

Zdzisław CHŁOPEK
Jacek BIEDRZYCKI
Jakub LASOCKI
Piotr WÓJCIK

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF DYNAMIC STATES OF AN INTERNAL COMBUSTION ENGINE ON ITS OPERATIONAL PROPERTIES

OCENA WPŁYWU STANÓW DYNAMICZNYCH SILNIKA SPALINOWEGO NA JEGO WŁAŚCIWOŚCI UŻYTKOWE*

Internal combustion engines as systems described by non-linear models do not have any properties that would not depend on their current states. The paper presents results of testing an automotive engine in dynamic states determined by the vehicle acceleration sign in vehicle driving tests simulating the real operation of passenger cars. During the tests, pollutant emission rates and fuel flow rates averaged for specific vehicle states were examined. The processes under investigation were found to be highly sensitive both to the dynamic states and to the types of the vehicle driving tests.

Keywords: internal combustion engines, pollutant emissions, vehicle driving tests, dynamic states.

Silniki spalinowe jako układy opisywane modelami nieliniowymi nie mają właściwości niezależnych od stanów, w jakich się znajdują. W pracy przedstawiono wyniki badań silnika samochodowego w stanach dynamicznych zdeterminowanych znakiem przyspieszenia pojazdu w testach jezdnych symulujących rzeczywistą eksploatację samochodów osobowych. Badano uśrednione w tych stanach: natężenie emisji zanieczyszczeń i natężenie przepływu paliwa. Stwierdzono znaczną wrażliwość badanych procesów zarówno na stany dynamiczne, jak i na rodzaje testów jezdnych.

Słowa kluczowe: silniki spalinowe, emisja zanieczyszczeń, testy jezdne, stany dynamiczne.

1. Introduction

In general, real objects described by non-linear mathematical models considered satisfactorily consistent with the subject of modelling [9] have no properties that would be independent of the objects' states [8]. The objects of this kind include internal combustion (IC) engines. Therefore, the degree of generality of the IC engine research tasks must be limited. In particular, in the case of IC engines being in dynamic states, some constraints in the form of specific test procedures adopted, e.g. a definite class of the processes assumed as engine operation conditions or a special method of processing the test results, such as averaging within the range of process values, must be imposed on the system under investigation.

The operational properties of IC engines (for constant engine steering characteristics) are chiefly determined by the quantities that characterize the engine work intensity, described as the effective power output, and the thermal engine state defined by the temperatures of engine parts and systems [8]. The quantities characterizing the engine work intensity are usually described by engine torque output, representing the engine load, and engine crankshaft speed [8]. This description may also be supplemented with the current setting of engine steering as another engine load indicator. These three quantities, i.e. engine steering setting "s", engine torque output "M_e", and engine crankshaft speed "n", depend on each other. For static states, this interdependence is represented by an elementary function with numerical values:

$$F(s, M_e, n) = 0 \quad (1)$$

For dynamic states, it takes a form of an operational equation [2]:

$$\Im[s, M_e, n] = 0 \quad (2)$$

The load of an IC engine may also be described with the use of the resistance torque "M_o" instead of the engine torque output. For static states, the following equation obviously holds:

$$M_e = M_o \quad (3)$$

but for dynamic states, we have:

$$\frac{d}{dt} [J(t) \times n(t)] = M_e(t) - M_o(t) \quad (4)$$

where: t – time;

J – moment of inertia of the moving engine parts, reduced to the crankshaft axis.

Hence, the following functional equation with numerical values applies to static states:

$$F(s, M_o, n) = 0 \quad (5)$$

(*) Tekst artykułu w polskiej wersji językowej dostępny w elektronicznym wydaniu kwartalnika na stronie www.ein.org.pl

while for dynamic states, it takes the form of an operational equation:

$$\Re[s, M_o, n] = 0 \quad (6)$$

In dynamic conditions, the operational properties of IC engines depend not only on the values of the quantities that describe the state of engine operation but also on the processes of changes in these values (time histories) [8]. For this reason, the operational properties of IC engines in static and dynamic conditions may significantly differ from each other [8].

When the thermal state of the IC engine is stable, the engine properties in its dynamic states are determined by the engine torque and crankshaft speed processes. In this connection, the operational properties of an IC engine in its dynamic states cannot be, in general, unequivocally evaluated. However, there is a possibility of considering the operational properties of an IC engine in certain dynamic states that may be assumed as elementary states. As one of the possible criteria of qualifying to the elementary dynamic states of an IC engine, the signs (positive or negative) of derivatives of the states with respect to time in the whole range of engine operation parameters may be considered. Thus, the following elementary states of engine operation are possible as combinations of engine controls setting, resistance torque, and engine crankshaft speed:

$$\frac{ds}{dt} > 0 \wedge \frac{dM_o}{dt} > 0 ; \Rightarrow \frac{dn}{dt} > 0 \quad (7)$$

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

$$\frac{ds}{dt} < 0 \wedge \frac{dM_o}{dt} > 0 ; \Rightarrow \frac{dn}{dt} > 0 \quad (9)$$

$$\frac{ds}{dt} < 0 \wedge \frac{dM_o}{dt} < 0 ; \Rightarrow \frac{dn}{dt} < 0 \quad (10)$$

$$\frac{ds}{dt} > 0 \wedge \frac{dM_e}{dt} > 0 ; \Rightarrow \frac{dn}{dt} > 0 \quad (11)$$

$$\frac{ds}{dt} > 0 \wedge \frac{dM_e}{dt} < 0 ; \Rightarrow \frac{dn}{dt} < 0 \quad (12)$$

In turn, if the engine torque output is to be taken into account in the said combinations in place of the resistance torque, then the possible elementary states of engine operation may be defined as follows:

$$\frac{ds}{dt} > 0 \wedge \frac{dM_e}{dt} > 0 ; \Rightarrow \frac{dn}{dt} > 0 \quad (13)$$

$$\frac{ds}{dt} > 0 \wedge \frac{dM_e}{dt} < 0 ; \Rightarrow \frac{dn}{dt} < 0 \quad (14)$$

$$\frac{ds}{dt} < 0 \wedge \frac{dM_e}{dt} > 0 ; \Rightarrow \frac{dn}{dt} > 0 \quad (15)$$

$$\frac{ds}{dt} < 0 \wedge \frac{dM_e}{dt} < 0 ; \Rightarrow \frac{dn}{dt} < 0 \quad (16)$$

$$\frac{ds}{dt} > 0 \wedge \frac{dM_e}{dt} < 0 ; \Rightarrow \frac{dn}{dt} < 0 \quad (17)$$

$$\frac{ds}{dt} < 0 \wedge \frac{dM_e}{dt} < 0 ; \Rightarrow \frac{dn}{dt} > 0 \quad (18)$$

