

Prof. nzw. dr hab. inż. Zdzisław Chłopek

Instytut Transportu Samochodowego
Ul. Jagiellońska 80, 03–301 Warszawa, Polska
E–mail: zdzislaw.chlopek@its.waw.pl

Badania zużycia energii przez samochód elektryczny w warunkach symulujących jazdę w mieście

Słowa kluczowe: *samochód elektryczny, zużycie energii, sprawność*

Streszczenie: W ostatnich latach następuje dynamiczny rozwój napędów elektrycznych w motoryzacji. W samochodach elektrycznych upatruje się możliwości rozwiązania najważniejszych problemów ekologicznych motoryzacji. W pracy przedstawiono wyniki badań zużycia energii przez samochód elektryczny w warunkach odpowiadających rzeczywistej eksploatacji takich pojazdów, mianowicie w testach jezdnych symulujących ruch w miastach, poza miastami, a także w zatorach drogowych. Wyznaczono drogowe zużycie energii i sprawność ogólną pojazdu w testach jezdnych. Wyznaczono charakterystykę zużycia energii w warunkach pseudoprzypadkowych użytkownika samochodu w mieście. Wykorzystano do tego celu metodę Monte Carlo.

1. Wstęp

Motoryzacja powoduje znaczne zagrożenia środowiska. Duża część tych zagrożeń jest związana ze stosowaniem do napędu pojazdów samochodowych silników spalinowych. Do najbardziej zauważalnych zagrożeń zalicza się emisję spalin i hałasu, a także zużywanie zasobów naturalnych wykorzystywanych do wytwarzania paliw ciekłych i gazowych. Zastosowanie w motoryzacji silników elektrycznych umożliwia eliminację emisji spalin na trasach komunikacyjnych, a także zmniejszenie emisji hałasu, wiadomo bowiem, że współczesna technika napędów elektrycznych umożliwia osiągnięcie takich korzyści [10, 14, 16, 26]. Jednocześnie trzeba sobie zdawać sprawę, że sloganowy termin „pojazdy o zerowej emisji” („zero emission vehicles”) to tylko populistyczne propagandowe określenie i to nie na najwyższym poziomie. Po pierwsze istnieją jeszcze inne źródła emisji zanieczyszczeń z samochodów inne niż silnik spalinowy, np. źródła emisji pyłów, takie jak: pary trybologiczne w pojeździe, ogumienie współpracujące z nawierzchnią jezdnią, a także wzniesanie pyłów z drogi [4]. Po drugie w przypadku stosowania silników elektrycznych w samochodach, co prawda z pojazdów nie są emitowane spaliny, ale zanieczyszczenie środowiska towarzyszy wytwarzaniu energii elektrycznej. Wytwarzanie energii elektrycznej w dalszym ciągu w znacznej mierze jest oparte na spalaniu paliw kopalnych, przede wszystkim węgla kamiennego. Dodatkowo często technologie wytwarzania energii elektrycznej z wykorzystaniem węgla kamiennego nie należą do najczystszych, zatem nie eliminuje się emisji nie tylko gazów cieplarnianych, ale i zanieczyszczeń szkodliwych dla zdrowia. Oczywiście przyszłościowym rozwiązaniem jest wykorzystanie odnawialnych nośników energii, przede wszystkim bezpośrednio energii promieniowania słonecznego (ogniwa fotoelektryczne), oraz energii jądrowej – szczególnie duże nadzieje wiąże się z wykorzystaniem syntezy jądrowej [20]. Oceną emisji zanieczyszczeń z samochodów w całym cyklu wytwarzania i wykorzystywania nośników energii zajmuje się tzw. analiza Well-to-Whell, tzn. analiza od źródła (nośników energii) do koła (jezdnego pojazdu) [25, 27]. Cykl ten dzieli

się na dwie części: Well-to-Tank – od źródła do zbiornika (nośnika energii) i Tank-to-Whell – od zbiornika do koła [25].

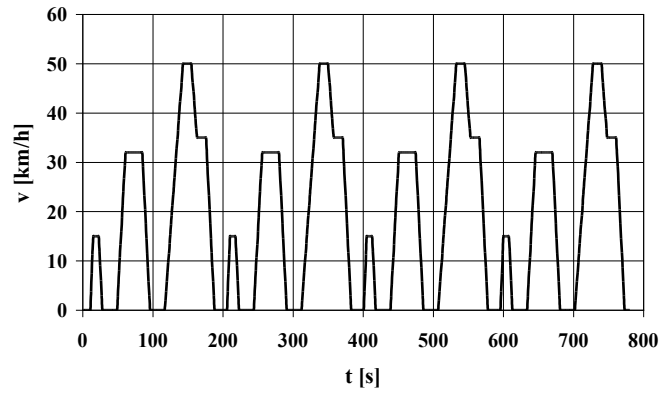
Innym problemem jest ocena ekologicznych korzyści zastosowania napędów elektrycznych w samochodach tzw. metodą oceny wpływu cyklu istnienia pojazdów LCIA (ang. Life Cycle Impact Assessment) [12]¹. W metodzie tej uwzględnia się nie tylko informacje uzyskane na drodze inwentaryzacji energii i emisji zanieczyszczeń, ale i określone zagrożenia środowiskowe, np. eutrofizację, zakwaszenie, hałas, drgania, smog, promieniowanie elektromagnetyczne, pył, zmianę zagospodarowania terenu, zmniejszenie zasobów surowców, m.in. wody i surowców do wytwarzania paliw kopalnych, zmiany klimatu, zubożenie warstwy ozonowej i inne [12]. Metoda LCIA umożliwia w odniesieniu do samochodu ocenę jego oddziaływania na środowisko na wszystkich etapach istnienia pojazdu, począwszy od wytwarzania, eksploatacji, aż do zagospodarowania zużytych pojazdów. Analiza ta może dotyczyć również infrastruktury eksploatacyjnej pojazdów. W metodzie oceny wpływu cyklu istnienia w odniesieniu do samochodów elektrycznych należy uwzględnić wiele czynników silnie obciążających środowisko, szczególnie wytwarzania i eksploatacji akumulatorów oraz ich zagospodarowania po zakończeniu eksploatacji [1, 11, 13, 16, 18, 21, 27].

