

EFEKTYWNOŚĆ PRZEMIANY ENERGII W JEDNOSTKACH NAPĘDOWYCH POJAZDÓW HYBRYDOWYCH

dr inż. Zdzisław JUDA

Zakład Mechatroniki Samochodowej, Politechnika Krakowska

ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków

Tel.: 4812/636-79-79, e-mail: zjuda@usk.pk.edu.pl

Streszczenie. Systemy napędowe współczesnych pojazdów muszą być optymalizowane pod kątem maksymalnej wydajności przekształcania energii. Z tego punktu widzenia, hybrydowe jednostki napędowe wydają się być najbardziej wydajne. Pojazdy hybrydowe posiadają zabudowane co najmniej dwa źródła energii; w tym źródło wtórne, które będąc magazynem energii pozwala na obniżenie szczytowej mocy zapotrzebowanej ze strony pierwotnego źródła energii – najczęściej silnika spalinowego. Ponieważ w konfiguracji szeregowy pojazd hybrydowy silnik spalinowy może pracować w ograniczonym polu obciążeń i prędkości obrotowych – może być zatem łatwiej optymalizowany pod kątem efektywności zużycia paliwa i emisji toksycznych składników spalin. Silniki spalinowe ZI osiągają maksymalną sprawność do 30 % przy wysokich mocach (0,6-0,8 mocy maksymalnej). W przypadku zastosowania stosu ogniwi paliwowych PEM (z ang. Proton Exchange Membrane) na paliwo wodorowe, maksymalna sprawność przemiany energii sięga 70 % i jest osiągana przy niskich mocach (0,15-0,30 mocy maksymalnej). Ponadto reakcje chemiczne w ogniwach paliwowych prowadzą do bezpośredniego wytwarzania energii elektrycznej, przy braku szkodliwej emisji do atmosfery. W referacie przedstawiono symulacyjne porównanie efektywności przemiany energii w pojazdach hybrydowych z silnikiem spalinowym i stosem ogniwi paliwowych jako pierwotnym źródłem energii. Symulacje przeprowadzono w środowisku programowym MATLAB/SIMULINK w oparciu o program Advisor 3.0. Przedmiotem symulacji są trzy pojazdy skonfigurowane na bazie tego samego modelu małego samochodu – pojazd konwencjonalny z silnikiem spalinowym ZI, szeregowy pojazd hybrydowy z silnikiem spalinowym ZI oraz szeregowy pojazd hybrydowy ze stosem ogniwi paliwowych PEM. Wyniki symulacji wskazują na zalety ogniwi paliwowych jako przyszłościowych źródeł energii w pojazdach nie tylko hybrydowych.

1. Wprowadzenie

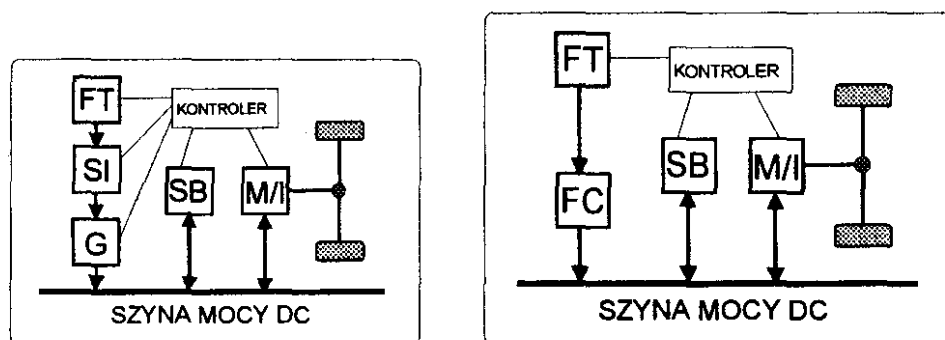
Kilka równocześnie występujących zjawisk legło u podstaw poszukiwań pojazdu, który zapewniłby komfort indywidualnego podróżowania na krótkie odległości, a szczególnie w ruchu miejskim. Po pierwsze wzrastająca ilość samochodów w obszarach wysoce zurbanizowanych prowadzi do katastrofy ekologicznej, wynikającej z nadmiernej emisji związków toksycznych (a środki transportu mają tutaj znaczenie dominujące) przy spadku efektywności tego rodzaju transportu. Zakorkowanie centrów miast ma w tym kontekście znaczenie decydujące. Taki charakter ruchu pojazdów powoduje częste zatrzymywanie się

