

NIEPOWTARZALNOŚĆ EMISJI ZANIECZYSZCZEŃ W WARUNKACH SYMULUJĄCYCH RUCH SAMOCHODU OSOBOWEGO W MIASTACH

Streszczenie

W związku z ograniczoną określonością stanów pracy silników spalinowych użytkowanych w samochodach powoduje, że jest celowe traktowanie właściwości użytkowych silników jako wielkości przypadkowych. W artykule przedstawiono wyniki badań empirycznych emisji zanieczyszczeń i zużycia paliwa dla samochodu użytkowanego w warunkach ruchu w miastach. Badania przeprowadzono na hamowni podwoziowej w testach jezdnych, zarówno homologacyjnych, jak i specjalnych. Jako miarę niepowtarzalności wyników badań przyjęto współczynnik zmienności wyników badań. Stwierdzono zróżnicowaną niepowtarzalność wyników badań ze względu na badane wielkości oraz ze względu na warunki ruchu samochodu.

WSTĘP

Kwalifikacja zjawisk na --+przyczynowe lub przypadkowe nie jest zależna od właściwości tych zjawisk, tylko do sposobu ich traktowania [5]. Niepełna określoność zjawisk uzasadnia traktowanie ich jako przypadkowe – powoduje to, że do opisu tych zjawisk wykorzystuje się nie procesy przyczynowe, tylko procesy stochastyczne [14]. W związku z tym wyniki empirycznych badań właściwości rzeczywistych obiektów różnią się dla różnych realizacji badań w porównywalnych warunkach pracy tych obiektów [6]. Jest celowa ocena różnic wyników tych badań. Stosuje się do tego celu badanie tzw. niepowtarzalności wyników badań. Samo pojęcie niepowtarzalności może okazać się dyskusyjne. W istocie jest rozpatrywany problem zróżnicowania (rozproszenia) elementów zbioru, nazywanego w statystyce zmiennością [11]. Właściwości te są zazwyczaj interpretowane jako miara rozkładu wartości elementów zbioru względem wartości średniej lub mediany. W literaturze specjalistycznej związanej z miernictwem jest przyjęty do tego celu termin „niepowtarzalność” [7, 8].

Wielkością względną, która jest możliwa do oceny niepowtarzalności elementów zbioru, jest współczynnik zmienności [11]:

$$W = \frac{D}{|AV|} \quad (1)$$

gdzie: D – odchylenie standardowe,
 AV – wartość średnia.

Ponieważ ta miara jest silnie obciążona wartością średnią elementów zbioru, zależną m.in. od przyjętej skali metrologicznej, w pracy [8] zaproponowano wprowadzenie pojęcia współczynnika niepowtarzalności w postaci:

$$WNR = \frac{D}{|AV - RV|} \quad (2)$$

gdzie RV jest wartością odniesienia, przyjmowaną dla badanych procesów w sposób arbitralny przez badacza na podstawie wiedzy o rozpatrywanych zjawiskach. Oczywiście dla wartości odniesienia równej zeru współczynnik niepowtarzalności jest równy współczynnikowi zmienności.

Do oceny niepowtarzalności można również wykorzystywać inne miary zróżnicowania elementów zbioru, np. rozstęp ćwiart-

kowy, szczególnie w wypadku zbiorów o rozkładach wyraźnie niesymetrycznych [11].

Badania niepowtarzalności właściwości silników spalinowych są prowadzone ze względu na różne cele, przykładowo w pracach [6–9, 12, 15–18]. W pracy [9] przedstawiono wyniki badań empirycznych emisji zanieczyszczeń i zużycia paliwa dla silnika o zapłonie iskrowym zasilanego gazem ziemnym. Stwierdzono dużą niepowtarzalność wyników badań emisji tlenu węgla, węglowodorów i tlenków azotu, znacznie zwiększającą się dla pracy silnika na mieszanekach ubogich. W pracy [12] badano niepowtarzalność wskaźników charakteryzujących proces ciśnienia indykowanego w cylindrze silnika spalinowego w czasie jego przyspieszania. W pracy [16] badania niepowtarzalności wyników badań empirycznych zostały wykorzystane do optymalizacji algorytmów sterowania silników spalinowych. W instytucie AVL w Grazu są prowadzone prace [15, 17, 18] dotyczące niepowtarzalności procesu spalania w cylindrach silnika i jego wpływu na właściwości silników, m.in. na zużycie paliwa i – w konsekwencji – na emisję dwutlenku węgla. Praca [6] dotyczy modelowania procesów emisji zanieczyszczeń z silników spalinowych. W pracy potraktowano procesy emisji jako procesy stochastyczne i przeanalizowano charakterystyki probabilistyczne tych procesów. W pracy [7] przedstawiono wyniki badań emisji drogowej zanieczyszczeń z silnika samochodu w warunkach pracy w homologacyjnym teście jezdnym NEDC (New European Driving Cycle – nowy europejski test jezdny) [20], realizowanym z rozruchem nagrzanego silnika. W pracy [8] analizowano niepowtarzalność emisji jednostkowej zanieczyszczeń z silnika o zapłonie samoczynnym w homologacyjnych dynamicznych testach jezdnych [19]: europejskim – ETC (European Transient Cycle – europejski test przejściowy) i amerykańskim HDDTT (Heavy Duty Diesel Transient Test – test przejściowy ciężkich silników o zapłonie samoczynnym).

