

Marcin Fice, Rafał Setlak
Politechnika Śląska, Gliwice

NAPĘD HYBRYDOWY POJAZDÓW MIEJSKICH Z PODWÓJNYM ZASOBNIKIEM ENERGII ELEKTRYCZNEJ

HYBRID DRIVE FOR CITY VEHICLES WITH DUAL ELECTRIC ENERGY STORAGE

Abstract: This paper presents an alternative solution of the electric hybrid drives for a city bus. The drive include an internal combustion engine and an electric machine with permanent magnets which works as motor or generator, in dependence on demands. Use of a dual energy storage including batteries and supercapacitors is the innovative approach to the problem. A reversible dc-dc power electronic converter transfer the energy from energy storage to electric machine during the vehicle starts and accelerate, and transfer the energy from electric machine to energy storage when the vehicle slow-down. The power transmission system is control by the microprocessor unit system.

1. Wstęp

Początki motoryzacji to pojazdy z napędem elektrycznym i hybrydowym, historia napędu elektrycznego ma już ponad 100 lat. W początkowych latach XX wieku pojazdy z napędem elektrycznym były chętniej kupowane niż z silnikiem spalinowym. W roku 1903 w USA na każdy jeden automobil parowy przypadało 0,93 elektrycznego i 0,55 spalinowego [1]. Popularność swą pojazdy elektryczne i parowe zawdzięczały swojej prostocie, niezawodnemu działaniu i łatwej eksploatacji. Uruchomienie silnika spalinowego korbą wymagało nie lada wysiłku. Silnik spalinowy na swój tryumf doznał się w roku, 1912 kiedy to Charles Franklin Kettering opracował niezawodny układ rozruchu silnika spalinowego - rozrusznik elektryczny i wyeliminował główną niewygodę silników spalinowych.

W latach 60'tych XX wieku na świecie zaczęto zwracać uwagę na problem zanieczyszczenia powietrza spowodowany przez ogromny rozwój motoryzacji. Znamienne dla tamtego okresu jest stwierdzenie, iż oto kończy się harmonijne współdziałanie człowieka i środowiska. Później miałyby już być tylko gorzej [2]. Już przed trzydziestu laty zasygnalizowano, że zasoby ropy naftowej maleją w zastraszającym tempie i wystarczą najwyżej na 40 – 50 lat [3]. Perspektywa wyczerpujących się złóż (kolejne lata przyniosły wydłużenie okresu „ery naftowej”) była impulsem do poszukiwań alternatywnych źródeł energii- tzw. alternatywnych źródeł odnawialnych.

2. Ekologiczne paliwa alternatywne

Wizja kończących się złóż ropy naftowej wymusiła poszukiwania innych paliw będących alternatywą dla oleju napędowego czy benzyny. Obecnie na świecie stosuje się paliwa alternatywne takie jak: gaz ziemny, gaz LPG, alkohole, etery, paliwa syntetyczne, wodór, oleje roślinne. Temat paliw ekologicznych jest bardzo złożonym w analizie i nie pomaga w tym fakt, że jest dobrą pożywką dla biznesu i polityki. Trudno prognozować rozwój rynku ekopaliw gdyż wydaje się, że aspekty techniczne, ekonomiczne i ekologiczne poddają się pod ogromnym naciskiem niejednoznacznego i ciągle zmiennego ustawodawstwa, populizmu i biznesu. Na drodze do stosowania paliw alternatywnych stoją (oprócz oczywiście politycznych i finansowych) problemy natury technicznej. Wadami eterów i alkoholi jest zwiększona emisja tlenków azotu oraz aldehydów. Obserwuje się także niekorzystny wpływ na elementy instalacji zasilającej w palio jak i sam silnik, paliwa te powodują korozję. Samochody zasilane związkami tlenowymi powinny być przystosowane do tego już w fazie projektowej. Niekorzystne oddziaływanie związków tlenowych na silniki spalinowe powoduje, że ustawowo ogranicza się ich maksymalne stężenie w paliwie (Światowa Karta Paliw, Norma PN-EN 228). Paliwa gazowe znane tak długo jak istnieje silnik spalinowy, obecnie najpopularniejsze to CNG (Compressed Natural Gas) i LPG (Liquid Petrol Gas). Paliwa gazowe w stosunku do benzyny wykazują lepsze własności przeciwstykowe, tworzą jednorodną mieszkanki

