

Modeling of particulate matter parameters for passenger cars under real traffic conditions

Abstract: In the paper models of mass, number and diameters of particulate matter generated by vehicles fitted with diesel engines have been determined. The author presents new possibilities of application of the values characterizing the vehicle traffic conditions for the identification of the particulate matter parameters. For the description of the vehicle operating conditions two-dimensional histograms have been used that include the values of vehicle speed and acceleration and its time of operation under actual traffic conditions. The result of these actions is the proposal of mathematical models describing the basic properties of particulate matter (its mass, number and diameters) under different operating conditions of passenger vehicles. The created models of particulate matter parameters using the input parameters obtained in the dynamic conditions have been treated with priority. Such research, a pioneer one to date, has been carried out for light duty vehicles and then the correctness of the obtained models has been confirmed of the particulate matter parameters by a validation on vehicles other than those used for the creation of the models.

Keywords: *particle mass, particle number, real traffic conditions*

Modelowanie parametrów cząstek stałych z samochodów osobowych w rzeczywistych warunkach ruchu

Streszczenie: W artykule wyznaczono modele masy, liczby i średnicy cząstek stałych emitowanych z pojazdów wyposażonych w silniki o zapłonie samoczynnym. Przedstawiono nowe możliwości wykorzystania wartości charakteryzujących warunki ruchu pojazdu do identyfikacji parametrów cząstek stałych. Do opisu warunków pracy pojazdu wykorzystano dwuwymiarowe histogramy, które ujmują wartości prędkości i przyspieszenia pojazdu oraz czasu jego pracy w rzeczywistych warunkach ruchu. Wynikiem tych działań jest propozycja modeli matematycznych opisujących podstawowe właściwości cząstek stałych (ich masę, liczbę i średnicę) w różnych warunkach pracy samochodów osobowych. Tworzone modele parametrów cząstek stałych wykorzystujące parametry wejściowe uzyskane w warunkach dynamicznych potraktowano priorytetowo. Badania takie, niewykonywane dotychczas, wykonano dla pojazdów lekkich, a następnie dowiedziono poprawności uzyskanych modeli parametrów cząstek stałych przez weryfikację, do której wykorzystano inne pojazdy niż użyte do tworzenia odpowiednich modeli.

Słowa kluczowe: *masa cząstek stałych, liczba cząstek stałych, rzeczywiste warunki ruchu*

1. Wprowadzenie

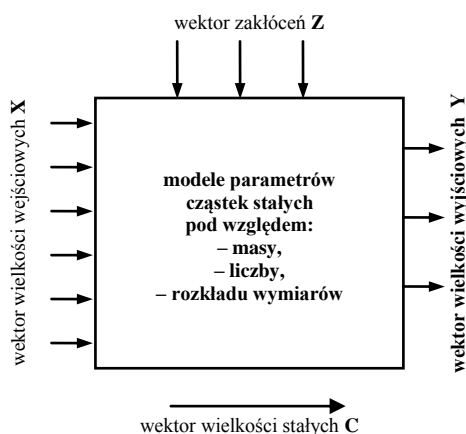
Rozwój techniki we wszystkich dziedzinach przemysłu powoduje konieczność ograniczania jego negatywnego wpływu na środowisko naturalne. Stosowanie zaawansowanych technik i ich rozwój zmuszają do ciągłej weryfikacji warunków pracy maszyn i urządzeń oraz analizy skutków ich oddziaływania na środowisko naturalne i cywilizacyjne człowieka. Motoryzacja jest uznawana za dziedzinę rozwijającą się bardzo dynamicznie; to powoduje konieczność ograniczania przede wszystkim emisji szkodliwych składników spalin. Istotnym zagrożeniem dla ludzi jest emisja cząstek stałych, stanowiąca barierę rozwoju współczesnych silników spalinowych, w szczególności silników o bezpośrednim wtrysku paliwa. Ważnym wyzwaniem dla producentów samochodów są projekty kolejnych norm toksyczności, według których poziom emisji cząstek stałych powinien być wielokrotnie mniejszy od dotychczasowego.

2. Modele parametrów cząstek stałych

2.1. Założenia wstępne

We współczesnych badaniach empirycznych silników spalinowych (ze względu na szeroki zakres ich stosowania), polegających na poszukiwaniu zależności między charakteryzującymi je wielkościami, coraz szerzej wykorzystuje się teorię planowania doświadczeń [1, 2, 3, 4, 5]. Opierając się na tych przesłankach, budowę modelu matematycznego realizowano, zakładając jego strukturę, a następnie zidentyfikowano jego parametry. Badania modelu umożliwiły sformułowanie wniosków o poziomie ogólności wyższym od uzyskanego przy interpretacji wyników pomiarów. W szczególności było możliwe dokonanie nie tylko analizy pierwiastkowej modelu, ale również analizy jego wrażliwości [6, 7]. Zidentyfikowano modele emisji cząstek stałych, wyznaczając ich charakterystyki na podstawie wielkości wejściowych i wyjściowych.

Wyróżniono wektor wielkości wejściowych X (rys. 1), wpływających na wektor wyjściowy Y – parametry cząstek stałych zawartych w spalinach. Uwzględniono również możliwy wpływ na emisję cząstek stałych wektora wielkości stałych C , których wartości nie zmieniają się podczas eksperymentu (wpływ ten wynikał np. z rodzaju zastosowanego oleju smarowego itp.) oraz wektor wielkości zakłócających Z , czyli wielkości, które mogą ulegać zmianie, np. temperatura, ciśnienie i wilgotność względna powietrza otaczającego oraz inne wielkości, nieuwzględnione w modelu w jawny sposób.



Rys. 1. Wielkości charakterystyczne uwzględnione w eksperymencie

W badaniach wykonywanych w warunkach zbliżonych do warunków otoczenia, jest możliwe przyjęcie założenia o pominięciu w rozważaniach wielkości zakłócających. Emisja substancji toksycznych z silników spalinowych zalicza się do procesów szczególnie silnie zależnych od warunków pracy silnika oraz od wielu innych czynników: konstrukcyjnych, eksploatacyjnych, warunków zewnętrznych itd. [6]. W rozpatrywanych badaniach zgodność z założeniem o pominięciu wielkości zakłócających zapewniono przez weryfikację (powtórzenia) pomiarów w porównywalnych warunkach.

Wielkości stałe, ze względu na ich niezmienny wpływ na wielkości wyjściowe, nie są uwzględniane w jakościowej analizie modelu obiektu badań.

Dokładności pomiaru poszczególnych wielkości były zgodne z normą ISO 8178-2 i dla mierzonych wielkości wynosiły: dla momentu obrotowego i prędkości obrotowej $\pm 0,5\%$; dla stężenia dwutlenku węgla, tlenku węgla, węglowodorów i tlenków azotu $\pm 1\%$; dla stopnia recyrkulacji spalin ± 1 .

Wielkości charakteryzujące pracę silnika określono na podstawie danych bieżących odczytywanych z pokładowego systemu diagnostycznego lub z układu sterowania silnikiem. Parametry emisyjne – stężenie związków szkodliwych i parametry cząstek stałych –

mierzono aparaturą zgodną z wymaganiami odpowiedniej normy.