To ostrożne podejście do problemu pojazdów elektrycznych nie jest w żadnej sprzeczności z faktem dynamicznie prowadzonych prac nad rozwojem napędów elektrycznych nie tylko w małych samochodach osobowych, ale i autobusach, samochodach ciężarowych [1, 8–11, 13–16, 18, 21–23, 26, 27] oraz pojazdach jednośladowych [24].

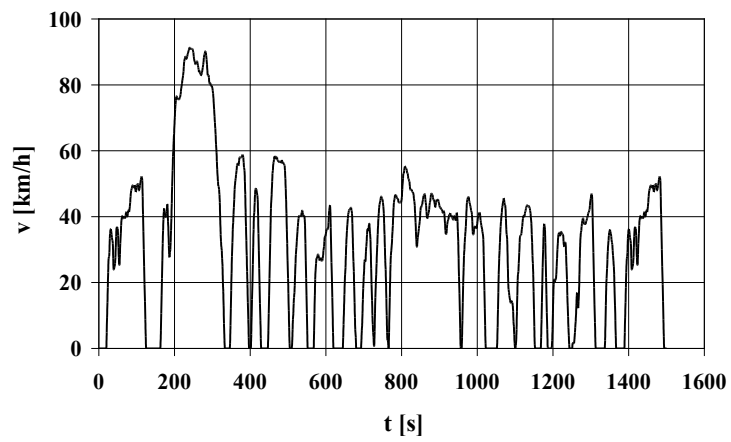
Ważnym problemem jest ocena zużycia energii przez samochody elektryczne w warunkach odpowiadających typowemu użytkowaniu tych pojazdów. Na obecnym stanie rozwoju technicznego zastosowanie samochodów elektrycznych jest przewidywane przede wszystkim do ruchu w miastach [1, 3, 8–11, 14–16, 18, 21–23, 26, 27]. W związku z tym warunki odpowiadające rzeczywistemu użytkowaniu samochodów elektrycznych dotyczą ruchu w miastach z uwzględnieniem przypadków szczególnych – ruchu w centrach miejskich i okolicach podmiejskich. Jako modele ruchu odpowiadające rzeczywistemu użytkowaniu samochodów elektrycznych przyjęto w niniejszej pracy testy homologacyjne: europejski UDC (Urban Driving Cycle – miejski test jezdny) – rysunek 1 i amerykański FTP-75 (Federal Transient Procedure – federalna procedura przejściowa) – rysunek 2 [28]. Test UDC jest typowym modelem ruchu samochodów osobowych i lekkich samochodów ciężarowych w miastach, test FTP-75 odpowiada ruchowi zarówno w miastach, jak i w okolicach podmiejskich. Dodatkowo rozszerzono program badań o test Stop and Go [2, 6] – rysunek 3, odpowiadający ruchowi samochodów w zatorach ulicznych.

¹ Rozpowszechniło się w tłumaczeniu na język polski błędne i naganne użycie – jako zapożyczonego z języka angielskiego – terminu „życie” w odniesieniu do obiektów innych niż organizmów i to nie tylko w aktach urzędowych, ale i nawet w pismach naukowych! Według „Słownika języka polskiego” życie jest to stan organizmu polegający na nieprzerwanym ciągu procesów umożliwiających reagowanie na bodźce i zwykle poruszanie się. Według Encyklopedii Państwowego Wydawnictwa Naukowego życie to zjawisko biologiczne złożone i wielowymiarowe, którego nie można opisać za pomocą jednej prostej definicji. Zjawisko to jest znane dotychczas wyłącznie z Ziemi i w tym kontekście jest definiowane w odniesieniu do dwóch podstawowych znaczeń: na określenie stanu materii (nazywanej organizmem) trwającego od pojawienia się (narodzin) organizmu do zakończenia jego bytu osobniczego, w większości kończącego się śmiercią oraz na określenie dynamicznego procesu, który pojawił się na Ziemi ok. 3,8 mld lat temu, obejmującego pochodzące od jednej formy wyjściowej wszystkie istniejące w przeszłości i żyjące obecnie organizmy wraz z wszelkimi wzajemnymi relacjami i zależnościami oraz ich wpływem na środowisko.

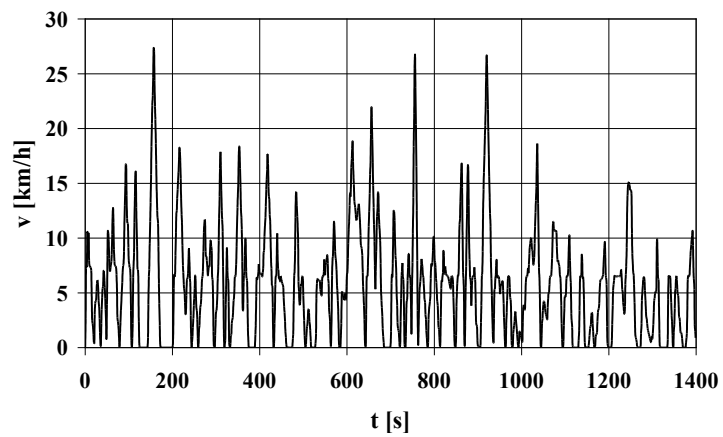
To, że w języku angielskim na określenie pojęcia istnienia używa się terminu „life” nie usprawiedliwia Polaków do nieposzanowania kultury języka polskiego i do błędnego tłumaczenia tego terminu na „życie” zamiast – prawidłowo – na „istnienie”.



Rys. 1. Test UDC



Rys. 2. Test FTP-75



Rys. 3. Test Stop and Go

Przyjęte modele ruchu obejmują większość zdarzających się warunków ruchu samochodów osobowych w strefach miejskich.

2. Systematyka wielkości do opisu zużycia energii przez samochód elektryczny

Do opisu zużycia energii przez samochód elektryczny przyjęto następujący system wielkości fizycznych.

