

Piotr PIĄTKOWSKI, Ryszard LEWKOWICZ

## ANALIZA EFEKTYWNOŚCI ZASTOSOWANIA NIEKONWENCJONALNYCH SYSTEMÓW NAPĘDOWYCH W POJAZDACH SAMOCHODOWYCH

W artykule przedstawiono współczesne kierunki rozwoju pojazdów w odniesieniu do barier oraz możliwości zastosowania pojazdów z napędem elektrycznym w miejsce pojazdów z silnikami spalinowymi. Przedstawiono także problem związany z systemem zarządzaniem ładowaniem baterii do samochodów elektrycznych. W pracy przedstawiono także odniesienie systemu ładowania baterii samochodów do istniejącej infrastruktury energetycznej oraz problemów z integracją dostępności energii elektrycznej w odniesieniu do zmiennego dobowego zapotrzebowania na energię do ładowania baterii. Jakkolwiek, jednym z celów pracy było zweryfikowanie możliwości rozwoju rynku samochodów elektrycznych w zależności od ich rodzaju w porównaniu do pojazdów z konwencjonalnym systemem napędowym. Wykazano, że w obecnym czasie całkowita efektywność ekonomiczna stanowi o możliwych kierunkach rozwoju rynku samochodów elektrycznych.

### WSTĘP

Obecnie transport znacząco wpływa na wzrost ekonomiczny oraz znaczenie gospodarcze każdego kraju. Zastosowanie w transporcie produkowanych dóbr efektywnych ekonomicznie oraz ekologicznie pojazdy pozwalają uzyskać niższe ceny ich produkcji oraz dystrybucji [16, 19]. Pozwala to producentom pozyskać nowe rynki zbytu poprzez zwiększenie dostępności ekonomicznej ich wyrobów dla różnych warstw społecznych w różnych regionach i krajach. Relacje pomiędzy kosztami produkcji dóbr materialnych, ich dystrybucji oraz ich użytkowania w wielu przypadkach są uzależnione od zużycia paliwa przez pojazdy wykorzystywane do ich transportu [17]. Z drugiej strony same pojazdy często postrzegane są przez społeczeństwo jako określenie statusu ich członków oraz wskazują na ich niezależność komunikacyjną dostosowaną do ich codziennych potrzeb.

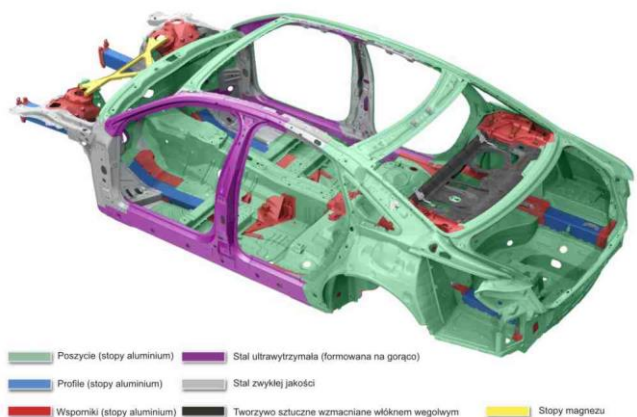
Większość z pojazdów wyposażonych jest w silniki spalinowe o zapłonie iskrowym (ZI) lub o zapłonie samoczynnym (ZS). Silniki tych pojazdów zasilane są paliwami węglowodorowymi, a uzyskiwana energia mechaniczna niezbędna do napędu tych pojazdów pochodzi ze spalania wspomnianych paliw. Proces spalania paliw węglowodorowych powoduje powstawanie spalin. W skład spalin oprócz składników powietrza atmosferycznego wchodzi; dwutlenek węgla, tlenki węgla, tlenki siarki (stanowiącej zanieczyszczenie paliwa), tlenki azotu oraz cząstki stałe (zarówno w odniesieniu do ich liczby - PN, jak i wielkości - PM).

Współczesne decyzje polityczne (głównie ze strony Komisji Europejskiej - EU oraz amerykańskiej agencji ochrony środowiska - EPA) dotyczą zaostrzenia limitów emisji spowodowanych przez silniki stosowane w pojazdach. Takie działania istotnie wpływają na trudności produkcyjne związane z koniecznością spełnienia coraz bardziej rygorystycznych norm emisji oraz sprawności silników, a finalnie na koszt produkcji pojazdów.

Jedną z możliwości pogodzenia efektywności ekonomicznej transportu wraz ze zmniejszeniem intensywności oddziaływania środowiskowego wydaje się być zastosowanie pojazdów z napędem elektrycznym. Takie źródło energii mechanicznej może być jednocześnie „czyste” ekologicznie jak efektywne.

### 1. WŁAŚCIWOŚCI SYSTEMÓW NAPĘDOWYCH

Właściwości użytkowe pojazdów wynikają głównie z konstrukcji, technologii wytwarzania oraz użytych materiałów do ich budowy. Dobór cech determinujących te właściwości wynika często z procesów optymalizacji dokonywanych przez producentów pojazdów. Obecnie, w procesach tych główną rolę odgrywa proces zmniejszenia masy własnej pojazdu z zachowania właściwości wytrzymałościowych oraz obniżeniu kosztów produkcji, co sprzyjałoby wzrostowi przychodów uzyskiwanych przez producentów pojazdów. Przykład zastosowań materiałowych (głównie stopów aluminium) w konstrukcji nadwozia samonośnego przedstawiono na rys. 1.