i pracę silnika na biegu jałowym, co skutkuje zwiększoną emisją przy braku efektów transportowych, a straty energetyczne wynikające z biegu jałowego sięgają 11 %. Urbanizacja powoduje również skrócenie średnich odległości jakie pokonują samochody, szczególnie małe auta będące drugim lub trzecim pojazdem w gospodarstwie domowym. Nawet jeśli dotychczas nie sprawdziły się prognozy o rychłym wyczerpaniu światowych zasobów ropy naftowej, to monopolistyczne kartele paliwowe dyktują wysokie ceny paliw płynnych. Ponadto, normy dopuszczalnej emisji są ciągle zaostrzane, tak że konwencjonalne rozwiązania jednostek napędowych nie są w stanie dłużej spełnić ostrych wymagań.

W wysokorozwiniętych krajach formułowane są postulaty mające na celu podniesienie efektywności wykorzystania paliwa - 80 mpg jako cel Partnership for a New Generation of Vehicles (PNGV - konsorcjum powołane przez prezydenta Clintona w 1993 roku, w skład którego wchodzi „wielka trójka” producentów samochodów, a także około 350 mniejszych firm technicznych). Celem PNGV jest taki rozwój technologii, który umożliwi produkcję pojazdów pokonujących 34 km przy zużyciu 1 l benzyny z zachowaniem zadowalających osiągnięć i bez pogorszenia bezpieczeństwa oraz takich, których cena nie wzrośnie znacząco i które będą emitować nie więcej niż 1/8 dzisiejszych ilości toksycznych składników spalin. Wreszcie w wielu obszarach szczególnie chronionych (np. pewne rejony Kalifornii) wprowadzane są wymagania emisji zerowej, co wymusza poszukiwanie rozwiązań niekonwencjonalnych. Stały postęp w dziedzinie poszukiwań alternatywnych źródeł energii owocuje coraz bardziej dojrzałymi rozwiązaniami technicznymi, którym towarzyszy sukcesywny spadek kosztów takich zaawansowanych jednostek napędowych.

2. Przedmiot publikacji

Przedmiotem prowadzonych obliczeń symulacyjnych jest mały, miejski samochód, rozpatrywane rozwiązania zostały ograniczone do trzech konfiguracji, bazujących na wspólnej konstrukcji podwozia i nadwozia. Wybrano mały samochód Fiat Seicento. Rozważania obejmują pojazd hybrydowy w konfiguracji szeregowej (Series HEV) i pojazd ze stosem ogniwi paliwowych, także w konfiguracji hybrydowej z wykorzystaniem baterii NiMH jako wtórnym źródłem energii. Obydwie koncepcje zaawansowanego pojazdu miejskiego odniesiono do konwencjonalnego samochodu Fiat Seicento – rys 1.



Rys.1. Przepływy energii w rozpatrywanych konfiguracjach HEV

Oznaczenia:

FT - zbiornik paliwa
SI - silnik spalinowy SI
G - generator

SB - bateria akumulatorów
M/I - silnik elektryczny z inwerterem

Główne wytyczne strategii sterowania dla pojazdu zaawansowanego to:

- maksymalizacja ekonomii zużycia paliwa z wykorzystaniem hamowania odzyskowego,
- minimalizacja emisji toksycznych składników spalin (szeregowy HEV może okresowo pracować jako pojazd o emisji zerowej),
- utrzymanie kosztów zaawansowanych jednostek napędowych na poziomie akceptowalnym przez konsumentów,
- utrzymanie poprawnych parametrów technicznych pojazdu, szczególnie zasięgu.

