

## **Prof. dr hab. inż. Zdzisław Chłopek**

Instytut Pojazdów, Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych,  
Politechnika Warszawska  
ul. Narbutta 84, 02-524 Warszawa  
E-mail: zchlopek@simr.pw.edu.pl

## **Mgr inż. Jacek Biedrzycki**

Zakład Ochrony Środowiska i Wykorzystania Energii Naturalnej,  
Przemysłowy Instytut Motoryzacji  
ul. Jagiellońska 55, 03-301 Warszawa  
E-mail: j.biedrzycki@pimot.eu

## **Mgr inż. Jakub Lasocki**

Instytut Pojazdów, Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych,  
Politechnika Warszawska  
ul. Narbutta 84, 02-524 Warszawa  
E-mail: j.lasocki@simr.pw.edu.pl

## **Mgr inż. Piotr Wójcik**

Zakład Ochrony Środowiska i Wykorzystania Energii Naturalnej,  
Przemysłowy Instytut Motoryzacji  
ul. Jagiellońska 55, 03-301 Warszawa  
E-mail: p.wojcik@pimot.eu

# **Ocena wpływu stanów dynamicznych silnika spalinowego na jego właściwości użytkowe**

**Słowa kluczowe:** *silniki spalinowe, emisja zanieczyszczeń, testy jezdne, stany dynamiczne*

**Streszczenie:** Silniki spalinowe jako układy opisywane modelami nieliniowymi nie mają właściwości niezależnych od stanów, w jakich się znajdują. W pracy przedstawiono wyniki badań silnika samochodowego w stanach dynamicznych zdeterminowanych znakiem przyspieszenia pojazdu w testach jezdnych symulujących rzeczywistą eksploatację samochodów osobowych. Badano uśrednione w tych stanach: natężenie emisji zanieczyszczeń i natężenie przepływu paliwa. Stwierdzono znaczną wrażliwość badanych procesów zarówno na stany dynamiczne, jak i na rodzaje testów jezdnych.

## **1. Wprowadzenie**

W ogólności rzeczywiste obiekty opisane nieliniowymi modelami uznanymi za dostatecznie zgodne z przedmiotem modelowania [9] nie mają właściwości, które byłyby niezależne od stanów tych obiektów [8]. Do takich obiektów należą silniki spalinowe. Istnieje – w związku z tym – konieczność ograniczania ogólności zadań badania silników spalinowych. Szczególnie dla silników spalinowych znajdujących się w stanach dynamicznych [10] istnieje konieczność nakładania na badany układ pewnych więzów jako przyjętych procedur badawczych, np. pewnej klasy procesów stanowiących warunki pracy, lub przyjętego sposobu przetwarzania wyników badań, m.in. uśredniania w zakresie wartości procesów.

Właściwości użytkowe silników spalinowych (dla stałych charakterystyk sterowania silnika) są zdeterminowane przede wszystkim tymi wielkościami, które charakteryzują: intensywność wykonywanej przez silniki pracy, opisywana mocą użyteczną, oraz stan cieplny silników, określany temperaturami ich części i układów [8]. Do opisu wielkości charakteryzujących intensywność wykonywanej przez silniki pracy wykorzystuje się zazwyczaj moment obrotowy, opisujący obciążenie silnika, i prędkość obrotową [8]. Do tego opisu można również przyjąć jako wielkość charakteryzującą obciążenie sterowanie silnika przez operatora. Te trzy wielkości: sterowanie silnika przez operatora –  $s$ , moment obrotowy silnika –  $M_e$  i jego prędkość obrotowa –  $n$  są ze sobą zależne. W stanach statycznych jest to zależność w postaci funkcji elementarnej o wartościach liczbowych:

$$F(s, M_e, n) = 0 \quad (1)$$

natomiast w stanach dynamicznych jest to zależność operatorowa [2]:

$$\mathfrak{F}[s, M_e, n] = 0 \quad (2)$$

Również do opisu obciążenia silnika spalinowego, zamiast jego momentu obrotowego, można użyć momentu oporu –  $M_o$ . W stanach statycznych zachodzi oczywiście zależność:

$$M_e = M_o \quad (3)$$

natomiast w stanach dynamicznych:

$$\frac{d}{dt}[J(t) \cdot n(t)] = M_e(t) - M_o(t) \quad (4)$$

gdzie:  $t$  – czas,

$J$  – moment bezwładności ruchomych części silnika sprowadzony na oś wału korbowego.

Zatem w stanach statycznych spełniona jest zależność funkcyjna o wartościach liczbowych:

$$F(s, M_o, n) = 0 \quad (5)$$

a w stanach dynamicznych jest to zależność operatorowa:

$$\mathfrak{R}[s, M_o, n] = 0 \quad (6)$$

Właściwości użytkowe silników spalinowych zależą w stanach dynamicznych nie tylko od wartości wielkości opisujących stan pracy silnika, ale i od ich przebiegów [8]. Z tego powodu właściwości użytkowe silników spalinowych w warunkach dynamicznych mogą się znacznie różnić od tych właściwości w warunkach statycznych [8].

Dla ustabilizowanego stanu cieplnego silnika spalinowego jego właściwości determinują w stanach dynamicznych procesy momentu obrotowego i prędkości obrotowej. W związku z tym w ogólności nie można jednoznacznie ocenić właściwości użytkowych silnika spalinowego w jego stanach dynamicznych. Istnieje jednak możliwość rozpatrywania właściwości użytkowych silnika spalinowego w stanach dynamicznych przyjętych jako stany elementarne. Jednym z możliwych kryteriów kwalifikacji do elementarnych stanów dynamicznych silnika spalinowego jest rozpatrywanie znaku pochodnych stanów względem czasu: dodatniego lub ujemnego, w całym zakresie pracy silnika. Zatem dla wielkości sterowania silnika przez operatora, momentu oporu i prędkości obrotowej są możliwe następujące elementarne stany pracy silnika:

$$\frac{ds}{dt} > 0 \wedge \frac{dM_o}{dt} > 0; \Rightarrow \frac{dn}{dt} > 0 \quad (7)$$

$$\frac{ds}{dt} > 0 \wedge \frac{dM_o}{dt} > 0; \Rightarrow \frac{dn}{dt} < 0 \quad (8)$$

$$\frac{ds}{dt} > 0 \wedge \frac{dM_o}{dt} < 0; \Rightarrow \frac{dn}{dt} > 0 \quad (9)$$

$$\frac{ds}{dt} < 0 \wedge \frac{dM_o}{dt} > 0; \Rightarrow \frac{dn}{dt} < 0 \quad (10)$$

$$\frac{ds}{dt} < 0 \wedge \frac{dM_o}{dt} < 0; \Rightarrow \frac{dn}{dt} < 0 \quad (11)$$

$$\frac{ds}{dt} < 0 \wedge \frac{dM_o}{dt} < 0; \Rightarrow \frac{dn}{dt} > 0 \quad (12)$$