Wektor wielkości wejściowych do opracowania modeli parametrów cząstek stałych emitowanych w rzeczywistych warunkach ruchu obejmował:

- prędkość pojazdu v [m/s],
- przyspieszenie pojazdu a [m/s²],
- prędkość obrotową silnika n [obr/min],
- współczynnik obciążenia silnika Z [%],

wyrażony jako $M_o/M_{o, \max}$ przy danej prędkości obrotowej silnika (obciążenie silnika odczytane z systemu diagnostycznego, podawane w procentach, według SAE International: Surface Vehicle Standard J1979: E/E Diagnostic Test Modes jest to obciążenie obliczone na podstawie chwilowego masowego natężenia przepływu paliwa do masowego natężenia przepływu paliwa przy pełnym otwarciu przepustnicy odniesione do warunków normalnych lub określane jako chwilowa wartość momentu obrotowego do wartości maksymalnej momentu obrotowego dla danej prędkości obrotowej odniesiona do warunków normalnych),

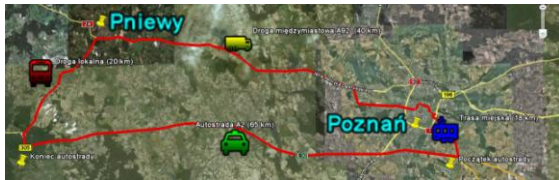
- stężenie dwutlenku węgla c_{CO_2} [%],
- stężenie tlenku węgla c_{CO} [ppm],
- stężenie węglowodorów c_{HC} [ppm],
- stężenie tlenków azotu c_{NO_x} [ppm].

Wektor wielkości wyjściowych obejmował następujące parametry cząstek stałych w spalinach:

- stężenie masowe cząstek stałych c_{PM} [mg/m³],
- stężenie liczbowe cząstek stałych c_{PN} [1/cm³],
- średnicę charakterystyczną cząstek stałych D [nm].

2.2. Obiekty badań i aparatura pomiarowa

Rejestracji parametrów wejściowych do stworzonych modeli dokonano podczas trwających ok. 5 h trzykrotnych przejazdów w różnych warunkach drogowych; udziały czasowe: 25% – jazda miejska, 50% – jazda pozamiejska, 25% – jazda autostradowa. Odcinek pomiarowy z punktami charakterystycznymi przedstawiono na rys. 2. Rejestrowane dane uśredniano w poszczególnych przedziałach prędkości i przyspieszenia pojazdu, zgodnie z procedurą tworzenia dwuwymiarowych histogramów. Obiektem, na którym dokonano pomiarów był samochód osobowy z silnikiem ZS (parametry podano w tab. 1), z zainstalowaną aparaturą służącą do pomiaru związków gazowych, parametrów cząstek stałych oraz z układem akwizycji danych z pokładowego systemu diagnostycznego (rys. 3).



Rys. 2. Najważniejsze punkty charakterystyczne trasy, na której rejestrowano dane na potrzeby tworzenia modeli parametrów cząstek stałych w rzeczywistych warunkach ruchu

Tabela 1. Parametry silnika pojazdu lekkiego jako obiektu badawczego

Parametr	Opis/wartość
Silnik	4-cyl., rzędowy, 16 zaworów
Objętość skokowa	1248 cm ³
Moc maksymalna	51 kW przy 4000 obr/min
Maksymalny moment obrotowy	180 N·m przy 1750 obr/min
Przebieg pojazdu	25 000 km
Protokół diagnostyczny	ISO 14230
Norma toksyczności spalin	Euro 4
Urządzenia oczyszczające spaliny	reaktor utleniający

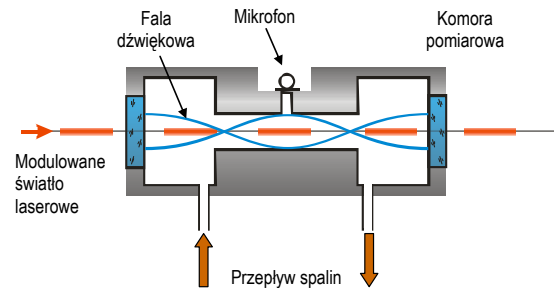


Rys. 3. Pojazd z zamontowaną aparaturą do pomiaru związków toksycznych i parametrów cząstek stałych

Do wyznaczania masy cząstek stałych stosowano analizator Micro Soot Sensor firmy AVL łącznie z układem kondycjonowania próbki – układem rozcieńczania spalin [11]. Zasada działania tego układu jest oparta na pomiarze fotoakustycznym (rys. 4) w tzw. rezonansowej komorze pomiarowej. Umożliwia ona detekcję stężenia cząstek stałych od 5 mg/m³. Gazy spalinowe dostarczane są bezpośrednio do komory pomiarowej i podgrzewane modulowanym światłem laserowym. Prowadzi to do periodycznych pulsacji ciśnienia, które są odbierane na detektorze – mikrofonie jako fala dźwiękowa. Następnie sygnał podlega wzmocnieniu i odfil-

trowaniu (podstawowe dane urządzenia przedstawiono w tab. 2).

Do pomiaru stężenia liczbowego cząstek stałych zastosowano licznik cząstek stałych AVL 489, zgodny z wymaganiami PMP. Urządzenie jest wyposażone w sondę pomiarową oraz układ rozcieńczania próbki spalin czystym powietrzem (rys. 5). Na podstawie pomiaru stężenia liczbowego cząstek stałych (rys. 6, podstawowe dane przedstawiono w tab. 3) łącznie z pomiarem masowego natężenia przepływu spalin określano całkowitą liczbę cząstek stałych w spalinach.



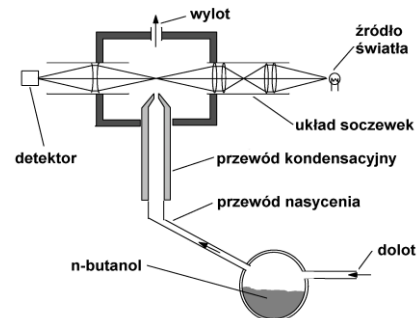
Rys. 4. Schemat działania analizatora AVL 483 Micro Soot Sensor [97]

Tabela 2. Dane techniczne analizatora cząstek stałych AVL MSS 483 [97]

Parametr	Wartość
Zakres pomiaru	0÷50 mg/m ³
Rozdzielczość	0,001 mg/m ³
Stopień rozcieńczenia	5000
Pobór próbki spalin	0,12 m ³ /h
Warunki pracy	5÷45°C, 0÷95% wilgotności



Rys. 5. Układ rozcieńczania spalin wykorzystywany w liczniku cząstek stałych [12]



Rys. 6. Schemat działania licznika cząstek stałych AVL 489 [12]

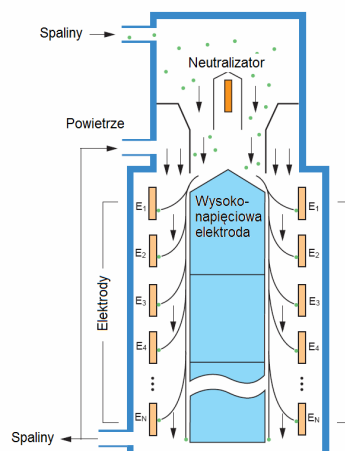
Cząstki stałe są kierowane z układu rozcieńczania, który utrzymuje również stałą temperaturę próbki, do ogrzewanego saturatora (39°C), w którym następuje nasycenie cząstek n-butanolem. W przewodzie kondensacyjnym pary n-butanolu są schładzane do temperatury 22°C (stają się wtedy przesycone i mogą się wykraplać na cząstkach stałych). W wyniku otoczenia cząstek n-butanolem otrzymuje się krople o średnicy 11,3÷12,3 µm (nowsze rozwiązania liczników, w których wykorzystuje się wodę zamiast n-butanolu, generują krople o średnicy ok. 2 µm). Krople takie są kierowane do laserowego układu zliczającego (przejście kropli przez układ pomiarowy powoduje rozproszenie promieniowania). Układ zliczający ma temperaturę 40°C, co zapobiega skraplaniu się n-butanolu na soczewkach i zmniejszaniu dokładności pomiarów.