W niniejszym artykule przedmiotem rozważań jest niepowtarzalność wyników badań emisji drogowej zanieczyszczeń oraz zużycia paliwa dla silnika samochodu osobowego badanego w testach jezdnych. Dla emisji zanieczyszczeń oraz dla zużycia paliwa wartość odniesienia jest równa zeru. W związku z tym jako współczynnik niepowtarzalności może być traktowany współczynnik zmienności.

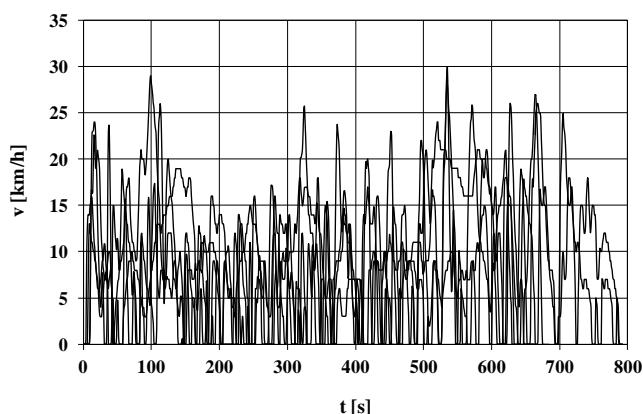
1. PRZEDMIOT I WARUNKI BADAŃ

Przedmiotem badań był samochód osobowy Honda Civic EJ9 z silnikiem o zapłonie iskrowym o objętości skokowej 1396 cm³, spełniający wymagania emisji zanieczyszczeń na poziomie Euro 3. Badania samochodu prowadzono w stanie silnika spalinowego narzanej do ustabilizowanej temperatury.

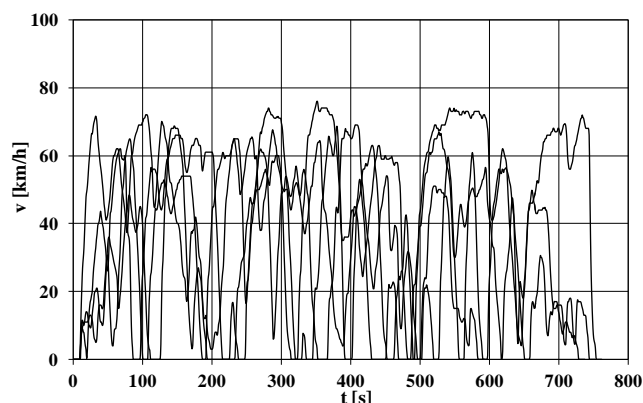
Badania samochodu zostały przeprowadzone na stanowisku hamowni podwozowej Schenk Komeg EMDY 48 z systemem Horiba Mexa 7200, wyposażonym w analizatory Horiba do pomiarów stężeń: tlenku węgla (AIA-721A), węglowodorów (FIA-725A), tlenków azotu (CLA-755A), dwutlenku węgla (AIA-722) i tlenu (MPA-720).

Badania samochodu były prowadzone w warunkach specjalnych testów jezdnych, opracowanych w ramach realizacji pracy [4]. Dla opracowanych testów jest znamienne oryginalne, odmienne od powszechnie stosowanych procedur, podejście do syntezy tych testów. Do badań właściwości samochodów w warunkach jezdnych stosuje się testy będące przyczynowymi funkcjami czasu. Tak jest w testach stosowanych w procedurach homologacyjnych [20], a także w innych testach specjalnych, opracowanych do symulacji rzeczywistych warunków jazdy samochodów, m.in. w warunkach zatorów ulicznych – test Stop and Go [2], czy na autostradach i drogach ekspresowych – test Autobahn [2]. Podobnie liczne testy jezdne, m.in. opracowane w ramach realizacji programu europejskiego Artemis (Common Artemis Driving Cycles – wspólne testy jezdne Artemis) [1, 10], czy w instytucie INRETS (Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité – Narodowy Instytut Transportu i Bezpieczeństwa) [13] mają charakter przyczynowy. W pracach [3, 4] potraktowano proces prędkości samochodu osobowego w porównywalnych warunkach ruchu jako proces stochastyczny. Porównywalne warunki ruchu samochodu obejmują ruch: w zatorach ulicznych, w miastach (z wyłączeniem zatorów ulicznych), poza miastami oraz na autostradach i drogach ekspresowych. Na podstawie wyników badań empirycznych ruchu samochodu w poszczególnych rodzajach warunków opracowano zgodnie z zasadą wierniej symulacji w dziedzinie czasu testy jezdne w postaci przebiegów prędkości, będące realizacjami procesów stochastycznych prędkości, modelujących ruch samochodów w rozpatrywanych warunkach. Na rysunkach 1–4 przedstawiono opracowane testy – po cztery realizacje dla każdego procesu stochastycznego:

