

Parametry eksploatacyjne silników spalinowych w pojazdach typu Range Extender

Jerzy Merkisz, Ireneusz Pielecha, Przemysław Borowski

Wstęp

Ciągły rozwój napędów pojazdów samochodowych spowodowany jest dążeniem do uzyskiwania coraz lepszych wskaźników pracy silnika przy jednoczesnym ograniczeniu skażenia środowiska naturalnego człowieka. Ograniczenie niekorzystnego oddziaływania pojazdów na środowisko wiąże się jednocześnie ze zmniejszeniem zużycia paliwa przez pojazdy. Jedną z możliwości redukcji emisji spalin i zużycia paliwa jest stosowanie pojazdów hybrydowych. Ich różnorodność aplikacji powoduje, że są one chętnie stosowanym substytutem typowych pojazdów samochodowych. Ma to szczególne znaczenie w państwach, w których kierowcy odczuwają wymierne korzyści z ich stosowania (rys. 1) w postaci zmniejszenia opłat podatkowych, możliwość wjazdu do centrum miast, bezpłatnego parkowania. Mimo dynamicznego rozwoju rynku tego typu pojazdów w Europie, w Polsce odnotowuje się niewielkie zainteresowanie pojazdami elektrycznymi. Według Instytutu Samar w I połowie 2012 roku zarejestrowano w Polsce tylko 17 pojazdów elektrycznych. Oznacza to spadek o 37%, w porównaniu do analogicznego okresu 2011 roku, w którym zarejestrowano 27 pojazdów. Najwięcej pojazdów według firmy

Samar sprzedał Renault (12 – Kangoo EV), następnie Peugeot (5), Citroen (2) i Mitsubishi (1 – i-MIEV).

Korzystnie prezentuje się sprzedaż pojazdów hybrydowych. W 2011 roku zarejestrowano 897 pojazdów z napędem hybrydowym (dane firmy Samar). Pomimo, że jest to margines rynku samochodowego, to w porównaniu z latami 2007-2009 przyrost jest trzykrotny.

Rozwój pojazdów hybrydowych i elektrycznych wynika z konieczności spełnienia ograniczeń dotyczących emisji dwutlenku węgla. Biorąc pod uwagę rygorystyczne limity emisji w poszczególnych państwach świata, (rys. 2) konieczne jest poszukiwanie rozwiązań e-mobilności. W nurt tych prac oprócz pojazdów hybrydowych i typowych pojazdów elektrycznych wpisują się również pojazdy typu Range Extender (REX). W niektórych państwach lub organizacjach przedstawiono długoterminowe cele ograniczania emisji CO₂ (np. Unia Europejska), natomiast w pozostałych (przedstawionych na rys. 2) zakres ograniczania emisji jest średnioterminowy. Wskazuje to na ograniczone możliwości wprowadzenia nowoczesnych technologii na rynku motoryzacyjnym lub wiąże się z innymi przeszkodami ustawodawczymi.

Wzrost zainteresowania pojazdami elektrycznymi w Polsce doprowadził do podjęcia dyskusji na ten temat w ramach konferencji „2012 International Conference on Electric Vehicles”, która odbyła się 9 lipca 2012 roku na Politechnice Warszawskiej. Poinformowano wówczas, że powstało opracowanie pt. „Uwarunkowania wdrożenia zintegrowanego systemu e-mobilności w Polsce” [3]. Zakłada ono m.in. rekomendację działań, których realizacja ułatwiałaby promowanie i wdrażanie w Polsce możliwości powszechniejszego korzystania z pojazdów elektrycznych.

Wśród rekomendacji znalazły się m.in.: [6]

