

Procedura wyznaczania ekologicznych charakterystyk silników trakcyjnych z zastosowaniem metody Monte Carlo

ZDZISŁAW CHŁOPEK

Politechnika Warszawska, Instytut Pojazdów

W pracy przedstawiono opracowaną przez autora procedurę wyznaczania ekologicznych charakterystyk silników trakcyjnych w przypadkowych warunkach eksploatacji z zastosowaniem metody Monte Carlo. Do syntezy właściwości silników w tych warunkach wykorzystano wyniki badań pojazdów na hamowni podwoziowej, realizowanych dla standardowych i specjalnych testów jezdnych. Testy te zostały potraktowane jako elementarne składniki przypadkowego procesu eksploatacji trakcyjnej pojazdu. Zaproponowana metoda została przebadana, a przykłady badań i zastosowań przedstawiono w pracy. Uzyskane wyniki potwierdzają przydatność opracowanej procedury do wyznaczania ekologicznych charakterystyk silników trakcyjnych.

1. Wstęp

Do celów oceny oddziaływania motoryzacji na środowisko istnieje potrzeba znajomości ekologicznych właściwości pojazdów eksploatowanych w różnych warunkach. Dla eksploatacji trakcyjnej silnika typowe są dynamiczne warunki pracy. Oznacza to, że właściwości ekologiczne silników pojazdów powinny być wyznaczane w warunkach dynamicznych symulujących pracę w eksploatacji trakcyjnej. Ze względu na możliwość realizacji oraz powtarzalność pomiarów takie badania można przeprowadzać tylko na hamowni podwoziowej [1, 2]. Znaczne nakłady pracy oraz koszty pozwalają jedynie na realizację nielicznej grupy testów jezdnych. Alternatywna metoda badań silników na hamowni silnikowej w warunkach symulujących eksploatację trakcyjną pojazdu należy również do kosztownych, pracochłonnych i skomplikowanych.

Różnorodność warunków ruchu, dla których konieczna jest znajomość ekologicznych właściwości pojazdów, obejmuje praktycznie wszystkie przypadki ruchu w miastach, poza miastami i na autostradach. Względy przedstawione powyżej skłaniają badaczy do poszukiwania metod uzyskiwania wyników przede wszystkim na drodze intelektualnej. Oznacza to stosowanie metod zapewniających otrzymywanie jak największej ilości praktycznych informacji z jak najmniejszej liczby wyników pomiarów. Szczególnie pożądane jest wykorzystywanie do tych celów wyników badań

wykonywanych obowiązkowo dla pojazdów. Do badań takich należą realizacje testów jezdnych do celów homologacji typu i zgodności produkcji pojazdów. Oprócz testów homologacyjnych konieczne jest dodatkowo przeprowadzanie badań w testach znacznie odbiegających od standardów homologacyjnych, np. w warunkach zatłoczonych ulic czy też ruchu na autostradach [1–4].

W niniejszej pracy zaproponowano metodę syntezy ekologicznych charakterystyk silników dla przypadkowej kombinacji elementarnych warunków ruchu.

Pod pojęciem charakterystyki ekologicznej pojazdu lub silnika jest rozumiana zależność wielkości fizycznych, opisujących zjawiska związane z pracą silnika lub pojazdu, mające wpływ na stan środowiska [1, 5] (w niniejszej pracy przyczyny oddziaływania silników lub pojazdów na środowisko są ograniczone do emisji szkodliwych składników spalin).

W celu wyznaczenia ekologicznych charakterystyk silników w warunkach symulujących rzeczywistą eksploatację wykorzystano doświadczenia metod przypadkowych zwanych metodami Monte Carlo [6–9]. W metodzie Monte Carlo do rozwiązywania zadania wykorzystuje się zaprogramowane doświadczenie przypadkowe. W doświadczeniu przypadkowym kluczową rolę odgrywają procedury do wyznaczenia liczb pseudoprzypadkowych, zwane generatorami liczb pseudoprzypadkowych. Istnieje wiele metod generowania liczb pseudoprzypadkowych oraz sposobów oceny tych metod [9, 10]. W większości przypadków są wykorzystywane algorytmy oparte na zasadzie wyznaczenia reszty z dzielenia dwóch liczb rzeczywistych [7, 9, 10], dawniej znane były również metody otrzymywania liczb przypadkowych w wyniku wykonywania rzeczywistych doświadczeń przypadkowych [10]. Obecnie większość programów matematycznych jest wyposażona w procedury do generowania liczb pseudoprzypadkowych, charakteryzujące się dużą skutecznością, m.in. dużym okresem powtarzalności ciągów liczb pseudoprzypadkowych oraz krótkim czasem obliczeń (niezależnie od mocy obliczeniowej komputera), co jest podstawowym warunkiem stosowania metody Monte Carlo. Zadania rozwiązywane z zastosowaniem metody Monte Carlo można sklasyfikować w dwie grupy. Do pierwszej grupy zadań zaliczają się metody matematyczne, do których przeprowadzenia jest konieczne stosowanie liczb pseudoprzypadkowych, np. całkowanie numeryczne czy poszukiwanie ekstremum funkcji metodami Monte Carlo. Druga grupa obejmuje szeroko rozumiane zadania symulacyjne, np. symulowanie błędów przypadkowych, fluktuacji itp. W niniejszej pracy metoda Monte Carlo jest wykorzystywana do symulowania warunków eksploatacji pojazdów i, dzięki temu, do wyznaczenia ekologicznych charakterystyk silników spalinowych w warunkach pseudoprzypadkowej eksploatacji trakcyjnej.