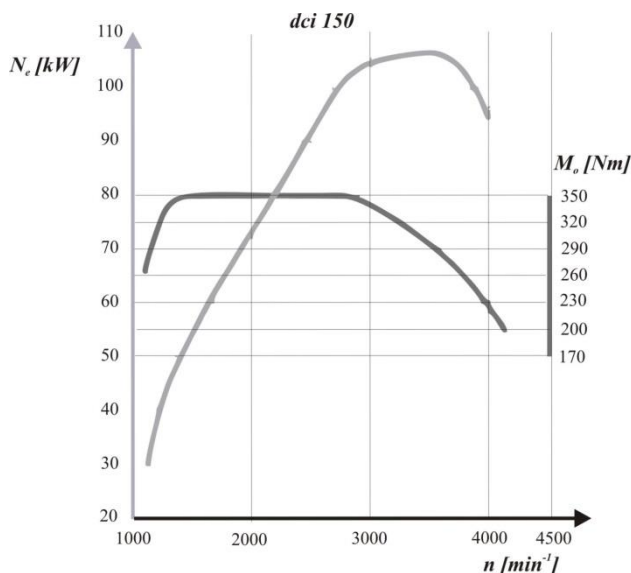


Rys. 1. Schemat struktury samonośnej nadwozia samochodu AUDI A8 wersja 04/2017 [21]

Przedstawione cele produkcji pojazdów są biegunowo odmienne w obszarze swoich wartości optymalnych, co niekoniecznie przekłada się na efekt kosztów produkcji oraz finalnej ceny pojazdu. W wielu przypadkach zastosowane technologie w produkcji pojazdów ściśle związane są z zasobnością finansową ich przyszłych użytkowników, a cele środowiskowe zostają pominięte.

Jednak w większości przypadków właściwości techniczno-użytkowe pojazdów związane są bezpośrednio z wartościami param-

trów określających parametry operacyjne pracy silników w nich zastosowanych. Wśród tych parametrów można wyróżnić: moment obrotowy ( $M_o$ ), moc użyteczną ( $N_e$ ), prędkość obrotową wału korbowego silnika ( $n$ ) oraz jednostkowe zużycie paliwa (parametr porównawczy silników). Zmiany wartości tych parametrów przedstawiane są za pomocą tzw. charakterystyki zewnętrznej silnika. Charakterystyka ta uzyskiwana jest zazwyczaj na hamowni silnikowej w warunkach pełnego otwarcia przepustnicy (TWO) – w warunkach pełnego obciążenia silnika. Przykład takiej charakterystyki dla silnika M9R produkowanego przez koncern Renault-Nissan przedstawiono na rys. 2.



**Rys. 2.** Charakterystyka zewnętrzna silnika Renault-Nissan typu M9R o mocy nominalnej 110 kW/3750 min<sup>-1</sup>, maksymalny moment obrotowy 320 Nm/1250-2800 min<sup>-1</sup> [22]

Moment obrotowy stanowi jeden z użytecznych parametrów pracy silnika i jest odpowiedzialny za wartość uzyskiwanej siły napędowej na kołach osi napędowej a w tym także za jego właściwości trakcyjne (np., przyspieszenie, zdolność do pokonywania wzniesie). Moc użyteczna niezbędna jest do tego aby pojazd mógł osiągnąć zakładaną prędkość poprzez równowagę mocy oporów ruchu ( $N_r$ ). Dla stałej prędkości ruchu oraz poziomej drogi moc oporów ruchu zależy głównie od mocy oporów toczenia oraz mocy oporów powietrza co przedstawiono za pomocą równania (1):

$$N_r = (f_t Q + 0,5\rho_a c_x A v^2)v \quad (1)$$

gdzie:

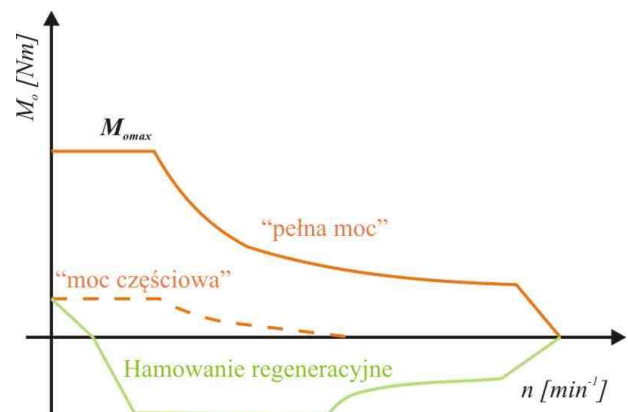
- $f_t$  – współczynnik oporów toczenia,
- $Q$  – ciężar pojazdu N,
- $\rho_a$  – gęstość powietrza kg/m<sup>3</sup>,
- $c_x$  – współczynnik oporów powietrza,
- $A$  – pole rzutu powierzchni czołowej pojazdu m<sup>2</sup>,
- $v$  – prędkość pojazdu m/s,

Zarówno moc jak i moment obrotowy silnika spalinowego wynikają bezpośrednio z ciśnienia uzyskiwanego nad tłokiem w cylindrze silnika w wyniku spalania paliwa. Stąd uzyskanie energii mechanicznej poprzez związany z tym proces spalania paliwa wiąże się także z zanieczyszczeniem powietrza. Ponadto, praca silnika spalinowego oprócz emisji spalin wiąże się także z emisją akustyczną – hałasem.

Każdy silnik spalinowy może zostać opisany w celach porównawczych za pomocą wskaźników pracy takich jak: emisja jednostkowa, moc jednostkowa, tłokowy wskaźnik mocy, jednostkowe zużycie paliwa, średnia prędkość tłoka, sprawność ogólna, itd.

