

## **Propozycja charakterystyk emisji zanieczyszczeń z silników spalinowych pracujących w warunkach dynamicznych**

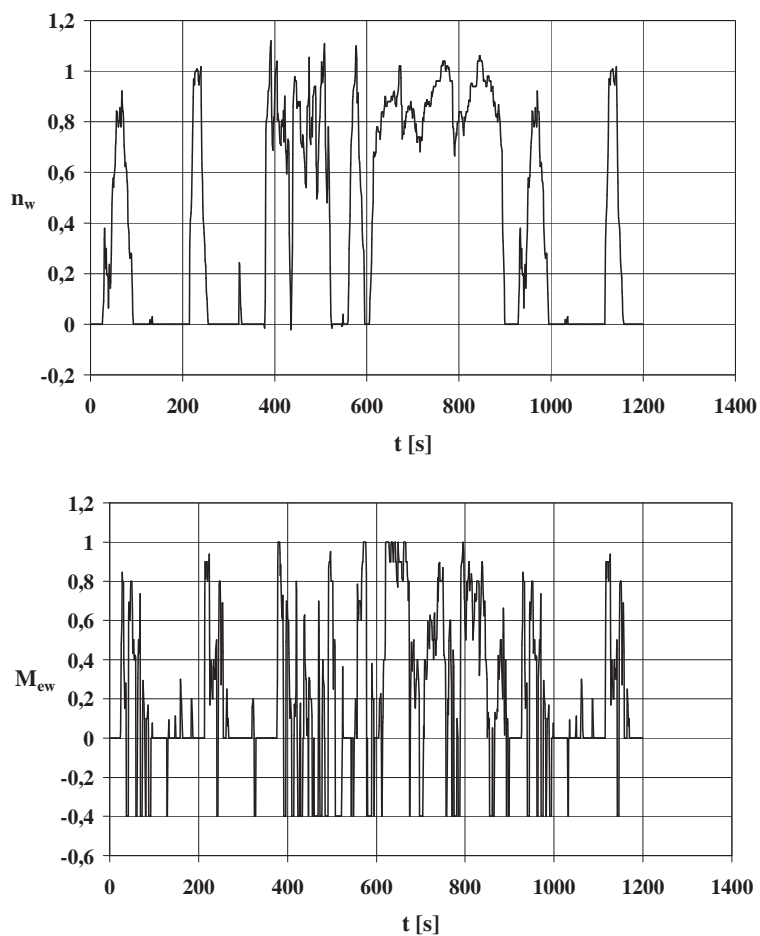
**ZDZISŁAW CHŁOPEK**

Institut Transportu Samochodowego

W pracy zaproponowano koncepcję charakterystyk emisji zanieczyszczeń z silników spalinowych pracujących w warunkach dynamicznych. Zaproponowane rozwiązanie nawiązuje do charakterystyk emisji zanieczyszczeń z silników samochodowych w warunkach dynamicznych w postaci zależności emisji drogowej zanieczyszczeń od prędkości średniej pojazdu. Jako charakterystyki emisji zanieczyszczeń z silników spalinowych w warunkach dynamicznych proponuje się zależność emisji jednostkowej zanieczyszczeń od średniej mocy użytecznej bez uwzględniania stanów z ujemnym momentem obrotowym. Zaproponowane charakterystyki emisji zanieczyszczeń wyznaczono z zastosowaniem metody Monte Carlo dla silnika o zapłonie samoczynnym Detroit Diesel Series 50.

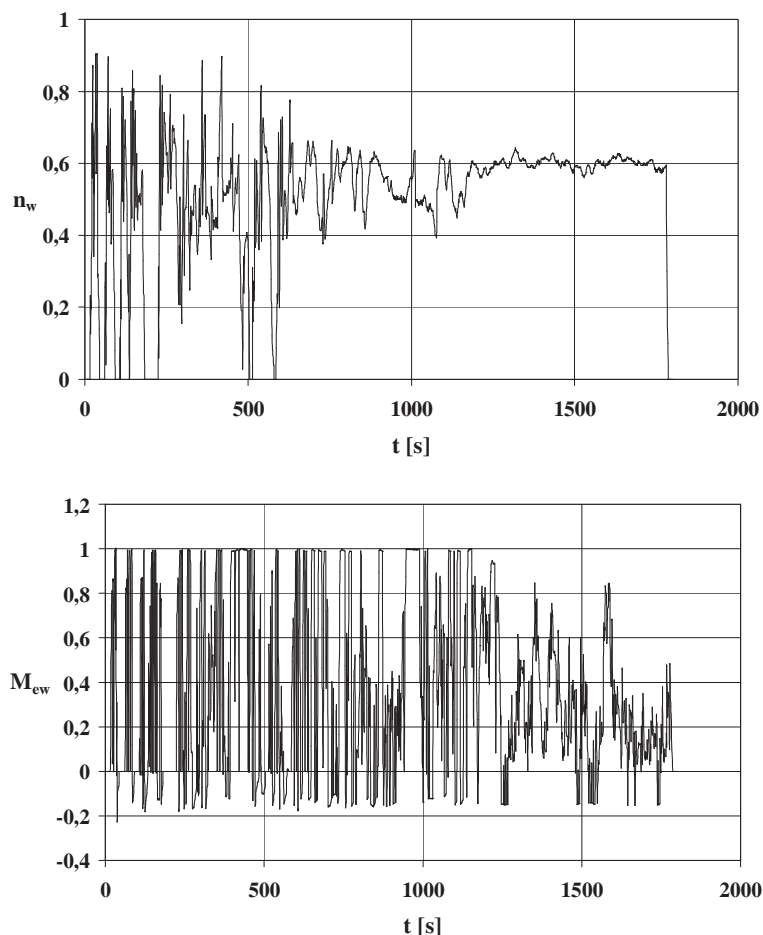
### **1. Wstęp**

Ekologiczne właściwości silników spalinowych stają się, od co najmniej kilkunastu lat, najważniejszym wyznacznikiem jakości silników. Szczególnie emisja zanieczyszczeń jest silnie odczuwalna jako poważne zagrożenie dla ludzi i ich środowiska. Przez wiele lat wiedza o właściwościach silników spalinowych była sprowadzana głównie do informacji uzyskiwanych w badaniach w warunkach statycznych [1]. Odnosiło się to – oczywiście – również do emisji zanieczyszczeń. Pierwsze badania emisji zanieczyszczeń z silników spalinowych, pracujących w warunkach dynamicznych, wprowadzono do badań homologacyjnych samochodów osobowych i lekkich samochodów ciężarowych w postaci testów jezdnych, realizowanych na hamowni podwoziowej [1]. Emisja z silników spalinowych na hamowniach silnikowych była badana natomiast w testach statycznych. Pierwsze testy dynamiczne do badania emisji zanieczyszczeń z silników spalinowych wprowadzono w Stanach Zjednoczonych Ameryki w 1985 r. Były to testy HDDTT (Heavy Duty Diesel Transient Test – dynamiczny test do badania ciężkich silników o zapłonie samoczynnym) – rysunek 1 oraz HDGTT (Heavy Duty Gasoline Transient Test – dynamiczny test do badania ciężkich silników o zapłonie iskrowym) [1, 2].



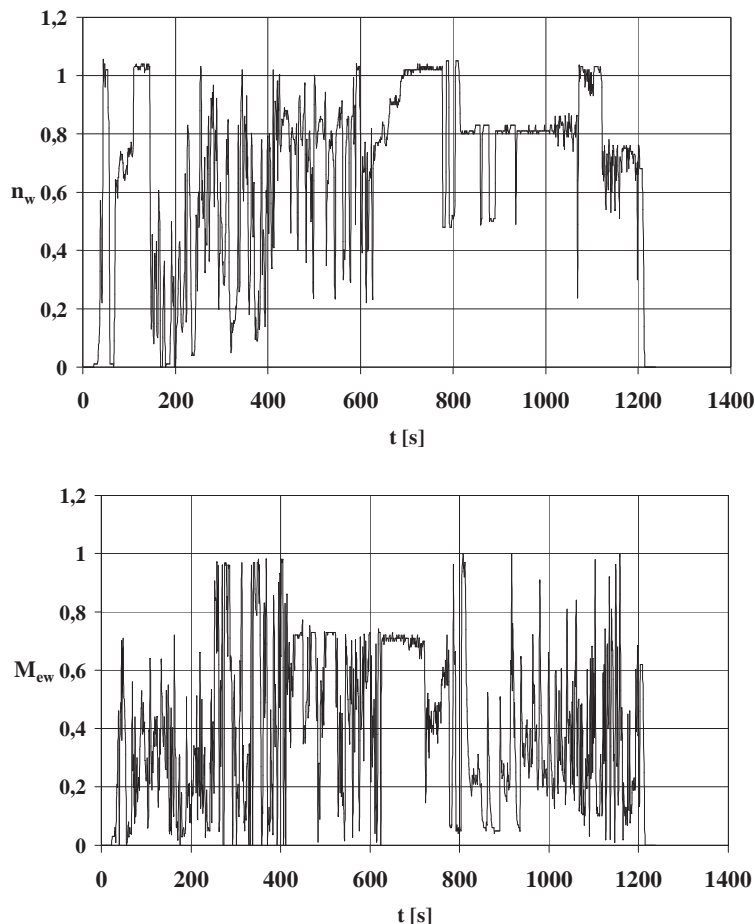
Rys. 1. Test dynamiczny do badania samochodowych silników spalinowych HDDTT.  
Fig. 1. The dynamic test to car engines – HDDTT.