Dla samochodu elektrycznego bez odzyskiwania energii hamowania system sprawności definiuje się w następujący sposób:

- sprawność napędu

$$\eta_D = \frac{N_R}{N_T} \quad (1)$$

- sprawność ładowania akumulatorów

$$\eta_{CH} = \frac{N_T}{N_{CH}} \quad (2)$$

- sprawność ogólna

$$\eta_G = \eta_{CH} \cdot \eta_D \quad (3)$$

gdzie: N_T – moc elektrycznego napędu samochodu,

N_R – moc oporów jazdy²,

N_{CH} – moc ładowania akumulatorów.

Dla samochodu elektrycznego z odzyskiwaniem energii hamowania system sprawności jest zdefiniowany w następujący sposób:

- sprawność napędu

$$\eta_D = \frac{N_R}{N_T - N_U} \quad (4)$$

- sprawność odzyskiwania energii hamowania

$$\eta_U = \frac{N_U}{N_B} \quad (5)$$

gdzie: N_B – moc hamowania maszyną elektryczną,

N_U – moc odzyskiwania energii hamowania.

Drogowe zużycie energii definiuje się jako pochodną zużywaną energii względem drogi przebywanej przez pojazd. Dla samochodu elektrycznego bez odzyskiwania energii hamowania drogowe zużycie energii wynosi:

$$c = \frac{dL_T(s)}{ds} \quad (6)$$

gdzie: s – droga przebywana przez pojazd,

$L_T(s)$ – praca elektrycznego napędu samochodu jako funkcja drogi.

Dla samochodu elektrycznego z odzyskiwaniem energii hamowania drogowe zużycie energii wynosi:

$$c = \frac{d(L_T(s) - L_U(s))}{ds} \quad (7)$$

gdzie: $L_U(s)$ – odzyskiwana energii hamowania jako funkcja drogi.

Wartość średnia drogowego zużycia energii w teście wynosi:

² Pod pojęciem „oporów jazdy” rozumie się w tym zastosowaniu zjawisko, a nie siły.

– dla samochodu bez odzyskiwania energii hamowania:

$$c_{AV} = \frac{L_T}{s} = \frac{AV[N_T(t)]}{AV[v(t)]} \quad (8)$$

gdzie: t – czas,

L_T – praca elektrycznego napędu samochodu w teście o czasie trwania t_f :

$$L_T = \int_0^{t_f} N_T(t) dt \quad (9)$$

s – droga przejechana przez samochód w teście:

$$s = \int_0^{t_f} v(t) dt \quad (10)$$

AV – operator wartości średniej;

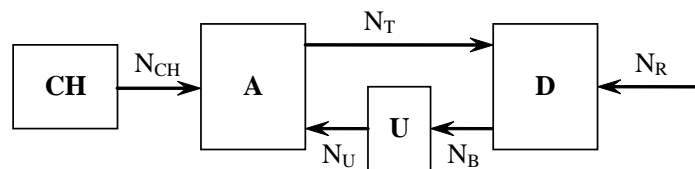
– dla samochodu z odzyskiwaniem energii hamowania:

$$c_{AV} = \frac{L_T - L_U}{s} = \frac{AV[N_T(t)] - AV[N_U(t)]}{AV[v(t)]} \quad (11)$$

gdzie: L_U – energia hamowania odzyskana w teście:

$$L_U = \int_0^{t_f} N_U(t) dt \quad (12)$$

Na rysunku 1 przedstawiono schemat przepływu mocy w zespole napędowym³ samochodu elektrycznego z odzyskiwaniem energii elektrycznej.



Rys. 4. Schemat przepływu mocy w zespole napędowym samochodu elektrycznego z odzyskiwaniem energii elektrycznej. Oznaczenia: CH – układ ładowania akumulatora, A – akumulator, D – układ napędowy samochodu, U – układ odzyskiwania energii hamowania, N_{CH} – moc ładowania akumulatorów, N_T – moc elektrycznego napędu samochodu, N_R – moc oporów jazdy, N_B – moc hamowania maszyną elektryczną, N_U – moc odzyskiwania energii hamowania

Należy zwrócić uwagę na fakt, że bilans energetyczny w układzie napędowym samochodu decyduje o tym, czy pojazd znajduje się w stanie statycznym, czyli porusza się ze stałą prędkością, czy w stanie dynamicznym: przyspieszania lub zmniejszania prędkości. Moc hamowania maszyną elektryczną jest różna od mocy hamowania pojazdu, gdyż moc hamowania pojazdu obejmuje również moc rozpraszaną w układzie hamulcowym przez hamulce cierne. Część z mocy hamowania maszyną elektryczną może być odzyskiwana – energia elektryczna jest magazynowana w czasie hamowania w akumulatorze.

³ Termin „układ napędowy” jest używany – zgodnie z tradycyjnym stosowaniem w naukach motoryzacyjnych – do oznaczenia układu przenoszenia energii mechanicznej z silnika do kół jezdnych pojazdu. Dla układu napędowego wraz z silnikiem oraz zbiornikiem energii stosuje się w niniejszej pracy termin „zespół napędowy”.

3. Wyniki badań empirycznych samochodu elektrycznego na hamowni podwoziowej

Badania empiryczne zużycia energii przez samochód elektryczny przeprowadzono na hamowni podwoziowej w Centrum Ochrony Środowiska w Instytucie Transportu Samochodowego [3]. Obiektem badań był elektryczny samochód osobowy Zilent Courant wyprodukowany w Chińskiej Republice Ludowej. Samochód Zilent Courant jest pojazdem z zasilaniem silników elektrycznych wyłącznie z akumulatorów energii elektrycznej. Samochód ma układ napędowy bez odzyskiwania energii hamowania. Masa pojazdu gotowego do jazdy wynosi 1170 kg.

Moc znamionowa silnika elektrycznego wynosi 8,5 kW. Pojazd jest wyposażony w 10 bezobsługowych akumulatorów kwasowo-ołowiowych o napięciu znamionowym 12 V i pojemności elektrycznej 100 Ah każdy akumulator.

Prędkość maksymalna samochodu wynosi 85 km/k, prędkość ekonomiczna – 40 km/h. Zasięg przy prędkości ekonomicznej wynosi nie mniej niż 150 km.

