

CAR LOAD ANALISE IN ASPECT OF COMPONENTS SELECTION OF A HYBRID DRIVE SYSTEM WITH FUEL CELL

Leszek Szczęch

Military University of Technology
Kaliskiego 2, 00-908 Warsaw, Poland
tel.: +48 22 6839546, fax: +48 22 6839546
e-mail:l.szczech@wme.wat.edu.pl

Abstract

The suitable selection of an electric driving system to a vehicle requires (if it is possible) analysing co-operation of this vehicle with combustion engine. The definition of propulsion force on wheels of a vehicle during typical load cycle realization on background of vehicle traction characteristic allows to estimate the conditions of designed hybrid system work. There is essential the qualification of power and rotatory speed of an electric engine as well as voltage applied to its power supply and also power and voltage produced by fuel cell. It makes possible to avoid mistakes worsening the usable properties of vehicle electric driving system. Characteristic power course of the Fiat 126p, characteristic torque course, speed up to 80 km/h, course of acceleration during speed increasing to 80 km/h, traction characteristic powered by combustion engine with course of propulsion force during speed up to 80 km/h, dynamic characteristic percent torque course during acceleration, torque course during acceleration 10 kW fuel cell characteristics, electric DC engine characteristics, traction characteristic, power course in drive system are presented in the paper.

Keywords: combustion engines, fuel cells, hybride drive system

ANALIZA OBCIĄŻEŃ SAMOCHODU W ASPEKTCIE DOBORU HYBRYDOWEGO UKŁADU NAPĘDOWEGO Z OGNIWEM PALIOWYM

Streszczenie

Właściwy dobór elektrycznego układu napędowego do pojazdu wymaga (jeśli to możliwe) przeanalizowania współpracy tego pojazdu z silnikiem spalinowym. Określenie siły napędowej na kołach pojazdu podczas realizacji typowego cyklu obciążenia na tle charakterystyki trakcyjnej pojazdu pozwala na oszacowanie warunków pracy projektowanego układu hybrydowego. Istotne jest tutaj określenie mocy i prędkości obrotowej silnika elektrycznego oraz napięcia stosowanego do jego zasilania a także ustalenie mocy i napięcie wytwarzanego przez ogniwo paliwowe. Umożliwia to uniknięcie błędów utrudniających lub pogarszających własności użytkowe pojazdu z elektrycznym układem napędowym. Charakterystyka zewnętrzna mocy silnika samochodu PF 126p, charakterystyka zewnętrzna momentu obrotowego, przebieg rozpędzania do prędkości 80 km/h, przebieg przyspieszenia podczas rozpędzania do prędkości 80 km/h, charakterystyka trakcyjna samochodu, charakterystyka dynamiczna samochodu, procentowy przebieg momentu obrotowego silnika podczas przyspieszania w odniesieniu do momentu maksymalnego, przebieg momentu obrotowego silnika podczas przyspieszania w odniesieniu do 60% i 40% momentu maksymalnego, charakterystyki ogniwa paliwowego 10 kW, charakterystyki elektrycznego silnika napędu pojazdu, charakterystyka trakcyjna pojazdu z silnikiem elektrycznym, przebieg mocy w układzie napędowym są przedstawione w pracy.

Słowa kluczowe: silniki spalinowe, ogniwa paliwowe, hybrydowe układy napędowe

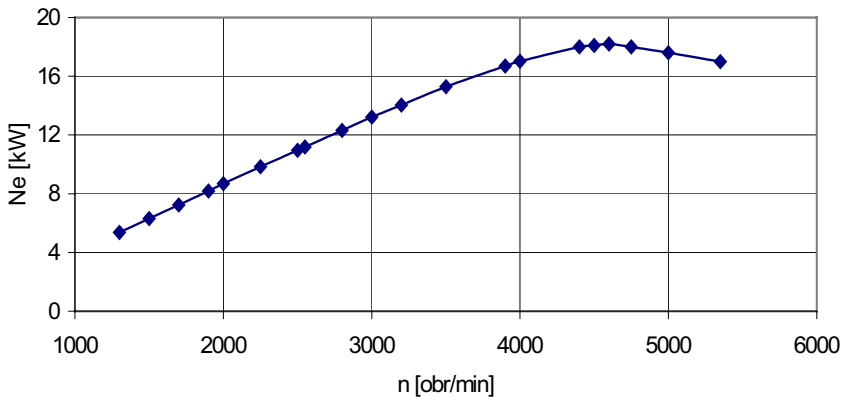
1. Wstęp

Opracowanie układu napędowego z silnikiem elektrycznym zasilanym ogniwem paliwowym wymaga opracowania bilansu energii dostarczanej przez silnik spalinowy w typowym samochodzie PF 126p. W literaturze można znaleźć niewiele danych dotyczących badań tego

