

JACEK KROPIWNICKI

OCENA EFEKTYWNOŚCI  
ENERGETYCZNEJ  
POJAZDÓW SAMOCHODOWYCH  
Z SILNIKAMI SPALINOWYMI

POLITECHNIKA GDAŃSKA

*monografie*

*110*

POLITECHNIKA GDAŃSKA

JACEK KROPIWNICKI

OCENA EFEKTYWNOŚCI  
ENERGETYCZNEJ  
POJAZDÓW SAMOCHODOWYCH  
Z SILNIKAMI SPALINOWYMI



GDAŃSK 2011

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO  
WYDAWNICTWA POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

*Romuald Szymkiewicz*

REDAKTOR PUBLIKACJI NAUKOWYCH

*Janusz T. Cieśliński*

REDAKTOR SERII

*Marek Szkodo*

RECENZENCI

*Jerzy Ejsmont*

*Jerzy Merkisz*

PROJEKT OKŁADKI

*Jolanta Cieślawska*

Wydano za zgodą  
Rektora Politechniki Gdańskiej

Oferta wydawnicza Politechniki Gdańskiej jest dostępna na stronie  
[www.pg.gda.pl/WydawnictwoPG](http://www.pg.gda.pl/WydawnictwoPG)

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej  
Gdańsk 2011

Utwór nie może być powielany i rozpowszechniany, w jakiegokolwiek formie  
i w jakikolwiek sposób, bez pisemnej zgody wydawcy

ISBN 978-83-7348-357-6

# SPIS TREŚCI

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW .....	5
1. WPROWADZENIE .....	7
2. STAN WIEDZY .....	9
2.1. Metody oceny efektywności energetycznej pojazdów.....	9
2.1.1. Sprawność eksploatacyjna pojazdu .....	9
2.1.2. Przebiegowe zużycie paliwa.....	12
2.1.3. Inne wskaźniki porównawcze.....	13
2.2. Metody identyfikacji warunków eksploatacji pojazdów.....	13
2.2.1. Profil prędkości pojazdu.....	13
2.2.2. Założona trasa przejazdu .....	15
2.2.3. Średnia prędkość jazdy .....	17
2.2.4. Moc dostarczana do kół napędowych.....	18
2.2.5. Energochłonność przebiegowa, energochłonność jednostkowa .....	18
2.2.6. Rozkład prawdopodobieństwa stanów pracy silnika .....	23
2.2.7. Rozkład prawdopodobieństwa stanów pracy pojazdu .....	25
2.2.8. Styl jazdy kierowcy .....	25
2.3. Podsumowanie stanu wiedzy .....	26
3. CEL I ZAKRES PRACY .....	28
4. ZAŁOŻENIA DLA PRZYJĘTEJ METODYKI BADAŃ .....	31
4.1. Informacje wstępne.....	31
4.2. Pomiar parametrów pracy silnika i pojazdu z wykorzystaniem pokładowej sieci CAN ...	33
4.3. Pomiar parametrów trakcyjnych pojazdu z wykorzystaniem systemu GPS .....	36
4.3.1. Korekta sygnału wysokości pochodzącego z systemu GPS .....	36
4.3.2. Przykłady wykorzystania korekty sygnału wysokości .....	40
4.4. Model układu napędowego pojazdu .....	42
4.5. Wykorzystanie charakterystyk statycznych w modelowaniu pracy silnika spalinowego ..	44
4.6. Możliwości wykorzystania dynamicznego modelu silnika spalinowego .....	49
4.6.1. Dynamiczny model silnika spalinowego.....	49
4.6.2. Iteracyjna procedura określania momentu obrotowego silnika spalinowego .....	54
5. IDENTYFIKACJA WARUNKÓW EKSPLOATACJI POJAZDU.....	59
5.1. Identyfikacja warunków eksploatacji pojazdu z wykorzystaniem energochłonności jed- nostkowej.....	59
5.2. Klasyfikacja warunków eksploatacji pojazdu.....	63
6. OCENA EKSPLOATACYJNEGO ZUŻYCIA PALIWA ORAZ EFEKTYWNOŚCI ENERGETYCZNEJ POJAZDÓW .....	70
6.1. Metryka energetyczna pojazdu .....	70
6.2. Uproszczona procedura wyznaczania metryki energetycznej pojazdu .....	71
6.3. Referencyjne zużycie paliwa .....	77
6.4. Przykłady porównania referencyjnego zużycia paliwa pojazdów dla zadanych warun- ków eksploatacji .....	79
6.5. Rozszerzona metryka energetyczna pojazdu .....	82
6.6. Porównywanie efektywności energetycznej pojazdów.....	86

