

RESEARCH OF THE POLLUTANT EMISSION FROM A CITY BUS ENGINE

Zdzisław Chłopek

Motor Transport Institute
Jagiellonska Street 80, 03-301 Warsaw, Poland
tel.: +48 22 8112480, fax: +48 22 8116028
e-mail: zdzislaw.chlopek@its.waw.pl; moriarty@o2.pl

Abstract

Methods of test synthesis to research the internal combustion engines used in different, other than typical automobile vehicle applications are presented. Results of empiric research of pollutant emission from a self ignition engine in static and dynamic tests are analyzed. The conditions of the engine use are compatible with the homologation tests and work conditions of city bus engines. The need of the possibilities for the objective opinion of useful properties of internal-combustion engines requires the applications of the research methods respondent to the real levels of engines service. The static and dynamic tests, worked out by the author, were used to the research of pollutant emission from the city bus engine. The results of pollutant emission from the engine were sensibility on conditions of the engine use. On the base of performed investigations and from secured experiences in the hitherto existing works it is possible to formulate following conclusions: results of empirical research performed on the work conditions of the of internal-combustion engines during their real usage enable the synthesis of a priori research tests, simulating engine work conditions, therefore the causes of the processes describing engine properties. The emissions of pollution from the internal combustion engine are strongly susceptible on the work conditions of the engines, both static states and occurrence of dynamic states.

Keywords: internal combustion engines, city bus engines, pollutant emission, pollutant emission tests

BADANIA EMISJI ZANIECZYSZCZEŃ Z SILNIKA AUTOBUSU MIEJSKIEGO

Streszczenie

W pracy przedstawiono metody syntezy testów do badań właściwości silników spalinowych o specyficznych zastosowaniach różnych od zastosowań do napędu typowych pojazdów samochodowych. Przeanalizowano wyniki badań empirycznych emisji zanieczyszczeń z silnika o zapłonie samoczynnym w testach statycznych i dynamicznych, odpowiadających różnym warunkom użytkowania silnika. Warunki te dotyczą użytkowania silnika spalinowego do napędu samochodu zgodnie z testami homologacyjnymi oraz do napędu autobusu miejskiego. Potrzeba możliwości obiektywnej oceny użytkowych właściwości silników spalinowych wymaga stosowania metod badawczych odpowiadających rzeczywistym warunkom eksploatacji silników. Do badań emisji zanieczyszczeń w warunkach innych niż homologacyjne wykorzystano testy badawcze: statyczne i dynamiczne, wyznaczone przez autora dzięki badaniom empirycznym warunków pracy silnika spalinowego w czasie jego rzeczywistego użytkowania w autobusie miejskim. Wyniki badań emisji zanieczyszczeń z silnika spalinowego wykazały znaczną wrażliwość na warunki jego użytkowania. Na podstawie przeprowadzonych badań oraz doświadczeń zdobytych w dotychczasowych pracach można sformułować następujące wnioski: wyniki badań empirycznych, przeprowadzanych nad warunkami pracy silników spalinowych w czasie ich rzeczywistego użytkowania, umożliwiają syntezę apriorycznych testów badawczych, symulujących warunki pracy, a więc przyczyny procesów opisujących właściwości silników. Emisje zanieczyszczeń z silnika spalinowego są silnie wrażliwe na warunki pracy silników, zarówno stanów statycznych, jak i występowania stanów dynamicznych

Słowa kluczowe: silniki spalinowe, silniki autobusów miejskich, emisja zanieczyszczeń, testy emisji zanieczyszczeń

1. Wprowadzenie

Właściwości użytkowe silników spalinowych są silnie zależne od warunków pracy tych silników. Warunki pracy silników spalinowych są określone przebiegami prędkości obrotowej

i momentu obrotowego oraz stanem cieplnym, którego miarą jest zbiór temperatur części silnika oraz jego materiałów eksploatacyjnych, przede wszystkim oleju smarnego i cieczy chłodzącej [2, 4, 5]. Właściwości silników spalinowych są zależne od warunków pracy i to zarówno dla różnych stanów statycznych, jak i dla występowania stanów dynamicznych. Szczególnie duża wrażliwość na warunki pracy silników spalinowych występuje w wypadku emisji zanieczyszczeń [2, 3].