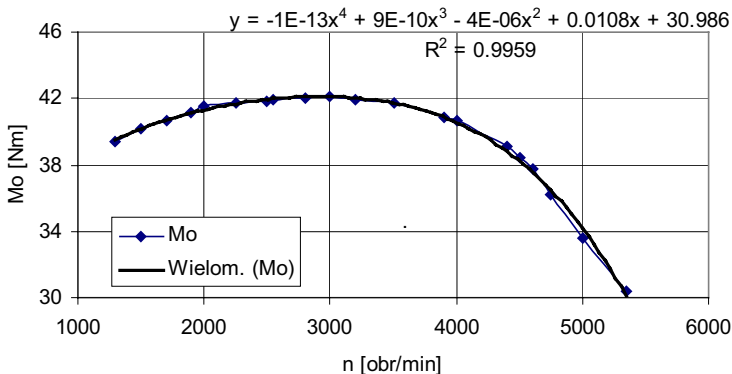
silnika. W jednej z instrukcji [1] znaleziono charakterystykę zewnętrzną tego silnika oraz czasowy przebieg rozpędzania do prędkości 80 km/h. Wykorzystano te dwie charakterystyki do oceny własności dynamicznych tego silnika podczas napędzania samochodu PF 126p. Założono, że rozpędzona masa wynosi ok. 720 kg (650 kg - masa własna samochodu oraz 70 kg - masa kierowcy). Określenie zapotrzebowania na energię, niezbędną do napędu samochodu przy pomocy silnika spalinowego planuje się wykorzystać do opracowania założeń do projektu układu napędowego, wykorzystującego ogniwo paliwowe jako źródło energii i silnik elektryczny jako czynnik napędowy.

2. Charakterystyka zewnętrzna silnika spalinowego

Charakterystyka zewnętrzna (rys. 1) opracowana została dla silnika o pojemności skokowej 650 cm³. Określono ją dla zakresu prędkości obrotowej $n = 1200 - 5400$ obr/min. Moc maksymalna silnika została określona na 18 kW przy prędkości obrotowej 4500 obr/min. Maksymalny moment obrotowy (rys. 2) wynoszący 42 Nm został określony przy prędkości obrotowej 3000 obr/min. Zbliżony do paraboli przebieg momentu obrotowego został przybliżony wielomianem czwartego stopnia o równaniu $M_o = -1 \cdot 10^{-13} n^4 + 9 \cdot 10^{-10} n^3 - 4 \cdot 10^{-6} n^2 + 0.0108 n + 30.986$ przy współczynnikiem korelacji $R^2 = 0.9959$. Równanie momentu obrotowego zostało wykorzystane w dalszych rozważaniach do określenia charakterystyki trakcyjnej i dynamicznej analizowanego pojazdu.



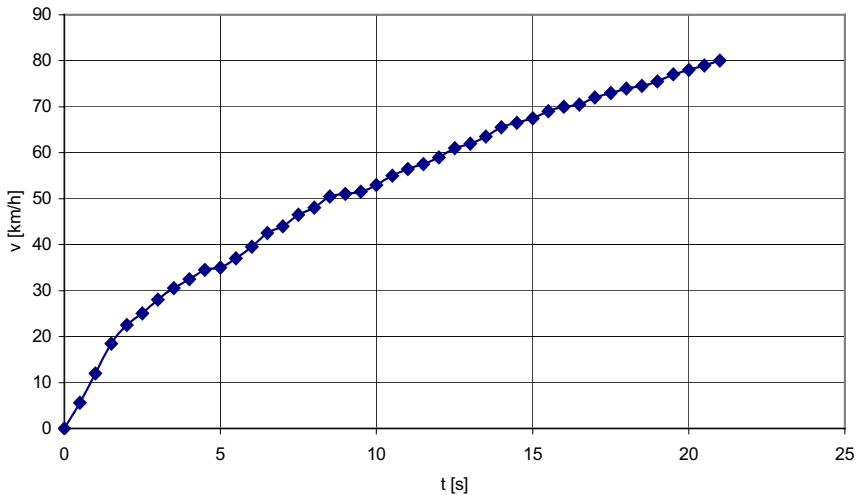
Rys. 1. Charakterystyka zewnętrzna mocy silnika samochodu PF 126p
Fig. 1. Characteristic power course of Fiat 126p



Rys. 2. Charakterystyka zewnętrzna momentu obrotowego silnika samochodu PF 126p
Fig. 2. Characteristic torque course of Fiat 126p