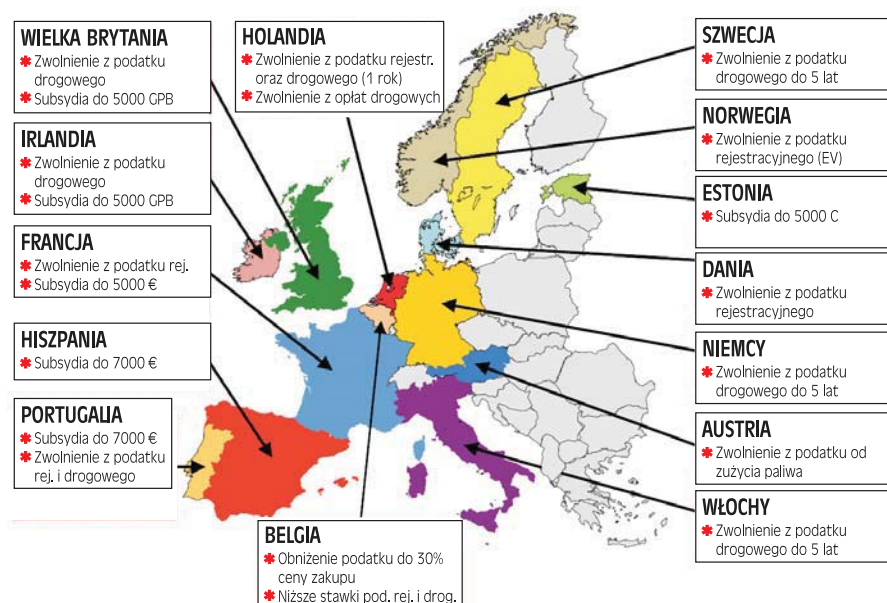
- ❑ zachęty podatkowe (w tym zmiana systemu podatkowego dotyczącego elektrycznych samochodów osobowych: akcyza, VAT, podatek ekologiczny),
- ❑ dopłaty dla nabywców pojazdów elektrycznych,
- ❑ konkurencyjne ceny detaliczne energii elektrycznej,
- ❑ preferencje przy zamówieniach publicznych,
- ❑ bezpłatne poruszanie się pojazdów elektrycznych po drogach publicznych,
- ❑ bezpłatne parkowanie samochodów elektrycznych w strefie płatnego parkowania w miastach.

Spełnienie wszystkich postulatów zamieszczonych w tym dokumencie wymaga wielu zmian w polskim ustawodawstwie.

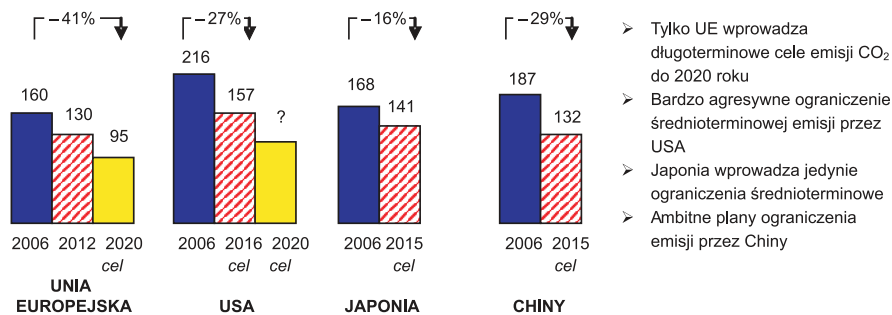
1. Charakterystyka pojazdów typu Range Extender

Pojazdy typu Range Extender to napędy, w których połączono niewielki silnik spalinowy z generatorem prądotwórczym. Układ taki doładowuje akumulatory w przypadku niewystarczającej wartości energii elektrycznej w nich zgromadzonej. Ze względu na ograniczone pole pracy silnika spalinowego w pojazdach Range Extender, otrzymuje się bardzo dużą ich wydajność. Z reguły stosuje się niewielkie silniki, których moc powinna być nieco większa od zapotrzebowania generatora. Schemat układu napędowego przedstawiono na rys. 3.

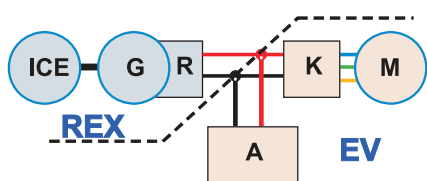
Napęd w takim schemacie może zostać podzielony na układ czysto elektryczny (EV) i jednostkę Range Extender (REX).



Rys. 1. Promocje napędów elektrycznych w wybranych państwach Europy [8]



Rys. 2. Obecne i przyszłe limity emisji dwutlenku węgla [g/km] przez pojazdy samochodowe w wybranych krajach świata [12]