Tabela 3. Dane techniczne licznika cząstek stałych firmy AVL 489 (particle counter) [12]

Parametr	Wartość
Zakres działania	0÷10 000 1/cm ³
Dolny limit pomiarowy	≤ 0,1 1/cm ³
Czas odpowiedzi	5 s
Przepływ próbki	0,06÷0,3 m ³ /h
Natężenie przepływu powietrza	1,8 m ³ /h
Warunki pracy urządzenia	0÷40°C
Temperatura spalin	< 200 °C

Do pomiaru wymiarów średnic cząstek stałych wykorzystano spektrometr masowy firmy TSI Incorporated – EEPS 3090 (engine exhaust particle sizer™ spectrometer). Umożliwia on pomiar dyskretnego zakresu średnic cząstek (od 5,6 nm do 560 nm) na podstawie ich zróżnicowanej prędkości (rys. 7). Zakres elektrycznej ruchliwości cząstek stałych jest zmieniany wykładniczo, a pomiar ich wielkości odbywa się z częstotliwością 10 Hz (podstawowe dane zawarto w tab. 4). Spaliny są kierowane przez układ rozcieńczający i układ utrzymujący wymaganą temperaturę do spektrometru masowego. Filtr wstępny zatrzymuje cząstki o średnicy większej niż 1 µm, będące poza zakresem pomiarowym urządzenia. Po przejściu przez neutralizator cząstki są kierowane na elektrodę ładującą; po uzyskaniu ładunku elektrycznego będą mogły być sklasyfikowane według wielkości. Cząstki odchylane przez wysokonapięciową elektrodę trafiają na szczelinę pierścieniową, będącą przestrzenią między dwoma cylindrami. Szczelinę otacza doprowadzane z zewnątrz czyste powietrze. Cylinder wylotowy jest zbudowany w formie stosu odizolowanych od siebie czułych elektrod ułożonych w formie pierścienia. Występujące między cylindrami pole elektryczne powoduje odpychanie cząstek od dodatnio

naładowanej elektrody; następnie cząstki te gromadzą się na zewnętrznych elektrodach. Uderzając w elektrody, cząstki powodują wytwarzanie prądu, który jest odczytywany przez układ przetwarzający.



Rys. 7. Schemat działania analizatora rozkładu cząstek stałych EEPS 3090

Tabela 4. Dane techniczne spektrometru masowego EEPS 3090 firmy TSI [13]

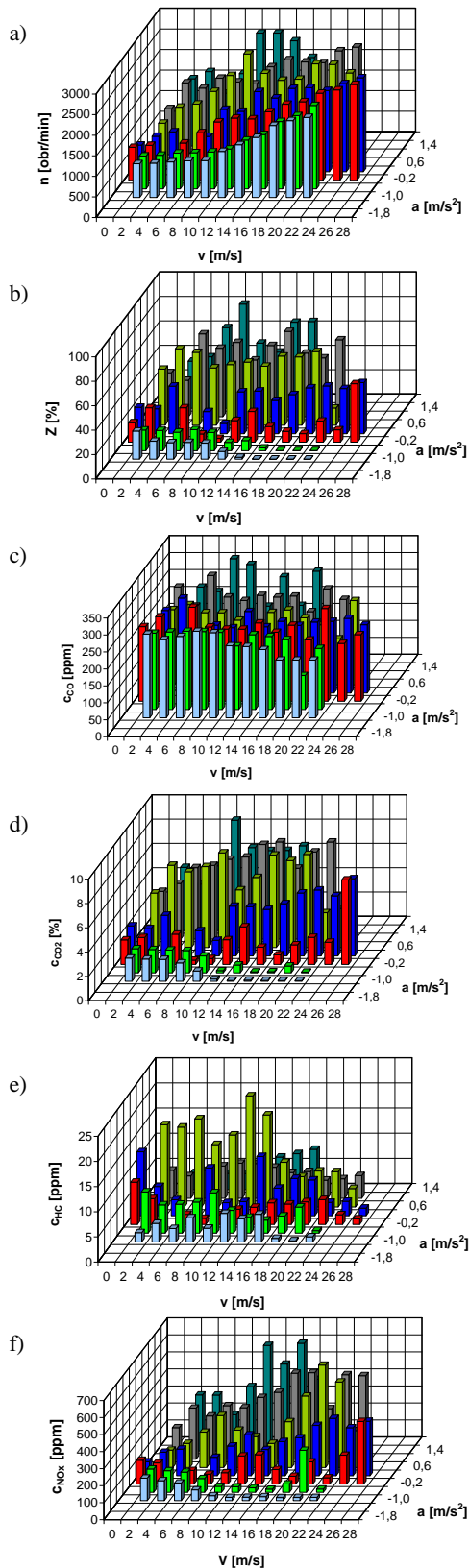
Parametr	Wartość
Wymiar mierzonych cząstek	5,6÷560 nm
Dostępne charakterystyki cząstek zależne od ich średnicy	PN = f(D), A = f(D), V = f(D), m = f(D) (dla ρ = 1 g/cm ³)
Liczba kanałów pomiarowych	16 kanałów na dekadę (łącznie 32)
Częstotliwość odczytu	10 Hz
Przyptyw sprężonego powietrza	2,4 m ³ /h
Przepływ próbki spalin	0,6 m ³ /h
Zakres wymaganego ciśnienia wewnątrz kolumny	700÷1034·10 ² Pa
Temperatura próbki	10÷52°C
Temperatura pracy urządzenia	0÷40°C

PN – liczba cząstek stałych, D, A, V, M – odpowiednio: średnica, powierzchnia, objętość i masa cząstek stałych, ρ – gęstość cząstek stałych