i wykazują szersze granice palności lecz mają nieco mniejszą wartość opałową i zdecydowanie mniejszą gęstość energii (skraplanie LPG przy ciśnieniu 10-15 bar, sprężanie CNG przy ciśnieniu 200 bar). Celem wykorzystania właściwości paliw gazowych należy to uwzględnić podczas projektowania układu napędowego samochodu. Często podkreślanymi zaletami gazu jest niska emisyjność spalin. Przeprowadzone przez ITS analizy wykazują, że LPG ma pewne właściwości korzystnie wpływające na emisję spalin [4]. Właściwości gazu nie można jednak oceniać w oderwaniu go od sposobu jego spalania. Niska jakość stosowanych systemów zasilania gazowego powoduje niewykorzystanie korzystnych właściwości gazu. Wskaźnik emisji zanieczyszczeń (masa zanieczyszczeń wydanych na jednostkę przebiegu) przez samochody niskoemisyjne (euro3, euro4) zależy od zaawansowania układu zasilania gazem. Zastosowanie w tych pojazdach instalacji I generacji spowoduje wzrost współczynnika emisji spalin nawet 20 razy. Zastosowanie najnowocześniejszych systemów zasilania gazem (IV generacja – wtrysk sekwencyjny) zmniejszy różnicę współczynnika emisji spalin do poziomów porównywalnych. W naszym kraju w grupie samochodów niskoemisyjnych przeważają instalacje gazowe I i II generacji (ok. 70% samochodów niskoemisyjnych przystosowanych do zasilania gazem). Większy przebieg pojazdu oraz nieodpowiednie instalacje powodują, że średnia emisja roczna związków kontrolowanych jest o prawie 200 % większa niż przy zasilaniu benzyną. Wzrastający w Europie udział silników wysokoprężnych (w 2004 przekroczył 50%, w Polsce 36%) powoduje zainteresowanie produkcją ekologicznych zamienników i dodatków do tradycyjnego oleju napędowego. Zwiększenie popytu na olej napędowy spowodowało nadprodukcję benzyny. W Polsce ogromne nadzieje wiąże się z uprawą rzepaku. Produkcja biodiesla (estry metylowe kwasów tłuszczowych olejów roślinnych) na podstawie rzepaku miałyby wprowadzić korzyści ekonomiczne jak i ekologiczne. Atutem biodiesla jest to, że po zmieszaniu w proporcjach 5% z olejem napędowym nie jest szkodliwy dla silnika, ale powyżej tej proporcji ma negatywny wpływ na elementy z tworzyw sztucznych (korozja) oraz na katalizator. Pisząc o rzepaku należy wspomnieć, iż posiada on dość wysokie wymagania glebowe i nie da się wbrew powszechnej opinii obsadzić wszystkich nieużytków [5].

Niezbędnie często mówi się także o niekorzystnym wpływie na rynek spożywczy. Zwiększenie zapotrzebowania na olej roślinny zwiększy jego cenę na rynku spożywczym (przykładem takiej sytuacji jest Brazylia i USA). Problem rzepaku i innych roślin oleistych pojawia się nie na poziomie technologicznym, lecz politycznym i ekonomicznym.

3. Napęd elektryczny

Powrót do samochodów elektrycznych nastąpił w latach 70'tych XX wieku, kiedy to pojawiła się obawa przed gwałtownie kurczącymi się zasobami ropy naftowej. Stuletnia historia napędu elektrycznego i rozwój akumulatorów kwasowych nie ziścił założeń konstruktorów. Na przeszkodzie stał także ówczesny niski rozwój energoelektroniki. Do tej pory napęd elektryczny stanowi marginalną część transportu samochodowego (akumulatory nadal są ciężkie, a zasięg pojazdów stosunkowo mały), pozostał jedynie w wykorzystaniu małych wózków transportowych, transportu wewnętrznego, wojska i zabawek. Należy dodać, że dopóki energia wytwarzana przez energetykę zawodową ze spalania węgla, paliw ciekłych czy gazowych to sprawność przetwarzania energii w łańcuchu producent, przesył, dystrybucja, przetwarzanie, magazynowanie w akumulatorach, przemiana w energię mechaniczną będzie niższa niż tradycyjnego silnika spalinowego, dochodzi do tego wątpliwy korzystny wpływ na środowisko, spaliny nie będą emitowane przez samochody, lecz przez elektrownie.

