

Metody badań właściwości silników spalinowych w warunkach przypadkowych modelujących użytkowanie

ZDZISŁAW CHŁOPEK

Politechnika Warszawska, Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych, Instytut Pojazdów,
Zakład Silników Spalinowych

W pracy dokonano systematycznej oceny metod badania właściwości silników spalinowych w warunkach odpowiadających, rzeczywistej eksploatacji, traktowanych jako procesy przypadkowe. Stwierdzono konieczność rozwijania takiego kierunku badań w zastosowaniu do silników nie tylko samochodowych, ale i o innym zastosowaniu. Przedstawiono przykłady wyników badań ekologicznych właściwości samochodów na hamowni podwoziowej oraz badań symulacyjnych emisji z samochodów poruszających się z prędkością modelowaną w postaci procesu przypadkowego.

Spis ważniejszych skrótów

AVL LIST GmbH	– <i>Anstalt für Verbrennungskraftmaschinen Prof. Dr. H. List, Gesellschaft mit beschränkter Haftung</i> – Instytut Silników Spalinowych Prof. Dra H. Lista, Sp. z o.o. (Austria);
BUWAL	– <i>Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft</i> – Związkowy Urząd Środowiska, Lasu i Krajobrazu (Szwajcaria);
COPERT	– <i>Computer Programme to Calculate Emission from Road Traffic</i> – program komputerowy do obliczania emisji z transportu drogowego (Unia Europejska);
CORINAIR	– <i>Coordination d'Information Environnemental</i> – Program Koordynacji Informacji o Stanie Środowiska (Unia Europejska);
COST	– <i>European Cooperation in the Field of Technical Research</i> – Europejska Współpraca na Polu Badań Technicznych (Unia Europejska);
ECE	– <i>Economic Commission for Europe</i> – Europejska Komisja Gospodarcza (EKG – agenda ONZ);
EEA	– <i>European Environment Agency</i> – Europejska Agencja Środowiska (Unia Europejska);
EPA	– <i>Environment Protection Agency</i> – Urząd Ochrony Środowiska (Stany Zjednoczone Ameryka);
INFRAS AG	– <i>Infrastruktur-, Umwelt- und Wirtschaftsberatung Aktiengesellschaft</i> – Ośrodek Doradztwa w Zakresie Gospodarki i Środowiska S.A. (Szwajcaria);
INRETS	– <i>Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité</i> – Narodowy Instytut Badań Transportu i Bezpieczeństwa (Francja);
LPG	– mieszanina propanu i butanu skroplona pod ciśnieniem
MEET	– <i>Methodologies to Estimate Emissions from Transport</i> – Metodologia do Oszacowania Emisji z Transportu (Unia Europejska);

MOBILE	– model emisji substancji szkodliwych dla środowiska z samochodów, opracowany w EPA;
RWTÜV	– <i>Rheinisch-Westfälischer Technischer Überwachungsverein</i> – Reńsko-Westfalskie Stowarzyszenie Nadzoru Technicznego (Niemcy);
TÜV	– <i>Technische Überwachungsverein</i> – Stowarzyszenie Nadzoru Technicznego (Niemcy);
UBA	– <i>Umweltbundesamt</i> – Związkowy Urząd Środowiska (Niemcy).

Spis ważniejszych oznaczeń

A	– wektor, zawierający informacje o oporach ruchu samochodu, związanych z ukształtowaniem nawierzchni;
A_v	– amplituda procesu prędkości;
b_{av}	– średnia wartość średnich w testach emisji drogowych;
b_D	– średnia emisja drogową dla przyczynowej funkcji prędkości;
b_s	– emisja drogową jako funkcja drogi;
b_{sr}	– średnia emisja drogową;
b_t	– emisja drogową jako funkcja czasu;
E	– natężenie emisji;
f	– częstotliwość;
f_p	– gęstość prawdopodobieństwa;
G	– wektor zawierający informacje o warunkach otoczenia;
G_M	– widmowa gęstość mocy;
M_e	– moment obrotowy;
m_s	– emisja jako funkcja drogi;
R	– wektor stanu cieplnego silnika;
s	– droga;
S	– droga przejechana w teście;
t	– czas;
T	– czas trwania testu;
u	– wrażliwość różnicy średniej emisji drogowej w teście dla prędkości o atrybutach funkcji: przyczynowym i przypadkowym na charakterystyki punktowe procesu prędkości;
v	– prędkość;
V	– charakterystyki punktowe procesu prędkości;
δb	– średnie odchylenie standardowe emisji drogowej;
Δb	– różnica średniej emisji drogowej dla prędkości o atrybutach funkcji: przyczynowym i przypadkowym;
δv	– średnie odchylenie standardowe prędkości;
Δv	– odchyłka prędkości.

1. Wprowadzenie

Tradycyjna wiedza na temat właściwości silników spalinowych ogranicza się prawie wyłącznie do statycznych warunków pracy, odpowiadających przybliżonej stałości parametrów pracy, uśrednianych w czasie większym, niż wynika to z częstotliwości typowych dla warunków eksploatacji trakcyjnej, tzn. około 10 Hz [12]. Dla stałych w czasie parametrów pracy są wyznaczane typowe charakterystyki statyczne silników, takie jak: szybkościowe, obciążeniowe, regulacyjne czy ogólne. W rzeczywistym użytkowaniu silników trakcyjnych charakterystyczna jest zmienność w czasie wielkości

opisujących pracę silników, w szczególności typowe są warunki zmienności w czasie prędkości obrotowej i obciążenia silników. Istnieje potrzeba poznania właściwości silników spalinowych w warunkach dynamicznych, podejmowane są w związku z tym próby sformalizowania tych zagadnień [6, 10, 26, 29, 31 – 33]. Nie jest to zagadnienie łatwe, ponieważ trudny jest analityczny opis zjawisk zachodzących w silnikach, co umożliwiłoby wykorzystanie wiedzy ogólnej. Wynika to m.in. z faktu, że w silnikach spalinowych zachodzi skomplikowana kombinacja zjawisk o charakterze: mechanicznym, cieplnym czy chemicznym. W związku z tym modele matematyczne silnika, uznawane powszechnie za dostatecznie zgodne z obiektem badań [7, 8], są zazwyczaj silnie nieliniowe [6, 10, 12].

Praktyczna wiedza dotycząca silników spalinowych jest uwarunkowana poznaniem ich właściwości w typowych warunkach pracy [1 – 6, 10 – 19, 21, 22, 25 – 27, 29, 32]. Jest to warunek znamieny dla obiektów, które są opisane modelami nieliniowymi, a do takich zazwyczaj należą silniki spalinowe ze względu na ich właściwości użytkowe. Obiekty o nieliniowych modelach nie mają właściwości nie zależnych od stanu, w jakim się znajdują – w odróżnieniu od obiektów opisanych modelami liniowymi [6, 10–12]. Istotną rolę odgrywa w takim wypadku formalny opis stanu pracy silnika w warunkach odpowiadających rzeczywistemu użytkowaniu. Konieczne jest w związku z tym:

- poznanie charakterystycznych właściwości warunków użytkowania obiektu [1–6, 9–18, 22, 26–27, 29–31],
- opracowanie warunków badań obiektu zgodnie z kryteriami podobieństwa warunków jego użytkowania lub właściwości [5, 6, 9, 10, 12, 13, 16, 19, 21, 26, 27].

Dla trakcyjnych silników spalinowych znamienne jest użytkowanie ich w warunkach dynamicznych, a dodatkowo stan nieokreślenia wielu czynników determinujących warunki użytkowania silników upoważnia do traktowania tych warunków jako przypadkowych [1, 6, 10, 11–13, 22, 26].

Szczególnie wrażliwe na warunki pracy silników są ich właściwości ekologiczne, przede wszystkim w wypadku silników o zapłonie iskrowym [3, 6, 10, 11, 12, 17, 18, 25]. W związku z tym przykłady przedstawione w niniejszej pracy są związane przede wszystkim z badaniem ekologicznych właściwości silników spalinowych, jednak rozważania mają charakter ogólny i odnoszą się do wszystkich obiektów badań i ich właściwości. Podstawowym problemem metodologicznym oceny właściwości obiektów badań w warunkach dynamicznych i przypadkowych jest fakt, że właściwości te są znamienne wyłącznie w konkretnych warunkach realizacji badań [6, 10–12]. Rolą metodologii jest zatem opracowanie podstaw do wnioskowania o właściwościach silników spalinowych w typowych warunkach użytkowania na podstawie wiedzy zdobytej w warunkach badań. Szczególnie istotną rolę w tych badaniach odgrywa stopień nieokreśloności ekologicznych właściwości silników spalinowych w przypadkowych warunkach użytkowania [11, 12].

Podstawowe problemy związane z badaniami ekologicznych właściwości silników spalinowych w warunkach symulujących użytkowanie trakcyjne są następujące [6, 10]:

1. Jaka jest relacja między wrażliwością ekologicznych właściwości silników spalinowych na ich immanentne cechy a wrażliwością na warunki użytkowania?

2. Na ile są reprezentatywne właściwości ekologiczne silników spalinowych, wyznaczane bez analizy stochastycznej w warunkach pozornie przyczynowych, w celu oceny przedmiotu badań, użytkowanego w rzeczywistości w warunkach kwalifikowanych jako przypadkowe?

3. Jaki jest wpływ na ekologiczne właściwości silników spalinowych warunków dynamicznych użytkowania, traktowanych jako przypadkowe – odpowiadające rzeczywistości?

4. Jakie są kryteria syntezy testów badawczych silników i samochodów jako odpowiadających rzeczywistemu użytkowaniu silników w celu poszukiwania środków obiektywizacji metod badań?

Naukowe cele stawiane w pracy mają uzasadnienie praktyczne. Wynika to z faktu, że racjonalna realizacja celów poprawy właściwości (szczególnie ekologicznych) silników spalinowych w warunkach odpowiadających rzeczywistemu użytkowaniu wymaga szerszego traktowania zagadnienia niż tylko w konkretnych powtarzalnych warunkach, np. odpowiadających standardom badań homologacyjnym. Optymalizacja wykonywana jedynie dla realizacji procesów przypadkowych warunków użytkowania jest ograniczona tylko do badanego wypadku.