Z kolei dla wielkości sterowania silnika przez operatora, momentu obrotowego i prędkości obrotowej są możliwe następujące elementarne stany pracy silnika:

$$\frac{ds}{dt} > 0 \wedge \frac{dM_e}{dt} > 0; \Rightarrow \frac{dn}{dt} > 0 \quad (13)$$

$$\frac{ds}{dt} > 0 \wedge \frac{dM_e}{dt} > 0; \Rightarrow \frac{dn}{dt} < 0 \quad (14)$$

$$\frac{ds}{dt} > 0 \wedge \frac{dM_e}{dt} < 0; \Rightarrow \frac{dn}{dt} > 0 \quad (15)$$

$$\frac{ds}{dt} < 0 \wedge \frac{dM_e}{dt} > 0; \Rightarrow \frac{dn}{dt} < 0 \quad (16)$$

$$\frac{ds}{dt} < 0 \wedge \frac{dM_e}{dt} < 0; \Rightarrow \frac{dn}{dt} < 0 \quad (17)$$

$$\frac{ds}{dt} < 0 \wedge \frac{dM_e}{dt} < 0; \Rightarrow \frac{dn}{dt} > 0 \quad (18)$$

Opisy (7–12) i (13–18) można również rozpatrywać dla założonych zakresów wartości procesów. Można również tworzyć kombinacje warunków i stanów pracy silnika określonych zakresami wartości procesów, znakami pochodnych procesów względem czasu oraz pochodnych procesów względem czasu równych zero z odpowiednio dobraną tolerancją (procesy stałe), np.:

$$\frac{ds}{dt} > 0; \quad \frac{dM_e}{dt} \in \left[ \delta_{M_e} - \frac{\varepsilon_{\delta M_e}}{2}; \delta_{M_e} + \frac{\varepsilon_{\delta M_e}}{2} \right] \quad (19)$$

dla

$$s \in [s_{\min}; s_{\max}] \quad n \in [n_{\min}; n_{\max}] \quad M_e \in [M_{e\min}; M_{e\max}] \quad (20)$$

W warunkach ustabilizowanego stanu cieplnego silnika spalinowego, procesem determinującym stan silnika samochodowego w warunkach użytkowania trakcyjnego jest proces prędkości pojazdu [8]. Z tego powodu do badania właściwości użytkowych samochodowych silników spalinowych można wykorzystywać badania pojazdów w testach jezdnych. Powszechnie badania te wykonuje się w testach homologacyjnych [25, 26] oraz testach specjalnych, symulujących szczególne warunki ruchu samochodów, np. w zatorach ulicznych – test Stop and Go [5] oraz na autostradach i drogach ekspresowych – test Autobahn [5]. Oczywiście wyniki badań właściwości użytkowych w stanach dynamicznych, występujących w różnych testach, różnią się od siebie.

Potrzeba badania użytkowych właściwości silników spalinowych, znajdujących się w stanach dynamicznych, jest aktualna od wielu lat. Pojawia się wiele prac podejmujących tę tematykę [1, 3, 4, 6–8, 10–19, 21–24], jednak dotychczas brak jest w zasadzie standardów tego typu badań, standardami są jedynie metody badań uśrednionych właściwości silników spalinowych w stanach dynamicznych, jak ma to miejsce w przypadku badań homologacyjnych [25, 26].

Większość prac dotyczy sterowania silników spalinowych z uwzględnieniem stanów dynamicznych [4, 12, 14, 17, 23]. W pracy [4] przedstawiono model matematyczny, wykorzystywany do symulacji pracy w stanach dynamicznych wtryskiwacza

w zasobnikowym układzie zasilania. W monografii [12], opracowanej w ETH Zürich, przedstawiono współczesny stan wiedzy na temat modelowania procesów roboczych w silnikach spalinowych ze względu na ich wykorzystanie w systemach sterowania stosowanych w silnikach. W publikacji [14] model matematyczny procesów zachodzących w silniku spalinowym został wykorzystany do sterowania procesów w silniku o systemie spalania HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition – samozapłon mieszanki jednorodnej). W pracy [17] jest przedstawiony wielowymiarowy model, wykorzystywany do opracowywania algorytmów sterowania silników spalinowych, z zastosowaniem logiki rozmytej. W artykule [23] przedstawiono wyniki badań parametrów sterowania silnika samochodowego w rzeczywistych warunkach eksploatacji.

Badane są również właściwości samochodowych silników spalinowych w konkretnych warunkach użytkowania w czasie rzeczywistej eksploatacji pojazdów [15, 16, 19], m.in. z zastosowaniem mobilnych systemów pomiarowych PEMS (Portable Emissions Measurement System). W [15] są przedstawione wyniki badań emisji zanieczyszczeń z silników pojazdów o zastosowaniach innych niż samochodowe (tzw. non-road), a w pracy [16] – z silników samochodowych. W pracy [19] analizowano wpływ parametrów ruchu samochodu osobowego na zużycie paliwa i emisję zanieczyszczeń w czasie rzeczywistego użytkowania pojazdu w warunkach ruchu w mieście.

