

## CHARAKTERYSTYKI EMISJI ZANIECZYSZCZEŃ WYZNACZANE METODĄ MONTE CARLO

### POLLUTANT EMISSION CHARACTERISTICS DETERMINED USING THE MONTE CARLO METHOD

*W pracy przedstawiono pionierski sposób badań ekologicznych właściwości silników spalinowych z zastosowaniem metody Monte Carlo do wyznaczenia charakterystyk emisji zanieczyszczeń z pojazdów samochodowych. Formalnie wprowadzono pojęcia oraz usystematyzowano zagadnienia związane z emisją zanieczyszczeń z pojazdów samochodowych. Przedstawiono wyniki badań empirycznych wykonanych dla rzeczywistego obiektu oraz wyznaczono charakterystyki emisji zanieczyszczeń w symulowanych warunkach pseudoprzygodkowych.*

**Słowa kluczowe:** samochody, silniki spalinowe, emisja zanieczyszczeń, metoda Monte Carlo.

*This paper presents a pioneering method for investigating the environmental properties of internal combustion engines using the Monte Carlo method to determine the characteristics of vehicle pollutant emissions. Concepts and questions relating to the pollutant emissions of vehicles are formally introduced and systematized. The results of empirical research on a real object are presented, as are the pollutant emission characteristics under simulated pseudo-random conditions.*

**Keywords:** vehicle, internal combustion engines, pollutant emissions, Monte Carlo method.

#### 1. Wprowadzenie

Ekologiczne właściwości silników spalinowych są od kilkadziesiąt lat podstawowym wyróżnikiem w ocenie jakości silników. Spośród wielu zagrożeń naturalnego i cywilizacyjnego środowiska ludzi przez eksploatację silników spalinowych szczególną wagę przypisuje się do emisji zanieczyszczeń, od której praktycznie rozpoczęła się ochrona środowiska przed skutkami motoryzacji [5]. Międzynarodowe przepisy wyróżniają substancje szkodliwe dla środowiska i – choć w prawie Unii Europejskiej i Stanów Zjednoczonych Ameryki Północnej oraz innych państw rozwiniętych gospodarczo – występują pewne różnice – są to przede wszystkim [4, 5]:

- tlenek węgla – CO,
- związki organiczne (węglowodory i ich pochodne) – HC (lub THC),
- tlenki azotu NO i NO<sub>2</sub>, oznaczane – NO<sub>x</sub>, sprowadzone do dwutlenku azotu NO<sub>2</sub>,
- cząstki stałe – PM.

Emisja innych substancji szkodliwych dla środowiska, pochodzących z pojazdów samochodowych, jest limitowana głównie przez skład i właściwości paliw, jak ma to miejsce np. w wypadku związków siarki, węglowodorów pierścieniowych czy metali ciężkich [1, 4, 5, 8].

Dodatkowo – ze względu na zagrożenie środowiska przed skutkami globalnego ocieplenia – rozpatruje się emisję dwutlenku węgla [4, 5], będącego najistotniejszym ze względu na skalę emisji gazem cieplarnianym, pochodzącym ze spalania paliw do silników spalinowych.

Dodatkowym czynnikiem, związanym z oddziaływaniem motoryzacji na środowisko – oprócz związku z emisją zanieczyszczeń – jest zużycie paliwa ze względu na ochronę zasobów naturalnych [5].

Całkowita emisja zanieczyszczeń z pojazdów samochodowych w obszarze bilansowania jest modelowana jako suma emisji [4, 5]:

#### 1. Introduction

The environmental properties of internal combustion engines have served as a primary determinant in assessing engine quality for several dozen years. Among the many threats to the natural and civilizational environment of people caused by the operation of internal combustion engines, particular weight is assigned to pollutant emissions. In practice, it is from them that environmental protection against motorization was launched [5]. International regulations identify substances that are harmful to the environment. Although the laws of the European Union, the United States of America, and other economically developed countries do vary to a certain degree, these substances are primarily [4, 5]:

- Carbon monoxide CO.
- Organic compounds (hydrocarbons and their derivatives) HC (or THC).
- Nitrogen oxides NO and NO<sub>2</sub>, designated NO<sub>x</sub>, as well as reduced to nitrogen dioxide NO<sub>2</sub>.
- Particulate matter PM.

The emission of other substances that are harmful to the environment generated by vehicles are mainly limited by the composition and properties of fuel, as is the case with sulfur compounds, ring hydrocarbons, and heavy metals [1, 4, 5, 8].

Moreover, due to the environmental threat of the effects of global warming, the emissions of carbon dioxide [4, 5] are being examined as most significant due to the scale of emission of this greenhouse gas, derived from the burning of fuel in internal combustion engines.

An additional factor linked with the impact of motoring on the environment – apart from pollutant emission – is the use of fuel in terms of natural resource protection [5].

The total pollutant emissions from vehicles in the balance area is modeled as the sum of the following emissions [4, 5]:

- z silników nagranych do temperatury normalnej eksploatacji,
- związanej z nagrzewaniem się silników do temperatury normalnej eksploatacji,
- parowania par paliwa z układu paliwowego pojazdu.

Ze względu na skutki dla środowiska istotny jest w rozpatrywanym miejscu przebieg stężenia zanieczyszczenia rozproszonego w powietrzu atmosferycznym – wielkość ta jest zwana, na wzór stosowany w specjalistycznej literaturze niemieckiej, imisją [4]. Między natężeniem emisji zanieczyszczenia a imisją jest związek operatorowy, który ma charakter inercyjny. Zjawisko opisywane tym związkiem nosi nazwę rozprzestrzeniania zanieczyszczeń i zawiera w sobie zjawiska transportu i dyspersji zanieczyszczeń. Między imisją zanieczyszczeń i wielkościami, określającymi skutki zanieczyszczeń dla środowiska, zachodzi również związek operatorowy o charakterze inercyjnym [4]. W związku z tym zazwyczaj operatorową zależność skutków zanieczyszczeń od natężenia ich emisji zastępuje się: średnią imisją zanieczyszczeń i czasem ich oddziaływania [4].

Wielkością charakteryzującą szkodliwość motoryzacji dla środowiska jest natężenie emisji całkowitej zanieczyszczenia w rozpatrywanym obszarze.

Czynnikami determinującymi natężenie emisji całkowitej zanieczyszczeń z pojazdów samochodowych – E oraz natężenie przepływu paliwa zużywanego przez silnik – G w rozpatrywanym obszarze i czasie są [4] – rysunek 1:

- struktura – S i liczność pojazdów – N,
- intensywność użytkowania pojazdów – P,
- warunki użytkowania pojazdów – R,
- warunki otoczenia – U,
- właściwości paliw – F.

Sam model emisji całkowitej zanieczyszczeń z pojazdów samochodowych jest bardzo prosty, natomiast istotnym problemem są duża liczba nieznanych zazwyczaj parametrów oraz charakterystyki, zależne od wielu czynników w sposób złożony i trudny do uogólnienia [4]. Z tych powodów istotną rolę odgrywa modelowanie poszczególnych elementów modelu emisji całkowitej zanieczyszczeń z pojazdów samochodowych.