W szczególności rozwój metod optymalnego sterowania silnika ze względu na jakość pracy, w tym m.in. na minimalizację szkodliwego oddziaływania na środowisko, wymaga zastosowania metod symulujących warunki użytkowania traktowane jako przypadkowe. Podobne wymagania są formułowane w stosunku do optymalnego sterowania innych układów samochodu, m.in.: układu napędowego, układu hamulcowego, zawieszenia oraz napędów hybrydowych [6, 10].

Ponadto badania właściwości silników o różnych zastosowaniach wymagają poszukiwań zobiektywizowanych metod oceny podobieństwa warunków użytkowania i badań [5, 6, 9, 10, 12–14, 16, 23, 26, 27, 32], do syntezy testów badawczych nie wystarcza bowiem nawet symulacja wierna czasowo – bez stochastycznego traktowania tego zjawiska, a tym bardziej metody badań statycznych [9, 12–14, 23, 27, 30].

Istniejący stan wiedzy w zakresie metod badania ekologicznych właściwości silników spalinowych w warunkach pracy symulujących użytkowanie trakcyjne charakteryzuje się:

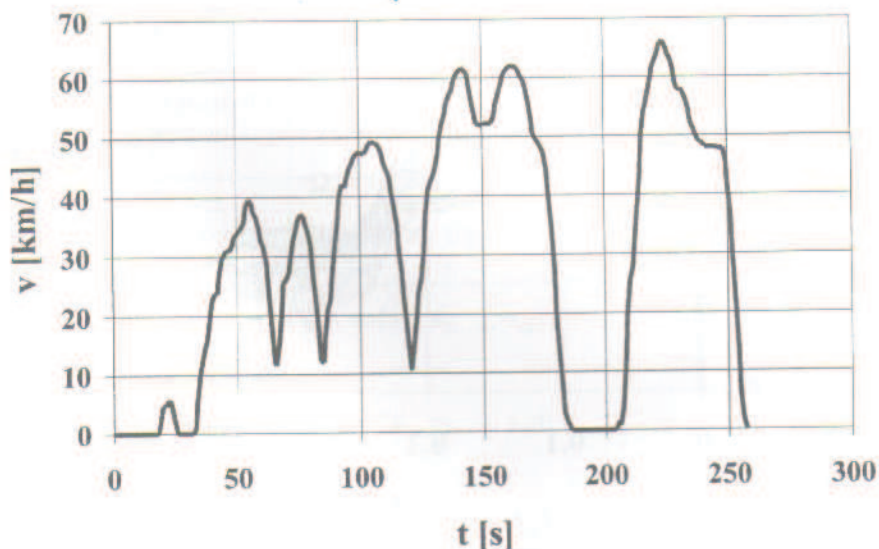
- zdecydowanym ukierunkowaniem na cele użyteczne, związane praktycznie wyłącznie ze spełnieniem wymagań badań kwalifikacyjnych; w wypadku metod symulacji emisji wyznaczanie ekologicznych właściwości silników opiera się również przede wszystkim na przyczynowych (zdeteminowanych) modelach ruchu pojazdów [1–3, 13–17, 19–21];

- rozproszeniem prac nad uogólnieniami wyników badań poszczególnych ośrodków, co ma uzasadnienie m.in. w pragmatycznym pojmowaniu podejmowanych zadań;

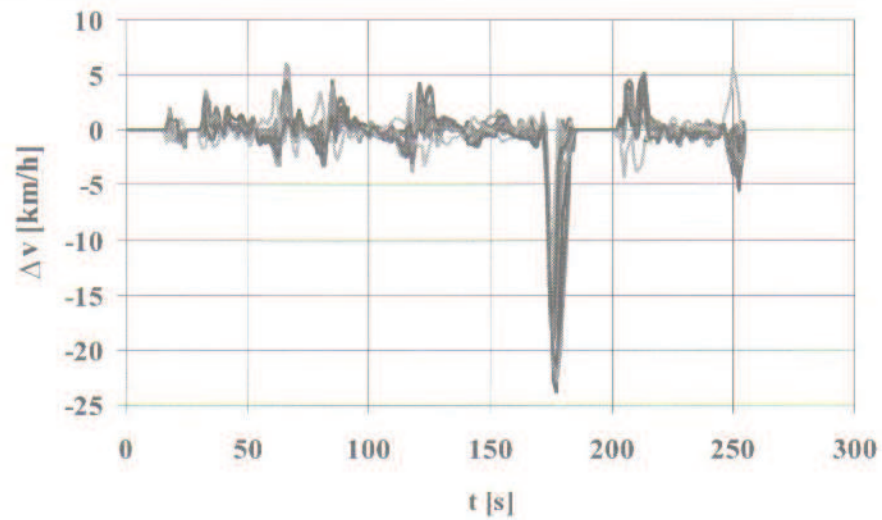
- stosunkowo niskim poziomem formalnym prac: zauważa się nawet podstawowe braki w zakresie definiowania wykorzystywanych wielkości fizycznych (np. emisja oznacza: emisję, emisję jednostkową, emisję drogową, natężenie emisji, wskaźnik emisji itd.); brak jest systematyki czynników determinujących ekologiczne właściwości silników spalinowych; matematyczne opisy badanych zjawisk zawierają często poważne uchybienia (nie tylko formalne) [17, 18, 25].

Jednocześnie zauważa się przywiązywanie dużej wagi do rozpatrywanej tematyki. W państwach rozwiniętych gospodarczo, m.in. w Unii Europejskiej, w Stanach Zjednoczonych Ameryki oraz w Japonii powstały duże programy naukowe (m.in. COST, MEET, CORINAIR, COPERT, INFRAS, MOBILE), realizowane z zaangażowaniem dużych sił i środków m.in. w takich ośrodkach naukowych, jak: AVL LIST, BUWAL, EEA, EPA, INFRAS, INRETS, RWTÜV, TÜV czy UBA [1–3, 17–22, 25, 29]. Uzasadnia to zainteresowanie w Polsce tematyką ekologicznych właściwości silników w warunkach odpowiadających użytkowaniu trakcyjnemu. Zainteresowanie naukowe i praktyczne tą tematyką w Polsce ma dotychczas charakter działań rozproszonych i przyczynkowych.

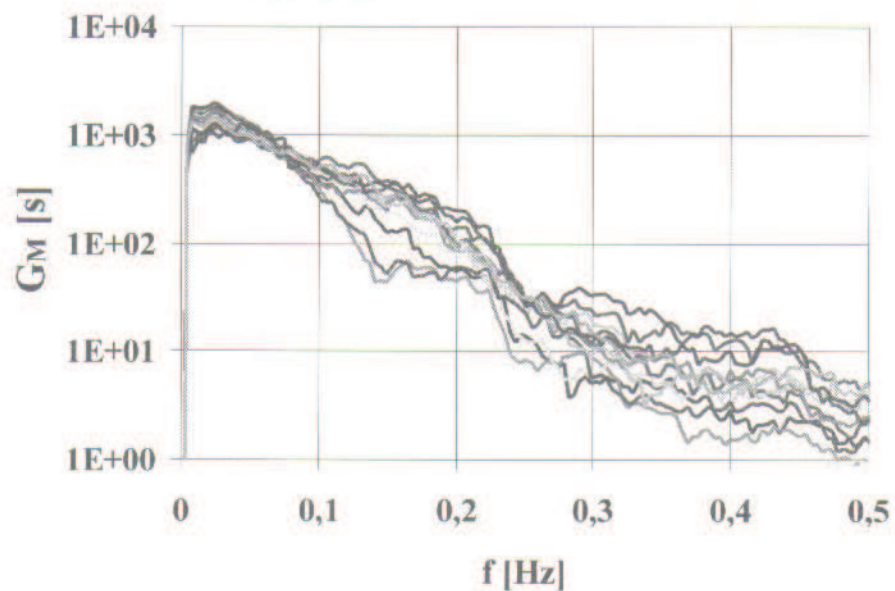
Jako przykład, uzasadniający celowość traktowania jako przypadkowe procesów determinujących warunki pracy silników spalinowych w użytkowaniu trakcyjnym, przedstawiono wyniki wielokrotnych prób samochodów osobowych w teście EPA-ST01, wykonywanym na hamowni podwoziowej w celu oceny ekologicznych właściwości silników w czasie nagrzewania się po rozruchu. Przykłady wyników badań przeprowadzonych w EPA są przedstawione na rys. 1 i 4 [2], a analiz tych wyników, przeprowadzonych przez autora, na rys. 2 i 3. Na rysunku 2 są przedstawione odchyłki prędkości w poszczególnych realizacjach, a na rys. 3 – reprezentacja widmowa tych odchyłek. Widmową gęstość mocy [29] wyznaczono dla unormowanych procesów odchyłek prędkości, tzn. przekształconych liniowo do procesów o wartości oczekiwanej równej 0 i wariancji równej 1. Na rysunkach 2–4 jest wyraźnie widoczny wpływ czynników przypadkowych na warunki pracy silnika oraz – w związku m.in. z tym – na jego ekologiczne właściwości. Uzasadnia to celowość podjęcia tematu ekologicznych właściwości samochodowych silników spalinowych w warunkach modelujących użytkowanie.