W pracy przedstawiono procedurę wyznaczenia charakterystyk ekologicznych w zaproponowany sposób oraz dokonano badań tej procedury ze względu na jej efektywność. Uzyskane wyniki potwierdzają przydatność opracowanej procedury do wyznaczenia ekologicznych charakterystyk silników trakcyjnych.

2. Modele ruchu samochodów do celów wyznaczania ekologicznych charakterystyk silników trakcyjnych

Właściwości ekologiczne silników spalinowych w ustabilizowanych warunkach termicznych oraz w dynamicznych warunkach eksploatacji zależą od przebiegów czasowych wielkości opisujących stan pracy silnika, np. prędkości obrotowej i momentu obrotowego [1]. Zależność ekologicznych właściwości silników od stanu pracy w warunkach dynamicznych nie ma charakteru funkcyjnego, jak to ma miejsce w wypadku statycznych warunków pracy. W warunkach dynamicznych zależności te są opisane funkcjami [1]. Stan pracy silnika jest uzależniony od [1]:

- przebiegu prędkości jazdy pojazdu,
- stosowanych przełożeń w układzie napędowym,
- oporów toczenia, oporów aerodynamicznych oraz, ewentualnie, sił związanych z jazdą po trasie niepoziomej i nieprostej,
- bezwładności pojazdu.

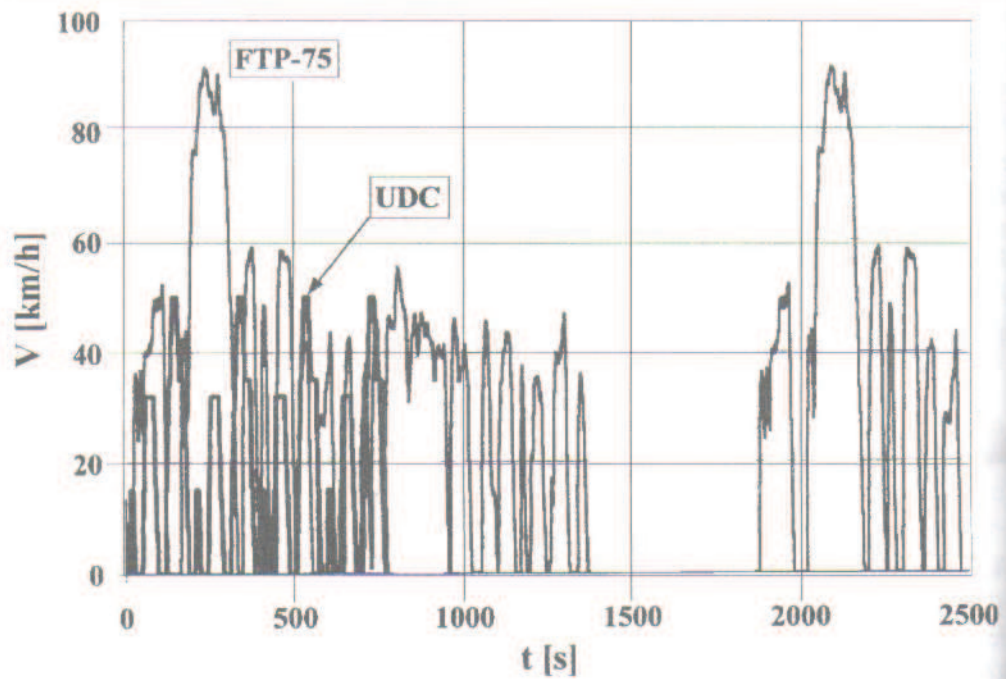
W standardowych testach jezdnych, przeprowadzanych na hamowni podwoziowej, symulacja dotyczy jazdy po drogach prostych i poziomych, ponadto sprecyzowany jest sposób zmiany przełożeń w układzie napędowym (inaczej w testach europejskich i amerykańskich). W porównywalnych kategoriach pojazdów na właściwości ekologiczne podstawowy wpływ ma przede wszystkim przebieg prędkości w teście.