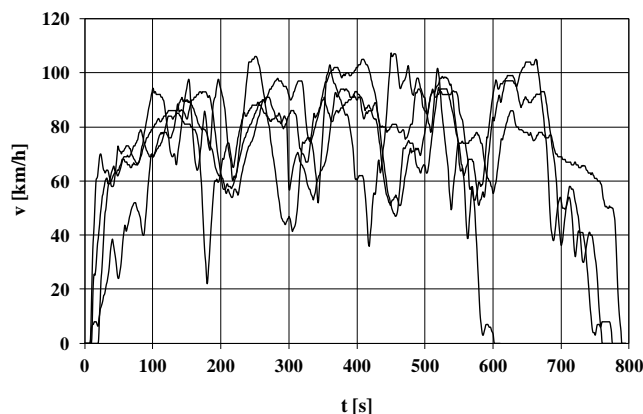
- CT – ruch w zatorach ulicznych,
- UT – ruch w miastach (z wyłączeniem zatorów ulicznych),
- RT – ruch poza miastami,
- HT – ruch na autostradach i drogach ekspresowych.



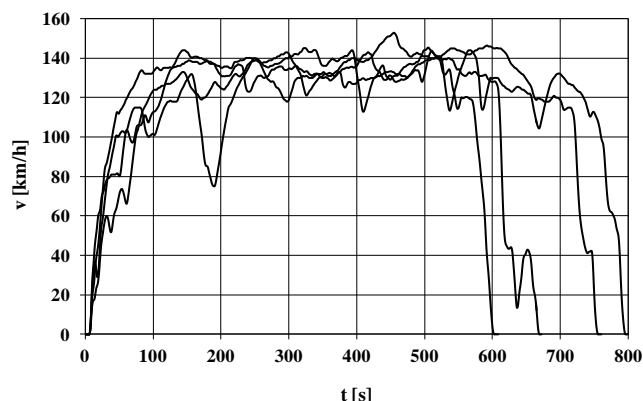
Rys. 1. Przebiegi prędkości – v w testach jazdy w zatorach ulicznych – CT



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



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

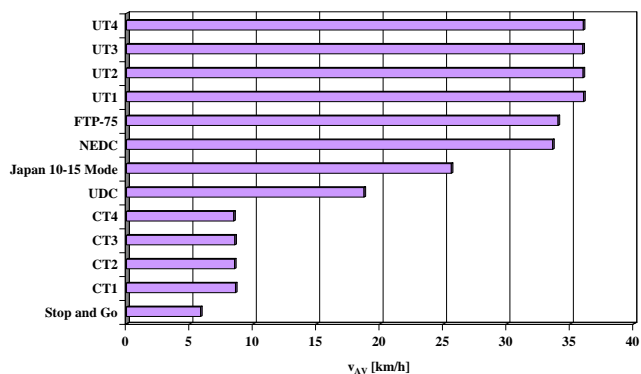


Rys. 4. Przebiegi prędkości – v w testach jazdy na autostradach i drogach ekspresowych – HT

Do badań emisji zanieczyszczeń w warunkach symulujących ruch samochodu osobowego w miastach wybrano testy:

- UDC (Urban Driving Cycle – miejski test jezdny), stanowiący część europejskiego testu homologacyjnego NEDC,
- NEDC – europejski test homologacyjny,
- Japan 10-15 Mode [20] – japoński test homologacyjny,
- FTP-75 (Federal Test Procedure – federalna procedura badawcza) [20] – amerykański federalny test homologacyjny,
- Stop and Go – test do symulacji ruchu w zatorach ulicznych,
- UT1, UT2, UT3 i UT4 – realizacje testu do symulacji ruchu w miastach (bez zatorów ulicznych),
- CT1, CT2, CT3 i CT4 – realizacje testu do symulacji ruchu w zatorach ulicznych.

Na rysunku 5 przedstawiono prędkość średnią w realizowanych testach.