Struktura pojazdów samochodowych jest modelowana zazwyczaj w postaci zbioru zawierającego [1, 4, 8]:

- samochody osobowe,
- lekkie samochody ciężarowe,
- autobusy miejskie,
- autobusy dalekobieżne,
- samochody ciężarowe,
- motocykle,
- motorowery.

Oprócz tego strukturę pojazdów samochodowych charakteryzują [1, 4, 8]:

- umowna wielkość pojazdów, zależna albo od objętości skokowej silnika (samochody osobowe, lekkie samochody ciężarowe oraz motocykle i motorowery) albo od

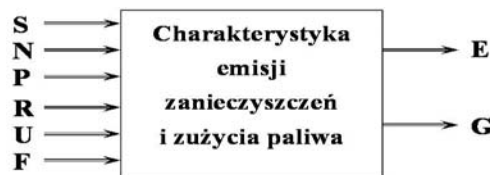
- From engines warmed up to normal operating temperature.
- Related to the warming up of engines to normal operating temperature.
- Evaporation of fuel vapors from the vehicle fuel system.

Due to the effects on the environment, what is important is the process of pollutant concentration as dispersed in the atmosphere at the examined location, where this value is known as imission, as used in a formula applied in specialized German literature [4]. There is an operational connection between the concentration of pollutant emission and imission. It is inertial in nature. The phenomenon described by this dependence is known as pollutant propagation and embodies the phenomena of pollutant transportation and dispersion. There is also an operational dependence of inertial character between pollutant imission and values defining the effects of pollution on the environment [4]. Thus, the usually operational dependence of the effects of pollution and the concentration of their emission is replaced by the average pollutant imission and its period of influence [4].

The value characterizing the harmfulness of motoring on the environment is the concentration of total pollutant emissions in the examined area.

Factors determining the concentration of total pollutant emissions caused by vehicles E as well as the concentration of the flow of fuel used by the engine G in the examined area and time are [4] – Figure No. 1:

- Structure S and quantity of vehicles – N.
- Intensity of vehicle use – P.
- Vehicle use conditions – R.
- Environmental conditions – U.
- Fuel properties – F.



Rys. 1. Model emisji całkowitej zanieczyszczeń z pojazdów samochodowych

Fig. 1. The model of the total pollutant emission from vehicles

The model itself for vehicle total pollutant emissions is very simple. However, the essence of the problem lies with the large number of usually unknown parameters and characteristics that are dependent on many factors in a complex manner that is difficult to generalize [4]. It is for this reason that the modeling of individual elements of the vehicle total pollutant emission model plays an important role.

The structure of vehicles is usually modeled in the form of a set containing the following [1, 4, 8]:

- Passenger cars.
- Light duty vehicle.
- Urban busses.
- Coaches.
- Heavy duty vehicle.
- Motorcycles.
- Motorbikes.

In addition to this, the vehicles structure is characterized by [1, 4, 8]:

- The conventional size of the vehicles, which is dependent on their engine capacity (passenger cars, light duty vehicle, motorcycles, and motorbikes) or their allowable total mass (heavy duty vehicle and busses).

- dopuszczalnej masy całkowitej (samochody ciężarowe i autobusy),
- rodzaje systemu spalania (o zapłonie iskrowym lub o zapłonie samoczynnym) i obiegu silnika spalinowego (dwusuwowy lub czterosuwowy),
- właściwości ekologiczne silnika spalinowego ze względu na poziom techniczny, zgodne z kolejnymi wersjami przepisów lub datami produkcji pojazdów.

Liczność pojazdów samochodowych dotyczy ww. kategorii, a intensywność użytkowania pojazdów samochodowych jest modelowana w postaci przebiegów (zazwyczaj rocznych).

Warunki użytkowania pojazdów to przede wszystkim modele [1, 4, 8]:

- ruchu – przebiegi prędkości,
- długości dróg przebywanych przed zatrzymaniem samochodu na długi czas,
- czasu postoju,
- długości dróg przebywanych po rozruchu nienagrzanego silnika.

Warunki otoczenia są zdeterminowane przez właściwości dróg oraz warunki atmosferyczne, a także przez natężenie ruchu pojazdów. W związku z tym warunki otoczenia mają oczywiście wpływ – oprócz woli kierującego – na modele ruchu pojazdu.

## 2. Charakterystyki emisji zanieczyszczeń z pojazdów samochodowych

Podstawową wielkością charakteryzującą ekologiczne właściwości pojazdów jest emisja drogowa zanieczyszczeń, będąca pochodną emisji (masy zanieczyszczeń) względem drogi przebywanej przez pojazd [4, 5].

Emisja drogowa zanieczyszczenia z pojazdu, traktowana jako wielkość dynamiczna, jest zależna od przebiegów stanu pracy silnika, które zazwyczaj są scharakteryzowane [1 – 4]:

- obciążeniem silnika –  $M_e(t)$ ,
- prędkością obrotową –  $n(t)$ ,
- stanem cieplnym silnika –  $T_s(t)$ , opisywanym zbiorem temperatur części silnika i czynników w jego układach (np. cieczy chłodzącej i oleju smarowego),
- warunkami otoczenia –  $G(t)$ .

Przebieg emisji drogowej zanieczyszczenia może być przedstawiony w postaci operatorowej [2 – 4]

$$b_i(t) = B_M [M_e(t), n(t), T_s(t), G(t)] \quad (1)$$

Stan pracy silnika spalinowego w eksploatacji trakcyjnej jest uzależniony m.in. od: prędkości jazdy samochodu, oporów ruchu oraz parametrów pojazdu, uwzględniających m.in. przełożenia w układzie przeniesienia napędu. W związku z tym emisję drogową można przedstawić jako zależność operatorową [2 – 4]

$$b_i(t) = B_v [v(t), A(t), T_s(t), G(t)] \quad (2)$$

gdzie wektor  $A(t)$  zawiera informacje o oporach ruchu pojazdu, związanych z ukształtowaniem nawierzchni.

Dla stałego stanu cieplnego silnika oraz porównywalnych warunków ruchu, uwzględniając daleko posuniętą unifikację konstrukcyjną pojazdów samochodowych, procesem determinującym emisję zanieczyszczeń jest zatem proces prędkości samochodu [2 – 4].

- The combustion system (spark and semi ignition engine) and internal combustion engine cycle (two- and four-stroke).
- Internal combustion engine environmental properties in terms of technological level pursuant to successive versions of regulations or vehicle manufacturing dates.

The quantity of vehicles relates to the above categories, while vehicle use intensity is modeled in the form of mileage (usually annual).

Vehicle use conditions primarily involve the following models [1, 4, 8]:

- Traffic – mileage velocities.
- Lengths of routes traveled before stopping the vehicle for an extended period.
- Parking time.
- Lengths of routes traveled following the start-up of a cold engine.

Environmental conditions are determined by road quality as well as atmospheric conditions, and vehicle traffic intensity. Thus, in addition to the wishes of the driver, environmental conditions have an obvious impact on the vehicle traffic model.

## 2. Vehicles pollutant emission characteristics

The basic value characterizing the environmental properties of vehicles is specific distance pollutant emissions that are a derivative of emissions (the mass of pollution) with respect to the road traveled by the vehicle [4, 5].