3. Źródła energii

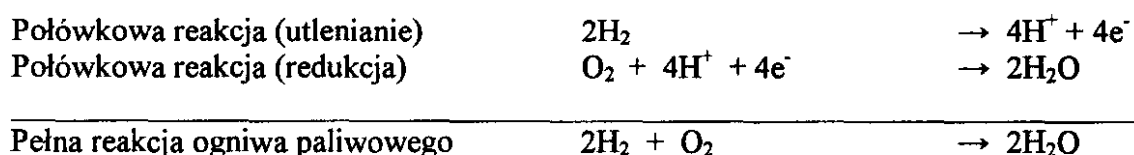
Pojazd hybrydowy musi posiadać na pokładzie co najmniej dwa źródła energii, a warunkiem koniecznym jest, aby jedno z nich było wtórnym źródłem energii. Wtórne źródło energii może przekształcać energię z jednego rodzaju w inny w sposób odwracalny oraz ma zdolność magazynowania energii. Zarówno silnik spalinowy jak również stos ogniw paliwowych są pierwotnymi źródłami energii, ponieważ przekształcają energię w jednym kierunku: silnik spalinowy przekształca energię chemiczną paliwa w energię mechaniczną w postaci momentu obrotowego, a ogniwa paliwowe przekształcają energię chemiczną paliwa bezpośrednio w energię elektryczną. Zarówno silniki spalinowe jak ogniwa paliwowe nie posiadają zdolności magazynowania energii. Wtórnym źródłem energii w rozwiązaniach szeregowego pojazdu hybrydowego z silnikiem SI oraz pojazdu hybrydowego z ogniwami paliwowymi są baterie akumulatorów, które przetwarzają dwukierunkowo energię chemiczną na elektryczną i elektryczną na chemiczną oraz magazynują energię w postaci chemicznej. Kombinacja pierwotnych i wtórnych źródeł energii daje różne konfiguracje pojazdów hybrydowych.

Silnik spalinowy SI - Silnik spalinowy jako pierwotne źródło energii daje dużą pewność pracy w każdych warunkach. Ponadto w rozwiązaniach szeregowych pojazdów hybrydowych, daje możliwość ładowania baterii w obszarach nie objętych wymogami emisji zerowej oraz czysto elektrycznej pracy napędu w obszarach zerowej emisji. Zaletą silników spalinowych jest także niski koszt wynikający z masowej produkcji. Ze względu na ograniczenia przemiany energii chemicznej paliwa w energię cieplną wynikające z obiegu Carnota, silniki spalinowe charakteryzują się niską sprawnością. Do wad silników spalinowych zalicza się hałaśliwość i wysoką temperaturę, a przede wszystkim długi łańcuch przemiany energii: energia chemiczna na cieplną, następnie cieplna na mechaniczną i wreszcie mechaniczna na elektryczną, ale za pośrednictwem zewnętrznego generatora. Wadą jest również brak możliwości spełnienia wyśrubowanych wymagań norm toksyczności spalin i wynikające z dużej ilości ruchomych części duże starty tarcia. Ograniczony ze względu na spalanie stukowe stopień sprężania także wpływa na obniżenie sprawności. W zastosowaniach hybrydowych możliwe jest stosowanie zarówno zaawansowanych konstrukcji silników SI, jak również nowoczesnych silników z zapłonem kompresyjnym. Najwyższa szkodliwa emisja ICE występuje bezpośrednio po zimnym starcie. Samochody miejskie, tzn. takie, które pokonują dziennie nie więcej niż 25 km, wytwarzają do 34% HC i CO emitowanych przez ogół samochodów, pomimo że sumaryczny dystans przez nie pokonany stanowi zaledwie 9% dziennego przebiegu wszystkich pojazdów [9]. Maksymalna efektywność silników spalinowych osiąga 30 % przy wysokiej mocy (0.6-0.8 mocy maksymalnej).

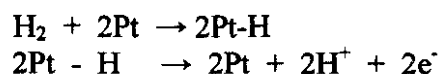
Ogniwa paliwowe - Ogniwa paliwowe są urządzeniami elektrochemicznymi i są z natury bardziej wydajne. Krótki łańcuch przemiany energii: energia chemiczna paliwa jest bezpośrednio przekształcana w energię elektryczną. W ogniwach paliwowych nie występuje spalanie. Zachodzące w ogniwach paliwowych reakcje chemiczne wodoru i

tleny w obecności katalizatora prowadzą do wytworzenia energii elektrycznej przy braku szkodliwej emisji do atmosfery. Maksymalna efektywność ogniw paliwowych wodorowych sięga 70 % i jest osiągana przy niskich mocach (0.15-0.30 mocy maksymalnej). Jest to bardzo korzystna cecha, dająca wysokie wykorzystanie energii przy małych i średnich obciążeniach jednostki napędowej. Do zalet ogniw paliwowych zalicza się także ich wielkość, porównywalną z silnikami spalinowymi oraz możliwość pracy na różnych paliwach (benzyna, wodór, metanol). Zastosowanie ogniw paliwowych do napędu pojazdów hybrydowych rozwija się intensywnie od lat 80-tych XX wieku, ale już w latach 70-tych używany był samochód hybrydowy z 6 kW stosem alkalicznych ogniw paliwowych. W latach 90-tych w USA i Kanadzie budowane były hybrydowe autobusy miejskie z ogniwami typu PEM. Wszyscy liczący się producenci biorą udział w pracach badawczo-rozwojowych, które koncentrują się na opracowaniu opartych na ogniwach paliwowych systemach napędowych o mocach 50-100 kW.