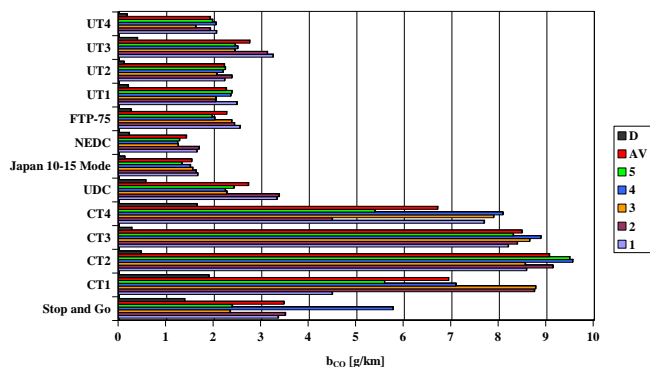


Rys. 5. Prędkość średnia – v_{AV} w realizowanych testach

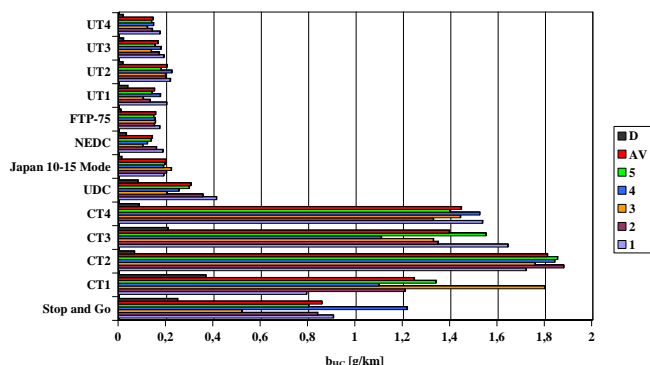
Badania samochodu w każdym z testów były wykonywane pięciokrotnie.

2. WYNIKI BADAŃ

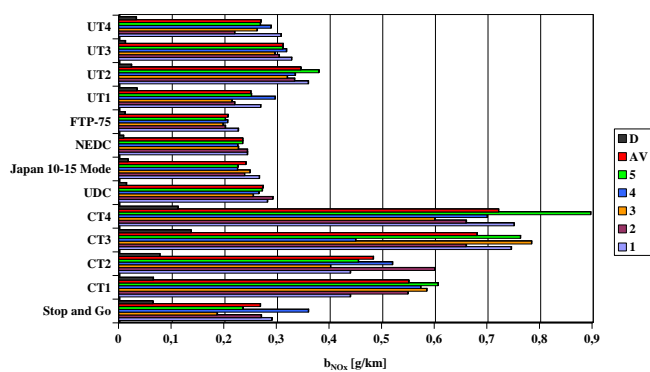
Na rysunkach 6–10 przedstawiono emisję drogową zanieczyszczeń i eksploatacyjne zużycie paliwa dla każdej z prób testów oraz wartość średnią i średnie odchylenie standardowe dla zbiorów z każdego testu.



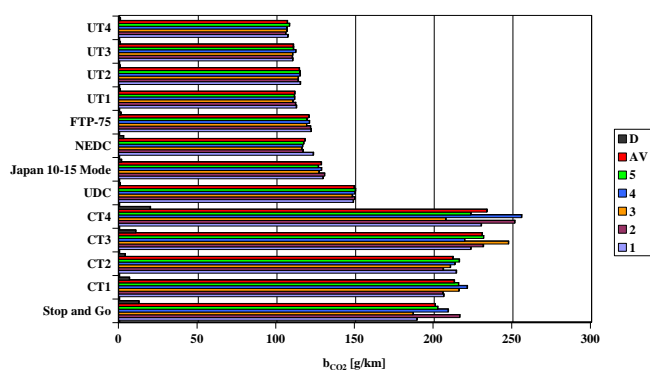
Rys. 6. Emisja drogową tlenku węgla – b_{CO} dla każdej z prób testów oraz wartość średnia – AV i średnie odchylenie standardowe – D dla zbiorów z każdego testu



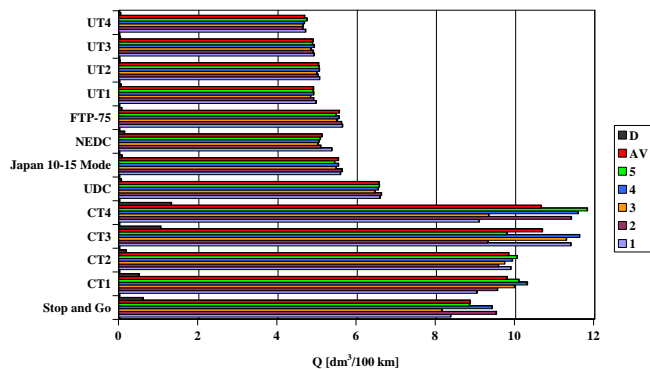
Rys. 7. Emisja drogową węglowodorów – b_{HC} dla każdej z prób testów oraz wartość średnia – AV i średnie odchylenie standardowe – D dla zbiorów z każdego testu



