

## Zero-dimensional characteristics of driving tests for modeling emission from automotive internal combustion engines

# Zerowymiarowe charakterystyki testów jezdnych do celów modelowania emisji zanieczyszczeń z samochodowych silników spalinowych



DOI: 10.15199/62.2024.12.13

Studies on zero-dimensional characteristics of the velocity processes of driving tests used in vehicle testing due to the emission of pollutants were carried out. The parameters taken into account included the av. velocity, median velocity, the av. value of the absolute value of the product of the velocity and acceleration and the av. value of the product of velocity and positive acceleration. Studies on zero-dimensional characteristics were conducted for selected driving tests used in the United States of America. The most effective zero-dimensional characteristics of the vehicle velocity process, which can be used in the development of pollutant emission characteristics, were: the av. velocity and the av. value of the absolute value of the product of the velocity and acceleration (or the av. value of the product of velocity and positive acceleration).

**Keywords:** motor vehicles, driving tests, zero-dimensional characteristics

Przeprowadzono badania zerowymiarowych charakterystyk procesów prędkości testów jezdnych stosowanych w badaniach samochodów ze względu na emisję zanieczyszczeń. Pod uwagę wzięto takie parametry, jak wartość średnia prędkości, mediana prędkości, wartość średnia wartości bezwzględnej iloczynu prędkości i przyspieszenia oraz wartość średnia iloczynu prędkości i przyspieszenia dodatniego. Badania zerowymiarowych charakterystyk przeprowadzono dla wybranych testów jezdnych stosowanych w Stanach Zjednoczonych Ameryki. W wyniku przeprowadzonych rozważań stwierdzono, że najskuteczniejszymi zerowymiarowymi charakterystykami procesu prędkości samochodu, które można wykorzystać do opracowania charakterystyki emisji zanieczyszczeń są: wartość średnia prędkości oraz wartość średnia wartości bezwzględnej iloczynu prędkości i przyspieszenia (lub wartość średnia iloczynu prędkości i przyspieszenia dodatniego).

**Słowa kluczowe:** samochody, testy jezdne, charakterystyki zerowymiarowe

Do modelowania emisji zanieczyszczeń z samochodowych silników spalinowych konieczna jest znajomość charakterystyk emisji zanieczyszczeń w przyjętych warunkach ruchu samochodów<sup>1, 2</sup>. Emisja zanieczyszczeń, podobnie jak i inne właściwości użytkowe silnika spalinowego, jest zależna od stanów pracy silnika określonych stanem cieplnym silnika i intensywnością jego pracy<sup>2, 3</sup>. Stan cieplny jest określony zbiorem temperatur części silnika i jego materiałów eksploatacyjnych, przede wszystkim cieczy chłodzącej

i oleju silnikowego<sup>2, 3</sup>. Miarą intensywności pracy silnika jest jego moc użyteczna. Intensywność użytkowania silnika jest zdeterminowana jego prędkością obrotową oraz obciążeniem, którego miarą jest zazwyczaj moment obrotowy. Przy ustabilizowanym stanie cieplnym silnika w zastosowaniach samochodowych stan pracy silnika jest zdeterminowany procesem prędkości pojazdu<sup>2, 3</sup>. Z tego powodu właściwości użytkowe samochodów, w tym emisję zanieczyszczeń, bada się w testach jezdnych, symulujących rzeczywiste warunki



Prof. dr hab. inż. Zdzisław CHŁOPEK (ORCID: 0000-0002-3499-2533) w roku 1974 ukończył studia na Wydziale Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej. W 1983 r. uzyskał stopień doktora nauk technicznych, a w 2000 r. stopień doktora habilitowanego. W 2012 r. otrzymał tytuł naukowy profesora. Obecnie jest zatrudniony w Instytucie Ochrony Środowiska – Państwowym Instytucie Badawczym w Warszawie. Specjalność – inżynieria mechaniczna oraz inżynieria lądowa, geodezja i transport.



Dr inż. Jakub LASOCKI (ORCID: 0000-0002-7157-6758) ukończył studia na Wydziale Chemicznym oraz na Wydziale Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej. Na drugim z tych wydziałów w 2015 r. uzyskał stopień doktora nauk technicznych. Jest adiunktem w Instytucie Pojazdów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej. Specjalność – silniki spalinowe.