The vehicle specific distance pollutant emissions, considered a dynamic value, are dependent on the engine operating state processes, which are usually characterized by [1–4]:

- Engine load –  $M_e(t)$ .
- Engine speed –  $n(t)$ .
- Engine thermal state –  $T_s(t)$ , described by a set of engine part temperatures and factors operating on its systems (e.g. coolant and lubricating oil).
- Environmental conditions –  $G(t)$ .

The specific distance pollutant emission process may be presented in operational form [2–4]:

$$b_i(t) = B_M [M_e(t), n(t), T_s(t), G(t)] \quad (1)$$

The state of internal combustion engine traction operation is dependent on such factors as vehicle velocity, resistance to motion, and vehicle parameters, including transmission ratios in the drive train. Thus, specific distance emissions may be presented as an operational dependence [2–4]:

$$b_i(t) = B_v [v(t), A(t), T_s(t), G(t)] \quad (2)$$

Where vector  $A(t)$  contains information about vehicle motion resistance connected with the shaping of the surface.

For a fixed engine thermal state as well as comparable traffic conditions, assuming far-reaching unification in vehicle design, the process determining pollutant emissions is the velocity process of the engines [2–4].

W związku z tym emisja drogowa zanieczyszczenia jest w ścisłym tego słowa znaczeniu zdeterminowana konkretnym przebiegiem prędkości pojazdu. Z tego powodu tak istotną rolę odgrywają modele ruchu pojazdów, będące przebiegami prędkości pojazdu. W celu stworzenia bardziej uogólnionej wiedzy na temat emisji zanieczyszczeń w zależności od przebiegów prędkości, dla których jest wyznaczona emisja, jest konieczne określenie zerowymiarowych (punktowych) charakterystyk tych przebiegów. W takim wypadku jest możliwe wyznaczanie zależności wielkości, charakteryzującej emisję zanieczyszczeń, np. emisji drogowej, od zerowymiarowych charakterystyk. Najczęściej jako reprezentatywną charakterystykę zerowymiarową przebiegów prędkości przyjmuje się wartość oczekiwaną, której estymatorem jest wartość średnia arytmetyczna [1–4]. Niekiedy rozpatruje się również jako reprezentatywne charakterystyki zerowymiarowe wartość średnią modułu przyspieszenia oraz wartość średnią modułu iloczynu prędkości i przyspieszenia [1–4].

Do celów wyznaczania charakterystyk emisji zanieczyszczeń zazwyczaj wykorzystuje się przebiegi prędkości pojazdów w homologacyjnych testach jezdnych: europejskich, amerykańskich i japońskich.

Europejskie testy homologacyjne to test zgodny z regulaminem nr 83 EKG ONZ [1, 4, 5, 7] oraz jego składowe: test jazdy miejskiej UDC (Urban Driving Test) i pozamiejskiej (EUDC – Extra Urban Driving Test) – rysunek 2.

Amerykańskim testem homologacyjnym do pomiarów emisji zanieczyszczeń jest test FTP 75 (Federal Transient Procedure) – rysunek 3, natomiast do badań zużycia paliwa wykorzystuje się test HWFET (Highway Fuel Economy Test) – rysunek 4. Oprócz tego istnieją m.in. testy [7]:

- SFTP US06 – Supplement Federal Transient Procedure US06 (dodatek US06 do testu FTP–75),
- SFTP SC03 – Supplement Federal Transient Procedure SC03 (dodatek SC03 do testu FTP–75),
- EPA NYCC – EPA (Environment Protection Agency) New York City Cycle (nowojorski test Amerykańskiej Agencji Ochrony Środowiska),
- California Unified Cycle LA92 (jednolity test kalifornijski LA92),
- Inspection & Maintenance Driving Cycle IM240 (test jezdny IM240 do celów kontrolno–obsługowych).

W Japonii stosuje się test 10–15 Mode Cycle [1, 4, 5, 7].

Testy homologacyjne stanowią bardzo szczególne przypadki ruchu pojazdów. Rzeczywiste warunki mogą znacznie odbiegać od warunków homologacyjnych. W związku z tym w modelach emisji zanieczyszczeń z samochodów, np. w modelu INFRAS AG [4, 8], stosuje się testy specjalne, przykładowo test ruchu pojazdów w warunkach znacznego utrudnienia, wynikającego z kongestii – model Stop and Go – rysunek 5 [1, 4]. Innym przykładem modelu ruchu jest model Autobahn, charakteryzujący ruch pojazdów na autostradach – rysunek 6 [1, 4].

Thus, specific distance pollutant emissions are strictly determined by the concrete vehicle velocity processes. It is for this reason that vehicle traffic models play such an important role—they define the vehicle's velocity processes. It is necessary to define zero-dimensional (point) characteristics of the processes in order to create more generalized knowledge on pollutant emissions as dependent on the velocity processes for which the emissions are calculated. In such a case it is possible to define the dependence between the value characterizing pollutant emissions – e.g. specific distance emissions and the zero-dimensional characteristic. The most frequent zero-dimensional representative characteristic of velocity processes is assumed as the expected value, whose estimator is the arithmetic average value [1–4]. Also considered at times as the zero-dimensional representative characteristic is the value of the acceleration module as well as the average value of the module of the product of velocity and acceleration [1–4].

What is usually applied in order to determine the characteristics of pollutant emissions is the vehicle velocity processes in homologation test drives – European, American, and Japanese.

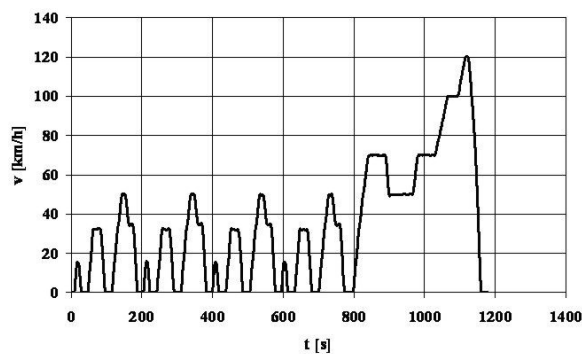
European homologation tests are test in agreement with Rule No. 83 ECE UE [1, 4, 5, 7] and its component parts – the urban driving test (UDT) and the extra-urban driving test (EUDT) – Figure No. 2.

American homologation tests for measuring pollutant emissions include the FTP 75 (Federal Test Procedure) – Figure No. 3. For fuel consumption, it is the Highway Fuel Economy test (HWFET) that is conducted – Figure No. 4. Other tests include [7]:

- SFTP US06 – Supplemental Federal Test Procedure US06 (a supplement to FTP 75).
- SFTP SC03 – Supplemental Federal Test Procedure SC03 (a supplement to FTP 75).
- EPA NYCC – EPA (Environment Protection Agency) New York City Cycle.
- California Unified Cycle LA92.
- IM240 – Inspection & Maintenance Driving Cycle.

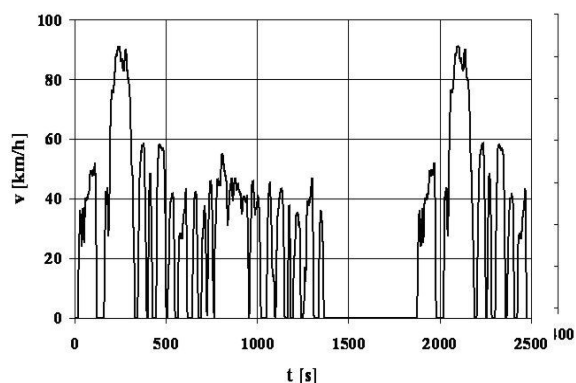
The 10–15 Mode Cycle test is applied in Japan [1, 4, 5, 7].