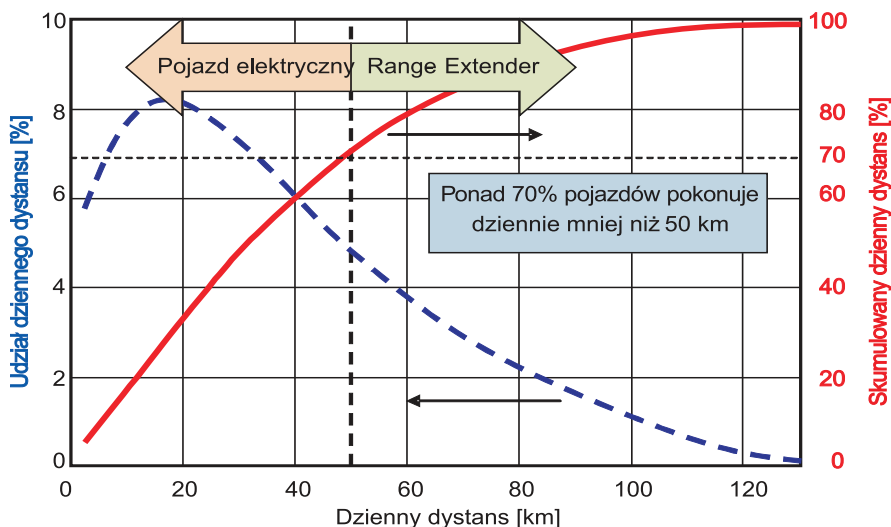


Rys. 3. Schemat układu napędu pojazdu typu Range Extender [10]

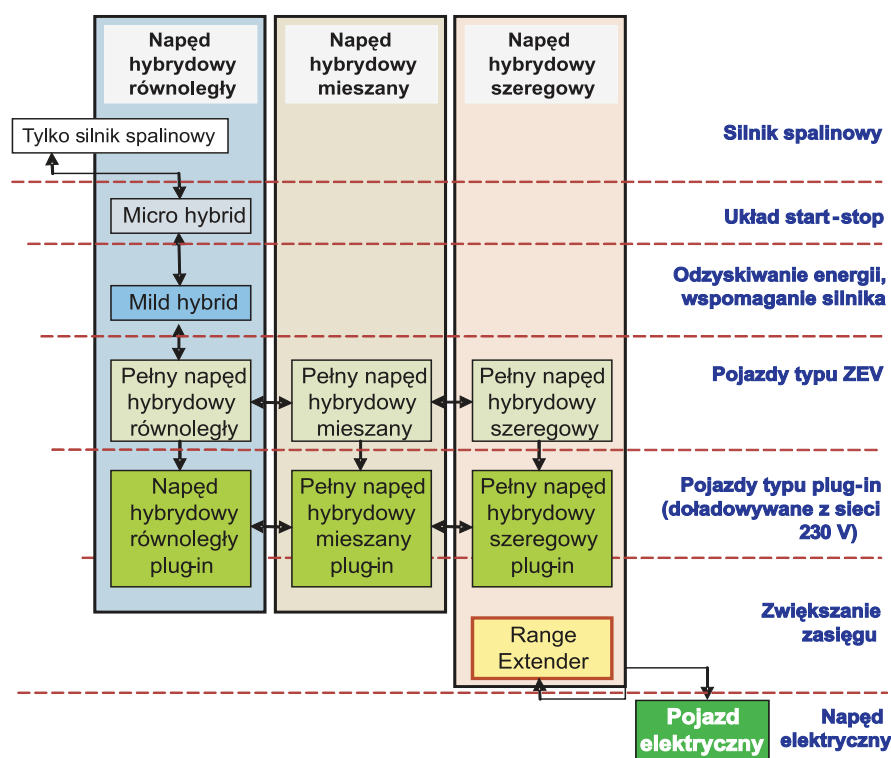
W układzie elektrycznym występuje silnik elektryczny (M), kontroler (K) oraz akumulatory (A). Układ REX składa się z silnika spalinowego (ICE) oraz generatora (G) z dołączonym prostownikiem prądu (R).

Samochody typu Range Extender osiągają znaczną przewagę nad pojazdami elektrycznymi szczególnie w uzyskiwanym zasięgu. W wielu publikacjach (np. [2, 4]) wspomina się, że zasięg do 50 km jest pokonywany przez 70% pojazdów (rys. 4). Przy zwiększaniu tego zasięgu możliwe jest wykorzystanie pojazdów typu Range Extender. Wynika z tego, że pojazdy typu REX mogą być stosowane jako tzw. główny środek transportu, niezależnie od prędkości jazdy pojazdem. Typowe pojazdy elektryczne nie zapewniają jeszcze takiego zasięgu przy zwiększonych prędkościach jazdy. Wraz z jej zwiększeniem drastycznie zmniejsza się zasięg pojazdu elektrycznego.