Potrzeba możliwości obiektywnej oceny użytkowych właściwości silników spalinowych wymaga stosowania metod badawczych odpowiadających rzeczywistym warunkom eksploatacji silników. Z tego powodu są opracowywane metody odwzorowujące rzeczywiste warunki pracy silnika lub jego właściwości w eksploatacji. Rzeczywiste warunki pracy silników spalinowych o większości zastosowań charakteryzują się znacznym udziałem stanów dynamicznych [1-3, 5, 6], naturalnym zatem wydaje się dążenie do odtwarzania w badaniach tych warunków. Prowadzi to do tworzenia dynamicznych testów badawczych, jak ma to powszechnie miejsce przykładowo w badaniu emisji zanieczyszczeń z silników stosowanych w samochodach osobowych i lekkich samochodach ciężarowych (tzw. dostawczych) na hamowni podwoziowej w dynamicznych testach jezdnych, symulujących rzeczywiste użytkowanie trakcyjne samochodu [2]. Mimo że testy dynamiczne umożliwiają badanie silników spalinowych w warunkach bardziej zbliżonych do rzeczywistych, trudności w ich realizacji skłaniają do rozwijania testów statycznych, dla których jest znamienne wykonywanie badań w ustabilizowanym stanie cieplnym w punktach pracy silnika, zdefiniowanych stałymi w czasie: prędkością obrotową i momentem obrotowym, będącym miarą obciążenia [2, 4-6].

Do opisu stanów pracy silników spalinowych w testach wprowadza się pojęcia względnych wielkości: prędkości obrotowej i momentu obrotowego, odnoszone do wielkości na zewnętrznej charakterystyce prędkościowej silnika.

Względna prędkość obrotowa wynosi [2, 3, 5, 6]

$$n_w = \frac{n - n_{bj}}{n_N - n_{bj}}, \quad (1)$$

gdzie:

- n - prędkość obrotowa,
- n_{bj} - minimalna prędkość obrotowa biegu jałowego
- n_N - znamionowa prędkość obrotowa.

Względny moment obrotowy dla prędkości obrotowej n jest odnoszony do momentu obrotowego na charakterystyce zewnętrznej dla tej samej prędkości [2, 3, 5, 6]:

$$M_{ew} = \frac{M_e(n)}{M_{ez}(n)}, \quad (2)$$

gdzie:

- $M_e(n)$ - moment obrotowy dla prędkości obrotowej n ,
- $M_{ez}(n)$ - moment obrotowy na charakterystyce zewnętrznej dla prędkości obrotowej n .

Typowymi testami statycznymi są [2, 4-6]: klasyczny test trzynastofazowy ECE R 49.02, test ESC (European Stationary Cycle - europejski test statyczny) oraz test NRSC (Non Road Stationary Cycle - statyczny test do badania silników o zastosowaniach do maszyn i pojazdów niedrogowych), tożsamy z testem C1 wg ISO 8178-4.

Testy dynamiczne, stosowane do badania silników spalinowych ze względu na emisję zanieczyszczeń, to przede wszystkim [2, 5, 6]: HDDTT (Heavy Duty Diesel Transient Test - test dynamiczny do silników o zapłonie samoczynnym do samochodów ciężarowych i autobusów), ETC (European Transient Test - europejski test dynamiczny), NRTC (Nonroad Transient Cycle - test dynamiczny do silników o zapłonie samoczynnym do maszyn i pojazdów niedrogowych) oraz WHTC (World Harmonized Transient Cycle - powszechny jednolity test dynamiczny do badania silników spalinowych).