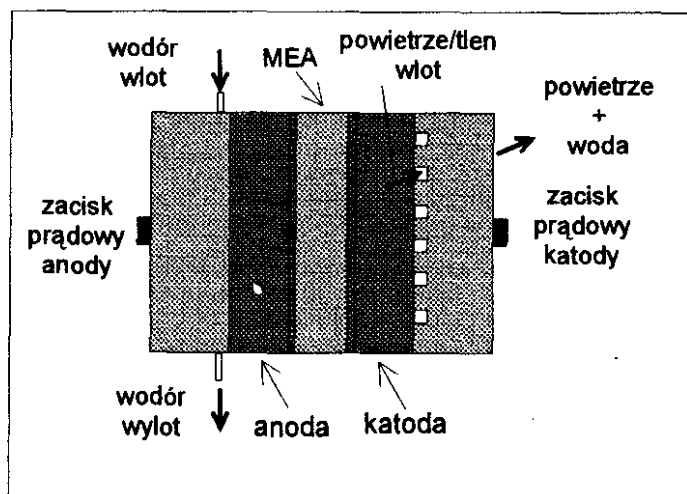
Elektrochemiczne przemiany w ogniwach paliwowych -[6].



Reakcje połówkowe na każdej elektrodzie mogą zachodzić jedynie przy dużym udziale katalizatora (platyna lub pallad) na powierzchni elektrody. Platyna wyjątkowo łatwo reaguje z tlenem i wodorem ułatwiając procesy chemiczne na elektrodach.



Platynowe katalizatory dla ogniw paliwowych PEM są drogie. W celu uzyskania maksymalnie dużej powierzchni katalizatora, elektrody są budowane w postaci porowatej, z którą wiążą się maleńkie cząsteczki platyny. Schemat ogniwa paliwowego PEM jest przedstawiony na rys. 2.

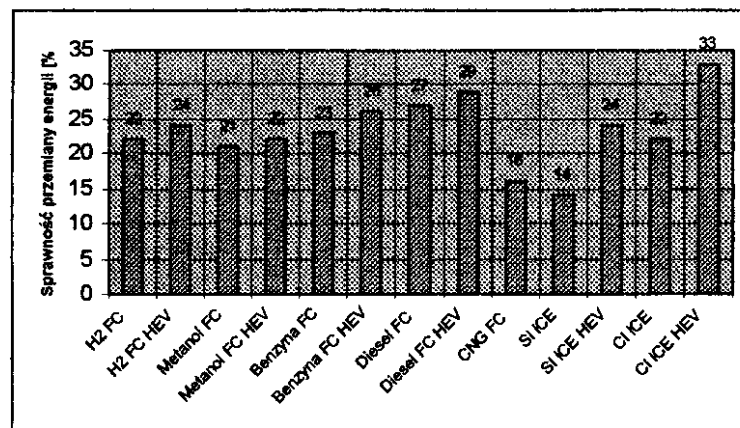


Rys. 2. Schemat ogniwa paliwowego PEM

Rodzaje ogniw paliwowych - Zaawansowane prace badawczo-rozwojowe trwają nad kilkoma rodzajami ogniw paliwowych:

- ogniwa PEM (Proton Exchange Membrane lub Polymer Electrolyte Membrane) o temperaturze pracy 80 °C mają sprawność do 60 % i są najwłaściwszą technologią ogniw paliwowych dla zastosowań pojazdowych.
- alkaliczne ogniwa paliwowe pracują w temperaturze 100 °C ze sprawnością do 70 %,
- fosforowo-kwasowe ogniwa pracują w temperaturze 200 °C ze sprawnością od 45 do 80 %,
- oparte na stopionych węglanach ogniwa pracują w temperaturze 650 °C,
- bazujące na stałych tlenkach ogniwa pracują w wysokiej temperaturze 800 – 1000 °C ze sprawnością do 60 %,
- ogniwa na metanol mają sprawność do 40 %.