Pojazd typu Range Extender ze względu na budowę układu napędowego jest obecnie trudny do sklasyfikowania w topografii napędów hybrydowych i elektrycznych. Uważa się, że jest to pojazd hybrydowy – klasyfikuje się go do pojazdów hybrydowych o napędzie szeregowym (rys. 5). Nie jest to jednak całkowicie słuszne, gdyż wtedy silnik spalinowy powinien pracować w pełnym zakresie jazdy pojazdu (lub w jego znacznej części), generując energię elektryczną. Pojazdy typu REX zostały stworzone jako układy elektrycznego napędu, a tylko w uzasadnionych przypadkach wykorzystują silnik spalinowy do doładowania



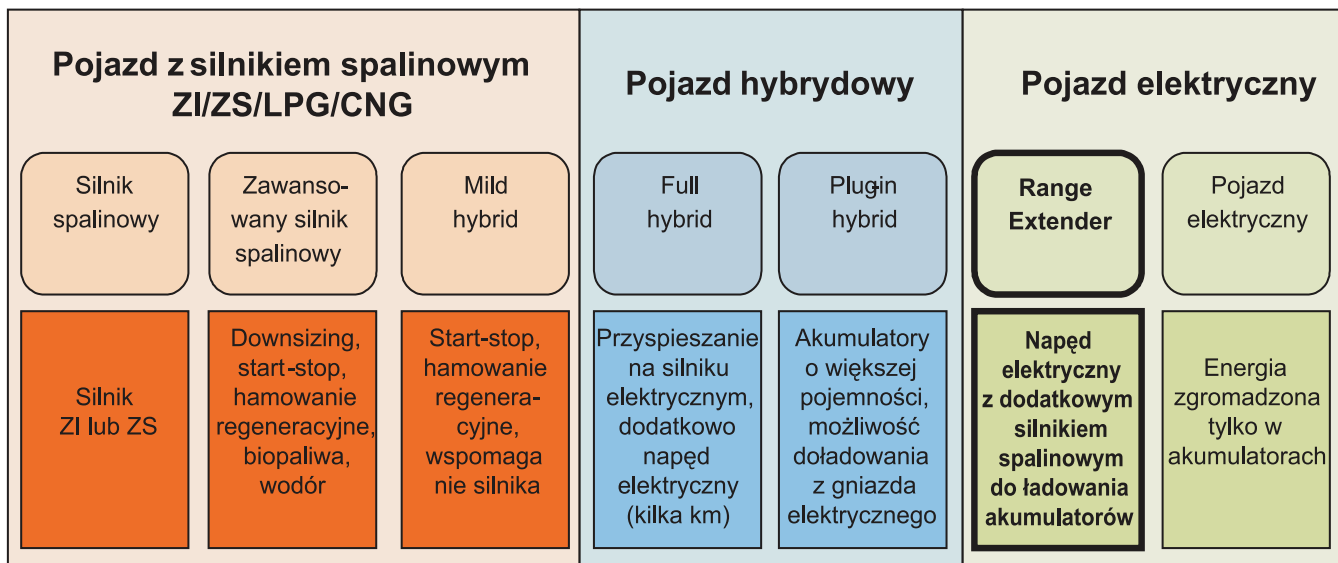
Rys. 4. Dzienny i skumulowany zasięg pojazdów elektrycznych i Range Extender [2]



Rys. 5. Topografia napędów hybrydowych z uwzględnieniem napędów typu Range Extender [13]

akumulatorów. Z tego względu powinny być zaliczane do grupy pojazdów elektrycznych z dodatkowym silnikiem spalinowym zwiększającym zasięg tych pojazdów (Range Extender) – rys. 6. Należy więc stwierdzić, że głównym wyznacznikiem klasyfikacji jest wielkość zastosowanych akumulatorów i sposób sterowania układem napędowym oraz przepływem energii (nie tylko elektrycznej).

Obecnie na rynku pojazdów hybrydowych i elektrycznych pojawiają się różne rozwiązania napędów aspirujące do grona napędów typu Range Extender. Niektóre



W tych pojazdach wymagane są akumulatory

Rys. 6. Technologie zmierzające do elektryfikacji pojazdów [8]

z nich mają niewielki silnik spalinowy, inne – silnik spalinowy, który mógłby samodzielnie napędzać koła pojazdu (rys. 7). Pojazdy typu REX można podzielić na dwie kategorie: szeregowy REX o małym zasięgu (np. Audi A1 e-tron) oraz o większym zasięgu szeregowo-równoległy REX (oznaczane jako REEV/PHEV – Range Extender Electric Vehicle/Parallel Hybrid Electric Vehicle). Małe pojazdy REX o szeregowym układzie napędowym zasilane są silnikami spalinowymi o mocy 10-20 kW. Jednak ich zastosowanie jest ograniczone ze względu na niewielki zasięg. Realny wzrost zasięgu prowadzi do znacznego zwiększenia zużycia paliwa, co

jest spowodowane dwukrotną konwersją energii (ICE → Gen → Akum → Siln. el.). W przypadku drugiej grupy możliwe jest ograniczenie wysokiego zużycia paliwa w układzie szeregowym przez stosowanie napędu równoległego. Jednak w przypadku dużych prędkości jazdy i pracy silnika spalinowego, nieistotna jest praca silnika elektrycznego, gdyż jego rolę może przejąć generator prądu.