Przykładami standardowych testów jezdnych, które mogą być wykorzystane do wyznaczania ekologicznych charakterystyk silników w warunkach ustabilizowanych termicznie, są [1–3]:

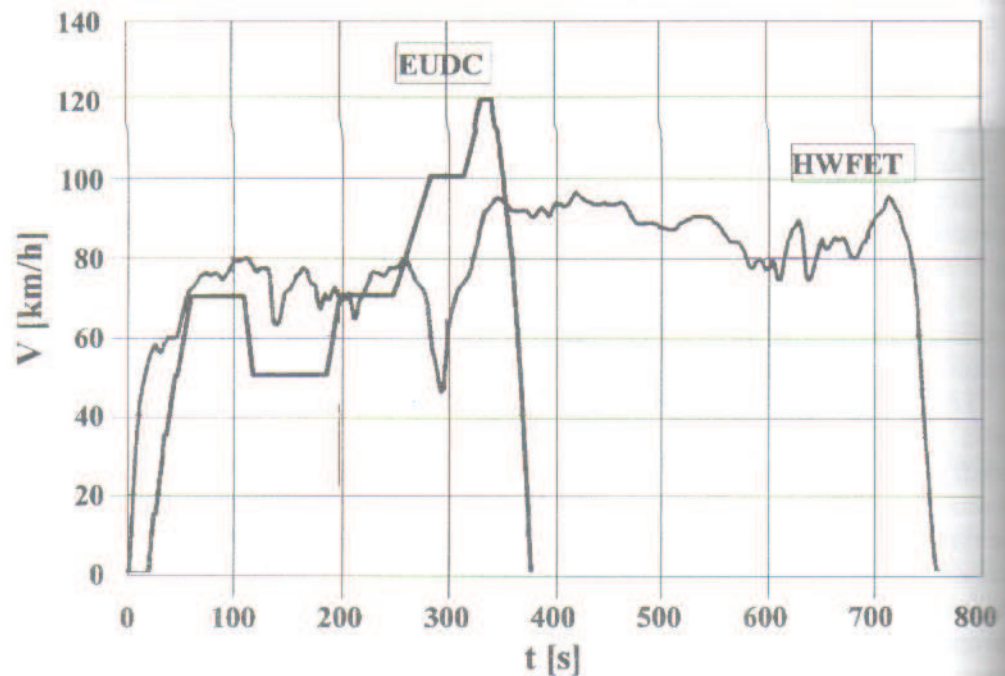
- europejski test miejski UDC (wykonywany ze startem z rozgrzanym silnikiem),
- europejski test pozamiejski EUDC,
- części testu amerykańskiego FTP-75: druga i trzecia,
- amerykański test autostradowy HWFET.

Dodatkowo wykorzystywane mogą być informacje z całego testu FTP-75 oraz z jego pierwszej części a także z testu europejskiego o nazwie EUROTEST, będącego połączeniem testów UDC i EUDC (zatem wyniki emisji drogowych w tym wypadku są kombinacją liniową wyników testów elementarnych). Do wyznaczania charakterystyk ekologicznych w warunkach ustabilizowanych termicznie wszystkie te testy muszą być jednak rozpoczynane dla silnika rozgrzanego (w odróżnieniu od testów wykonywanych standardowo do celów badań homologacyjnych).

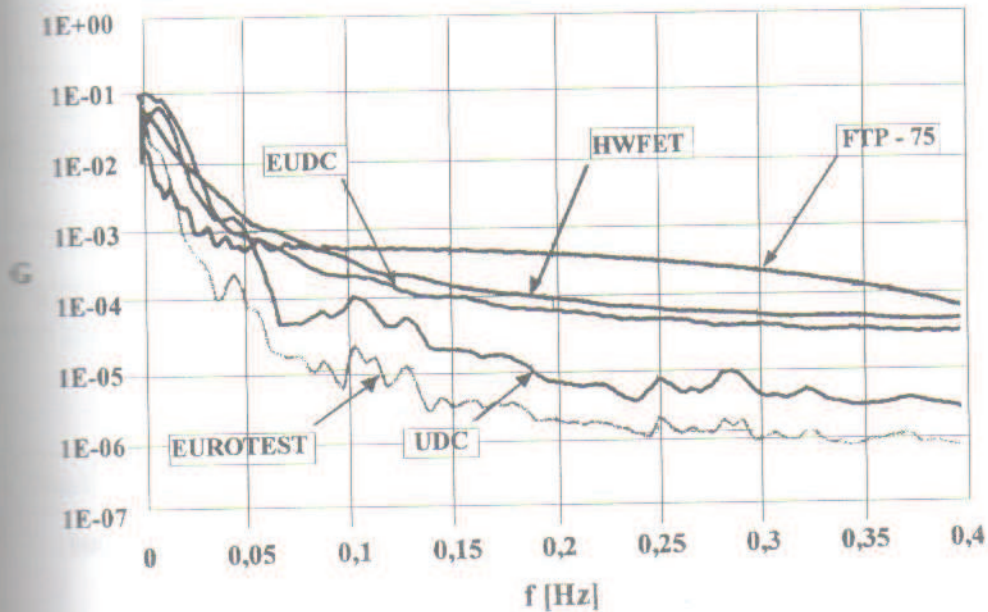
Testy homologacyjne znacznie się różnią między sobą zarówno zakresem prędkości jazdy jak i właściwościami dynamicznymi. Szczególnie widoczne są różnice między odpowiednimi testami europejskimi i amerykańskimi. Na rysunkach 1 i 2 porównano testy UDC i FTP-75 oraz EUDC i HWFET w dziedzinie czasu, natomiast na rysunku 3 porównano testy europejskie i amerykańskie w dziedzinie częstotliwości. Zarówno z przebiegów czasowych jak i z charakterystyk częstotliwościowych jednoznacznie wynika, że testy amerykańskie są znacznie bardziej dynamiczne niż europejskie. Jest to szczególnie widoczne w zakresie większych częstotliwości. Testy amerykańskie zostały opracowane na podstawie kryteriów wiernej symulacji czasowej, natomiast europejskie są wynikiem syntezy elementarnych charakterystyk ruchu