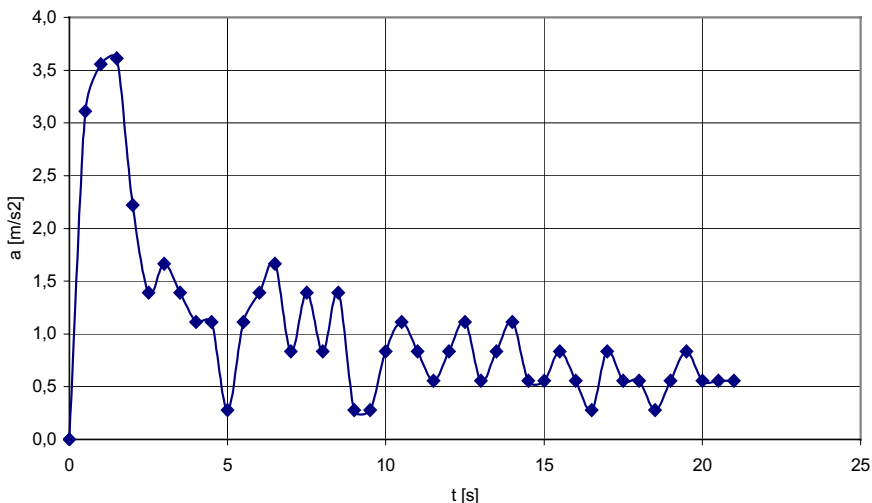
3. Wyznaczenie parametrów ruchu pojazdu podczas przyspieszania

Własności dynamiczne samochodu zostały określone na podstawie przebiegu rozpędzania samochodu PF 126p wyposażonego w silnik spalinowy. Przebieg ten przedstawiono na rysunku 3. Przedstawia on zmiany prędkości badanego pojazdu w funkcji czasu. Można zauważyć, że w czasie ok. 22 s. pojazd przyspiesza od zera do prędkości ok. 80 km/h przy kolejnych zmianach biegów I–II w piątej sekundzie, II – III w dziewiątej i III – IV w szesnastej.



Rys. 3. Przebieg rozpędzania samochodu PF 126p do prędkości 80 km/h
Fig. 3. Speed up of the Fiat 126p to 80 km/h

W pierwszych trzech sekundach pojazd przyspiesza najszybciej do około 3.5 m/s^2 , później tempo przyspieszania stopniowo spada i od piątej sekundy utrzymuje się na niemal stałym poziomie $0.5 - 1.0 \text{ m/s}^2$ (rys. 4).



Rys. 4 Przebieg przyspieszenia samochodu PF 126p podczas rozpędzania do prędkości 80 km/h
Fig 4. Course of Fiat 126p acceleration during speed increasing to 80 km/h

Na podstawie analizy przyspieszenia i prędkości w kolejnych chwilach czasu na podstawie równania:

$$s = \sum_{i=1}^{44} v_{i-1}t + \frac{a_i t^2}{2}$$

gdzie: t oznacza kolejne chwile czasu z odstępem 0.5 s;

określono dystans (drogę) s jaki został pokonany przez samochód. Analizowany pojazd do chwili osiągnięcia prędkości 80 km/h pokonał ok. 310 m.

4. Charakterystyka trakcyjna i dynamiczna samochodu PF 126p

Wykorzystując charakterystykę zewnętrzną momentu obrotowego oraz parametry układu napędowego wyznaczono charakterystykę trakcyjną samochodu PF 126p. Przedstawia ona wartości siły napędowej na kołach pojazdu w zależności od prędkości pojazdu. Siła napędowa wyznaczana jest na podstawie charakterystyki zewnętrznej momentu obrotowego M_o (rys. 2) oraz przełożeń skrzyni biegów i_{sb} i przekładni głównej i_{pg} a także promienia koła napędowego r_k .

$$P_n = M_o \cdot i_{sb} \cdot i_{pg} \cdot \frac{1}{r_k} \text{ [N]}$$

Parametry układu napędowego są przedstawione w tabeli 1.

Tab. 1. Parametry układu napędowego samochodu PF 126p
Tab. 1. Parameters of the Fiat 126 gear system

Skrzynia biegów / bieg	Przełożenie
I	3.25
II	2.067
III	1.3
IV	0.872
Przekładnia główna	4.87

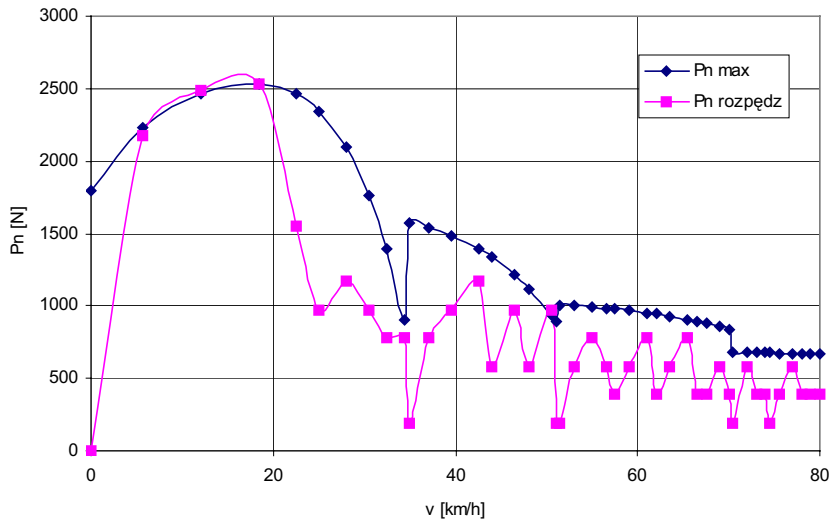
Promień koła napędowego (zmierzony na pojeździe) wynosi 260 mm.