**\* Adres do korespondencji:**

Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych, Politechnika Warszawska, ul. Ludwika Narbutta 84, 02-524 Warszawa, tel.: (22) 234-87-80, e-mail: jakub.lasocki@pw.edu.pl

użytkowania pojazdu<sup>4, 5</sup>). W warunkach dynamicznych właściwości użytkowe silnika spalinowego zależne są od stanu jego pracy w sposób operatorowy, a nie funkcyjny (w sensie funkcji o wartościach liczbowych), jak ma to miejsce w przypadku statycznych warunków pracy silnika<sup>2, 3</sup>). Skoro w warunkach dynamicznych emisja zanieczyszczeń zależy od procesu prędkości w sposób operatorowy, to zależność funkcyjną emisji zanieczyszczeń można postulować jedynie od zerowymiarowych charakterystyk procesu prędkości<sup>2, 3</sup>). W dotychczasowej praktyce zazwyczaj przyjmuje się taką charakterystykę jako wartość średnią prędkości<sup>1, 2</sup>). Rozpatruje się również wartość średnią wartości bezwzględnej iloczynu prędkości i przyspieszenia<sup>1, 2</sup>).

W literaturze jest praktycznie brak rozważań na temat zerowymiarowych charakterystyk prędkości testów jezdnych do celów modelowania emisji zanieczyszczeń oprócz aspektów praktycznych. W związku z tym celem pracy była analiza zerowymiarowych charakterystyk procesów prędkości testów jezdnych stosowanych do badań samochodów ze względu na emisję zanieczyszczeń.

## Część doświadczalna

### Metodyka badań

Wykorzystano testy stosowane w USA do badań samochodów osobowych ze względu na emisję zanieczyszczeń oraz zużycie paliwa i zużycie energii: FTP-75, US06, SC03, HWFET, IM240, LA-92 i ST01<sup>4, 5</sup>), a także testy specjalne do symulacji szczególnych warunków ruchu samochodów osobowych: test Stop and Go do symulacji ruchu samochodów w zatorach ulicznych<sup>1</sup>) oraz test Autobahn do symulacji ruchu samochodów na autostradach i drogach ekspresowych<sup>1</sup>). Wspólną cechą tych testów jest to, że zostały one opracowane zgodnie z zasadą wiernej symulacji w dziedzinie czasu<sup>2</sup>). Dobór testów do badań został przeprowadzony wg kryterium znacznego zróżnicowania właściwości procesów prędkości w testach.

Jako zerowymiarowe charakterystyki procesów prędkości, dla których są reprezentatywne testy jezdne, rozpatrywano następujące wielkości: (i) wartość średnia prędkości  $v$  (oznaczenie AV[ $v$ ]), (ii) mediana prędkości (M[ $v$ ]), (iii) wartość średnia wartości bezwzględnej iloczynu prędkości i przyspieszenia  $a$  (AV[Mod[ $v \cdot a$ ]]), (iv) wartość średnia iloczynu prędkości i przyspieszenia dodatniego  $a(+)$  (AV[ $v \cdot a(+)$ ]), (v) wartość średnia wartości bezwzględnej przyspieszenia (AV[Mod[ $a$ ]]) i (vi) wartość średnia przyspieszenia dodatniego (AV[ $a(+)$ ]).

W literaturze rozpatrywane jest zastosowanie do celów modelowania emisji zanieczyszczeń jako zerowymiarowych charakterystyk wartości średniej prędkości oraz wartości średniej wartości bezwzględnej iloczynu prędkości i przyspieszenia<sup>1, 2</sup>). Wartość średnią iloczynu wartości bezwzględnej iloczynu prędkości i przyspieszenia można interpretować jako miarę mocy użytecznej silnika przypadającą na jednostkę masy pojazdu.

Zbadano również zależność wartości średniej wartości bezwzględnej iloczynu prędkości i przyspieszenia oraz wartości średniej prędkości w pseudoprzypadkowych realizacjach fragmentów testów FTP-75 i LA-92. Do wyznaczania pseudoprzypadkowych realizacji fragmentów testów zastosowano metodę Monte Carlo<sup>6, 7</sup>), generując pseudoprzypadkowe liczby wykorzystywane do definiowania początku i końca realizacji.