Rys. 1. Porównanie prędkości pojazdów w testach UDC i FTP – 75 w dziedzinie czasu



Rys. 2. Porównanie prędkości pojazdów w testach EUDC i HWFET w dziedzinie czasu

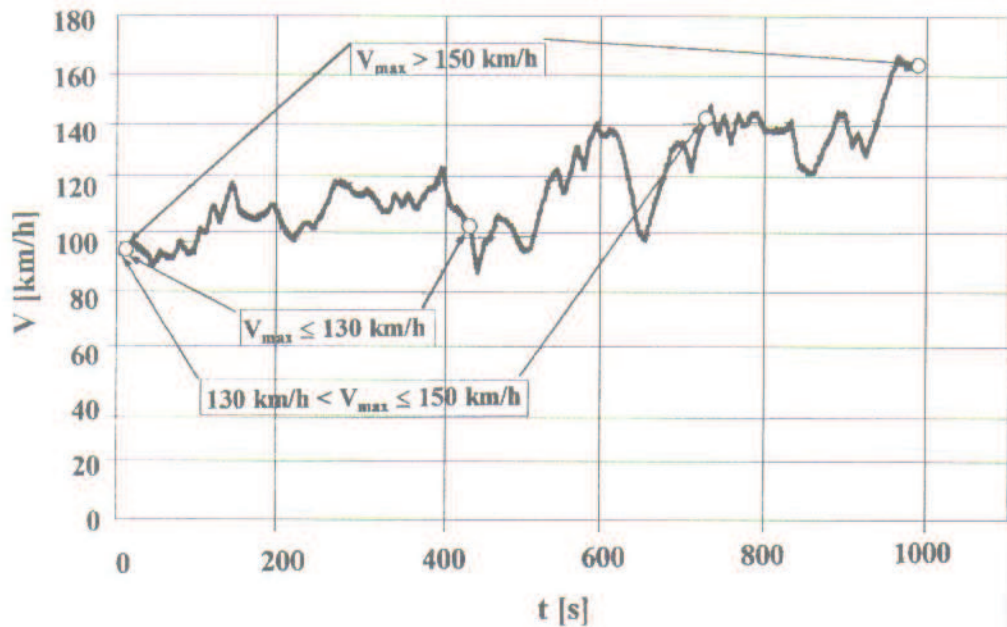


Rys. 3. Porównanie prędkości pojazdów w testach europejskich i amerykańskich w dziedzinie częstotliwości – f (G – gęstość widmowa mocy unormowanych przebiegów czasowych)

pojazdów w modelowych warunkach. Głębsze analizy, których przytaczanie przekracza ramy niniejszego artykułu, wskazują, że – jak to często bywa z modelami opartymi na wiernej symulacji czasowej – testy amerykańskie znacznie lepiej oddają specyfikę ruchu drogowego.

Niestandardowym (niehomologacyjnym) testem jeźdźnym umożliwiającym rozszerzenie granic prędkości jazdy jest test autostradowy o nazwie Autobahn wprowadzony przez TÜV (Technische Überwachungsverein – Stowarzyszenie Nadzoru Technicznego w RFN) [4]. Przebieg prędkości w teście Autobahn dla samochodów o prędkościach maksymalnych nie przekraczających 130 km/h, zawartych w granicach od 130 km/h do 150 km/h oraz większych od 150 km/h przedstawiono na rysunku 4. W tabeli 1 przedstawiono zestawienie podstawowych właściwości testów wykorzystywanych do symulacji ekologicznych właściwości silników w eksploatacji trakcyjnej.

Wykorzystanie tak różniących się między sobą testów do symulacji ekologicznych charakterystyk silników umożliwia uzyskanie wyników reprezentatywnych dla rzeczywistej eksploatacji trakcyjnej. Stosowanie metody syntezy ekologicznych charakterystyk na podstawie elementarnych danych jest jedyną realną metodą badawczą. W niniejszej pracy w odróżnieniu od metody wykorzystującej kombinację liniową wyników badań w elementarnych testach [3, 11–15] potraktowano zagadnienie syntezy warunków ruchu w sposób przypadkowy, dzięki czemu rozszerzona została zmienność możliwych stanów silnika w eksploatacji trakcyjnej.