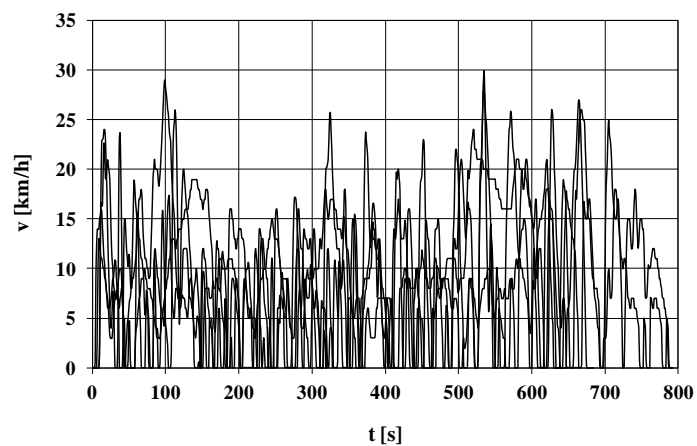
Część prac dotyczy badań procesów przepływów, tworzenia mieszanki palnej, spalania i powstawania poszczególnych składników spalin w silnikach spalinowych znajdujących się w stanach dynamicznych [22, 24].

Większość prac dotyczy silników samochodowych, jednak w artykule [13] przedstawiono wyniki badań emisji zanieczyszczeń z okrętowego tłokowego silnika spalinowego w czasie jego rozruchu, a w pracy [15] z silnika ciągnika rolniczego.

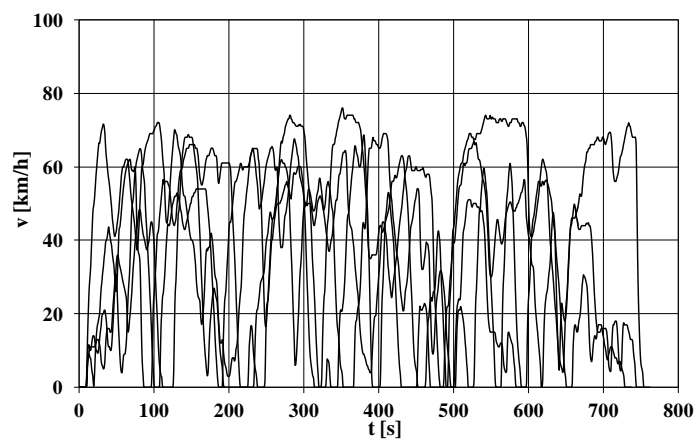
W niniejszej pracy postanowiono wykorzystać do badań testy opracowane przez autorów w ramach realizacji pracy [7], nazwane testami PIMOT. W pracy tej przyjęto oryginalną koncepcję wyznaczania testów do symulacji rzeczywistych warunków jazdy samochodu osobowego [6]. Zarejestrowane przebiegi prędkości samochodu w porównywalnych warunkach ruchu (w zatorach ulicznych, w miastach, poza miastami oraz na autostradach i drogach ekspresowych) potraktowano jako realizacje procesów stochastycznych prędkości samochodu w rozpatrywanych warunkach ruchu. Na podstawie analizy tych procesów stochastycznych wyznaczono dla każdego z warunków ruchu samochodu po kilka przebiegów prędkości, stanowiących realizacje procesu stochastycznego, będącego testem jezdny w każdym z rozpatrywanych warunkach. Poszczególne realizacje prędkości pojazdu zostały wyznaczone zgodnie z kryterium wiernej symulacji w dziedzinie czasu. Jako kryteria porównawcze przy wyznaczaniu testów jezdnych przyjęto podobieństwo zerowymiarowych charakterystyk procesów stochastycznych prędkości: w rzeczywistym użytkowaniu oraz testów, mianowicie: wartości oczekiwanej, wartości ekstremalnych oraz wariancji.

Na rysunkach 1–4 przedstawiono testy jezdne PIMOT, stanowiące po cztery realizacje procesów stochastycznych prędkości samochodu, charakteryzujących jego ruch:

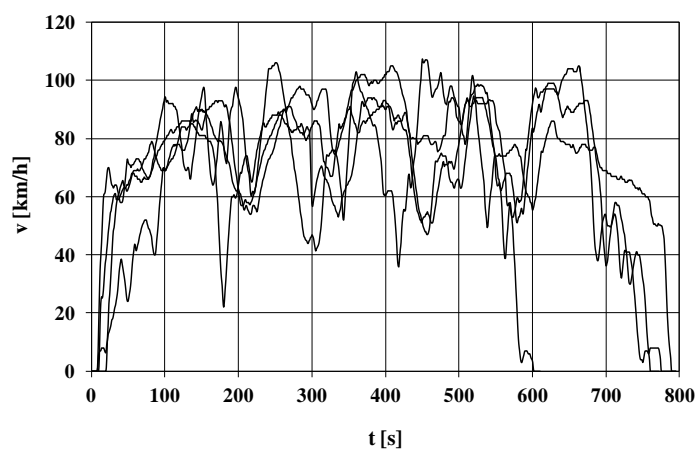
- w zatorach ulicznych – oznaczenie CT,
- w miastach z wyłączeniem zatorów ulicznych – UT,
- poza miastami – RT,
- na autostradach i drogach ekspresowych – HT.



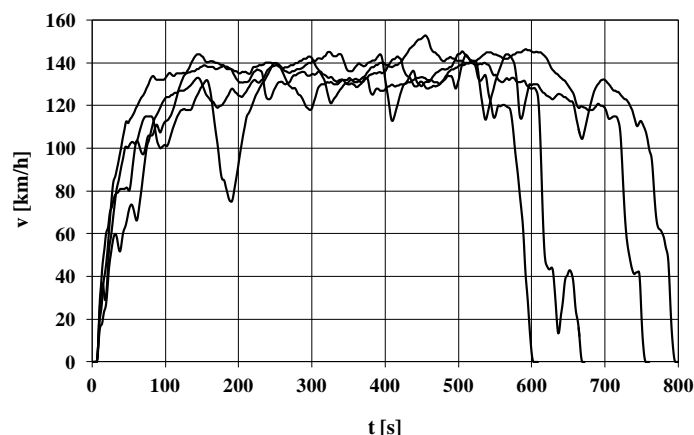
Rys. 1. Przebiegi prędkości –  $v$  w testach jazdy w zatorach ulicznych – CT



Rys. 2. Przebiegi prędkości –  $v$  w testach jazdy w mieście – UT



Rys. 3. Przebiegi prędkości –  $v$  w testach jazdy poza miastami – RT



Rys. 4. Przebiegi prędkości –  $v$  w testach jazdy na autostradach i drogach ekspresowych – HT

## 2. Metodyka, obiekt i wyniki badań

W celu oceny wpływu stanów dynamicznych silnika spalinowego na jego właściwości przeprowadzono badania w testach w warunkach odpowiadających przyspieszeniu samochodu w testach: ujemnemu i dodatniemu. Właściwościami, które poddano badaniu, były: emisja zanieczyszczeń i zużycie paliwa. Oceny wpływu stanów dynamicznych silnika spalinowego na jego właściwości dokonywano w warunkach pracy silnika w samochodzie w testach PIMOT.