Rys. 8. Emisja drogową tlenków azotu – b_{NOx} dla każdej z prób testów oraz wartość średnia – AV i średnie odchylenie standardowe – D dla zbiorów z każdego testu



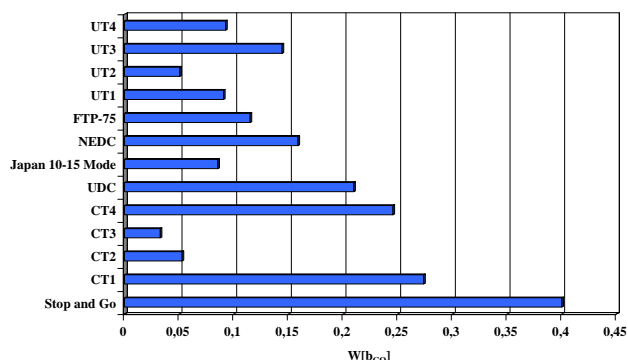
Rys. 9. Emisja drogową dwutlenku węgla – b_{CO2} dla każdej z prób testów oraz wartość średnia – AV i średnie odchylenie standardowe – D dla zbiorów z każdego testu



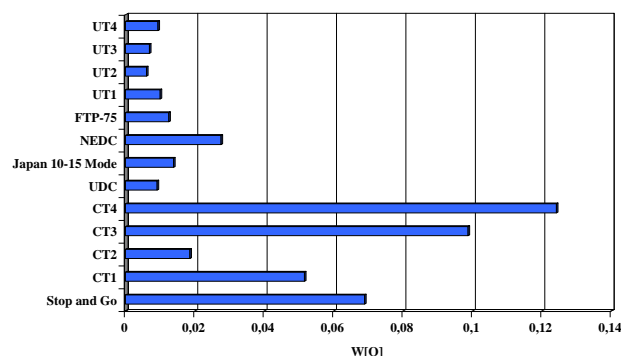
Rys. 10. Eksploatacyjne zużycie paliwa – Q dla każdej z prób testów oraz wartość średnia – AV i średnie odchylenie standardowe – D dla zbiorów z każdego testu

Widoczne są znaczne różnice wartości poszczególnych wielkości dla każdego testu. Charakterystyczne są znaczne różnice wartości wyznaczanych wielkości dla poszczególnych realizacji testu do symulacji ruchu samochodów w miastach i – szczególnie wyraźnie – dla testu dla zatorów ulicznych. Dla testu CT nawet dla emisji drogowej dwutlenku węgla i dla eksploatacyjnego zużycia paliwa występują duże różnice w poszczególnych realizacjach testów.

Na rysunkach 11–15 przedstawiono współczynnik zmienności emisji drogowej zanieczyszczeń i eksploatacyjnego zużycia paliwa dla każdego z testów.

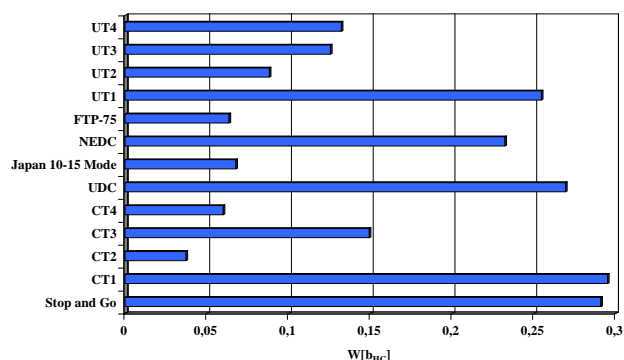


Rys. 11. Współczynnik zmienności emisji drogowej tlenku węgla – $W[b_{CO}]$ dla każdego z testów

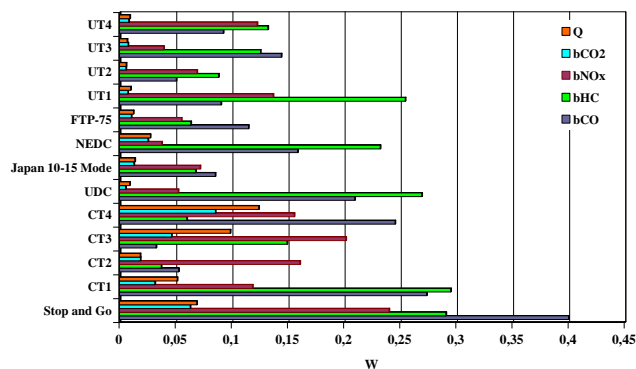


Rys. 15. Współczynnik zmienności eksploatacyjnego zużycia paliwa – $W[Q]$ dla każdego z testów