The use of descriptions (7–12) and (13–18) may also be considered with respect to the assumed ranges of values of individual processes. Moreover, there is a possibility of taking into account combinations of engine operation conditions and states defined by the ranges of values of individual processes, signs of derivatives of the processes with respect to time, and zero values of the time derivatives with tolerance ranges appropriately defined (constant-value processes), e.g.:

$$\frac{ds}{dt} > 0 ; \quad \frac{dM_e}{dt} \in \left[\delta_{M_e} - \frac{\varepsilon_{\delta M_e}}{2} ; \delta_{M_e} + \frac{\varepsilon_{\delta M_e}}{2} \right] \quad (19)$$

for

$$s \in [s_{\min}; s_{\max}] \quad n \in [n_{\min}; n_{\max}] \quad M_e \in [M_{e\min}; M_{e\max}] \quad (20)$$

In the conditions of stable thermal state of an IC engine, the state of an automotive engine in the conditions of engine operation in a moving vehicle is determined by the vehicle speed process [8]. Therefore, vehicle driving tests may be used to examine the operational properties of automotive IC engines. Such tests are commonly carried out within type-approval tests [25, 26] and special tests where special vehicle traffic conditions are simulated, e.g. those prevailing in urban traffic congestions (the “Stop-and-Go” test [5]) or in the traffic on motorways and fast roads (the “Autobahn” test [5]). Obviously, the results of examination of the operational properties of engines in the dynamic states that occur at various test procedures will differ from each other.

The need to examine the operational properties of engines in dynamic states has existed for many years. Many publications with reports of works on this subject are issued [1, 3, 4, 6–8, 10–19, 21–24] but, in principle, there are no standards so far for tests of this type; only the methods of examining the averaged properties of IC engines in dynamic states, such as those used at type-approval tests, may be considered as standards [25, 26].

Most of the works concern the controlling of IC engines with taking into account dynamic states [4, 12, 14, 17, 23]. In publication [4], a mathematical model used to simulate the injector operation in a common rail engine fuelling system has been presented. Monograph [12], prepared at ETH in Zürich, shows the present-day state of knowledge regarding the modelling of working processes in IC engines in respect of the use of such processes in engine control systems. Publication [14] is dedicated to the use of a mathematical model of the processes taking place in the IC engine to control the processes in an HCCI (Homogenous Charge Compression Ignition) engine. A multidimensional model used for developing IC engine control algorithms with the application of fuzzy logic has been shown in publication [17]. Results of examination of the parameters of controlling an automotive engine in real operation conditions have been presented in paper [23].

The properties of automotive IC engines in specific working conditions prevailing during real vehicle operation are examined as well [15, 16, 19], where e.g. mobile measurement systems PEMS (Portable Emissions Measurement System) are used. Results of the examination of pollutant emissions from non-road and automotive engines have been presented in publications [15] and [16], respectively. The impact of passenger car motion parameters on fuel consumption and pollutant emissions during real vehicle operation in urban traffic conditions has been analysed in publication [19].

Some of the works are dedicated to research on the processes of flows, air-fuel mixture formation, combustion, and formation of

individual exhaust gas components in IC engines being in dynamic states [22, 24].

Most of the publications deal with motor vehicle engines; however, results of the examination of pollutant emissions from a marine IC piston engine during engine start-up and from an agricultural tractor engine have been presented in papers [13] and [15], respectively.

At this work, a decision was made to carry out tests with the use of the test procedures named as "PIMOT tests", developed by the authors during the work described in publication [7]. A unique concept of defining appropriate test procedures for the simulation of real conditions of driving a passenger car [6] was adopted. The vehicle velocity recorded in comparable traffic conditions (i.e. in the street congestion, urban, extra-urban, and high-speed traffic conditions) were treated as individual realizations of stochastic processes of vehicle velocity in the traffic conditions under consideration. Based on an analysis of the stochastic processes, several velocity processes were selected for each of the types of vehicle motion conditions, with treating individual realizations of a stochastic process as a vehicle driving test for each of the types of the traffic conditions under consideration. Individual realizations of the vehicle speed process were defined in conformity with the criterion of faithful simulation in the time domain. The vehicle driving tests were defined based on the similarity of zero-dimensional characteristics of the stochastic processes of speed in real vehicle operation and in the tests, i.e. the expected values, extreme values, and variance, taken as a criterion for comparisons.

Figs. 1–4 show the PIMOT vehicle driving tests, with each of them consisting of four realizations of the stochastic processes of vehicle velocity that characterize the vehicle motion in the following conditions:

- urban traffic congestions (denoted by "CT");
- urban traffic without congestions (denoted by "UT");
- extra-urban ("rural") traffic (denoted by "RT");
- high-speed traffic (on motorways and fast roads, denoted by "HT").

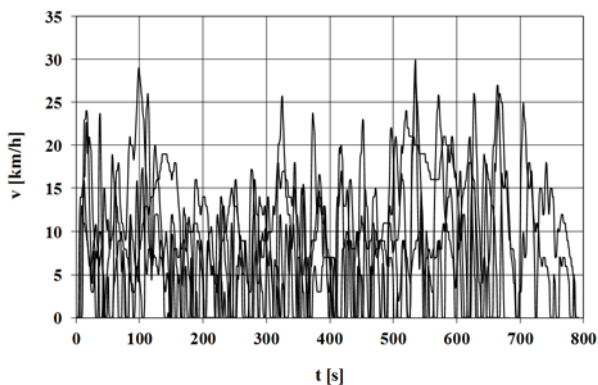


Fig. 1. The vehicle velocity – v for test drives in urban traffic congestions – the driving tests CT

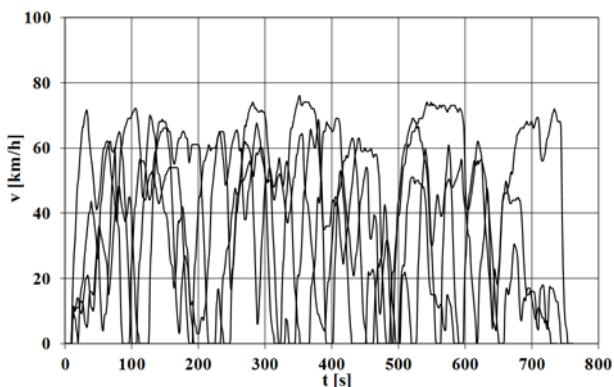


Fig. 2. The vehicle velocity – v for test drives in urban traffic – the driving tests UT