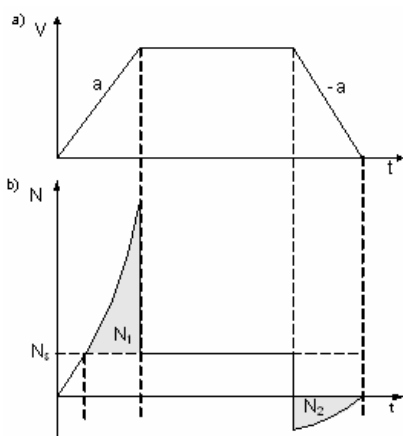
4. Napęd hybrydowy

Napęd hybrydowy, czyli połączenie napędu spalinowego i elektrycznego jest także napędem wykorzystującym źródło odnawialne – stosowany jest magazyn energii elektrycznej odzyskiwanej z energii kinetycznej pojazdu. Głównym celem stosowania napędu hybrydowego, czyli połączenia napędu spalinowego oraz elektrycznego, jest możliwość odzyskiwania energii hamowania i jej późniejsze wykorzystanie podczas ruszania i przyspieszania. Omawiany napęd hybrydowy pozwala na znaczne obniżenie zużycia paliwa oraz co się z tym wiąże także zanieczyszczenia spalinami. Poważnym problemem wprowadzenia napędu hybrydowego, spalinowo-elektrycznego, do produkcji masowej jest jego cena. Obserwując rynek motoryzacyjny można dojść do wniosku, iż niewielu producentów samochodów wpro-

wadza na rynek pojazdy wyposażone w tego typu napęd. Wiele projektów nie wyszło poza fazy testów. Faktem jest, że napęd taki sprawdza się jedynie w warunkach aglomeracji miejskiej, gdzie pojazd samochodowy wykonuje dużo manewrów przyspieszania i hamowania.

Typowym przykładem pojazdu pracującego w cyklu przyspieszanie – hamowanie jest autobus jeżdżący w miejskiej sieci komunikacyjnej. Ruch autobusu miejskiego można podzielić na kilka faz:

- ruszanie,
- przyspieszanie,
- jazda ze stałą prędkością,
- hamowanie.



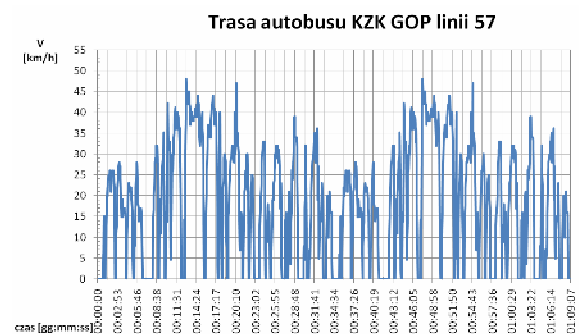
Rys. 1. Przykładowy cykl jazdy pojazdu: a) przebieg prędkości, b) zapotrzebowanie na moc. N_s – moc średnia potrzebna do utrzymania stałej prędkości, N_1 – moc potrzebna do przyspieszenia pojazdu do zadanej prędkości, N_2 – moc tracona w postaci ciepła podczas hamowania

Przykładowy cykl jazdy zawierający wyżej wymienione fazy został umieszczony na rys. 1. Poruszanie się autobusu w terenie miejskim wymusza częste hamowania, ruszania i przyspieszania. Warunki miejskie praktycznie nie dopuszczają do poruszania się pojazdem samochodowym ze stałą prędkością. Przy ruszaniu z miejsca i podczas przyspieszania zapotrzebowanie na moc silnika jest znacznie większe niż podczas jazdy ze stałą prędkością (rys. 1b). Moc ta potrzebna jest nie tylko na pokonanie oporów ruchu, ale także na zwiększenie energii kinetycznej pojazdu na płaskim odcinku drogi oraz energii potencjalnej podczas podjazdu pod górę. Natomiast podczas hamowania energia ta jest bezpowrotnie tracona w postaci ciepła wydzielanego w hamulcach ciernych pojazdu. Wykorzystanie hamowania odzyskowego w po-

staci magazynowania energii elektrycznej i późniejsze jej wykorzystanie do ruszania i przyspieszania jest ideą połączenia napędów spalinowego i elektrycznego.