Współczesne silniki spalinowe często charakteryzują się relatywnie wysoką wartością uzyskiwanej sprawności ogólnej silnika, które może wynosić powyżej 40%, wysoką wartością mocy jednostkowej (np. 95kW/dm<sup>3</sup>) zachowując cechy pojazdu o niskiej (LEV) oraz ultra niskiej (ULEV) jednostkowej emisji spalin [20]. Pomimo tych zalet, silniki spalinowe nie wydają się być przyszłością dla napędu pojazdów szczególnie w odniesieniu do obszarów miejskich, gdzie współcześnie obserwuje się tendencję do zamykania obszarów ruchu dla pojazdów wyposażonych w silniki spalinowe.

Jak zostało przedstawiono na rys. 2, moment obrotowy silnika spalinowego nie może być odbierany przy zerowej (lub bliskiej zeru) prędkości obrotowej wału korbowego silnika. To oznacza, że układ napędowy pojazdu wyposażonego w silnik spalinowy wymaga stosowania sprzęgła, skrzyni biegów i przekładni głównej. Zespoły te pozwalają na realizację dwóch zasadniczych funkcji układu przeniesienia napędu – kinematycznej oraz dynamicznej. Funkcja kinematyczna pozwala dostosować wartość prędkość obrotowej silnika do prędkości obrotowej kół jezdnych, a funkcja dynamiczna pozwala dostosować wartość siły napędowej do zadanych warunków ruchu pojazdu. Całkiem odmienną charakterystykę posiadają silniki elektryczne. W tych silnikach maksymalny moment obrotowy dostępny jest od niemal zerowej prędkości obrotowej wirnika silnika. Przykład charakterystyki momentu obrotowego maszyny elektrycznej z funkcją odzysku energii (KERS – Kinetic Energy Recovery System) przedstawiono na rys. 3.



**Rys. 3.** Charakterystyka prędkościowa silnika elektrycznego z funkcją odzysku energii

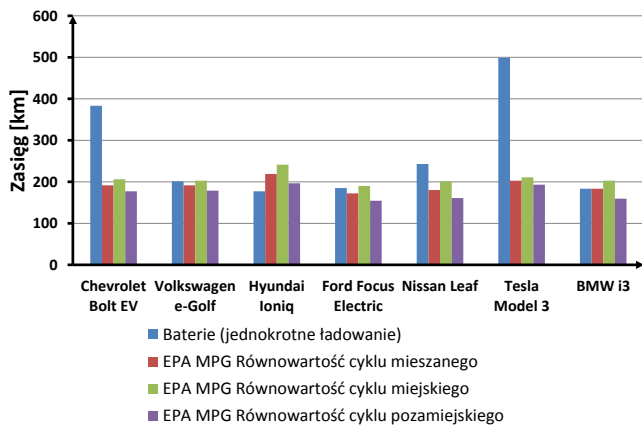
Zależność moment obrotowy od prędkości obrotowej wirnika silnika elektrycznego (rys.3) pozwala stwierdzić, że silnik elektryczny posiada „lepsze” cechy w odniesieniu do zastosowania go do napędu pojazdów. Opinia ta wynika z dostępności maksimum momentu już przy zerowej prędkości obrotowej wirnika silnika, a możliwość wykorzystania silnika jako generatora energii w fazie hamowania [6] znacząco poprawia status silników elektrycznych, gdzie przy silniku spalinowym energia kinetyczna jest bezpowrotnie tracona.

Dziś można zaobserwować dwa główne rodzaje barier dla rozwoju rynku samochodów elektrycznych, które istotnie wpływają na rozwój pojazdów z napędem elektrycznym [15].

Pierwszy rodzaj barier dotyczy uzyskiwanych zasięgów przez samochody elektryczne. W odniesieniu do większości dostępnych na rynku samochodów w pełni elektrycznych (BEV – Battery Electric Vehicle) zasięg ten zawiera się w przedziale pomiędzy 100, a 400 km na jednym pełnym ładowaniu akumulatorów (rys. 4). Stąd potencjalni użytkownicy obawiają się czy ich pojazd zapewni im bezproblemowy powrót do miejsca zamieszkania.

Drugi rodzaj bariery związany jest z ceną współcześnie dostępnych pojazdów. Ten „walor” w połączeniu z brakiem zachęty ze

strony ustawodawcy nie sprzyja rozwojowi rynku samochodów elektrycznych, a na ich zakup decydują się nieliczni. Tym nie mniej można zaobserwować w Europie, że rządy niektórych państw (np. Niemiec) zmieniają nastawienie do polityki fiskalnej i zachęcają do wycofania pojazdów z silnikami spalinowymi na rzecz pojazdów z napędem elektrycznym. Dotyczy to jednak społeczeństw o wyższych od średniej europejskiej dochodach gospodarstw domowych.



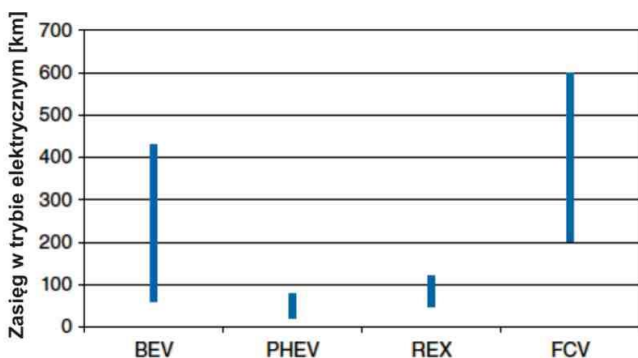
**Rys. 4.** Zasięg samochodów elektrycznych – deklarowany i rzeczywisty w cyklu jeżdżym

Oprócz samochodów elektrycznych, dziś odstępną na rynku są także samochody z napędem hybrydowym (HEV – Hybrid Electric Vehicle). Układ ten stanowi połączenie silnika spalinowego (najczęściej ZI) oraz silnika elektrycznego. System napędowy może pracować w kilku wariantach pracy: jako w pełni elektryczny oraz częściowo elektryczny i częściowo konwencjonalny lub tylko konwencjonalny. Ponadto pojazdy z napędem hybrydowym mogą także realizować funkcję odzysku energii podczas hamowania. Napęd takiego pojazdu może być zorganizowany jako szeregowy, równoległy lub mieszany.