Rys. 1. Przebieg prędkości pojazdu – v w teście EPA-ST01
Fig. 1. The vehicle velocity – v in the EPA-ST01 test

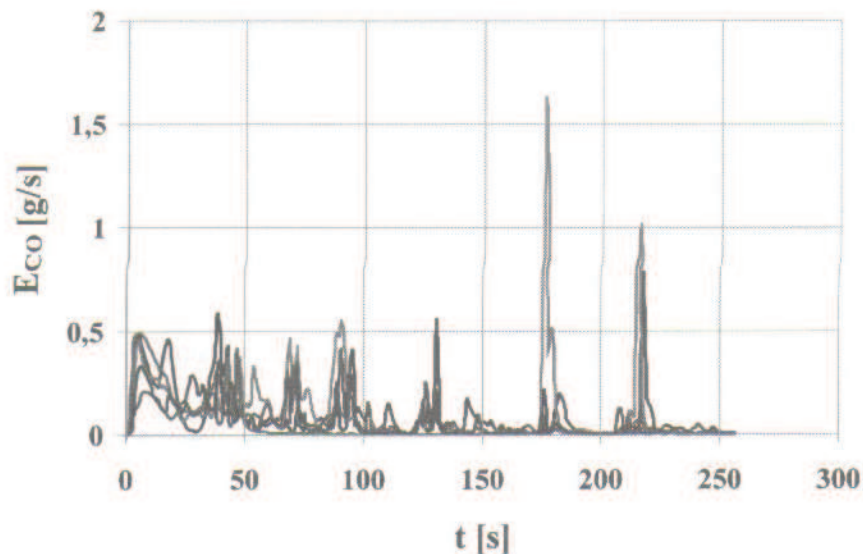


Rys. 2. Odchyłki prędkości pojazdów – Δv w realizacjach testu EPA-ST01
 Fig. 2. The deviation of vehicle velocity – Δv in EPA-ST01 test realisations



Rys. 3. Widmowa gęstość mocy unormowanych procesów odchyłek prędkości pojazdów – G_M w realizacjach testu EPA-ST01

Fig. 3. The spectre characteristic for the deviation of vehicle velocity – G_M in EPA-ST01 test realisations



Rys. 4. Natężenie emisji tlenku węgla – E_{CO} z pojazdów w realizacjach testu EPA-ST01
 Fig. 4. The carbon monoxide emission intensity – E_{CO} for vehicles in EPA-ST01 test realisation

2. Silnik spalinowy jako obiekt badań – formalny opis zadania badawczego

Przedmiotem badań jest silnik spalinowy ze względu na swe właściwości użytkowe, w szczególności ekologiczne. Jako właściwości ekologiczne samochodowych silników spalinowych (samochodów) przyjęto właściwości, charakteryzujące oddziaływanie silników (samochodów) na środowisko, z ograniczeniem do emisji substancji szkodliwych dla środowiska.

Wielkościami fizycznymi opisującymi układ fizyczny, określający obiekt badań i warunki jego użytkowania, jest zbiór Ω .

$$\Omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_{i\omega}\}. \quad (1)$$

Ze zbioru można wyodrębnić podzbiory (rys. 5):

– wielkości wejściowe

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_{ix}\}; \quad (2)$$

– wielkości wyjściowe

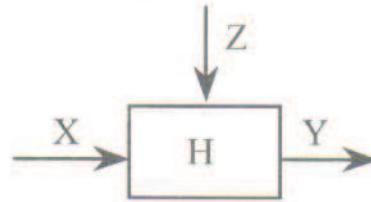
$$Y = \{y_1, y_2, \dots, y_{iy}\}; \quad (3)$$

– wielkości charakteryzujące obiekt

$$H = \{h_1, h_2, \dots, h_{ih}\}; \quad (4)$$

– pozostałe wielkości

$$Z = \{z_1, z_2, \dots, z_{iz}\}. \quad (5)$$



Rys. 5. Schemat wielkości fizycznych opisujących obiekt – silnik spalinowy
 Fig. 5. The schema of object physical categories – internal combustion engine

Wybór niektórych z wielkości jest zależny od celów stawianych przed badaniami, w związku z czym w różnych modelach te same wielkości mogą być traktowane np. raz jako wejściowe, innym razem jako wyjściowe itp.

Przyjmujemy, że zbiór Ω jest sumą zbiorów: X , Y , H i Z

$$\Omega = X \cup Y \cup H \cup Z \quad (6)$$

zatem

$$i\omega = ix + iy + ih + iz. \quad (7)$$

Charakterystykę układu można zapisać w ogólności jako zależność operatorową

$$\Im[\Omega] = 0 \quad (8)$$

lub w postaci zależności

$$H = \Phi[X, Y, Z]. \quad (9)$$

Jak wspomniano, dla liniowego modelu obiektu badań jego właściwości nie zależą od warunków, w jakich się on znajduje. Jeśli zależność (9) jest różniczkowalna względem zmiennych niezależnych, spełnione są w wypadku modelu liniowego warunki

$$\frac{\partial h_j}{\partial \alpha_k} = 0, \quad (10)$$

gdzie: $j = 1, 2, \dots, ih$;

$$(\alpha = x \wedge k = 1, 2, \dots, ix) \vee (\alpha = y \wedge k = 1, 2, \dots, iy) \vee (\alpha = z \wedge k = 1, 2, \dots, iz).$$

W wypadku charakterystyki statycznej obiektu jego właściwości nie są jawnie zależne od czasu – t , czyli

$$\frac{\partial h_j}{\partial t} = 0. \quad (11)$$

Styczne warunki, w jakich znajduje się obiekt, są określone ich jawną niezależnością od czasu

$$\frac{\partial \omega_m}{\partial t} = 0 \quad (12)$$

gdzie: $m = 1, 2, \dots, i\omega$.

W użytkowaniu, a szczególnie w badaniach, jest możliwe nałożenie na badany obiekt pewnych ograniczeń – więzów, np. stałości parametrów pracy silnika w badaniach statycznych czy szybkiego zwiększenia sterowania układu paliwowego nie obciążonego silnika o zapłonie samoczynnym przy swobodnym przyspieszaniu.

Więzy nałożone na układ mogą (ale nie muszą) być przedstawione w postaci funkcyjnej

$$W(X, Z) = 0. \quad (13)$$

Jest możliwe przyjęcie takich więzów, że charakterystyka obiektu jest zależna od pozostałych wielkości w postaci funkcyjnej

$$H = \varphi(X, Y, Z). \quad (14)$$

W takich warunkach istnieje możliwość łatwiejszej analizy – a przede wszystkim – interpretacji dynamicznych właściwości silników. Wyznaczanie charakterystyk obiektów w warunkach dynamicznych polega w istocie na przyjęciu kryteriów doboru więzów nałożonych na badany układ, umożliwiających otrzymanie charakterystyki w postaci (14) oraz spełniających odpowiedniość warunków badań i rzeczywistego użytkowania [12, 13]. Klasycznym praktycznym przypadkiem wyznaczania właściwości obiektu w warunkach dynamicznych jest badanie toksyczności spalin w testach jezdnych na hamowni podwoziowej. Więzy nałożonymi na badany układ są w tym wypadku wszystkie ustalone warunki, przede wszystkim: przebieg prędkości jazdy i – zazwyczaj – sposób doboru przełożeń układu napędowego oraz sposób symulacji oporów ruchu oraz warunki otoczenia i przygotowania pojazdu do badań. Charakterystyką dynamiczną są średnie emisje drogowe badanych składników spalin.

Spośród wielkości, charakteryzujących ekologiczne właściwości silników trakcyjnych, najczęściej jest wykorzystywana emisja drogowa [12], ponieważ umożliwia odnoszenie emisji do pracy przewozowej, która musi być wykonana w przestrzeni, a więc pracy określonej przebytą przez pojazd drogą. W wypadku silników o innych zastosowaniach wielkością, charakteryzującą ekologiczne właściwości silników, może być np. natężenie emisji lub wskaźnik emisji [12].

Emisja drogowa $b_s(s)$ jest to pochodna emisji – m_s względem drogi przebywanej przez pojazd – s

$$b_s(s) = \frac{sm_s(s)}{ds}. \quad (15)$$

Jako funkcja czasu emisja drogowa może być przedstawiona w postaci

$$b_r(t) = b_s(s(t)), \quad (16)$$

gdzie związek drogi z czasem jest dany jako funkcjonal zależny od przebiegu prędkości – v

$$s(t) = \int_0^t v(\tau) \cdot d\tau. \quad (17)$$

Ekologiczne właściwości silnika (podobnie jak wiele innych właściwości) są zależne w warunkach dynamicznych od przebiegu warunków pracy silnika. Przebieg emisji drogowej można przedstawić w postaci zależności operatorowej [12]:

$$b_i(t) = B_M[M_e(t), n(t), \mathbf{R}(t), \mathbf{G}(t)], \quad (18)$$

gdzie: $M_e(t)$ – moment obrotowy, $n(t)$ – prędkość obrotowa, $\mathbf{R}(t)$ – wektor stanu cieplnego silnika, $\mathbf{G}(t)$ – wektor zawierający informacje o warunkach otoczenia.

Dla silników trakcyjnych celowe jest uzależnienie ich ekologicznych właściwości od warunków użytkowania pojazdów. W związku ze znaczną standaryzacją konstrukcji współczesnych samochodów (m.in. układu przeniesienia napędu) istnieje możliwość przedstawienia emisji drogowej jako zależnej od przebiegu prędkości jazdy [12]:

$$b_i(t) = B_v[v(t), \mathbf{A}(t), \mathbf{R}(t), \mathbf{G}(t)], \quad (19)$$

gdzie: $\mathbf{A}(t)$ – wektor, zawierający informacje o oporach ruchu samochodu, związanych z ukształtowaniem nawierzchni.

W wypadku silników trakcyjnych wykorzystuje się ich badanie w pojazdach w warunkach kontrolowanej powtarzalności niektórych wielkości. Wymuszeniami w warunkach badań testu jezdnego na hamowni podwoziowej są przebiegi, które można modelować ze względu na ich interpretację fizyczną jako zależności:

$$v(t) = f_v(t), \quad (20)$$

$$\mathbf{G}(t) = f_G(t), \quad (21)$$

$$\mathbf{R}(t) = f_R[v(t), \mathbf{G}(t)], \quad (22)$$

$$\mathbf{A}(t) = f_A(v(t)). \quad (23)$$

Wynikami badań w testach jezdnych jest najczęściej średnia emisja drogowa w teście, która wynosi

$$b_{ir} = \frac{1}{S} \cdot \int_0^S b_i(s) \cdot ds, \quad (24)$$

gdzie droga jazdy w czasie trwania testu – T jest

$$S = \int_0^T v(t) \cdot dt. \quad (25)$$

Na wartość średniej emisji drogowej w teście mają zatem wpływ funkcje: $v(t) = f_v(t)$, $\mathbf{G}(t) = f_G(t)$, $\mathbf{R}(t) = f_R[v(t), \mathbf{G}(t)]$, $\mathbf{A}(t) = f_A(v(t))$.