Wodorowe ogniwa paliwowe mają wysoką sprawność głównie z powodu wysokiej gęstości energii: wodór – 40000 Wh/kg, metanol – 6000 Wh/kg, benzyna – 12000 Wh/kg. Na rys. 3 przedstawiono porównanie sprawności przemiany energii dla różnych rodzajów napędu [12].



Rys. 3. Porównanie sprawności przemiany energii dla różnych rodzajów napędu pojazdu.

gdzie:

- H2 FC - stos ogniw paliwowych bezpośrednio na wodór
- H2 FC HEV - napęd hybrydowy ze stosem ogniw paliwowych i baterią akumulatorów
- Metanol FC - stos ogniw paliwowych na wodór z reformingu metanolu
- Metanol FC HEV - jak wyżej z baterią akumulatorów
- Benzyna FC - stos ogniw paliwowych na wodór z reformingu benzyny
- Benzyna FC HEV - jak wyżej z baterią akumulatorów
- Diesel FC - stos ogniw paliwowych na wodór z reformingu oleju napędowego
- Diesel FC HEV - jak wyżej z baterią akumulatorów
- CNG FC - silnik spalinowy SI na gaz naturalny
- SI ICE - silnik spalinowy SI konwencjonalny
- SI ICE HEV - napęd hybrydowy z silnikiem SI i baterią akumulatorów
- CI ICE - silnik spalinowy CI konwencjonalny
- CI ICE HEV - napęd hybrydowy z silnikiem CI i baterią akumulatorów

Szkodliwa emisja ogniw paliwowych - Amerykańska agencja ochrony energii (EPA) szacuje, że 78 % globalnej emisji CO, 45 % NO_x oraz 37 % lotnych cząstek organicznych (VOC) w USA pochodzi od samochodów. Ogniw paliwowe zasilane bezpośrednio wodorem są uznawane za czyste źródła energii – o zerowej emisji. Każdy inny system oparty na wytwarzaniu wodoru (reformingu paliw węglowodorowych) skutkuje pewną emisją, której wielkość została przedstawiona w tabeli.

Tabela 1. Poziom emisji różnych systemów napędowych [12]

Pierwotne źródło energii	CO g/km	NO _x g/km	VOC g/km
Ogniw paliwowe na wodór z gazu ziemnego	0,17	0,48	0,17
Ogniw paliwowe na wodór z metanolu	0,32	0,64	0,17
Ogniw paliwowe na wodór z benzyny	0,32	0,32	0,32
Silnik spalinowy SI	16,0	1,6	0,96
Hybrydowy z silnikiem SI	9,65	0,96	0,64

Ekonomia ogniw paliwowych – Ekonomia jednostek napędowych bazujących na ogniwach paliwowych jest uzależniona od sposobu pozyskiwania wodoru. Jedną z dróg jest wytwarzanie wodoru poza pojazdem i magazynowanie go w zbiornikach pojazdu dla bezpośredniego zasilania stosu ogniw paliwowych. Innym sposobem jest pozyskiwanie wodoru z paliw węglowodorowych w wyniku reformingu na pokładzie pojazdu. Wpodejściu pierwszym na koszt finalny składają się: koszt elektrolizy lub reformingu przemysłowego, dystrybucji i składowania wodoru na pokładzie pojazdu hybrydowego. Z kolei w drugim przypadku koszt obejmuje autonomiczną instalację reformingu w pojeździe, natomiast koszty dystrybucji i składowania są niższe ze względu na mniejsze wymagania bezpieczeństwa.

Sterowanie przepływem energii w układzie szeregowego HEV – Program Advisor 3.0 w przypadku sterowania przepływem energii w szeregowym HEV bazuje na zasadzie termostatycznej pracy silnika spalinowego. Oznacza to, że silnik spalinowy włącza się do pracy, kiedy SOC spadnie poniżej pewnego poziomu, np. 40 %, a włącza się przy osiągnięciu innego stanu SOC, np. 80 %. W koncepcji samochodu hybrydowego do zastosowań w obszarach o zerowej emisji konieczna byłaby modyfikacja strategii sterowania polegająca na wykluczeniu możliwości włączania się ICE w rejonach objętych wymogami emisji zerowej i dająca możliwość pracy układu ładującego poza tymi rejonami. Wówczas ICE pracuje w zoptymalizowanym punkcie pracy, tzn. przy stałej prędkości obrotowej i niewielkich odchyłkach momentu obrotowego (ładowanie stałym prądem). W tak ograniczonym polu pracy można łatwiej zoptymalizować parametry układów dolotowego i wydechowego oraz rozrządu wtrysku paliwa i wyprzedzenia zapłonu pod kątem emisji i ekonomii zużycia paliwa.

