc.eu/upcoming-euro-7-emission-regulations-to-drive-europes-zero-emission-mobility-goal/>
- [4] Bosch R., Napędy hybrydowe, ogniwa paliwowe i paliwa alternatywne, WKŁ, 2010
- [5] Zhao C., Zhang B., Zheng Y., Huang S., Yan T., Liu X., Hybrid Battery Thermal Management System in Electrical Vehicles: A Review, *Energies* 2020, 13(23), 6257
- [6] Kowal J., Avaroglu E., Chamekh F., Šenfelds A., Thien T., Wijaya D., Uwe Sauer D., Detailed analysis of the self-discharge of supercapacitors, *Journal of Power Sources*, 196 (2011), 573-579
- [7] Kouchachvili L., Yaici W., Entchev E., Hybrid battery/supercapacitor energy storage system for the electric vehicles, *Journal of Power Sources*, 374 (2018), 237-248
- [8] King A., Power-hungry Tesla picks up supercapacitor maker, *ChemistryWorld*, 2019, <https://www.chemistryworld.com/news/power-hungry-tesla-picks-up-supercapacitor-maker-/3010215.article>
- [9] L. H. Saw, H. M. Poon, W. T. Chong, C.-T. Wang, M. C. Yew, M. K. Yew, T. C. Ng, "Numerical modeling of hybrid supercapacitor battery energy storage system for electric vehicles", *Energy Procedia* 2019 (158), The 10th International Conference on Applied Energy (ICAE2018), Hong Kong, Chiny, 22-25 Sierpień 2018, 2750-2755.
- [10] J. L. Sampietro, V. Puig, R. Costa-Castelló, "Optimal Sizing of Storage Elements for a Vehicle Based on Fuel Cells, Supercapacitors, and Batteries", *Energies* 2019, 12, 925.
- [11] P. Woźniak, "Hybrid energy storage system in hybrid vehicles: design of energy management strategy and comparative analysis", *Przegląd Elektrotechniczny* 2020 , 96, 55-59.
- [12] A. Biswas, A. Emadi, "Energy Management Systems for Electrified Powertrains: State-of-the-Art Review and Future Trends", *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 2019, 68(7), 6453-6467.
- [13] ADVISOR, <http://adv-vehicle-sim.sourceforge.net/>
- [14] AMESim, <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/products/simcenter/simcenter-amesim.html>
- [15] AVL CRUISE, <https://www.avl.com/cruise>
- [16] PSIM, <https://powersimtech.com/products/psim/psim-modules/hev-design-suite/>
- [17] Autonomie, <https://www.anl.gov/es/autonomie-vehicle-system-simulation-tool>
- [18] New and Improved NREL Automotive Simulator Predicts Drivetrain Efficiency, *DesignNews*, <https://www.designnews.com/new-and-improved-nrel-automotive-simulator-predicts-drivetrain-efficiency>
- [19] C. W. Ng, L. Yossapong, "Comparison of Electric Bus Power Consumption Modelling and Simulation Using Basic Power Model, ADVISOR and FASTSim", 2020 2nd International Conference on Smart Power & Internet Energy Systems (SPIES), Bangkok, Tajlandia, 15-18 Wrzesień 2020, pp. 414-419
- [20] Noga M., Juda Z., The application of NiMH batteries in a light-duty electric vehicle, *Technical Transactions*, 1 (2019), 197-221
- [21] He S., Wang S., Chen, H., Hou X., Shao Z., A new dual-ion hybrid energy storage system with energy density comparable to that of ternary lithium ion batteries, *J. of Materials Chemistry A*, 5 (2020)
- [22] Review of supercapacitors: Materials and devices, *Journal of Energy Storage*, 21 (2019), 801-825
- [23] L. Chiter, "DIRECT algorithm : A new definition of potentially optimal hyperrectangles", *Applied Mathematics and Computation* 2006, 179(2), 742-749.