W celu badania ekologicznych właściwości silników spalinowych w warunkach przypadkowych, symulujących rzeczywiste użytkowanie, istnieje możliwość arbitralnego przyjęcia w programie badań założeń o przyczynowości funkcji: $f_G(t)$, $f_R(v(t), \mathbf{G}(t))$ i $f_A(v(t))$.

Funkcję $f_v(t)$ można potraktować jako przypadkową i przedstawić jako funkcję funkcji przyczynowej $f_{vD}(t)$ i przypadkowej $f_{vI}(t)$:

$$f_v(t) = F(f_{vD}(t), f_{vI}(t)), \quad (26)$$

np.

$$f_v(t) = f_{vD}(t) + f_{vI}(t), \quad (27)$$

lub

$$f_v(t) = f_{vD}(t) \cdot f_{vI}(t), \quad (28)$$

Jeżeli funkcja $f_v(t)$ jest funkcją przyczynową, czyli nie jest ona zależna od funkcji $f_{vI}(t)$, tzn. $f_{vI}(t) = 0$ w wypadku (27) lub $f_{vI}(t) = 1$ w wypadku (28) dla $t \in [0; T]$, to $b_{sr} = b_D$.

W ogólności, gdy funkcja $f_v(t)$ jest funkcją przypadkową, $b_{sr} \neq b_D$, zatem miarą różnicy średniej emisji drogowej w teście w warunkach prędkości o atrybutach: przyczynowym i przypadkowym jest

$$\Delta b = |b_{sr} - b_D|. \quad (29)$$

Istotne zagadnienie dotyczy wrażliwości różnicy Δb na charakterystyki zerowymiarowe (punktowe) procesu przypadkowego charakteryzującego prędkość pojazdu $f_{vI}(t)$.

Charakterystykami punktowymi procesu $f_{vI}(t)$ są funkcjonały określone na funkcji $f_{vI}(t)$:

$$\mathbf{V} = \mathfrak{R}[f_{vI}(t)]. \quad (30)$$

Wybór postaci funkcjonałów \mathbf{V} jest zależny od programu badań i stosownie do ich postaci są im przypisywane różne interpretacje, np. wartość oczekiwana czy wariancja itd.

Niech charakterystyki punktowe procesu $f_{vI}(t)$ opisuje wektor

$$\mathbf{V} = [V_1, V_2, \dots, V_{iV}]^T. \quad (31)$$

Miarą wrażliwości różnicy średniej emisji drogowej w teście w warunkach prędkości o atrybutach: przyczynowym i przypadkowym – Δb na charakterystyki punktowe procesu $f_{vI}(t)$ jest wielkość:

$$u_i = \left. \frac{\partial \Delta b}{\partial V_i} \right|_{V_j = \text{const}}, \quad (32)$$

gdzie: $i = 1, 2, \dots, iV$; $j = 1, 2, \dots, iV$; $i \neq j$.

Przykładowymi szczególnymi postaciami zadania badania wrażliwości ekologicznych właściwości silnika na przypadkowe warunki użytkowania mogą być przypadki:

1. Proces $f_v(t)$ jest w postaci

$$f_v(t) = f_{vD}(t) + f_{vI}(t).$$

Proces $f_{vI}(t)$ jest przyjęty jako proces o stałej gęstości widmowej mocy:

$$G_M(f) = \text{const dla częstotliwości } f \in [0; f_{\max}]$$

Wartość oczekiwana procesu $f_{vI}(t)$ wynosi

$$E[f_{vI}(t)] = 0,$$

a średnie odchylenie standardowe procesu $f_{vI}(t)$

$$D[f_{vI}(t)] = D_{vI}.$$

Badanie dotyczy oceny wpływu:

- średniego odchylenia standardowego procesu $f_{v,t}(t) - D_{v,t}$,
 - maksymalnej częstotliwości widmowej reprezentacji procesu $f_{v,t}(t) - f_{max}$
- na różnicę średniej emisji drogowej w teście w warunkach prędkości o atrybutach: przyczynowym i przypadkowym – Δb .

Cele badania mogą być zrealizowane przez przeprowadzanie z różną starannością testów tego samego egzemplarza samochodu w porównywalnych warunkach badań.

2. Wpływ na rozrzut średniej emisji drogowej wielkości charakteryzujących niepowtarzalność charakterystyk ekologicznych w ramach:

- tego samego typu samochodu,
- tej samej kategorii samochodu.

Inna metoda badania dotyczy wpływu zaburzeń sterowania procesów zachodzących w silniku na jego właściwości ekologiczne. Podstawowe procesy, których sterowanie może być poddawane zaburzeniom, to w silniku o zapłonie iskrowym: natężenie przepływu dawkowanego paliwa oraz kąt wyprzedzenia zapłonu. Również stan techniczny silnika ma wpływ na badane procesy. Istnieje możliwość realizacji takich badań przez symulowanie odstępstw od stanu technicznego silnika, uznanego za stan normalny, w postaci niesprawności lub objawów zwiększonego zużycia wybranych części. Kolejnymi wielkościami, których wpływ na ekologiczne właściwości silnika może być badany przez traktowanie ich jako wielkości przypadkowych, są warunki otoczenia, przede wszystkim temperatura i wilgotność powietrza oraz wielkości charakteryzujące opory ruchu, np. współczynnik oporu toczenia i prędkość wiatru.

Symulacja badań z tej grupy może być realizowana z użyciem metod Monte Carlo [24, 33] w badaniach zarówno pojazdów na hamowni podwoziowej, jak i silników na hamowni silnikowej.

3. Przykłady badań pojazdów w testach dynamicznych na hamowni podwoziowej

Badania pojazdów w testach dynamicznych, szczególnie w warunkach odbiegających od standardów typowych badań homologacyjnych, należy zaliczyć do trudnych i kosztownych. Badania postulowane w niniejszym artykule są planowane w szerszym zakresie dopiero w przyszłości. Jako przykłady interpretacji wyników badań zgodnie z proponowaną metodą wybrano wyniki prób wykonanych w Instytucie Transportu Samochodowego [6, 10]. Badania zostały przeprowadzone na hamowni podwoziowej w powtarzalnych warunkach testów jezdnych, zgodnych z regulaminem ECE R83:

- testu miejskiego – UDC,
 - testu pozamiejskiego – EUDC,
 - testu homologacyjnego – EUROTEST, składającego się z testów: UDC i EUDC.
- Badaniom poddano:
- jeden egzemplarz samochodu osobowego z silnikiem o zapłonie iskrowym – wykonano 4 cykle badań – oznaczenie na rysunkach: „SO – ZI”,

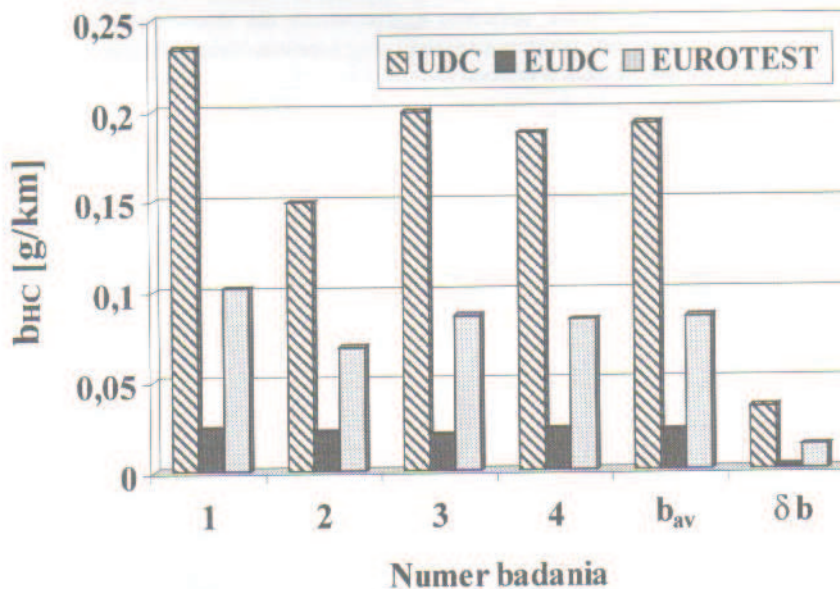
– zbiory tego samego typu pojazdu:

12 samochodów dostawczych z silnikami o zapłonie samoczynnym – „Typ SD – ZS”;

9 samochodów osobowych z silnikami o zapłonie iskrowym, zasilanymi mieszaniną skroplonych gazów: propanu i butanu – „Typ SO – ZI – LPG”.

W badaniach wyznaczano w poszczególnych próbach średnie emisje drogowe: tlenku węgla – CO, węglowodorów – HC, tlenków azotu – NO_x oraz dwutlenku węgla – CO₂, a dla silników o zapłonie samoczynnym również cząstek stałych – PM.

Na rysunku 6 przedstawiono wyniki średniej emisji drogowej węglowodorów w testach: UDC, EUDC i EUROTEST dla czterech badań tego samego samochodu osobowego z silnikiem o zapłonie iskrowym oraz ich wartość średnią – b_{AV} i średnie odchylenie standardowe – δb . Analogiczne wartości dla zbioru samochodów z silnikami o zapłonie samoczynnym przedstawiono dla cząstek stałych na rys. 7, a dla zbioru samochodów z silnikami o zapłonie iskrowym, zasilanymi LPG – dla tlenków azotu na rys. 8.