Stopień naładowania baterii jest określony jako:

$$SOC = \frac{Q_{max} - Q_{used}}{Q_{max}} \cdot 100\%$$

gdzie:

Q_{max} – pojemność maksymalna (znamionowa) baterii Ah,

Q_{used} – różnica pojemności znamionowej i bieżącej Ah.

Zestaw danych do symulacji obejmuje zakresy prędkości obrotowych i momentów obrotowych dla konkretnego silnika oraz tablice jednostkowego zużycia paliwa w g/kWh oraz emisji dla 3 toksycznych składników spalin przeliczonych na g/s. Wszystkie tablice są indeksowane przez skwantyzowane prędkości obrotowe i momenty obrotowe. Dane w tablicach pochodzą z badań silnikowych na hamowni w warunkach symulowanego testu jezdny, a więc są obciążone pewnymi błędami. W obliczeniach energetycznych uwzględnia się odzysk energii podczas hamowania, kiedy to moment od kół napędowych napędza silnik elektryczny. Układ inwertera przekształca napięcie z AC w DC i w tej postaci przekazuje do zmagazynowania w baterii akumulatorów.

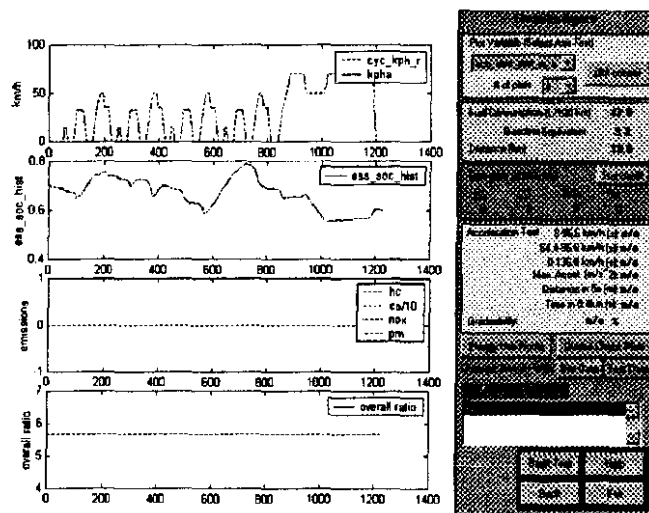
Sterowanie przepływem energii w układzie HEV z ogniwami paliwowymi [7] – Do symulacji pojazdu z ogniwami paliwowymi jako pierwotnym źródłem energii wykorzystano zestawy danych zawarte w pakiecie Advisor dla 50 kW baterii ogniw paliwowych na wodór pracujących przy ciśnieniu atmosferycznym. Odmienne niż w przypadku szeregowego HEV – przetwornik paliwa pracuje w sposób ciągły z określeniem bieżącego punktu pracy na podstawie wielkości mocy zapotrzebowanej ze strony napędu i obciążeń dodatkowych. Te dane są następnie wykorzystywane przez model do określenia zużycia paliwa i poziomu emisji w poszczególnych punktach czasowych. Advisor wykorzystuje do symulacji jeden z trzech modeli ogniwa paliwowego. Ze względu na praktyczny brak szkodliwej emisji, pojazd zasilany przez ogniwa paliwowe może być bez przeszkód używany w obszarach objętych wymogami emisji zerowej. Nie bez znaczenia jest również brak emisji hałasu.

