

## ESTIMATION OF ENERGY EFFECTIVENESS OF VEHICLE USING CRUISE OPERATING DATA

Jacek Kropiwnicki

Gdańsk University of Technology, Mechanical Engineering Faculty  
ul. Narutowicza 11/12, 80-952 Gdańsk  
tel.: +48 58 3471024, fax +48 58 3471174  
e-mail: jkropiwn@pg.gda.pl

### Abstract

*New method of estimation of energy effectiveness of vehicle has been presented in this work.*

*The opinion on the energy effectiveness of automobile vehicle has measurable meaning both for individual users, and also for of transport firms and communication firms. The complex analysis of results can contribute to the lowering of the expenditure of the energy (fuel) and the emission of toxic complexes in engine exhaust.*

*The opinion on the energy effectiveness of car vehicle enables: the delimitation of a optimum control of car powerplant system, the detection of defects in car powerplant system, the choice of the optimum road route, the choice of proper exploitation materials, the choice of the best powerplant unit (of applied design solutions).*

*Its results will be representative for whole range of propulsion system operation. The whole range of propulsion system operation will be included using long-time recording of the car's basic operating parameters. This method can also be used for comparison of energy effectiveness of different cars in the same operating conditions. For example: when somebody wants to buy a car, he can compare different vehicles with regard to the amount of fuel consumed in car operating conditions specific for him as a driver.*

**Keywords:** operation of vehicles, fuel consumption

## OCENA DOBROCI ENERGETYCZNEJ POJAZDU SAMOCHODOWEGO NA PODSTAWIE DANYCH POCHODZĄCYCH Z BIEŻĄCEJ EKSPLOATACJI

### Streszczenie

*W pracy zaproponowana została nowa metoda oceny dobroci energetycznej pojazdu samochodowego, którego wyniki będą reprezentatywne dla pełnego zakresu warunków ruchu spotykanych przez użytkowników pojazdów.*

*Ocena dobroci energetycznej pojazdu samochodowego ma wymierne znaczenie zarówno dla indywidualnych użytkowników, jak również dla firm transportowych i komunikacyjnych. Kompleksowa analiza wyników może się przyczynić do obniżenia zużycia energii (paliwa) oraz emisji związków toksycznych w spalinach.*

*Ocena dobroci energetycznej pojazdów samochodowych umożliwia: wyznaczenie optymalnego sterowania układem napędowym, wykrycie usterek w układzie napędowym, wybór optymalnej drogi przejazdu, dobór właściwych materiałów eksploatacyjnych, wybór najlepszej jednostki napędowej (zastosowanych rozwiązań konstrukcyjnych).*

*Pełen zakres eksploatacji badanego pojazdu zostanie uwzględniony dzięki długoterminowej rejestracji parametrów pracy silnika i pojazdu w czasie jego codziennej eksploatacji. Metoda ta może również posłużyć do przeprowadzenia porównania efektywności energetycznej różnych pojazdów dla tych samych, szczególnych warunków eksploatacji. Przykładowo, ktoś decydując się na zakup samochodu może przeprowadzić porównanie różnych egzemplarzy ze względu na ilość zużywanego paliwa przy sposobie eksploatacji właściwym dla niego jako kierowcy.*

**Słowa kluczowe:** eksploatacja pojazdów samochodowych, zużycie paliwa

### 1. Wstęp

Ocena dobroci energetycznej pojazdu samochodowego ma wymierne znaczenie zarówno dla indywidualnych użytkowników, jak również dla firm transportowych i komunikacyjnych. Kompleksowa analiza wyników może się przyczynić do obniżenia zużycia energii (paliwa) oraz

emisji związków toksycznych w spalinach. Ocena dobroci energetycznej pojazdów samochodowych umożliwia:

- wyznaczenie optymalnego sterowania układem napędowym,
- wykrycie usterek w układzie napędowym,
- wybór optymalnej drogi przejazdu,
- dobór właściwych materiałów eksploatacyjnych,
- wybór najlepszej jednostki napędowej (zastosowanych rozwiązań konstrukcyjnych).

Do ocena dobroci energetycznej pojazdu samochodowego wykorzystywany jest najczęściej jeden z dwóch parametrów:

- sprawność eksploatacyjna:  $\eta_{exp}$  [%]
- przebiegowe zużycie paliwa:  $Q$  [dm<sup>3</sup>/100 km].