2.3. Modele parametrów cząstek stałych dla samochodów osobowych

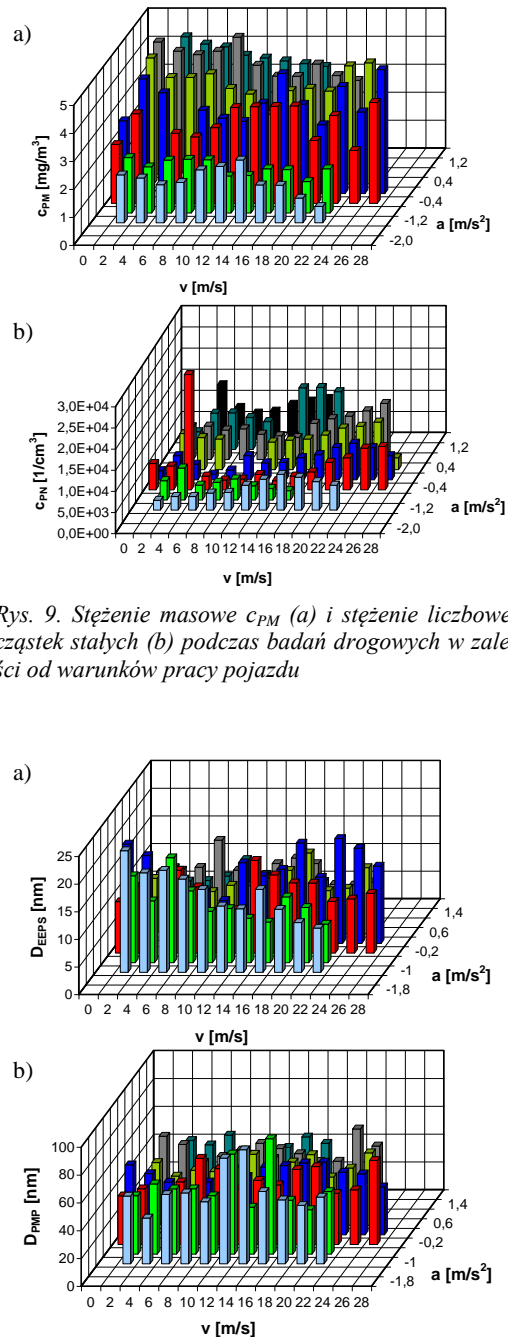
Do tworzenia modeli parametrów cząstek stałych wykorzystano następujące dane wejściowe (charakterystyki) zależne od prędkości i przyspieszenia pojazdu (rys. 8):

- prędkość obrotową silnika n [obr/min],
- współczynnik obciążenia silnika Z [%],
- stężenie dwutlenku węgla c_{CO2} [%],
- stężenie tlenku węgla c_{CO} [ppm],
- stężenie węglowodorów c_{HC} [ppm],
- stężenie tlenków azotu c_{NOx} [ppm].

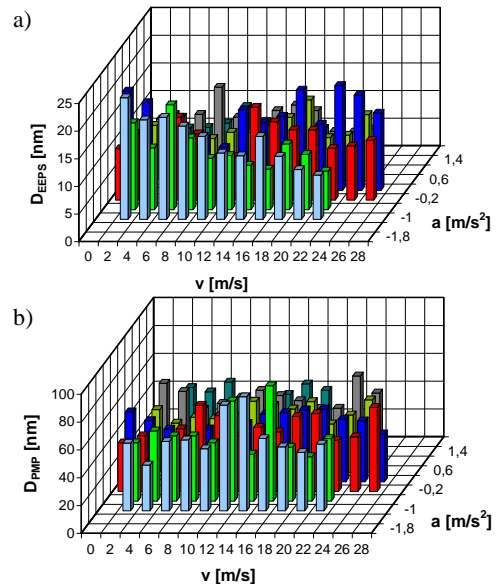


Rys. 8. Zbiory danych wejściowych do tworzenia modeli parametrów cząstek stałych emitowanych z silników w rzeczywistych warunkach ruchu jako ich charakterystyki we współrzędnych: prędkość pojazdu i jego przyspieszenie: a) prędkość obrotowa silnika, b) obciążenie silnika, c) stężenie tlenku węgla, d) stężenie dwutlenku węgla, e) stężenie węglowodorów, f) stężenie tlenków azotu

Wielkościami wyjściowymi były parametry cząstek stałych: stężenie masowe c_{PM} , stężenie liczbowe c_{PN} oraz średnica charakterystyczna D . Pierwsze dwie charakterystyki prezentowano na rys. 9, a charakterystyki średnic przedstawiono w dwóch wariantach: jako pomiar wszystkich cząstek – oznaczony D_{EEPS} oraz jako pomiar zgodny z protokołem PMP (tylko dla zakresu średnic cząstek większych niż 23 nm) – oznaczony jako D_{PMP} (rys. 10).



Rys. 9. Stężenie masowe c_{PM} (a) i stężenie liczbowe c_{PN} cząstek stałych (b) podczas badań drogowych w zależności od warunków pracy pojazdu



Rys. 10. Średnica charakterystyczna cząstek stałych (jako zbiór danych wyjściowych) zmierzona w rzeczywistych warunkach ruchu: a) pomiar wszystkich cząstek, b) pomiar cząstek o średnicy większej niż 23 nm – zgodnie z programem PMP

Dla tak przygotowanych danych wejściowych wyznaczono funkcje aproksymacyjne (modele) parametrów cząstek stałych w rzeczywistych warunkach ruchu. Otrzymano następujące zależności funkcyjne, opisujące:

– stężenie masowe cząstek stałych c_{PM} [mg/m^3]:

$$c_{PM} = 1,05 \cdot \frac{(a+2)^{0,672} \cdot n^{0,052} \cdot Z^{0,082} \cdot c_{CO}^{0,092}}{v^{0,014} \cdot c_{CO_2}^{0,016} \cdot c_{HC}^{0,035} \cdot c_{NO_x}^{0,037}}$$

– stężenie liczbowe cząstek stałych c_{PN} [$1/cm^3$] (pomiar wszystkich cząstek):

$$c_{PN} = 1,06 \cdot \frac{v^{0,022} \cdot n^{0,45} \cdot Z^{0,42} \cdot c_{CO}^{0,56} \cdot c_{HC}^{0,18} \cdot c_{NO_x}^{0,44}}{(a+2)^{0,093} \cdot c_{CO_2}^{0,84}}$$

– stężenie liczbowe cząstek stałych c_{PN} [$1/cm^3$] (pomiar według wytycznych dla programu PMP; liczone są cząstki o średnicy większej niż 23 nm):

$$c_{PN(PMP)} = 1,06 \cdot \frac{(a+2)^{0,17} \cdot n^{0,61} \cdot Z^{0,15} \cdot c_{CO}^{0,22}}{v^{0,006} \cdot c_{CO_2}^{0,41} \cdot c_{HC}^{0,053} \cdot c_{NO_x}^{0,42}}$$

– średnicę charakterystyczną cząstek stałych D [nm] (pomiar wszystkich cząstek):

$$D = 1,06 \cdot \frac{n^{0,051} \cdot Z^{0,081} \cdot c_{CO}^{0,36} \cdot c_{NO_x}^{0,28}}{v^{0,065} \cdot (a+2)^{0,70} \cdot c_{CO_2}^{0,16} \cdot c_{HC}^{0,032}}$$