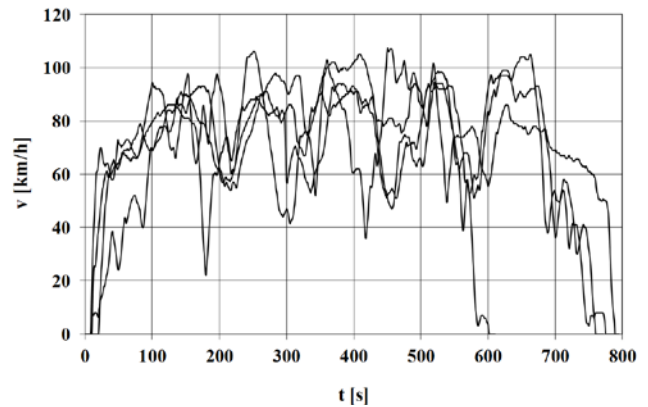


Fig. 3. The vehicle velocity – v for test drives in extra-urban traffic – the driving tests RT

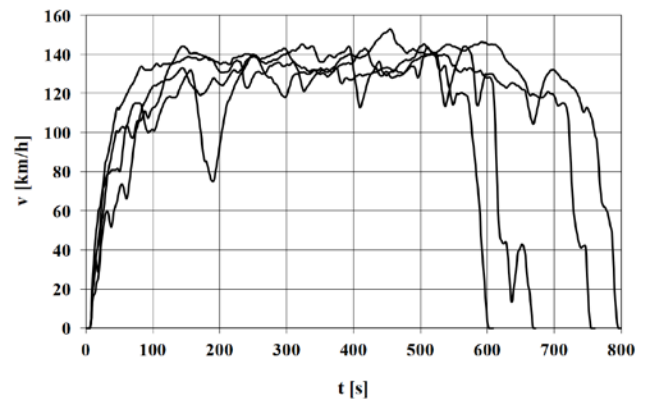


Fig. 4. The vehicle velocity – v for test drives in high-speed traffic – the driving tests HT

2. Methods, object, and results of testing

To assess the impact of dynamic states of an IC engine on its properties, a research work was done, which was based on tests carried out in conditions corresponding to negative and positive accelerations of the vehicle tested. During the tests, pollutant emissions and fuel consumption were examined. The said impact of dynamic states was assessed in the conditions of engine operation in a motor vehicle subjected to PIMOT tests.

The test specimen was a Honda Civic passenger car provided with a spark-ignition engine of 1 396 cm³ displacement volume.

The vehicle tests were carried out on a Schenck-Komeg vehicle chassis dynamometer EMDY 48. The pollutant emissions were examined with the use of an exhaust gas analysing test stand which incorporates a Horiba Mexa 7200 system provided with the following analysers:

- AIA-721A (carbon monoxide concentration);
- AIA-722 (carbon dioxide concentration);
- MPA-720 (oxygen concentration);
- CLA-755A (nitrogen oxides concentration);
- FIA-725A (hydrocarbon concentration).

The processes subjected to investigation included the intensity of flow of the fuel consumed by the engine and the pollutant emission intensity. The signals were synchronized at the location where the exhaust gas was taken off, downstream of the multifunctional catalytic reactor; the delays in individual signals related to the exhaust gas analysis process were taken into account and the fuel flow intensity was determined from the balance of carbon mass in the signals of exhaust gas component emission intensity. The signals under investigation were pre-processed for gross errors to be eliminated and for the

share of high-frequency interference to be reduced. The measurement results were sampled with a frequency of 10 Hz and then averaged for 10 subsequent samples. Thus, the sampling interval for the signals processed was equal to 1 s. The gross errors were identified by the method of analysing the current variance of measurement results. For the share of high-frequency noise in the signals to be reduced, a Golay-Savitzky low-pass filter [20] was used, where both-side approximation from two data points on each side to a polynomial of degree 2 was applied.

Let sets E_{CO} , E_{HC} , E_{NOx} , E_{CO2} and G_f contain digitized values of pollutant emission intensity, fuel flow intensity, and vehicle acceleration for each of the test realizations with a sampling frequency of 1 Hz. The power of each of the sets is N . Each of the sets may be presented in the form of a sum of sets consisting of elements characterized by such a feature that the vehicle acceleration is either positive or negative:

$$X = X_{(a<0)} \cup X_{(a>0)} \quad (21)$$

where: $X = E_{CO}, E_{HC}, E_{NOx}, E_{CO2}, G_f$.

Let the power of the sets $X_{(a<0)}$ be $N_{(a<0)}$ and the power of the sets $X_{(a>0)}$ be $N_{(a>0)}$. The average value of elements of the sets $X_{(a<0)}$ is:

$$X_{(a<0)AV} = \frac{1}{N_{(a<0)}} \sum_{i=1}^{N_{(a<0)}} X_{(a<0)i} \quad (22)$$

For the sets $X_{(a>0)}$, this average value is:

$$X_{(a>0)AV} = \frac{1}{N_{(a>0)}} \sum_{i=1}^{N_{(a>0)}} X_{(a>0)i} \quad (23)$$

where: $X_{(a<0)AV} = E_{CO(a<0)j}, E_{HC(a<0)j}, E_{NOx(a<0)j}, E_{CO2(a<0)j}, G_{f(a<0)j}$;
 $X_{(a>0)AV} = E_{CO(a>0)j}, E_{HC(a>0)j}, E_{NOx(a>0)j}, E_{CO2(a>0)j}, G_{f(a>0)j}$;
 $j = 1, 2, 3, 4$ – item number of a realization of each of the tests.

Example test results for specific traffic types have been presented in illustrations as specified below:

- for the CT test, in Figs. 5 and 6;
- for the UT test, in Figs. 7 and 8;
- for the RT test, in Figs. 9 and 10;
- for the HT test, in Figs. 11 and 12.

The graphs shown in the said illustrations represent the average values and the relative ranges of the average fuel flow intensity and average pollutant emission intensity for the test results for negative and positive vehicle accelerations in specific test realizations.