Badany samochód należy do kategorii pojazdów elektrycznych o prostej konstrukcji. Samochód nie jest wyposażony ani w układy akumulatorów nowej generacji, ani nie ma możliwości odzyskiwania energii hamowania. Wskaźniki użyteczne również nie kwalifikują badanego pojazdu do kategorii nowoczesnych samochodów elektrycznych. Mały jest zasięg pojazdu, mała prędkość maksymalna, tym bardziej słabe są właściwości dynamiczne. Cechy te mają wpływ na sceptyczną ocenę bezpieczeństwa biernego samochodu oraz komfortu jego użytkowania.

Badania przeprowadzono na jednorolkowej hamowni podwoziowej z regulowaną charakterystyką oporów firmy AVL–Zoellner [3].

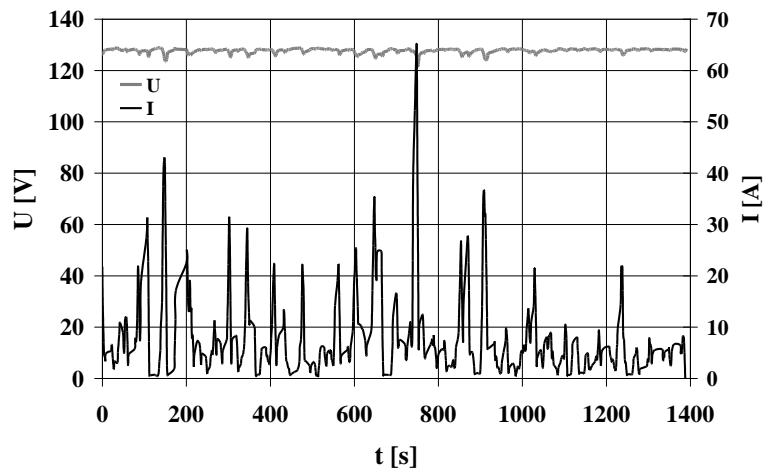
W czasie badań na hamowni podwoziowej dokonywano pomiarów m.in.:

- prędkości jazdy samochodu na rolce hamowni podwoziowej,
- napięcia na zespole akumulatorów,
- natężenia prądu w instalacji napędowej pojazdu.

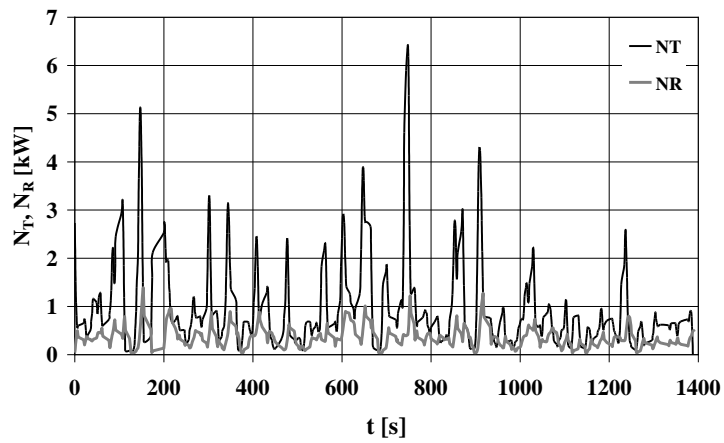
Charakterystykę mocy pochłanianej przez hamownię podwoziową zidentyfikowano na podstawie badań empirycznych wybiegu samochodu [3].

Rejestracji sygnałów badanych wielkości dokonywano z czasem próbkowania 1 s. Rejestrowane sygnały były wynikiem uśredniania wyników z 10 pomiarów dokonywanych co 0,1 s. Zarejestrowane sygnały zostały poddane wstępnemu przetwarzaniu w celu usunięcia błędów grubych i zmniejszenia udziału szumów o wysokich częstotliwościach. Do poszukiwania błędów grubych wykorzystano analizę bieżącej wariancji sygnałów. W celu zmniejszenia udziału szumów o wysokich częstotliwościach w sygnałach zastosowano filtrację dolnoprzepustową. Wykorzystano do tego celu filtr Golaya–Savitzky’ego [19] z wielomianem drugiego stopnia oraz z aproksymacją obustronną po 2 punkty.

Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono wyniki badań empirycznych samochodu w teście Stop and Go – przebiegi natężenia prądu pobieranego z akumulatora i napięcia na zaciskach akumulatora oraz mocy elektrycznej napędu samochodu i mocy oporów jazdy.

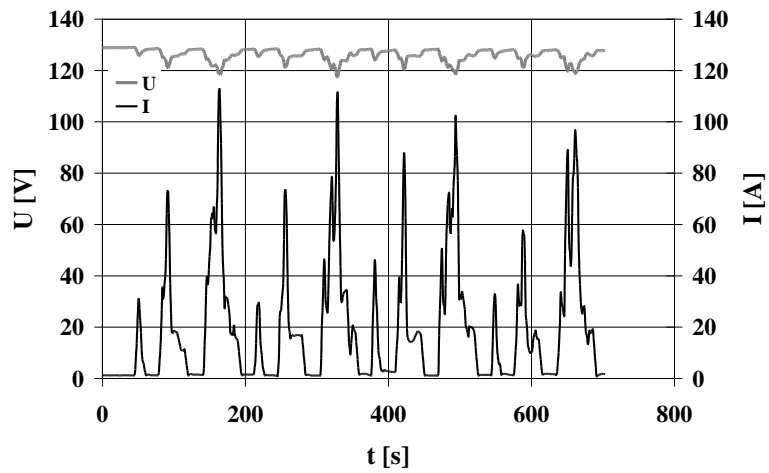


Rys. 5. Natężenie prądu pobieranego z akumulatora i napięcie na zaciskach akumulatora w teście Stop and Go

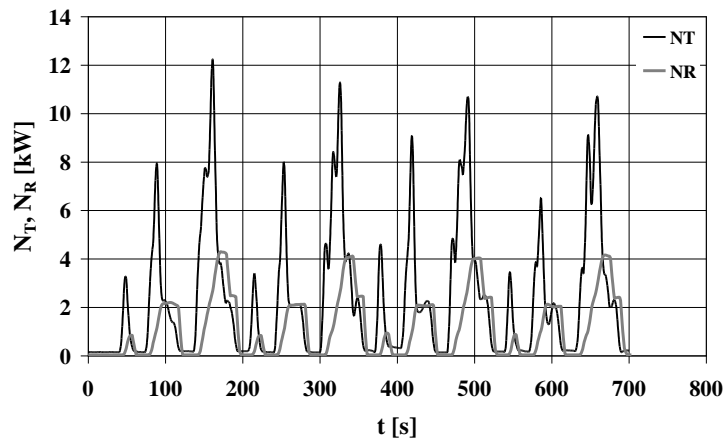


Rys. 6. Moc elektryczna napędu samochodu i moc oporów w teście Stop and Go

Na rysunkach 7 i 8 przedstawiono wyniki badań empirycznych samochodu w teście UDC.