Homologation tests are a very specific case in vehicle traffic. Real world conditions may differ significantly from the homologation testing conditions. For this reason special tests are used in motor vehicle pollutant emission models – e.g. the INFRAS AG model [4, 8]. These include the vehicle traffic test where difficulties resulting from traffic congestion are introduced – the Stop and Go model – Figure No. 5 [1, 4]. Another example of a traffic model is the Autobahn model, which characterizes vehicle traffic on highways – Figure No. 6 [1, 4].

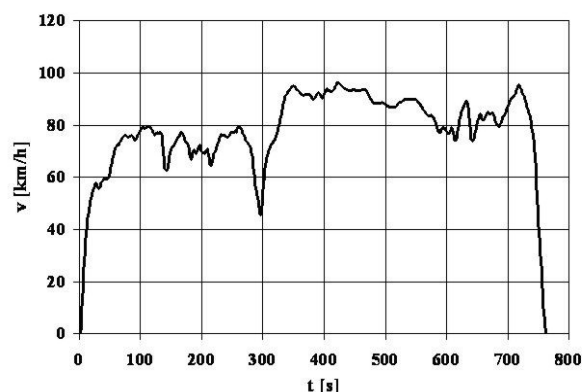


Rys. 2. Przebieg prędkości pojazdu  $v$  w teście zgodnym z regulaminem nr 83 EKG ONZ

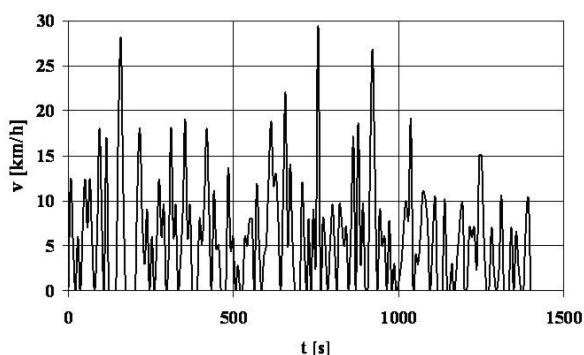
Fig. 2. The process of the vehicle velocity  $v$  in the ECE R 83 test



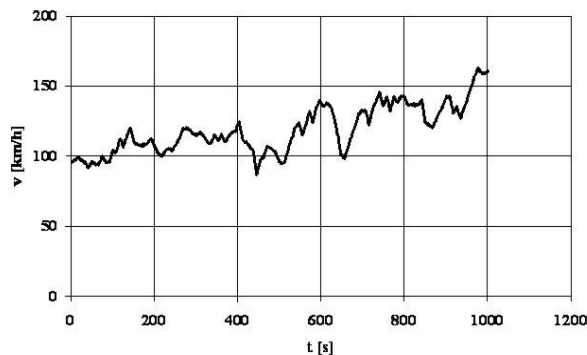
Rys. 3. Przebieg prędkości pojazdu  $v$  w teście FTP 75  
Fig. 3. The process of the vehicle velocity  $v$  in the FTP 75 test



Rys. 4. Przebieg prędkości pojazdu  $v$  w teście HWFET  
Fig. 4. The process of the vehicle velocity  $v$  in the HWFET test



Rys. 5. Przebieg prędkości pojazdu  $v$  w teście Stop and Go  
Fig. 5. The process of the vehicle velocity  $v$  in the Stop and Go test

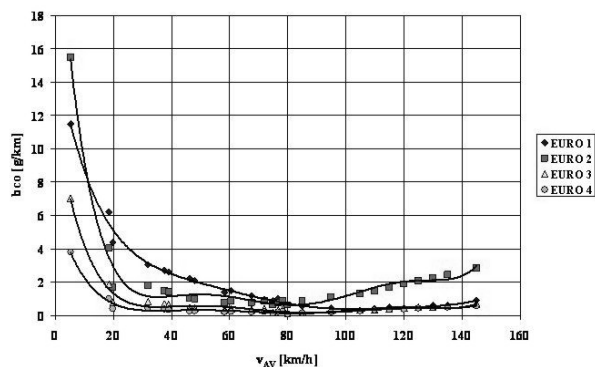


Rys. 6. Przebieg prędkości pojazdu  $v$  w teście Autobahn  
Fig. 6. The process of the vehicle velocity  $v$  in the Autobahn test

Przykładem charakterystyk emisji zanieczyszczeń z wykorzystaniem wyników badań w testach, stosowanych w oprogramowaniu INFRAS, jest zależność emisji drogowej tlenku węgla dla samochodów osobowych z silnikami o zapłonie iskrowym o objętości skokowej większej niż  $2,0 \text{ dm}^3$  od prędkości średniej dla kategorii ekologicznych EURO 1, EURO 2, EURO 3 i EURO 4 – rysunek 7.

Przedstawione charakterystyki emisji zanieczyszczeń są wyznaczone dla modeli ruchu, obejmujących prędkość średnią w granicach  $(5,3 \div 145) \text{ km/h}$ . Emisje drogowe zanieczyszczeń, wyznaczone dla poszczególnych modeli ruchu, zostały na wykresie aproksymowane funkcjami wielomianowymi o stopniu nie większym niż szósty. Kryterium doboru stopnia wielomianu była niesprzeczność wyniku aproksymacji z prawami fizyki (np. dodatniość emisji), doświadczeniem i wiedzą autorów na temat charakteru badanych zależności, wyznaczanych na

An example of pollutant emission characteristics using test results as applied in INFRAS software, is the dependence between the specific distance emissions of carbon monoxide for passenger cars with spark ignition engines with a capacity of more than  $2.0 \text{ dm}^3$  and average velocity in the EURO 1, EURO 2, EURO 3, and EURO 4 categories – Figure No. 7.



Rys. 7. Zależność emisji drogowej tlenku węgla  $b_{CO}$  dla samochodów osobowych z silnikami o zapłonie iskrowym o objętości skokowej większej niż  $2,0 \text{ dm}^3$  od prędkości średniej  $v_{AV}$   
Fig. 7. The dependence of the specific distance emission of carbon oxide  $b_{CO}$  for personal cars with spark ignition engines with the engine capacity more than  $2 \text{ dm}^3$  on the average velocity  $v_{AV}$

The presented pollutant emission characteristics are determined for traffic models encompassing average velocities in the  $5.3 \text{ km/h} - 145 \text{ km/h}$  range. Specific distance pollutant emissions as identified for individual traffic models have been approximated in the graph using polynomial functions of a degree not greater than six. The criterion for selection of the polynomial degree was non-contradiction of the approximated results with the laws of physics (e.g. emission positivity), experience, and the knowledge of the authors on the character of the examined relations,

podstawie badań empirycznych, w wyniku których jest postulowana zależność funkcyjna emisji drogowej zanieczyszczeń od prędkości średniej pojazdu [1–4, 6].

Zastosowanie metody Monte Carlo do wyznaczania charakterystyk emisji zanieczyszczeń z pojazdów samochodowych

Zastosowanie metody Monte Carlo do wyznaczania charakterystyk emisji zanieczyszczeń z pojazdów samochodowych polega na generowaniu doświadczeń pseudoprzypadkowych [2–4, 10] na podstawie zarejestrowanych realizacji procesów stochastycznych modelujących prędkość pojazdu oraz natężenia emisji zanieczyszczeń.