Użycie drugiego z wymienionych parametrów do oceny dobroci energetycznej pojazdu cieszy się zdecydowanie największą popularnością wśród kierowców ponieważ pozwala im prowadzić osobiście niezależne pomiary oraz stwarza niezwykłą łatwość interpretacji wyników. Zaufanie kierowców do takich wyników spowodowane jest również tym, że pomiary przebiegowego zużycia paliwa prowadzone są w rzeczywistych warunkach ruchu i uwzględniają specyfikę warunków ruchu w określonym mieście lub dzielnicy oraz specyfikę sposobu prowadzenia pojazdu przez danego kierowcę. Ocena eksploatacyjnego zużycia paliwa prowadzona przez kierowców samochodów napotyka jednak na podstawowe trudności związane z brakiem wiarygodnego wzorca, z którym pomierzone w czasie eksploatacji zużycie paliwa można porównać. Konieczna jest w związku z tym identyfikacja warunków eksploatacji pojazdu i przypisania im według przyjętego modelu referencyjnego zużycia paliwa.

## 2. Charakterystyka metody

Zaproponowana metoda oceny dobroci energetycznej pojazdu samochodowego bazuje na spostrzeżeniu, iż dla wybranego egzemplarza samochodu przebiegowe zużycie paliwa pozostaje w ścisłej korelacji z energią mechaniczną dostarczoną do kół napędowych w czasie cyklu pomiarowego, odniesioną do przejechanej drogi i masy pojazdu. Zależność powyższa może być aproksymowana funkcją liniową w postaci [10]:

$$Q = k_1 \cdot \Phi + k_0, \quad (1)$$

gdzie:

$Q$  [dm<sup>3</sup>/100 km] - przebiegowe zużycie paliwa (z wyłączeniem paliwa zużywanego przez silnik na biegu jałowym),

$$\Phi = \frac{E}{L \cdot m} \text{ [J/(m kg)]} - \text{energochłonność jednostkowa [15],} \quad (2)$$

$E$  - energia mechaniczna dostarczona przez układ przeniesienia napędu do kół w czasie cyklu pomiarowego  $t_c$ ,

$L$  - całkowita droga pokonana przez pojazd,

$M$  - masa całkowita pojazdu,

$k_1, k_0$  - współczynniki funkcji aproksymującej.

Zależność (1) będzie dalej nazywana metryką energetyczną pojazdu. Z analizy pozwalającej wyznaczyć zależność (1) wyłączone zostały niewłaściwe stany eksploatacji będące wynikiem złego wyboru biegu w przekładni wybieralnej. Mogą one prowadzić do zwiększenia zużycia paliwa, np. jazda z wybranym II biegiem w przekładni wybieralnej przy stałej prędkości 70 km/h. Eliminacja niewłaściwych stanów eksploatacji jest prowadzona poprzez rozpoznanie

zastrzeżonych konfiguracji: wybranego biegu, osiąganego przez pojazd przyspieszenia oraz prędkości obrotowej silnika. Eliminacja taka ma miejsce wyłącznie wtedy, gdy takie samo przyspieszenie i prędkość pojazd może osiągnąć na innym „właściwym” biegu.

Wyniki doświadczeń prowadzonych w warunkach ruchu ulicznego [15] potwierdzają wstępnie przyjętą tezę (1). Były one jednak wykonane z uwzględnieniem paliwa zużywanego przez silnik w czasie pracy na biegu jałowym, a więc w czasie gdy układ napędowy nie dostarcza energii kołom. Ponadto w zaproponowanej w niniejszej pracy metodzie uwzględnione mają być również krótkotrwałe stany pracy związane z dużą energochłonnością przebiegową, np. intensywne przyspieszanie. Konieczne jest w związku z tym taktowanie kolejnych pomiarów przyjętymi zdarzeniami: zmiana biegów, osiągnięcie założonej drogi lub czasu próby.