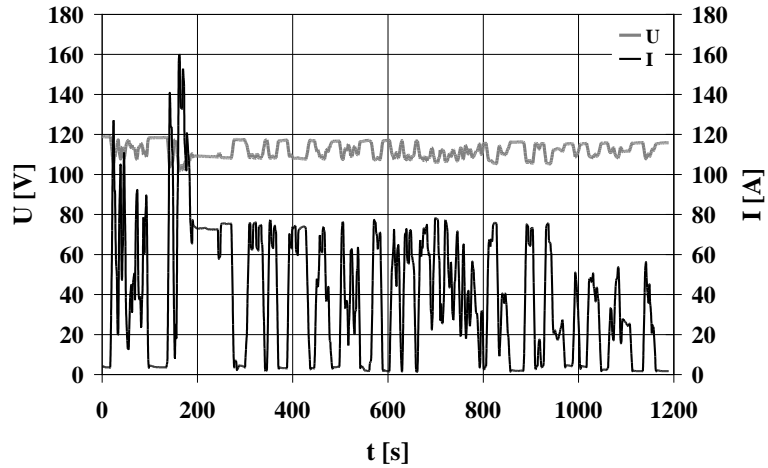


Rys. 7. Natężenie prądu pobieranego z akumulatora i napięcie na zaciskach akumulatora w teście UDC

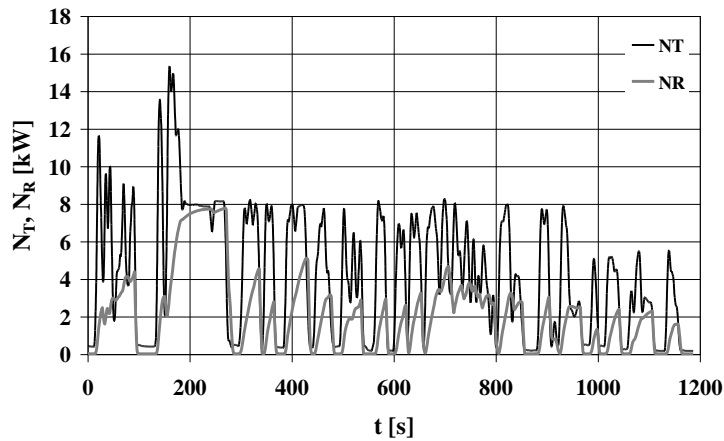


Rys. 8. Moc elektryczna napędu samochodu i moc oporów w teście UDC

Na rysunkach 9 i 10 przedstawiono wyniki badań empirycznych samochodu w teście FTP-75.



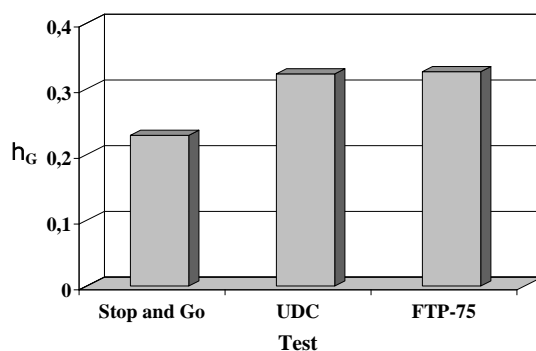
Rys. 9. Natężenie prądu pobieranego z akumulatora i napięcie na zaciskach akumulatora w teście FTP-75



Rys. 10. Moc elektryczna napędu samochodu i moc oporów w teście FTP-75

Dla testów badawczych wyznaczono sprawność ogólną pojazdu. Sprawność ogólną wyznaczano jako iloczyn sprawności napędu i sprawności ładowania akumulatorów. Sprawność napędu wyznaczono na podstawie wykonanych badań empirycznych. Problemem było przyjęcie sprawności ładowania akumulatorów. Procesy napędu pojazdu i ładowania akumulatorów nie zachodzą w tym samym czasie, zatem pojęcie sprawności ogólnej pojazdu w warunkach dynamicznych jest umowne i w zasadzie sprawność ogólną można oceniać tylko w warunkach bilansowania energii. Literatura podaje wartości sprawności ładowania akumulatorów znacznie różniące się wartością w zależności od rodzaju akumulatorów. Przykładowo w publikacji [10] jest przyjmowana wartość sprawności ładowania akumulatorów równa 0,86. W badaniach [3] uzyskano dla akumulatorów kwasowo-ołowiowych znacznie mniejsze wartości, nawet rzędu 0,6. Ostatecznie do analiz w niniejszej pracy przyjęto sprawność ładowania akumulatorów równą 0,65.

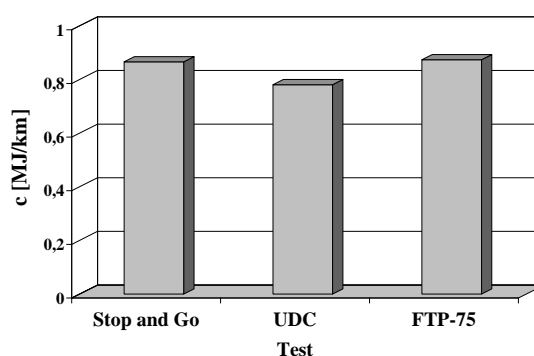
Na rysunku 11 zestawiono sprawność ogólną pojazdu w poszczególnych testach.