Współczesna generacja pojazdów typu HEV pozwala także na ładowanie akumulatorów ze źródeł zewnętrznych (sieci). Tego typu pojazdy określane są mianem Plug-in-HEV (PHEV). Standardowy zasięg tych pojazdów tylko z wykorzystaniem silników elektrycznych zawiera się w przedziale pomiędzy 30 do 60 km.

Niektórzy producenci pojazdów (np. Opel, Chevrolet) opracowali system napędowy który pozwolił na zwiększenie zasięgu pojazdów z napędem elektrycznym (REX – Range Extended).

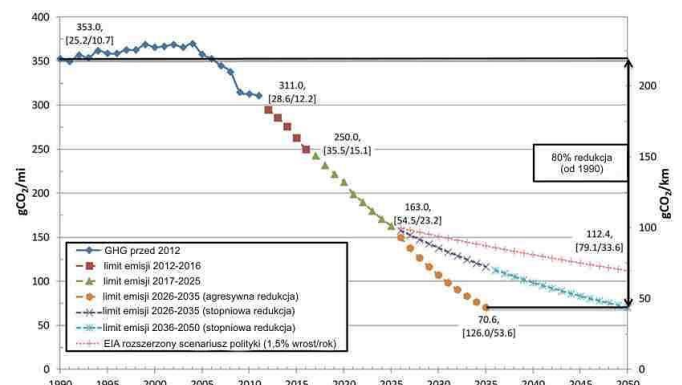
Ostatnią grupę pojazdów z napędem elektrycznym stanowią pojazdy, gdzie źródłem energii elektryczny stanowią ogniwa paliwowe (FCV – Fuel Cell Vehicle). Ogniwa paliwowe tych pojazdów zasilane są najczęściej za pomocą wodoru. Taki system zasilania pozwala uzyskać znacznie większy zasięg samochodu elektrycznego nawet do 600 km – rys.5.



**Rys. 5.** Zasięg pojazdów w trybie elektrycznym [1]

Samochody elektryczne (EV) powinny obecnie spełniać wymagania w zakresie swojej efektywności i zasięgu przede wszystkim w odniesieniu do terenów miejskich i podmiejskich, gdzie zagęszczeniu ludności wpływa istotnie na liczbę pojazdów oraz liczbę pojedynczych przejazdów. Współcześnie samochody elektryczne występują jako małe samochody osobowe lub jako drugi pojazd w rodzinie, jako samochody rodzinne średniej klasy, samochody klasy wyższej, samochody dostawcze, samochody ciężarowe, autobusy oraz pojazdy jednośladowe (motocykle i skutery). Taka paleta pojazdów pozwala spełnić większość oczekiwań transportowych mieszkańców miast w zakresie ich mobilności osobistej, jak i w odniesieniu do transportu towarów.

Współczesna polityka transportowa wskazuje, że w niedalekiej przyszłości (perspektywa kilkunastu lat), że liczba pojazdów wyposażonych w silniki spalinowe istotnie się zmniejszy. Może być to uzyskane przez zwiększenie restrykcji w zakresie zużycia paliwa oraz emisji dwutlenku węgla (GHG). Przykład zmian w zakresie limitów emisji dwutlenku węgla w prognozach dla pojazdów użytkowych przedstawiono na rys. 6.



**Rys. 6.** Przeszłe i prognozowane standardy emisji dwutlenku węgla (GHG) przez silniki samochodów użytkowych – na podstawie informacji EIA – Energy Information Administration [14]

Kierunki zmian decyzji politycznych oraz wymagań ochrony środowiska (rys.6) pozwalają stwierdzić, że elektryfikacja pojazdów stanowić będzie jedyną drogę w kierunku redukcji zużycia energii pierwotnej. W miejsce konwencjonalnych paliw będą stosowane paliwa pochodzące ze źródeł odnawialnych, gdzie silniki elektryczne będą pełniły główną rolę w napędzie pojazdów [12]. Ponadto, należy się spodziewać większego zużycia paliw gazowych jako produktów ubocznych dla procesów technologicznych oraz paliw pochodzących z odpadów (głównie biogaz, bioetanol, bioestry). W tych jednak przypadkach istnieje obawa, że niektórzy producenci żywności przestawią się na produkcję upraw roślin na rzecz przemysłu naftowego, co z punktu widzenia produkcji żywności może być uznane za nieefektywne.

Ponadto, proces elektryfikacji pojazdów musi być poprzedzony przebudową oraz modernizacją infrastruktury energetycznej wielu krajów [13]. Ten problem stanowi obok czynników społecznych i ekonomicznych barierę dla rozwoju rynku samochodów elektrycznych. Większość krajów nie posiada wystarczająco wydajnej infrastruktury energetycznej pozwalającej na masową skalę „ładować” baterie samochodów elektrycznych o dowolnej porze dnia i nocy. Taki proces wymaga pełnej koordynacji parametrów sieci elektrycznej wraz z zapleczem wytwarzania energii oraz systemu zapotrzebowania na energię. Jedną z metod rozwiązania problemu koordynacji procesu ładowania baterii samochodów elektrycznych przedstawiono w pracy [5]. Za pomocą zaproponowanego modelu matematycznego

odzworowującego parametry techniczne pracy sieci energetycznej przy określonej liczbie pojazdów przedstawiono na rys. 7. Jako ogólne równanie opisujące zapotrzebowanie na energię elektryczną pobieraną z sieci ( $E_v^{dem}$ ) autorzy pracy [5] zaproponowali zależność (2):