Energia mechaniczna przekazywana kołom napędowym może być obliczona na podstawie pomiarów momentu obrotowego silnika  $M_o$  [6] lub wyznaczana z odpowiedniego modelu [11] i prędkości obrotowej  $n$  oraz określenia sprawności układu przeniesienia napędu  $\eta_{UPN}$ :

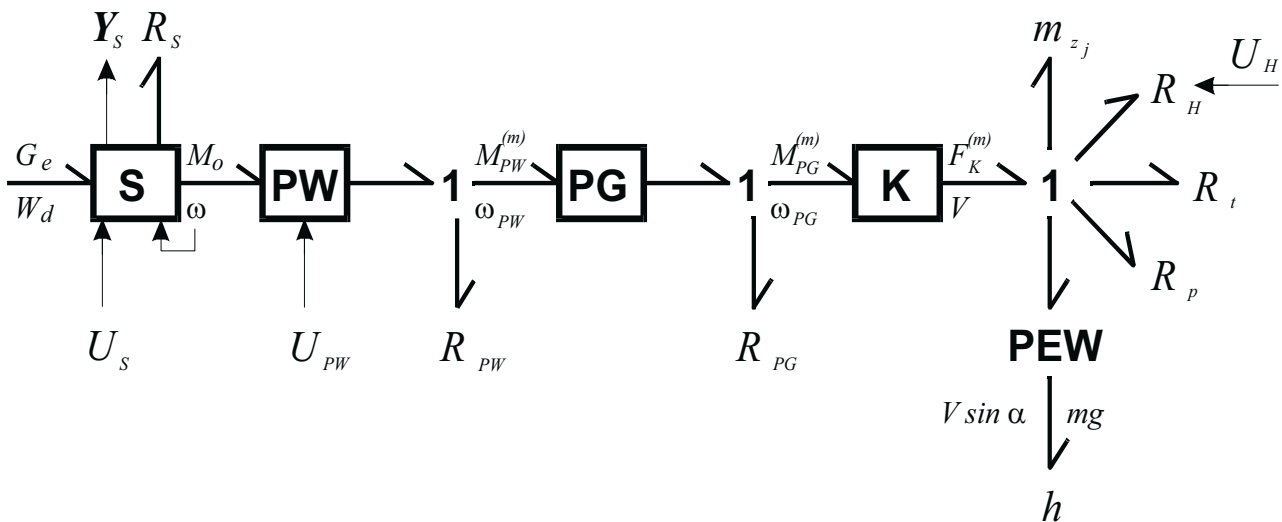
$$E = \int_0^{t_c} (M_o \cdot \omega \cdot \eta_{UPN}) dt, \quad (3)$$

gdzie:

$t_c$  - długość cyklu pomiarowego,

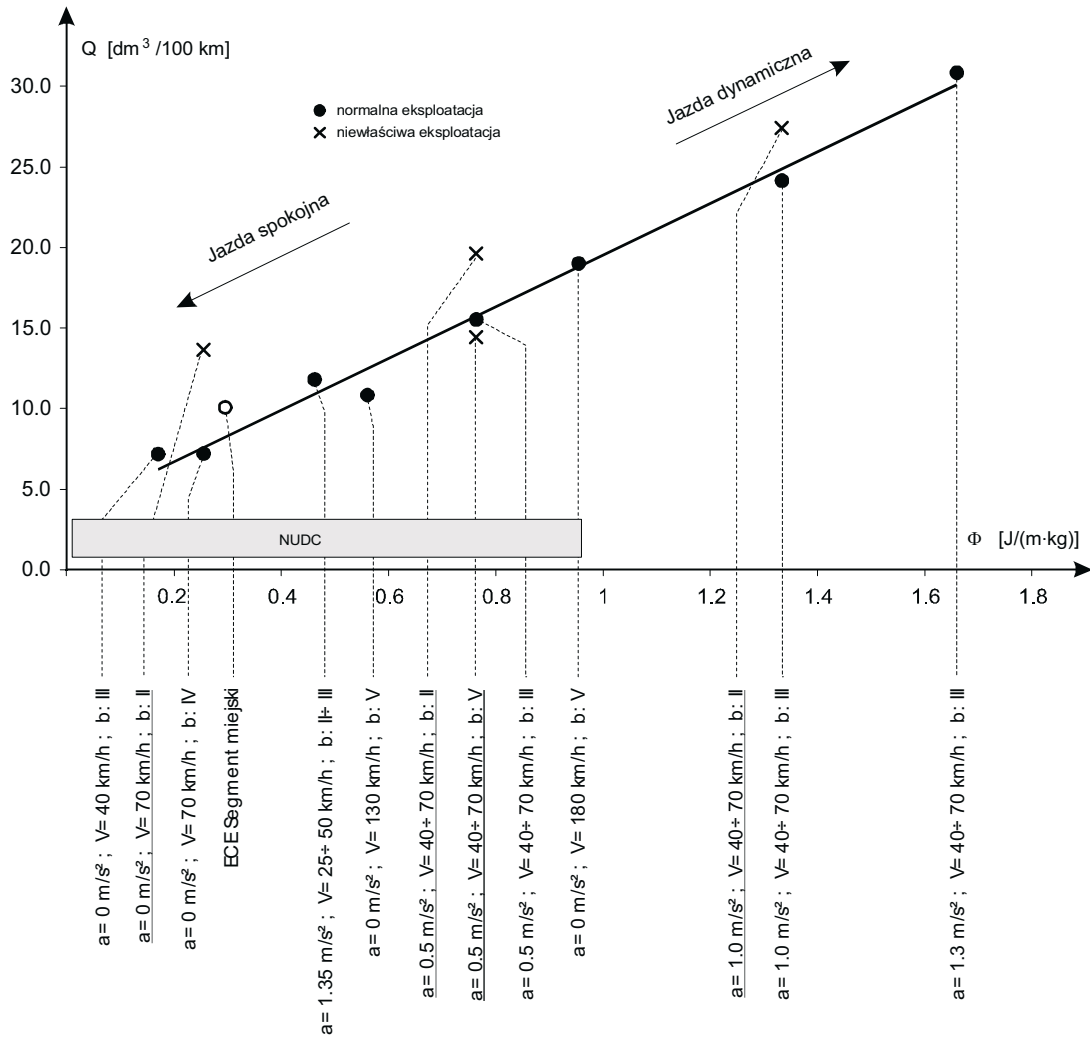
$\omega = 2\pi n$  - prędkość kątowna silnika.