W Unii Europejskiej pierwszym testem dynamicznym, zastosowanym do badań homologacyjnych emisji zanieczyszczeń z silników spalinowych, był wprowadzony w 2000 r., test ETC (European Transient Test – europejski test dynamiczny) [2] – rysunek 2.



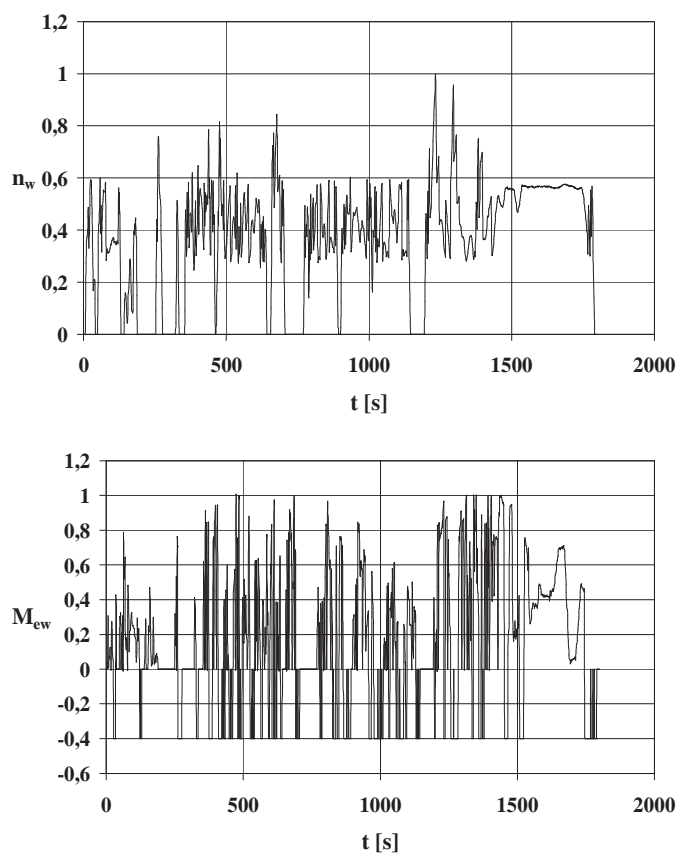
Rys. 2. Test dynamiczny do badania samochodowych silników spalinowych ETC.  
Fig. 2. The dynamic test to car engines – ETC.

W wypadku tych testów badania procesów emisji zanieczyszczeń z silników spalinowych ograniczają się, podobnie jak w badaniach pojazdów na hamowni podwoziowej w testach homologacyjnych, do wyznaczenia uśrednionych miar emisji w całych testach. Zbliżone zastosowanie znajdują testy dynamiczne, przewidziane do badania silników spalinowych wykorzystywanych nie tylko w samochodach: NRTC (Nonroad Transient Cycle – test dynamiczny do badania silników spalinowych maszyn niedrogowych) [2, 3] – rysunek 3 i WHTC (World Harmonized Transient Cycle – jednolity światowy test dynamiczny) [2] – rysunek 4.

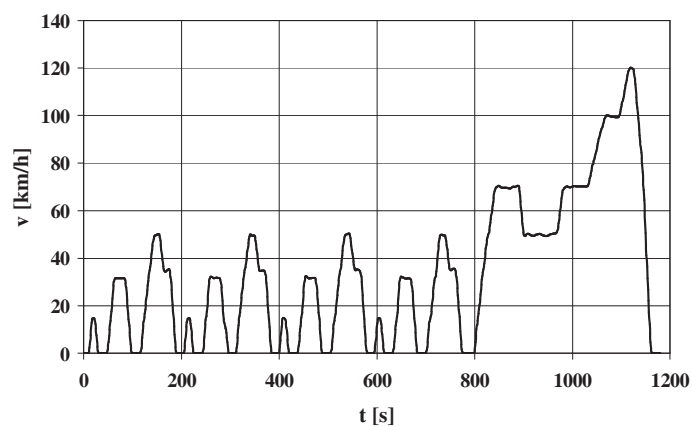


Rys. 3. Test dynamiczny do badania silników spalinowych maszyn niedrogowych NRTC.  
Fig. 3. The dynamic test to nonroad engines – NRTC.

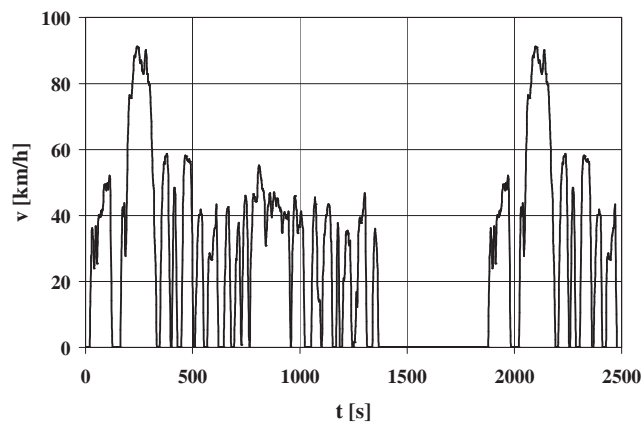
Wiedza o emisji zanieczyszczeń z silników spalinowych pracujących w warunkach dynamicznych, ograniczonych do wybranych testów, nie jest jednak wystarczająca. Ważne są przykładowo właściwości ekologiczne silników samochodowych w różnych warunkach ruchu pojazdów. W tym celu do badania emisji zanieczyszczeń są wykorzystywane nie tylko testy homologacyjne, m.in. europejski zgodny z regulaminem nr 83 EKG ONZ (Europejskiej Komisji Gospodarczej ONZ) [1, 2] – rysunek 5, amerykański FTP-75 (Federal Transient Procedure – federalny test dynamiczny) [1, 2] – rysunek 6, ale i testy specjalne, np. test Stop and Go [1, 4] do symulacji warunków ruchu na zatłoczonych ulicach – rysunek 7, czy Autobahn [1, 4], odpowiadający ruchowi pojazdów na autostradach i trasach szybkiego ruchu – rysunek 8.



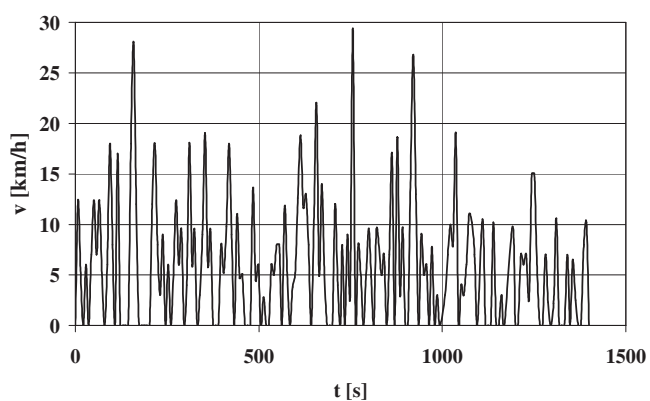
Rys. 4. Powszechny jednolity test dynamiczny do badania silników spalinowych WHTC.  
Fig. 4. The dynamic test to internal combustion engines – WHTC.