The average value of the average pollutant emission intensity for the realizations of each of the tests is:

$$E_{x(a>0)} = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 E_{x(a>0)j} \quad (24)$$

where: $x = CO, HC, NOx, CO_2$.

Similarly, the average value of the average fuel flow intensity is defined as follows:

$$G_{f(a>0)} = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 G_{f(a>0)j} \quad (25)$$

The relative range is defined as the ratio of the absolute value of

range R to the average value AV :

$$\delta = \frac{|R|}{AV} \quad (26)$$

where: $AV = E_{x(a<0)}, E_{x(a>0)}, G_{f(a<0)}, G_{f(a>0)}$, and

$$R = \max(y) - \min(y) \quad (27)$$

where: $y = E_{x(a<0)}, E_{x(a>0)}, G_{f(a<0)}, G_{f(a>0)}$;

- max – operator of the maximum value of the elements of a set;
- min – operator of the minimum value of the elements of a set.

In the graphs below, the indices $(a<0)$ and $(a>0)$ have been referred to in the legends.

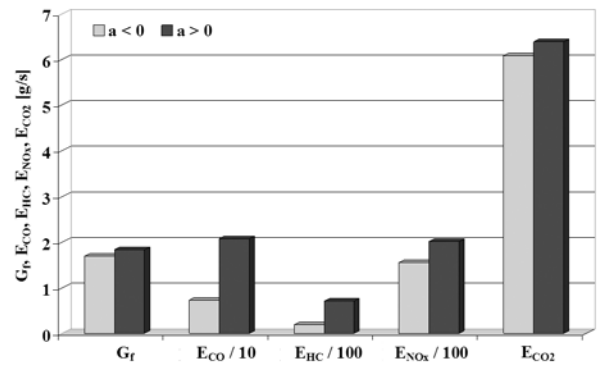


Fig. 5. Average values of the average fuel flow intensity (G_f) and of the average intensity of emission of carbon monoxide (E_{CO}), hydrocarbons (E_{HC}), nitrogen oxides (E_{NOx}), and carbon dioxide (E_{CO2}) for negative ($a < 0$) and positive ($a > 0$) vehicle accelerations in the CT test

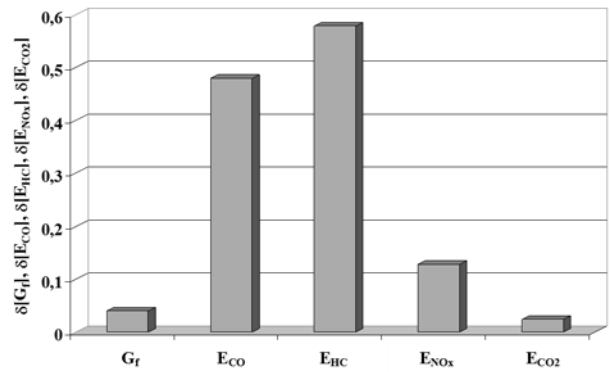


Fig. 6. Relative ranges of the average fuel flow intensity (G_f) and of the average intensity of emission of carbon monoxide (E_{CO}), hydrocarbons (E_{HC}), nitrogen oxides (E_{NOx}), and carbon dioxide (E_{CO2}) for negative and positive vehicle accelerations in the CT test

A vehicle driven in urban traffic congestions is subject to very special conditions of motion, characterized by low absolute values of vehicle acceleration. This explains the fact that the carbon dioxide emission intensity and fuel flow intensity, determined for the vehicle acceleration phase, do not significantly differ from the corresponding values measured for the deceleration phase, especially if the “averaging” properties of the exhaust gas sampling system are taken into consideration. In contrast, significant increase can be clearly seen in the intensity of emission of hydrocarbons and, in second rank, carbon monoxide.

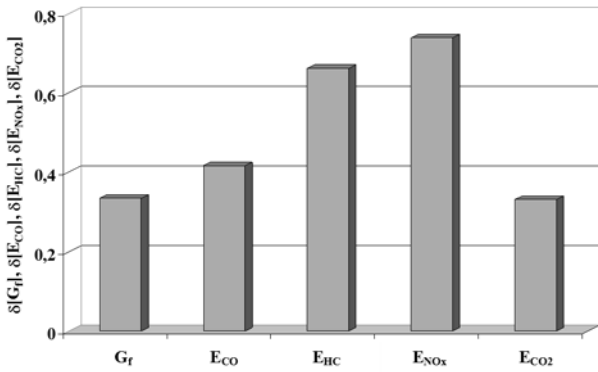


Fig. 7. Average values of the average fuel flow intensity (G_f) and of the average intensity of the emission of carbon monoxide (E_{CO}), hydrocarbons (E_{HC}), nitrogen oxides (E_{NOx}), and carbon dioxide (E_{CO2}) for negative ($a < 0$) and positive ($a > 0$) vehicle accelerations in the UT test

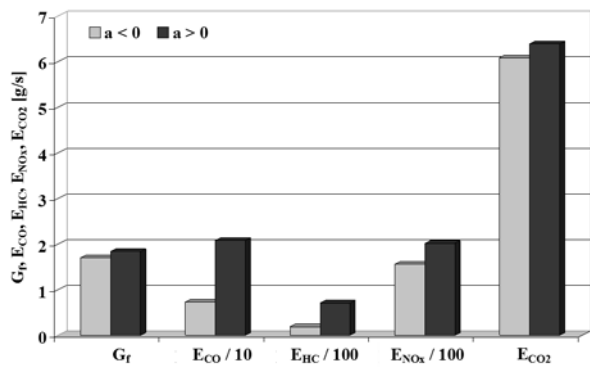


Fig. 8. Relative ranges of the average fuel flow intensity (G_f) and of the average intensity of the emission of carbon monoxide (E_{CO}), hydrocarbons (E_{HC}), nitrogen oxides (E_{NOx}), and carbon dioxide (E_{CO2}) for negative and positive vehicle accelerations in the UT test

For the vehicle driven in urban traffic conditions (exclusive of traffic congestions), the differences in pollutant emission intensity and fuel intensity rates for the phases of accelerated and decelerated vehicle motion are much bigger than those recorded for vehicle drives in urban traffic congestions. A particularly high relative range (exceeding 50%) can be noticed for the nitrogen oxides emission intensity; this is related to high engine load occurring when the vehicle is accelerating.