Poniżej zamieszczono przykład symulacji pracy układów napędowych pojazdów: 1. i 2., które przygotowane zostały z użyciem modelu w formie grafów wiązań [4, 5, 11] przedstawionego na Rys. 1. oraz rzeczywistych charakterystyk statycznych silników [10].



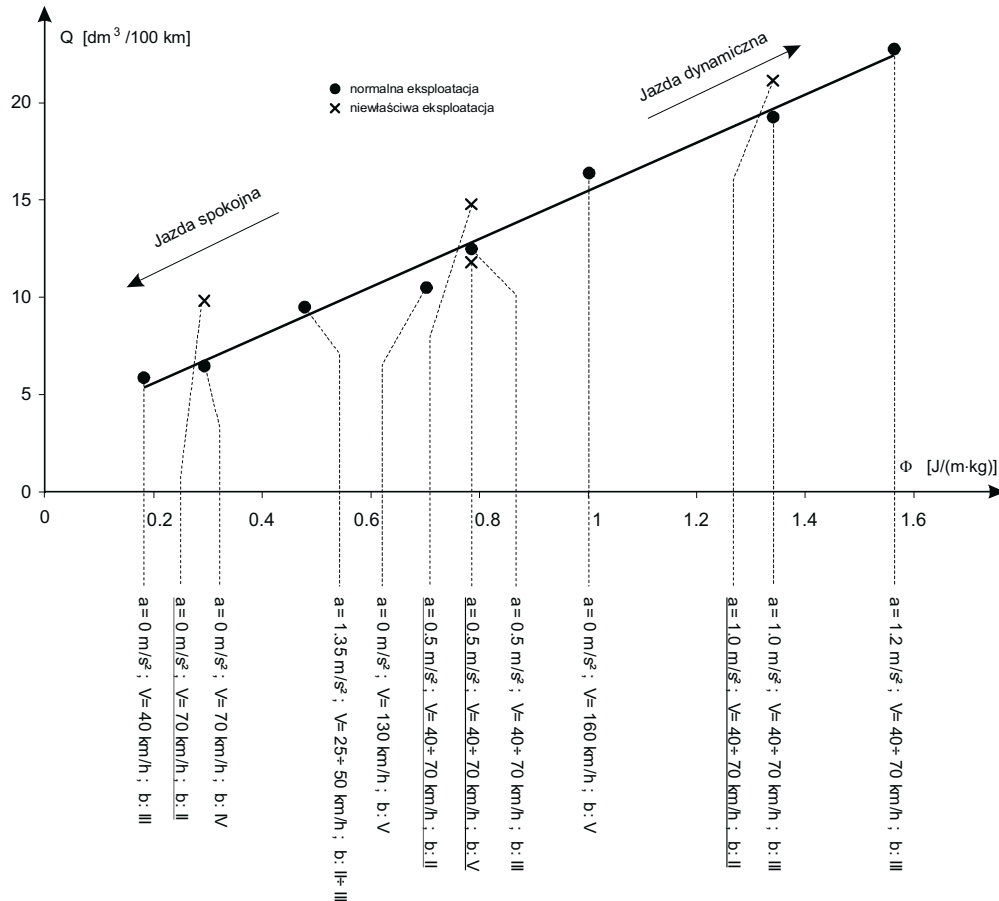
Rys. 1. Model pojazdu w formie grafów wiązań  
Fig. 1. Model of engine in bond graph form