Ze względu na zróżnicowanie systemów REX oraz duże możliwości wykorzystania silników spalinowych w tych układach, poniżej scharakteryzowano kilka wybranych silników spalinowych stosowanych w takich konstrukcjach.

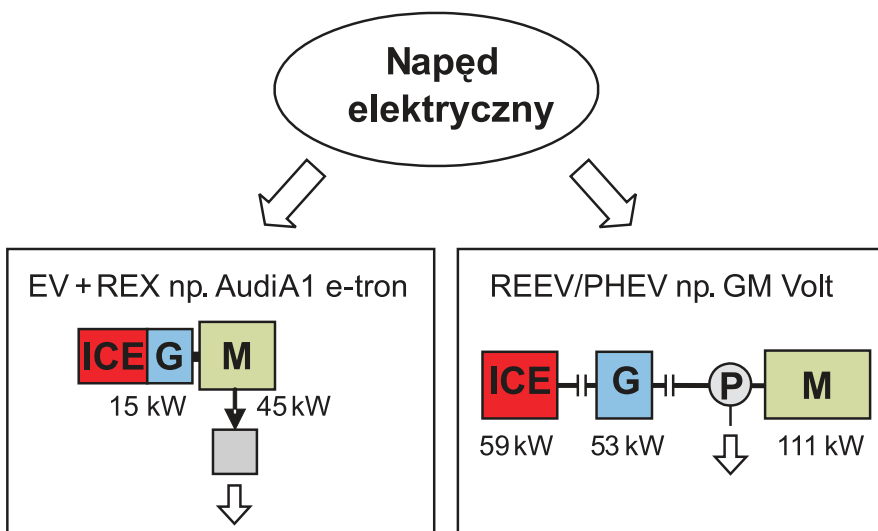
2. Charakterystyka silników spalinowych

Analizie poddano silniki spalinowe obecnie produkowanych pojazdów typu REX oraz będących w fazie badawczej lub przedprodukcyjnej. Scharakteryzowano dwa silniki firmy AVL, trzy silniki firmy Lotus oraz po jednym firm GM (zastosowany w GM Volt), Kolbenschmidt Pierburg i Mahle (tab. 1).

Z zestawienia wynika, że analizowane pojazdy typu REX wykorzystują silniki spalinowe o pojemnościach od 254 cm³ do 1400 cm³. Oznacza to znaczną rozpiętość pojemności skokowych przy jednocześnie zróżnicowanych liczbach cylindrów (od 1 do 4). Wszystkie nieprodukcyjne rozwiązania (poza GM Volt) stosują tzw. downsizing, zmniejszając liczbę cylindrów (od 1 – firma AVL do 3 cylindrów – firma Lotus). Szeroką popularność zdobywają jednocześnie silniki dwucylindrowe (cztery analizowane konstrukcje).

3. Wskaźniki eksploatacyjne silników spalinowych stosowanych w pojazdach Range Extender

Zróżnicowana pojemność skokowa oraz liczba cylindrów powodują konieczność określenia wskaźników eksploatacyjnych tych silników spalinowych. Z tego względu wyznaczono podstawowe wskaźniki, jak średnie ciśnienie efektywne p_e oraz jednostkowe zużycie paliwa. Analiza prędkości



Rys. 7. Różne koncepcje rozwiązania napędu typu Range Extender [2]

Tab. 1.

Parametry techniczne silników stosowanych w układach REX [1, 5, 7, 9, 11, 14-16]

Wielkość	Pojazd	AVL	AVL	GM	KSPR	Lotus	Lotus	Lotus	Mahle
Zasilanie		benzyna	benzyna	benzyna	benzyna	benzyna/etanol/ metanol	benzyna/etanol/ metanol	benzyna/etanol/ metanol	benzyna
Pojemność [cm ³]		254	570	1400	799	866	1192,8	1299	900
Układ cyl.		1/wankel	R2	R4 DOHC	V2-90 OHV	R2	R3 2V	R3 2V	R2 SOHC 2V
Ne [kW]		25	25	63	30	23	36,8	55	30
		@ 7000 min ⁻¹	@ 5000 min ⁻¹	@ 4800 min ⁻¹	@ 4500 min ⁻¹	@ 3500 min ⁻¹	@ 3500 min ⁻¹	@ 3500 min ⁻¹	@ 4000 min ⁻¹
Ne gen. [kW]		15	15	54	2 × 15	20		50	