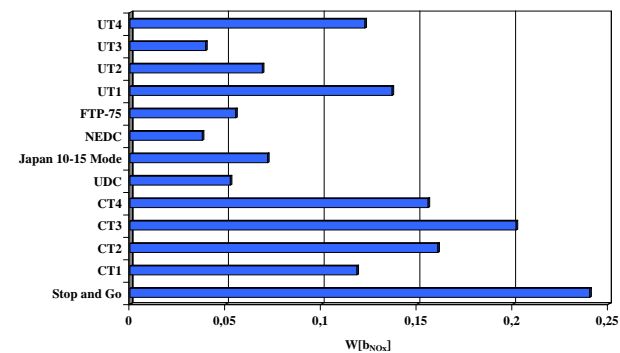
Na rysunkach 16 i 17 przedstawiono w sposób zbiorczy współczynniki zmienności emisji drogowej zanieczyszczeń i eksploatacyjnego zużycia paliwa dla każdego z testów.



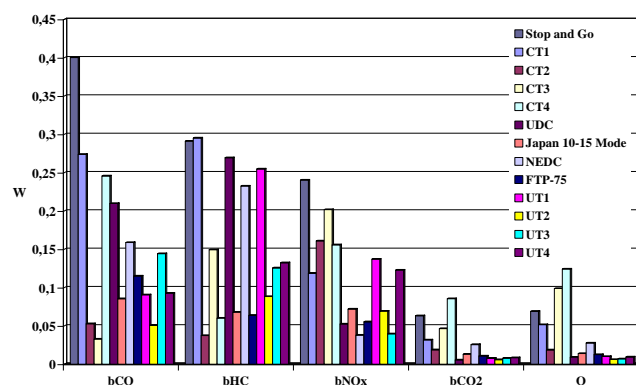
Rys. 12. Współczynnik zmienności emisji drogowej węglowodorów – $W[b_{HC}]$ dla każdego z testów



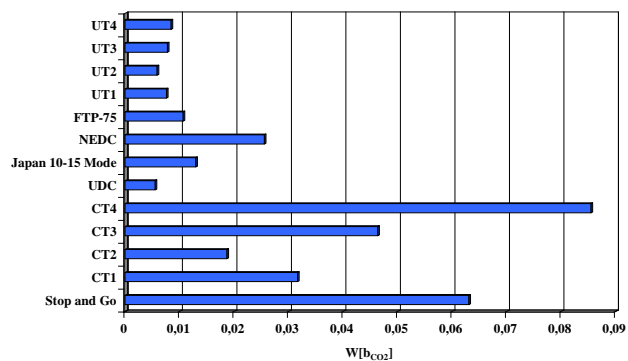
Rys. 16. Współczynnik zmienności – W emisji drogowej zanieczyszczeń i eksploatacyjnego zużycia paliwa dla każdego z testów



Rys. 13. Współczynnik zmienności emisji drogowej tlenków azotu – $W[b_{NOx}]$ dla każdego z testów



Rys. 17. Współczynnik zmienności – W emisji drogowej zanieczyszczeń i eksploatacyjnego zużycia paliwa dla każdego z testów

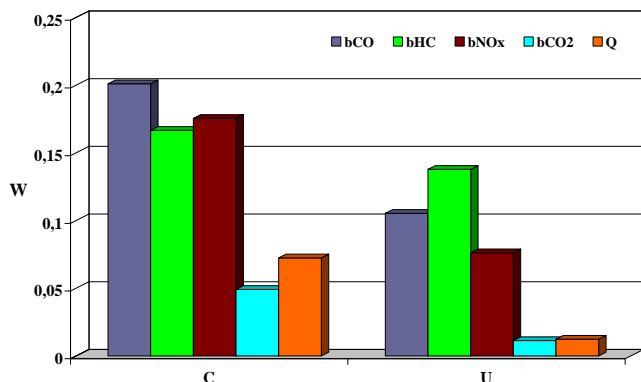


Rys. 14. Współczynnik zmienności emisji drogowej dwutlenku węgla – $W[b_{CO2}]$ dla każdego z testów