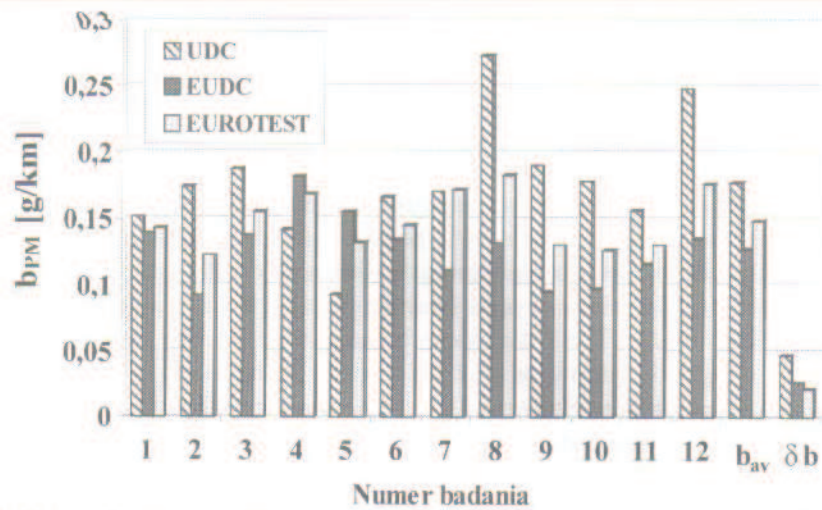


Rys. 6. Średnia emisja drogowa węglowodorów – b_{HC} w testach dla jednego egzemplarza samochodu osobowego z silnikiem o zapłonie iskrowym oraz ich wartość średnią – b_{AV} i średnie odchylenie standardowe – δb

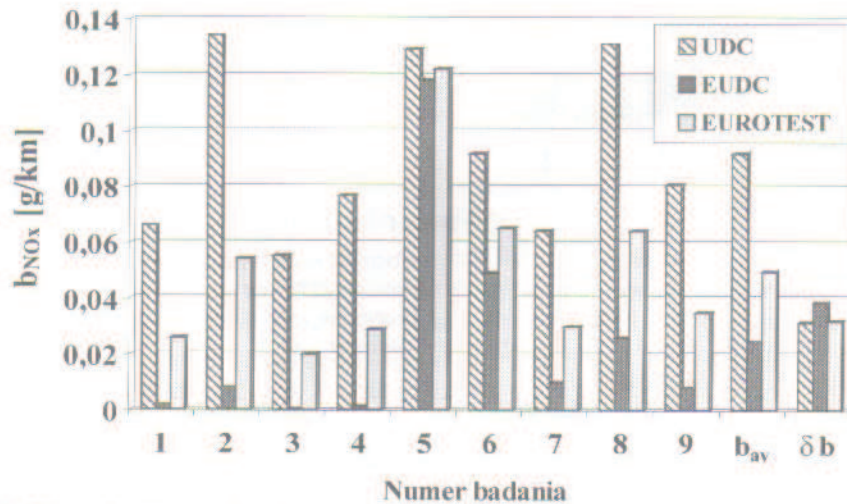
Fig. 6. The mean road emission of hydrocarbons – b_{HC} in tests for personal car with SI engine, mean value – b_{AV} and standard deviation – δb

Jako miarę rozrzutu ekologicznych właściwości pojazdów autor zaproponował stosunek średniego odchylenia standardowego do wartości średniej emisji drogowej poszczególnych substancji w testach jezdnych dla analizowanych zbiorów badań. Na rysunkach 9–11 przedstawiono miarę rozrzutu średniej emisji drogowej analizowanych substancji w poszczególnych testach dla badanych zbiorów.

Wyniki badań należy analizować z pewną ostrożnością, przede wszystkim z powodu małej liczby prób: w wypadku badań jednego egzemplarza samochodu liczebność

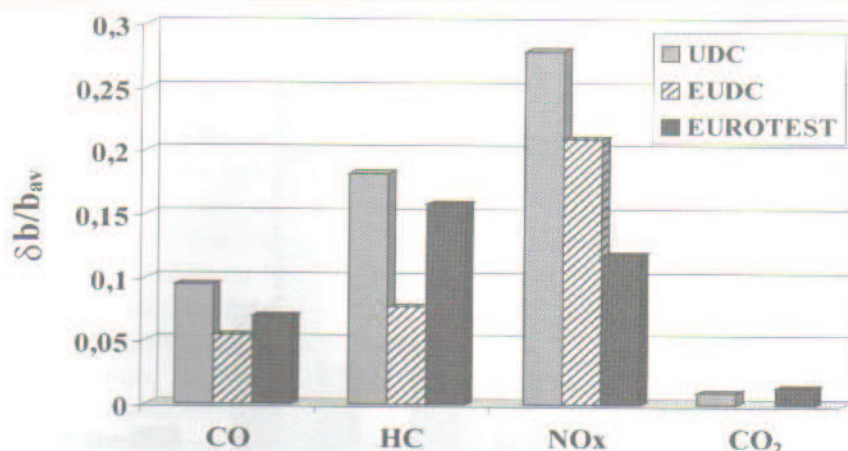


Rys. 7. Średnia emisja drogowa cząstek stałych – b_{PM} w testach dla zbioru samochodów z silnikami o zapłonie samoczynnym oraz ich wartość średnia – b_{av} i średnie odchylenie standardowe δb
 Fig. 7. The mean road emission of particulate matter – b_{PM} in tests for light duty diesel vehicles, mean value – b_{av} and standard deviation – δb



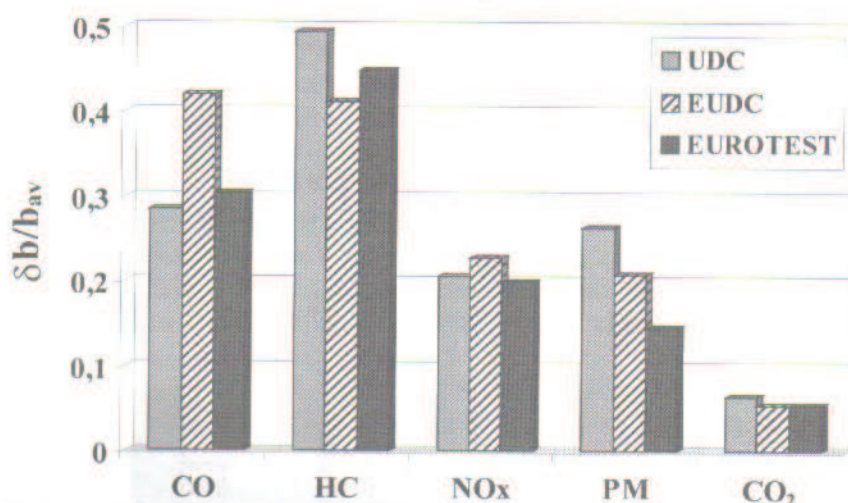
Rys. 8. Średnia emisja drogowa tlenków azotu – b_{NOx} w testach dla zbioru samochodów z silnikami o zapłonie iskrowym, zasilanymi mieszaniną skroplonych gazów; propanu i butanu, oraz ich wartość średnia – b_{av} i średnie odchylenie standardowe – δb

Fig. 8. The mean road emission of nitrogen oxides – b_{NOx} in tests for personal car with SI – LPG engine, mean value – b_{av} and standard deviation – δb



Rys. 9. Stosunek średniego odchylenia standardowego do wartości średniej emisji drogowych – $\delta b/b_{av}$ poszczególnych substancji w testach dla jednego egzemplarza samego samochodu osobowego z silnikiem o zapłonie iskrowym

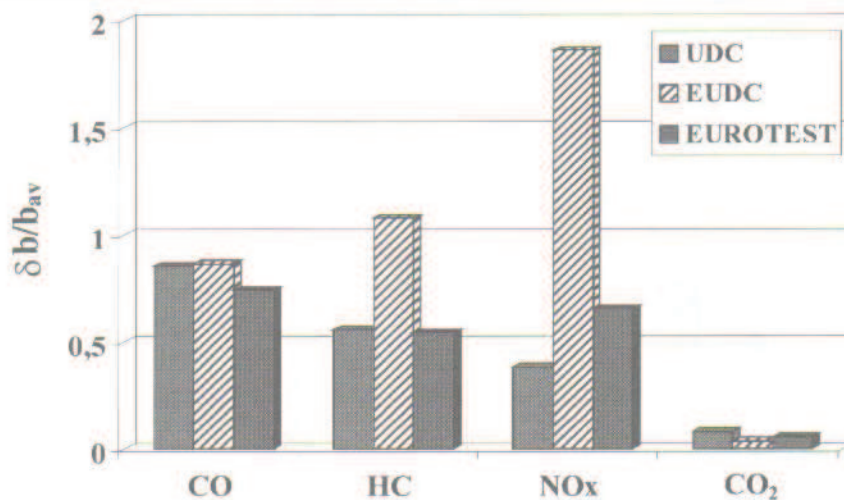
Fig. 9. The proportion of standard deviation and mean value – $\delta b/b_{av}$ for particular substances for personal car with SI engine



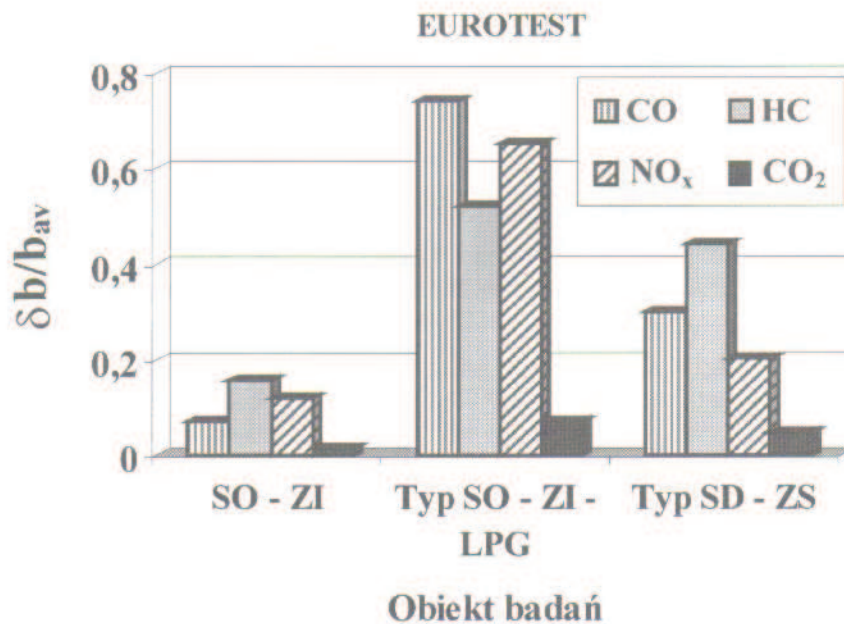
Rys. 10. Stosunek średniego odchylenia standardowego do wartości średniej emisji drogowych – $\delta b/b_{av}$ poszczególnych substancji w testach dla samochodów dostawczych z silnikami o zapłonie samoczynnym.