Zużycie paliwa zostało obliczone przy wykorzystaniu matematycznego modelu zawierającego wielowymiarową charakterystykę statyczną silnika [3, 9]. Na Rys. 2. przedstawiono wyniki badań symulacyjnych pojazdu nr 1 wraz ze szczegółowym opisem warunków pracy pojazdu. W dolnej części rysunku podano: maksymalne przyspieszenie, które osiąga pojazd ( $a$ ), zakres zmian prędkości liniowej ( $V$ ) oraz numery biegów, które były wykorzystane w trakcie testu ( $b$ ). Kropkami zaznaczone zostały stany eksploatacji, które uwzględniono przy wyznaczaniu prostej aproksymacyjnej (1).



Rys. 2. Wyniki badań symulacyjnych pojazdu nr 1  
 Fig. 2. Results of simulation tests for 1<sup>st</sup> vehicle

Krzyżykami natomiast zaznaczone zostały niewłaściwe stany eksploatacji, które nie zostały uwzględnione przy konstruowaniu prostej aproksymacyjnej (1). Szarym polem z oznaczeniem NUDC [13] oznaczono zakres zmian parametru  $\Phi$  w cyklu jezdnym NUDC. Przedstawione na Rys. 2. warunki pracy pojazdu nr 1 obejmują zarówno krótkie stany rozpędzania pojazdu, jak również jazdę pojazdu ze stałą prędkością, a więc warunki ustalone. Odpowiednio duże wartości parametru  $\Phi$  osiągnięto dzięki skróceniu wybranych do analizy fragmentów pracy układu napędowego pojazdu, np.: bardzo intensywne przyspieszanie na biegu III (ostatni punkt włączony do analizy). Dla porównania, warunki pracy pojazdu odpowiadające spokojnej jeździe mogą zostać uzyskane podczas realizacji segmentu miejskiego testu NUDC. Na tej podstawie można wnioskować, że rejestracja rzeczywistych długotrwałych warunków pracy będzie powodować znaczące zawężanie analizowanych zakresów zmian parametru  $\Phi$  i dlatego podczas tworzenia prostej aproksymacyjnej (1) należy wyodrębnić również krótkie stany pracy odpowiadające dużym wartościom  $\Phi$ . Wykonana na Rys. 2. aproksymacja liniowa przebiegowego zużycia paliwa  $Q$  potwierdza wstępnie przyjętą tezę (1) o zachowaniu ścisłej korelacji przebiegowego zużycia paliwa z energochłonnością jednostkową  $\Phi$  po odrzuceniu z analizy punktów odpowiadających niewłaściwej eksploatacji układu napędowego. Aproksymacja została wykonana z użyciem metody najmniejszych kwadratów a współczynnik korelacji osiągnął w tym wypadku wartość  $\rho = 0.994$ . Podobne rezultaty osiągnięto przy analizie pracy układu napędowego pojazdu nr 2. (Rys. 3), współczynnik korelacji wyniósł  $\rho = 0,993$ .



Rys. 3. Wyniki badań symulacyjnych pojazdu nr 2  
 Fig. 3. Results of simulation tests for 2<sup>nd</sup> vehicle