Pseudoprzypadkowe warunki ruchu pojazdu są modelowane w postaci procesu stochastycznego  $\mathbf{v}(t)$ .

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

$$\mathbf{Y}(t) = [\mathbf{E}_{CO}, \mathbf{E}_{HC}, \mathbf{E}_{NOx}, \mathbf{E}_{PM}, \mathbf{E}_{CO2}, \mathbf{G}_f]^T \quad (3)$$

gdzie:  $\mathbf{E}$  – natężenie emisji zanieczyszczeń,  $\mathbf{G}_f$  – natężenie zużycia paliwa.

Przy założeniu stacjonarności i ergodyczności procesów  $\mathbf{v}(t)$  i  $\mathbf{Y}(t)$  można wyznaczyć dla ich realizacji wartości oczekiwane w przedziale czasu  $(t_\alpha, t_\omega)$ :

$$v_{AV}(t_\alpha, t_\omega) = \frac{1}{t_\omega - t_\alpha} \int_{t_\alpha}^{t_\omega} \mathbf{v}(t) dt \quad (4)$$

$$Y_{AV}(t_\alpha, t_\omega) = \frac{1}{t_\omega - t_\alpha} \int_{t_\alpha}^{t_\omega} \mathbf{Y}(t) dt \quad (5)$$

Emisja drogowa zanieczyszczenia jest stosunkiem natężenia emisji zanieczyszczenia i prędkości. Zatem średnia emisja drogowa zanieczyszczenia wynosi

$$b_{AV}(t_\alpha, t_\omega) = \frac{E_{AV}(t_\alpha, t_\omega)}{v_{AV}(t_\alpha, t_\omega)} \quad (6)$$

Średnia emisja drogowa zanieczyszczenia jest zatem funkcją prędkości średniej (która jest funkcją czasów początku i końca uśredniania) oraz czasów początku i końca uśredniania:

$$b_{AV} = f_b(v_{AV}(t_\alpha, t_\omega), t_\alpha, t_\omega) \quad (7)$$

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

Dzięki zastosowaniu metody Monte Carlo istnieje możliwość wyznaczania stochastycznych charakterystyk emisji zanieczyszczeń z pojazdów samochodowych, np. w postaci zależności emisji drogowej zanieczyszczeń od prędkości średniej samochodu. Istnieje również możliwość wyznaczania charakterystyk jednowymiarowych w zależności od innych wielkości, np. wartości średniej modułu przyspieszenia lub wartości średniej modułu iloczynu prędkości i przyspieszenia. Istnieje również możliwość wyznaczenie wielowymiarowych charakterystyk emisji zanieczyszczeń.

Przykładem realizacji stochastycznego procesu prędkości pojazdu, zbudowanego na bazie testu wg regulaminu nr 83 EKG ONZ, jest zbiór realizacji przedstawionych na rysunku 8.

determined on the basis of empirical tests whose result is the postulated dependence between the specific distance pollutant emission function and average velocity [1–4, 6].

Application of the Monte Carlo Method in determining vehicle pollutant emission characteristics

Application of the Monte Carlo method to determine the characteristics of vehicle pollutant emissions involves the generation of pseudo-random experiments [2–4, 10] on the basis of the registered results of stochastic processes modeling the velocity of vehicles and the concentrations of pollutant emissions.

The pseudo-random road traffic conditions are modeled in the form of a stochastic process  $\mathbf{v}(t)$ .

The multidimensional stochastic process of phenomena accompanying the operation of a vehicle  $\mathbf{Y}(t)$  primarily applies to the emission of pollutants and fuel consumption:

$$\mathbf{Y}(t) = [\mathbf{E}_{CO}, \mathbf{E}_{HC}, \mathbf{E}_{NOx}, \mathbf{E}_{PM}, \mathbf{E}_{CO2}, \mathbf{G}_f]^T \quad (3)$$

where:  $\mathbf{E}$  – intensity of pollutant emissions,  $\mathbf{G}_f$  – intensity of fuel consumption.

Assuming stationary and ergodynamic processes  $\mathbf{v}(t)$  and  $\mathbf{Y}(t)$ , it is possible to determine values in the expected time frame  $(t_\alpha, t_\omega)$  for their implementation:

$$v_{AV}(t_\alpha, t_\omega) = \frac{1}{t_\omega - t_\alpha} \int_{t_\alpha}^{t_\omega} \mathbf{v}(t) dt \quad (4)$$

$$Y_{AV}(t_\alpha, t_\omega) = \frac{1}{t_\omega - t_\alpha} \int_{t_\alpha}^{t_\omega} \mathbf{Y}(t) dt \quad (5)$$

The specific distance pollutant emissions are the ratio of concentration of pollutant emissions and velocity. Thus, the average specific distance pollutant emissions amount to:

$$b_{AV}(t_\alpha, t_\omega) = \frac{E_{AV}(t_\alpha, t_\omega)}{v_{AV}(t_\alpha, t_\omega)} \quad (6)$$

The average specific distance pollutant emissions are thus a function of average velocity (that is a function of the time of the start and finish of the averaging process) as well as the time of the start and finish of the averaging process:

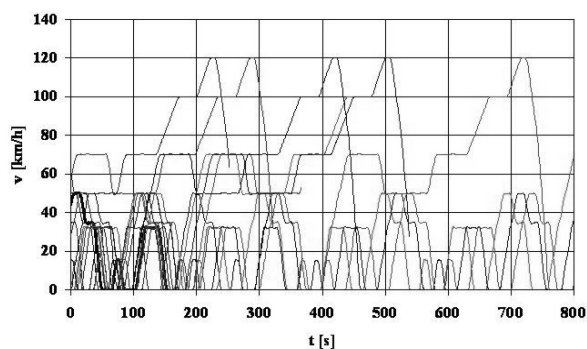
$$b_{AV} = f_b(v_{AV}(t_\alpha, t_\omega), t_\alpha, t_\omega) \quad (7)$$

If assumed that the time of the start and finish of the averaging process is randomly variable, then the determined specific distance emissions as a function of random variables may be considered a random function.

Thanks to the application of the Monte Carlo method there is a possibility of determining the stochastic characteristics of vehicle pollutant emissions – e.g. in the form of a dependence of specific distance pollutant emissions on the average vehicle velocity. There is also a possibility of determining one-dimensional characteristics dependent on other values – e.g. the average value of the module of acceleration or the average value of the module of the product of velocity and acceleration. There is also a possibility of determining multi-dimensional characteristics of pollutant emissions.

An example of implementation of the stochastic process of vehicle velocity built on the basis of Rule No. 83 ECE UE tests is the set of performances as depicted in Figure No. 8.

Fundamentalną właściwością zaproponowanej metody wyznaczania charakterystyk z zastosowaniem metody Monte Carlo jest możliwość uzyskania informacji o badanym obiekcie na podstawie pojedynczej realizacji procesu stochastycznego! Metoda Monte Carlo została zatem zastosowana – zgodnie z pierwotną, historyczną już, intencją jej twórców: Stanisława Ulama i Nickolasa Metropolisa [10] – do generowania rzeczywistości pseudoprzyrodkowej.