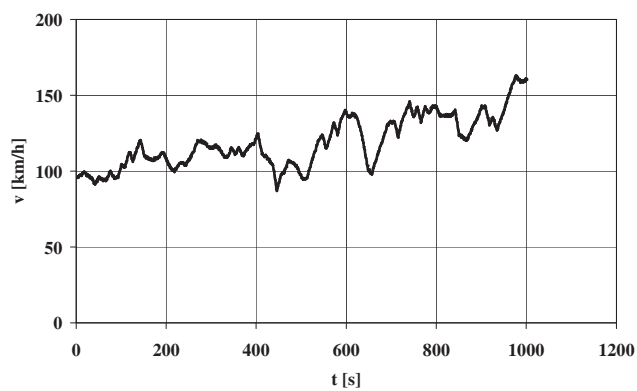
Rys. 5. Test jezdny według regulaminu nr 83 EKG ONZ.  
Fig. 5. The driving test according to the ECE R 83.



Rys. 6. Test jezdny FTP-75.  
Fig. 6. The FTP-75 driving test.

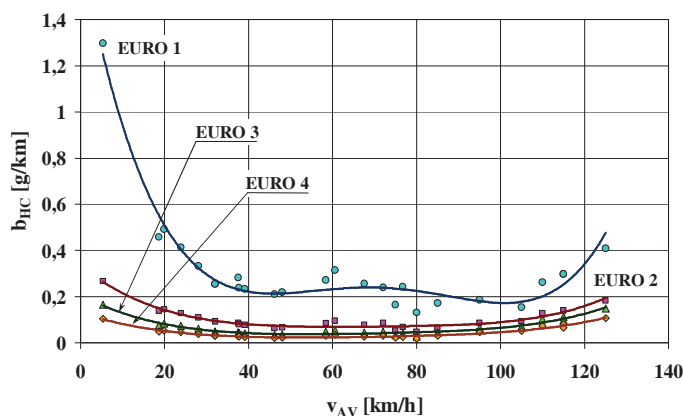


Rys. 7. Test Stop and Go.  
Fig. 7. The Stop and Go test.



Rys. 8. Test Autobahn.  
Fig. 8. The Autobahn test.

Wykorzystanie wyników badań emisji zanieczyszczeń z silników samochodów badanych w różnych testach oraz ich kombinacjach umożliwia wyznaczenie, np. zależności emisji drogowej zanieczyszczeń od średniej prędkości pojazdów [1, 4÷8]. Przykładową charakterystykę przedstawiono na rysunku 9 dla samochodów osobowych z silnikami o zapłonie iskrowym różnych kategorii ekologicznych od EURO 1 do EURO 4.



Rys. 9. Charakterystyka emisji węglowodorów z silników samochodów osobowych o różnych kategoriach ekologicznych w dynamicznych warunkach jako zależność emisji drogowej węglowodorów od średniej prędkości ruchu.

Fig. 9. The characteristics of the hydrocarbons emission from cars engines of different ecological categories in dynamic conditions as the dependence of the specific distance emission of hydrocarbons on the average car velocity.

Jako zmienną niezależną, opisującą charakter ruchu, wybrano na podstawie doświadczeń średnią prędkość samochodu [1, 4÷8]. Wybór zerowymiarowej (punktowej) charakterystyki, opisującej dynamiczne warunki ruchu, jest sprawą umowną, a podstawowym kryterium oceny propozycji tych charakterystyk jest ich praktyczna przydatność.

Badania właściwości silników spalinowych w warunkach dynamicznych nie dojechały się do tej pory usystematyzowanych standardów. Jest to szczególnie odczuwalne w zakresie emisji zanieczyszczeń, która jest silnie wrażliwa na występowanie stanów dynamicznych.

Badaniami dynamiki procesów opisujących silniki spalinowe zajmują się m.in. autorzy prac [1, 3÷6, 9÷31]. Modelowanie dynamicznych procesów emisji zanieczyszczeń z silników spalinowych jest tematem prac Ajtaya i Weilenmanna [9, 10] oraz klasycznych prac Dobnera, m.in. [19]. Również do celów sterowania silników spalinowych wykorzystuje się elementy modelowania procesów emisji zanieczyszczeń w warunkach dynamicznych [11÷13, 21, 23]. W wielu pracach wykorzystuje się modelowanie emisji zanieczyszczeń w warunkach dynamicznych do celów bilansowania emisji [26, 27] oraz oceny oddziaływania motoryzacji na środowisko [24]. Pro-

blemami modelowania emisji zanieczyszczeń z silników spalinowych w warunkach, odpowiadających rzeczywistemu użytkowaniu samochodów, zajmują się autorzy prac: dla silników samochodowych [1, 4÷8, 15÷18, 22, 26÷28] oraz dla innych zastosowań silników [1, 3, 25]. Tematyka wyznaczania charakterystyk emisji zanieczyszczeń w zależności od warunków pracy silników spalinowych jest poruszana w pracach [1, 3÷8, 26÷28, 31]. W większości wypadków wyznaczanie charakterystyk emisji zanieczyszczeń dotyczy silników samochodowych, jedynie w pracach [1, 3, 25] – silników o innych zastosowaniach. Problem emisji zanieczyszczeń z silników spalinowych, traktowany w sposób stochastyczny, jest tematem prac [1, 5÷7]. Podejście takie jest uzasadnione stosunkowo dużym brakiem wiedzy na temat stanów pracy silników spalinowych w warunkach ich rzeczywistego użytkowania.

Z krótkiego syntetycznego przeglądu literatury na temat badań właściwości użytkowych silników spalinowych w warunkach dynamicznych, symulujących rzeczywistą eksploatację, wynika, że jest to tematyka wzbudzająca duże zainteresowanie, ale jednocześnie sposoby podejścia do rozwiązania podstawowych problemów są w znacznym stopniu zróżnicowane, a wiedza – rozproszona i nieujednolicona. Szczególnie odczuwa się to w wypadku badań emisji zanieczyszczeń odniesionej do warunków pracy silników spalinowych – w odróżnieniu od warunków pracy samochodów – brak usystematyzowanej wiedzy na temat charakterystyk emisji zanieczyszczeń w warunkach dynamicznych. Niniejsza praca zawiera propozycję charakterystyk emisji zanieczyszczeń z silników spalinowych pracujących w warunkach dynamicznych oraz sposobu ich wyznaczania z zastosowaniem metody Monte Carlo [1, 7, 32].

## 2. Analiza stanów dynamicznych silnika spalinowego

Jeśli warunki pracy silnika spalinowego są opisane zbiorem wielkości fizycznych  $W$ , to warunki te można sklasyfikować jako statyczne lub dynamiczne. Warunki pracy silnika są statyczne, jeśli jest spełniony warunek [1, 5, 6]

$$\frac{\partial W(t)}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

dla wielkości opisujących pracę silnika spalinowego, rozpatrywanych w zakresie częstotliwości odpowiadających warunkom badań (przede wszystkim warunkom typowego użytkowania).

Jeżeli zachodzi nierówność

$$\frac{\partial W(t)}{\partial t} \neq 0 \quad (2)$$

dla jakiegokolwiek wielkości, opisującej pracę silnika spalinowego, to są to warunki dynamiczne [1, 5, 6].

W praktycznym zastosowaniu konieczne jest przyjęcie dla analizowanych wielkości fizycznych zakresów tolerancji w celu kwalifikowania warunków jako statycznych lub dynamicznych [1, 5, 6].



Możliwe są następujące rodzaje dynamicznych warunków pracy silnika spalinowego [15]:

1. Wzrastające sterowanie silnika przez operatora  $s$  i malejący moment oporu  $M_o$  – w konsekwencji wzrastająca prędkość obrotowa  $n$

$$\frac{ds(t)}{dt} > 0, \frac{dM_o(t)}{dt} < 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{dn(t)}{dt} > 0 \quad (3)$$

2. Malejące sterowanie i wzrastający moment oporu – w konsekwencji malejąca prędkość obrotowa

$$\frac{ds(t)}{dt} < 0, \frac{dM_o(t)}{dt} > 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{dn(t)}{dt} < 0 \quad (4)$$

3. Wzrastające sterowanie i wzrastający moment oporu – w konsekwencji malejąca prędkość obrotowa

$$\frac{ds(t)}{dt} > 0, \frac{dM_o(t)}{dt} > 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{dn(t)}{dt} < 0 \quad (5)$$

4. Wzrastające sterowanie i wzrastający moment oporu – w konsekwencji wzrastająca prędkość obrotowa

$$\frac{ds(t)}{dt} > 0, \frac{dM_o(t)}{dt} > 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{dn(t)}{dt} > 0 \quad (6)$$

5. Malejące sterowanie i malejący moment oporu – w konsekwencji malejąca prędkość obrotowa

$$\frac{ds(t)}{dt} < 0, \frac{dM_o(t)}{dt} < 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{dn(t)}{dt} < 0 \quad (7)$$

6. Malejące sterowanie i malejący moment oporu – w konsekwencji wzrastająca prędkość obrotowa

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

Dla warunków tych, choć uwzględniają one tylko jakościowe a nie ilościowe różnice procesów determinujących stan silników, właściwości silników mogą się zasadniczo różnić. Jak widać, w rzeczywistym użytkowaniu silników spalinowych różnorodność dynamicznych warunków pracy może w zdecydowany sposób determinować właściwości ekologiczne silników. W związku z tym istnieje pragmatyczna celowość badania właściwości silników spalinowych w warunkach symulujących rzeczywiste użytkowanie. Przykładem takich warunków są np. testy tworzone na zasadach wiernego podobieństwa w dziedzinie czasu, m.in. HDDTT, ETC, NRTC czy WHTC. Oprócz tego istnieje możliwość wykorzystania testów specjalnych, symulujących specyficzne warunki pracy, np. silnika spycharki gaśnicowej w trybach pracy z lemieszem i zrywakiem [3], czy silnika autobusu miejskiego [16].