2. Synteza testów do badań silników spalinowych autobusów miejskich

W warunkach statycznych właściwości silnika spalinowego są zależne od warunków jego pracy w sposób funkcyjny [2]. W warunkach dynamicznych właściwości silnika spalinowego są zależne od warunków jego pracy w sposób operatorowy [2], zatem właściwości te są znamienne tylko dla warunków ich wyznaczania.

W warunkach statycznych w stanie ustabilizowanym termicznie związek między momentem obrotowym, prędkością obrotową i sterowaniem silnika przez operatora - s może być opisany jako zależność funkcyjna [2,5, 6]:

$$M_e = f_{sn}(s, n), \quad (3)$$

lub

$$s = f_{M_e, n}(M_e, n), \quad (4)$$

lub

$$n = f_{sM_e}(s, M_e). \quad (5)$$

Podstawą syntezy testów statycznych są warunki pracy silnika spalinowego w czasie jego rzeczywistego użytkowania, określone procesami prędkości obrotowej, momentu obrotowego i sterowania silnika [2, 5, 6]. Niech realizacje procesów prędkości obrotowej, momentu obrotowego i sterowania będą przedstawione w postaci funkcji:

$$n = f_n(t), \quad (6)$$

$$M_e = f_{M_e}(t), \quad (7)$$

$$s = f_s(t). \quad (8)$$

Przebiegom (6 - 8) odpowiadają na płaszczyznach $n - M_e$, $s - M_e$ oraz $s - n$ zbiory stanów statycznych silnika

$$M_e = f_{n-M_e}(n), \quad (9)$$

$$M_e = f_{s-M_e}(s), \quad (10)$$

$$s = f_{n-s}(n). \quad (11)$$

We współrzędnych względnych zbiory stanów statycznych silnika są opisane zależnościami

$$M_{ew} = f_{n_w-M_{ew}}(n_w), \quad (12)$$

$$M_{ew} = f_{s-M_{ew}}(s), \quad (13)$$

$$s = f_{n_w-s}(n_w). \quad (14)$$

Charakterystyką, stanowiącą najbardziej kompletny opis statycznych stanów pracy silników spalinowych, jest łączna gęstość prawdopodobieństwa procesów [2, 5, 6]:

- prędkość obrotowa - moment obrotowy,
- sterowanie silnika - prędkość obrotowa,
- sterowanie silnika - moment obrotowy.

Do opisu warunków pracy silnika spalinowego można też wykorzystać udział stanów statycznych silnika - h [2]. Udział stanów statycznych silnika może być scharakteryzowany łączną gęstością prawdopodobieństwa wymienionych procesów. Udział stanów silnika jest względnym histogramem wielkości opisujących ten stan.

W celu opracowania statycznego testu konieczne jest przyjęcie współrzędnych punktów testu. Niech współrzędne punktów testu będą opisane w postaci zbiorów dla:

względnej prędkości obrotowej

$$\mathbf{n}_{ws} = [n_{ws1}, n_{ws2}, \dots, n_{wsk}]^T, \quad (15)$$

względnego momentu obrotowego

$$\mathbf{M}_{ews} = [M_{ews1}, M_{ews2}, \dots, M_{ewsk}]^T, \quad (16)$$

sterowania silnika

$$\mathbf{s}_s = [s_{s1}, s_{s2}, \dots, s_{sk}]^T, \quad (17)$$

gdzie:

k - liczba punktów testu.

Styczny test zostaje opracowany dzięki aproksymacji gęstości prawdopodobieństwa procesów [2, 5, 6]:

- względna prędkość obrotowa - względny moment obrotowy lub
- sterowanie silnika - względna prędkość obrotowa lub
- sterowanie silnika - względny moment obrotowy

dyskretnymi gęstościami prawdopodobieństwa dla współrzędnych określonych parami zbiorów: \mathbf{n}_{ws} , \mathbf{M}_{ews} , \mathbf{s}_s .