Rys. 11. Sprawność ogólna w testach Stop and Go, UDC i FTP-75

Sprawność ogólna pojazdu w testach homologacyjnych ma podobną wartość, mimo że testy te znacznie się różnią właściwościami dynamicznymi, jest jednak między nimi znacznie większe podobieństwo ze względu na prędkość średnią niż w stosunku do testu Stop and Go. Znacznie mniejsza jest sprawność ogólna w teście Stop and Go. Test ten charakteryzuje się częstym przyspieszaniem i hamowaniem, prędkość średnia pojazdu wynosi około 5,8 km/h. W związku z tym można spodziewać się dużych strat. Przypadek taki występuje również w samochodach napędzanych silnikami spalinowymi [2, 6].

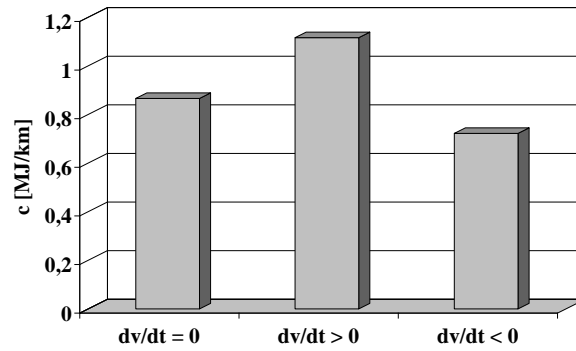
Na rysunku 12 przedstawiono średnie drogowe zużycie energii.



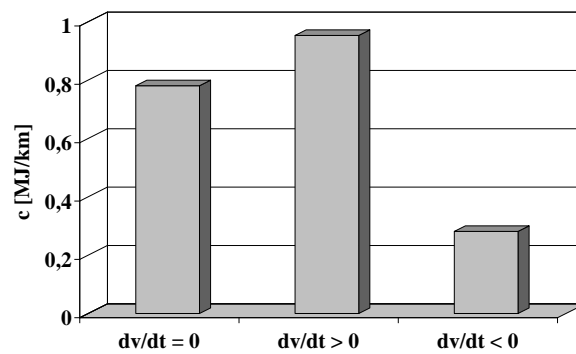
Rys. 12. Średnie drogowe zużycie energii w testach Stop and Go, UDC i FTP-75

Średnie drogowe zużycie energii ma podobną wartość dla testów FTP-75 i Stop and Go, mniejsza wartość jest natomiast dla testu UDC. Jest to prawdopodobnie związane z właściwościami dynamicznymi procesów prędkości w zastosowanych testach. Testy FTP-75 i Stop and Go charakteryzują się silniejszymi właściwościami dynamicznymi niż test UDC. Jest to widoczne m.in. we właściwościach częstotliwościowych – większa jest wartość widmowej gęstości mocy prędkości w testach FTP-75 i Stop nad Go w stosunku do testu UDC dla dużych częstotliwości [6]. Właściwość ta wynika ze sposobu wyznaczania analizowanych testów, mianowicie testy FTP-75 Stop and Go są stworzone zgodnie z kryterium wiernej symulacji w dziedzinie czasu, a test UDC jest wynikiem syntezy zgodnie z podobieństwem charakterystyk punktowych w warunkach badań i rzeczywistego użytkowania.

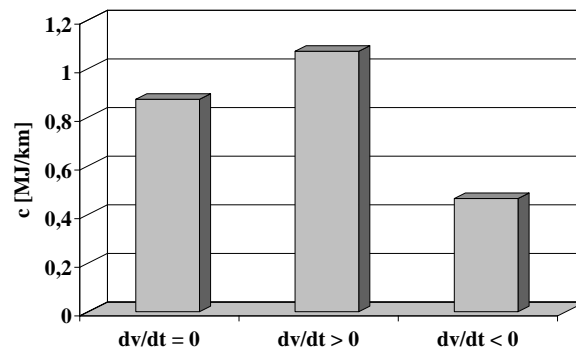
Przeprowadzono również badania średniego drogowego zużycia energii w stanach dynamicznych: dodatniego przyspieszenia i ujemnego przyspieszenia. Wyniki tych analiz przedstawiono na rysunkach 13–15.



Rys. 13. Średnie drogowe zużycie energii w stanach dynamicznych dodatniego przyspieszenia i ujemnego przyspieszenia w teście Stop and Go



Rys. 14. Średnie drogowe zużycie energii w stanach dynamicznych dodatniego przyspieszenia i ujemnego przyspieszenia w teście UDC



Rys. 15. Średnie drogowe zużycie energii w stanach dynamicznych dodatniego przyspieszenia i ujemnego przyspieszenia w teście FTP-75

Wyniki analiz są oczekiwane: większe średnie drogowe zużycie energii przypada na fazy przyspieszania. Największa różnica średniego drogowego zużycia energii w rozpatrywanych fazach dynamicznych występuje dla testu UDC.

4. Wyznaczanie charakterystyk zużycia energii w pseudoprzypadkowych warunkach użytkowania samochodu

Do wyznaczania charakterystyk zużycia energii w pseudoprzypadkowych warunkach użytkowania samochodu wykorzystano metodę Monte Carlo [5–7, 17]. Istota metody Monte Carlo polega na wykorzystaniu generatorów liczb przypadkowych lub pseudoprzypadkowych nie tylko w metodach numerycznych, ale przede wszystkim na tworzeniu intelektualnej przypadkowej lub pseudoprzypadkowej rzeczywistości, której badania umożliwiają poznanie przyczynowych i przypadkowych właściwości doświadczanej rzeczywistości [7].

Pseudoprzypadkowe warunki użytkowania samochodu są traktowane jako pseudoprzypadkowy przebieg prędkości samochodu, będący realizacją procesu stochastycznego prędkości samochodu [5, 6]. Jako charakterystyka punktowa procesu prędkości samochodu jest rozpatrywana jego prędkość średnia [5, 6]:

$$v_{AV} = \frac{s}{\tau} \quad (13)$$

gdzie: s – droga przebywana przez pojazd,
 τ – czas jazdy.

Ruch samochodu jest modelowany jako kombinacja ruchu w testach Stop and Go, UDC i FTP–75.

Droga przebywana przez samochód jest modelowana jako kombinacja liniowa:

$$s_{\Sigma} = \sum_{i=1}^3 v_i \cdot t_i \quad (14)$$

gdzie: t – czas traktowany jako zmienna przypadkowa o rozkładzie równomiernym,
 $i = 1, 2, 3$; 1 – Stop and Go, 2 – UDC, 3 – FTP–75.