Rys. 8. Przykładowe realizacje stochastycznego procesu prędkości pojazdu  $v$

Fig. 8. Exemplary realizations of a stochastic process of the vehicle velocity  $v$

A fundamental quality of the proposed method for determining characteristics using the Monte Carlo method is the ability to procure information on the examined object on the basis of a single implementation of the stochastic process! Thus, the Monte Carlo method has been applied in line with the initial, historical intention of its creators – Stanislaw Ulam and Nickolas Metropolis [10] – to generate pseudo-random reality.

#### 4. Wyniki badań empirycznych

Badania empiryczne przeprowadzono na lekkim samochodzie ciężarowym Citroën Berlingo z silnikiem o zapłonie samoczynnym na hamowni podwoziowej w Przemysłowym Instytucie Motoryzacji w Warszawie. Aparatura wykorzystywana do badań była zgodna z wymaganiami dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady w zakresie badań homologacyjnych samochodów. Spośród wielu rodzajów testów, m.in. FTP-75, HWFET, Stop and Go i Autobahn do analiz wybrano wyniki badań w teście wg regulaminu 83 EKG przeprowadzonym z rozruchem silnika nagrzanego do warunków normalnej eksploatacji.

Zarejestrowane przebiegi natężeń emisji zanieczyszczeń przetworzono cyfrowo, eliminując grube błędy i przeprowadzając filtrację dolnoprzepustową. Do filtracji wykorzystano filtr Golaya-Savitzky'ego [11] z następującymi parametrami uśredniania: wykorzystano obustronnie po dwa punkty oraz drugi stopień wielomianu aproksymującego.

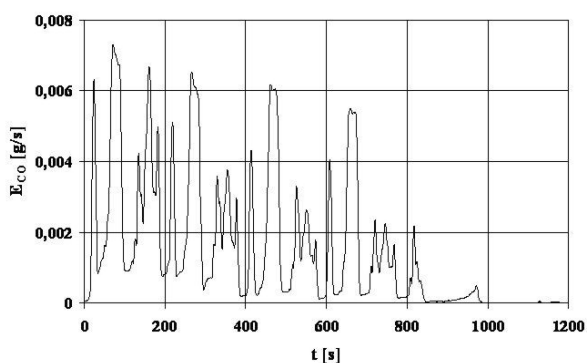
Na rysunkach 9 – 13 przedstawiono przetworzone przebiegi natężeń emisji zanieczyszczeń: tlenku węgla, węglowodorów, tlenków azotu, cząstek stałych i dwutlenku węgla. Natężenie emisji cząstek stałych wyznaczono na podstawie pomiarów współczynnika zadymienia spalin, korelacyjnych metod wyznaczania stężenia cząstek stałych [6] oraz zarejestrowanego objętościowego natężenia przepływu powietrza zużywanego przez silnik. Przebiegi współczynnika zadymienia spalin oraz natężenia przepływu powietrza zostały poddane takim samym

#### 4. The results of empirical tests

Empirical tests were conducted on a Citroën Berlingo light duty vehicle, equipped in a semi ignition engine, on a chassis dynamo meter at the Automotive Industry Institute in Warsaw. Equipment used in the tests was in line with the requirements of the Directive of the European Parliament and Council on vehicles homologation testing. Among the many types of tests – including FTP 75, HWFET, Stop and Go, and Autobahn – the test results selected were those from the Rule No. 83 ECE test conducted with the start-up of an engine warmed up to normal operating temperature.

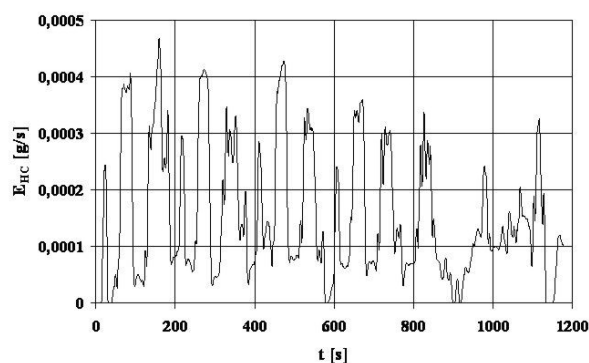
Registration of the processes of pollutant emission concentrations was processed digitally, eliminating significant errors and conducting low-pass filtration. The Golay-Savitzky filter [11] was used in filtration, with the following averaging parameters: two-sided use of two points and a second degree approximating polynomial.

Figure Nos. 9–13 depict the processed pollutant emission concentration processes: carbon monoxide, hydrocarbons, nitrogen oxides, particulate matter, and carbon dioxide. The concentration of particulate matter emissions was determined on the basis of measurements of the fume smoke coefficient, correlated methods for determining particulate matter concentrations [6], and the registered volume of air flow as used by the engine. The processes of the fume smoke coefficient as well as the volumes of air flow were subject to the same digital processing procedures as the pollutant emission concentration processes.



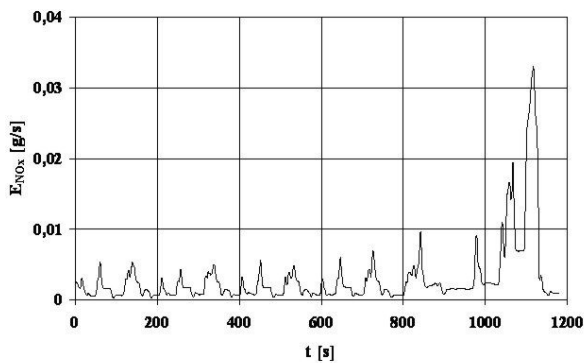
Rys. 9. Przebieg natężenia emisji tlenku węgla  $E_{CO}$

Fig. 9. The process of the emission intensity of carbon monoxide  $E_{CO}$

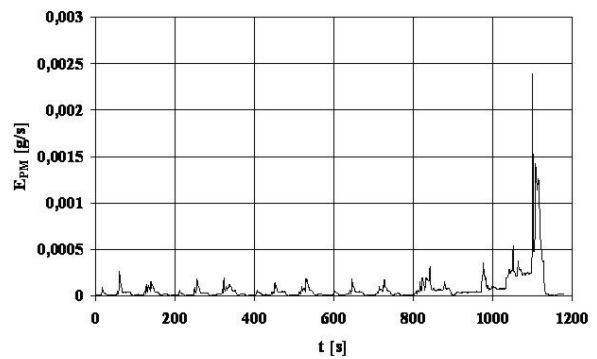


Rys. 10. Przebieg natężenia emisji węglowodorów  $E_{HC}$

Fig. 10. The process of the emission intensity of hydrocarbons  $E_{HC}$



Rys. 11. Przebieg natężenia emisji tlenków azotu  $E_{NOx}$   
 Fig. 11. The process of the emission intensity of nitrogen oxides  $E_{NOx}$



Rys. 12. Przebieg natężenia emisji cząstek stałych  $E_{PM}$   
 Fig. 12. The process of the emission intensity of particulate matter  $E_{PM}$

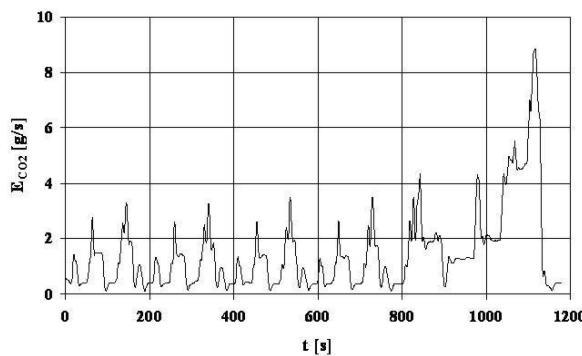
procedurom przetwarzania cyfrowego jak przebiegi natężenia emisji zanieczyszczeń.