Fig. 10. The proportion of standard deviation and mean value – $\delta b/b_{av}$ for particular substances for light duty diesel vehicles

badania wynosiła tylko 4. Mimo, że badania były przeprowadzane w porównywalnych warunkach laboratoryjnych, rozrzut ekologicznych właściwości samochodów dla rozpatrywanych zbiorów okazał się stosunkowo duży. Charakterystyczny jest znaczny rozrzut rzędu kilkunastu procentów dla tego samego egzemplarza samochodu, szczególnie w wypadkach emisji drogowej węglowodorów i tlenków azotu, głównie w teście miejskim. Największy rozrzut ekologicznych właściwości silników występuje w zbiorze samochodów osobowych z silnikami o zapłonie iskrowym zasilanymi LPG, czyli w pojaz-



Rys. 11. Stosunek średniego odchylenia standardowego do wartości średniej emisji drogowych – $\delta b/b_{av}$ poszczególnych substancji w testach dla samochodów osobowych z silnikami o zapłonie iskrowym zasilanymi LPG
 Fig. 11. The proportion of standard deviation and mean value – $\delta b/b_{av}$ for particular substances for personal car with SI – LPG engine



Rys. 12. Porównanie stosunków średniego odchylenia standardowego do wartości średniej emisji drogowych – $\delta b/b_{av}$ poszczególnych substancji w testach dla rozpatrywanych zbiorów badań
 Fig. 12. The comparison of proportion of standard deviation nad mean value – $\delta b/b_{av}$ for particular substances for investigated vehicle class

dach z modyfikacjami fabrycznego wykonania: na obecnym poziomie powtarzalności produkcji masowej – przynajmniej w motoryzacji – modyfikacje skutkują zazwyczaj pogorszeniem jakości wyrobu.

Na rysunku 12 porównano rozrzuty ekologicznych właściwości samochodów dla rozpatrywanych zbiorów badań.

Potwierdzają się zdecydowanie najmniejsze rozrzuty wyników badań dla tego samego egzemplarza oraz największe dla samochodów osobowych z silnikami o zapłonie iskrowym zasilanymi LPG (w jednym wypadku rozrzut przekracza nawet 70%!). Najmniejsze rozrzuty, mniejsze niż 10%, są dla emisji drogowej dwutlenku węgla (a więc również drogowego zużycia paliwa), co wynika z mniejszej wrażliwości sprawności ogólnej silnika na warunki pracy niż w wypadkach emisji innych substancji szkodliwych dla środowiska.

4. Wyniki symulacyjnych badań ekologicznych właściwości silnika o zapłonie iskrowym

Dzięki wykorzystaniu algorytmów stosowanych w modelach emisji substancji szkodliwych dla środowiska z silników trakcyjnych istnieje możliwość dokonywania badań symulacyjnych ich właściwości ekologicznych. Metoda takich badań jest opisana w [3, 11, 12]. Umożliwia ona badania symulacyjne emisji składników spalin dla zadanych procesów przebiegu prędkości pojazdu dopuszczalnych do zrealizowania ze względu na właściwości silnika.

Do określenia stanu dynamicznego silnika w samochodzie wykorzystuje się jego badania w dwuwymiarowej dziedzinie wielkości charakteryzujących ruch samochodu: prędkości oraz iloczynu prędkości i przyspieszenia. Iloczyn prędkości jazdy i przyspieszenia interpretuje moc silnika wykorzystywaną w warunkach dynamicznych, odniesioną do jednostki masy pojazdu.

Modelowanie emisji w dziedzinie prędkości oraz iloczynu prędkości i przyspieszenia opiera się na wyznaczeniu dla porównywalnych kategorii pojazdów uśrednionych wartości emisji drogowych jednostkowych względem rozpatrywanych zmiennych niezależnych: prędkości i iloczynu prędkości i przyspieszenia, zdefiniowanego zmienną ξ

$$\xi = v \cdot a. \quad (33)$$

Średnia emisja drogowa w rozpatrywanym cyklu badań wynosi

$$b_{st} = \int_{v_{min}}^{v_{max}} \int_{\xi_{min}}^{\xi_{max}} f_p(v, \xi) \cdot g(v, \xi) \cdot dv \cdot d\xi, \quad (34)$$

gdzie: $f_p(v, \xi)$ jest dwuwymiarową gęstością prawdopodobieństwa względem zmiennych v i ξ , zaś

$$g(v, \xi) = \frac{d^2 b}{dv \cdot d\xi} \quad (35)$$

jest średnią dla rozpatrywanego badania emisją drogową jednostkową względem zmiennych v i ξ .

W postaci skończonej średnia emisja drogową w rozpatrywanym cyklu badań wynosi

$$b_{st} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J f_{p(i,j)} \cdot b_{(i,j)} \quad (36)$$

gdzie: f_p – macierz o wymiarach $I \times J$ dyskretnych gęstości prawdopodobieństwa procesów ruchu względem zmiennych v i ξ .

Wielkość $b_{(i,j)}$ – dyskretna średnia dla rozpatrywanego badania emisja drogową jednostkowa względem zmiennych v i ξ , opisanych kolejnymi numerami i oraz j – jest zdefiniowana jako

$$b_{(i,j)} = \int_{v_0}^{v_{0+1}} \int_{\xi_0}^{\xi_{0+1}} g(v, \xi) \cdot dv \cdot d\xi \quad \text{dla } i = 1, \dots, I-1; j = 1, \dots, J-1. \quad (37)$$

Jeśli znana jest zależność dyskretniej średniej emisji drogowej jednostkowej względem zmiennych v i ξ , to są możliwe badania symulacyjne emisji składników szkodliwych pod warunkiem, że istnieją podstawy do oceny podobieństwa klas procesów prędkości pojazdu: wykorzystywanych do wyznaczania charakterystyki (37) oraz stanowiących przedmiot badań symulacyjnych. Ocena kryteriów podobieństwa klas procesów przekracza możliwości objętościowe niniejszej pracy, można jedynie zaznaczyć, że rozpatrując większość realizowalnych stacjonarnych procesów prędkości pojazdu nie popełnia się istotnych błędów merytorycznych.

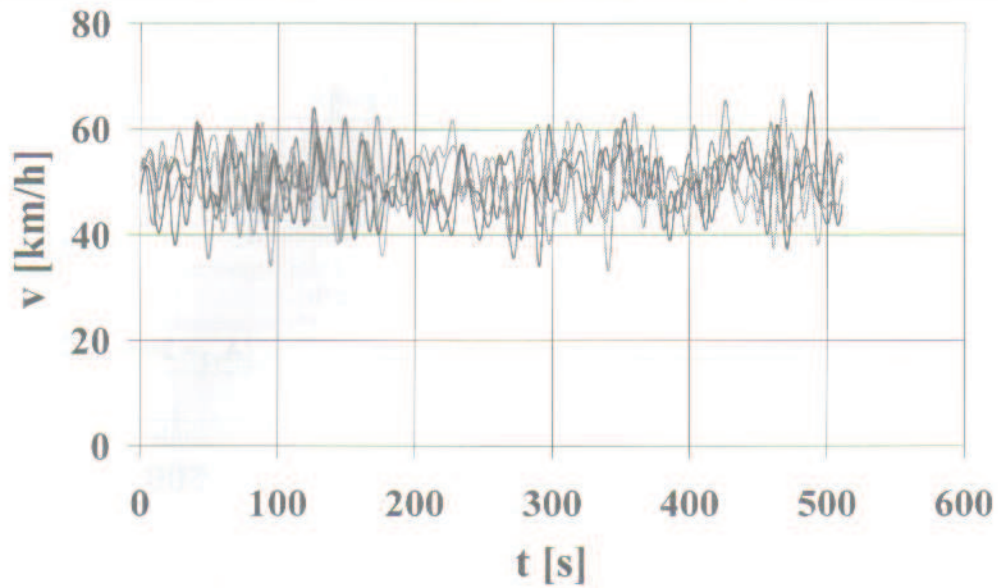
Z zastosowaniem opisanej metodyki możliwe jest badanie ekologicznych właściwości silników w zależności od wybranych wielkości charakteryzujących proces prędkości jazdy samochodu, np. w zależności od charakterystyk stochastycznych procesu prędkości.

Jako przykład badania emisji substancji szkodliwych dla środowiska w warunkach przypadkowego użytkowania pojazdów poddano badaniom symulacyjnym kategorię silników o zapłonie iskrowym z wielofunkcyjnymi reaktorami katalitycznymi, stosowanych w samochodach osobowych.