Obiekt badań stanowił samochód osobowy Honda Civic z silnikiem o zapłonie iskrowym o objętości skokowej  $1396 \text{ cm}^3$ .

Badania samochodu zostały przeprowadzone na stanowisku hamowni podwoziowej Schenk Komeg EMDY 48. Do badań emisji wykorzystano stanowisko do analizy spalin, w skład którego wchodzi system Horiba Mexa 7200 wyposażony w analizatory Horiba:

- AIA-721A (pomiar stężenia tlenku węgla),
- AIA-722 (pomiar stężenia dwutlenku węgla),
- MPA-720 (pomiar stężenia tlenu),
- CLA-755A (pomiar stężenia tlenków azotu),
- FIA-725A (pomiar stężenia węglowodorów).

Badaniom poddano procesy: natężenia przepływu paliwa zużywanego przez silnik oraz procesy natężenia emisji zanieczyszczeń. Sygnały zostały zsynchronizowane w miejscu poboru spalin w układzie wylotowym za wielofunkcyjnym reaktorem katalitycznym: uwzględniono opóźnienie poszczególnych sygnałów, związane z analizą spalin, natomiast natężenie przepływu paliwa wyznaczono z bilansu masy węgla w sygnałach natężenia emisji składników spalin. Badane sygnały poddano przetwarzaniu w celu wyeliminowania błędów grubych i zmniejszenia udziału zakłóceń o dużych częstotliwościach. Pomiary były próbkowane z częstotliwością 10 Hz, a następnie uśredniane dla 10 kolejnych wyników pomiarów. Przetwarzane sygnały miały zatem odstęp próbkowania równy czasowi 1 s. Błędy grube identyfikowano metodą analizy bieżącej wariancji wyników pomiarów. Do zmniejszenia udziału w sygnałach szumów o dużych częstotliwościach zastosowano filtr dolnoprzepustowy Golaya-Savitzky'ego [20] z wielomianem drugiego stopnia oraz z aproksymacją obustronną po 2 punkty.

Niech zbiory  $E_{CO}$ ,  $E_{HC}$ ,  $E_{NOx}$ ,  $E_{CO2}$  oraz  $G_f$  zawierają zdyskretyzowane wartości natężeń emisji zanieczyszczeń i natężenia przepływu paliwa oraz przyspieszenia samochodu dla każdej z realizacji testów z częstotliwością próbkowania 1 Hz. Moc każdego z tych zbiorów wynosi  $N$ . Każdy ze zbiorów może być przedstawiony w postaci sumy zbiorów

zawierających elementy charakteryzujące się tą właściwością, że przyspieszenie samochodu jest dodatnie lub ujemne:

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_{(a<0)} \cup \mathbf{X}_{(a>0)} \quad (21)$$

gdzie:  $\mathbf{X} = \mathbf{E}_{CO}, \mathbf{E}_{HC}, \mathbf{E}_{NOx}, \mathbf{E}_{CO2}, \mathbf{G}_f$ .

Niech moc zbiorów  $\mathbf{X}_{(a<0)}$  wynosi  $N_{(a<0)}$ , zaś zbiorów  $\mathbf{X}_{(a>0)}$  –  $N_{(a>0)}$ . Wartość średnia elementów zbiorów  $\mathbf{X}_{(a<0)}$  wynosi:

$$\mathbf{X}_{(a<0)AV} = \frac{1}{N_{(a<0)}} \sum_{i=1}^{N_{(a<0)}} \mathbf{X}_{(a<0)i} \quad (22)$$

Zaś zbiorów  $\mathbf{X}_{(a>0)}$

$$\mathbf{X}_{(a>0)AV} = \frac{1}{N_{(a>0)}} \sum_{i=1}^{N_{(a>0)}} \mathbf{X}_{(a>0)i} \quad (23)$$

gdzie:  $\mathbf{X}_{(a<0)AV} = \mathbf{E}_{CO(a<0)j}, \mathbf{E}_{HC(a<0)j}, \mathbf{E}_{NOx(a<0)j}, \mathbf{E}_{CO2(a<0)}, \mathbf{G}_{f(a<0)j}$ ,

$\mathbf{X}_{(a>0)AV} = \mathbf{E}_{CO(a>0)j}, \mathbf{E}_{HC(a>0)j}, \mathbf{E}_{NOx(a>0)j}, \mathbf{E}_{CO2(a>0)}, \mathbf{G}_{f(a>0)j}$ ,

$j = 1, 2, 3, 4$  – numer realizacji każdego z testów.

Przykładowe wyniki badań przedstawiono dla testów:

- CT na rysunkach 5 i 6,
- UT na rysunkach 7 i 8,
- RT na rysunkach 9 i 10,
- HT na rysunkach 11 i 12.

Na rysunkach tych przedstawiono wartość średnią oraz względny rozstęp średniego natężenia przepływu paliwa i średniego natężenia emisji zanieczyszczeń dla wyników badań dla ujemnego i dodatniego przyspieszenia samochodu w poszczególnych realizacjach testów.