Zarejestrowane przebiegi prędkości pojazdu oraz natężeń emisji zanieczyszczeń zostały wykorzystane do wyznaczenia charakterystyk emisji zanieczyszczeń.

Charakterystyki emisji zanieczyszczeń z samochodu wyznaczone metodą Monte Carlo.

Charakterystyki emisji zanieczyszczeń z samochodu zostały wyznaczone według metody przedstawionej w niniejszej pracy.

Na wykresach 14 – 18 przedstawiono charakterystyki emisji zanieczyszczeń w postaci zależności emisji drogowej od prędkości średniej. Zbiory punktów aproksymowano funkcją wielomianową o stopniu mniejszym niż 7 oprócz wykresu dla tlenku węgla, gdzie zastosowano do aproksymacji funkcję wykładniczą z powodu bardzo małych wartości emisji drogowej dla większych prędkości średnich, co groziło w wypadku funkcji wielomianowej wystąpieniem obszarów o ujemnej war-



Rys. 13. Przebieg natężenia emisji dwutlenku węgla  $E_{CO2}$   
 Fig. 13. The process of the emission intensity of carbon dioxide  $E_{CO2}$

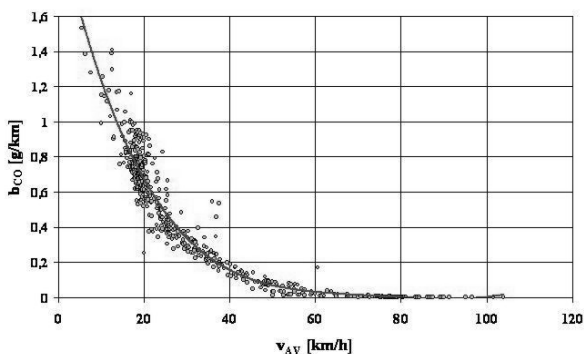
The registered vehicle velocity processes as well as those of pollutant emission concentrations were used to determine pollutant emission characteristics.

Vehicle pollutant emission characteristics determined using the Monte Carlo Method.

The vehicle pollutant emission characteristics were determined in line with the method presented in this paper.

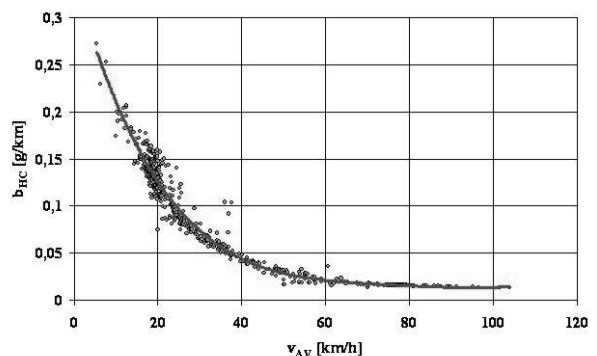
Figures Nos. 14–18 present the pollutant emissions in the form of the dependence of specific distance emissions on

average velocity. The sets of points were approximated by polynomial functions of a degree less than seven, except for the graph for carbon monoxide, where an exponential function was used in the approximation due to the very small value of specific distance emissions for greater average velocities, which threatened cases in which the polynomial function would have negative values for specific distance emissions. Selection of the degree of the polynomial for approximating the sets of points



Rys. 14. Zależność średniej emisji drogowej tlenku węgla  $b_{CO}$  od prędkości średniej  $v_{AV}$  lekkiego samochodu ciężarowego z silnikiem o zapłonie samoczynnym

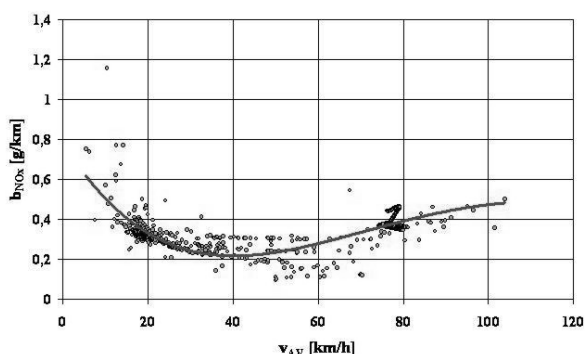
Fig. 14. The dependence of the specific distance emission of carbon oxide  $b_{CO}$  for light duty vehicle with semi ignition engines on the average velocity  $v_{AV}$



Rys. 15. Zależność średniej emisji drogowej węglowodorów  $b_{HC}$  od prędkości średniej  $v_{AV}$  lekkiego samochodu ciężarowego z silnikiem o zapłonie samoczynnym

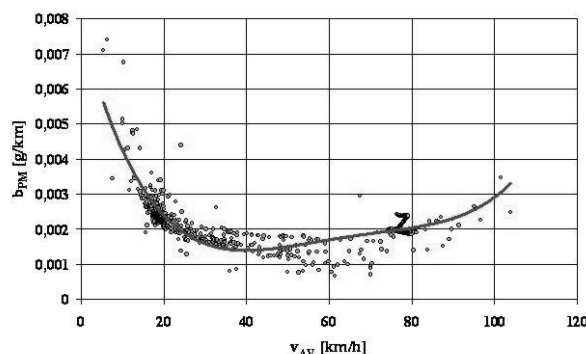
Fig. 15. The dependence of the specific distance emission of hydrocarbons  $b_{HC}$  for light duty vehicle with semi ignition engines on the average velocity  $v_{AV}$





Rys. 16. Zależność średniej emisji drogowej tlenków azotu  $b_{NO_x}$  od prędkości średniej  $v_{AV}$  lekkiego samochodu ciężarowego z silnikiem o zapłonie samoczynnym

Fig. 16. The dependence of the specific distance emission of nitrogen oxides  $b_{NO_x}$  for light duty vehicle with semi ignition engines on the average velocity  $v_{AV}$



Rys. 17. Zależność średniej emisji drogowej cząstek stałych  $b_{PM}$  od prędkości średniej  $v_{AV}$  lekkiego samochodu ciężarowego z silnikiem o zapłonie samoczynnym

Fig. 17. The dependence of the specific distance emission of particulate matter  $b_{PM}$  for light duty vehicle with semi ignition engines on the average velocity  $v_{AV}$

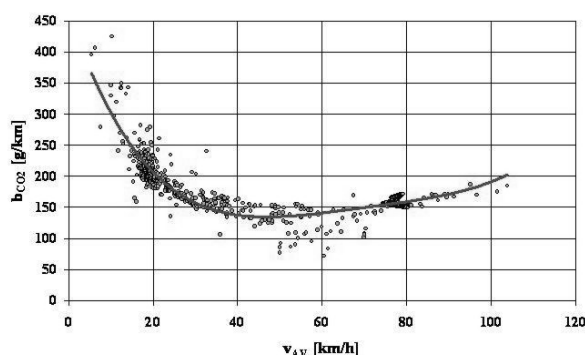
tości emisji drogowej. O doborze stopnia wielomianu proksymującego zbiory punktów decydowały kryteria niesprzeczności wyników aproksymacji z rzeczywistością (np. postulat dodatniości emisji) oraz z dotychczasowymi wiedzą i doświadczeniem.