### 3. Ocena dobroci energetycznej pojazdu samochodowego

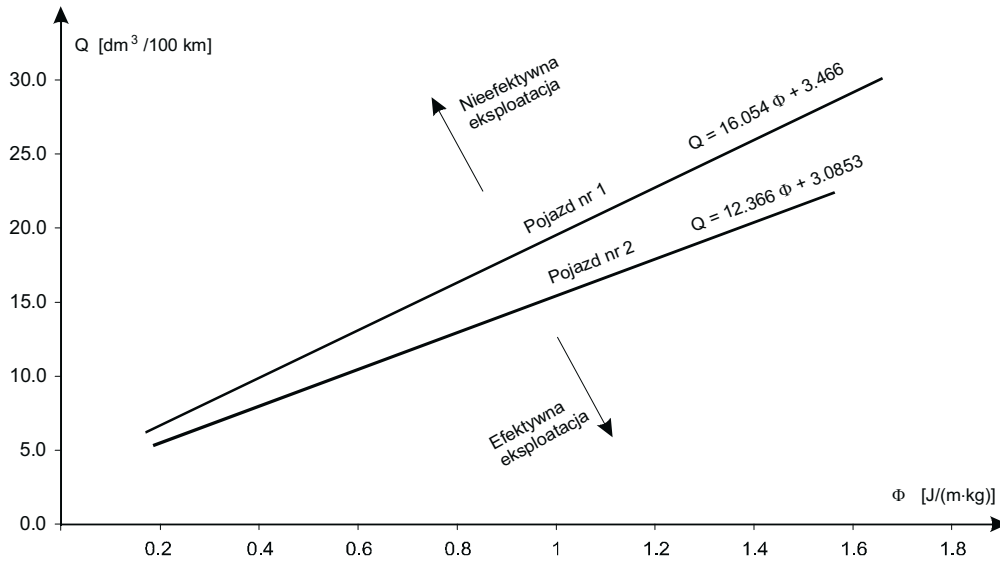
Uzyskane proste aproksymacyjne w przykładach dla pojazdów 1. i 2. można traktować jako funkcyjny lub dwuparametrowy (współczynniki  $k_1$  i  $k_0$ ) opis efektywności pracy układu napędowego. W odróżnieniu od dotychczas używanego przebiegowego zużycia paliwa  $Q$  [dm<sup>3</sup>/100 km] opis za pomocą funkcji (1) obejmuje pełen zakres pracy układu napędowego. Nie następuje tutaj także niejednoznaczna klasyfikacja warunków pracy na ruch miejski i poza-miejski [1, 2, 7, 14, 15].

Na Rys. 4. pokazane zostało wzajemne położenie metryk energetycznych pojazdów (1) uzyskanych w czasie badań symulacyjnych pojazdów nr 1 i nr 2. Na Rys. 4. pokazane zostały również równania opisujące proste aproksymacyjne. Wyniki badań symulacyjnych pojazdów nr 1 i 2 pokazują jednoznacznie, iż pojazd nr 2 posiada układ napędowy, który pracuje bardziej efektywnie przy każdych spotykanych warunkach ruchu. Warunki ruchu pojazdu opisane są parametrem  $\Phi$ , którego wartość dla założonego czasu trwania cyklu  $t_c$ , można obliczyć korzystając z równania (2). Wynikającą stąd oszczędność w zużyciu paliwa można obliczyć przyjmując bądź jedną określoną wartość  $\Phi$ , bądź też jej przedział zmian z przypisaną do niego funkcją gęstości rozkładu parametru  $\Phi$ :

$$f_{\Phi} = f(\Phi). \quad (4)$$

Funkcja ta może zostać wyznaczona na drodze okresowej rejestracji podstawowych parametrów opisujących warunki eksploatacji pojazdu, między innymi: prędkości obrotowej wału korbowego silnika i momentu obrotowego (z modelu układu napędowego pojazdu - w przypadku braku systemu pomiaru tego parametru), przejechanej drogi.

W przypadku, gdy proste aproksymacyjne (metryki energetyczne) (1) przecinają się (Rys. 5) jednoznaczne określenie, który z pojazdów posiada bardziej efektywny układ napędowy nie jest możliwe. W takim wypadku należy do analizy włączyć funkcję gęstości rozkładu parametru  $\Phi$  (4).



Rys. 4. Wzajemne położenie prostych aproksymacyjnych (1) uzyskanych w czasie badań symulacyjnych pojazdów nr 1 i nr 2

Fig. 4. Relative position of approximation straight lines (1), which have been obtained during simulation tests of 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> vehicles

Na Rys. 5. pokazane zostały przykładowe przecinające się proste aproksymacyjne oraz przykładowa funkcja  $f_\Phi$ . Przy obciążeniu układu napędowego według funkcji  $f_\Phi$  zaproponowanej na Rys. 5 decydujący wpływ na wybór jednostki efektywniejszej będzie miało niewątpliwie jej przebiegowe zużycie paliwa  $Q$  w obszarze tzw. „jazdy spokojnej”. W ogólnym przypadku dysponując funkcją  $f_\Phi$ , określającą sposób eksploatacji pojazdu, można wyznaczyć przeciętne zużycie paliwa przez pojazd na podstawie równania:

$$\bar{Q} = \frac{1}{L} \left\{ L_n \int_{\Phi_{min}}^{\Phi_{max}} [f_\Phi(k_1 \cdot \Phi + k_0)] d\Phi + \mathcal{G}_{b.j.} + \mathcal{G}_h \right\}, \quad (5)$$

gdzie:

$\Phi_{min}, \Phi_{max}$  - granice zmian parametru  $\Phi$ .