obrotowych silników spalinowych wskazuje na to, że silniki pojazdów typu REX mają maksymalne prędkości obrotowe w zakresie 4000-5000 obr/min (rys. 8a). Jest to nieco poniżej maksymalnej prędkości obrotowej Toyoty Prius. Jedynie silnik AVL w konfiguracji Wankla ma większą prędkość obrotową (7000 obr/min), jednakże charakteryzuje się największym jednostkowym zużyciem paliwa (rys. 8b). Masy silników osiągają wartość około 60 kg, jedynie silnik czterocylindrowy znacznie tę wartość przekracza (rys. 8c). Jego masa jest zbliżona do silnika Toyoty Prius. Średnie ciśnienia efektywne są dość duże, co świadczy o wysileniu tych jednostek (rys. 8d). Wartość wskaźnika p_e dla Toyoty Prius mimo znacznej pojemności silnika jest niewielka, gdyż silnik ten pracuje w cyklu Atkinsona.

Zmniejszenie liczby cylindrów silników stosowanych w pojazdach typu Range

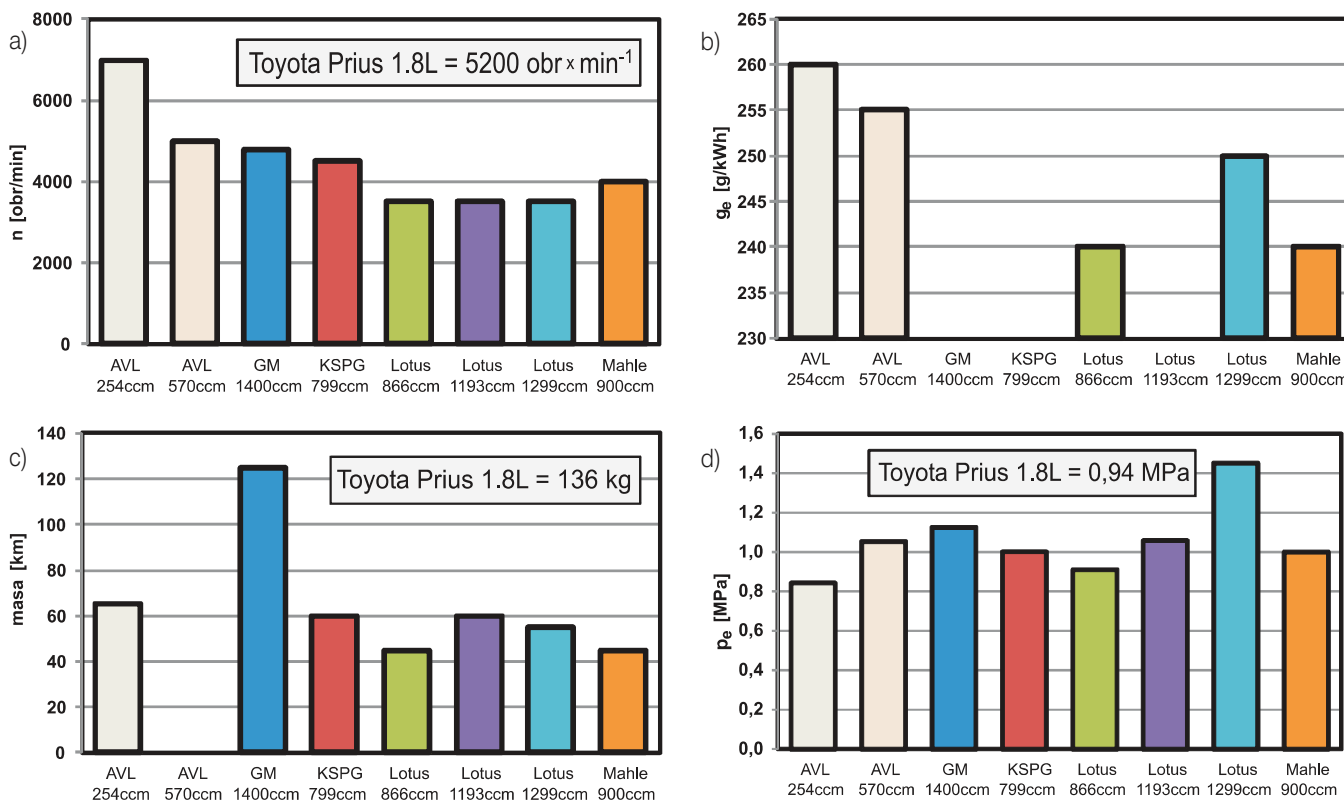
Extender powoduje, że pojemność jednego cylindra zawiera się w przedziale 300-400 cm³. Wskazuje to na typowe pojemności stosowane obecnie w silnikach (rys. 9a). Jednostki te są w znacznym stopniu jednokowo obciążone, gdyż moc jednostkowa (z jednostki pojemności silnika) zawiera się w przedziale 30-40 kW/dm³. Górna granica stanowi typową wartość dla silnika Toyoty Prius (40,6 kW/dm³). Należy zauważyć, że silnik firmy KSPG uzyskuje większą moc jednostkową niż silnik Lotus o większej pojemności (rys. 9b). Jest to spowodowane większą o 1000 obr/min prędkością obrotową mocy maksymalnej tego pierwszego.