Na kolejnych przełożeniach zewnętrzny moment obrotowy pozwala na osiągnięcie coraz wyższych prędkości obrotowych przy zmniejszonej maksymalnej sile napędowej. Przebieg charakterystyki trakcyjnej (oznaczonej P_{nmax}) przedstawiono na rysunku 5.

Na charakterystyce tej przedstawiono także siłę wytwarzaną na kołach samochodu PF 126p podczas rozpędzania do prędkości 80 km/h. Wartości tej siły obliczono z II prawa Newtona na podstawie przyspieszenia osiągniętego przez pojazd (rys. 4) i rozpędzanej masy. Masę pojazdu wraz z kierowcą oceniono na 720 kg. Wartości prędkości podczas przyspieszania przyjęto zgodnie z rysunkiem 3.

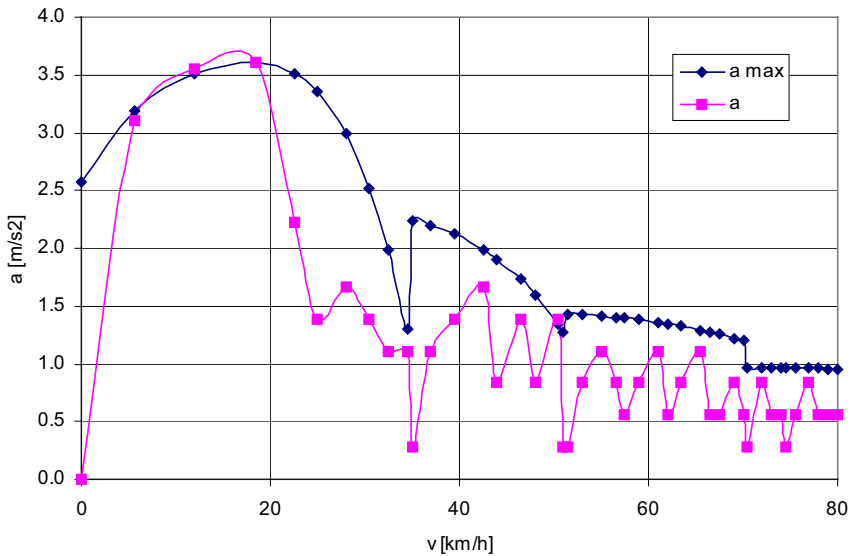
Analizując otrzymane przebiegi można zauważyć, że siła napędowa wytwarzana przez rozpędzany pojazd dochodzi do wartości maksymalnych jedynie na pierwszym biegu, w pierwszych sekundach rozpędzania. W dalszym czasie siła napędowa jest dużo mniejsza od maksymalnej (od 10 do 60 %).

Wyznaczono także charakterystykę dynamiczną analizowanego pojazdu (rys. 6), przedstawiającą analogicznie jak na charakterystyce trakcyjnej zarówno maksymalne przyspieszenie możliwe do osiągnięcia na poszczególnych przełożeniach jak i przyspieszenia osiągane podczas rozpędzania przedstawione w funkcji prędkości pojazdu. Porównując obydwie charakterystyki można zauważyć, że mają one analogiczny przebieg, co jest dość oczywiste ze względu na brak zmiany masy pojazdu podczas rozpędzania. Zużycie paliwa zostało pominięte.



Rys. 5. Charakterystyka trakcyjna samochodu PF 126 p z silnikiem spalinowym z przebiegiem siły napędowej podczas rozpędzania do 80 km/h

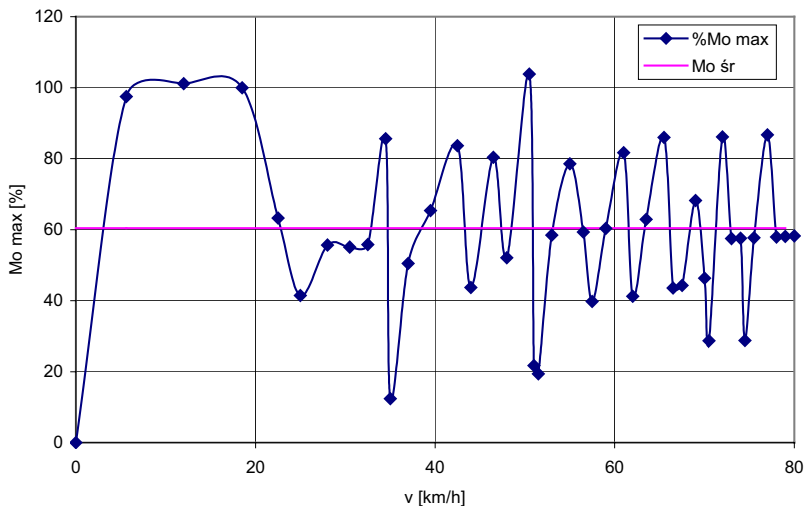
Fig. 5. Traction characteristic of Fiat 126p powered by combustion engine with course of propulsion force during speed up to 80 km/h