The relations observed in the conditions of extra-urban traffic are similar to those recorded for the urban traffic conditions, except for the fact that the impact of vehicle accelerations on the increase in pollutant emission intensity and fuel flow intensity is even more clearly visible.

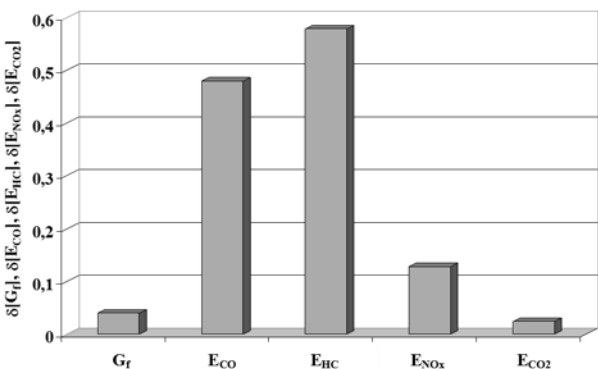


Fig. 9. Average values of the average fuel flow intensity (G_f) and of the average intensity of the emission of carbon monoxide (E_{CO}), hydrocarbons (E_{HC}), nitrogen oxides (E_{NOx}), and carbon dioxide (E_{CO2}) for negative ($a < 0$) and positive ($a > 0$) vehicle accelerations in the RT test

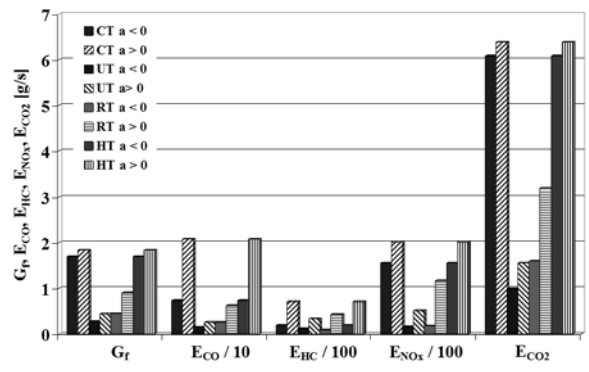


Fig. 10. Relative ranges of the average fuel flow intensity (G_f) and of the average intensity of the emission of carbon monoxide (E_{CO}), hydrocarbons (E_{HC}), nitrogen oxides (E_{NOx}), and carbon dioxide (E_{CO2}) for negative and positive vehicle accelerations in the RT test

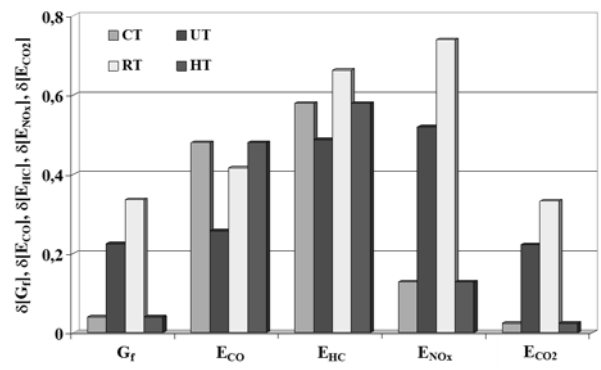


Fig. 11. Average values of the average fuel flow intensity (G_f) and of the average intensity of the emission of carbon monoxide (E_{CO}), hydrocarbons (E_{HC}), nitrogen oxides (E_{NOx}), and carbon dioxide (E_{CO2}) for negative ($a < 0$) and positive ($a > 0$) vehicle accelerations in the HT test

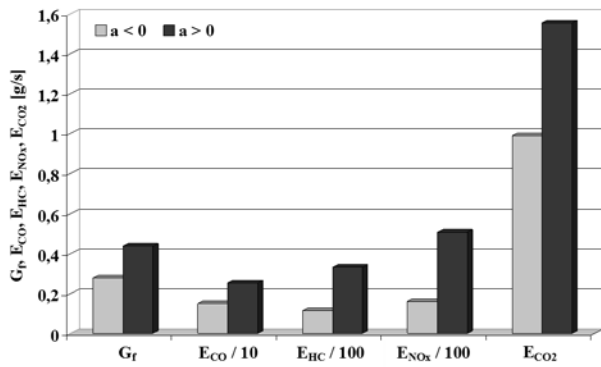


Fig. 12. Relative ranges of the average fuel flow intensity (G_f) and of the average intensity of the emission of carbon monoxide (E_{CO}), hydrocarbons (E_{HC}), nitrogen oxides (E_{NOx}), and carbon dioxide (E_{CO2}) for negative and positive vehicle accelerations in the HT test

During vehicle drives on motorways and fast roads, the absolute vehicle acceleration values are low. In this connection, no significant differences can be seen in fuel flow intensity and carbon dioxide emission intensity for the phases of vehicle acceleration and deceleration. A similar finding may be formulated for the nitrogen oxides emission intensity. Differences occur, however, for the carbon monoxide and hydrocarbons emission intensity.

An overall graph of the average fuel flow intensity and average pollutant emission intensity for the negative and positive vehicle accelerations in the PIMOT tests has been presented in Fig. 13.

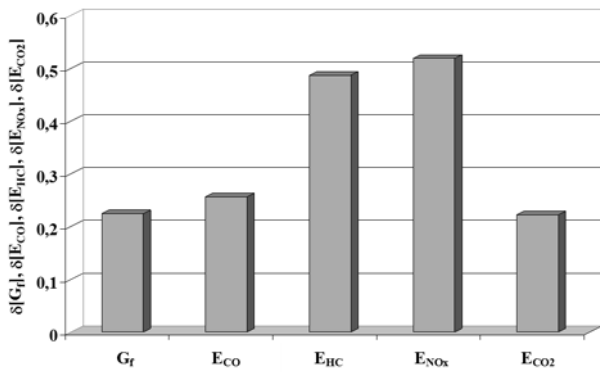


Fig. 13. Average values of the average fuel flow intensity (G_f) and of the average intensity of the emission of carbon monoxide (E_{CO}), hydrocarbons (E_{HC}), nitrogen oxides (E_{NOx}), and carbon dioxide (E_{CO2}) for negative ($a < 0$) and positive ($a > 0$) vehicle accelerations in the PIMOT tests