Rys. 4. Przebieg prędkości w teście Autobahn

Tabela 1. Zestawienie podstawowych właściwości testów wykorzystywanych do symulacji ekologicznych właściwości silników w eksploatacji trakcyjnej (wg [2, 3])

	Test jako model ruchu	Udział czasowy $V=0$ [%]	Średnia prędkość pojazdu w teście v [km/h]	Minimalna prędkość pojazdu w teście V_{\min} [km/h]	Maksymalna prędkość pojazdu w teście V_{\max} [km/h]
1	UDC	30,8	18,7	0	50
2	EUDC	5	62,6	0	120
3	EUROTEST	22	33,6	0	120
4	FTP-75	19	34,2	0	91,2
5	FTP-75	19	26,2	0	54,6
6	FTP-75	20	41,1	0	91,2
7	HWFET	0	77,4	0	96,4
8	Autobahn dla samochodów o $V_{\max} \leq 130$ km/h	0	108	90	124
9	Autobahn dla samochodów o 130 km/h $< V_{\max} \leq 150$ km/h	0	108	86	139
10	Autobahn dla samochodów o $V_{\max} > 150$ km/h	0	117	86	162

3. Wyznaczanie ekologicznych charakterystyk silników trakcyjnych z zastosowaniem metody Monte Carlo

Niech m oznacza emisję, tzn. masę wyemitowanego składnika spalin w czasie t , zaś E natężenie emisji tego składnika.

$$m = \int_0^t E \cdot dt \quad (1)$$

Emisja drogowa jest zdefiniowana jako pochodna emisji względem drogi przebytej przez pojazd

$$B = \frac{dm}{ds} \quad (2)$$

Ponieważ prędkość pojazdu wynosi

$$V = \frac{ds}{dt} \quad (3)$$

natężenie emisji jest związane z emisją drogową zależnością

$$E = \frac{dm}{dt} = \frac{B \cdot ds}{dt} = V \cdot B \quad (4)$$

Uśrednione w czasie t wartości prędkości i emisji drogowej przedstawione są wzorami (5) – (7).

$$v = \frac{1}{t} \cdot \int_0^t V \cdot dt \quad (5)$$

$$b = \frac{m}{s} \quad (6)$$

$$b = \frac{\int_0^t V \cdot B \cdot dt}{\int_0^t V \cdot dt} \quad (7)$$

Załóżmy, że badany przypadek emisji składa się z kombinacji N elementarnych przypadków o prędkościach średnich, średnich emisjach drogowych i czasach trwania, opisanych wektorami v , b i t

$$\begin{aligned} v &= [v_1, v_2, \dots, v_N] \\ b &= [b_1, b_2, \dots, b_N] \\ t &= [t_1, t_2, \dots, t_N] \end{aligned} \quad (8)$$

Wówczas średnia emisja drogowa dla badanego przypadku wynosi

$$b = \frac{\sum_{i=1}^N v_i \cdot b_i \cdot t_i}{\sum_{i=1}^N v_i \cdot t_i} \quad (9)$$

Średnia prędkość opisana jest wzorem

$$v = \frac{s}{t} = \frac{\sum_{i=1}^N v_i \cdot t_i}{\sum_{i=1}^N t_i} \quad (10)$$

Niech elementy wektora t będą opisane zależnościami

$$t_i = u_i \cdot \zeta_i \cdot T \quad (11)$$

przy czym

$$T = \sum_{i=1}^N t_i \quad (12)$$

jest całkowitym czasem trwania kombinacji elementarnych testów, zaś

$$u_i \geq 0; \zeta_i \geq 0$$

Wówczas średnia emisja drogowa i prędkość średnia wynoszą

$$b = \frac{\sum_{i=1}^N v_i \cdot b_i \cdot u_i \cdot \zeta_i}{\sum_{i=1}^N v_i \cdot u_i \cdot \zeta_i} \quad (13)$$

$$v = \frac{\sum_{i=1}^N v_i \cdot u_i \cdot \zeta_i}{\sum_{i=1}^N u_i \cdot \zeta_i} \quad (14)$$

Wartości te z definicji spełniają warunki

$$b \in [\min(b); \max(b)] \quad (15)$$

$$v \in [\min(v); \max(v)]$$

gdzie: $\min(x)$, $\max(x)$ — odpowiednio najmniejszy i największy element wektora x .

W szczególności liczby ζ_i przyjmujemy w proponowanej metodzie jako liczby przypadkowe. Liczby u_i traktowane mogą być jako współczynniki wagowe. Kwestiami wyboru jest:

- jakie są charakterystyki liczb ζ_i , np. jaki jest rozkład prawdopodobieństwa tych liczb,
- jakie są wartości współczynników wagowych u_i .

Przedstawiona metoda syntezy ekologicznych właściwości silników trakcyjnych w warunkach przypadkowych ma charakter ogólny. Przykład jej zastosowania został przedstawiony dla zbioru samochodów osobowych z silnikami o zapłonie iskrowym, wyposażonych w wielofunkcyjne reaktory katalityczne. W przykładzie przedstawiono zastosowanie procedury dla wyznaczania emisji drogowych tlenku węgla. Elementarne testy oraz wartości średnich emisji drogowych tlenku węgla w tych testach dla badanego zbioru pojazdów przedstawiono w tabeli 2.