---

7. MOŻLIWOŚCI WYZNACZANIA REFERENCYJNEGO ZUŻYCIA PALIWA I EMISJI CO <sub>2</sub> POJAZDÓW Z UŻYCIEM MAPY WARUNKÓW EKSPLOATACJI W WYBRANEJ AGLOMERACJI.....	89
7.1. Koncepcja tworzenia mapy warunków eksploatacji w wybranej aglomeracji.....	89
7.2. Przykład wykorzystania mapy warunków eksploatacji dla wybranych tras przejazdu.....	93
7.3. Wpływ pory dnia na warunki eksploatacji pojazdów .....	97
7.4. Analiza uzyskanych wyników .....	101
8. PODSUMOWANIE.....	102
BIBLIOGRAFIA.....	107
Streszczenie w języku polskim .....	115
Streszczenie w języku angielskim .....	115

# WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW

## Oznaczenia

$CO_2$	– emisja drogowa dwutlenku węgla [g/km]
$C_X$	– współczynnik oporu powietrza [-]
$E$	– energia mechaniczna dostarczona przez układ przeniesienia napędu do kół [J]
$e_{CO}$	– jednostkowa emisja tlenku węgla [g/(kW·h)]
$ef$	– wskaźnik efektywności energetycznej pojazdu [(J·m)/Gkg]
$\overline{ef}$	– wartość średnia wskaźnika efektywności energetycznej pojazdu [(J·m)/Gkg]
$e_{HC}$	– jednostkowa emisja węglowodorów [g/(kW·h)]
$E_{CE}^*$	– całkowite zużycie energii cieplnej w czasie eksploatacji [J]
$E_{EL}^*$	– całkowite zużycie energii elektrycznej w czasie eksploatacji [J]
$E_{ME}^*$	– całkowite zużycie energii mechanicznej w czasie eksploatacji [J]
$E_p$	– zapotrzebowanie energii na pokrycie oporów powietrza pojazdu [J]
$E_t$	– zapotrzebowanie energii na pokrycie oporów toczenia pojazdu [J]
$F$	– obliczeniowa powierzchnia czołowa pojazdu [m <sup>2</sup> ]
$F_k$	– siła na kołach napędowych [N]
$F_p$	– siła oporów powietrza [N]
$F_t$	– siła oporów toczenia pojazdu [N]
$f_t$	– współczynnik oporu toczenia [-]
$f_{io}$	– współczynnik podstawowego oporu toczenia [-]
$f_{\Phi}$	– funkcja gęstości rozkładu energochłonności jednostkowej
$g$	– przyspieszenie ziemskie [m/s <sup>2</sup> ]
$g_e$	– jednostkowe zużycie paliwa [g/(kW·h)]
$\overline{G}_{bj}$	– czasowe zużycie paliwa przy pracy silnika na biegu jałowym [kg/s]
$G_e$	– czasowe zużycie paliwa [kg/s]
$H$	– wysokość nad poziomem morza, na której znajduje się pojazd [m]
$i_b$	– przełożenie przekładni wybieralnej [-]
$i_g$	– przełożenie przekładni głównej [-]
$I_k$	– moment bezwładności koła jezdnego [kg·m <sup>2</sup> ]
$L$	– całkowita droga przebyta przez pojazd [m]
$L_n$	– droga przebyta przez pojazd w fazie napędzania przez silnik [m]
$L_n/L$	– udział drogi przejechanej w fazie napędzania przez silnik w stosunku do całkowitej drogi [-]
$L_s$	– pole pracy silnika
$m$	– masa całkowita pojazdu [kg]
$m_0$	– masa pojazdu, przy której utworzono metrykę energetyczną pojazdu [kg]
$m_{pal}^*$	– paliwo zużyte w czasie eksploatacji [kg]
$m_{z_j}$	– masa zredukowana pojazdu uwzględniająca kumulację energii kinetycznej w elementach wykonujących ruch obrotowy [kg]
$M_d$	– dynamiczny moment obrotowy silnika [N·m]
$M_o$	– moment obrotowy silnika [N·m]
$\overline{M}_o$	– wartość średnia momentu obrotowego silnika w fazie napędowej [N·m]
$M_S$	– moment obrotowy, który silnik generuje w stanie ustalonym [N·m]
$n$	– prędkości obrotowa silnika [obr/min]
$\overline{n}$	– wartość średnia prędkości obrotowej silnika w fazie napędowej [obr/min]
$Q$	– przebiegowe zużycie paliwa [dm <sup>3</sup> /100 km]
$Q_{exp}$	– eksploatacyjne zużycie paliwa [dm <sup>3</sup> /100 km]
$Q_n$	– przebiegowe zużycie paliwa w fazie napędowej [dm <sup>3</sup> /100 km]