Dyskretne gęstości prawdopodobieństwa badanych procesów są w postaci udziałów (współczynników wagowych) poszczególnych punktów w całym teście.

$$\mathbf{u} = [u_1, u_2, \dots, u_k]^T. \quad (18)$$

Wyniki badań emisji z silnika spalinowego w teście statycznym są wynikami badań emisji w poszczególnych punktach testu, uśrednionymi zgodnie ze współczynnikami wagowymi u.

Testy dynamiczne mogą powstawać na zasadzie wiernej symulacji w dziedzinie czasu lub jako wynik syntezy na podstawie przyjętych wymogów, np. charakterystyk częstotliwościowych lub gęstości prawdopodobieństwa warunków pracy silnika [2]. Najprostszą metodą syntezy testów dynamicznych pracy silnika spalinowego jest metoda wiernej symulacji w dziedzinie czasu. Na podstawie badań empirycznych stanów pracy silnika spalinowego następuje wybór fragmentów przebiegów wielkości charakteryzujących warunki pracy silnika, które to fragmenty zostają arbitralnie uznane jako reprezentatywne dla badanej pracy silnika. W ten sposób powstają testy dynamiczne w postaci przebiegów:

$$n = f_n(t), \quad (19)$$

$$M_e = f_{Me}(t), \quad (20)$$

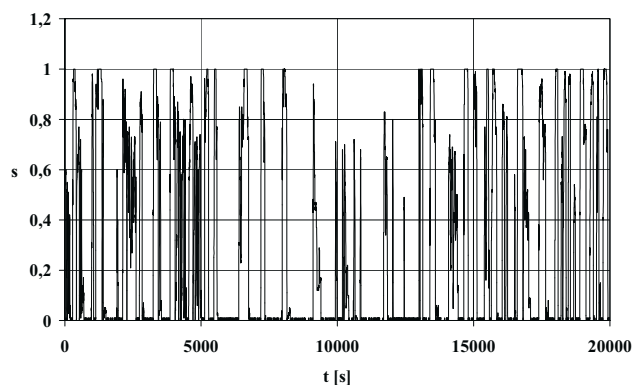
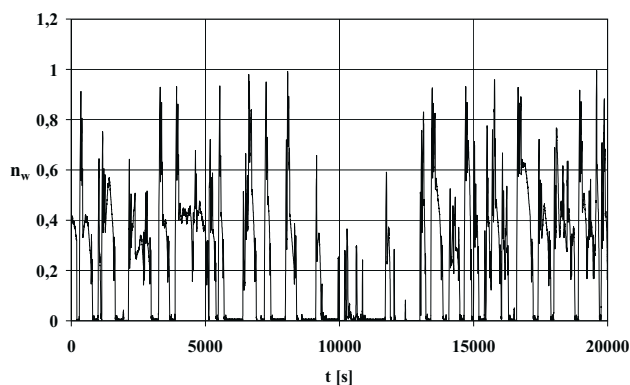
$$s = f_s(t). \quad (21)$$

Przedstawioną metodykę syntezy testów badań silników spalinowych zastosowano do silnika autobusu komunikacji miejskiej [1]. Do syntezy testów wykorzystano wyniki badań empirycznych autobusu MAN A27 solo w czasie dwóch przejazdów na półkursach linii komunikacyjnej w Poznaniu, reprezentatywnej dla ruchu w dużych miastach europejskich. W czasie jazdy rejestrowano z częstotliwością 1 Hz m.in.:

- prędkość obrotową silnika,
- sterowanie silnika przez operatora,
- przełożenia biegów.

Zarejestrowane przebiegi przetworzono cyfrowo, eliminując grube błędy i przeprowadzając filtrację dolnoprzepustową. Do filtracji wykorzystano filtr Golaya-Savitzky'ego [7] z parametrami uśredniania: wykorzystanie obustronnie po dwa punkty oraz drugi stopień wielomianu aproksymującego.