Możliwości badawcze mogą być rozszerzone przez zastosowanie analizy modalnej [1] dla fragmentów przebiegów warunków pracy silników spalinowych zgodnie z modami, określonymi np. wzorami (3÷8).

### 3. Koncepcja charakterystyk emisji zanieczyszczeń z silnika spalinowego pracującego w warunkach dynamicznych

Nawiązując do koncepcji wyznaczania charakterystyk emisji zanieczyszczeń z silników samochodowych znajdujących się w warunkach dynamicznych [1, 4÷7], proponuje się wykorzystanie testów dynamicznych silnikowych wykonywanych na hamowni silnikowej. Podstawowym problemem jest wybór wielkości, które mogą skutecznie charakteryzować:

- emisję zanieczyszczeń,
- warunki pracy silnika.

Tradycyjnie do oceny emisji zanieczyszczeń w badaniach silników spalinowych wykorzystuje się emisję jednostkową, będącą pochodną emisji względem pracy użytecznej silnika [1]. Podczas badań w testach wyznacza się uśrednioną w warunkach pracy silnika emisję jednostkową zanieczyszczeń.

Wielkość charakteryzująca dynamiczne warunki pracy silnika jest, z formalnego punktu widzenia, charakterystyką punktową, wyznaczaną jako pewien funkcjonal przebiegów warunków pracy silnika. Warunki te są opisane stanem cieplnym silnika oraz intensywnością jego pracy [1]. Miarą stanu cieplnego silnika jest zbiór temperatur części silnika oraz jego materiałów eksploatacyjnych, przede wszystkim oleju silnikowego i cieczy chłodzącej. Intensywność pracy silnika może być opisana wykonywaną pracą użyteczną, zależną od częstotliwości pracy i obciążenia. Miarą częstotliwości pracy jest prędkość obrotowa. Obciążenie można opisać momentem obrotowym (lub średnim ciśnieniem użytecznym) lub sterowaniem silnika przez operatora. W ustabilizowanym stanie cieplnym silnika warunki pracy są zatem opisane przez prędkość obrotową i obciążenie, za którego miarę będzie w dalszej części pracy przyjmowany moment obrotowy (bez ograniczenia możliwości przeprowadzanych rozwiązań).

Warunki dynamiczne silnika są opisane przebiegami w dziedzinie czasu w przedziale  $(t_\alpha, t_\omega)$  momentu obrotowego  $M_e$  i prędkości obrotowej  $n$ :

$$M_e(t); n(t) \quad (9)$$

Z badań emisji zanieczyszczeń z samochodowych silników spalinowych w warunkach ruchu pojazdu wynika, że skuteczną charakterystyką punktową, opisującą warunki pracy silnika jest prędkość średnia, choć rozpatruje się również średnią wartości bezwzględnej iloczynu prędkości i przyspieszenia samochodu [1, 4].

Na podstawie dotychczasowego doświadczenia można postulować jako charakterystykę punktową (opisującą warunki pracy silnika na hamowni silnikowej), jego średnią moc użyteczną. W warunkach dynamicznych istnieje możliwość występowania stanów napędzania silnika spalinowego przez odbiornik mocy, czyli hamo-

wania silnikiem. Stanowi temu odpowiada ujemny moment obrotowy, a więc również ujemna moc użyteczna. Przy uwzględnianiu stanów pracy silnika z ujemnym momentem obrotowym średnia moc użyteczna w przedziale czasu ( $t_\alpha$ ;  $t_\omega$ ) wynosi:

$$N_{uAV}(t_\alpha, t_\omega) = \frac{c}{t_\omega - t_\alpha} \int_{t_\alpha}^{t_\omega} n(t) \cdot M_e(t) dt \quad (10)$$

gdzie:  $c$  – stała zależna od użytych jednostek miar dla prędkości obrotowej, momentu obrotowego i mocy.

Bez uwzględniania stanów pracy silnika z ujemnym momentem obrotowym średnia moc użyteczna w przedziale czasu ( $t_\alpha$ ;  $t_\omega$ ) wynosi:

$$N_{eAV}(t_\alpha, t_\omega) = \frac{K \cdot c}{t_\omega - t_\alpha} \int_{t_\alpha}^{t_\omega} n(t) \cdot M_e(t) dt \quad (11)$$

gdzie:  $K = 0$  dla  $M_e \leq 0$ ,

$K = 1$  dla  $M_e > 0$ .

Można również rozpatrywać jako charakterystyki punktowe, opisujące warunki pracy silnika, średnie kwadratów mocy użytecznej:

$$N_{uAV2}(t_\alpha, t_\omega) = \frac{c^2}{t_\omega - t_\alpha} \int_{t_\alpha}^{t_\omega} [n(t) \cdot M_e(t)]^2 dt \quad (12)$$

$$N_{eAV2}(t_\alpha, t_\omega) = \frac{K \cdot c^2}{t_\omega - t_\alpha} \int_{t_\alpha}^{t_\omega} [n(t) \cdot M_e(t)]^2 dt \quad (13)$$

Celowe jest także rozpatrzenie jako charakterystyk punktowych, opisujących warunki pracy silnika, średniej prędkości obrotowej i średniego momentu obrotowego bez uwzględniania stanów hamowania silnikiem:

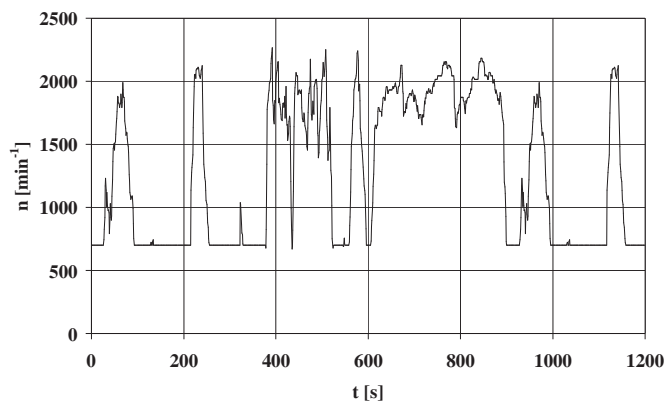
$$n_{AV}(t_\alpha, t_\omega) = \frac{1}{t_\omega - t_\alpha} \int_{t_\alpha}^{t_\omega} n(t) dt \quad (14)$$

$$M_{eAV}(t_\alpha, t_\omega) = \frac{K}{t_\omega - t_\alpha} \int_{t_\alpha}^{t_\omega} M_e(t) dt \quad (15)$$

Rozważania na temat charakterystyk punktowych, opisujących warunki dynamiczne pracy silnika, zweryfikowano za pomocą wyników badań empirycznych. Badania przeprowadzono na silniku Detroit Diesel Series 50 w teście HDDTT. W badaniach zarejestrowano m.in. przebiegi: prędkości obrotowej, momentu obrotowego oraz natężeń emisji tlenu węgla CO, węglowodorów HC, tlenków azotu NO<sub>x</sub> oraz dwutlenku węgla CO<sub>2</sub>. Natężenie emisji cząstek stałych PM wyznaczono na podstawie pomiarów współczynnika zadymienia spalin, korelacyjnych metod wyznaczania stężenia cząstek stałych [33] oraz zarejestrowanego objętościowego

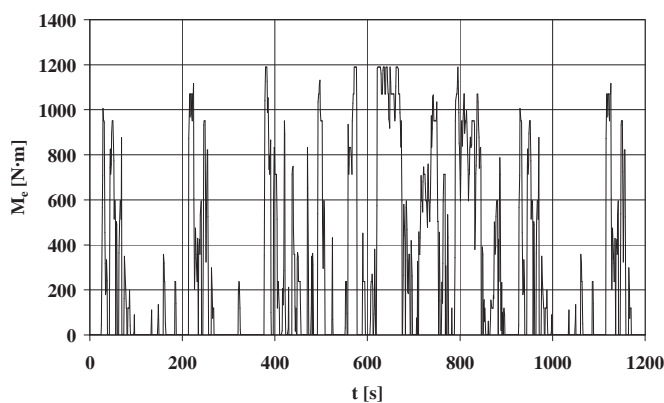
natężenia przepływu powietrza zużywanego przez silnik. Zarejestrowane przebiegi przetworzono cyfrowo, eliminując grube błędy i przeprowadzając filtrację dolnoprzepustową. Do filtracji zastosowano filtr Golaya–Savitzky’ego [34] z parametrami uśredniania: wykorzystano obustronnie po dwa punkty oraz drugi stopień wielomianu aproksymującego.