$\bar{Q}$	– referencyjne (prognozowane) zużycie paliwa [ $\text{dm}^3/100 \text{ km}$ ]
$R^2$	– współczynnik determinacji [–]
$r_d$	– promień dynamiczny koła [m]
$t_{bj}$	– czas pracy silnika na biegu jałowym [s]
$t_{bj}/t_c$	– udział czasu pracy silnika na biegu jałowym lub w trybie czuwania w przypadku funkcjonowania systemu Start – Stop, w stosunku do całkowitego czasu testu [–]
$t_c$	– całkowity czas trwania testu lub okresu eksploatacji [s]
$T_{ch}$	– temperatura płynu chłodzącego silnika [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$U_s$	– sygnał sterowania silnikiem
$V$	– prędkość pojazdu [m/s]
$\bar{V}$	– średnia prędkość pojazdu [m/s]
$W_d$	– wartość opałowa paliwa [J/kg]
$\mathbf{Y}_s$	– wektor parametrów charakterystyki wielowymiarowej
$\delta$	– współczynnik mas wirujących [–]
$\delta_{\text{exp}}$	– błąd odwzorowania eksploatacyjnego zużycia paliwa [–]
$\Delta E_k$	– zapotrzebowanie energii na wzrost energii kinetycznej pojazdu (w wyniku przyspieszania) [J]
$\Delta E_H$	– zapotrzebowanie energii na wzrost energii potencjalnej pojazdu (w wyniku pokonywania wzniesień) [J]
$\Delta L$	– długość, na którą podzielono trasę przejazdu w płaszczyźnie poziomej [m]
$\Delta L_S$	– prostokątny element pola pracy silnika o zadanych wymiarach
$\Delta M$	– różnica między statycznym i dynamicznym momentem obrotowym silnika dla tej samej prędkości obrotowej [N·m]
$\varepsilon$	– przyspieszenie kątowe wału korbowego silnika [ $\text{rad/s}^2$ ]
$\Phi$	– energochłonność jednostkowa (w fazie napędzania przez silnik) [J/(m·kg)]
$\bar{\Phi}$	– wartość średnia rozkładu energochłonności jednostkowej [J/(m·kg)]
$\eta_o$	– sprawność ogólna silnika [–]
$\eta_{UE}$	– sprawność układu energetycznego [–]
$\eta_{UN}$	– ogólna sprawność chwilowa układu napędowego pojazdu (wraz z silnikiem) [–]
$\eta_{UPN}$	– sprawność układu przeniesienia napędu (sprzęgło, przekładnie, linia wałów) [–]
$\vartheta_{bj}$	– paliwo zużyte podczas pracy silnika na biegu jałowym [ $\text{dm}^3$ ]
$\vartheta_h$	– paliwo zużyte podczas hamowania [ $\text{dm}^3$ ]
$\rho_{\text{pow}}$	– gęstość powietrza [ $\text{kg/m}^3$ ]
$\rho$	– współczynnik korelacji [–]
$\sigma$	– odchylenie standardowe rozkładu energochłonności jednostkowej [J/(m·kg)]
$\omega$	– prędkość kąтова silnika [rad/s]