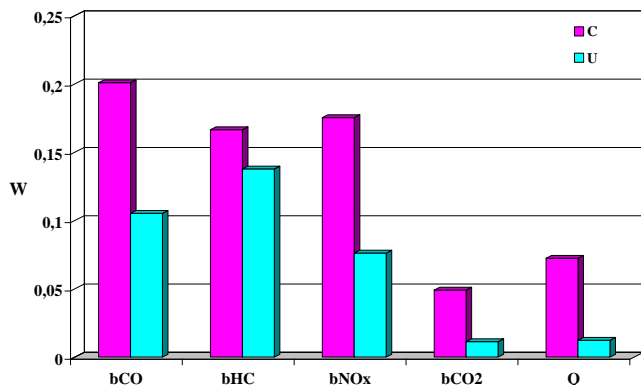
W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że największa niepewtarzalność jest dla emisji drogowej tlenku węgla i węglowodorów, natomiast najmniejsza dla emisji drogowej dwutlenku węgla i dla eksploatacyjnego zużycia paliwa. Największe wartości współczynnika zmienności zarówno emisji drogowej zanieczyszczeń, jak i eksploatacyjnego zużycia paliwa, są dla testów do symulacji ruchu samochodów w zatorach ulicznych, przede wszystkim dla testu Stop and Go.

Na rysunkach 18 i 19 przedstawiono współczynniki zmienności emisji drogowej zanieczyszczeń i eksploatacyjnego zużycia paliwa uśrednione dla kategorii ruchu: w zatorach ulicznych – C i w mia-

stach bez uwzględniania zatorów – U. Do kategorii ruchu w zatorach ulicznych zaliczono testy: Stop and Go oraz CT1, CT2, CT3 i CT4, a do kategorii ruchu w miastach bez zatorów: UDC, Japan 10-15 Mode, NEDC, FTP-75 oraz UT1, UT2, UT3 i UT4.



Rys. 18. Współczynniki zmienności – W emisji drogowej zanieczyszczeń i eksploatacyjnego zużycia paliwa uśrednione dla kategorii ruchu: w zatorach ulicznych – C i w miastach bez uwzględniania zatorów – U



Rys. 19. Współczynniki zmienności – W emisji drogowej zanieczyszczeń i eksploatacyjnego zużycia paliwa uśrednione dla kategorii ruchu: w zatorach ulicznych – C i w miastach bez uwzględniania zatorów – U

Stwierdzono, że znacznie większa jest niepowtarzalność zarówno emisji drogowej zanieczyszczeń, jak i eksploatacyjnego zużycia paliwa dla ruchu samochodów w zatorach ulicznych w stosunku do ruchu samochodów w miastach bez zatorów. Znaczna jest również różnica w wartościach współczynnika niepowtarzalności emisji drogowej tlenku węgla, węglowodorów i tlenków azotu oraz w wartościach współczynnika niepowtarzalności emisji drogowej dwutlenku węgla oraz eksploatacyjnego zużycia paliwa, zarówno dla ruchu w zatorach ulicznych, jak i w miastach bez zatorów.

PODSUMOWANIE

Badania emisji zanieczyszczeń i zużycia paliwa dla samochodu osobowego użytkowanego w warunkach symulujących ruch w mieście umożliwiają sformułowanie następujących wniosków:

- 1) Szczególnie duża jest wrażliwość emisji drogowej zanieczyszczeń, przede wszystkim tlenku węgla i węglowodorów, a w następnej kolejności tlenków azotu, na stany pracy silnika spalinowego, zdeterminowane procesem prędkości samochodu. Wrażliwość emisji drogowej dwutlenku węgla i eksploatacyjnego zużycia paliwa na stany pracy silnika jest znacznie mniejsza.

- 2) Również w wypadku współczynnika niepowtarzalności wyników badań jego wartość jest największa dla emisji drogowej tlenku węgla, węglowodorów i tlenków azotu i znacznie mniejsza dla emisji drogowej dwutlenku węgla oraz dla eksploatacyjnego zużycia paliwa. Prawdopodobnie tę stwierdza się zarówno dla testów do symulacji ruchu samochodów w zatorach ulicznych, jak i w miastach bez zatorów.

- 3) Znamienne jest, że nawet dla poszczególnych realizacji testów do symulacji ruchu w miastach – UT i w zatorach ulicznych – CT występuje duży współczynnik niepowtarzalności wyników badań, szczególnie wyraźnie – dla testu dla zatorów ulicznych. Dla testu CT nawet dla emisji drogowej dwutlenku węgla i dla eksploatacyjnego zużycia paliwa występują duże różnice wartości w poszczególnych realizacjach testów.

Ogólnie stwierdzono, że czynnikiem determinującym znaczną niepowtarzalność wyników badań emisji zanieczyszczeń i zużycia paliwa jest znaczna zmienność prędkości w ruchu samochodów w miastach, szczególnie w warunkach zatorów ulicznych. Badania w poszczególnych realizacjach testów do symulacji ruchu samochodów w zatorach ulicznych i w miastach bez zatorów potwierdziły celowość traktowania testów jezdnych jako procesów stochastycznych.

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.