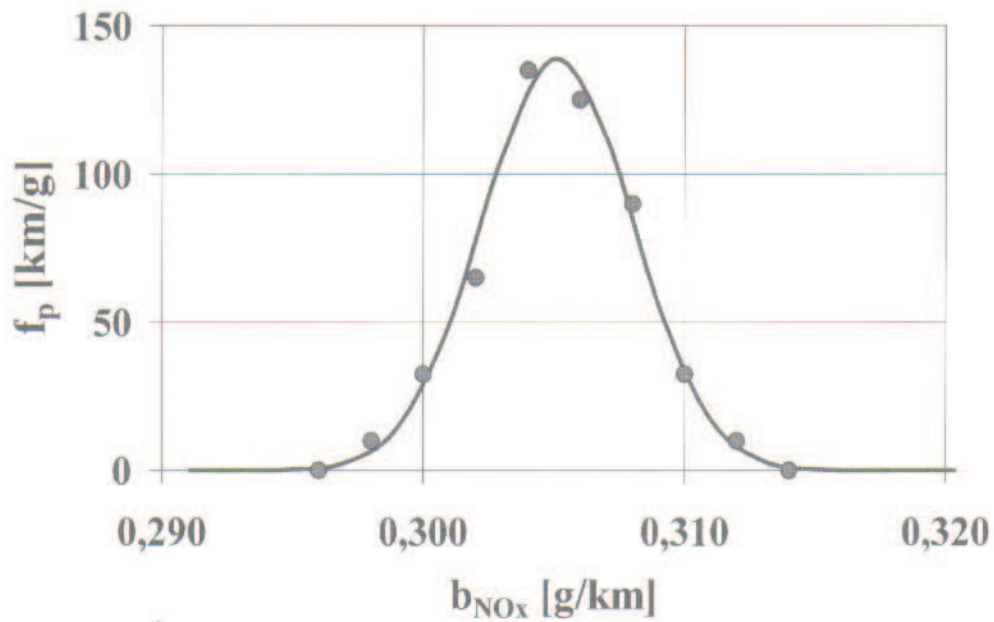
Do realizacji procedury wykorzystano charakterystykę (37), wyznaczoną dla średniej emisji drogowej tlenków azotu w [3], opisaną w [12]. Proces prędkości pojazdu został przyjęty w postaci białego szumu o częstotliwości ograniczonej do pasma $(0 \div 0,1)$ Hz.

Przykładowe wyniki badań przedstawiono na rys. 13–16 [11, 12]. Na rysunku 13 zostały przedstawione przykładowe realizacje procesu przypadkowego prędkości samochodu o wartości oczekiwanej 50 km/h i o amplitudzie 35 km/h. Dla tego procesu wyznaczono m.in. funkcję gęstości prawdopodobieństwa średniej emisji drogowej tlenków azotu, przedstawioną na rys. 14 jako aproksymowaną funkcją rozkładu normalnego. Badano również wpływ amplitudy procesu prędkości pojazdu (rys. 15) na jego właściwości ekologiczne (rys. 16).

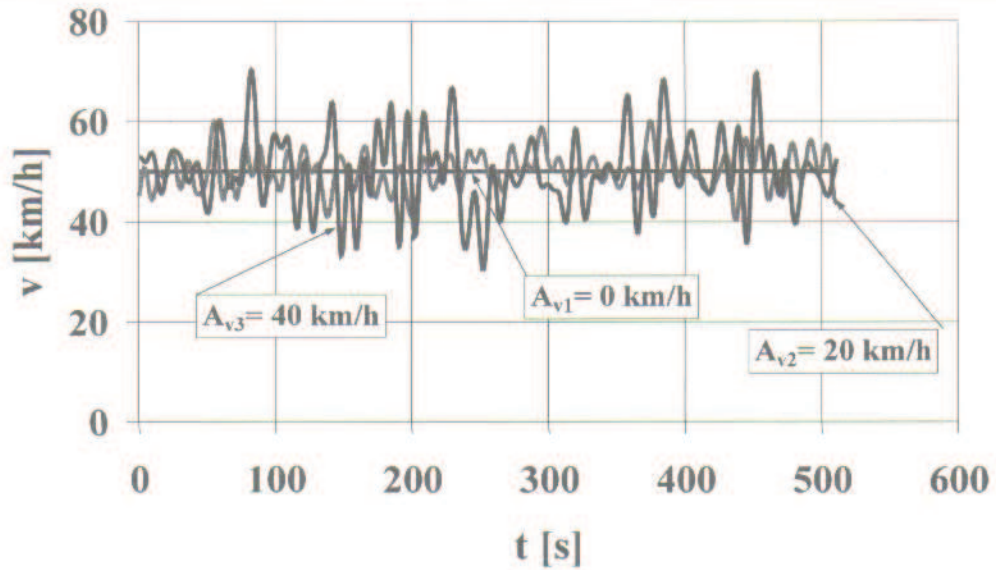
W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono małą wrażliwość średniej emisji drogowej tlenków azotu na amplitudę procesu prędkości, a więc na pewną miarę jego właściwości dynamicznych, co jest zgodne z wynikami innych badań w podobnych pod względem dynamicznym (ze względu np. na przyspieszenia) warunkach przyczynowych [3, 4, 12, 25, 30]. Nawet te stosunkowo proste badania symulacyjne umożliwiają ocenę rozrzutu ekologicznych właściwości silników w warunkach przypadkowych.



Rys. 13. Przykładowe realizacje procesu przypadkowego prędkości samochodu – v
Fig. 13. The examples of probabilistic process realisations for vehicle velocity – v

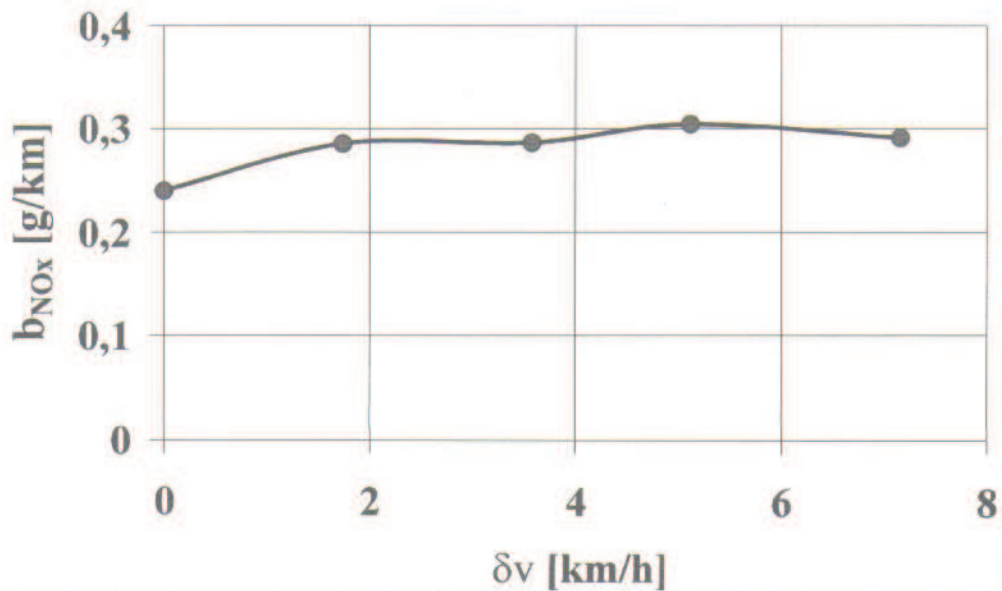


Rys. 14. Gęstość prawdopodobieństwa – f średniej emisji drogowej tlenków azotu b_{NOx}
Fig. 14. The histogram – f of mean nitrogen oxides road emission – b_{NOx}



Rys. 15. Przykładowe realizacje procesów prędkości samochodu – v o stałej charakterystyce amplitudowo-częstotliwościowej, stałej wartości średniej i zmiennej amplitudzie prędkości – A_v .

Fig. 15. The examples of probabilistic process realisations for vehicle velocity – v : constant spectre characteristic, constant mean value, variable amplitude – A_v .



Rys. 16. Zależność średniej emisji drogowej tlenków azotu – b_{NOx} od średniego odchylenia standardowego prędkości samochodu δv

Fig. 16. The dependence of mean nitrogen oxides road emission – b_{NOx} on vehicle road standard deviation – δv

Ogólność otrzymanych wyników ogranicza procedura, w której są wykorzystywane dane dla pewnej klasy procesów prędkości. Należy oczekiwać, że dla bardziej ogólnych przypadków procesów prędkości (np. klasy procesów Markowa) [26] byłoby wymagane wykorzystanie innych procedur wyznaczania danych, charakteryzujących właściwości ekologiczne silników, np. ich badanie w warunkach dynamicznych, generowanych metodami Monte Carlo. Konieczna jest jednak w tym celu realizacja złożonego programu badawczego, wymagająca zaangażowania zarówno dużego potencjału intelektualnego i zawodowego, jak i – przede wszystkim – znacznych środków.

5. Podsumowanie

Badania silników spalinowych w warunkach dynamicznych, szczególnie traktowane w sposób stochastyczny, nie mają dotychczas ugruntowanej pozycji w środowisku w kraju i za granicą. Najczęściej są to prace szczegółowe [2–4, 11, 12, 22, 26], a działania różnych ośrodków nie są skoordynowane. W artykule podjęto próbę usystematyzowania zagadnień, związanych z dynamiką silników, co ilustrowano ich badaniami ze względu na właściwości ekologiczne. Nie tylko rozważania teoretyczne, ale i proste przykłady, przedstawione w pracy, uzasadniają sformułowanie następujących wniosków:

1. W celu oceny ekologicznych właściwości silników spalinowych w warunkach odpowiadających rzeczywistemu użytkowaniu jest konieczne przeprowadzanie badań w stanach dynamicznych. Do rozwojowych i naukowych badań silników samochodowych nie jest wystarczające badanie silników:

- w warunkach testów homologacyjnych,
- w warunkach testów – realizacji procesów przypadkowych, symulujących użytkowanie, bez stochastycznego potraktowania zagadnienia.