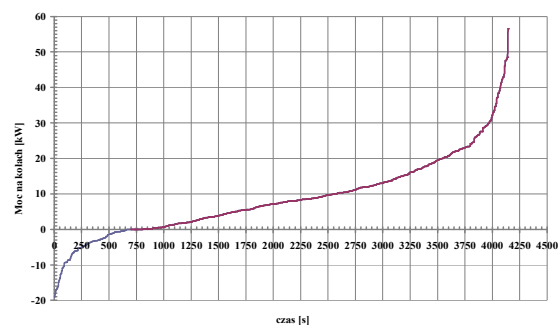
5. Badania eksploatacyjne

Wyznaczenie teoretyczne energii i mocy danego cyklu jezdnego rzeczywistego autobusu możliwe było po przeprowadzeniu pomiarów i rejestracji prędkości pojazdu na rzeczywistej trasie autobusu miejskiego. Do pomiarów wybrano autobus linii 57 poruszający się na trasie Gliwice – Brzezinka, Zabrze – os. Helenka. Długość trasy wynosi 30 km, a czas w jakim autobus pokonał trasę wynosi 70 min.

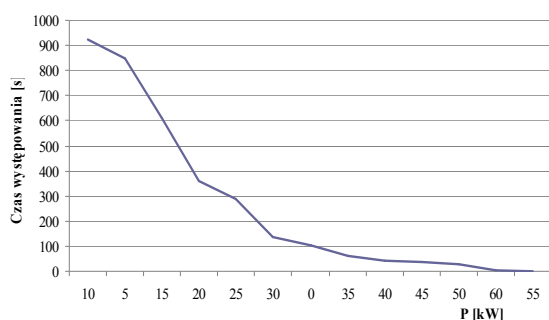


Rys. 2. przebieg prędkości w funkcji czasu przejazdu

Na podstawie danych prędkości zarejestrowanych podczas jazdy na trasie oraz wyznaczonych oporów ruchu autobusu można było oszacować teoretyczne zapotrzebowanie na moc oraz zużycie energii. Na rysunku 3 przedstawiono uporządkowany wykres mocy, a na rysunku 4 przedstawiono częstość występowania zadanych poziomów mocy. Średnie obliczone zapotrzebowanie na moc trasy autobus wynosi 21 kW, maksymalna obliczona moc trasy wynosi 60 kW, Zapotrzebowanie na moc maksymalną w czasie jazdy na trasie trwało ok. 6 sekund. Zużyta obliczona energia na trasie autobusu wynosi 24,5 kWh [6].

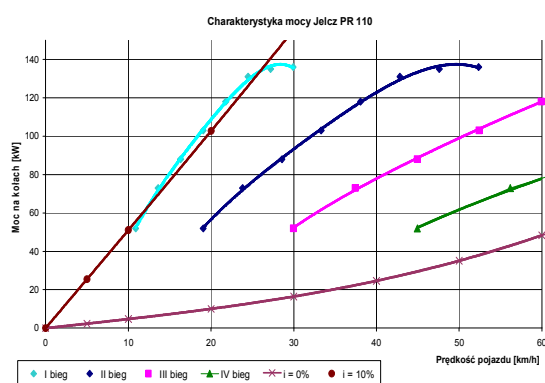


Rys. 3. Uporządkowany przebieg mocy przejazdu na trasie autobusu



Rys. 4. Częstość występowania danej wartości mocy na trasie przejazdu autobusu

Obliczenia całkowitych oporów ruchu, mocy całkowitych oporów ruchu oraz siły napędowej na kołach pozwoliły na wyznaczenie charakterystyk trakcyjnych autobusu (rys. 5)



Rys. 5. Wykres mocy oraz oporów ruchu dla różnego nachylenia wzniesień autobusu Jelcz PR110