### Skróty

CAN	– pokładowa sieć wymiany danych, ang. <i>Controller Area Network</i>
EUDC	– cykl pozamiejski testu jezdniego (Unia Europejska), ang. <i>Extra Urban Driving Cycle</i>
FTP-75	– federalny test jezdny (Stany Zjednoczone), ang. <i>Federal Test Procedure</i>
GPS	– system pomiaru położenia, nawigacji satelitarnej obejmujący całą kulę ziemską, ang. <i>Global Positioning System</i>
GW	– metoda Grafów Wiązań
HWFET	– test badania zużycia paliwa w jeździe po autostradzie (Stany Zjednoczone), ang. <i>Highway Fuel Economy Test</i>
NEDC	– test jezdny (Unia Europejska), ang. <i>New European Driving Cycle</i>
OBD	– układ diagnostyki pokładowej, ang. <i>On-Board Diagnostics</i>
RS	– metoda Równań Stanu
UDC	– cykl miejski testu jezdniego (Unia Europejska), ang. <i>Urban Driving Cycle</i>

## Rozdział 1

# WPROWADZENIE

Duża intensywność rozwoju aglomeracji miejskich oraz wzrost transportu towarów i osób [153, 164, 175] powoduje intensyfikację prac mających na celu rozpoznanie warunków eksploatacji pojazdów na tych obszarach [36, 55, 113, 114, 126, 155, 168] oraz ograniczenie poziomu emisji związków toksycznych do atmosfery pochodzących z transportu drogowego [34, 64, 113, 123, 124, 127, 128]. Rozwijanych jest równolegle wiele metod opisu warunków eksploatacji pojazdów. Używane są metody identyfikujące warunki eksploatacji pojazdów za pomocą wskaźników takich jak: energochłonność przebiegowa, energochłonność jednostkowa, średnie przyspieszenie w fazach przyspieszania, średnia prędkość, rozkład punktów pracy silnika, etc. [34, 64, 97, 155]. W powszechnym użyciu są również metody, które identyfikują warunki eksploatacji w sposób uśredniony dla reprezentatywnej grupy pojazdów na wybranym obszarze (Transport intensity, Passenger-kilometers, Freight-kilometers, Environmental capacity, etc.) [5, 16, 165]. Metody te pozwalają zazwyczaj analizować wpływ warunków eksploatacji na emisję związków toksycznych dla reprezentatywnej grupy pojazdów na wybranym obszarze. Nie są to jednak metody, których celem jest identyfikacja warunków eksploatacji pojedynczego pojazdu. Nadal powszechnie używaną metodą jest również opis warunków eksploatacji pojazdów za pomocą profilu prędkości pojazdu poruszającego się po wybranym obszarze [111, 140, 167, 171].

Poprawna identyfikacja warunków eksploatacji wybranego samochodu ma duże znaczenie zarówno dla indywidualnych kierowców, jak również dla firm zajmujących się transportem publicznym. Jej wyniki mogą przyczynić się do obniżenia zużycia energii (paliwa), a tym samym emisji związków toksycznych. Do najważniejszych celów identyfikacji warunków eksploatacji samochodu można zaliczyć:

- ocenę efektywności energetycznej pojazdu samochodowego dla rozpoznanych lub założonych warunków eksploatacji, która zgodnie z [1, 86, 119, 131, 151] umożliwia:
  - wyznaczenie optymalnego sterowania układem napędowym,
  - wykrycie usterek w układzie napędowym,
  - dobór właściwych materiałów eksploatacyjnych,
  - wybór najlepszej jednostki napędowej (zastosowanych rozwiązań konstrukcyjnych),
- wyznaczenie referencyjnego zużycia paliwa dla rozpoznanych lub założonych warunków eksploatacji [3, 169],
- określenie wpływu stosowanych rozwiązań inżynierii drogowej na strukturalne zużycie energii i emisję związków szkodliwych do atmosfery dla określonej struktury eksploatowanych pojazdów [5, 165],
- wyznaczenie optymalnej drogi przejazdu ze względu na minimalizację zużycia paliwa, energii, emisję CO<sub>2</sub> lub związków szkodliwych do atmosfery [3].