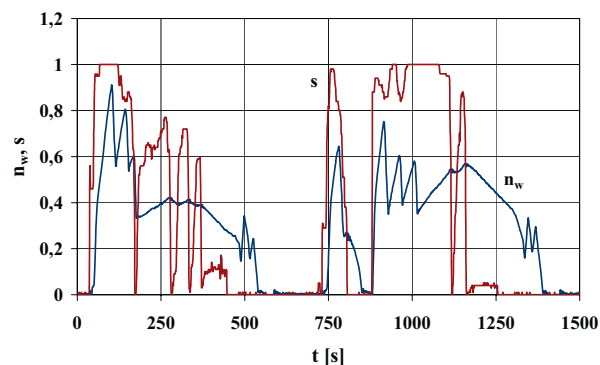
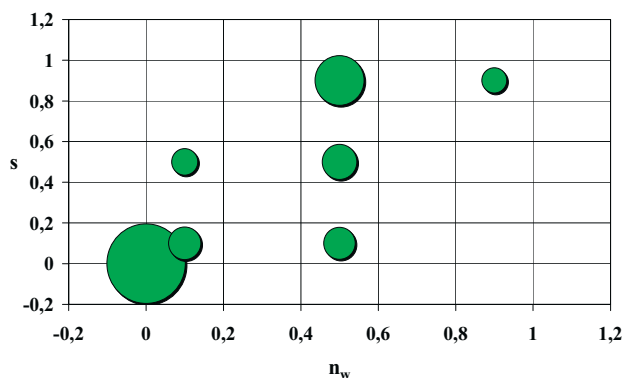
Na Rys. 1 i 2 przedstawiono przebiegi względnej prędkości obrotowej i sterowania silnika przez operatora w czasie pierwszego przejazdu autobusu.



Rys. 1. Przebieg względnej prędkości obrotowej w czasie pierwszego przejazdu autobusu
 Rys. 2. Przebieg sterowania silnika przez operatora w czasie pierwszego przejazdu autobusu
 Fig. 1. The process of the relative engine speed in the first drive of the city bus
 Fig. 2. The process of the relative engine steering in the first drive of the city bus

Na podstawie zarejestrowanych przebiegów względnej prędkości obrotowej i sterowania silnika przez operatora opracowano testy do badań silników:

- test statyczny CBST - City Bus Static Test - Rys. 3,
- test dynamiczny CBDT - City Bus Dynamic Test - Rys. 4.

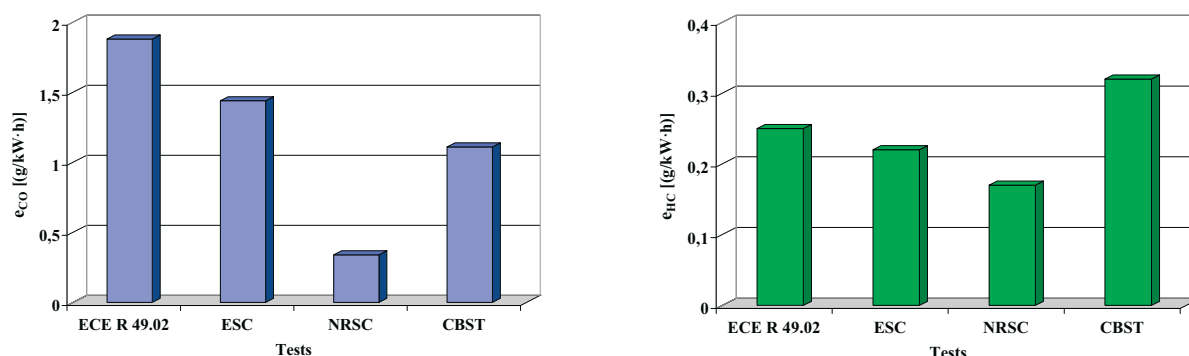


Rys. 3. Schemat statycznego testu silnika spalinowego autobusu miejskiego CBST - pola powierzchni kół proporcjonalne do udziałów poszczególnych faz w teście
 Rys. 4. Schemat dynamicznego testu silnika spalinowego autobusu miejskiego CBDT
 Fig. 3. The schema of the city bus static test CBST - the circle areas are proportional to participations of each phase in the test
 Fig. 4. The schema of the city bus dynamic test CBDT