$$E_v^{dem} = \Delta t \cdot \sum_{p,t_v} P_{v,p,t_v} \quad (2)$$

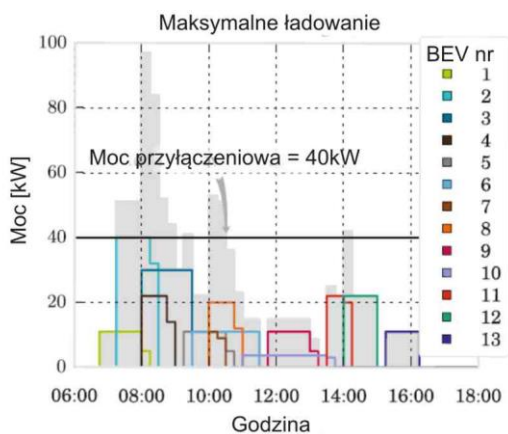
gdzie:

$\Delta t$  – równe przedziały czasowe s,

$p$  – moc zapotrzebowana ze stacji ładujących kW,

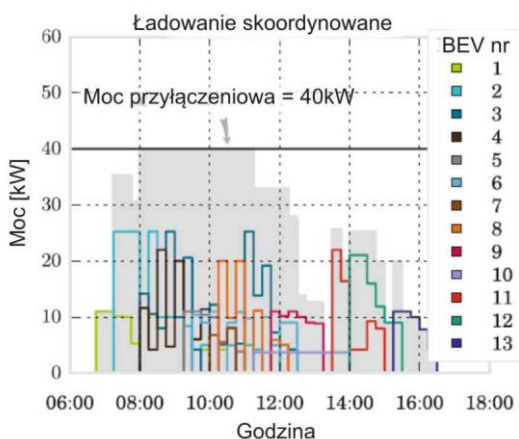
$t_v$  – sumaryczny czas ładowania pojazdu w ciągu doby s,

Przykład uzyskany wyników modelowania matematycznego zapotrzebowania na energię elektryczną w układzie skoordynowanym nie skoordynowanym przedstawiono na rysunkach 7 oraz 8.



**Rys. 7.** Przykład wyników modelowania – system ładowania pojazdów nieskoordynowany [5]

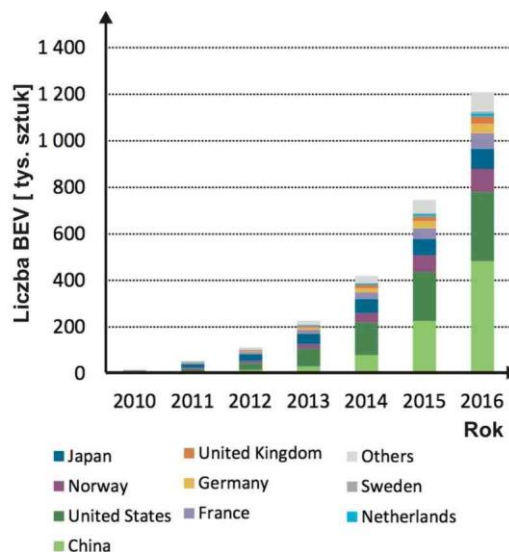
Analizując dane modelowania przedstawione na rys. 7 pozwalają stwierdzić, że brak koordynacji już kilku pojazdów może spowodować spiętrzenie mocy i możliwość awarii sieci energetycznej. Nieco inną sytuację wykazano na rys. 8.



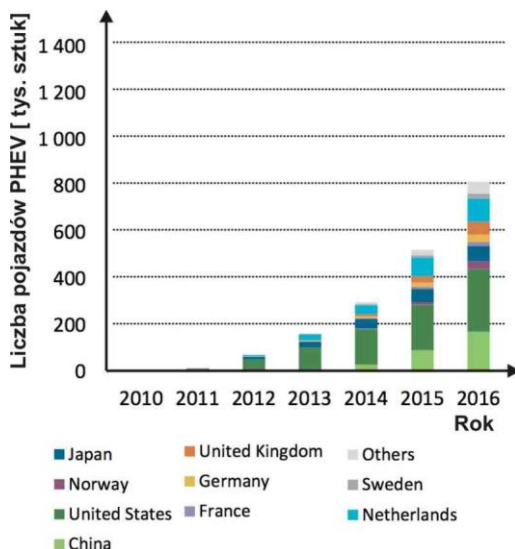
**Rys. 8.** Wyniki analizy poboru mocy w przypadku ładowania skoordynowanego – brak przeciążeń sieci [5]

Autorzy w pracy [5] przedstawili wyniki obliczeń oraz model matematyczny za pomocą którego wykazali, że koordynacja zapotrzebowania na energię elektryczną nie tylko pozwala zmniejszyć ryzyko awarii sieci energetycznej ale także pozwala zapewnić optymalny czas ładowania dla użytkowników samochodów elektrycznych. Więc istnieje potrzeba modernizacji sieci energetycznej w sposób zapew-

niający bezpieczeństwo dla infrastruktury energetycznej zanim nastąpi istotne zwiększenie liczby pojazdów z napędem elektrycznym typu BEV (rys.9) oraz PHEV (rys.10).