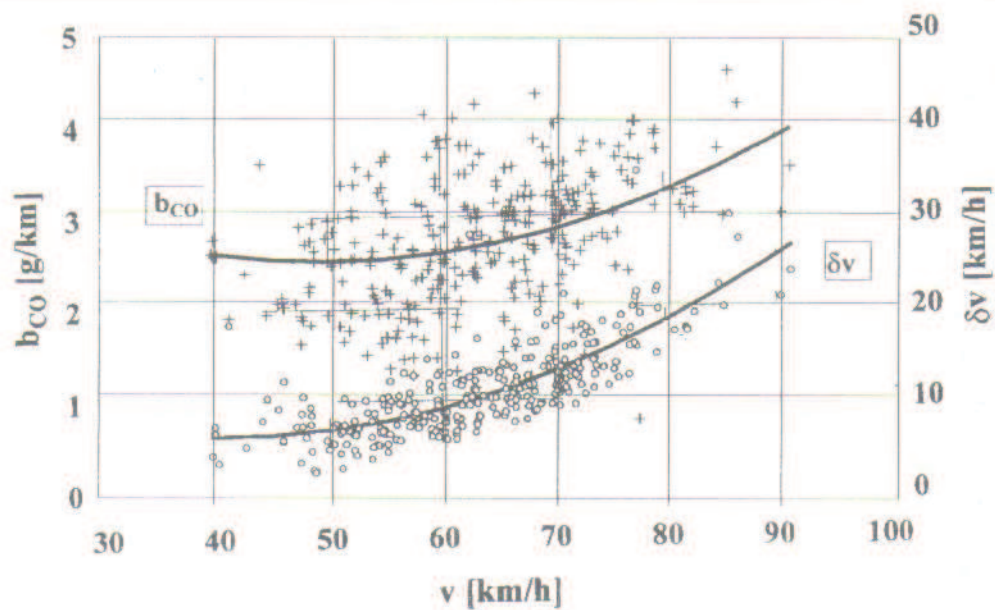
Tabela 2 Elementarne testy oraz wartości średnich emisji drogowych tlenku węgla w tych testach dla badanego zbioru pojazdów (wg [2, 3])

	Elementarny test	Średnia emisja drogową tlenku węgla w teście b_{CO} [g/km]
1	UDC	5,85
2	FTP-75 (3. faza)	1,92
3	EUDC	0,969
4	HWFET	0,766
5	Autobahn	5,03

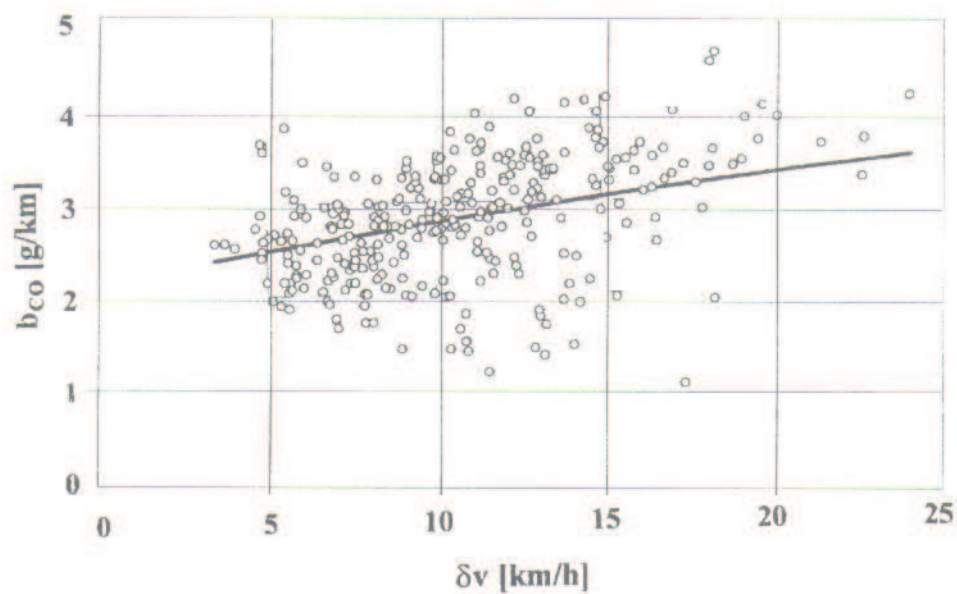
Jako liczby ζ_i przyjęto liczby pseudoprzypadkowe o rozkładzie równomiernym z przedziału $\zeta_i \in [0; 1]$. Współczynniki wagowe przyjęto $u_i = 1$.

Na rysunku 5 przedstawiono zależność emisji drogowej tlenku węgla oraz średniego odchylenia standardowego średnich prędkości testów elementarnych z uwzględnieniem ich czasowych udziałów w badanych przypadkach od średniej prędkości jazdy. Rysunek 6 przedstawia zależność emisji drogowej tlenku węgla od średniego odchylenia standardowego średnich prędkości testów. Linie ciągłe na rysunkach 5 i 6 są wynikiem aproksymacji zbiorów punktów. Jako funkcję aproksymującą przyjęto wielomian potęgowy. W wyniku aproksymacji otrzymano zależności o charakterze niesprzecznym z dotychczasowym doświadczeniem [1, 3, 11–13]. Znaczny rozrzut punktów odpowiada rzeczywistemu rozrzutowi emisji drogowych odpowiadającemu różnemu rodzajowi jazdy pojazdu mimo tej samej średniej wartości prędkości. Wyniki badań eksperymentalnych w pełni potwierdzają tę tezę [2, 3]. Miarą zróżnicowania rodzajów jazdy w badanym przypadku jest średnie odchylenie standardowe średnich prędkości testów elementarnych z uwzględnieniem ich czasowych udziałów.