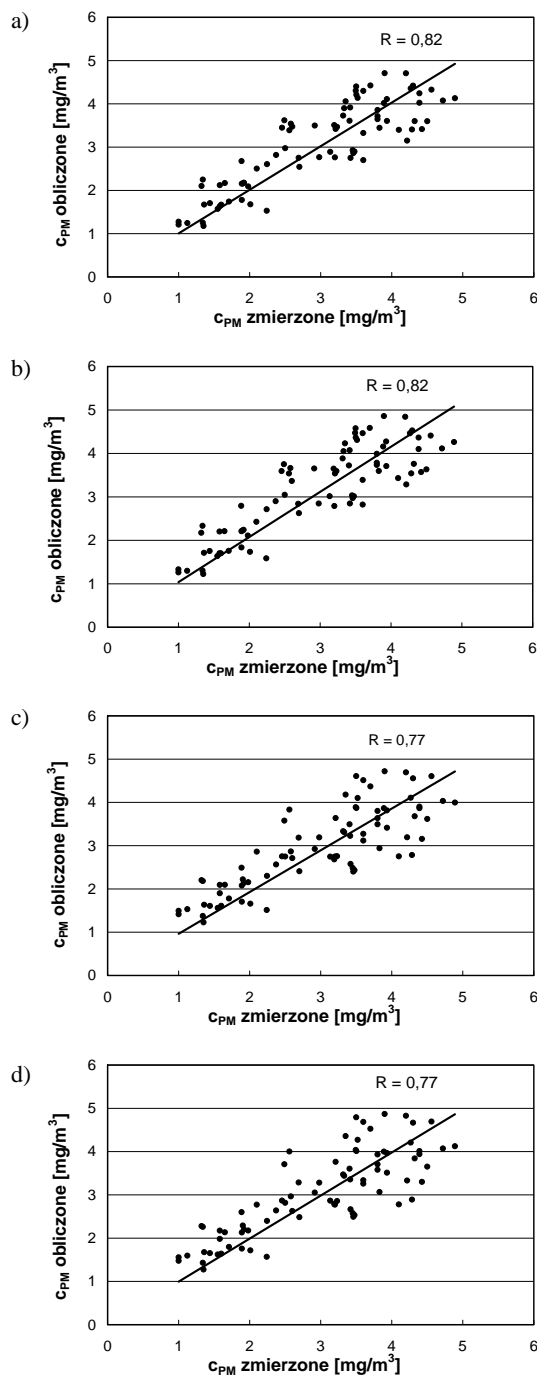
– średnicę charakterystyczną cząstek stałych D [nm] (pomiar według wytycznych dla programu PMP, uwzględnione są cząstki o średnicy większej niż 23 nm):

$$D_{PMP} = 1,03 \cdot \frac{v^{0,005} \cdot n^{0,15} \cdot Z^{0,17} \cdot c_{CO}^{0,32} \cdot c_{HC}^{0,067} \cdot c_{NO_x}^{0,164}}{(a+2)^{0,056} \cdot c_{CO_2}^{0,37}}$$

Po otrzymaniu zależności funkcyjnych oceniono ich adekwatność na podstawie wartości współczynnika korelacji między wynikami badań rzeczywistych a wynikami obliczeń z użyciem modeli.

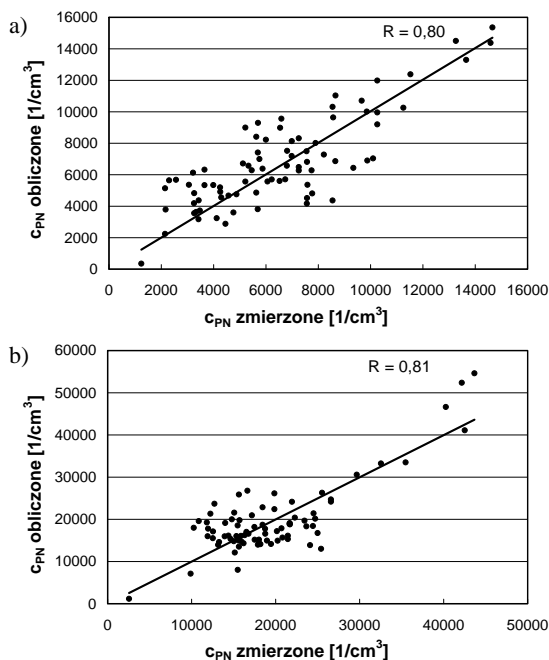
Uzyskana wartość współczynnika korelacji ($R = 0,82$ dla modelu stężenia masowego cząstek stałych wykorzystujących wszystkie dane wejściowe) jest większa od założonej wartości 0,5, w związku z czym można uznać adekwatność wyznaczonego modelu opisującego stężenie masowe cząstek stałych (rys. 11a). Ponieważ wyznaczona zależność funkcyjna zawiera dane wejściowe z wykładnikiem potęgowym o bardzo małej wartości, dokonano również oceny tego modelu bez uwzględnienia prędkości pojazdu i stężenia dwutlenku węgla (mały wpływ na wartość wynikową). Wyznaczone zależności między zmierzonymi i obliczonymi wartościami stężenia masowego cząstek stałych (rys. 11b, c, d) charakteryzują się coraz mniejszą wartością współczynnika korelacji. Brak uwzględnienia tylko prędkości pojazdu nie wpływa znaczą-

co na ten wskaźnik, natomiast jednoczesne pominięcie prędkości pojazdu i stężenia dwutlenku węgla powoduje zmniejszenie współczynnika korelacji o ponad 10% i zwiększenie przedziału zmienności między zmierzonymi i obliczonymi wartościami stężenia masowego cząstek stałych.



Rys. 11. Porównanie zmierzonych wartości stężenia cząstek stałych i obliczonych z użyciem wzoru (1): a) z uwzględnieniem wszystkich danych wejściowych, b) bez uwzględnienia prędkości pojazdu, c) bez uwzględnienia stężenia dwutlenku węgla, d) bez uwzględnienia stężenia dwutlenku węgla i prędkości pojazdu

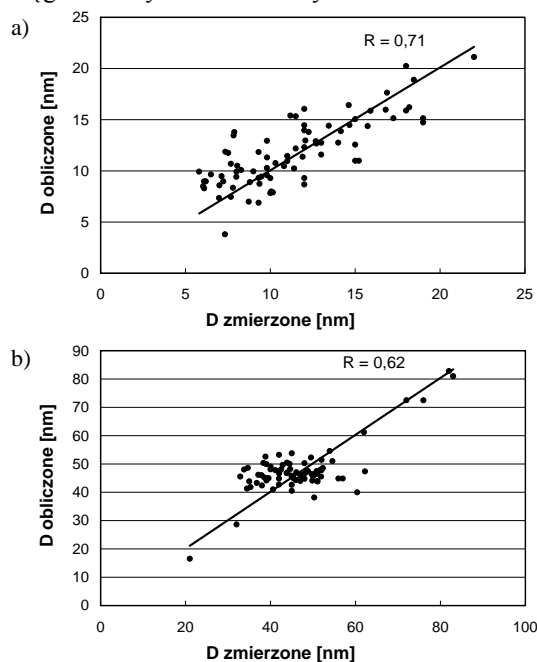
Podobne porównania wykonano dla stężenia liczbowego i średnicy charakterystycznej cząstek stałych. Jednakże uwzględniono także możliwości pomiaru aparatury badawczej, dokonując pomiaru wszystkich cząstek (cały zakres średnic) oraz pomiaru cząstek o średnicach większych niż 23 nm, zgodnie z programem PMP. Porównanie wartości stężenia liczbowego cząstek stałych uzyskanych dwiema metodami pomiarowymi i obliczonych z użyciem wzorów (2) i (3) pozwala na stwierdzenie podobnych współczynników korelacji, jednak znacznie zróżnicowanych wartości (rys. 12). W pomiarach stężenia liczbowego cząstek o średnicach większych niż 23 nm uzyskuje się mniejsze wartości tego parametru, co jest wynikiem nie tylko uwzględnienia cząstek o większych średnicach, ale również wykorzystywania systemu (według wymogów programu PMP) odparowania lekkich frakcji węglowodorów osadzonych na cząstkach stałych.