Rys. 6. Charakterystyka dynamiczna samochodu PF 126 p z naniesionym przebiegiem przyspieszenia samochodu
Fig. 6. Dynamic characteristic of the Fiat 126p with course of car accelerating

Dokonując doboru silnika elektrycznego do napędu samochodu PF 126 przyjęto, że elektryczny układ napędowy będzie w stanie napędzić pojazd z co najmniej taką samą prędkością i przy co najmniej takich samych własnościach dynamicznych jak silnik spalinowy. Aby określić poziom

momentu obrotowego, jaki musi być wytwarzany przez silnik elektryczny obliczono średnią wartość momentu obrotowego wytwarzanego przez silnik spalinowy. Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku 7. Wyznaczona wartość średniego momentu obrotowego została ustalona na ok. 60%. Ponieważ większość silników elektrycznych może być przeciążona o co najmniej 100% przez czas 30 do 60 s można przyjąć, że przyjęcie silnika elektrycznego o momencie maksymalnym równym ok. 25 Nm czyli 60% momentu maksymalnego silnika spalinowego i dopuszczenie 40% przeciążenia nie powinno wpłynąć na trwałość nowego układu napędowego. Na rysunku 8 przedstawiono przebieg momentu obrotowego podczas rozpędzania, a także przebieg momentu obrotowego ograniczonego do 60% i 40% momentu obrotowego na charakterystyce zewnętrznej. Przeciążenie silnika powyżej 60 % występuje impulsowo w pikach trwających od 2 do 7 sekund. Ogólnie czas pracy układu napędowego z momentem wyższym od 60% obciążenia wynosi 8.5 s, co stanowi ok. 38% całego czasu rozpędzania. Średnie przeciążenie wynosi ok. 24%.

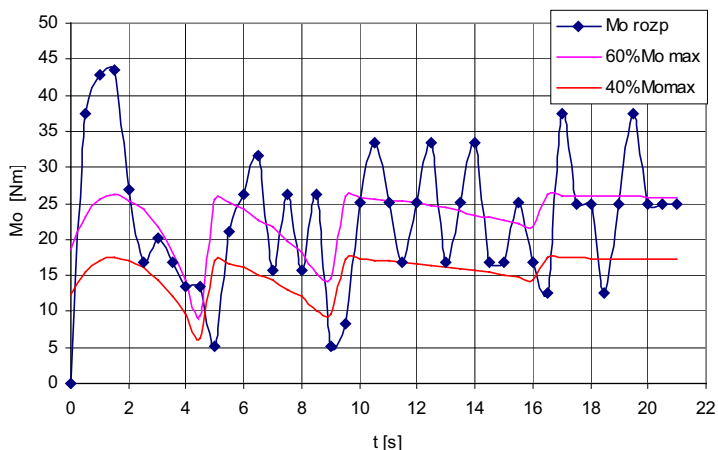


Rys. 7. Procentowy przebieg momentu obrotowego silnika podczas przyspieszania samochodu PF 126 p w odniesieniu do momentu maksymalnego

Fig. 7. Percent torque course during acceleration of the Fiat 126p in compare to maximum load

W przypadku silnika pokrywającego 40% obciążenia silnika spalinowego praca z przeciążeniem przekracza 18 s co stanowi ok. 82% czasu pracy przy czym średnie przeciążenie wynosi ok. 35%. W przypadku przeciążenia trwającego więcej niż 50% czasu pracy trudno oczekiwać, że stan cieplny silnika, który jest w takich przypadkach trudny do ustabilizowania, będzie można utrzymać na bezpiecznym poziomie. Oczywiście podczas prób na pojeździe silnik elektryczny trzeba wyposażyć w układ pomiaru temperatury i termiczny wyłącznik zabezpieczający. Korzystne będzie także zastosowanie wentylatora wymuszającego przepływ powietrza przez komorę silnika a nawet przez sam silnik.

Z analizy tej można wywnioskować, że silnik elektryczny pokrywający 60% obciążenia wytwarzanego przez silnik spalinowy będzie mógł spełniać rolę silnika napędowego samochodu PF 126 p. Należy przy tym pamiętać, że rzeczywiste obciążenie silnika w pojeździe podczas zwykłej eksploatacji będzie nieco mniejsze. Próba rozpędzania pojazdu zawsze skłania do wykorzystania do maksimum możliwości silnika i układu napędowego. Natomiast z reguły w czasie normalnej eksploatacji wykorzystują pojazd łagodniej choćby z uwagi na zmniejszenie zużycia paliwa.