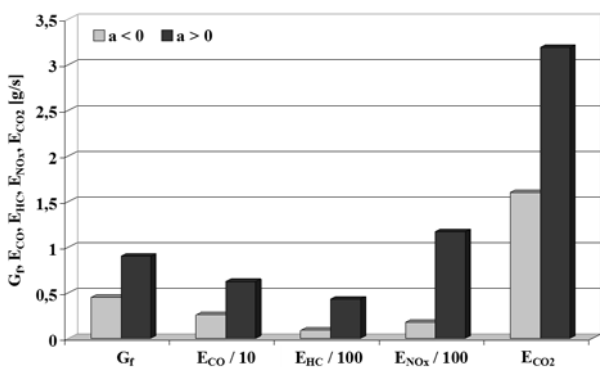


Fig. 14. Relative ranges of the average fuel flow intensity (G_f) and of the average intensity of the emission of carbon monoxide (E_{CO}), hydrocarbons (E_{HC}), nitrogen oxides (E_{NOx}), and carbon dioxide (E_{CO2}) for negative and positive vehicle accelerations in the PIMOT tests

An overall graph of the relative ranges of fuel flow intensity and pollutant emission intensity for negative and positive vehicle accelerations in the PIMOT tests has been shown in Fig. 14.

3. Conclusions

Based on the tests carried out for dynamic states of an IC engine, the following conclusions may be formulated.

- 1) It has been unequivocally ascertained that the values of pollutant emission intensity and fuel flow intensity in the conditions

of vehicle acceleration are higher than those determined when the vehicle motion is decelerated. The values of these differences are significantly diversified depending on the quantities examined and the conditions of vehicle motion, determined by the test types adopted. The relative range of the average pollutant emission intensity and of the fuel flow intensity varies within limits from 0.024 to 0.739, where the lowest and the highest value were obtained for the carbon dioxide emission intensity in the conditions of vehicle motion in urban congestion traffic and for the nitrogen oxides emission intensity in the conditions of vehicle motion in extra-urban traffic, respectively.

- 2) No unequivocal interrelations have been found to exist between the increase in pollutant emission intensity and fuel flow intensity as determined for vehicle acceleration on the one hand and those determined for vehicle deceleration on the other hand, at different test types. As an example, when the vehicle was operated in the conditions of urban congestion traffic and traffic on motorways and fast roads, the quantity found to be most sensitive to the dynamic states under consideration was the hydrocarbons emission intensity; in the conditions of urban and extra-urban traffic, the highest sensitivity was observed for the nitrogen oxides emission intensity.
- 3) The highest values of the relative ranges of pollutant emission intensity and fuel flow intensity were recorded in the conditions of extra-urban traffic; the values of these relative ranges were on the lowest level for the conditions of urban congestion traffic.
- 4) The relative range of pollutant emission intensity in the vehicle acceleration phase reached the highest value for the hydrocarbons emission while the lowest values of this relative range were recorded for the carbon dioxide emission intensity and for the fuel flow intensity.

In general, a statement may be made that in the states of IC engine operation when the vehicle acceleration sign is positive, the average intensity of flow of the fuel consumed and the average pollutant emission intensity are higher than those corresponding to negative vehicle acceleration. In some cases, this difference is very big, i.e. the relative range of these quantities even exceeds 70%.

Acknowledgement: The paper has been based on results of tests carried out within research project No. N N509 556440 entitled "Sensitivity of pollutant emission and fuel consumption to the conditions of operation of a spark-ignition engine", sponsored by the National Science Centre.

References

1. Arregle J, Bermudez V, Serrano JR, Fuentes E. Procedure for engine transient cycle emissions testing in real time. *Experimental Thermal and Fluid Science* 2006; 30(5): 485–496.
2. Banach S. *Théorie des opérations linéaires*. Monografie Matematyczne 1. Warszawa, 1932.
3. Bermúdez V, Luján JM, Serrano JR, Pla B. Transient particle emission measurement with optical techniques. *Measurement Science and Technology* 2008; 19(6): 065404.
4. Bianchi GM, Falfari S, Parotto M, Osbat G. Advanced modeling of common rail injector dynamics and comparison with experiments. SAE paper 2003-01-0006.
5. Buwal, infras AG. *Luftschadstoffemissionen des Strassenverkehrs 1950–2010*. BUWAL–Bericht Nr. 255, 1995.
6. Chłopek Z, Biedrzycki J, Lasocki J, Wójcik P. Investigation of the motion of motor vehicles in Polish conditions. *The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji* 2013; 60(2): 3–20.
7. Chłopek Z, Biedrzycki J, Lasocki J, Wójcik P. Sprawozdanie z pracy N N509 556440 „Wrażliwość emisji zanieczyszczeń i zużycia paliwa na warunki użytkowania trakcyjnego silnika o zapłonie iskrowym. Warszawa, 2013. (Praca nie publikowana).
8. Chłopek Z. Modelowanie procesów emisji spalin w warunkach eksploatacji trakcyjnej silników spalinowych. *Prace Naukowe. Seria „Mechanika”* z. 173. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 1999.