Rys. 12. Porównanie stężenia liczbowego cząstek stałych zmierzonych i obliczonych: a) z uwzględnieniem wszystkich cząstek stałych, b) zgodnie z metodyką programu PMP

Postępując podobnie do wykonanej poprzednio analizy, wyniki pomiaru charakterystycznej średnicy cząstek stałych zaprezentowano dla dwóch przypadków wymienionych poprzednio (rys. 13). Znamienny jest zakres średnicy charakterystycznej wynoszący ok. 5÷20 nm – uzyskany w wyniku pomiarów wszystkich cząstek stałych, oraz zakres 40÷60 nm – uzyskany w wyniku pomiarów według programu PMP. Na podstawie tego porównania można wnioskować, że w spalinach najwięcej jest cząstek o najmniejszych średnicach, przy czym

mogą to być również inne związki, m.in. węglowodory w stanie ciekłym.



Rys. 13. Porównanie średnic charakterystycznych cząstek stałych zmierzonych i obliczonych: a) z uwzględnieniem wszystkich cząstek stałych, b) zgodnie z metodyką programu PMP

3. Ocena wyników modelowania dla pojazdów lekkich

Modele parametrów cząstek stałych poddano weryfikacji, aby ocenić ich przydatność w badaniach drogowych pojazdów. Duża zmienność warunków pomiarów oraz uzyskiwanych wyników (wartości parametrów cząstek stałych), a także z jednej strony łatwość odczytu wartości chwilowych parametrów wejściowych do modeli, a z drugiej dużo mniejsza dostępność aparatury do pomiaru cząstek stałych (jest ona kilkakrotnie droższa od aparatury do pomiaru związków gazowych) potwierdzają zasadność i konieczność przyszłego stosowania opracowanych modeli.

Wykorzystanie zależności opisujących parametry cząstek stałych emitowanych z pojazdów w rzeczywistych warunkach ruchu pozwoliło na porównanie ich wartości z wartościami zmierzonymi zarówno dla pojazdów lekkich, jak i ciężkich. Pojazdy przystosowano do pomiarów związków szkodliwych oraz cząstek stałych, tak aby spełniały wymagania tworzenia modeli, jednakże w celu uogólnienia wyników weryfikacji modeli pomiaru wykonano na różnych odcinkach badawczych – o innej charakterystyce natężenia ruchu drogowego. Obiektem służącym do weryfikacji uzyskanych modeli dla pojazdów lekkich był samochód osobowy z silnikiem ZS (rys. 14) o przebiegu 15 000 km (parametry techniczne – tab. 5), spełniający normę Euro 4.

Dodatkowym aspektem wykonanych pomiarów była możliwość porównania masy cząstek stałych uzyskanych z modeli oraz nowego systemu pomiaru tej wielkości, urządzenia Semtech PPMD (*portable particulate measurement device*). Podczas weryfikacji rejestrowano następujące wielkości (w nawiasie podano wykorzystaną aparaturę badawczą):



Rys. 14. Pojazd spełniający normę Euro 4 – obiekt badań służący do weryfikacji modeli parametrów cząstek stałych emitowanych z pojazdów osobowych (a) wraz z zamontowaną aparaturą badawczą (b)

Tabela 5. Pojazd i silnik wykorzystywane do weryfikacji modeli emisji cząstek stałych z pojazdów lekkich – parametry techniczne

Parametr	Opis/wartość
Rodzaj pojazdu	samochód osobowy
Silnik	4-cyl., 16 zaworów
Objętość skokowa	2231 cm ³
Moc maksymalna	110 kW
Maks. moment obrotowy	340 N·m
Przebieg pojazdu	15 000 km
Protokół diagnostyczny	CAN 2.0
Norma toksyczności spalin	Euro 4
Oczyszczanie spalin	reaktor utleniający

– składniki gazowe spalin (mobilny analizator spalin Semtech DS firmy Sensors) – rys. 15a,

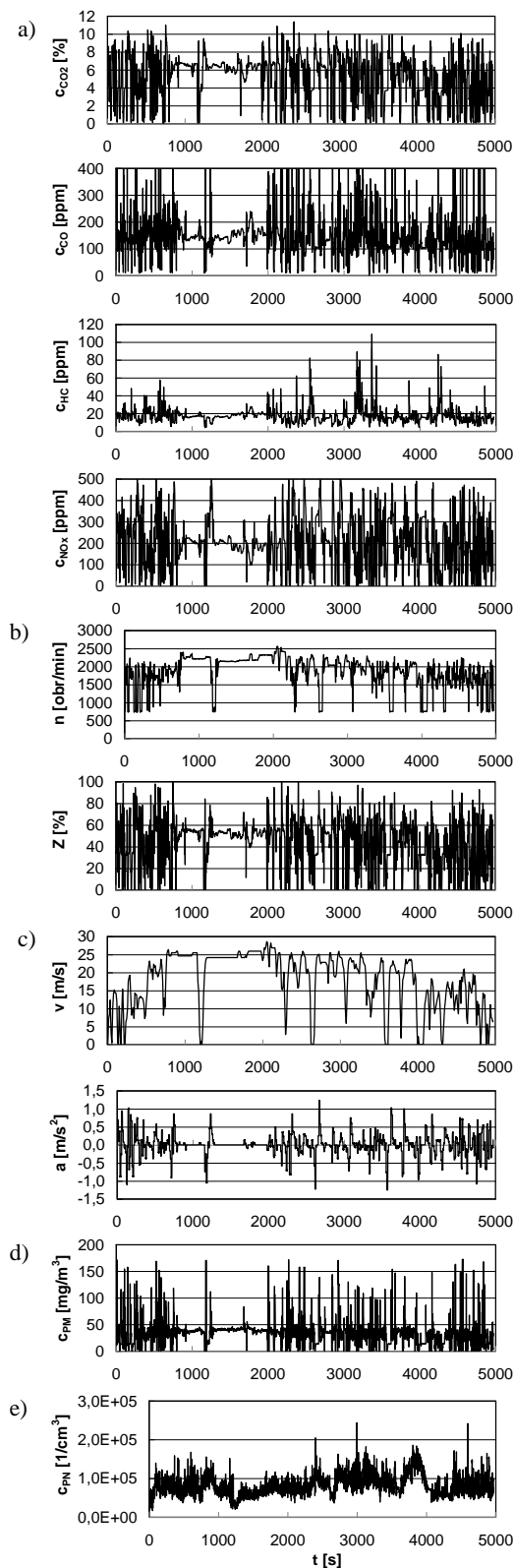
– wartości chwilowe parametrów pracy silnika lub pojazdu odczytywane z pokładowego systemu diagnostycznego (Semtech DS) – rys. 15b i c,