**Rys. 9.** Zmiana liczby pojazdów z napędem elektrycznym typu BEV [10]

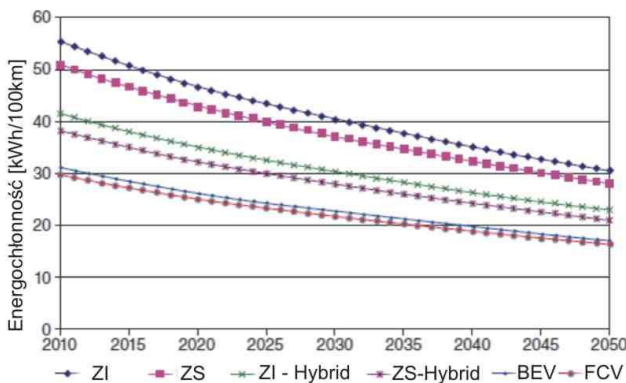


**Rys. 10.** Zmiana liczby pojazdów z napędem hybrydowym typu PHEV [10]

Jak wynika z danych przedstawionych na rysunkach 9 oraz 10 liczba pojazdów typu BEV oraz PHEV istotnie wzrosła po roku 2010.

## 2. EFEKTYWNOŚĆ SAMOCHODÓW ELEKTRYCZNYCH

Jednym w parametrów mogących posłużyć ocenie efektywności zużycia energii w odniesieniu do pojazdów z napędem elektrycznym jest wskaźnik określony w łańcuchu zużycia energii jako tank-to-wheel (TTW). Ten wskaźnik pozwala określić jak efektywnie moc układu napędowego przenoszona jest na koła napędowe w celu pokonania oporów ruchu. Ten wskaźnik może posłużyć jako parametr porównawczy z innymi pojazdami do celów oceny efektywności energetycznej układu napędowego, a w konsekwencji także całego pojazdu. Kilka przykładów porównania wartości wskaźnika TTW pomiędzy pojazdami przedstawiono na rys. 11.

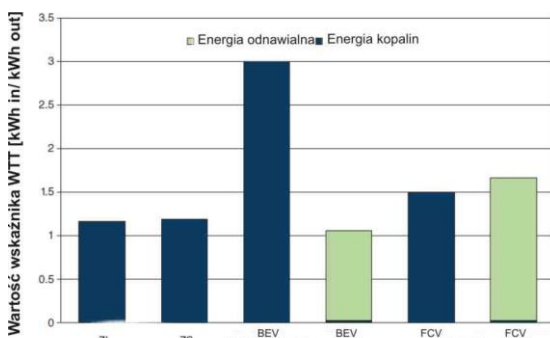


Rys. 11. Energochłonność ruchu pojazdów – stan obecny oraz prognoza [1]

Na podstawie danych (rys. 11) stwierdzono, że w ciągu następnych 40 lat wskaźniki TTW powinien się zmniejszyć o przynajmniej 30% w odniesieniu do dnia dzisiejszego. Efekt ten może zostać osiągnięty głównie poprzez zmniejszenie oporów ruchu pojazdów oraz zwiększenie sprawności układów napędowych stosowanych w pojazdach. Obie te drogi prowadzą do wdrożenia nowej technologii lub nowych materiałów.

Obecnie jednym z głównych problemów wpływających na zasięg samochodów elektrycznych jest masa baterii [4, 7] a w tym także ilość zgromadzonej w niej energii elektrycznej, problematyka ładowania baterii [9, 18] oraz ich trwałość i koszt.

Kolejnym istotnym wskaźnikiem brany pod uwagę przy ocenie efektywności konwersji energii w pojazdach zasilanych elektrycznie jest wskaźnik określony jako well-to-tank (WTT). Wskaźnik ten związany jest bezpośrednio z produkcją energii elektrycznej bądź produkcją wodoru. Określa on jaka ilość energii pierwotnej jest wymagana do uzyskania 1 kWh energii elektrycznej użytej w tych pojazdach. W odniesieniu do wielu pojazdów całkowity wkład energii pierwotnej może stanowić połączenie źródeł konwencjonalnych (t.j. paliwa kopalne) oraz paliw pochodzących ze źródeł odnawialnych (np. energia wiatrowa). Niestety w wielu krajach, nadal podstawowym źródłem energii elektrycznej stanowią elektrownie węglowe (np. Polska), co istotnie wpływa na obniżenie wartości tego wskaźnika. Najniższe ilości energii pierwotnej zużywa się w przypadku produkcji energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych. Przykład analizy wartości wskaźnika WTT przedstawiono na rys. 12.



Rys. 12. Wartość wskaźnika WTT w zależności od typu pojazdu [2]

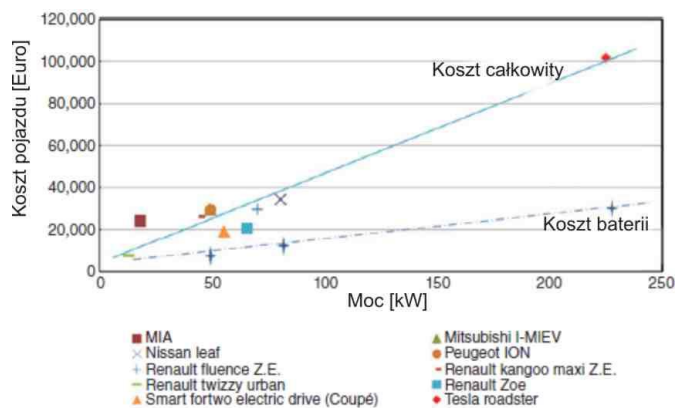
Zarówno wskaźnik WTT jak i TTW mogą być szacowane jednocześnie. Wtedy sumaryczny wskaźnik oceny efektywności konwersji energii jest określany mianem well-to-whell (WTW). Wskaźnik ten opisuje całkowitą ilość energii zużytej do uzyskania ruchu pojazdu oraz odnosi się do sumarycznej emisji dwutlenku węgla [11].