3. Wyniki badań emisji zanieczyszczeń z silników spalinowych w testach badawczych

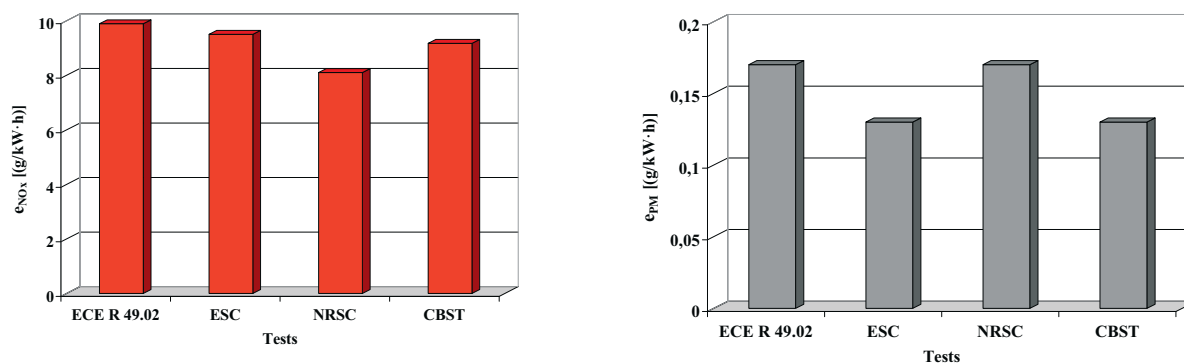
Do badań emisji zanieczyszczeń wykorzystano silnik o zapłonie samoczynnym Cummins QSC 8,3. Badania przeprowadzono w Instytucie Transportu Samochodowego w Warszawie. Część wyników, przedstawianych w niniejszej pracy, jest publikowana w [9].

Na Rys. 5 i 6 przedstawiono wyniki badań emisji zanieczyszczeń w statycznym teście autobusowym CBST oraz w celach porównawczych w testach statycznych: ECE R 49.02, ESC i NRSC.



Rys. 5. Emisja jednostkowa zanieczyszczeń: tlenku węgla CO i węglowodorów HC w testach statycznych: ECE R 49.02, ESC, NRSC i CBST

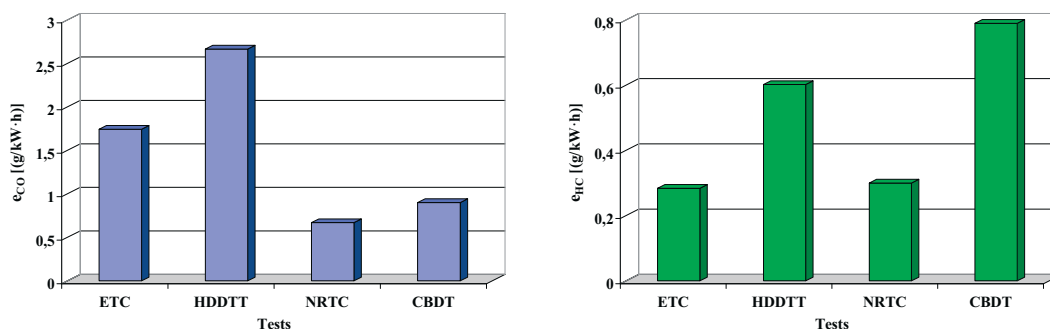
Fig. 5. The specific brake emission of pollutants: carbon monoxide CO and hydrocarbons HC in the static tests: ECE R 49.02, ESC, NRSC and CBST



Rys. 6. Emisja jednostkowa zanieczyszczeń: tlenków azotu NO_x i cząstek stałych PM w testach statycznych: ECE R 49.02, ESC, NRSC i CBST