6. Strategia zarządzania energią pojazdu hybrydowego.

Dla wykorzystania zalet każdego z silników napędowych pojazdu HEV, a co za tym idzie zwiększenia sprawności i zmniejszenia emisji spalin, niezbędne jest odpowiednie zarządzanie przepływem energii, która występuje podczas jazdy samochodu. Jest to proces ciągłej analizy wielu sygnałów i sterowania elementami wykonawczymi. Dzięki zoptymalizowanej strategii pod kątem oszczędności energii oraz trwałości osiąga się poprawę sprawności energetycznej, czystości spalin i żywotności zespołu napędowego. Silnik spalinowy pracując w pewnym obszarze obciążenia (stopnia zasilania) i prędkości obrotowej ma najwyższą sprawność, najmniejsze zużycie jednostkowe paliwa, najmniej zanieczyszcza środowisko i posiada najwyższą trwałość. Bateria akumulatorów jest bardzo wrażliwa na zbyt głębokie rozładowania (DOD – depth of discharge) i przeładowanie. Cena

baterii akumulatorów zawiera się w przedziale 50% do 70% wartości pojazdu samochodowego dlatego jest tak istotne zwiększenie trwałość ogniw elektrochemicznych, dlatego też strategia przepływu energii powinna uwzględniać chwilowy stopień naładowania baterii akumulatorów (SOC - State Of Charge) i nie dopuścić do rozładowania albo przeładowania ponad poziomy dopuszczalne.

Można wyróżnić kilka stanów pracy napędu hybrydowego:

- jazda z dużym obciążeniem (ruszanie, przyspieszanie, jazda pod górę): silnik spalinowy wspomagany jest przez silnik elektryczny tak aby silnik spalinowy mógł pracować w obszarze ekonomicznym, energia elektryczna pobierana jest z zasobnika,
- jazda ustalona z małym obciążeniem: zapotrzebowanie na moc jest mniejsze niż praca w obszarze ekonomicznym silnika spalinowego, silnik spalinowy napędza pojazd, a nadwyżka mocy, poprzez maszynę elektryczną, pobierana jest przez zasobnik energii elektrycznej,
- hamowanie rekuperacyjne pojazdu: energia kinetyczna pojazdu zamieniana jest na energię elektryczną w prądnicy i magazynowana w akumulatorze, moc hamowania przewyższa możliwości przesłania energii do akumulatora, hamowanie rekuperacyjne wspomagane jest przez hamulce mechaniczne,
- łagodne zwalnianie pojazdu: podczas jazdy np. ze wzniesienia energia pojazdu gromadzona jest w zasobniku podczas hamowania maszyną elektryczną,
- jazda z wybiegu, postój: silnik spalinowy napędzając prądnicę ładuje akumulator,
- manewry z małą prędkością: pojazd napędzany jest tylko maszyną elektryczną.

7. Akumulatory i superkondensatory

Podstawowymi wadami akumulatorów są: mała gęstość mocy (przepływ dużych wartości prądów przyspiesza utratę pojemności), duża masa (w przypadku autobusu znacznie zmniejsza ładowność), stosunkowo mała liczba cykli ładowanie-rozładowanie. Producenci pojazdów napędzanych hybrydowo stosują nowocześniejsze typy akumulatorów jakimi są akumulatory litowo-jonowe. Jednak akumulatory te posiadają o wiele niższy stosunek mocy do ceny. Nie rozwiązuje to także dużej masy akumulatorów oraz wrażliwości ogniw na pobór oraz oddawanie dużych wartości prądów. W Polsce dostępne są w sprzedaży trzy modele osobowych

pojazdów hybrydowych producentów Japońskich wykorzystujące akumulatory Litowo-Jonowe (Li-Ion).

Poprawę parametrów pojazdu o napędzie hybrydowym można uzyskać przez wprowadzenie efektywnych metod odzysku energii hamowania pojazdu oraz jednoczesne obniżenie masy zasobników energii. Można to uzyskać stosując podwójne źródło energii, czyli dwa współpracujące magazyny energii: baterię akumulatorów oraz wysoko zaawansowane technologicznie superkondensatory [7], [8]. W takim przypadku można zastąpić część ciężkich akumulatorów baterią superkondensatorów.

Przykładowa bateria superkondensatorów dostępna na rynku o pojemności 58F i napięciu 15 V posiada gęstość energii $q_{en} = 3,63 \text{ Wh/kg}$, a gęstość mocy $p_w = 3 \text{ kW/kg}$. Trwałość modułu wynosi 500 000 cykli, a masa 0,5 kg [9].