– stężenie masowe cząstek stałych (Micro Soot Sensor firmy AVL) – rys. 15d,

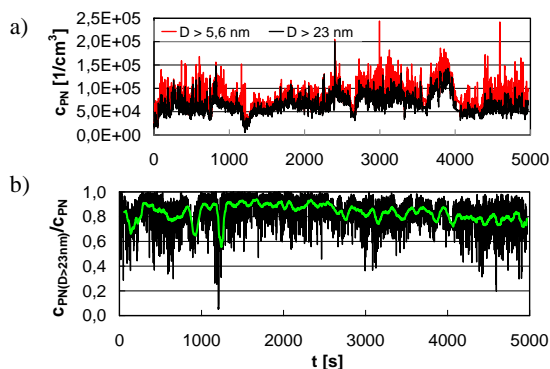
– stężenie liczbowe cząstek stałych (Particle Counter firmy AVL) – rys. 15e,

– rozkład wymiarów cząstek stałych (spektrometr masowy EEPS 3090 firmy TSI); rejestrowano w warunkach drogowych wymiary cząstek stałych o różnych średnicach: od 5,6 nm oraz od 23 nm (rys. 16a), a także porównawczo udział cząstek o średnicy większej niż 23 nm (rys. 16b); w spalinach pojazdów lekkich obserwowany jest duży udział cząstek o wymiarach większych niż 23 nm (ok. 80% całej liczby cząstek stałych);

– masę cząstek stałych (Semtech PPMD firmy Sensors); uzyskano informacje o masie cząstek emitowanych podczas całego testu (wyniki na rys. 17a), brak natomiast wartości stężenia masowego lub natężenia emisji.



Rys. 15. Wielkości rejestrowane podczas weryfikacji modeli parametrów cząstek stałych (dane cząstkowe): a) stężenie składników gazowych (CO_2 , CO , HC , NO_x), b) parametry pracy silnika (n , Z), c) parametry pracy pojazdu (v , a), d) stężenie masowe c_{PM} , e) stężenie liczbowe cząstek stałych e_{PN}

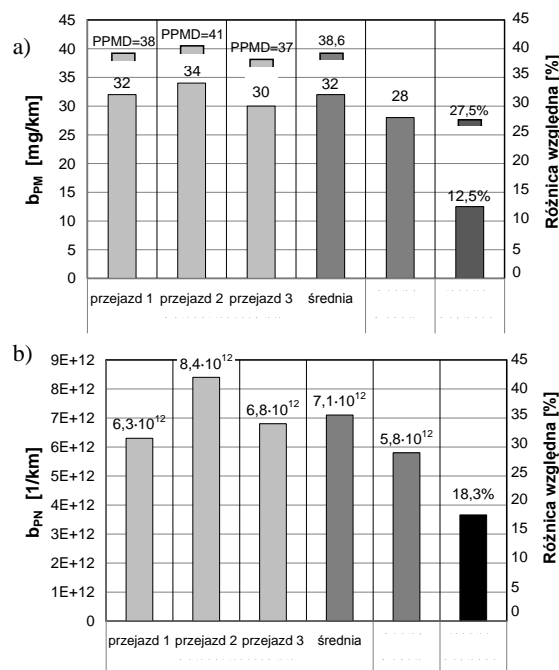


Rys. 16. Stężenie liczbowe cząstek stałych c_{PN} o średnicach cząstek większych niż 5,6 nm oraz 23 nm (a) oraz udział cząstek o średnicach większych niż 23 nm w całej liczbie cząstek (b); linią zieloną zaznaczono średnią z 60-sekundowego okna pomiarowego

Zarejestrowane wielkości wejściowe do modeli parametrów cząstek stałych emitowanych z pojazdów lekkich posłużyły do określenia wielkości wyjściowych (stężenia masowe i liczbowe cząstek stałych oraz średnicy charakterystycznej) z częstotliwością uzyskiwanych wyników wynoszącą 1 Hz. Wykorzystując znajomość natężenia przepływu spalin, określono wartość emisji drogowej i liczby drogowej cząstek stałych. Jednocześnie analizatorem Semtech PPMD zmierzono masę cząstek stałych na odcinku badawczym o długości 88 km. Badania wykonano trzykrotnie, uzyskując przedział zmienności rzędu 10÷20% między wartościami obliczonymi z użyciem opracowanych modeli a rzeczywistą emisją drogową (rys. 17). Brak powtarzalności wyników jest cechą charakterystyczną pomiarów w rzeczywistych warunkach ruchu. Nie jest to ich wadą, lecz cechą odróżniającą je od testów prowadzonych na hamowniach podwoziowych. Wyniki tych ostatnich w warunkach powtarzalnych powinny być zbliżone, jednakże – jak zaobserwowano podczas różnych badań – mogą się różnić o ok. 15% [14]. Uzyskana w badaniach weryfikacyjnych ok. 13-procentowa różnica w świetle powyższych informacji może być potwierdzeniem poprawności uzyskanych modeli.

Komentarza wymaga wynik pomiaru masy cząstek stałych, uzyskany za pomocą innego analizatora niż używany podczas tworzenia modeli parametrów cząstek stałych – PPMD. Z jednej strony działanie analizatora do pomiaru masy cząstek stałych było oparte na metodzie pomiaru częstotliwości drgających elementów kwarcowych o częstotliwości własnej 5 MHz. Wzrost masy cząstek stałych osadzonej na tych elementach (ośmiu, w tym jeden wzorcowy) powodował zmniejszenie częstotliwości ich drgań. Z drugiej strony analizator używany do pomiaru wielkości wejściowych do modeli umożliwił uzyskanie informacji o co najmniej 80% masy cząstek stałych – pomiar dotyczył części węglowej cząstek stałych oraz zaabsorbowanych węglowodorów w stanie ciekłym. Stanowi to wyjaśnienie, dlaczego z użyciem analizatora przema-

zzonego do pomiaru całej masy cząstek stałych zmierzono wartość emisji drogowej o ok. 20% większą niż z użyciem analizatora służącego tylko do pomiaru stężenia masowego cząstek stałych.



Rys. 17. Porównanie wartości parametrów cząstek stałych uzyskanych w rzeczywistych warunkach ruchu (wyniki pomiarów pojedynczych i ich wartości średnie) oraz z użyciem modeli: a) emisji drogowej cząstek stałych b_{PPM} , b) liczby drogowej cząstek stałych b_{PN}

Dodatkową niepewnością uzyskanych wyników jest sumowanie się niepewności wartości cząstkowych. Należy do nich zaliczyć wartość średnią parametrów pracy układu napędowego (odczytywaną z pokładowego systemu diagnostycznego z częstotliwością nie mniejszą niż 1 Hz, jednakże zależną od szybkości przetwarzania informacji przez sterownik pojazdu) oraz uśrednioną wartość natężenia przepływu spalin (średnia co 1 s z pomiarów o częstotliwości 50 Hz). Ostatni wymieniony czynnik – wpływający na wartość natężenia emisji danego związku szkodliwego – jest również mierzony z częstotliwością 1 Hz. Jest to wartość zgodna z wymaganiami normy SAE ISO 1065 [15], odnoszącej się do badań w rzeczywistych warunkach ruchu, jednakże produkcji przepływomierzy spalin oferują urządzenia o znacznie większej częstotliwości pomiaru – rzędu 50 Hz. Rozpatrując jednak zmienność pracy układu napędowego pojazdu oraz wyniki opublikowane w pracach [16, 17, 18], można przyjąć, że wymuszenie jednosekundowego przedziału pomiaru stężenia danego związku oraz natężenia przepływu spalin nie powoduje znacznych różnic między wartościami emisji drogowej zmierzonymi w rzeczywistych warunkach ruchu oraz w laboratoriach badawczych na hamowni podwozowej.