Na rysunkach 10÷16 przedstawiono przetworzone wyniki badań.



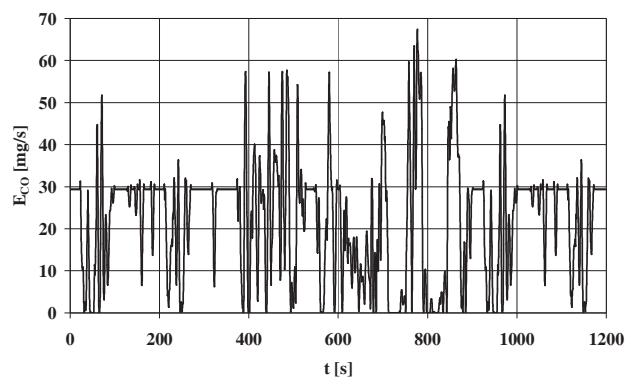
Rys. 10. Przebieg prędkości obrotowej.

Fig. 10. The engine speed.

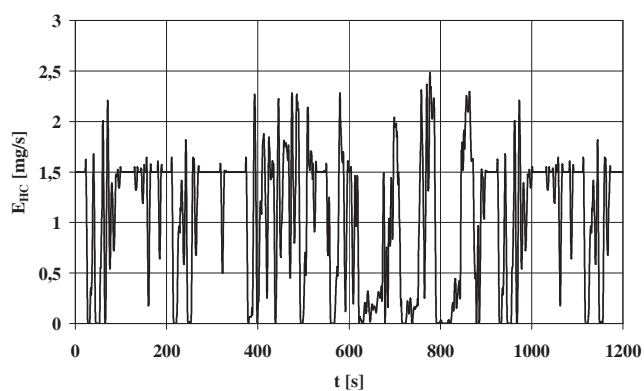


Rys. 11. Przebieg momentu obrotowego.

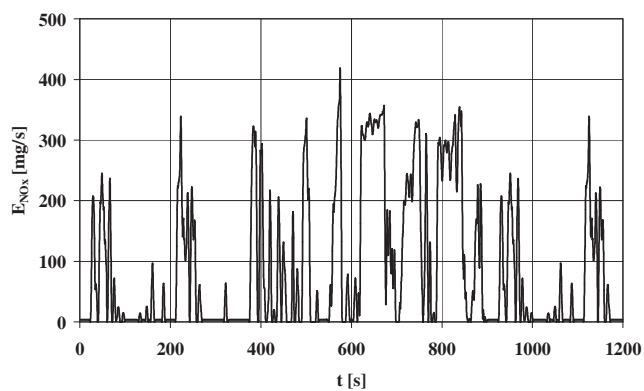
Fig. 11. The engine torque.



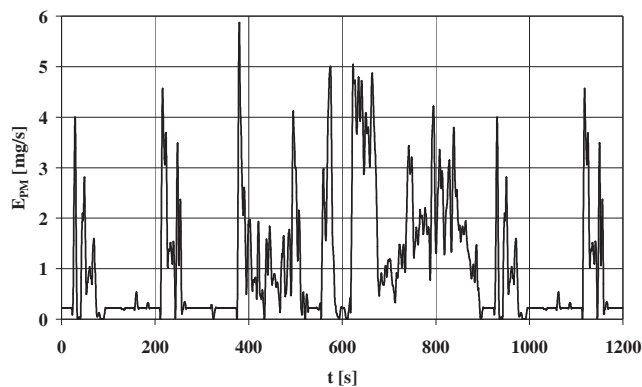
Rys. 12. Przebieg natężenia emisji tlenku węgla.  
Fig. 12. The emission intensity of carbon monoxide.



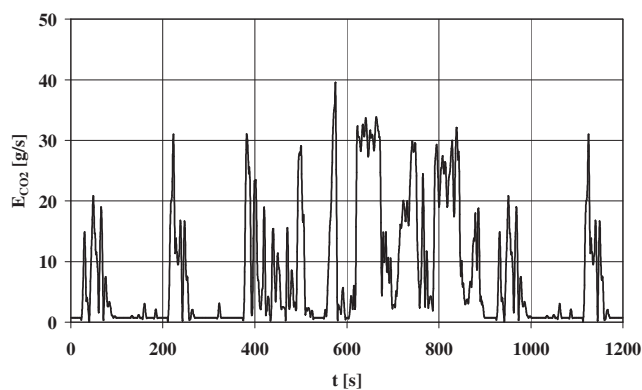
Rys. 13. Przebieg natężenia emisji węglowodorów.  
Fig. 13. The emission intensity of hydrocarbons.



Rys. 14. Przebieg natężenia emisji tlenków azotu.  
Fig. 14. The emission intensity of nitrogen oxides.

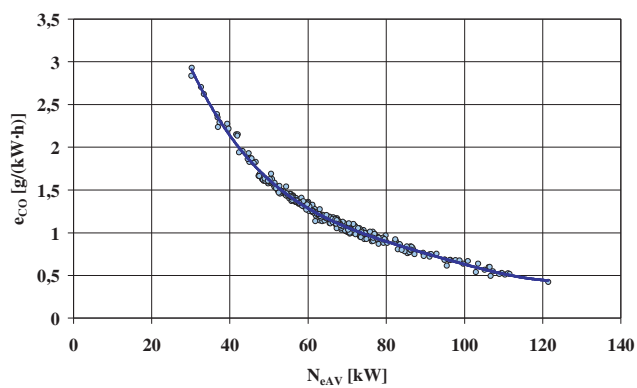


Rys. 15. Przebieg natężenia emisji cząstek stałych  
Fig. 15. The emission intensity of particulate matter



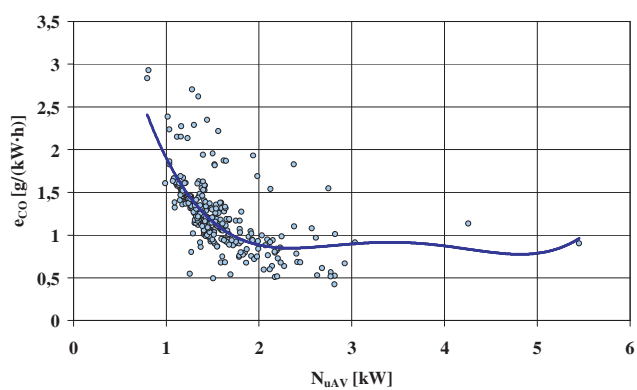
Rys. 16. Przebieg natężenia emisji dwutlenku węgla.  
Fig. 16. The emission intensity of carbon dioxide.

Dla zarejestrowanych wielkości wyznaczono przypadkowo wybranym fragmentem – zgodnie z opisywanym, w dalszej części pracy, formalnym sposobem z zastosowaniem metody Monte Carlo – średnie emisje jednostkowe zanieczyszczeń oraz opisane powyżej propozycje charakterystyk punktowych, wskazujących warunki dynamiczne pracy silnika – rysunki 17÷22. Zbiory punktów na wykresach aproksymowano funkcją wielomianową o stopniu mniejszym od 7.



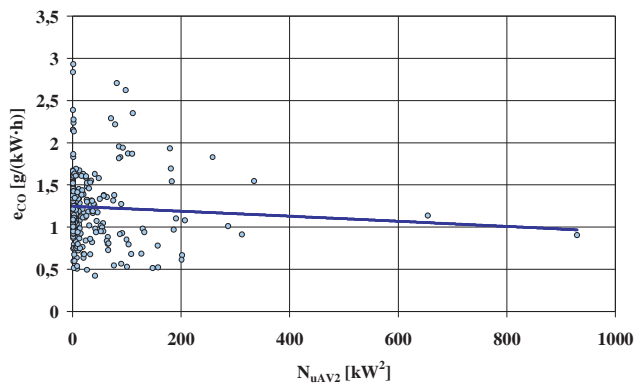
Rys. 17. Charakterystyka emisji jednostkowej tlenku węgla w zależności od średniej mocy użytecznej bez uwzględnienia stanów silnika o ujemnym momencie obrotowym.