Na podstawie takich badań jest możliwa ocena właściwości silników tylko w warunkach, w jakich były wykonane badania. W celu uogólnienia wyników badań konieczna jest stochastyczna ocena rozrzutu wyników badań, odpowiadająca rozpatrywanej klasie procesów modelujących warunki użytkowania silników. Szczególnie rozwój metod optymalnego sterowania silników ze względu na jakość pracy, w tym m.in. minimalizację szkodliwego oddziaływania na środowisko, wymaga zastosowania metod symulujących warunki użytkowania traktowane jako przypadkowe. Optymalizacja wykonywana jedynie dla realizacji procesów przypadkowych warunków użytkowania jest ograniczona tylko do badanego wypadku.

2. Podobne wymagania są formułowane w stosunku do optymalnego sterowania innych układów samochodu, m.in.: układu napędowego (sterowanie automatyczną skrzynią biegów, wykorzystanie siły napędowej, stateczność ruchu), układu hamulcowego (sterowanie skuteczności hamowania, stateczność ruchu), zawieszania (aktywne zawieszania, stateczność ruchu) oraz napędów hybrydowych.

3. Badania właściwości silników o różnych zastosowaniach wymagają poszukiwań zobjektywizowanych metod oceny podobieństwa warunków użytkowania i badań. Do syntezy testów badawczych nie wystarcza symulacja wierna czasowo bez stochastycz-

nego traktowania tego zjawiska. Konieczne jest opracowanie zasad syntezy stochastycznych testów badawczych, umożliwiających ocenę nie tylko właściwości silników w warunkach symulujących rzeczywiste użytkowanie, ale i poznanie stochastycznych charakterystyk tych właściwości.

4. Metody badań właściwości silników spalinowych w warunkach przypadkowych modelujących użytkowanie obejmują metody zarówno empiryczne, jak i symulacyjne. W badaniach tych wykorzystuje się bądź eksperymenty bierne, wykonywane w warunkach rzeczywistego użytkowania silników lub symulacji tych warunków, bądź czynne, w których w sposób programowany oddziałuje się na obiekt badań (np. badania z zastosowaniem zaburzeń). Wyniki badań właściwości silników spalinowych w warunkach przypadkowych modelujących użytkowanie stanowią wiedzę niepewną, ale za to nie ograniczoną tylko do klasy warunków przyczynowych, jak ma to miejsce w wypadku klasycznych badań w warunkach przyczynowych.

Tematyka badań właściwości silników spalinowych w warunkach przypadkowych, modelujących użytkowanie, jest niezbędnym elementem naukowym i utylitarnym postępu i rozwoju w dziedzinie silników spalinowych i samochodów. Jest to kierunek zgodny z tendencjami badań obiektów technicznych, od których wymaga się szczególnej pewności działania, np. samolotów, statków czy obiektów badań przestrzeni kosmicznej. Należy oczekiwać, że rozwój silników spalinowych, poparty racjonalnymi działaniami z udziałem współczesnych metod naukowych, będzie w najbliższej przyszłości wymagał takiego podejścia.

Literatura

- [1] ABAY & MEIER: *Fahrverhalten von Personenwagen in der Schweiz*, Umweltmaterialen Nr. 40. Luft. Im Auftrag des BUWAL. Bern 1995.
- [2] BRZEZINSKI D.: *Comparison of Start Emissions in LA92 and ST01 Test Cycles*, US EPA 1997.
- [3] BUWAL, INFRAS AG: *Luftschadstoffemissionen des Strassenverkehrs 1950–2010*. BUWAL-Bericht Nr. 255, 1995.
- [4] CHŁOPEK Z., DANILCZYK W., KRUCZYŃSKI S.: *Wpływ dynamicznych warunków eksploatacji samochodu na jego właściwości ekologiczne*, Journal of KONES 1998.
- [5] CHŁOPEK Z., DARKOWSKI A.: *Simulation of nitrogen oxides reduction over silver aluminate catalyst in homologation tests of Diesel engines*, International Journal of Occupational Safety and Ergonomics (praca w druku).
- [6] CHŁOPEK Z., MAJ M.: *Problemy badań właściwości silników spalinowych w warunkach modelujących użytkowanie*, Teka Komisji Naukowo-Problemovej Motoryzacji PAN (praca w druku).
- [7] CHŁOPEK Z., PIASECZNY L.: *O roli modelowania w badaniach naukowych*, Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej. Rok 42, Nr 2(146). Gdynia 2001.
- [8] CHŁOPEK Z., PIASECZNY L.: *Remarks about the modelling in science researches*, Eksploatacja i niezawodność Nr 4/2001. PAN – Oddział w Lublinie.
- [9] CHŁOPEK Z.: *Analiza metod wyznaczania statycznych testów badawczych silników spalinowych*, Journal of KONES 1999.
- [10] CHŁOPEK Z.: *Koncepcja badań ekologicznych właściwości samochodowych silników spalinowych w warunkach modelujących użytkowanie*, IX Ogólnopolskie Sympozjum Naukowe „Motoryzacyjne Problemy Ochrony Środowiska”. Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów Politechniki Warszawskiej (praca w druku).

- [11] CHŁOPEK Z.: *Metody badań ekologicznych właściwości silników spalinowych w warunkach przypadkowych*. Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów Politechniki Warszawskiej 4(35)/1999.
- [12] CHŁOPEK Z.: *Modelowanie procesów emisji spalin w warunkach eksploatacji trakcyjnej silników spalinowych*, Prace Naukowe, Seria „Mechanika” z. 173, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1999.
- [13] CHŁOPEK Z.: *O kryteriach równoważności warunków eksploatacji i warunków badań silników spalinowych*, Fourth International Symposium on Combustion Engines in Military Applications, Jurata 1999.
- [14] CHŁOPEK Z.: *Ocena ekologicznych właściwości silników spalinowych o różnych zastosowaniach – problemy procedur badawczych*, Ogólnopolska Konferencja Naukowa KONSSPAL 2000.
- [15] CHŁOPEK Z.: *Ocena wpływu organizacji ruchu pojazdów drogowych na globalną emisję substancji szkodliwych dla środowiska naturalnego*. Chemia i Inżynieria Ekologiczna, T. 7, Nr 7, 2000.
- [16] CHŁOPEK Z.: *Synteza statycznych testów badawczych silników spalinowych*, PAN Oddział w Krakowie, Teka Komisji Naukowo-Problemovej Motoryzacji, Zeszyt 18, Kraków 1999.
- [17] *COPERT III – Methodology and Emission Factors*. European Environment Agency. European Topic Center on Air Emission, 2000.
- [18] *CORINAIR Working Group on Emission Factors for Calculating 1995 Emissions from Road Traffic*. Final Report, 1996.
- [19] CORNETTI G.M., KLEIN K., FRÄNKLE G.J., STEIN H.J., *US transient cycle versus ECE R49 mode cycle*, SAE Paper 880715.
- [20] EPA: *Procedures for emission inventory preparation – Vol. IV: Mobile sources*. <http://www.bts.gov/smart/cat/AQP.html>. 1998.
- [21] FRÄNKLE G., STEIN H.J.: *Instationäre oder stationäre Abgasprüfverfahren für Nutzfahrzeug-Dieselmotoren*, 1. Teil ATZ 1/1988, 2. Teil – ATZ 2/1988.
- [22] HEUSCH-BOESEFELD GmbH, TÜV RHEINLAND GMBH: *Clusteranalytische Ermittlung von repräsentativen Fahrkurven von Personenwagen in der Schweiz*, Arbeitsunterlage 10. Im Auftrag des BUWAL. Aachen, Köln, Januar 1993.
- [23] *ISO 08178. Reciprocating internal combustion engines – Exhaust emission measurement – Part 4: Test cycles for different engine applications*.
- [24] JERMAKOW S.M.: *Metoda Monte Carlo i zagadnienia pokrewne*, PWN, Warszawa, 1976.
- [25] JOUMARD R.: *Methods of estimation of atmospheric emissions from transport: European scientist network and scientific state-of-the art*, INRETS report LTE 9901. Bron, France and European Commission. DG Transport EUR 18902. Luxembourg 1999.
- [26] KNIAZIEWICZ T., MERKISZ J., PIASECZNY L.: *Symulacja rzeczywistych obciążeń silników okrętowych w testach badawczych toksyczności ich spalin*, PAN Oddział w Krakowie. Teka Komisji Naukowo-Problemovej Motoryzacji, Kraków 1999.
- [27] MERKISZ J., BARSKI R.: *O możliwościach zastąpienia 13-fazowego testu ECE R49 skróconym testem SET w badaniach toksyczności silnika ZS*, EKO-DIESEL 1996.
- [28] OPPENHEIM A.V., SCHAFER R.W.: *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów*, WKiŁ, Warszawa 1979.
- [29] RWTÜV: *Emissions- und Verbrauchsmessungen an Dieselmotoren auf dem dynamischen Motorprüfstand*. Im Auftrag des UBA, Essen 1993.
- [30] SAE RECOMMENDED PRACTICE: *Test Procedure for the Measurement of Gaseous Exhaust Emissions from Small Utility Engines*, SAE J1088, February 1993.
- [31] SAMS Th., TIEBER J.: *Berechnung von Nfz-Emissionen unter Berücksichtigung des dynamischen Fahrverhaltens*, 18. Internationales Wiener Motorensymposium. VDI Verlag, Reihe 12: Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik Nr. 306. Wien 1998.
- [32] US EPA: *Nonregulatory Nonroad Duty Cycles*. August 1999.
- [33] WITUSZYŃSKI K., CZARNIGOWSKI J.: *Charakterystyki procesów przejściowych silników spalinowych*, Archiwum Motoryzacji, 3, 2000.
- [34] ZIELIŃSKI R.: *Metody Monte Carlo*, WNT, Warszawa 1970.

The research methods of internal combustion engines in probabilistic conditions of operation

S u m m a r y

In the paper systematic opinion of the research methods of internal combustion engines in probabilistic conditions of operation was presented. The researches of traction and off-road engines with these methods are indispensable. The examples of research results in road test for vehicles were presented. The examples of research results also for the model with vehicle velocity as probabilistic process were presented.