Rys. 8. Przebieg momentu obrotowego silnika podczas przyspieszania samochodu PF 126 p w odniesieniu do 60% i 40% momentu maksymalnego

Fig. 8. Torque course during acceleration of the Fiat 126p in compare to 40 and 60% of maximum load

5. Założenia do układu napędowego samochodu PF 126p z ogniwem paliwowym

5.1. Przyjęcie układu konstrukcyjnego

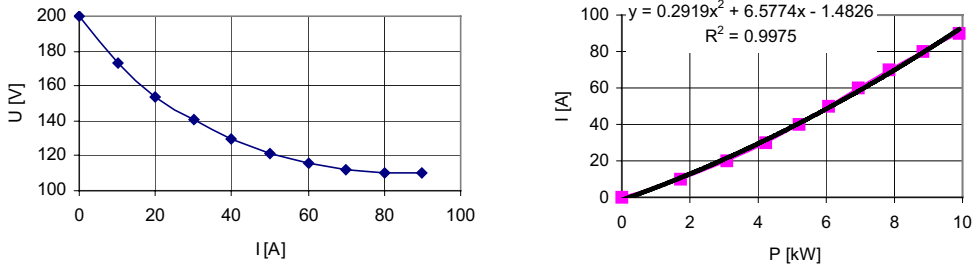
Przyjęto, że samochód PF 126p będzie napędzany układem hybrydowym, wykorzystującym ogniwo paliwowe jako główne źródło energii. Pomocniczym źródłem energii będzie bateria 8-10 akumulatorów o pojemności 60 Ah ustawiona szeregowo pracująca przy napięciu stałym ok. 100 V. Źródłem napędu będzie silnik elektryczny prądu stałego o mocy 10 kW. Ponieważ silnik ten może być przeciążony o ok. 100% będzie można krótkotrwale podnieść moc silnika (ok. 1 min.) do ok. 20 kW.

Dodatkowym problemem będzie konieczność zastosowania układu elektronicznego dopasowującego napięcie ogniwa paliwowego umożliwiające wykorzystanie ogniwa paliwowego do ładowania akumulatorów. W tym celu wykorzystywany jest przetwornik DC/DC (konwerter) zmniejszający zakres zmiany napięcia generowanego przez ogniwo paliwowe.

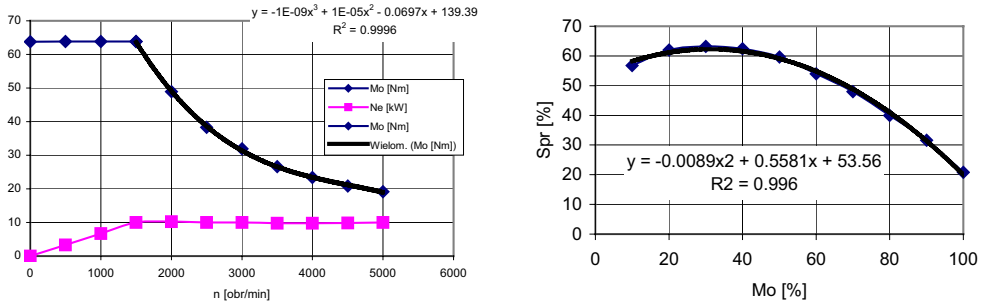
Silnik napędowy zostanie zamocowany w miejsce silnika spalinowego. Moment obrotowy zostanie bezpośrednio przeniesiony na wałek sprzęgłowy skrzyni przekładniowej samochodu. Ponieważ prędkość obrotową silnika można zmieniać od 0 do ok. 5000 obr/min sprzęgło jest zbędne i nie będzie w układzie napędowym zamontowane. Dalej moment obrotowy prowadzony jest do kół pojazdu identycznie jak w pojeździe napędzanym silnikiem spalinowym. Prędkość obrotowa elektrycznego silnika napędowego będzie regulowana przetwornikiem impulsowym napięcia.

5.2 Dobór ogniwa paliwowego

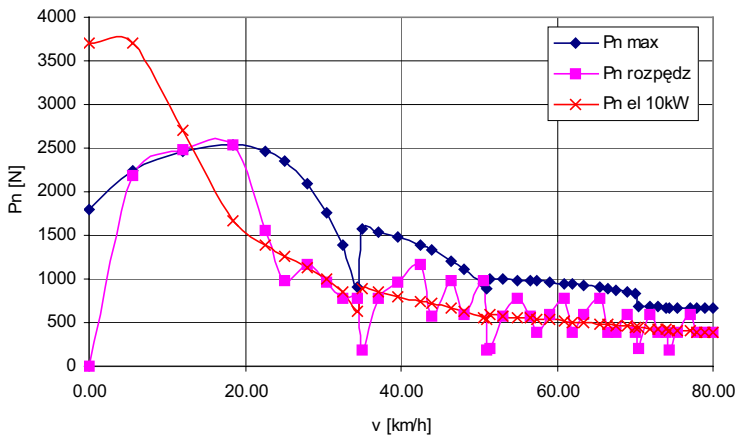
Doboru ogniwa paliwowego dokonano na podstawie średniego zapotrzebowania na moc wytwarzaną przez silnik spalinowy. Przyjęto, że moc ogniwa paliwowego powinna wynosić ok. 60 % mocy maksymalnej zastępowanego silnika spalinowego. Wobec tego moc ogniwa nie powinna być niższa od 10.8 kW. Wobec dość ograniczonego dostępu do opracowanych ogniw paliwowych produkowanych przez światowych producentów wybrano ogniwo produkowane przez firmę Intelligent Solutions™ we współpracy z PSA o mocy znamionowej 10 kW. Zakres napięć generowanych przez ogniwo wynosi 110-200V, a maksymalny prąd 90 A. Masa suchego ogniwa wynosi 70 kg. Charakterystyki tego ogniwa przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 9. Charakterystyki ogniwa paliwowego 10 kW
Fig. 9. 10 kW fuel cell characteristics