Czas trwania pseudoprzypadkowego testu wynosi:

$$t_{\Sigma} = \sum_{i=1}^3 t_i \quad (15)$$

Prędkość średnia samochodu w pseudoprzypadkowym teście wynosi zatem

$$v_{AV\Sigma} = \frac{s_{\Sigma}}{t_{\Sigma}} \quad (16)$$

Energia zużyta do napędu samochodu wynosi w pseudoprzypadkowym teście:

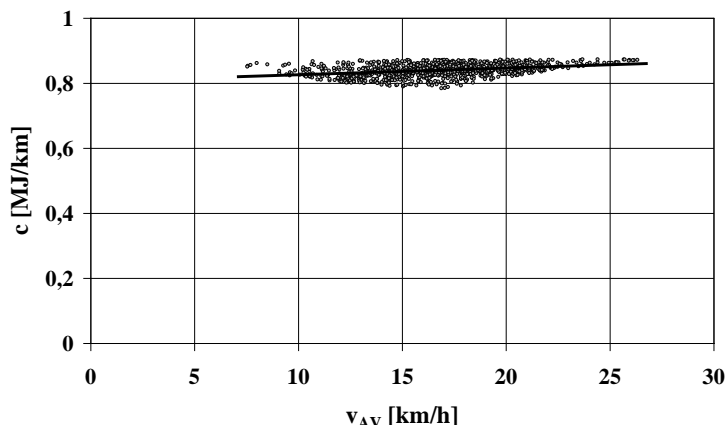
$$L_{D\Sigma} = \sum_{i=1}^3 v_i \cdot t_i \cdot c_i \quad (17)$$

gdzie: c_i – średnie drogowe zużycie energii w poszczególnych testach

Średnie drogowe zużycie energii w pseudoprzypadkowym teście jest równe:

$$c_{\Sigma} = \frac{L_{D\Sigma}}{s_{\Sigma}} \quad (18)$$

Na rysunku 16 przedstawiono przykładową charakterystykę drogowego zużycia energii w pseudoprzypadkowych warunkach użytkowania samochodu w postaci zależności drogowego zużycia energii od prędkości średniej pojazdu. Poszczególne punkty odpowiadają kolejnym doświadczeniom pseudoprzypadkowym generowania czasów trwania testów Stop and Go, UDC i FTP–75. Na wykresie naniesiono również linię prostą, aproksymującą zbiór punktów zgodnie z kryterium najmniejszej sumy kwadratów.



Rys. 16. Charakterystyka drogowego zużycia energii w pseudoprzypadkowych warunkach użytkowania samochodu

Jak wynika z wyznaczonej charakterystyki, zależność drogowego zużycia energii od prędkości średniej w warunkach dynamicznych zasadniczo różni się od analogicznej charakterystyki dla silników spalinowych. Drogowe zużycie paliwa przez samochodowe silniki spalinowe ulega zdecydowanemu zmniejszeniu się w miarę zwiększania się prędkości średniej pojazdu w zakresie małej wartości średniej prędkości, natomiast charakterystyka dla samochodu elektrycznego wykazuje małą wrażliwość na prędkość średnią pojazdu. Oczywiście tego wniosku nie można uogólniać, bo wyznaczono charakterystykę tylko dla jednego pojazdu, jednak wynik badania jest oryginalny i wart zwrócenia na niego uwagi.

Wielokrotnie powtarzane doświadczenia pseudoprzypadkowe wykazują, że wyznaczone charakterystyki są bardzo mało wrażliwe na kolejne serie doświadczeń. Świadczy to o małej wrażliwości zużycia energii przez samochód elektryczny na pseudoprzypadkowe warunki użytkowania pojazdu, określone procesem prędkości jazdy.

5. Podsumowanie

Istnieje powszechne przekonanie, że pojazdy samochodowe z napędami elektrycznymi są przyszłością motoryzacji przede wszystkim ze względów ekologicznych. Z tego powodu jest celowe badanie właściwości tych pojazdów ze względu na zużycie energii. Wyniki badań przedstawione w niniejszej pracy potwierdzają, że zaproponowana metoda badań jest skuteczna i umożliwi uzyskania obiektywnych wyników. Zaproponowany sposób wyznaczania charakterystyk drogowego zużycia energii w warunkach pseudoprzypadkowych z zastosowaniem metody Monte Carlo jest oryginalną procedurą badania zużycia energii przez samochody elektryczne.

W obecnym stanie technicznym podstawowymi ograniczeniami rozpowszechniania się stosowania samochodów elektrycznych są:

- poziom techniczny akumulatorów energii elektrycznej – o dużej masie, kosztownych i o małej trwałości, a także o małej pojemności energetycznej, uniemożliwiającej – w konsekwencji – zapewnienia dużego zasięgu samochodu,
- sposoby wytwarzania energii elektrycznej na dużą skalę, dotychczas niewykorzystujące metod uznawanych powszechnie za ekologiczne.

Dotychczasowy rozwój akumulatorów energii elektrycznej nie jest dostatecznie dynamiczny, aby w najbliższych czasach optymistycznie traktować możliwość pokonania tej bariery rozwoju samochodów elektrycznych.

Pochodzenie energii na Ziemi można sklasyfikować w sposób następujący.

1. Energia promieniowania słonecznego:

- energia wewnętrzna atmosfery i skorupy ziemskiej,
 - paliwa biologiczne,
 - paliwa kopalne pochodzenia biologicznego,
 - energia kinetyczna ruchu powietrza atmosferycznego,
 - energia kinetyczna ruchu wód: grawitacyjnego i prądów ciepłych.
2. Energia kinetyczna Ziemi i Układu Słonecznego – energia pływów, energia tarcia wewnętrznego.
 3. Energia wiązań chemicznych substancji Ziemi.
 4. Energia jądrowa substancji Ziemi: rozpadu (naturalna i sztuczna) i syntezy (sztuczna).
 5. Energia wewnętrzna Ziemi.
 6. Energia promieniowania kosmicznego.

Ze względów ekologicznych i ekonomicznych od technologii wytwarzania energii elektrycznej oczekuje się spełnienia co najmniej jednego z dwóch warunków:

- odnawialności źródeł energii lub wykorzystywania energii Ziemi,
- małej emisji zanieczyszczeń w procesie wytwarzania energii elektrycznej.