### Wyniki badań

W badaniach procesu prędkości wzięto pod uwagę, oprócz wartości średniej, również medianę. Wynikało to ze znacznej niekiedy niesymetryczności rozkładów rozpatrywanych procesów prędkości, a jest wiadome, że dla rozkładów niesymetrycznych bardziej reprezentatywną miarą jest mediana zamiast wartości średniej<sup>8</sup>). Współczynnik skośności dla rozkładów prędkości w testach był zawarty w granicach -2,20–4,22. Jedynie rozkład prędkości w teście SC03 był symetryczny, współczynnik skośności wynosił 0,01. Rozkłady prędkości w rozpatrywanych testach również znacznie różniły się miarą spłaszczenia. Kurtოza była w zakresie -1,08–58,53. Większość procesów prędkości miała rozkłady platokurtyczne, jedynie dla testów HWFET, a w szczególności dla Stop and Go, rozkłady były leptokurtyczne.

Badaniom poddano związki między charakterystykami zerowymiarowymi rozpatrywanych procesów prędkości samochodu w testach jezdnych. Wybrane wyniki w postaci wykresów przedstawiono na rys. 1.

Na rys. 1a przedstawiono związek mediany z wartością średnią prędkości w testach. Wartość średnia prędkości była we wszystkich testach silnie skorelowana z medianą prędkości. Współczynnik korelacji liniowej Pearsona<sup>9</sup>) wynosił 0,981, a prawdopodobieństwo nieodrzućenia hipotezy o braku korelacji liniowej było mniejsze od 0,01. Oznacza to, że jako reprezentatywną charakterystykę procesu prędkości samochodu można wykorzystywać zamiennie zarówno wartość średnią prędkości, jak i medianę. W praktyce<sup>1, 2</sup>) w modelowaniu emisji zanieczyszczeń wykorzystywana jest wartość średnia prędkości.

Na rys. 1b przedstawiono związek wartości średniej wartości bezwzględnej iloczynu prędkości i przyspieszenia oraz wartości średniej iloczynu prędkości i przyspieszenia dodatniego z wartością średnią prędkości w rozpatrywanych testach. Badane zbiory należy ocenić jako słabo skorelowane. Współczynnik korelacji liniowej Pearsona w obydwu przypadkach wynosił ok. 0,54, a prawdopodobieństwo nieodrzućenia hipotezy o braku korelacji liniowej wynosiło ok. 0,11.

W celu porównania dwóch zerowymiarowych charakterystyk wartości średniej iloczynu prędkości i przyspieszenia dodatniego oraz wartości średniej wartości bezwzględnej iloczynu prędkości i przyspieszenia zbadano ich związek (rys. 1c). Wartość średnia iloczynu prędkości i przyspieszenia dodatniego była we wszystkich testach silnie skorelowana z wartością średnią wartości