BIBLIOGRAFIA

1. André M. et al.: The Artemis European tools for estimating the transport pollutant emissions. <http://www.epa.gov/ttnchie1/conference/ei18/session6/andre.pdf>. (2014-07-03).
2. BUWAL, INFRAS AG: Luftschadstoffemissionen des Strassenverkehrs 1950–2010. BUWAL-Bericht Nr. 255, 1995.
3. 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.
4. 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).
5. Chłopek Z., Piaseczny L.: Remarks about the modelling in science researches. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability Nr 4(11)/2001. 47–57.
6. Chłopek Z.: Modelowanie procesów emisji spalin w warunkach eksploatacji trakcyjnej silników spalinowych. Prace Naukowe. Seria „Mechanika” z. 173. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa. 1999.
7. Chłopek Z.: Testing of non-repeatability of pollution emission from motor-car engines. Silniki Spalinowe – Combustion Engines Nr 1/2004 (118). 40–51.
8. Chłopek Z.: The non-repeatability of results of the pollutant emission from an internal combustion engine. Silniki Spalinowe – Combustion Engines. (Praca w druku).
9. Cho H. M., He B.-Q.: Combustion and emission characteristics of a natural gas engine under different operating conditions. Environmental Engineering Research. 2009. Vol. 14, No. 2. 95–101.

10. Common Artemis Driving Cycles.
<https://www.dieselnet.com/standards/cycles/artemis.php>. (2014–07–03).
11. Fisz M.: Probability theory and mathematical statistics. Wiley, New York 1963.
12. Litak G., Longwic R.: Analysis of repeatability of diesel engine acceleration. Applied Thermal Engineering 2009, 29 (17–18). 3574–3578.
13. Nollet V. et al.: Elaboration d'un cadastre d'émissions de polluants primaires dans la region Nord-Pas-de-Calais. Les transports automobiles. Pollution Atmosphérique No 165 – Janvier–Mars 2000. 109–119.
14. Papoulis A., Pillai S.U.: Probability, random variables and stochastic processes. 4th edition. McGraw Hill. 2002.
15. Poetsch Ch. et al.: A computational study on the impact of cycle-to-cycle combustion fluctuations on fuel consumption and knock onset in steady-state and drive-cycle operation. SAE paper 13ICE-0037.
16. Shi Y., Ge H.-W., Reitz R.D.: Computational optimization of internal combustion engines. Springer 2011.
17. Tatschl R. et al.: A scalable simulation methodology for assessment of SI-engine performance and fuel consumption on component, subsystem and system level. Transport Research Arena 2014. Paris.
18. Vitek O. et al.: Modelling cycle-to-cycle variations in 0D/1D simulation by means of combustion model parameter perturbations based on statistics of cycle-resolved data. SAE paper 2013-01-1314.
19. Worldwide emission standards. Heavy duty and off-highway vehicles. Delphi. Innovation for the real world. 2013/2014.
20. Worldwide emission standards. Passenger cars and light duty vehicles. Delphi. Innovation for the real world. 2012/2013.

Autorzy:

Prof. dr hab. **Zdzisław Chłopek** – Przemysłowy Instytut Motoryzacji. 01-301 Warszawa, ul. Jagiellońska 55; e-mail: Zdzislaw.Chlopek@pimot.eu; Zdzislaw.Chlopek@gmail.com; tel. +48 22 7777019; +48 603861709.

Mgr inż. **Jacek Biedrzycki** – Przemysłowy Instytut Motoryzacji. 01-301 Warszawa, ul. Jagiellońska 55; e-mail: j.biedrzycki@pimot.eu; tel. +48 22 7777191.

Mgr inż. **Jakub Lasocki** – Politechnika Warszawska. Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych. 02-524 Warszawa, ul. Narbutta 84; e-mail: j.lasocki@simr.pw.edu.pl; tel. +48 22 8490303.

Mgr inż. **Piotr Wójcik** – Przemysłowy Instytut Motoryzacji. 01-301 Warszawa, ul. Jagiellońska 55; e-mail: p.wojcik@pimot.eu; tel. +48 22 7777191.

THE NON- REPEATABILITY OF THE POLLUTANT EMISSION UNDER CONDITIONS SIMULATING THE TRAFFIC OF A PERSONAL CAR IN CITIES

Abstract

Due to uncertain specificity of work states of internal combustion engines used in cars makes it expedient treatment of engines performance as random quantities. The article presents the results of empirical studies of the pollutant emission and fuel consumption for the vehicle operated in traffic conditions in cities. The study was conducted on chassis dynamometer tests, both the approval and special. As a measure of the non-repeatability of research results adopted the variation coefficient of test results. It was found diverse non-repeatability of the test results because the test quantities and due to the conditions of a traffic car.