Istotny jest również wskaźnik mocy silnika spalinowego do mocy generatora. W większości przypadków silnik spalinowy pokrywa zakres mocy z zapasem 20-60%. Jedynie w przypadku konstrukcji firmy Kolbenschmidt Pierburg wskaźnik ten wynosi 1.

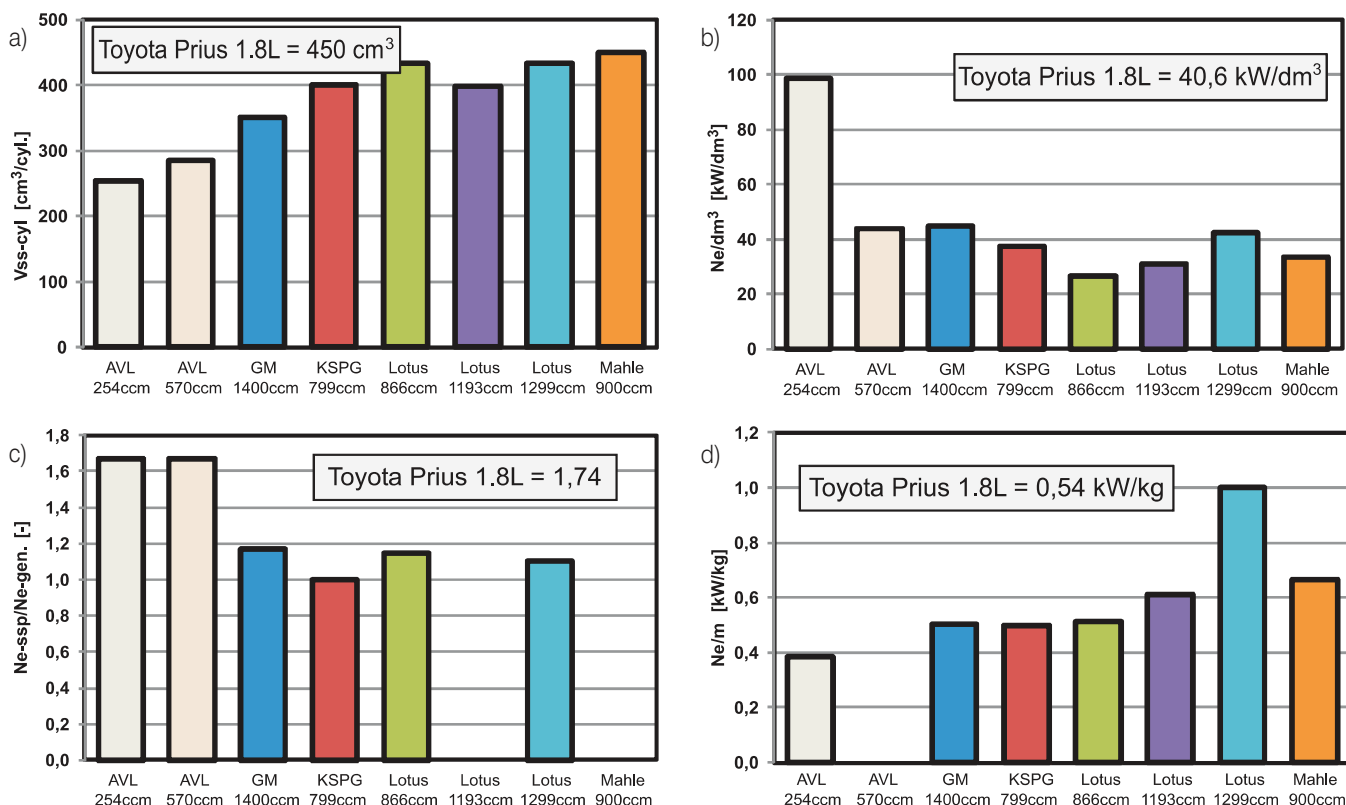
Oznacza to, że silnik spalinowy musi pracować w warunkach znamionowych w celu zapewnienia maksymalnej mocy generatora. Spowoduje to zapewne zwiększenie przebiegowego zużycia paliwa. Silnik Lotus (o pojemności 1299 cm³) wykazuje najlepszy wskaźnik mocy do masy. Oznacza to, że z każdego 1 kg masy uzyskano 1 kW mocy silnika (silnik 3-cylindrowy). Większość silników ma ten wskaźnik na poziomie 0,5 – podobnie jak silnik Priusa, którego wielkość tego wskaźnika jest tylko nieznacznie większa.