$\mathcal{G}_{b.j.}$  [dm<sup>3</sup>] - paliwo zużyte podczas pracy silnika na biegu jałowym,

$\mathcal{G}_h$  [dm<sup>3</sup>] - paliwo zużyte podczas hamowania (w czasie hamowania silnikiem:  $\mathcal{G}_h \rightarrow 0$ ),

$L$  [m] - całkowita droga przebyta przez pojazd,

$L_n$  [m] - droga przebyta przez pojazd gdy był on napędzany przez silnik.

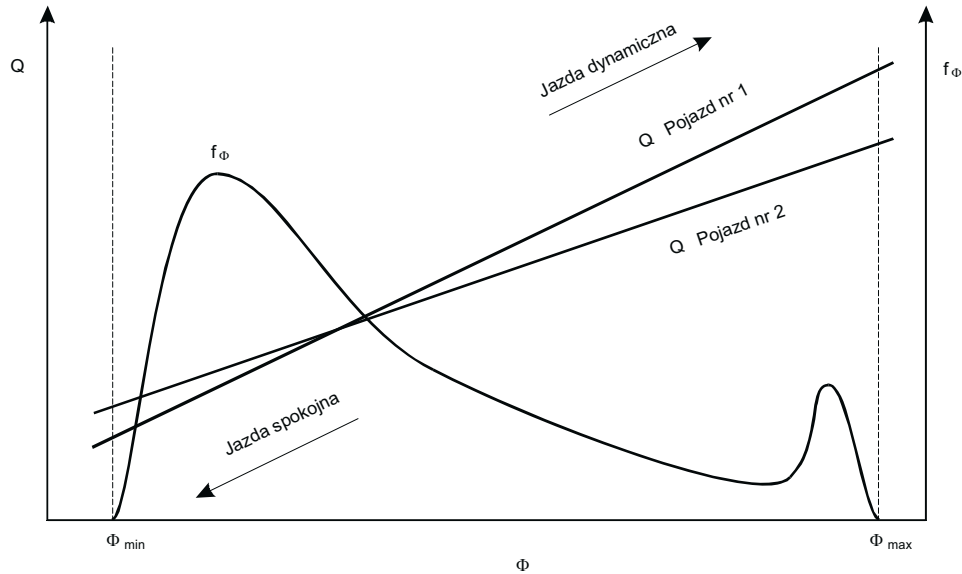
Dla przyjętych granic zmian parametru  $\Phi$  spełniony musi być ponadto warunek:

$$\int_{\Phi_{min}}^{\Phi_{max}} f_\Phi d\Phi = 1. \quad (6)$$

Uproszczoną analizę efektywności układów napędowych pojazdów można także wykonać wykorzystując wskaźnik równy polu zamkniętemu pod prostą aproksymacyjną (1):

$$ef = \frac{1}{2} (Q|_{\Phi_{max}} + Q|_{\Phi_{min}}) \cdot (\Phi_{max} - \Phi_{min}). \quad (7)$$

Przyjmując, że:  $f_{\Phi} = const$  mniejsza wartość tego wskaźnika będzie odpowiadała bardziej efektywnemu układowi napędowemu.



Rys. 5. Wzajemne położenie przecinających się prostych aproksymacyjnych (1) wraz z funkcją gęstości rozkładu parametru  $\Phi$

Fig.5. Relative position of approximation straight (1) with density function of distribution of parameter  $\Phi$