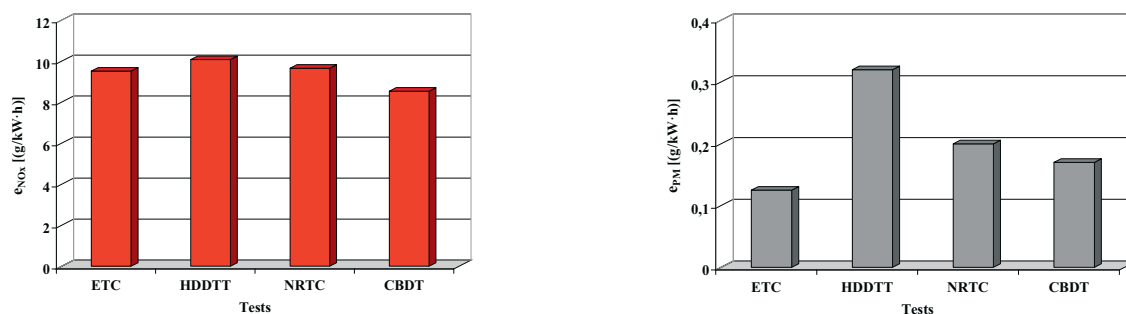
Fig. 6. The specific brake emission of pollutants: nitrogen oxides NO_x and particulate matter PM in the static tests: ECE R 49.02, ESC, NRSC and CBST

Na Rys. 7 i 8 porównano emisję jednostkową zanieczyszczeń w dynamicznym teście autobusowym CBDT oraz w celach porównawczych w testach dynamicznych: ETC, HDDTT i NRTC.



Rys. 7. Emisja jednostkowa zanieczyszczeń: tlenku węgla CO i węglowodorów HC w testach dynamicznych: ETC, HDDTT, NRTC i CBDT

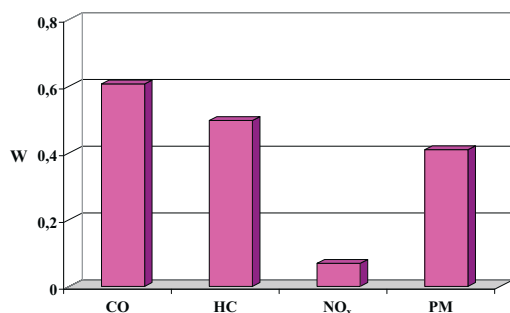
Fig. 7. The specific brake emission of pollutants: carbon monoxide CO and hydrocarbons HC in the dynamic tests: ETC, HDDTT, NRTC and CBDT



Rys. 8. Emisja jednostkowa zanieczyszczeń: tlenków azotu NO_x i cząstek stałych PM w testach dynamicznych: ETC, HDDTT, NRTC i CBDT

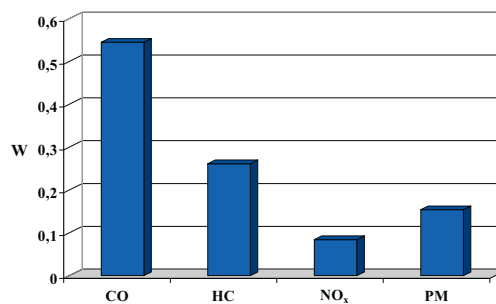
Fig. 8. The specific brake emission of pollutants: nitrogen oxides NO_x and particulate matter PM in the dynamic tests: ETC, HDDTT, NRTC and CBDT

Jak widać, różnice między emisjami jednostkowymi tego samego zanieczyszczenia dla różnych testów są znaczne, największe dla tlenku węgla, zarówno dla warunków statycznych, jak i dynamicznych - Rys. 9-10. Najmniejsze różnice występują dla emisji jednostkowej tlenków azotu.