Wartość średnia średniego natężenia emisji zanieczyszczeń dla realizacji każdego z testów wynosi:

$$\mathbf{E}_{x(a>0)} = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 \mathbf{E}_{x(a>0)j} \quad (24)$$

gdzie:  $x = CO, HC, NOx, CO_2$ ,

a dla średniego natężenia przepływu paliwa

$$\mathbf{G}_{f(a>0)} = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 \mathbf{G}_{f(a>0)j} \quad (25)$$

Względny rozstęp jest zdefiniowany jako stosunek wartości bezwzględnej rozstępu  $R$  i wartości średniej  $AV$ :

$$\delta = \frac{|R|}{AV} \quad (26)$$

gdzie:  $AV = \mathbf{E}_{x(a<0)}, \mathbf{E}_{x(a>0)}, \mathbf{G}_{f(a<0)}, \mathbf{G}_{f(a>0)}$ ,

przy czym

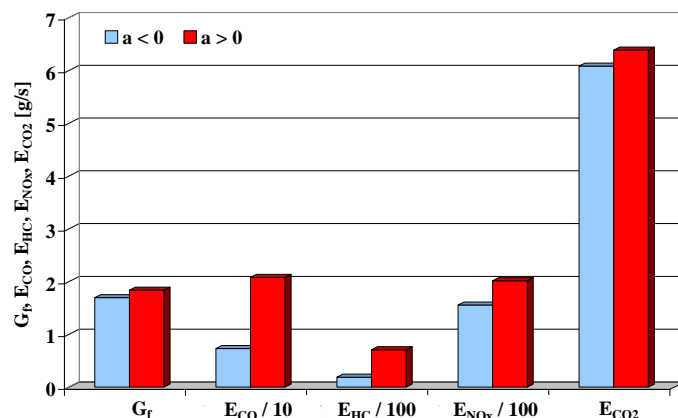
$$R = \max(y) - \min(y) \quad (27)$$

gdzie:  $y = \mathbf{E}_{x(a<0)}, \mathbf{E}_{x(a>0)}, \mathbf{G}_{f(a<0)}, \mathbf{G}_{f(a>0)}$ ,

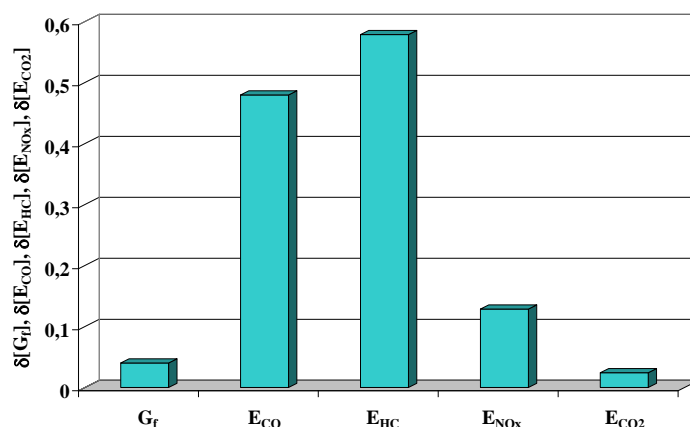
$\max$  – operator wartości maksymalnej elementów zbioru,

$\min$  – operator wartości minimalnej elementów zbioru.

Na poniższych wykresach indeksy  $(a<0)$  i  $(a>0)$  zamieszczono w legendach.



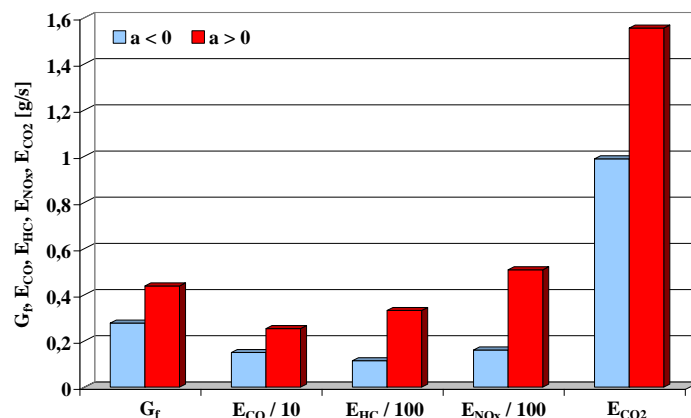
Rys. 5. Wartość średnia średniego natężenia przepływu paliwa –  $G_f$  oraz średniego natężenia emisji: tlenku węgla –  $E_{CO}$ , węglowodorów –  $E_{HC}$ , tlenków azotu –  $E_{NOx}$  i dwutlenku węgla –  $E_{CO2}$  dla ujemnego ( $a < 0$ ) i dodatniego ( $a > 0$ ) przyspieszenia samochodu w teście CT



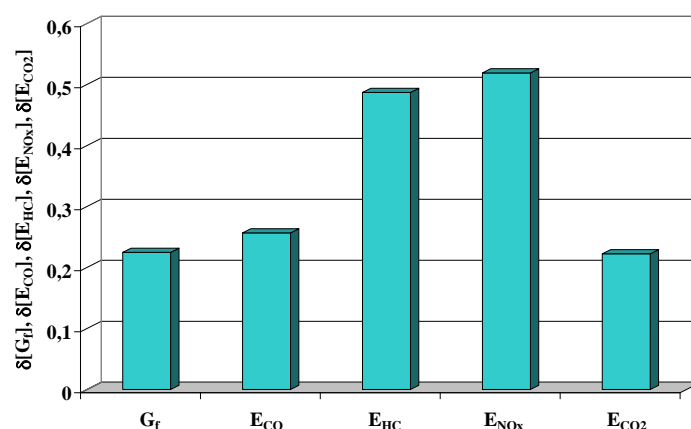
Rys. 6. Względny rozstęp średniego natężenia przepływu paliwa –  $G_f$  oraz średniego natężenia emisji: tlenku węgla –  $E_{CO}$ , węglowodorów –  $E_{HC}$ , tlenków azotu –  $E_{NOx}$  i dwutlenku węgla –  $E_{CO2}$  dla ujemnego i dodatniego przyspieszenia samochodu w teście CT

W czasie jazdy w zatorach ulicznych są bardzo specyficzne warunki ruchu, charakteryzujące się niedużymi bezwzględnymi wartościami przyspieszenia. Z tego powodu natężenie emisji dwutlenku węgla i natężenie przepływu paliwa nie różnią się znacznie w fazach przyspieszania i opóźniania ruchu samochodu, szczególnie uwzględniając „uśredniające” właściwości układu poboru spalin do analizy. Wyraźnie widoczny jest znaczny wzrost w fazie przyspieszania natężenia emisji węglowodorów oraz – w następnej kolejności – tlenku węgla.