4. Rezultaty symulacji

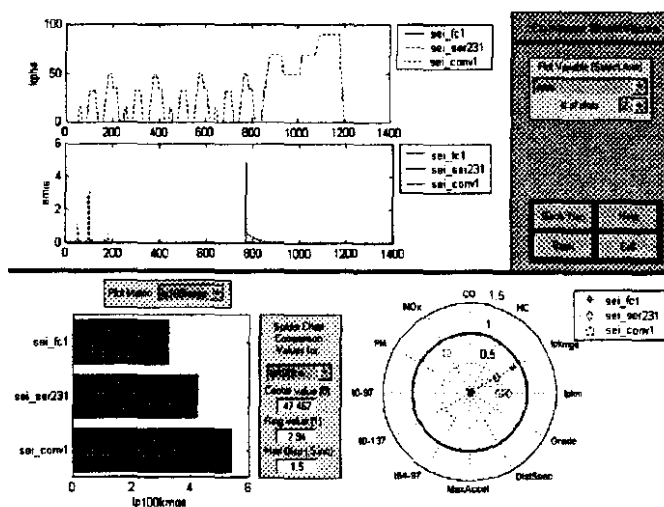
Symulacja wybranych pojazdów pod kątem wydajności energetycznej, emisji i sprawności ogólnej została przeprowadzona przy użyciu programu Advisor 3.0. Procedura symulacyjna rozpoczyna się od wprowadzenia do bazy programu pakietów Matlab'a zawierających dane pomiarowe dotyczące zastosowanych silników spalinowych w pojeździe konwencjonalnym i szeregowym HEV. W kolejnym kroku następuje właściwe skonfigurowanie pojazdu poprzez wybór podsystemów takich jak pierwotne źródło energii, nadwozie, przekładnia, silnik elektryczny, generator i bateria akumulatorów. Następnie należy określić końcową masę pojazdu. Kolejne zadanie to wybór cyklu jezdny lub testu. W omawianej procedurze przyjęto cykl jezdny EUDC-LOW, jako że obejmuje on symulację jazdy miejskiej z ograniczeniem maksymalnej prędkości do 90 km/h. Większość tego trwającego 1200 s cyklu obejmuje prędkości niskie, charakterystyczne dla jazdy miejskiej. Kolejny krok dotyczy właściwej symulacji osiągow pojazdu w wybranym cyklu. W procesie symulacji pojazdu hybrydowego zmiennymi są: wielkość silnika spalinowego/stosu ogniw paliwowych jako pierwotnego źródła energii, moc elektrycznego silnika trakcyjnego wraz z inwerterem, pojemność baterii akumulatorów trakcyjnych i przełożenia. Do symulacji wykorzystywane są modele Simulinka dla głównych podsystemów pojazdu oraz dane pomiarowe i procedury uwzględniające cykl jezdny. W efekcie uzyskano wielkość zużycia paliwa w przeliczeniu na benzynę, wielkość emisji toksycznych składników spalin, pełną analizę przekształcania i przepływu energii oraz strat energetycznych oraz kilkadziesiąt innych wielkości w funkcji czasu trwania cyklu. Program Advisor sporządza stosowne wykresy oraz daje możliwość analizy porównawczej dla wybranej grupy pojazdów. W tabeli 2 zestawiono wyniki symulacji dla trzech przedmiotowych pojazdów w zakresie sprawności całkowitej, emisji CO, HC i NO_x oraz zużycia paliwa przeliczonego na ekwiwalent benzyny w l/100 km, a na rys. 4 i 5 graficzne wyniki symulacji dla 3 konfiguracji pojazdu.

Tabela 2. Wyniki zużycia paliwa, emisji i sprawności

	η_{tot}	HC g/km	CO g/km	NOx g/km	Zużycie paliwa l/100km
konwencjonalny	0,125	0,368	3,45	0,134	5,4
szeregowy HEV	0,153	0,373	3,59	0,445	4,2
HEV z FC	0,215	-	-	-	3,2



Rys. 4. Wyniki symulacji HEV z ogniwami paliwowymi



Rys. 5. Wykresy zbiorcze dla 3 konfiguracji pojazdu

W przypadku szeregowego HEV z powodu zastosowania termostaticznej strategii sterowania występuje znaczna emisja toksycznych składników spalin. Podczas jazdy czysto elektrycznej szeregowy HEV zachowuje się jak pojazd o zerowej emisji. Stosunkowo niskie sprawności ogólne wynikają ze zbyt dużej masy wszystkich rozpatrywanych pojazdów. Zużycie paliwa w ujęciu ilości kilometrów przebytych na 1 litrze paliwa wynoszą dla pojazdu konwencjonalnego 18.5 km/l, dla szeregowego HEV 23.8 km/l oraz dla pojazdu ze stosem ogniw paliwowych 31.3 km/l w przeliczeniu na benzynę. Sprawność ogólna pojazdów jest wyliczana wg zależności [4]:

$$\eta = \frac{AERO_{loss} + ROLL_{loss}}{FC_{in} - ES_{in}}$$

gdzie:

- AERO – straty energii wynikające z oporu powietrza,
- ROLL – straty energii wynikające z toczenia,
- FC – energia wejściowa przetwornika energii
- ES – energia wejściowa elementu magazynującego energię.

5. Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzone symulacje wskazują na zalety miejskiego samochodu ze stosem ogniwo paliwowych jako pierwotnym źródłem energii. Praktyczny brak szkodliwej emisji, niskie zużycie paliwa (liczone jako ekwiwalent benzyny), dobre własności trakcyjne wskazują na kierunek, w którym zapewne pójdzie rozwój zaawansowanych systemów napędowych. Dzisiejsze wysokie koszty są wadą tego rozwiązania. Jednak zgodnie z wytycznymi PNGV koszt stosu ogniwo paliwowych o mocy 50 kW spadnie blisko pięciokrotnie z 294 \$/kW obecnie do około 50 \$/kW w roku 2004. W obszarach o zerowej emisji takie pojazdy mogą zużywać czysto elektryczną energię, a w pozostałych obszarach mogą pracować silniki spalinowe dla ładowania baterii akumulatorów. Ponieważ silnik spalinowy w układzie szeregowego HEV pracuje przy stałej prędkości obrotowej w wąskim polu obciążeń, to jego sterowanie może być w wysokim stopniu zoptymalizowane, co owocuje wysoką sprawnością i obniżoną emisją. Z porównania z pojazdem konwencjonalnym o podobnych cechach geometrycznych wynika, że poszukiwania rozwiązań alternatywnych mogą iść równolegle w obydwu rozpatrywanych kierunkach, ponieważ obydwa mają szereg przemawiających za nimi przesłanek. Dla samochodu miejskiego zarówno przyspieszenia jak zdolność pokonywania wzniesień nie są bardzo istotne. Ważniejsze jest dążenie do zmniejszenia masy całkowitej pojazdów. W przypadku pojazdu z ogniwoami paliwowymi należałoby zainstalować stos o mniejszej mocy (np. 35 kW). W przypadku szeregowego HEV jednostka APU może bazować na mniejszym silniku spalinowym. W stosunkowo niewielkim nadwoziu, po zabudowaniu APU lub stosu FC oraz baterii akumulatorów, pozostaje niewielka przestrzeń bagażowa i w miarę komfortowe miejsce dla 2 podróżnych. W przypadku pojazdu z FC należy zwrócić uwagę na usytuowanie zbiornika na wodór – najlepsze miejsce to prawie centralne umieszczenie pod tylną kanapą.

6. Literatura

- [1] Cuddy, M. R., Wipke, K. B., *Analysis of the Fuel Economy Benefit of Drivetrain Hybridization*, SAE Paper No. 970289
- [2] Patil, P. G., *Advanced Vehicle Technologies for the Partnership for a New Generation of Vehicles*, Office of Advanced Automotive Technologies, US Department of Energy
- [3] Magi, M., *A New Paradigm for Vehicle Propulsion Will Soon Become True*, World Market Research Centre, Global Automotive Manufacturing & Technology, 2000
- [4] NREL, *Advisor 3.0, Documentation*, 2000
- [5] Arthur D. Little, Inc. *Cost Analysis of Fuel Cell System for Transportation*, 2000
- [6] Los Alamos National Laboratory, "Fuel Cells – Green Power", 1999
- [7] Rajashekara, K., *Propulsion System Strategies for Fuel Cell Vehicles*, SAE Paper No. 2000-01-0369
- [8] Steinbugler, M., *Fuel Economy and Range Estimates for Fuel Cell Powered Automobiles*, Fuel Cell Seminar, 1996

- [9] Reucyl, J. S., Schuurmans, P. J., *Policy Implications of Hybrid-Electric Vehicles*, Nevcor Inc., 1999
- [10] Report by XCELLSIS, *Fuel Cell Engines – The Engines of Tomorrow*, 2000
- [11] Patil, P. G., *Technology Path to Triple Automotive Fuel Economy*, Office of Advanced Automotive Technologies, US Department of Energy
- [12] Northeast Advanced Vehicle Consortium, *Future Wheels*, Boston, USA, 2000.