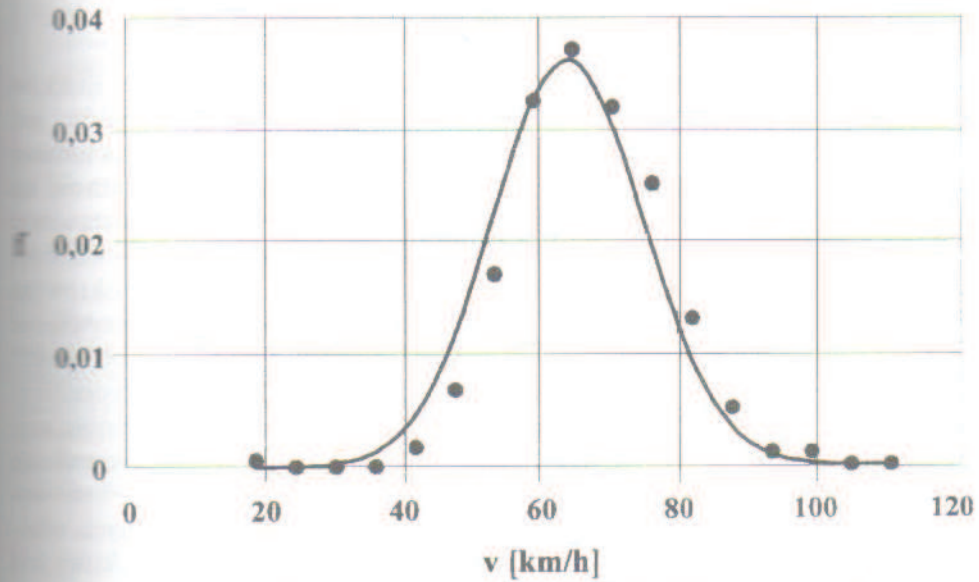
Dyskretna gęstość prawdopodobieństwa procesu prędkości jazdy opisanej wzorem (14) odpowiada rozkładowi normalnemu (rysunek 7).



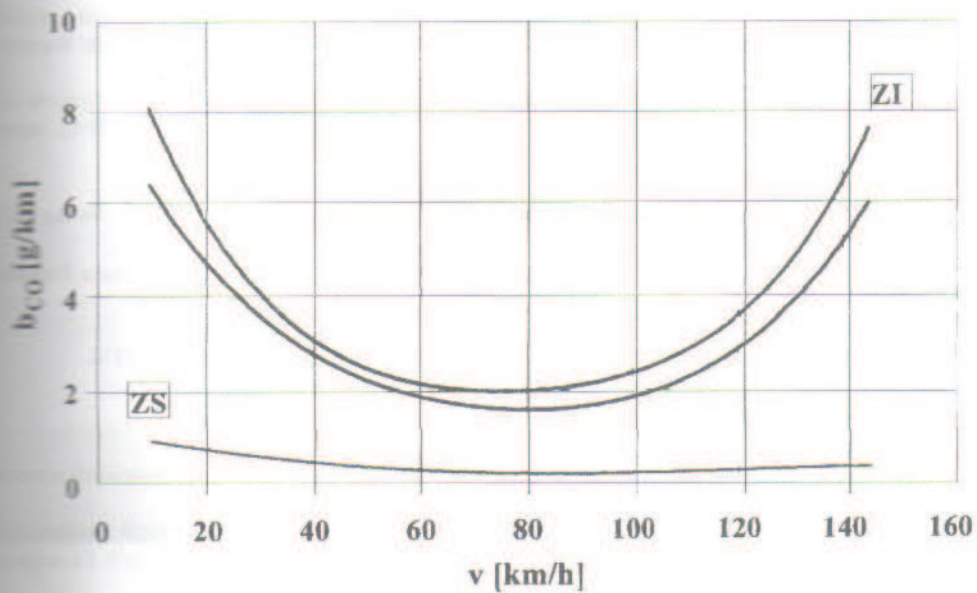
Rys. 5. Zależność emisji drogowej tlenku węgla oraz średniego odchylenia standardowego średnich prędkości testów elementarnych od średniej prędkości jazdy



Rys. 6. Zależność emisji drogowej tlenku węgla od średniego odchylenia standardowego średnich prędkości testów



Rys. 7. Dyskretna gęstość prawdopodobieństwa procesu prędkości jazdy



Rys. 8. Zależność emisji drogowej tlenku węgla dla kategorii samochodów osobowych (bez oznaczenia) oraz kategorii samochodów osobowych z silnikami o zapłonie iskrowym (ZI) i o zapłonie samoczynnym (ZS) od średniej prędkości jazdy