Fig. 17. The characteristics of the specific brake emission of the carbon monoxide depending on the average of the engine power without the engine states with the negative torque.



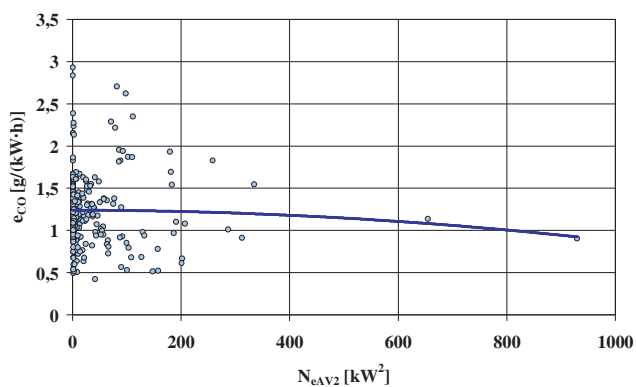
Rys. 18. Charakterystyka emisji jednostkowej tlenku węgla w zależności od średniej mocy użytecznej.

Fig. 18. The characteristics of the specific brake emission of the carbon monoxide depending on the average of the engine power.



Rys. 19. Charakterystyka emisji jednostkowej tlenku węgla w zależności od wartości średniej kwadratu mocy użytecznej bez uwzględnienia stanów silnika o ujemnym momencie obrotowym.

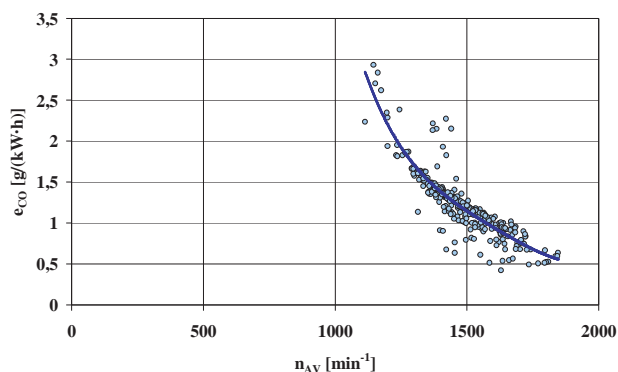
Fig. 19. The characteristics of the specific brake emission of the carbon monoxide depending on the average of the engine power square without the engine states with the negative torque.



Rys. 20. Charakterystyka emisji jednostkowej tlenku węgla w zależności od wartości średniej kwadratu mocy użytecznej.

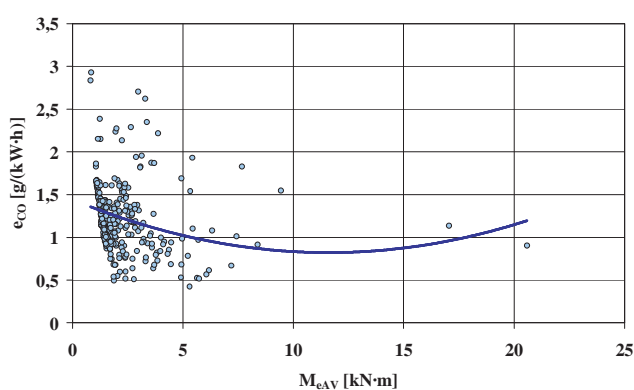
Fig. 20. The characteristics of the specific brake emission of the carbon monoxide depending on the average of the engine power square.





Rys. 21. Charakterystyka emisji jednostkowej tlenku węgla w zależności od średniej prędkości obrotowej.

Fig. 21. The characteristics of the specific brake emission of the carbon monoxide depending on the average of the engine speed.



Rys. 22. Charakterystyka emisji jednostkowej tlenku węgla w zależności od średniego momentu obrotowego bez uwzględnienia stanów silnika o ujemnym momencie obrotowym.

Fig. 22. The characteristics of the specific brake emission of the carbon monoxide depending on the average of the engine torque without the engine states with the negative torque.

Z analizy zależności, przedstawionych na rysunkach 17+22, wyraźnie wynika, że najsilniejsza korelacja występuje w wypadku średniej wartości mocy użytecznej bez uwzględniania stanów o ujemnym momencie obrotowym. W związku z tym można postawić tezę, że za najbardziej skuteczną charakterystykę punktową, opisującą warunki dynamiczne pracy silnika, można przyjąć średnią wartość mocy użytecznej bez uwzględniania stanów o ujemnym momencie obrotowym

#### 4. Wyznaczanie charakterystyk emisji zanieczyszczeń z silnika spalinowego pracującego w warunkach dynamicznych

Do wyznaczenia charakterystyk emisji zanieczyszczeń z silnika spalinowego pracującego w warunkach dynamicznych wykorzystano metodę Monte Carlo [32].

Zastosowanie metody Monte Carlo do wyznaczenia charakterystyk emisji zanieczyszczeń z silników spalinowych pracujących w warunkach dynamicznych polega na generowaniu doświadczeń pseudoprzypadkowych na podstawie zarejestrowanych realizacji procesów stochastycznych modelujących warunki pracy silnika oraz natężenia emisji zanieczyszczeń.

Pseudoprzypadkowe warunki pracy silnika są modelowane w postaci procesów stochastycznych  $\mathbf{M}_e(t)$  oraz  $\mathbf{n}(t)$ .

Wielowymiarowy proces stochastyczny zjawisk towarzyszących pracy silnika spalinowego  $\mathbf{Y}(t)$  dotyczy przede wszystkim emisji zanieczyszczeń i zużycia paliwa:

$$\mathbf{Y}(t) = [E_{CO}, E_{HC}, E_{NOx}, E_{PM}, E_{CO2}, G_f]^T \quad (16)$$

gdzie:  $E$  – natężenie emisji zanieczyszczeń,  
 $G_f$  – natężenie zużycia paliwa.

Przy założeniu stacjonarności i ergodyczności procesów [35]  $\mathbf{M}_e(t)$ ,  $\mathbf{n}(t)$  i  $\mathbf{Y}(t)$  można wyznaczyć dla ich realizacji wartości oczekiwane w przedziale czasu  $(t_\alpha, t_\omega)$ : średnią moc użyteczną bez uwzględniania stanów o ujemnym momencie obrotowym (11) oraz:

$$Y_{AV}(t_\alpha, t_\omega) = \frac{1}{t_\omega - t_\alpha} \int_{t_\alpha}^{t_\omega} Y(t) dt \quad (17)$$

Emisja jednostkowa zanieczyszczenia jest stosunkiem natężenia emisji zanieczyszczenia i mocy użytecznej. Zatem średnia emisja jednostkowa zanieczyszczenia wynosi

$$e_{AV}(t_\alpha, t_\omega) = \frac{E_{AV}(t_\alpha, t_\omega)}{N_{eAV}(t_\alpha, t_\omega)} \quad (18)$$

Średnia emisja jednostkowa zanieczyszczenia jest zatem funkcją średniej mocy użytecznej bez uwzględniania stanów o ujemnym momencie obrotowym (która jest funkcją czasów początku i końca uśredniania) oraz czasów początku i końca uśredniania:

$$e_{AV} = f_e(N_{eAV}(t_\alpha, t_\omega), t_\alpha, t_\omega) \quad (19)$$

Jeśli przyjąć, że czasy początku i końca uśredniania są zmiennymi przypadkowymi, to wyznaczona emisja jednostkowa jako funkcja zmiennych przypadkowych może być traktowana jako funkcja przypadkowa.