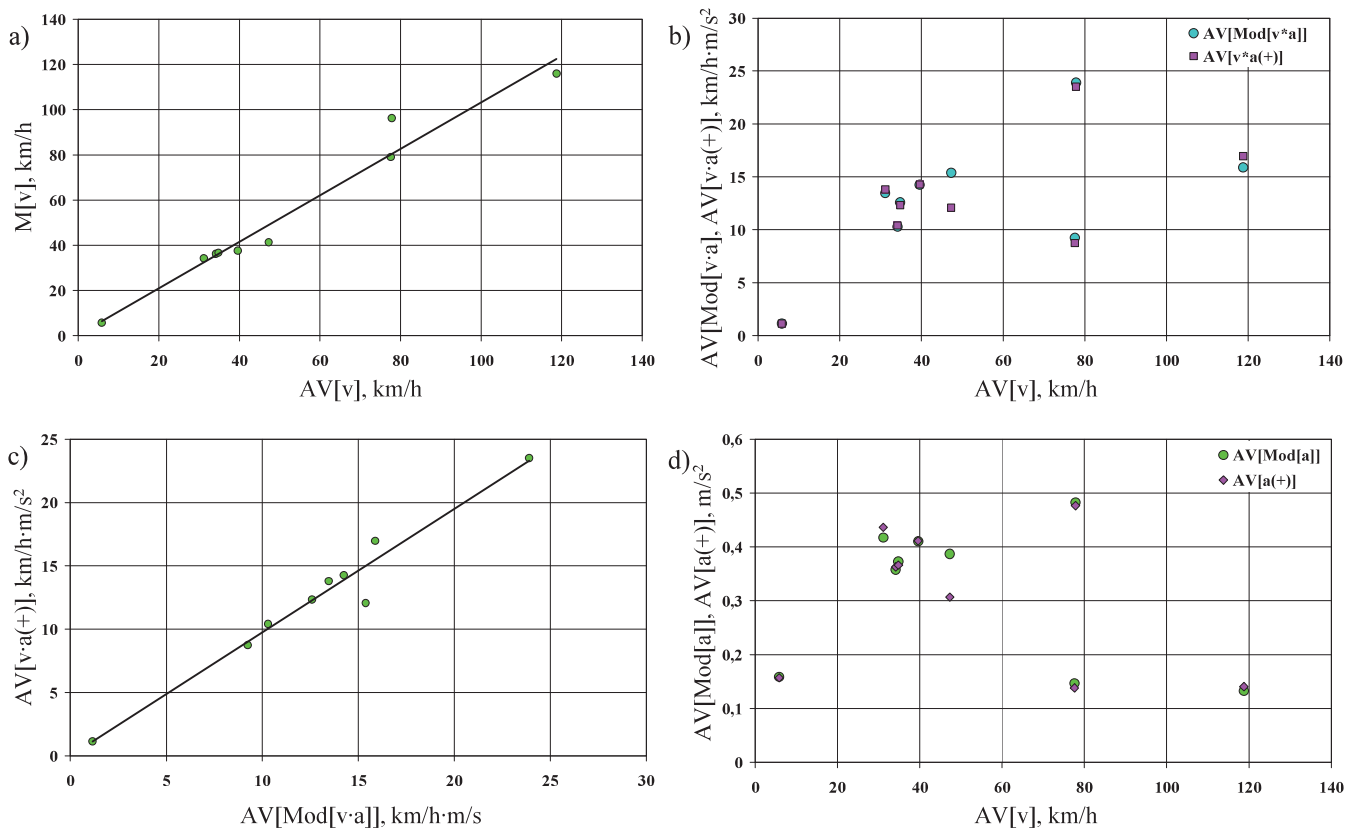


Fig. 1. Relationships between zero-dimensional characteristics of the considered velocity processes: a) median with the average value of velocity, b) average value of the absolute value of the product of velocity and acceleration and the average value of the product of velocity and positive acceleration with the average value of velocity, c) average value of the product of velocity and positive acceleration with the average value of the absolute value of the product of velocity and acceleration, d) average value of the absolute value of acceleration and the average value of positive acceleration with the average value of velocity (designations explained in the text)

Rys. 1. Związki między charakterystykami zerowymiarowymi rozpatrywanych procesów prędkości; a) mediany z wartością średnią prędkości, b) wartości średniej wartości bezwzględnej iloczynu prędkości i przyspieszenia oraz wartości średniej iloczynu prędkości i przyspieszenia dodatniego z wartością średnią prędkości, c) wartości średniej iloczynu prędkości i przyspieszenia dodatniego z wartością średnią wartości bezwzględnej iloczynu prędkości i przyspieszenia, d) wartości średniej wartości bezwzględnej przyspieszenia oraz wartości średniej przyspieszenia dodatniego z wartością średnią prędkości (oznaczenia objaśniono w tekście)

bezwzględnej iloczynu prędkości i przyspieszenia. Współczynnik korelacji liniowej Pearsona wyniósł 0,980, a prawdopodobieństwo nieodrzućcia hipotezy o braku korelacji liniowej było mniejsze od 0,01. Oznacza to, że jako reprezentatywną charakterystykę procesu prędkości samochodu można wykorzystywać zamiennie zarówno wartość średnią iloczynu prędkości i przyspieszenia dodatniego, jak i wartość średnią wartości bezwzględnej iloczynu prędkości i przyspieszenia.