Z ekologicznego (emisyjnego) punktu widzenia, samochody hybrydowe typu HEV mogą przyczynić się tylko nieznacznie ponieważ

głównym źródłem energii jest w tych pojazdach silnik spalinowy zasilany paliwem pochodzącym z kopalni. Dużo lepsze efekty w zakresie zmniejszenia oddziaływania środowiskowego pojazdów można uzyskać poprzez popularyzację samochodów elektrycznych typu BEV oraz FCV, lecz w tym przypadku wskaźnik WTW często zależy od źródła energii pierwotnej.

### 3. ASPEKTY EKONOMICZNE POJAZDÓW ELEKTRYCZNYCH

Jak wspomniano wcześniej, jedna z krytycznych barier stojących na drodze do popularyzacji samochodów elektrycznych związana jest oprócz względów społecznych z kosztem zakupu samochodu elektrycznego oraz jego eksploatacji. Z punktu widzenia użytkownika istotne jest to, żeby ogólny koszt zakupu i eksploatacji samochodu elektrycznego był porównywalny z współcześnie użytkowanym klasycznym samochodem napędzanym za pomocą silnika spalinowego. Takie podejście stanowi realną drogę do wzrostu sprzedaży samochodów elektrycznych. Inną sprawą wydają się problem trwałości baterii. Na rynku obserwuje się dwie metody organizacji obrotu bateriami. Np. firma Renault nie sprzedaje baterii wraz z pojazdem, a tylko je odpłatnie użycza natomiast inne firmy często sprzedają pojazd wraz z bateriami. Takie podejście w pewnym sensie umożliwia wielokrotną wymianę baterii, lecz z punktu widzenia ekonomicznego wydaje się być droższe w dłuższym okresie czasu. Na rys. 13 przedstawiono relację pomiędzy cenami baterii oraz cenami pojazdów typu BEV.



Rys. 13. Relacja pomiędzy kosztami inwestycyjnymi a kosztami baterii w odniesieniu do pojazdów typu BEV [1]

Całkowity koszt mobilności ( $K_{cm}$ ) zawiera koszt zakupu samochodu, koszty użytkowania, koszty obsługi technicznych oraz koszty energii (paliw). Wartość tego kosztu może być obliczona na podstawie zależności (3):

$$K_{cm} = K_i \cdot a + E_{tc} \cdot \rho_f \cdot b_c + K_{OOT} \quad (3)$$

gdzie:

$K_i$  – koszty inwestycyjne,

$a$  – wskaźnik zwrotu inwestycji,

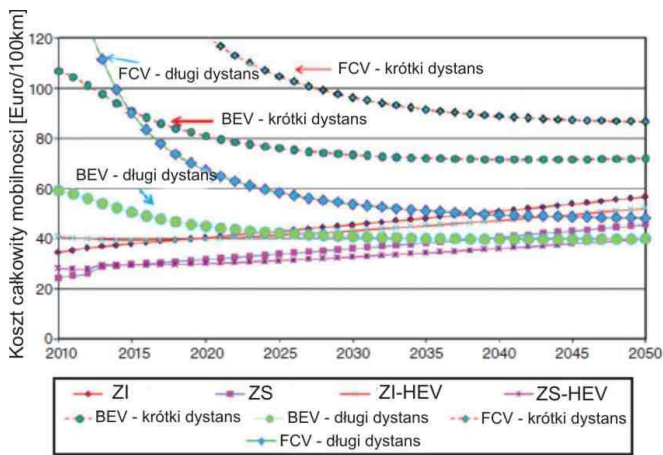
$E_{tc}$  – koszty paliw wraz z podatkami, np. €/kWh,

$\rho_f$  – energochłonność ruchu kWh/100 km,

$b_c$  – dystans przejechany w ciągu rozpatrywanego okresu,

$K_{OOT}$  – koszty użytkowania i obsługi technicznych.

Przykład analizy prowadzącej do oceny ekonomicznej mobilności z zastosowaniem różnych typów pojazdów przedstawiono na rys. 14.



**Rys. 14.** Koszty całkowite mobilność w zależności od typu pojazdu oraz prognozowanego sposobu użytkowania

Na podstawie wyników obliczeń przedstawionych na rys. 14 stwierdzono, że istotnym czynnikiem wpływającym na wartość jednostkowego kosztu całkowitego stanowi liczba przejechanych kilometrów oraz wartość kosztów inwestycyjnych. Następnie koszt przejechania 100 kilometrów ( $K_b$ ) można obliczyć na podstawie zależności (4):

$$K_b = \frac{K_i \cdot a}{b_c} + E_{tc} \cdot \rho_f + \frac{K_{OOT}}{b_c} \quad (4)$$

Natomiast całkowita cena energii ( $E_{tc}$ ) uzależniona jest ilości zużytej energii ( $E_u$ ), wartości podatku VAT ( $p_{VAT}$ ), podatku akcyzowego ( $p_{exc}$ ) oraz podatku od emisji  $CO_2$  ( $p_{CO_2}$ ). Może być obliczone na podstawie zależności (5):

$$E_{tc} = E_u + p_{CO_2} + p_{VAT} + p_{exc} \quad (5)$$

Największą część kosztów stanowi koszty inwestycyjne niezależnie od rodzaju i typu pojazdu. Współcześnie koszty te są szczególnie wysokie w odniesieniu do pojazdów elektrycznych typu FCV i BEV, lecz ich odniesienie do kosztów zakupu energii jest wyraźnie niższe niż w pozostałych [1].

## PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonej analizy literatury oraz obliczeń stwierdzono że:

1. Samochody elektryczne stanowią efektywne rozwiązanie problemu środowiskowego oddziaływania transportu, szczególnie w obszarach miejskich i podmiejskich.
2. Sieć energetyczna jest niedostosowana do wzrostu obciążenia spowodowanego przez podłączenie stacji ładowania dla pojazdów elektrycznych a proces ten wymaga koordynacji.
3. Koszty inwestycyjne istotnie wpływają na zahamowania rozwoju rynku samochodów elektrycznych.
4. Obserwuje się istotne decyzje polityczne skutkujące zmniejszenie obszaru zastosowania klasycznych silników spalinowych w środkach transportu miejskiego.