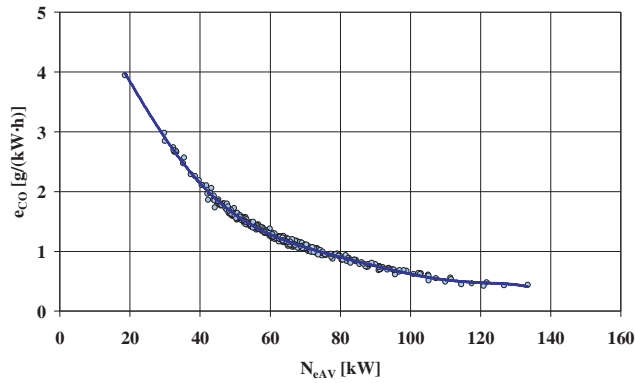
Z formalnego punktu widzenia fragmenty przebiegów momentu obrotowego, prędkości obrotowej oraz natężenia emisji zanieczyszczeń są realizacjami różnych procesów stochastycznych. Rozpatrzmy przykładowo realizację procesu prędkości obrotowej  $\mathbf{n}(t)$  w przedziale czasu  $(t_a, t_z)$ . Każdy z fragmentów realizacji procesu stochastycznego prędkości obrotowej  $\mathbf{n}(t)$ , rozpoczynający się w chwili  $t_{ai}$  i kończący się w chwili  $t_{zi}$ , tj.

$$t_{ai}, t_{zi} \in (t_a, t_z) \quad (20)$$

jest realizacją innego procesu stochastycznego  $\mathbf{n}_i(t)$ . Procesy te różnią się zatem swoimi charakterystykami, m.in. gęstością prawdopodobieństwa, wartością oczekiwaną, wariancją itd. W opisywanej procedurze do wyznaczania chwil początków i końców fragmentów realizacji procesów wykorzystuje się metodę Monte Carlo. Znajomość jednej realizacji każdego z różnych procesów przykładowo prędkości obrotowej pod warunkiem przyjęcia założenia o ergodyczności procesu. Mimo, że formalnie założenie o ergodyczności jest mocne, w praktyce jest często stosowane do obserwowanych realizacji procesów stochastycznych [35]. Jest zatem znamienne, że dzięki proponowanej metodzie istnieje możliwość postulowania wiedzy o procesach różniących się m.in. wartością oczekiwaną na podstawie jednej realizacji jednego procesu.

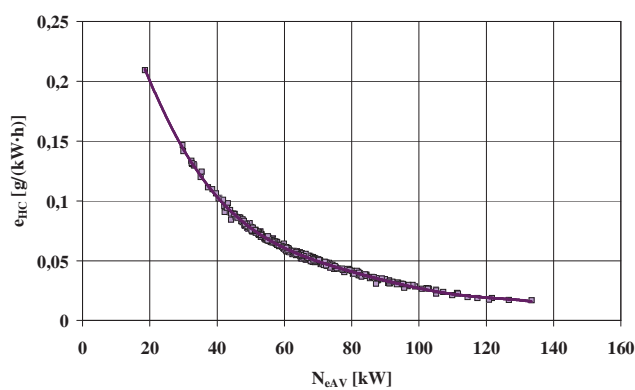
Metoda Monte Carlo jest więc stosowana do generowania realizacji różnych procesów stochastycznych o różnych – w związku z tym – charakterystykach, w tym również o różnej wartości oczekiwanej, co jest wykorzystywane w opisywanej metodzie wyznaczania charakterystyk emisji zanieczyszczeń z silnika pracującego w warunkach dynamicznych.

Na rysunkach 23÷27 przedstawiono wyznaczone z zastosowaniem opracowanej metody charakterystyki emisji zanieczyszczeń z silnika pracującego w warunkach procesów stochastycznych, odpowiadających wybranymi właściwościami testowi HDDTT. Zbiory punktów na wykresach aproksymowano funkcją wielomianową o stopniu mniejszym od 7.



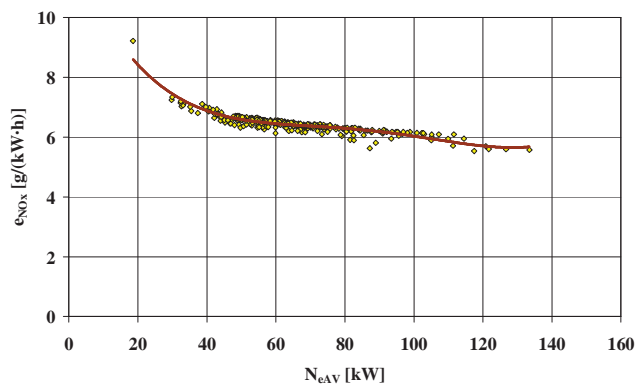
Rys. 23. Charakterystyka emisji jednostkowej tlenku węgla.

Fig. 23. The characteristics of the specific brake emission of the carbon monoxide.



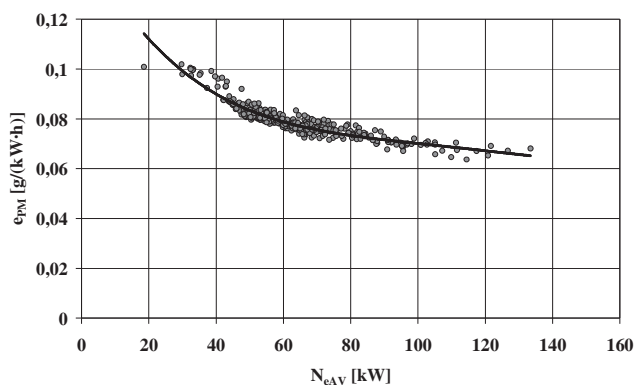
Rys. 24. Charakterystyka emisji jednostkowej węglowodorów.

Fig. 24. The characteristics of the specific brake emission of the hydrocarbons.



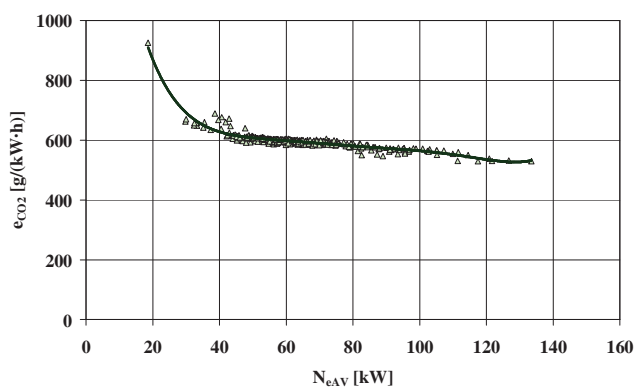
Rys. 25. Charakterystyka emisji jednostkowej tlenków azotu.

Fig. 25. The characteristics of the specific brake emission of the nitrogen oxides.



Rys. 26. Charakterystyka emisji jednostkowej cząstek stałych.

Fig. 26. The characteristics of the specific brake emission of the particulate matter.



Rys. 27. Charakterystyka emisji jednostkowej dwutlenku węgla.

Fig. 27. The characteristics of the specific brake emission of the carbon dioxide.

Regularność charakterystyk, wyznaczonych dla pseudoprzykładowych warunków pracy silnika spalinowego, wskazuje na trafność i skuteczność zaproponowanej metody. Wyznaczone w opracowany sposób charakterystyki mogą być m.in. wykorzystywane do symulacji emisji zanieczyszczeń z silników o zastosowaniach innych niż do napędu samochodów.

## 5. Podsumowanie

Mimo niewątpliwiej celowości poszukiwania rezerw poprawy jakości silników spalinowych przede wszystkim w warunkach odpowiadających rzeczywistemu użytkowaniu, a więc w warunkach dynamicznych, stan wiedzy w tym zakresie jest stosunkowo słabo usystematyzowany. Badania właściwości użytkowych silników spalinowych w warunkach dynamicznych dotyczą głównie zastosowań samochodowych. Wiedza zdobywana w ten sposób jest jednoznacznie użyteczna, wykorzystywana m.in. do bilansowania emisji zanieczyszczeń oraz oceny skuteczności podejmowania pro-

ekologicznych rozwiązań w transporcie samochodowym. Dla silników spalinowych o zastosowaniach innych niż samochodowe brak jest do tej pory zbiorów charakterystyk emisji zanieczyszczeń dla elementarnych kategorii silników. Dla silników samochodowych takie zbiory istnieją i są powszechnie wykorzystywane do m.in. prognozowania emisji zanieczyszczeń komunikacyjnych, oceny skuteczności podejmowanych działań proekologicznych w transporcie drogowym, czy też inwentaryzacji zanieczyszczeń [1, 26, 27].

Metoda przedstawiona w niniejszej pracy umożliwia skuteczne wyznaczanie emisji zanieczyszczeń z silników spalinowych pracujących w warunkach dynamicznych, nie ograniczając zastosowań silników tylko do zastosowań samochodowych. Dodatkowo opracowana metoda umożliwia rozszerzenie możliwości badawczych na warunki przypadkowe pracy silników, co pozwala na wykorzystanie bogatej i usystematyzowanej wiedzy na temat procesów stochastycznych [35].