Na rys. 1d przedstawiono związek wartości średniej wartości bezwzględnej przyspieszenia oraz wartości średniej przyspieszenia dodatniego z wartością średnią prędkości w rozpatrywanych testach. Badane zbiory były słabo skorelowane. Współczynnik korelacji liniowej Pearsona w obydwu wypadkach wyniósł ok. -0,28, a prawdopodobieństwo nieodrzućcia hipotezy o braku korelacji liniowej wyniosło ok. 0,46.

Na rys. 2 przedstawiono zależność wartości średniej wartości bezwzględnej iloczynu prędkości

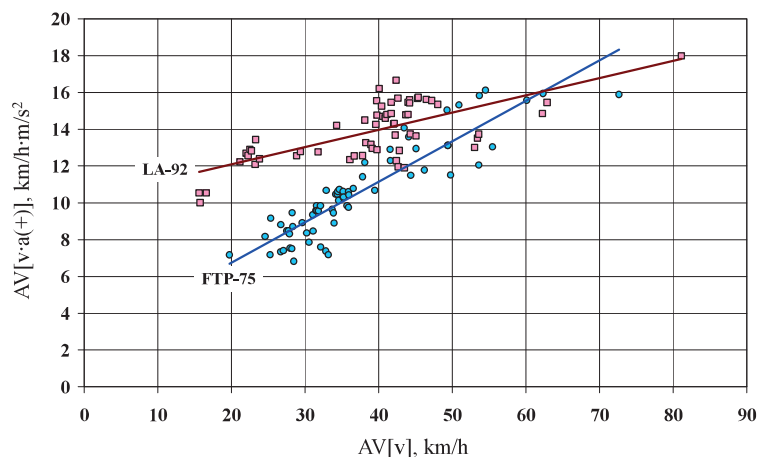


Fig. 2. Relationship between the average value of the absolute value of the product of velocity and acceleration with the average value of velocity in pseudorandom realizations of fragments of the FTP-75 and LA-92 tests (designations explained in the text)

Rys. 2. Związek wartości średniej wartości bezwzględnej iloczynu prędkości i przyspieszenia oraz wartości średniej prędkości w pseudoprzygodkowych realizacjach fragmentów testów FTP-75 i LA-92 (oznaczenia objaśniono w tekście)



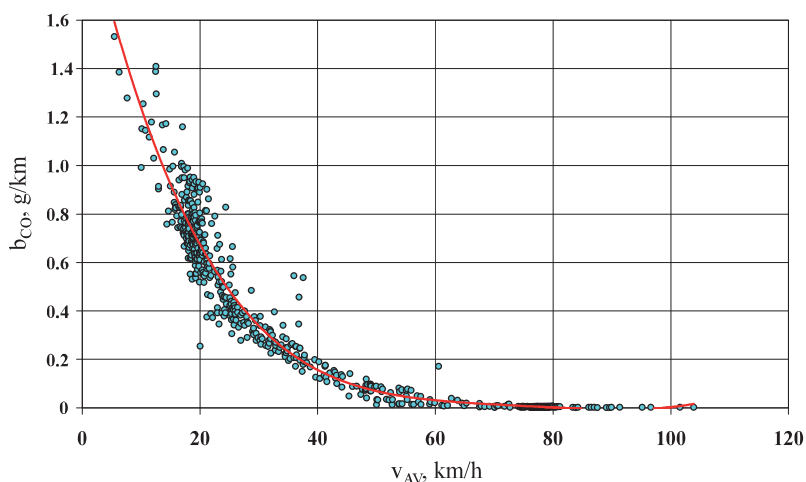


Fig. 3. Characteristics of carbon monoxide emission depending on average velocity for a light duty vehicle with a compression-ignition engine (designations explained in the text)

Rys. 3. Charakterystyka emisji drogowej tlenku węgla w zależności od prędkości średniej dla lekkiego samochodu ciężarowego z silnikiem o zapłonie samoczynnym (oznaczenia objaśniono w tekście)

i przyspieszenia oraz wartości średniej prędkości w pseudoprzypadkowych realizacjach fragmentów testów FTP-75 i LA-92 wyznaczonych metodą Monte Carlo<sup>6, 7</sup>.