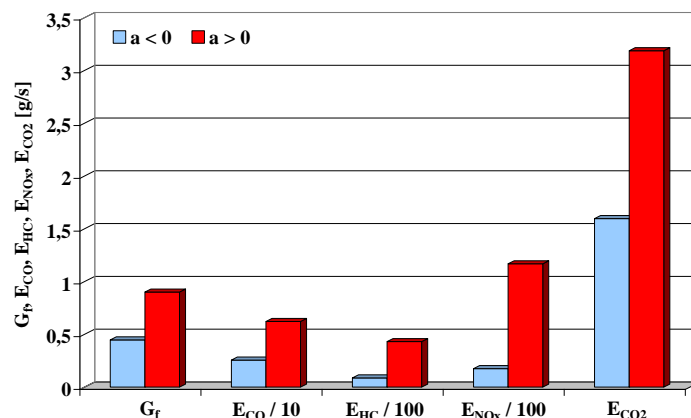


Rys. 7. Wartość średnia średniego natężenia przepływu paliwa –  $G_f$  oraz średniego natężenia emisji: tlenku węgla –  $E_{CO}$ , węglowodorów –  $E_{HC}$ , tlenków azotu –  $E_{NOx}$  i dwutlenku węgla –  $E_{CO2}$  dla ujemnego ( $a < 0$ ) i dodatniego ( $a > 0$ ) przyspieszenia samochodu w teście UT

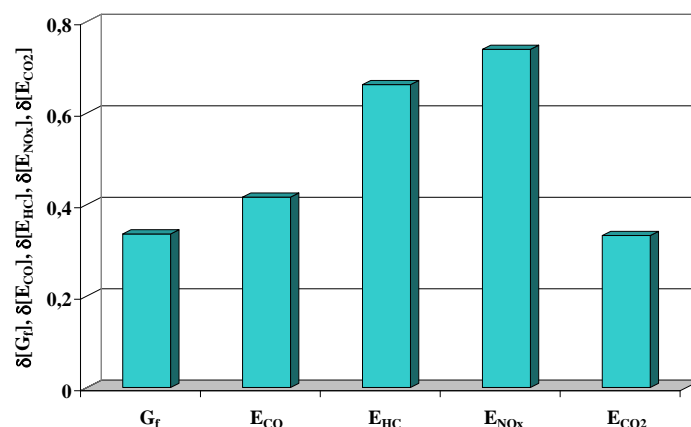


Rys. 8. Względny rozróżnienie średniego natężenia przepływu paliwa –  $G_f$  oraz średniego natężenia emisji: tlenku węgla –  $E_{CO}$ , węglowodorów –  $E_{HC}$ , tlenków azotu –  $E_{NOx}$  i dwutlenku węgla –  $E_{CO2}$  dla ujemnego i dodatniego przyspieszenia samochodu w teście UT

W czasie jazdy w miastach (bez uwzględniania ruchu w warunkach zatorów ulicznych) dużo większa jest różnica – niż w wypadku jazdy w zatorach ulicznych – natężenia emisji zanieczyszczeń i natężenia przepływu paliwa dla faz przyspieszania i opóźniania ruchu samochodu. Szczególnie duży jest ponad 50-procentowy względny rozróżnienie natężenia emisji tlenków azotu, co ma związek z dużym obciążeniem silnika w czasie przyspieszania samochodu.

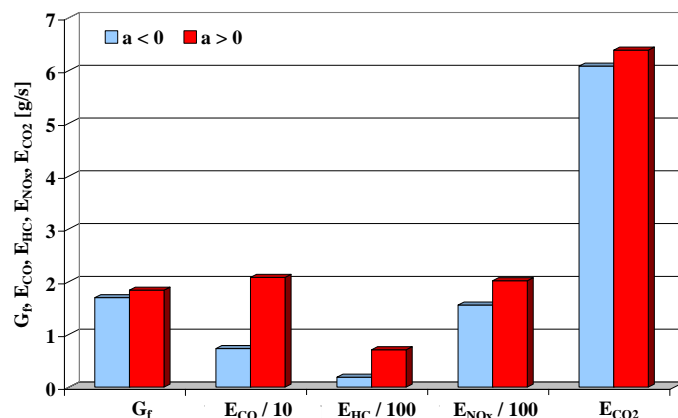


Rys. 9. Wartość średnia średniego natężenia przepływu paliwa –  $G_f$  oraz średniego natężenia emisji: tlenku węgla –  $E_{CO}$ , węglowodorów –  $E_{HC}$ , tlenków azotu –  $E_{NOx}$  i dwutlenku węgla –  $E_{CO2}$  dla ujemnego ( $a < 0$ ) i dodatniego ( $a > 0$ ) przyspieszenia samochodu w teście RT

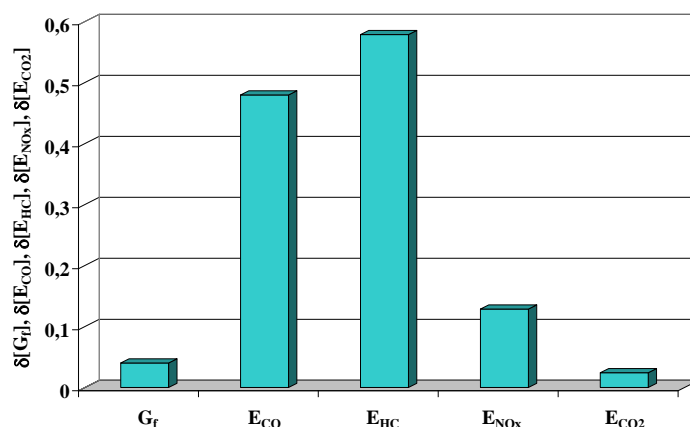


Rys. 10. Względny rozstęp średniego natężenia przepływu paliwa –  $G_f$  oraz średniego natężenia emisji: tlenku węgla –  $E_{CO}$ , węglowodorów –  $E_{HC}$ , tlenków azotu –  $E_{NOx}$  i dwutlenku węgla –  $E_{CO2}$  dla ujemnego i dodatniego przyspieszenia samochodu w teście RT

W warunkach jazdy poza miastami występują podobne zależności jak w wypadku jazdy w miastach, przy czym wpływ przyspieszania samochodu na przyrost natężenia emisji zanieczyszczeń i natężenia przepływu paliwa jest jeszcze bardziej wyraźny.