Pierwsze próby wyznaczania charakterystyk emisji zanieczyszczeń z silnika o zapłonie samoczynnym, pracującego w warunkach dynamicznych, doprowadziły do uzyskania zachęcających wyników. Charakterystyki w postaci zależności emisji jednostkowej zanieczyszczeń od średniej mocy użytecznej silnika bez uwzględniania stanów o ujemnym momencie obrotowym, wyznaczone z zastosowaniem metody Monte Carlo, są regularne i niesprzeczne z dotychczasową wiedzą. Potwierdzeniem słuszności wyboru średniej mocy użytecznej silnika bez uwzględniania stanów o ujemnym momencie obrotowym jako wielkości charakteryzującej dynamiczne warunki pracy silnika jest mały rozrzut punktów charakterystyk, co jest uwidocznione silną korelacją zbiorów współrzędnych tych punktów.

### Literatura

- [1] CHŁOPEK Z.: Modelowanie procesów emisji spalin w warunkach eksploatacji trakcyjnej silników spalinowych. Prace Naukowe. Seria „Mechanika” z. 173. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 1999.
- [2] <http://www.dieselnet.com/standards/cycles/>.
- [3] MARECKA-CHŁOPEK E., CHŁOPEK Z.: Synteza testów do badań silników spalinowych maszyn roboczych. Rozdział w monografii „Uwarunkowania ekorozwoju rekreacji i turystyki”. Wydawnictwo Naukowe Gabriel Borowski. Lublin 2008.
- [4] BUWAL, INFRAS AG: Luftschadstoffemissionen des Strassenverkehrs 1950 – 2010. BUWAL–Bericht Nr. 255. 1995.
- [5] CHŁOPEK Z.: Metody badań ekologicznych właściwości silników spalinowych w warunkach przypadkowych. Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów Politechniki Warszawskiej 3(33)/99.
- [6] CHŁOPEK Z.: Metody badań właściwości silników spalinowych w warunkach przypadkowych modelujących użytkowanie. Archiwum Motoryzacji 4/2001.
- [7] CHŁOPEK Z.: Zastosowanie metody Monte Carlo do wyznaczania ekologicznych charakterystyk silników. Journal of KONES 1998.
- [8] INFRAS AG: Handbuch für Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs; Version 2.1; Bern 2004.
- [9] AJTAY D., WEILENMANN M.: Compensation of the exhaust gas transport dynamics for accurate instantaneous emission measurement. Environmental Science and Technology 2008. Vol. 38, No. 19, pp. 5141 – 5148.
- [10] AJTAY D., WEILENMANN M.: Static and dynamic instantaneous emission modeling. International Journal of Environment and Pollution 2004. Vol. 22, No. 3, pp. 226 – 239.

- [11] AYEB M, THEUERKAUF H.J., WINSEL T.: SI engine emissions model based on dynamic neural networks and D-optimality. SAE Technical Papers 2005-01-0019.
- [12] BORETTI A.A., WILL F., WATSON H.C., BREAR M.J., DINGLI R., VOICE G.: Comparison of static and dynamic engine models on the transient performance of passenger vehicle powertrain. FISITA paper no. F2008-12-287. FISITA Paper no. F2008-12-287.
- [13] BRANDT E., Y. WANG Y., GRIZZLE J.W.: Dynamic modeling of three-way catalyst for SI engine exhaust emission control. IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2000. 8(5), pp. 767-776.
- [14] CHŁOPEK Z., STASIAK P.: The analysis of an unrepeatability of cylinder pressure signal in internal combustion engines. Combustion Engines Nr 1/2005 (120).
- [15] CHŁOPEK Z., PAWLICKI M., SYPOWICZ R.: Analiza statystyczna natężeń emisji zanieczyszczeń z silnika spalinowego w warunkach symulujących użytkowanie dynamiczne. Archiwum Motoryzacji 1/2005.
- [16] CHŁOPEK Z.: Badania warunków pracy silnika spalinowego w czasie rzeczywistego użytkowania w autobusie miejskim. Archiwum Motoryzacji 1/2007.
- [17] CHŁOPEK Z.: Testing of non-repeatability of pollution emission from motor-car engines. Combustion Engines Nr 1/2004 (118).
- [18] DE HAAN P., KELLER M.: Modelling fuel consumption and pollutant emissions based on real-world driving patterns: the HBEFA approach. International Journal of Environment and Pollution 2004 – Vol. 22, No.3 pp. 240 – 258.
- [19] DOBNER, D.J.: Dynamic engine models for control development-Part I: Nonlinear and linear model formulation. International Journal of Vehicle Design 1983. SP4, pp. 54 – 74.
- [20] HAFNER M.: Steps Towards an optimization of the dynamic emission behavior of IC engines: Measurement Strategies – Modelling – Model-Based Optimization. SAE Technical Papers 2001-01-1793.
- [21] HAGENA J.R., FILIPI Z.S., ASSANIS D.N.: Transient diesel emissions: analysis of engine operation during a tip-in. Journal & Paper No. SAE 2006-01-1151.
- [22] HAUSBERGER S., REXEIS M.: Emission behaviour of modern heavy duty vehicles in real world driving. International Journal of Environment and Pollution 2004 – Vol. 22, No.3 pp. 275 – 286.
- [23] ISERMANN R., HAFNER M.: Mechatronic combustion engines – from modeling to optimal control. European Journal of Control. 2001. Vol. 7, pp. 220 – 247.
- [24] MENSINK C., COSEMANS G., PELKMANS L.: Dynamic modelling of transient emissions and concentrations from traffic in street canyons. International Journal of Environment and Pollution 2005 – Vol. 25, No.1/2/3/4 pp. 118 – 130.
- [25] SAMULSKI M. J., JACKSON C. C.: Effects of steady-state and transient operation on exhaust emissions from nonroad and highway diesel engines. SAE Papers 982044.
- [26] STURM P.J., HAUSBERGER S., KELLER M., DE HAAN P.: Estimating real world emissions from passenger cars – use and limitations of instantaneous emission data. International Journal of Vehicle Design 2000 – Vol. 24, No.1 pp. 19 – 33.
- [27] STURM P.J., KIRCHWEGER G., HAUSBERGER S., ALMBAUER R.A.: Instantaneous emission data and their use in estimating road traffic emissions. International Journal of Vehicle Design 1998 – Vol. 20, No.1/2/3/4 pp. 181 – 191.
- [28] WATSON H.C., MILKINS E.E., PRESTON M.O., CHITTLEBOROUGH C., ALIMORADIAN B.: Predicting fuel consumption and emissions – transferring chassis dynamometer results to real driving conditions. SAE Paper. 830435.
- [29] WEILENMANN M., BACH CH., RUDY C.: Aspects of instantaneous emission measurement. International Journal of Vehicle Design 2001 – Vol. 27, No.1/2/3/4, pp. 94-104.
- [30] WEILENMANN M., SOLTIC P., AJTAY D.: Describing and compensating gas transport dynamics for accurate instantaneous emission measurements. Atmospheric Environment. Vol. 37, pp. 5137 – 5145, 2003.
- [31] ZHANG J., MORAWSKA L.: Combustion sources of particles: Emission factors and measurement methods. 2002 Elsevier Science Ltd.

- [32] METROPOLIS N., ULAM S.: The Monte Carlo method. *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 44, No. 247 (Sep., 1949), pp. 335 – 341.
- [33] CHŁOPEK Z., DARKOWSKI A., PIASECZNY L.: Influence of metalloorganic additive to the fuel on the pollution emission from the SI engine. *Polish Journal of Environmental Studies*. Vol. 14, No 5(2005). 559 – 567.
- [34] SAVITZKY A., GOLAY M.J.E.: Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Analytical Chemistry*. 1964. 36: 1627 – 1639.
- [35] SOBZYK K.: *Metody dynamiki statystycznej*. PWN. Warszawa 1973.

### **The proposal of characteristics of the pollutant emission from internal combustion engines in dynamic conditions**

#### **S u m m a r y**

The conception of characteristics of the pollutant emission from internal combustion engines in dynamic conditions has been presented in the paper. The suggested solution is referring to pollutant characteristics from car engines in dynamic conditions in the form of the dependence of the pollutants specific distance emission on the vehicle average velocity. As characteristics of the pollutants emission from internal combustion engines in dynamic conditions is proposed the dependence of the pollutant specific brake emission on the average of the engine power without the engine states with the negative torque. The suggested characteristics of the pollutants emission were appointed with the application of the Monte Carlo method for the self-ignition engine Detroit Diesel Series 50.