Zbiory wartości średniej wartości bezwzględnej iloczynu prędkości i przyspieszenia oraz wartości średniej prędkości w pseudoprzypadkowych realizacjach fragmentów testów FTP-75 i LA-92 były ze sobą silnie skorelowane. Współczynnik korelacji liniowej Pearsona dla testu FTP-75 wynosił 0,905, a dla testu LA-92 0,693. W obydwu przypadkach prawdopodobieństwo nieodrzućcia hipotezy o braku korelacji liniowej było mniejsze od 0,01.

## Podsumowanie

Z przeprowadzonych rozważań wynika, że najskuteczniejszymi zerowymiarowymi charakterystykami procesu prędkości samochodu, które mogą być wykorzystywane w opracowywaniu charakterystyk emisji zanieczyszczeń są: wartość średnia prędkości oraz wartość średnia wartości bezwzględnej iloczynu prędkości i przyspieszenia (lub wartość średnia iloczynu prędkości i przyspieszenia dodatniego). W praktyce trudno jest tworzyć charakterystyki dwuwymiarowe emisji zanieczyszczeń, przykłady takich charakterystyk, tworzone jednak do celów poznawczych, a nie praktycznych, są zawarte m.in. w publikacji<sup>2</sup>. To,

że charakterystyki jednowymiarowe mogą się znacznie różnić w zależności od innych właściwości, niż te, które są określone przez wykorzystaną zmienną niezależną, można zaobserwować na charakterystykach wyznaczonych dla pseudoprzypadkowych procesów wygenerowanych z zastosowaniem metody Monte Carlo<sup>6, 7</sup> na podstawie wyników badań samochodu na hamowni podwozowej<sup>10</sup> w homologacyjnym teście jezdnym NEDC<sup>4, 5</sup> (rys. 3).

Na charakterystyce wyraźnie widać, że dla tej samej prędkości średniej wartości emisji drogowej tlenku węgla mogą znacznie się różnić. Odpowiada to oczywiście różnym właściwościom realizacji procesów, dla których wyznaczono wartość emisji drogowej zanieczyszczenia. Mimo to wydaje się, że praktycznym wnioskiem z przeprowadzonych rozważań jest, przy świadomości istniejących ograniczeń, stosowanie do opracowywania charakterystyk

emisji zanieczyszczeń jako zmiennej niezależnej wartości średniej prędkości samochodu. Wnioski z rozważań przedstawionych w pracy znajdują zastosowanie również w stosunku do innych właściwości użytkowych w warunkach ruchu samochodu, np. zużycia paliwa i zużycia energii.

Otrzymano: 08-10-2024

Zrecenzowano: 25-11-2024

Zaakceptowano: 30-11-2024

Opublikowano: 20-12-2024

## LITERATURA

- [1] BUWAL, INFRAS AG, *Luftschadstoffemissionen des Strassenverkehrs 1950–2010*, BUWAL-Bericht nr. 255, Berno 1995.
- [2] Z. Chłopek, *Modelowanie procesów emisji spalin w warunkach eksploatacji trakcyjnej silników spalinowych*, Prace Naukowe, Seria „Mechanika”, nr 173, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1999.
- [3] Z. Chłopek, *Combust. Engines* 2010, **143**, nr 4, 60.
- [4] <https://www.dieselnet.com>, dostęp 25 września 2024 r.
- [5] B. Warner, *Worldwide emission standards 2022/2023. Passenger cars and light duty vehicles*, Prospekt firmowy.
- [6] Z. Chłopek, *Ekspluat. Niezawodn.* 2009, **43**, nr 3, 38.
- [7] N. Metropolis, S. Ulam, *J. Am. Statist. Assoc.* 1949, **44**, nr 247, 335.
- [8] M. Fisz, *Probability theory and mathematical statistics*, Wiley, New York 1963.
- [9] K. Pearson, *On the theory of contingency and its relation to association and normal correlation*, Dulau and Co., Londyn 1904.
- [10] Z. Chłopek, P. Laskowski, *Ekspluat. Niezawodn.* 2009, **42**, nr 2, 42.