Rys. 9. Współczynnik zmienności emisji jednostkowej poszczególnych zanieczyszczeń dla różnych testów statycznych

Fig. 9. The variability coefficient of the specific brake emission of pollutants for the different static tests



Rys. 10. Współczynnik zmienności emisji jednostkowej poszczególnych zanieczyszczeń dla różnych testów dynamicznych

Fig. 10. The variability coefficient of the specific brake emission of pollutants for the different dynamic tests

Wyniki badań potwierdzają tezę, że emisja zanieczyszczeń z silników spalinowych jest silnie wrażliwa na warunki pracy silników [2, 3].

4. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań oraz doświadczeń zdobytych w dotychczasowych pracach można sformułować następujące wnioski:

1. Wyniki badań empirycznych, przeprowadzanych nad warunkami pracy silników spalinowych w czasie ich rzeczywistego użytkowania, umożliwiają syntezę apriorycznych testów badawczych, symulujących warunki pracy, a więc przyczyny procesów opisujących właściwości silników.
2. Emisje zanieczyszczeń z silnika spalinowego są silnie wrażliwe na warunki pracy silników, zarówno stanów statycznych, jak i występowania stanów dynamicznych.

Wyniki niepowtarzalności emisji jednostkowych w różnych warunkach pracy silnika spalinowego, której miarą jest współczynnik zmienności, są w znacznej mierze jedynie poglądy. Badania były w każdym teście przeprowadzane tylko jednokrotnie, co wynikało z ograniczeń materialnych i technicznych. Doświadczenie wskazuje, że konieczne jest co najmniej kilkukrotne powtarzanie badań, co jeszcze w Polsce nie stało się obowiązującym zwyczajem. W czołowych ośrodkach badawczych na świecie istnieją wewnętrzne zalecenia stosowania powtarzania badań, np. w Environment Canada co najmniej trzykrotnego [3].

Mimo tych zastrzeżeń, należy zwrócić uwagę, że istnieje możliwość oceny prawidłowości wniosków sformułowanych na podstawie otrzymanych wyników, wykorzystując analizę korelacji. Zbiory emisji jednostkowej zanieczyszczeń w poszczególnych testach badawczych są skorelowane ze sobą zgodnie z teoriami Pearsona, Kendalla i Kruskala [8] na poziomie istotności mniejszym niż 1%, co można uznać za potwierdzenie prawidłowości wniosków sformułowanych w niniejszej pracy.

References

- [1] Chłopek, Z., *Badania warunków pracy silnika spalinowego w czasie rzeczywistego użytkowania w autobusie miejskim*, Archiwum Motoryzacji 2/2007.
- [2] Chłopek, Z., *Modelowanie procesów emisji spalin w warunkach eksploatacji trakcyjnej silników spalinowych*, Prace Naukowe, Seria Mechanika Z. 173, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1999.
- [3] Chłopek, Z., Rostkowski, J., *Analiza emisji zanieczyszczeń z silników o zapłonie samoczynnym w warunkach dynamicznych*, Archiwum Motoryzacji 3/2003, s. 119-140, 2003.
- [4] ISO 08178, „*Reciprocating internal combustion engines - Exhaust emission measurement - Part 4: Test cycles for different engine applications*”.
- [5] Marecka-Chłopek, E., *Metodyka i wytyczne do badań emisji zanieczyszczeń z silników spalinowych o zapłonie samoczynnym stosowanych w maszynach roboczych*, Instytut Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego, Praca statutowa Nr 12066/MZ, Warszawa 2008.
- [6] Marecka-Chłopek, E., Chłopek, Z., *Pollutants emission problems from the combustion engines of other applications than motor cars*, Maintenance and Reliability, Nr 3(35)2007.
- [7] Savitzky, A., Golay, M. J. E., *Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures*. Analytical Chemistry, 36, pp. 1627-1639, 1964.
- [8] Wasserman, L., *All of nonparametric statistics* Springer, 2007.
- [9] Żółtowski, A., *Analiza porównawcza testów badawczych emisji zanieczyszczeń*, Transport Samochodowy. (Praca w druku).