9. Chłopek Z, Piaseczny L. Remarks about the modelling in science researches. *Eksplatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2001; 11(4): 47–57.
10. Chłopek Z. Some remarks on engine testing in dynamic states. *Silniki Spalinowe – Combustion Engines* 2010; 143(4): 60–72.
11. Daw CS, Kennel MB, Finney CEA, Connolly F T. Observing and modeling nonlinear dynamics in an internal combustion engine. *Physical Review E* 1998; 57(3): 2811–2819.
12. Guzzella L, Onder Ch. Introduction to modeling and control of internal combustion engine systems. Springer Verlag. 2nd ed., 2010.
13. Kniaziewicz T, Piaseczny L, Zadrag R. Toksyczność spalin okrętowego silnika spalinowego podczas jego rozruchu. *Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej* 1999; 2: 51–63.
14. Ma H, Xu HM, Wang JH. Real-time control oriented HCCI engine cycle-to-cycle dynamic modelling. *International Journal of Automation and Computing* 2011; 8(3): 317–325.
15. Merksiz J, Lijewski P, Fuć P, Weymann S. Exhaust emission tests from non-road vehicles conducted with the use of PEMS analyzers. *Eksplatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2013; 15(4): 364–368.
16. Merksiz J, Gis W. Exhaust emission from vehicles under real conditions. Proceedings of the Ninth Asia-Pacific International Symposium on Combustion and Energy Utilization. APISCEU. Beijing, 2008.
17. Piltan F, Sulaiman N, Talooki I A, Ferdosali P. Control of IC engine: design a novel MIMO fuzzy backstepping adaptive based fuzzy estimator variable structure control. *International Journal of Robotics and Automation* 2011; 2(5): 360–380.
18. Quintero HF, Romero CA, Vanegas Useche LV. Thermodynamic and dynamic analysis of an internal combustion engine with a noncircular-gear based modified crank-slider mechanism. 12th IFToMM World Congress, Besançon (France), June 18–21, 2007: 1–6.
19. Romaniszyn K, Nowak A. Analiza wpływu parametrów ruchu pojazdu na zużycie paliwa i emisję zanieczyszczeń przy przejeździe przez Bielsko-Białą. *Zeszyty Naukowe OBRSM BOSMAL* 2004; 23(1): 43–49.
20. Savitzky A, Golay M J E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Analytical Chemistry* 1964; 36: 1627–1639.
21. Wang J, Storey J, Domingo N, Huff S, Thomas J, West B. Studies of diesel engine particle emissions during transient operations using an engine exhaust particle size. *Aerosol Science and Technology* 2006; 40(11): 1002–1015.
22. Wang Z-s, Liu D-g, Xu Ch-s. The dynamic modelling and simulation for air supplying mechanism of internal combustion engine based on Bond graph. *Intelligent System Design and Engineering Application* 2010; 2: 647–650.
23. Wendeker M, Godula A. Research on variability in control parameters for spark ignition engines in real-life operation. *Eksplatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2002; 16(4): 12–23.
24. Whitelaw JHW, Payri F, Desantes J M. Thermo- and fluid-dynamic processes in diesel engines. Springer 2002.
25. Worldwide emission standards. Heavy duty & off-road vehicles. Delphi. Innovation for the real world. 2013/2014.
26. Worldwide emission standards. Passenger cars and light duty vehicles. Delphi. Innovation for the real world. 2014/2015.

Zdzisław CHŁOPEK

Institute of Vehicles, Faculty of Automotive
and Construction Machinery Engineering
Warsaw University of Technology
ul. Narbutta 84, 02-524 Warszawa, Poland
E-mail: zchlopek@simr.pw.edu.pl

Jacek BIEDRZYCKI

Department of Environmental Protection and Natural Energy Use
Automotive Industry Institute
ul. Jagiellońska 55, 03-301 Warszawa, Poland
E-mail: j.biedrzycki@pimot.eu

Jakub LASOCKI

Institute of Vehicles, Faculty of Automotive
and Construction Machinery Engineering
Warsaw University of Technology
ul. Narbutta 84, 02-524 Warszawa, Poland
E-mail: j.lasocki@simr.pw.edu.pl

Piotr WÓJCIK

Department of Environmental Protection and Natural Energy Use
Automotive Industry Institute
ul. Jagiellońska 55, 03-301 Warszawa, Poland
E-mail: p.wojcik@pimot.eu

Prof. dr hab. inż. Zdzisław Chłopek

Instytut Pojazdów, Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych,
Politechnika Warszawska
ul. Narbutta 84, 02-524 Warszawa
E-mail: zchlopek@simr.pw.edu.pl

Mgr inż. Jacek Biedrzycki

Zakład Ochrony Środowiska i Wykorzystania Energii Naturalnej,
Przemysłowy Instytut Motoryzacji
ul. Jagiellońska 55, 03-301 Warszawa
E-mail: j.biedrzycki@pimot.eu

Mgr inż. Jakub Lasocki

Instytut Pojazdów, Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych,
Politechnika Warszawska
ul. Narbutta 84, 02-524 Warszawa
E-mail: j.lasocki@simr.pw.edu.pl

Mgr inż. Piotr Wójcik

Zakład Ochrony Środowiska i Wykorzystania Energii Naturalnej,
Przemysłowy Instytut Motoryzacji
ul. Jagiellońska 55, 03-301 Warszawa
E-mail: p.wojcik@pimot.eu

Ocena wpływu stanów dynamicznych silnika spalinowego na jego właściwości użytkowe

Słowa kluczowe: *silniki spalinowe, emisja zanieczyszczeń, testy jezdne, stany dynamiczne*

Streszczenie: Silniki spalinowe jako układy opisywane modelami nieliniowymi nie mają właściwości niezależnych od stanów, w jakich się znajdują. W pracy przedstawiono wyniki badań silnika samochodowego w stanach dynamicznych zdeterminowanych znakiem przyspieszenia pojazdu w testach jezdnych symulujących rzeczywistą eksploatację samochodów osobowych. Badano uśrednione w tych stanach: natężenie emisji zanieczyszczeń i natężenie przepływu paliwa. Stwierdzono znaczną wrażliwość badanych procesów zarówno na stany dynamiczne, jak i na rodzaje testów jezdnych.

1. Wprowadzenie

W ogólności rzeczywiste obiekty opisane nieliniowymi modelami uznanymi za dostatecznie zgodne z przedmiotem modelowania [9] nie mają właściwości, które byłyby niezależne od stanów tych obiektów [8]. Do takich obiektów należą silniki spalinowe. Istnieje – w związku z tym – konieczność ograniczania ogólności zadań badania silników spalinowych. Szczególnie dla silników spalinowych znajdujących się w stanach dynamicznych [10] istnieje konieczność nakładania na badany układ pewnych więzów jako przyjętych procedur badawczych, np. pewnej klasy procesów stanowiących warunki pracy, lub przyjętego sposobu przetwarzania wyników badań, m.in. uśredniania w zakresie wartości procesów.

Właściwości użytkowe silników spalinowych (dla stałych charakterystyk sterowania silnika) są zdeterminowane przede wszystkim tymi wielkościami, które charakteryzują: intensywność wykonywanej przez silniki pracy, opisywana mocą użyteczną, oraz stan cieplny silników, określany temperaturami ich części i układów [8]. Do opisu wielkości charakteryzujących intensywność wykonywanej przez silniki pracy wykorzystuje się zazwyczaj moment obrotowy, opisujący obciążenie silnika, i prędkość obrotową [8]. Do tego opisu można również przyjąć jako wielkość charakteryzującą obciążenie sterowanie silnika przez operatora. Te trzy wielkości: sterowanie silnika przez operatora – s , moment obrotowy silnika – M_e i jego prędkość obrotowa – n są ze sobą zależne. W stanach statycznych jest to zależność w postaci funkcji elementarnej o wartościach liczbowych:

$$F(s, M_e, n) = 0 \quad (1)$$

natomiast w stanach dynamicznych jest to zależność operatorowa [2]:

$$\mathfrak{F}[s, M_e, n] = 0 \quad (2)$$

Również do opisu obciążenia silnika spalinowego, zamiast jego momentu obrotowego, można użyć momentu oporu – M_o . W stanach statycznych zachodzi oczywiście zależność:

$$M_e = M_o \quad (3)$$

natomiast w stanach dynamicznych:

$$\frac{d}{dt}[J(t) \cdot n(t)] = M_e(t) - M_o(t) \quad (4)$$

gdzie: t – czas,

J – moment bezwładności ruchomych części silnika sprowadzony na oś wału korbowego.