Tab.1.

Porównanie parametrów akumulatorów i superkondensatorów [14]

	Ołowiowy	Superkondensatory
Gęstość energii [Wh/kg]	32	0,6 - 4
Gęstość mocy [W/kg]	44	1000 - 3300
Napięcie ogniwa [V]	2	2,3 – 2,5
Trwałość [cykle]	do 1500	500 000

Zaletą superkondensatorów jest fakt, że są zdolne do przyjmowania i wydawania prądów o wartości do 800 A bez utraty trwałości. W tradycyjnych akumulatorach kwasowo-ołowiowych nie ma możliwości przyjmowania dużych mocy hamowania pojazdu bez znaczącego obniżenia żywotności.

Całkowite wyeliminowanie tradycyjnych akumulatorów z proponowanego napędu hybrydowego nie jest możliwe, jedynie sensowne jest zastosowanie obu zasobników energii. Superkondensatory mają zastosowanie tam gdzie potrzebny jest duży wydatek mocy w krótkim przedziale czasu oraz szybkie magazynowanie dużych ilości energii przy przepływie dużych wartości prądów. Akumulatory mają wówczas za zadanie jedynie dostarczanie energii elektrycznej podczas rozruchu silnika lub podczas manewrów z małymi prędkościami bez konieczności uruchamiania silnika spalinowego. Energia z akumulatorów pobierana jest także podczas wspomaganie silnika spalinowego

przez maszynę elektryczną podczas długotrwałego zapotrzebowania na zwiększoną moc silnika spalinowego oraz podczas doładowywania kondensatorów.

8. Dobór pojemności superkondensatorów do autobusu

W projekcie założono, że energia zgromadzona w kondensatorowym zasobniku energii elektrycznej powinna pozwolić na rozpędzenie autobusu do prędkości 40 km/h. Obliczeń dokonano dla autobusu Jelcz PR110, którego dopuszczalna masa całkowita wynosi 17 ton. Energia potrzebna na przyspieszenie autobusu do prędkości 40 km/h w czasie 9,5 s wynosi 1300 kJ co daje 0,361 kWh. Zakładając napięcie baterii kondensatorów 120 V pojemność takiej baterii wynosi 218 F. Masa baterii superkondensatorów o pojemności 218 F i napięciu 120 V złożona z ogniw 58F/15V wynosi 136 kg. Pojemność ta została wyznaczona z zależności:

$$E = \frac{C \cdot U^2}{2} \quad (1)$$

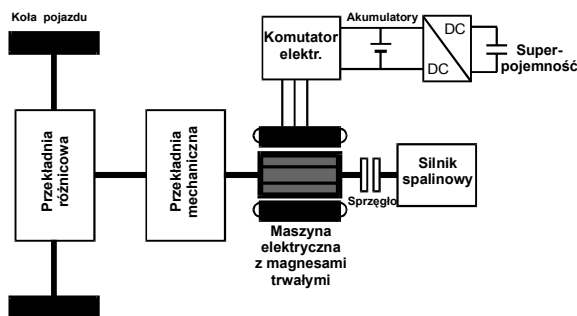
9. Napęd spalinowo-elektryczny w autobusie

Na rys. 6 przedstawiono schematycznie propozycję napędu hybrydowego autobusu miejskiego. Proponowany napęd hybrydowy, spalinowo-elektryczny, daje możliwości oszczędności paliwa oraz korzyści ekologiczne, a także zmniejszenie zużycia takich materiałów jak okładziny, bębny i tarcze hamulcowe. Zainstalowanie maszyny elektrycznej obok silnika spalinowego pozwoli na:

- odzyskiwanie energii hamowania podczas zwalniania i jazdy ze wzniesienia.,
- wspomaganie silnika spalinowego w nieekonomicznych zakresach pracy, czyli podczas dużych obciążeń,
- możliwość uruchamiania silnika spalinowego przez maszynę elektryczną (można zrezygnować z rozrusznika),
- zmniejszenie mocy silnika spalinowego o 40% względem istniejącego, ponieważ suma mocy silnika spalinowego i elektrycznego pozostanie taka sama.