4. Wnioski

Opracowane modele parametrów cząstek stałych: masy, liczby i średnicy charakterystycznej, pozytywnie zweryfikowane, odzwierciedlają cechy cząstek stałych emitowanych w spalinach silników zasilanych różnymi paliwami (z wykorzystaniem parametrów pracy silnika lub pojazdu dostępnych z sieci pokładowej pojazdów). Modele te odniesiono tylko do parametrów pracy pojazdu bez fenomenologicznej analizy powstawania cząstek stałych. Zaprezentowane w artykule modele odnoszą się zarówno do warunków statycznych, jak i dynamicznych. Mają charakter uniwersalny, gdyż można je wykorzystać w badaniach różnych grup pojazdów, a jednocześnie wartości wynikowe są dostosowane do pragmatycznych wymogów stawianych pomiarom zanieczyszczeń (zgodność w odniesieniu do jednostek miar).

Uzyskane zależności opisu parametrów cząstek stałych można wykorzystać do oceny emisji cząstek stałych z pojazdów w różnych warunkach ich pracy. Zaproponowano narzędzie, które można wyko-

rzystać do oceny parametrów cząstek stałych, mając dane tylko wartości parametrów pracy silnika i/lub pojazdu. Pozwala to na wykorzystanie przez różne ośrodki badawczo-rozwojowe lub podmioty gospodarcze metody badawczej i znaczące ograniczenie kompletacji aparatury badawczej, a jednocześnie wnioskowanie o parametrach cząstek stałych w czasie rzeczywistym. Obecnie nie wystarcza znajomość masy cząstek stałych, wymagana jest również znajomość emisji liczby cząstek stałych, a docelowo również ich charakterystyki średnicowej (liczby cząstek w zależności od ich średnicy charakterystycznej). Uzyskane dane można wykorzystać do ekologicznej oceny pojazdów pod względem emisji cząstek stałych – nie tylko pod względem ich masy, ale również innych możliwych do określenia w ten sposób parametrów. Obecnie takie dane można uzyskać w programach COPERT, jednakże są to dane uzyskiwane szacunkowo i dla określonych obszarów badawczych. Nie uwzględniają one rzeczywistych warunków ruchu a jedynie uśrednione parametry wejściowe.

Nomenclature/Skróty i oznaczenia

a	przyspieszenie	PN	<i>particle number</i> /liczba cząstek stałych
A	powierzchnia	R	współczynnik korelacji liniowej Pearsona
b_{PM}	emisja drogowa cząstek stałych	t	czas
b_{PN}	liczba drogowa cząstek stałych	u	udział czasu pracy
c	stężenie	X	wektor wielkości wejściowych
c_{PM}	stężenie masowe cząstek stałych	Y	wektor wielkości wyjściowych
c_{PN}	stężenie liczbowe cząstek stałych	v	prędkość
C	wektor wielkości stałych	V	objętość
D	średnica	Z	wektor wielkości zakłócających
DPF	<i>diesel particulate filter</i> /filtr cząstek stałych	Z	współczynnik obciążenia silnika (definiowany jako $M_{o\text{ rzecz}}/M_{o\text{ max}}$ przy danej prędkości obrotowej)
M	masa	ZS	zapłon samoczynny
M_o	moment obrotowy silnika	ρ	gęstość
n	prędkość obrotowa silnika		
PM	<i>particle mass</i> /masa cząstek stałych		
PMP	<i>particle measurement programme</i> /program pomiaru cząstek stałych		

Bibliography/Literatura

- [1] Chłopek Z., Identyfikacja nieliniowego układu dynamicznego z zastosowaniem równania Fokkera-Plancka-Kolmogorowa oraz funkcji modulujących. Rozprawa doktorska, Warszawa 1982.
- [2] Chłopek Z., Modelowanie procesów emisji spalin w warunkach eksploatacji trakcyjnej silników spalinowych. Prace Naukowe serii „Mechanika”, z. 173, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1999.
- [3] Eykhoff P., Identyfikacja w układach dynamicznych. PWN, Warszawa 1980.
- [4] Piaseczny L., Metody ograniczenia emisji związków toksycznych tłokowych silników spalinowych eksploatowanych w silowniach okrętowych. Sprawozdanie nr 9T12D 006 13, Akademia Marynarki Wojennej, Gdynia 2000.
- [5] Sobieszkański M., Brzozowski K., Nowakowski J., Tekielak M., Wpływ parametrów regulacyjnych silnika ZS na zawartość składników toksycznych i zadymienie spalin. Eksploatacja i Niezawodność, nr 3, 2008.
- [6] Chłopek Z., Piaseczny L., O roli modelowania w badaniach naukowych. Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej, nr 2, 2001.
- [7] Chłopek Z., Piaseczny L., Prolegomena do rozważań o roli modelowania w procesie poznania. W: Materiały Międzynarodowej Konferencji „Humanisation of Technology”, Vilnius 2001.

-
- [8] Chłopek Z., Piaseczny L., Zastosowanie teorii planowania doświadczeń w badaniach ekologicznych właściwości silników spalinowych. *Archiwum Motoryzacji*, nr 2-3, 2002.
- [9] Chłopek Z., Some remarks on engine testing in dynamic states. *Combustion Engines*, No. 4, 2010.
- [10] Polański Z., Planowanie doświadczeń w technice. PWN, Warszawa 1984.
- [11] Schindler W., Haisch Ch., Beck H.A., Niessner R., Jacob E., Rothe D., A photoacoustic sensor system for time resolved quantification of diesel soot emissions. SAE Paper Series 2004-01-0968.
- [12] Emission instruments: AVL Particle Counter. AVL List GmbH, Graz 2010.
- [13] Particle Instruments: Model 3090 Engine Exhaust Particle Sizer™ Spectrometer. TSI Incorporated, 2009.
- [14] Merkisz J., Pielecha J., The on-road exhaust emissions characteristics of SUV vehicles fitted with diesel engines. *Combustion Engines*, No. 2, 2011.
- [15] Environmental Protection Agency, Vol. 73, No. 126, Rules and Regulations: §1065.920 PEMS calibrations and verifications, 2008.
- [16] Bonnel P., Weiss M., Provenza A., In-use emissions requirements in the new and future European motor vehicle emissions regulations: state of play. In: 8th Annual SUN Conference, Ann Arbor 2011.
- [17] Mamakos A., Correlation between PM, soot and airborne particle mass emitted from diesel heavy duty engines at PM levels ranging from Euro V to post-DPF. In: 15 International ETH-Conference on Combustion Generated Nanoparticles, Zurich 2011.
- [18] Rubino L., Bonnel P., Carriero M., Krasenbrink A., Portable emission measurement system (PEMS) for heavy duty diesel vehicle PM measurement: the European PM PEMS program. SAE Paper Series 2009-24.

Mr Jacek Pielecha, DSc., DEng. – Doctor in the Faculty of Working Machines and Transportation at Poznań University of Technology.

Dr hab. inż. Jacek Pielecha – adiunkt na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej.



Mr Jerzy Merkisz, DEng. – Professor in the Faculty of Working Machines and Transportation at Poznań University of Technology.

Prof. dr hab. inż. Jerzy Merkisz – profesor na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej.