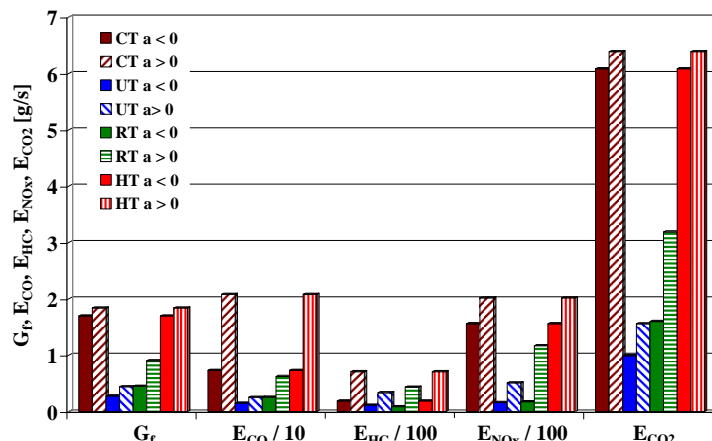
Rys. 11. Wartość średnia średniego natężenia przepływu paliwa –  $G_f$  oraz średniego natężenia emisji: tlenku węgla –  $E_{CO}$ , węglowodorów –  $E_{HC}$ , tlenków azotu –  $E_{NOx}$  i dwutlenku węgla –  $E_{CO2}$  dla ujemnego ( $a < 0$ ) i dodatniego ( $a > 0$ ) przyspieszenia samochodu w teście HT



Rys. 12. Względny rozstęp średniego natężenia przepływu paliwa –  $G_f$  oraz średniego natężenia emisji: tlenku węgla –  $E_{CO}$ , węglowodorów –  $E_{HC}$ , tlenków azotu –  $E_{NOx}$  i dwutlenku węgla –  $E_{CO2}$  dla ujemnego i dodatniego przyspieszenia samochodu w teście HT

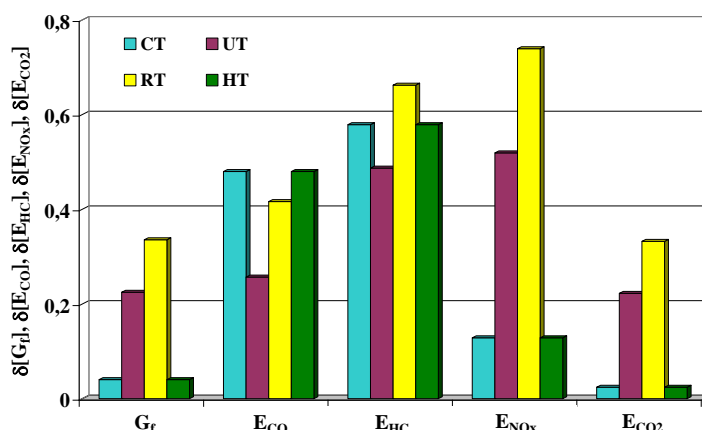
W czasie jazdy samochodu na autostradach i drogach ekspresowych wartość bezwzględna przyspieszenia ma nieduże wartości. W związku z tym nie ma dużej różnicy między natężeniem przepływu paliwa i natężeniem emisji dwutlenku węgla w fazach przyspieszania i opóźniania samochodu. Podobnie jest w wypadku natężenia emisji tlenków azotu. Różnice występują natomiast dla natężenia emisji tlenku węgla i węglowodorów.

Na rysunku 13 przedstawiono zbiorczy wykres średniego natężenia przepływu paliwa oraz średniego natężenia emisji zanieczyszczeń dla ujemnego i dodatniego przyspieszenia samochodu w testach PIMOT.



Rys. 13. Wartość średnia średniego natężenia przepływu paliwa –  $G_f$  oraz średniego natężenia emisji: tlenku węgla –  $E_{CO}$ , węglowodorów –  $E_{HC}$ , tlenków azotu –  $E_{NOx}$  i dwutlenku węgla –  $E_{CO2}$  dla ujemnego ( $a < 0$ ) i dodatniego ( $a > 0$ ) przyspieszenia samochodu w testach PIMOT

Na rysunku 14 jest przedstawiony zbiorczy wykres względnego rozstępu natężenia przepływu paliwa oraz względnego rozstępu natężenia emisji zanieczyszczeń dla ujemnego i dodatniego przyspieszenia samochodu w testach PIMOT.



Rys. 14. Względny rozstęp średniego natężenia przepływu paliwa –  $G_f$  oraz średniego natężenia emisji: tlenku węgla –  $E_{CO}$ , węglowodorów –  $E_{HC}$ , tlenków azotu –  $E_{NOx}$  i dwutlenku węgla –  $E_{CO2}$  dla ujemnego i dodatniego przyspieszenia samochodu w testach PIMOT

### 3. Wnioski

Na podstawie badań przeprowadzonych w stanach dynamicznych silnika spalinowego można sformułować następujące wnioski:

- 1) Jednoznacznie stwierdzono, że w warunkach przyspieszania samochodu większe są wartości natężenia emisji zanieczyszczeń i natężenia przepływu paliwa niż w wypadku opóźniania ruchu pojazdu. Wartości różnic są znacznie zróżnicowane w zależności od badanych wielkości i warunków ruchu, zdeterminowanych testami. Względny rozstęp średniego natężenia emisji zanieczyszczeń i średniego natężenia przepływu paliwa mieści

się w granicach od 0,024 do 0,739 – najmniejsza wartość dla natężenia emisji dwutlenku węgla w warunkach ruchu samochodu w zatorach ulicznych, największa dla natężenia emisji tlenków azotu w warunkach ruchu poza miastami.

- 2) Nie stwierdzono jednoznacznych zależności zwiększania się natężenia emisji zanieczyszczeń i natężenia przepływu paliwa przy przyspieszaniu samochodu w stosunku do sytuacji opóźniania ruchu pojazdu w różnych rodzajach testów. Przykładowo w warunkach zatorów ulicznych oraz dla jazdy na autostradach i drogach ekspresowych największa jest wrażliwość na oceniane stany dynamiczne dla natężenia emisji węglowodorów, a w warunkach jazdy w miastach i poza miastami dla natężenia emisji tlenków azotu.
- 3) Największy względny rozstęp natężenia emisji zanieczyszczeń i natężenia przepływu paliwa wystąpił w warunkach ruchu poza miastami, zaś najmniejszy w ruchu w zatorach ulicznych.
- 4) Największy względny rozstęp natężenia emisji w fazie przyspieszania samochodu jest w przypadku węglowodorów, zaś najmniejszy jest względny wzrost natężenia emisji dwutlenku węgla i natężenia przepływu paliwa.