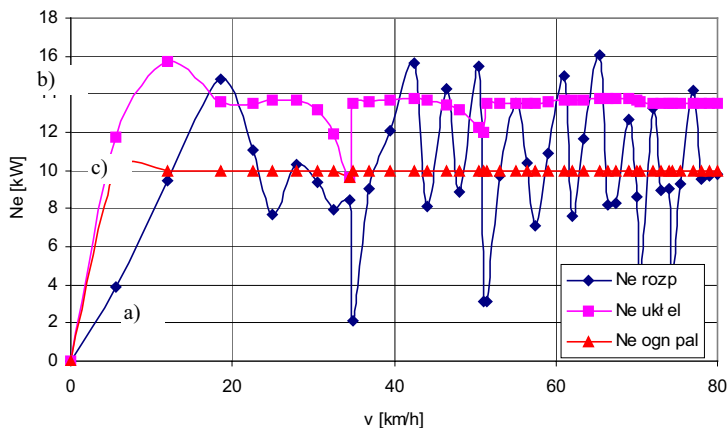
Rys. 10. Charakterystyki elektrycznego silnika napędu pojazdu
Fig. 10. Electric DC engine characteristics



Rys. 11. Charakterystyka trakcyjna pojazdu PF 126p z silnikiem elektrycznym
Fig. 11. Fiat126p traction characteristic

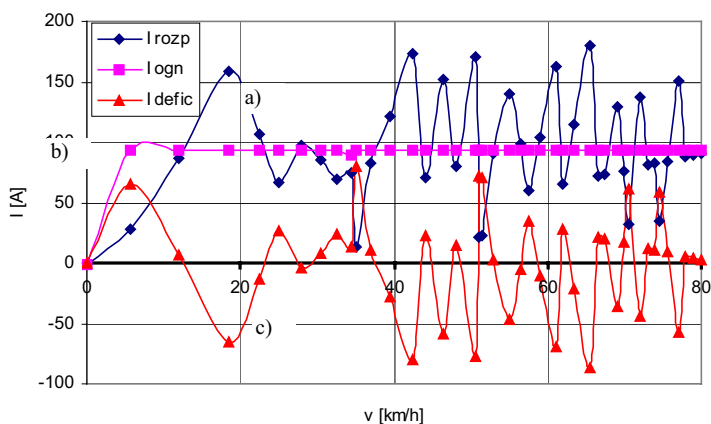
Do napędu pojazdu dobrano silnik elektryczny prądu stałego o mocy 10 kW pracującego przy analogicznym do ogniwa paliwowego zakresie napięć. Charakterystyki tego silnika przedstawiono na rysunku 10.

Wykorzystując charakterystykę silnika elektrycznego opracowano charakterystykę trakcyjną samochodu napędzanego tym silnikiem (rys. 11).



Rys. 12. Przebieg mocy w układzie napędowym: a) moc potrzebna do rozpędzenia pojazdu, b) moc maksymalna układu zasilania, c) moc maksymalna ogniwa

Fig. 12. Power course in drive system: a) power needed to vehicle accelerate, b) maximum power of electric system, c) maximum power of the fuel cell



Rys. 13. Przebieg prądu podczas przyspieszania: a) zapotrzebowanie na prąd, b) prąd wytwarzany przez ogniwo paliwowe, c) deficyt prądu uzupełniany z akumulatorów

Fig. 13. Current course during acceleration: a) current needed to vehicle accelerate, b) current produced by fuel cell, c) current deficite filled up from battery

Ponieważ siła napędowa, którą może wytworzyć silnik elektryczny wraz z układem napędowym przewyższa siłę napędową wytwarzaną przez silnik spalinowy jedynie w zakresie do ok. 15 km/h można oszacować, że własności trakcyjne pojazdu z silnikiem elektrycznym nie będą lepsze niż w przypadku napędzania silnikiem spalinowym. Należy jednak pamiętać, że silnik elektryczny może być krótkotrwale przeciążony nawet o 100%. Czas trwania tego przeciążenia jest uzależniony od stanu cieplnego uzwojeń silnika. Z reguły jest on ograniczony do 60 s, ale prawdopodobnie może być zwiększony poprzez zastosowanie wydajniejszych wentylatorów z własnym napędem.