#### 4. Wnioski

Ocena dobroci energetycznej pojazdu samochodowego według przedstawionej koncepcji polega na wyznaczeniu w czasie regularnej eksploatacji pojazdu zbioru punktów:  $[Q; \Phi]$  poprzez pomiar i rejestrację podstawowych parametrów pracy silnika i pojazdu. Zakłada się, iż parametr  $\Phi$  zostanie wyznaczony przy użyciu metody (3), natomiast przebiegowe zużycie paliwa  $Q$  zostanie obliczone na podstawie czasu otwarcia wtryskiwacza oraz prędkości obrotowej silnika [8]. Wynikiem przeprowadzonego testu będzie wyznaczenie prostej aproksymacyjnej (metryki energetycznej pojazdu) opisanej równaniem (1), której położenie określa efektywność układu napędowego pojazdu dla pełnego zakresu jego pracy. Im „niżej” prosta (1) jest położona tym większa jest efektywność pracy układu napędowego pojazdu. Wykorzystania prostej aproksymacyjnej (1) upatruje się głównie przy porównaniach różnych pojazdów pod względem efektywności pracy ich układów napędowych (zużycia paliwa dla tych samych warunków pracy). Prosta aproksymacyjna (1) może stanowić metrykę energetyczną pojazdu a jej bieżące, zbyt „wysokie” położenie może kwalifikować pojazd do naprawy bądź wycofania z ruchu ze względu na zbyt dużą emisję  $CO_2$  (w przypadku, gdy ograniczenie takie zostanie już wprowadzone).

Metoda umożliwia także ocenę eksploatacyjnego zużycia paliwa pojazdu samochodowego dzięki porównaniu zarejestrowanego zużycia paliwa z referencyjnym dla tych samych warunków eksploatacji [12]. Przykładowo, ktoś decydując się na zakup samochodu może przeprowadzić porównanie różnych egzemplarzy ze względu na ilość zużywanego paliwa przy sposobie eksploatacji właściwym dla niego jako kierowcy.

#### Literatura

- [1] Cayot, J. F., *Compared fuel consumption between gasoline and diesel cars during short urban drive*, Reducing automobile fuel consumption: a challenge for the turn of the century, Rueil-Malmaison, 4 X 1996.

- [2] Chłopek, Z., *Ochrona środowiska naturalnego*, WKiŁ, Warszawa 2002.
- [3] Cichy, M., Kropiwnicki, J., Makowski, S., *Model silnika spalinowego w formie grafów wiązań (GW), A model of the IC engine in the form of the bond graph (BG)*, Silniki Spalinowe - Combustion Engines, s. 40-47, 2004.
- [4] Cichy, M., Kropiwnicki, J., *Model procesu hamowania w pojeździe hybrydowym*, Archiwum Motoryzacji, Wydawnictwo Naukowe PTNM 2005/4, s. 309-320.
- [5] Cichy, M., *Modelowanie systemów energetycznych*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2001.
- [6] Fehrenbach, H., Hohmann, C., Schmidt, Th., Schultalbers, W., Rasche, H., *Bestimmung des Motordrehmoments aus dem Drehzahlsignal*, MTZ 12/2002, s. 1020-1027.
- [7] Gronowicz, J., *Ochrona środowiska w transporcie lądowym*, Politechnika Poznańska, Instytut Technologii Eksploatacji w Radomiu, 2003.
- [8] Kneba, Z., Kropiwnicki, J., *Pośrednie metody pomiaru chwilowego zużycia paliwa w silniku ZI o wtrysku pośrednim*, V Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna Pojazd a Środowisko, Jedlnia-Letnisko, 13-15 czerwca 2005, Wydaw. P. Radom, s. 159-166, 2005.
- [9] Kropiwnicki, J., *The Application of spline function for approximation of engine characteristics*, Archiwum Motoryzacji, PWN 2000/4, s. 19-21, Warszawa.
- [10] Kropiwnicki, J., *Koncepcja nowego testu energetycznego dla pojazdów samochodowych*, Archiwum Motoryzacji, Nr 2, s. 69-183, 2007.
- [11] Kropiwnicki, J., *Modeling of Reciprocating Engine Transient Torque*, Materiały konf. Bałtiechmasz, Kaliningrad 20-23.06, 2006.
- [12] Kropiwnicki, J., *Possibilities of operating fuel consumption estimation of vehicles. Developments in Mechanical Engineering*, Gdańsk University of Technology Publishers, , Vol. 2, Gdańsk 2008.
- [13] Mercedes-Benz, *Grenzwerte, Vorschriften und Messung der Abgas-Emissionen sowie Berechnung des Kraftstoffverbrauchs aus dem Abgastest*.
- [14] Merkisz, J., *Ekologiczne problemy silników spalinowych*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1998.
- [15] Siłka, W., *Teoria ruchu samochodu*, WNT, Warszawa 2002.