Uwagi końcowe

Zaproponowana metoda wyznaczania ekologicznych charakterystyk silników spalinowych w warunkach przypadkowej eksploatacji trakcyjnej pojazdów jest skutecznym narzędziem do badania emisji ze źródeł transportowych. Badania testowe przeprowadzone przy użyciu opracowanej metody potwierdziły jej przydatność do oceny ekologicznych właściwości silników trakcyjnych. Jako przykład przedstawiono na rysunku 8 zależność emisji drogowej tlenku węgla dla kategorii samochodów osobowych oraz kategorii samochodów osobowych z silnikami o zapłonie iskrowym i o zapłonie samoczynnym od średniej prędkości jazdy. Ze względu na czytelność wykresu na rysunku przedstawiono jedynie linie ciągle aproksymujące wielomianami potęgowymi zbiory punktów wyznaczone w wyniku realizacji opracowanej procedury.

Ograniczona objętość artykułu uniemożliwia przedstawienie innych zastosowań opracowanej metody badania ekologicznych właściwości silników w warunkach eksploatacji trakcyjnej. Istotną cechą tej metody jest to, że umożliwia ona wyznaczenie w przypadkowych warunkach eksploatacji nie tylko ekologicznych właściwości silników, ale i rozrzutu wielkości charakteryzujących te właściwości, który jest znamieny dla rzeczywistych warunków pracy silników trakcyjnych.

Literatura

- [1] Z. CHŁOPEK: *Modelowanie procesów emisji spalin w warunkach eksploatacji trakcyjnej silników spalinowych*. Prace Naukowe. Seria „Mechanika” z. 173. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- [2] BUWAL (Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft), INFRAS AG (Infrastruktur-, Umwelt- und Wirtschaftsberatung): „Luftschadstoffemissionen des Strassenverkehrs 1950-2010”. BUWAL-Bericht Nr. 255, 1995
- [3] INFRAS, *Handbuch für Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs*, Bern 1995.
- [4] TÜV 1986, *Abgas-Grossversuch, im Auftrag des Bundesministers für Verkehr*, Verlag TÜV Rheinland GmbH; Köln, Januar 1986.
- [5] Z. CHŁOPEK: *Synteza ekologicznych charakterystyk silników pojazdów*. Zeszyty Instytutu Pojazdów 1(27)/98
- [6] N. METROPOLIS, S. ULAM: *The Monte Carlo method*. JASA. 1949 Nr. 247.
- [7] S. M. JERMAKOW: *Metoda Monte Carlo i zagadnienia pokrewne*. PWN. Warszawa, 1976.
- [8] R. Y. RUBINSTEIN: *Simulation and Monte Carlo method*. Wiley. 1981.
- [9] R. ZIELIŃSKI: *Metody Monte Carlo*. WNT. Warszawa, 1970.
- [10] S. BRANDT: *Analiza danych*. PWN. Warszawa, 1998
- [11] Z. CHŁOPEK, W. DANILCZYK, S. KRUCZYŃSKI: *Modelowanie emisji z samochodów osobowych w warunkach eksploatacji trakcyjnej*. Journal of KONES, 1996.
- [12] Z. CHŁOPEK, W. DANILCZYK, S. KRUCZYŃSKI: *Metody wyznaczania charakterystyk ekologicznych silników trakcyjnych do celów modelowania emisji zanieczyszczeń*. Chemia i Inżynieria Ekologiczna nr 4 tom 2. Opole; 1995.
- [13] Z. CHŁOPEK, W. DANILCZYK, S. KRUCZYŃSKI: *Ocena właściwości ekologicznych i energetycznych trakcyjnych silników spalinowych*. Czwarta Konferencja „Racjonalizacja użytkowania energii i środowiska - Szczyrk'96” - materiały konferencji.
- [14] M. BERNHARDT, Z. CHŁOPEK, W. DANILCZYK, S. KRUCZYŃSKI: *Symulacja testów jezdnych pojazdów z silnikami o zapłonie samoczynnym metodami statycznymi*; Journal of KONES; 1994.

M. BERNHARDT, Z. CHŁOPEK, W. DANILCZYK, S. KRUCZYŃSKI: *Symulacja procesów emisji substancji szkodliwych z pojazdu z silnikiem o zapłonie samoczynnym w teście dynamicznym*; Journal of KONES; 2005.

The Procedure of Emission Factor Characteristic Estimation for Traction Engines Based on Monte Carlo Methods

S u m m a r y

The procedure of emission factor characteristic estimation for traction engines working under randomised exploitation conditioned is presented in the thesis. The procedure is based on Monte Carlo Methods and was originally designed by author. The results of chassis-dyne measurements done under standard and special drive patterns were used to conclude about engine features. Those tests were treated as elements of randomised process of vehicle operation. Proposed method was tested and some examples of its practical application are presented in the thesis. The results are confirming the adequacy of the method for emission factor characteristics estimation in the case of traction engines exploitation.