Podczas przyspieszania pojazd oczywiście nie jest napędzany z maksymalną siłą napędową. Na podstawie rysunku 11 można stwierdzić, że rzeczywista siła napędowa wytwarzana przez silnik

spalinowy jedynie w zakresie 15-23 s rozpędzania przekracza siłę napędową, którą może wytworzyć silnik elektryczny, a od 40 s rozpędzania siła potrzebna do rozpędzenia i wytwarzana przez silnik elektryczny są porównywalne.

Ponieważ w pracy dążono do oceny współpracy ogniwa paliwowego i silnika elektrycznego więc dokonano porównania mocy maksymalnej, potrzebnej do rozpędzenia pojazdu oraz mocy wytwarzanej przez ogniwo paliwowe (rys. 12). Z analizy tych przebiegów wynika, że moc maksymalna jaką trzeba dostarczyć do elektrycznego układu napędowego, ze względu na sprawność silnika elektrycznego, jest o około 30% wyższa niż moc maksymalna, którą może wytworzyć ogniwo paliwowe. Deficyt prądu niezbędnego do wytworzenia tej mocy (rys. 13) musi być uzupełniony z akumulatorów. Właściwa praca takiego układu hybrydowego będzie miała miejsce, jeśli średnie obciążenie silnika będzie nieco mniejsze od maksymalnych możliwości obciążenia ogniwa paliwowego. Wstępne obliczenia wykazały, że średnie obciążenie silnika elektrycznego w przypadku kontynuacji jazdy z prędkością ok. 80 km/h pozwalają na uzupełnienie energii w akumulatorach zużytej na rozpędzenie pojazdu.

6. Wnioski

1. Dopasowanie silnika elektrycznego do współpracy z ogniwem paliwowym wymaga dokładnego przeanalizowania obciążeń pojazdu i możliwości elektrycznego układu napędowego. Wyznaczenie mocy maksymalnej silnika i ogniwa na ok. 60% mocy silnika spalinowego pozwala mieć nadzieję, że taki układ hybrydowy będzie w stanie napędzić pojazd z przyspieszeniami nie gorszymi od układu z silnikiem spalinowym.

2. Podczas projektowania elektrycznych układów napędowych należy zwracać uwagę na dobór zakresów napięć poszczególnych urządzeń: ogniwa paliwowego, silnika elektrycznego i urządzeń przetwarzających lub ustalających własności prądu elektrycznego. Ponieważ charakterystyka ogniwa paliwowego jest niekorzystna z punktu widzenia silnika elektrycznego a zwłaszcza akumulatorów należy wykorzystać w układzie konwerter DC/DC stabilizujący zmiany napięcia w funkcji prądu. Urządzenia te mają swoją sprawność, która w powyższych rozważaniach nie została uwzględniona. Przy natężeniach prądu rzędu 100 A oczywiście podzespoły elektroniczne będą emitowały duże ilości ciepła, które należy odprowadzić do otoczenia.

3. Obciążenia silnika i pojazdu zostały oszacowane na podstawie danych literaturowych. Wydaje się konieczne przeprowadzenie badań rzeczywistego obciążenia silnika w pojeździe w różnych warunkach drogowych: podczas przyspieszania, jazdy z różnymi prędkościami i pokonywania wzniesień. Dopiero znajomość tych warunków obciążenia da dobrą podstawę do oszacowania warunków współpracy ogniwa paliwowego z silnikiem elektrycznym.

4. Pojemność akumulatorów nie jest zbyt wielka i będzie pozwalała na zasilania silnika elektrycznego z pełną mocą przez niespełna 25 minut, przy założeniu, że akumulatory zostaną całkowicie rozładowane. W rzeczywistości, ponieważ napięcie akumulatorów będzie się zmniejszać, możliwość zasilania silnika z pełną mocą przez tak długi czas będzie ograniczona. Dodatkowo, ponieważ do zasilania silnika przewidziano napięcie rzędu 110 V do ich zasilania potrzebna będzie bateria składająca się z 8-10 akumulatorów, których masa nie została w obliczeniach uwzględniona.

Literatura

- [1] Jakubowski, B., Tomiczek, T., *Polski Fiat 126p, budowa, eksploatacja, naprawa*, WKŁ, Warszawa 1981.
- [2] "Nexa™ power module user's manual, MAN5100078, Ballard Power Systems Inc. 2003.
- [3] Ehsani, M., Gao, Y., Gay, S. E., Emadi, A., *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles*, CRC Press, London 2004.
- [4] Rousseau, A., Ahuwahlia, R., Deville, B., Zhang, Q., *Well-to-Wheel analyses of advanced SUV fuel cell vehicles*, SAE International, 01-0415-2003.