Ogólnie można stwierdzić, że w stanach pracy silnika spalinowego odpowiadających dodatniemu przyspieszeniu samochodu średnie natężenie przepływu zużywanego paliwa oraz średnie natężenie emisji zanieczyszczeń są większe niż w stanach odpowiadających ujemnemu przyspieszeniu. W niektórych przypadkach różnica jest bardzo duża – względny rozstęp badanych wielkości przekracza nawet 70%.

**Podziękowanie:** Artykuł opracowano na podstawie wyników badań realizowanych w pracy N N509 556440 „Wrażliwość emisji zanieczyszczeń i zużycia paliwa na warunki użytkowania trakcyjnego silnika o zapłonie iskrowym”, finansowanej ze środków Narodowego Centrum Nauki.

## Piśmiennictwo

1. Arregle J, Bermudez V, Serrano J R, Fuentes E. Procedure for engine transient cycle emissions testing in real time. *Experimental Thermal and Fluid Science* 2006; 30(5): 485–496.
2. Banach S. *Théorie des opérations linéaires*. Monografie Matematyczne 1. Warszawa, 1932.
3. Bermúdez V, Luján J M, Serrano J R, Pla B. Transient particle emission measurement with optical techniques. *Measurement Science and Technology* 2008; 19(6): 065404.
4. Bianchi G M, Falfari S, Parotto M, Osbat G. Advanced modeling of common rail injector dynamics and comparison with experiments. SAE paper 2003–01–0006.
5. BUWAL, INFRAS AG. Luftschadstoffemissionen des Strassenverkehrs 1950–2010. BUWAL–Bericht Nr. 255, 1995.
6. Chłopek Z, Biedrzycki J, Lasocki J, Wójcik P. Investigation of the motion of motor vehicles in Polish conditions. *The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji* 2013; 60(2): 3–20.
7. Chłopek Z, Biedrzycki J, Lasocki J, Wójcik P. Sprawozdanie z pracy N N509 556440 „Wrażliwość emisji zanieczyszczeń i zużycia paliwa na warunki użytkowania trakcyjnego silnika o zapłonie iskrowym”. Warszawa, 2013. (Praca nie publikowana).
8. Chłopek Z. Modelowanie procesów emisji spalin w warunkach eksploatacji trakcyjnej silników spalinowych. *Prace Naukowe. Seria „Mechanika”* z. 173. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 1999.

9. Chłopek Z, Piaseczny L. Remarks about the modelling in science researches. *Eksplatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2001; 11(4): 47–57.
10. Chłopek Z. Some remarks on engine testing in dynamic states. *Silniki Spalinowe – Combustion Engines* 2010; 143(4): 60–72.
11. Daw C S, Kennel M B, Finney C E A, Connolly F T. Observing and modeling nonlinear dynamics in an internal combustion engine. *Physical Review E* 1998; 57(3): 2811–2819.
12. Guzzella L, Onder Ch. Introduction to modeling and control of internal combustion engine systems. Springer Verlag. 2nd ed., 2010.
13. Kniaziewicz T, Piaseczny L, Zdraż R. Toksyczność spalin okrętowego silnika spalinowego podczas jego rozruchu. *Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej* 1999; 2: 51–63.
14. Ma H, Xu H M, Wang J H. Real-time control oriented HCCI engine cycle-to-cycle dynamic modelling. *International Journal of Automation and Computing* 2011; 8(3): 317–325.
15. Merkisz J, Lijewski P, Fuć P, Weymann S. Exhaust emission tests from non-road vehicles conducted with the use of PEMS analyzers. *Eksplatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2013; 15(4): 364–368.
16. Merkisz J, Gis W. Exhaust emission from vehicles under real conditions. Proceedings of the Ninth Asia–Pacific International Symposium on Combustion and Energy Utilization. APISCEU. Beijing, 2008.
17. Piltan F, Sulaiman N, Talooki I A, Ferdosali P. Control of IC engine: design a novel MIMO fuzzy backstepping adaptive based fuzzy estimator variable structure control. *International Journal of Robotics and Automation* 2011; 2(5): 360–380.
18. Quintero H F, Romero C A, Vanegas Useche L V. Thermodynamic and dynamic analysis of an internal combustion engine with a noncircular-gear based modified crank-slider mechanism. 12th IFToMM World Congress, Besançon (France), June 18–21, 2007: 1–6.
19. Romaniszyn K, Nowak A. Analiza wpływu parametrów ruchu pojazdu na zużycie paliwa i emisję zanieczyszczeń przy przejeździe przez Bielsko-Białą. *Zeszyty Naukowe OBRSM BOSMAL* 2004; 23(1): 43–49.
20. Savitzky A, Golay M J E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Analytical Chemistry* 1964; 36: 1627–1639.
21. Wang J, Storey J, Domingo N, Huff S, Thomas J, West B. Studies of diesel engine particle emissions during transient operations using an engine exhaust particle size. *Aerosol Science and Technology* 2006; 40(11): 1002–1015.
22. Wang Z-s, Liu D-g, Xu Ch-s. The dynamic modelling and simulation for air supplying mechanism of internal combustion engine based on Bond graph. *Intelligent System Design and Engineering Application* 2010;. 2: 647–650.
23. Wendeker M, Godula A. Research on variability in control parameters for spark ignition engines in real-life operation. *Eksplatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2002; 16(4): 12–23.
24. Whitelaw J H W, Payri F, Desantes J M. Thermo- and fluid-dynamic processes in diesel engines. Springer 2002.
25. Worldwide emission standards. Heavy duty & off-road vehicles. Delphi. Innovation for the real world. 2013/2014.
26. Worldwide emission standards. Passenger cars and light duty vehicles. Delphi. Innovation for the real Word. 2014/2015.