W związku z tym jako przyszłościowe technologie wytwarzania energii elektrycznej jest traktowane wykorzystanie:

- odnawialnych nośników energii – biopaliw, powietrza i wody (energia kinetyczna), promieniowania słonecznego dzięki zastosowaniu ogniw fotoelektrycznych,
- energii Ziemi,
- rozszczepiania jąder atomowych,
- syntezy jądrowej.

Należy oczekiwać, że w przyszłości problem wytwarzania energii elektrycznej nie będzie stanowił najważniejszej bariery rozwoju samochodów elektrycznych.

Inną barierą rozpowszechniania użytkowania samochodów elektrycznych jest infrastruktura stacji ładowania akumulatorów energii elektrycznej oraz sama technologia ładowania – długotrwała w stosunku do zasilania zbiorników samochodów z silnikami spalinowymi paliwami ciekłymi lub gazowymi.

Niezależnie od ograniczeń możliwości rozwoju samochodów elektrycznych jednym z najważniejszych tematów eksploatacji tych pojazdów jest problem zużycia energii, decydujący w znacznej mierze o skuteczności ekonomicznej powszechnego elektrycznego transportu samochodowego.

Piśmiennictwo

1. Becker T.A., Sidhu I., Tenderich B.: Electric vehicles in the United States. A New model with forecasts to 2030. Center for Entrepreneurship & Technology. Technical Brief Number 2009.1.v.2.0. August 24, 2009.
2. BUWAL, INFRAS AG: Luftschadstoffemissionen des Strassenverkehrs 1950 – 2010. BUWAL–Bericht Nr. 255. 1995.
3. Chłopek Z. et al.: Badania empiryczne zużycia energii przez samochód elektryczny w warunkach symulujących rzeczywiste użytkowanie. Praca statutowa ITS nr 6110/COŚ. Warszawa, 2012.
4. Chłopek Z., Jakubowski A.: A study of the particulate matter emission from the braking systems of motor vehicles. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability Nr 4 (4)/2009: 45–52.
5. Chłopek Z., Laskowski P.: Pollutant emission characteristics determined using the Monte Carlo Metod. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability Nr 2(42)/2009: 42–51.

6. Chłopek Z.: Modelowanie procesów emisji spalin w warunkach eksploatacji trakcyjnej silników spalinowych. Prace Naukowe. Seria „Mechanika” z. 173. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 1999.
7. Chłopek Z.: The cognitive interpretation of the Monte Carlo method for the technical applications. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability Nr 3 (43)/2009. 38–46.
8. Delucchi M.A.: Electric and gasoline vehicle lifecycle cost and energy–use model. Report for the California Air Resources Board. Final Report UCD–ITS–RR–99–04. Davis, California: Institute of Transportation Studies – University of California, 2000.
9. Delucchi M.A.: Emissions of greenhouse gases from the use of transportation fuels and Electricity. Report ANL/ESD/TM–22. Argonne, Illinois: Argonne National Laboratory, 1991.
10. Eberhard M., Tarpinning M.: The 21st century electric car. Tesla Motors Inc. 6 October 2006.
11. Gaines L., Singh M: Energy and environmental impacts of electric vehicle battery production and recycling. SAE Total Life Cycle Conference and Exposition. Vienna, 1995.
12. Goedkoop M., Spriensma R.: The Eco–indicator 99. A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment. Methodology Report. Pre Consultants B. V. Amersfoort, 2001.
13. Hirabayashi T., Furuta S., Satou H.: Cost estimation on advanced batteries for electric vehicle. 1992 ISATA Proceedings. SAE Paper 920238.
14. Hirota T.: Nissan’s electric and hybrid electric vehicle program. SAE Hybrid Vehicle Symposium. San Diego CA, 13–14 February 2008.
15. Kromer M.A.; Heywood J.B.: Electric powertrains: Opportunities and challenges in the U.S. light–duty vehicle fleet. Publication No. LFEE 2007–03 RP.
16. Matthew–Wilson C.: A critique of the economic and environmental value of electric cars. C. Matthew–Wilson, 2010.
17. Metropolis N., Ulam S.: The Monte Carlo method. Journal of the American Statistical Association, Vol. 44, No. 247 (Sep., 1949): 335–341.
18. Núñez P. J. M. et al.: Electric vehicle. A cyclical story of death and resurrection. International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ’10) Granada (Spain), 23th to 25th March, 2010.
19. Savitzky A., Golay M.J.E.: Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. Analytical Chemistry. 1964. 36: 1627–1639.
20. Surdacki P.: Reaktor termojądrowy jako źródło energii wykorzystujące technologie plazmowe i nadprzewodnikowe. Rozdział w monografii „Energia niekonwencjonalne i zagospodarowanie odpadów”. Lublin: Wydawnictwo Naukowe Gabriel Borowski, 2010.
21. van Essen H., Kampman B.: Impacts of electric vehicles – Summary report. Publication number: 11.4058.26. Delft: April 2011. www.cedelft.eu.
22. van Haaren R.: Assessment of electric cars’ range requirements and usage patterns based on driving behavior recorded in the National Household Travel Survey of 2009. Study of the Solar Journey USA. Earth and Environmental Engineering Department, Columbia University, Fu Foundation School of Engineering and Applied Science. New York. December, 2011.
23. Wakefield E.H.: History of the electric automobile: Battery–only powered cars. Warrendale PA. SAE 1994.
24. Weinert J., MA C., Cherry C.: The transition to electric bikes in China: history and key reasons for rapid growth. Transportation 34. 2007: 301–318.

25. Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context. WELL-to-WHEELS Report, Version 2c. EUCAR/CONCAWE/JRC. March 2007.
26. Westbrook M.H.: The electric car: Development and future of battery, hybrid and fuel-cell cars. IEE Power & Energy Series, 38. 2001.
27. Wheel to Well Analysis of EVs. MIT Electric Vehicle Team. MIT. April 2008. http://web.mit.edu/evt/summary_wtw.pdf.
28. Worldwide emission standards. Passenger cars and light duty vehicles. Delphi. Innovation for the real world. 2011/2012.