Zastosowanie maszyny elektrycznej prądu stałego z magnesami trwałymi umożliwi wykorzystanie maszyny o mocy ok. 20% mocy silnika spalinowego, ponieważ maszyna elektryczna może być krótkotrwale przeciążana momentem

nawet trzykrotnie [10]. Ocenia się, że odzysk energii hamowania, oraz zmniejszenie wielkości silnika spalinowego pozwoli zmniejszyć zużycie paliwa o ok. 30% [11]. Maszyna elektryczna umożliwia pracę silnika w ekonomicznym zakresie pracy przy najmniejszym jednostkowym zużyciu paliwa. Jazda z mocą mniejszą niż moc zadanego cyklu, podczas jazdy ze wzniesienia lub praca silnika na biegu jałowym pozwoli na doładowywanie podczas jazdy akumulatorów i superkondensatorów.



Rys. 6. Napęd hybrydowy, spalinowo-elektryczny

10. Zakończenie

Zastosowanie w zasobniku energii elektrycznej akumulatorów i superkondensatorów pozwoli na zwiększenie sprawności wykorzystania energii hamowania, ponieważ superkondensatory pozwalają na pobieranie dużych wartości prądu w bardzo krótkim czasie. Krótki czas i stosunkowo duża częstotliwość cykli hamowanie-przyspieszanie wymusza częste zmiany przepływu energii elektrycznej i co się z tym wiąże częste cykle ładowania-rozładowania źródła energii. Akumulatory ołowiowe nie są w stanie przyjąć takich ilości energii w tak krótkim czasie bez znacznego obniżenia trwałości, tak więc superkondensatory doskonale uzupełniają się wraz z akumulatorami jako zasobnik energii elektrycznej. Zmagazynowana energia elektryczna jest następnie wykorzystywana podczas rozruchu i przyspieszania. W tej fazie jazdy maszyna elektryczna pobierając energię z zasobników wspomaga silnik spalinowy przez co nie musi on pracować w nieekonomicznym zakresie pracy i zużywa znacznie mniej paliwa oraz zmniejsza się emisja szkodliwych substancji do atmosfery.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2006-2009 jako projekt badawczy N510 054 31/3358 oraz projekt badawczy promotorski N501 0089 33

11. Literatura

[1]. W. Rychter: *Dzieje samochodu*, WKŁ 1987.

[2]. *Auto Technika Motoryzacyjna*, roczniki 2003-2007, Motor roczniki 1970-1980.

[3]. K. Baczewski, T. Kałdoński: *Paliwa do silników o zapłonie iskrowym*. WKŁ 2005.

[4]. Merkiś J., Radziński S.: *Analiza porównawcza emisji zanieczyszczeń z pojazdów samochodowych zasilanych benzyną i gazem płynnym propanbutan*. Transport Samochodowy 2-2006.

[5]. A. Gumieniuk: *Rośliny energetyczne uprawiane w Polsce*. Energetyka i Ekologia 2006.

[6]. J. Dygoń: „*Stanowisko laboratoryjne hybrydowego układu napędowego pojazdu samochodowego*” Praca Dyplomowa Magisterska, Gliwice 2007.

[7]. J. Dixon, M. Ortuzar: *Supercapacitors + DC-DC converters in regenerative braking system* IEEE AESS Systems Magazine, 2002.

[8]. M. Ortuzar, J. Dixon, J. Moreno: *Design, Construction and Performance of a Buck-Boost Converter for Supercapacitors – Based Auxiliary Energy System for Electric Vehicles* IEEE IEC, Virginia, USA, 2003.

[9]. Maxwell: *Dane katalogowe kondensatorów Maxwell Technologies BPAK0058-15V Ultracapacitors*, www.maxwell.com.

[10]. T. Glinka, A. Fręchowicz: *Brushless DC Motor Operating in Constant Power Range* ICEM 2002 15 th International Conference on Electrical Machines Brugge, Belgium, 2002.

[11]. R. Grzenik, E. Kałuża: *Możliwości wykorzystania hamowania rekuperacyjnego w celu zwiększenia efektywności użytkowania energii w infrastrukturze transportu miejskiego* Materiały Konferencyjne X Konferencji Naukowej Trakcji Elektrycznej SEMTRAK 2002, Zakopane, 2002.