Dla wyznaczonych charakterystyk jest znamienna ich regularność i zgodność z doświadczeniem [1, 4, 8]. W wypadku tlenku węgla i węglowodorów z silników o zapłonie samoczynnym do lekkich samochodów ciężarowych znamienne jest znaczne zmniejszenie się emisji drogowej w miarę wzrostu prędkości średniej pojazdu. Dla tlenków azotu, cząstek stałych i dwutlenku węgla również dla małych prędkości średnich pojazdu stwierdza się zmniejszanie się emisji drogowej, jednocześnie jednak następuje jej zwiększanie w obszarze dużych prędkości średnich, odpowiadających dużemu obciążeniu silnika.

Charakterystyki emisji zanieczyszczeń w postaci zależności emisji drogowej od prędkości średniej stanowią wartościowe źródło informacji o ekologicznych właściwościach pojazdów w dynamicznych warunkach użytkowania. Bez znajomości takich charakterystyk nie ma możliwości bilansowania emisji zanieczyszczeń z ruchu drogowego, a więc także oceny szkodliwości motoryzacji dla naturalnego i cywilizacyjnego środowiska ludzi, zatem zaproponowana metoda ma oprócz charakteru poznawczego również wymierne walory użyteczne.

## 6. Podsumowanie

Przedstawiona metoda wyznaczania charakterystyk emisji zanieczyszczeń z zastosowaniem metody Monte Carlo jest pionierską unikatową metodą badania ekologicznych właściwości silników spalinowych w symulowanych warunkach pseudoprzypadkowych. Znamienną cechą tej metody jest



Rys. 18. Zależność średniej emisji drogowej dwutlenku węgla  $b_{CO_2}$  od prędkości średniej  $v_{AV}$  lekkiego samochodu ciężarowego z silnikiem o zapłonie samoczynnym

Fig. 18. The dependence of the specific distance emission of carbon dioxide  $b_{CO_2}$  for light duty vehicle with semi ignition engines on the average velocity  $v_{AV}$

was determined by the criterion of non-contradiction of the approximation results with reality (e.g. the postulate of positivity of the emissions) as well as current knowledge and experience.

Regularity and agreement with experience [1, 4, 8] is characteristic of the determined attributes. In the case of carbon monoxide and hydrocarbons from semi ignition engines for light duty vehicle, what is characteristic is the significant decrease in specific distance emissions with an increase in average vehicle velocities. As to nitrogen oxides, particulate

matter, and carbon dioxide, there is also a fall in specific distance emissions in the case of low average vehicle velocities. However, at the same time they increase in the area of high average velocities, signifying major engine load.

Characteristics of pollutant emissions in the form of dependence between specific distance emissions and average velocity are a valuable source of information about the environmental properties of vehicles subject to dynamic operating conditions. Without an awareness of these characteristics it is not possible to balance pollutant emissions for road traffic, and thus also assess the harmfulness of motoring on the natural and civilizational environment of people. Thus, the proposed method, in addition to a learning character, also has tangible utilitarian values.

## 6. Summary

The presented method for determining the characteristics of pollutant emissions using the Monte Carlo method is a pioneering and unique method for studying the environmental properties of internal combustion engines under pseudo-random simulated conditions. A characteristic feature of this method is

fakt, iż jest możliwe wnioskowanie o właściwościach ocenianego obiektu w warunkach modelowanych procesami stochastycznymi o różnych właściwościach na podstawie znajomości tylko jednej realizacji procesu, która jest zarejestrowana w wyniku przeprowadzenia badania empirycznego. W zaproponowanej metodzie wykorzystywaną zmienną właściwością procesów stochastycznych jest wartość oczekiwana prędkości pojazdu, możliwe jest jednak znaczne rozszerzenie programu badań na inne właściwości procesów stochastycznych.

Możliwości zastosowania opracowanej metody są dużo szersze od opisanych, może być ona wykorzystana do badania wielu obiektów i to nie tylko technicznych, dla których to obiektów jest znamienna współzależność procesów opisujących obiekt: postulowana determinacja lub stwierdzona korelacja.

the fact that it is possible for draw conclusions as to the qualities of the evaluated object subject to conditions of modeled stochastic processes of various properties on the basis of familiarity with only a single implementation of a process that is registered as a result of a conducted empirical experiment. In the proposed method, the variable property of stochastic processes used is the value of the expected vehicle velocity. However, it is possible to significantly expand the test program to encompass other stochastic process properties.

The potential application for the developed method is much broader than described. It can be used to study many objects, not only technical ones, for which the co-dependence of processes describing the object is a characteristic—the postulated determination or confirmed correlation.

### 7. References

1. BUWAL, INFRAS AG: Luftschadstoffemissionen des Strassenverkehrs 1950 – 2010. BUWAL–Bericht Nr. 255. Bern, Zürich, 1995.
2. Chłopek Z.: Metody badań ekologicznych właściwości silników spalinowych w warunkach przypadkowych. Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów Politechniki Warszawskiej 1999; 3(34): 27–34.
3. Chłopek Z.: Metody badań właściwości silników spalinowych w warunkach przypadkowych modelujących użytkowanie. Archiwum Motoryzacji 2001; 4: 187–210.
4. Chłopek Z.: Modelowanie procesów emisji spalin w warunkach eksploatacji trakcyjnej silników spalinowych. Prace Naukowe. Seria „Mechanika” z. 173. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 1999.
5. Chłopek Z.: Pojazdy samochodowe. Ochrona środowiska naturalnego. Warszawa: WKŁ, 2002.
6. Chłopek Z., Darkowski A., Piaseczny L.: Influence of metalorganic additive to the fuel on the pollution emission from the SI engine. Polish Journal of Environmental Studies, 2005; 5(14): 559–567.
7. <http://www.dieselnet.com/standards/cycles/>.
8. INFRAS AG: Handbuch für Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs; Version 2.1. Bern, 2004.
9. Lohmeyer A., Düring I., Lorentz H.: Validierung von PM10–Immissions–berechnungen im Nahbereich von Straßen und Quantifizierung der Staubbildung von Straßen, Schildhornstraße in Berlin. Senatsverwaltung für Stadtentwicklung. Berlin, 2001.
10. Metropolis N., Ulam S.: The Monte Carlo Method. Journal of the American Statistical Association, 1949; 44(247): 335–341.
11. Savitzky A., Golay M.J.E.: Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. Analytical Chemistry 1964; 36: 1627–1639.

---

#### **Prof. nzw. dr hab. inż. Zdzisław CHŁOPEK**

Przemysłowy Instytut Motoryzacji w Warszawie  
ul. Jagiellońska 55, 03–301 Warszawa  
e-mail: moriarty@o2.pl

#### **Mgr inż. Piotr LASKOWSKI**

Politechnika Warszawska  
Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych  
ul. Narbutta 84, 02–524 Warszawa  
e-mail: peterkasprus@interia.pl

---