Zakończenie

Ograniczenie emisji dwutlenku węgla związane jest z rozwojem zarówno napędów hybrydowych jak i elektrycznych. Wśród tej grupy znaczną rolę zaczyna odgrywać napęd typu Range Extender. Silniki spalinowe tych pojazdów budowane są z wykorzystaniem



Rys. 8. Podstawowe wielkości charakteryzujące silniki pojazdów Range Extender [1, 5, 7, 9, 11, 14-16]



Rys. 9. Wskaźniki eksploatacyjne silników stosowanych w pojazdach Range Extender

pozytywnych efektów downsizingu, wykazując tendencję do ograniczania liczby cylindrów bez zmiany mocy tych jednostek. Wskaźniki eksploatacyjne tych silników mimo ich rozbieżności konstrukcyjnej są zbliżone do siebie w zakresie mocy jednostkowej i mocy właściwej (odniesionej do masy silnika). Należy spodziewać się coraz większego upowszechnienia pojazdów typu Range Extender, a co się z tym wiąże również silników spalinowych o zmniejszonej liczbie cylindrów. Układ taki (dwucylindrowy – rzędowy lub widlasty) nie oznacza pogorszenia wskaźników eksploatacyjnych silnika.

Bibliografia

- Atzwanger M., Hubmann Ch., Schoeffmann W., Kometter B. i in., *Two-cylinder gasoline engine concept for highly integrated Range Extender and hybrid powertrain applications*. SAE Technical Paper 2010-32-0130.
- Bacher C., Hohenberg, G., *With electricity to ZEV? Potential and limitations of electric mobility*. SAE Technical Paper 2011-37-0011.
- Bassett M., Hall J., OudeNijeweme D., Darkes D. i in., *The development of a dedicated Range Extender engine*. SAE Technical Paper 2012-01-1002.
- Fischer R., *Die Elektrifizierung des Antriebs – vom Turbohybrid zum Range Extender*. 30. Internationales Wiener Motorsymposium 2009.
- Fraidl G.K., Beste F., Kapus P.E., Korman M. i in., *Challenges and solutions for Range Extenders – from concept considerations to practical experiences*. SAE Technical Paper 2011-37-0019.
- Ministerstwo Gospodarki, Departament Innowacji i Przemysłu *Uwarunkowania wdrożenia zintegrowanego systemu e-mobilności w Polsce*. Warszawa, 06.2012. www.mg.gov.pl
- Pischinger M., Tomazic D., Wittek K., Esch H.-J. i in., *NVH Range-Extender application with a small V-2 engine – Based on a new vibration compensation system*. SAE Technical Paper 2012-32-0081.
- Pratt A., *Electric vehicle demand. Global forecast through 2030*. 2011. www.polk.com
- Rust A., Graf B.J., *NVH of electric vehicles with Range Extender*. SAE Technical Paper 2010-01-1404.
- Schacht H., Schoegl O., Bretterklieber N., Kirchberger R. i in., *Low cost Range Extender technology for hybrid electric city scooters*. SAE Technical Paper 2012-32-0083, 2012.
- Turner J., Blake D., Moore J., Burke P. i in., *Lotus Range Extender Engine*. SAE Technical Paper 2010-01-2208.
- Valentine-Urbschat M., Bernhart W., *The future drives electric. Roland Berger Strategy Consultants*. Powertrain 2020, 2009. www.rolandberger.com
- Vinot S., *Hybrid and electric vehicle development*. Panorama 9/2012, www.ifpennergie-snouvelles.com
- www.gm-volt.com
- www.greencarcongress.com
- www.lotuscars.com
- www.mahle-powertrain.com

Autorzy:

prof. dr hab. inż. **Jerzy Merkisz** – Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, Instytut Silników Spalinowych i Transportu, Zakład Silników Spalinowych, jerzy.merkisz@put.poznan.pl
 dr hab. inż. **Ireneusz Pielecha** – Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, Instytut Silników Spalinowych i Transportu, Zakład Silników Spalinowych, ireneusz.pielecha@put.poznan.pl
 mgr inż. **Przemysław Borowski** – Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, Instytut Silników Spalinowych i Transportu, Zakład Silników Spalinowych, przemyslaw.t.borowski@doctorate.put.poznan.pl