## BIBLIOGRAFIA

1. Ajanovic A. (2015) The future of electric vehicles: prospects and impediments, *WIREs Energy Environment* 2015, 4:521–536.
2. Ajanovic A. (2013) Renewable fuels – a comparative assessment from economic, energetic and ecological point-of-view up to 2050 in EU-countries. *Renew Energy* 2013, 60:733–738.
3. Arslan O., Yildiz B., Karas O.E. (2015), Minimum cost path problem for Plug-in Hybrid Electric Vehicles, *Transportation Research Part E* 80 (2016) 123–141.

4. Baumeister J., Weise J., Hirtz E., Höhne K., Hohe J. (2014), Applications of aluminium hybrid foam sandwiches in battery housings for electric vehicles, *Mat.-wiss. u. Werkstofftech.* 2014, 45, No. 12
5. Braam Felix, Groß Arne, Mierau Michael, Kohrs Robert, Wittwer Christof, Coordinated charge management for battery electric vehicles, *Comput Sci Res Dev* (2017) 32:183–193
6. Cao X., Ishikawa T. (2016), Optimum Design of a Regenerative Braking System for Electric Vehicles Based on Fuzzy Control Strategy, *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, *IEEE Trans* 2016; 11(S1): S186–S187
7. Deng Y., Li J., Li T., Zhang J., Yang F., Yuan C. (2017), Life cycle assessment of high capacity molybdenum disulfide lithiumion battery for electric vehicles, *Energy* 123 (2017) 77–88.
8. Dusmez S, Khaligh A. (2012), A Novel Low Cost Integrated On-board Charger Topology for Electric Vehicles and Plug-in Hybrid Electric Ve Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC 2012, 2611 – 2616.
9. Einhorn M., Reoßler W., Conte F. V, Popp H., Fleig J. (2012), Charge balancing of serially connected lithium-ion battery cells in electric vehicles, *Elektrotechnik & Informationstechnik* (2012) 129/3: 167–173.
10. Global EV Outlook IEA Report 2016
11. Goldin E., Erickson L., Natarajan B., Brase G., Pahwa A. (2014), Solar Powered Charge Stations for Electric Vehicles, *Environmental Progress & Sustainable Energy* (Vol.33, No.4) DOI 10.1002/ep, 1298–1308.
12. Lorf C., Martínez-Botas R., Howey D., Lytton L., Cussons B. (2013) Comparative analysis of the energy consumption and  $CO_2$  emissions of 40 electric, plug-in hybrid electric, hybrid electric and internal combustion engine vehicles, *Transportation Research Part D* 23 (2013) 12–19.
13. Maggetto G., Van Mier J. (2001), Electric vehicles, hybrid electric vehicles and fuel cell vehicles: state of the art and perspectives, *Ann. Chim. Sci. Mat.*, 2001, 26 (4), pp. 9–26.
14. MacPherson N.D., Keoleian G.A., and Kelly J.C., (2017) Evaluation of a Regional Approach to Standards for Plug-in Battery Electric Vehicles in Future Light-Duty Vehicle Greenhouse Gas Regulations *Journal of Industrial Ecology*, Volume 19, Number 1, 2017: 10.1111/jiec.12170.
15. Quak H., Nesterova N., van Rooijen T. (2015), Possibilities and barriers for using electric-powered vehicles in city logistics practice, *Transportation Research Procedia* 12 ( 2016 ) 157 – 169
16. Rizeta C., Cruzb C., Vromantc M. (2015), The constraints of vehicle range and congestion for the use of electric vehicles for urban freight in France, *Transportation Research Procedia* 12 ( 2016 ) 500 – 507.
17. Skytte K., Pizarro A. and Karlsson K. B. (2017) Use of electric vehicles or hydrogen in the Danish transport sector in 2050?, *WIREs Energy Environ* 2017, 6:e233. doi: 10.1002/wene.233.
18. Sung W., Hwang D.S., Jeong B.J., Lee J., Kwon T. (2016), Electrochemical battery model and its parameters estimator for use in a battery management system in Plug-In hybrid electric vehicles, *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 17, No. 3, pp. 493–508 (2016)
19. Wang L., Lin A., Chen Y. (2010), Potential Impact of Recharging Plug-in Hybrid Electric Vehicles on Locational Marginal Prices, *Naval Research Logistics*
20. Zhao J., Chen P., Ibrahim U., Wang J. (2016), Comparative study and accommodation for Biodiesel in diesel electric hybrid vehicles coupled with aftertreatments systems, *Asian Journal of Control*, Vol. 18, No. 1, pp. 3–15, January 2016.
21. Materiały informacyjne AUDI

22. Materiały informacyjne Renault

## The analysis of unconventional powertrain system usege

*Paper discussed the impact electric powertrain system on its usage among different mean of transport. There was presented some main troubles which are connected with increase in electric vehicle markets.*

Autorzy:

Dr hab. inż. **Piotr Piatkowski** prof. nzw.– Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, Zakład Transportu, tel. 48 94 34 78 355, e-mail: piotr.piatkowski@tu.koszalin.pl.

Dr hab. inż. **Ryszard Lewkowicz** prof. nzw – Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, Zakład Transportu, tel. 48 94 34 78 267, e-mail: ryszard.lewkowicz@tu.koszalin.pl.

JEL: O18 DOI: 10.24136/atest.2018.206

Data zgłoszenia: 2018.05.28 Data akceptacji: 2018.06.15