Do oceny efektywności energetycznej pojazdu samochodowego wykorzystywany jest najczęściej jeden z dwóch parametrów:

- sprawność eksploatacyjna [9, 48, 64],
- przebiegowe zużycie paliwa [74, 76, 119, 129, 135, 147, 150, 156].



Użycie drugiego z wymienionych parametrów do oceny efektywności energetycznej pojazdu cieszy się największą popularnością wśród kierowców, ponieważ pozwala im prowadzić niezależne pomiary (metodą pełnego zbiornika lub z wykorzystaniem pokładowego systemu komputerowego) oraz ułatwia interpretację wyników. Zaufanie kierowców do takich wyników spowodowane jest również tym, że pomiary przebiegowego zużycia paliwa prowadzone są w rzeczywistych warunkach ruchu i uwzględniają specyfikę ruchu w określonym mieście lub dzielnicy oraz styl prowadzenia pojazdu przez danego kierowcę. Ocena efektywności energetycznej pojazdu prowadzona przez kierowców samochodów napotyka jednak na podstawowe trudności związane z brakiem wiarygodnego wzorca, z którym mierzone 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. Określone powyżej cele identyfikacji warunków eksploatacji wymagają stosowania odpowiednich modeli pozwalających powiązać te warunki z wybranymi parametrami pracy silników, jak np.: zużyciem paliwa, emisją związków toksycznych, itp. Ocena efektywności układów napędowych zasilanych mieszaninami paliw [115] lub wyposażonych w układy hybrydowe [117, 118, 122, 160] stwarza dodatkowe problemy związane ze stosowaniem źródeł energii o innych właściwościach fizycznych, np. w układzie hybrydowym energia do napędu kół może pochodzić z silnika spalinowego zasilanego paliwem węglowodorowym lub z silnika elektrycznego zasilanego z akumulatorów. Przy napędach hybrydowych wygodniej jest używać, jako wskaźnika porównawczego, energii odniesionej do drogi. Używane są również sprawności oraz jednostkowe zużycie energii [170].

Bezpośrednią inspiracją do przygotowania tej pracy była kilkuletnia współpraca autora z firmą komunikacyjną MZK Słupsk w zakresie badania właściwości ekologicznych i nadzoru nad eksploatacją autobusów miejskich zasilanych paliwem etanolowym oraz współpracą z firmą ELPIGAZ z Gdańska zajmującą się projektowaniem instalacji gazowych do pojazdów samochodowych. W czasie tej współpracy pojawił się istotny problem w zakresie identyfikacji warunków eksploatacji pojazdów oraz normowania zużycia paliwa, a także możliwości obniżenia kosztów eksploatacji floty pojazdów przez optymalizację trasy przejazdu oraz doboru pojazdów do wybranych tras. Praca dotyczy specyficznych warunków eksploatacji samochodów osobowych spotykanych w dużych aglomeracjach miejskich. W rozdziale drugim zamieszczono opis wybranych metod oceny efektywności energetycznej pojazdów oraz metod identyfikacji warunków ich eksploatacji. W rozdziale 3. sformułowano cel i zakres pracy. Rozdział 4. poświęcono opisowi przyjętej metodyki badań oraz wyznaczaniu parametrów eksploatacyjnych silnika i pojazdu. W pracy wykorzystano wyniki badań czterech pojazdów, z czego dwa mają formę modeli numerycznych. W związku z tym koniecznym było przygotowanie pełnego modelu układu napędowego pojazdu pozwalającego obliczać przebiegowe zużycie paliwa dla zadanych warunków testu. Badane pojazdy wyposażone były w silniki o zapłonie iskrowym. Przyjęto jednak, że opracowane metody, po uprzedniej weryfikacji, zostaną w przyszłości wykorzystane również w badaniach pojazdów z silnikami o zapłonie samoczynnym. Rozdział 5. poświęcono opisowi autorskiej metody identyfikacji warunków eksploatacji pojazdów. W rozdziale 6. zaprezentowano nową metodę oceny eksploatacyjnego zużycia paliwa oraz efektywności energetycznej pojazdów. W rozdziale 7. przedstawiono koncepcję przygotowania oraz wykorzystania mapy warunków eksploatacji w wybranej aglomeracji. Pracę kończy rozdział 8. zawierający podsumowanie i wnioski oraz wykaz proponowanych dalszych prac.