Zatem w stanach statycznych spełniona jest zależność funkcyjna o wartościach liczbowych:

$$F(s, M_o, n) = 0 \quad (5)$$

a w stanach dynamicznych jest to zależność operatorowa:

$$\mathfrak{R}[s, M_o, n] = 0 \quad (6)$$

Właściwości użytkowe silników spalinowych zależą w stanach dynamicznych nie tylko od wartości wielkości opisujących stan pracy silnika, ale i od ich przebiegów [8]. Z tego powodu właściwości użytkowe silników spalinowych w warunkach dynamicznych mogą się znacznie różnić od tych właściwości w warunkach statycznych [8].

Dla ustabilizowanego stanu cieplnego silnika spalinowego jego właściwości determinują w stanach dynamicznych procesy momentu obrotowego i prędkości obrotowej. W związku z tym w ogólności nie można jednoznacznie ocenić właściwości użytkowych silnika spalinowego w jego stanach dynamicznych. Istnieje jednak możliwość rozpatrywania właściwości użytkowych silnika spalinowego w stanach dynamicznych przyjętych jako stany elementarne. Jednym z możliwych kryteriów kwalifikacji do elementarnych stanów dynamicznych silnika spalinowego jest rozpatrywanie znaku pochodnych stanów względem czasu: dodatniego lub ujemnego, w całym zakresie pracy silnika. Zatem dla wielkości sterowania silnika przez operatora, momentu oporu i prędkości obrotowej są możliwe następujące elementarne stany pracy silnika:

$$\frac{ds}{dt} > 0 \wedge \frac{dM_o}{dt} > 0; \Rightarrow \frac{dn}{dt} > 0 \quad (7)$$

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

$$\frac{ds}{dt} > 0 \wedge \frac{dM_o}{dt} < 0; \Rightarrow \frac{dn}{dt} > 0 \quad (9)$$

$$\frac{ds}{dt} < 0 \wedge \frac{dM_o}{dt} > 0; \Rightarrow \frac{dn}{dt} < 0 \quad (10)$$

$$\frac{ds}{dt} < 0 \wedge \frac{dM_o}{dt} < 0; \Rightarrow \frac{dn}{dt} < 0 \quad (11)$$

$$\frac{ds}{dt} < 0 \wedge \frac{dM_o}{dt} < 0; \Rightarrow \frac{dn}{dt} > 0 \quad (12)$$

Z kolei dla wielkości sterowania silnika przez operatora, momentu obrotowego i prędkości obrotowej są możliwe następujące elementarne stany pracy silnika:

$$\frac{ds}{dt} > 0 \wedge \frac{dM_e}{dt} > 0; \Rightarrow \frac{dn}{dt} > 0 \quad (13)$$

$$\frac{ds}{dt} > 0 \wedge \frac{dM_e}{dt} > 0; \Rightarrow \frac{dn}{dt} < 0 \quad (14)$$

$$\frac{ds}{dt} > 0 \wedge \frac{dM_e}{dt} < 0; \Rightarrow \frac{dn}{dt} > 0 \quad (15)$$

$$\frac{ds}{dt} < 0 \wedge \frac{dM_e}{dt} > 0; \Rightarrow \frac{dn}{dt} < 0 \quad (16)$$

$$\frac{ds}{dt} < 0 \wedge \frac{dM_e}{dt} < 0; \Rightarrow \frac{dn}{dt} < 0 \quad (17)$$

$$\frac{ds}{dt} < 0 \wedge \frac{dM_e}{dt} < 0; \Rightarrow \frac{dn}{dt} > 0 \quad (18)$$

Opisy (7–12) i (13–18) można również rozpatrywać dla założonych zakresów wartości procesów. Można również tworzyć kombinacje warunków i stanów pracy silnika określonych zakresami wartości procesów, znakami pochodnych procesów względem czasu oraz pochodnych procesów względem czasu równych zero z odpowiednio dobraną tolerancją (procesy stałe), np.:

$$\frac{ds}{dt} > 0; \quad \frac{dM_e}{dt} \in \left[\delta_{M_e} - \frac{\varepsilon_{\delta M_e}}{2}; \delta_{M_e} + \frac{\varepsilon_{\delta M_e}}{2} \right] \quad (19)$$

dla

$$s \in [s_{\min}; s_{\max}] \quad n \in [n_{\min}; n_{\max}] \quad M_e \in [M_{e\min}; M_{e\max}] \quad (20)$$

W warunkach ustabilizowanego stanu cieplnego silnika spalinowego, procesem determinującym stan silnika samochodowego w warunkach użytkowania trakcyjnego jest proces prędkości pojazdu [8]. Z tego powodu do badania właściwości użytkowych samochodowych silników spalinowych można wykorzystywać badania pojazdów w testach jezdnych. Powszechnie badania te wykonuje się w testach homologacyjnych [25, 26] oraz testach specjalnych, symulujących szczególne warunki ruchu samochodów, np. w zatorach ulicznych – test Stop and Go [5] oraz na autostradach i drogach ekspresowych – test Autobahn [5]. Oczywiście wyniki badań właściwości użytkowych w stanach dynamicznych, występujących w różnych testach, różnią się od siebie.

Potrzeba badania użytkowych właściwości silników spalinowych, znajdujących się w stanach dynamicznych, jest aktualna od wielu lat. Pojawia się wiele prac podejmujących tę tematykę [1, 3, 4, 6–8, 10–19, 21–24], jednak dotychczas brak jest w zasadzie standardów tego typu badań, standardami są jedynie metody badań uśrednionych właściwości silników spalinowych w stanach dynamicznych, jak ma to miejsce w przypadku badań homologacyjnych [25, 26].

Większość prac dotyczy sterowania silników spalinowych z uwzględnieniem stanów dynamicznych [4, 12, 14, 17, 23]. W pracy [4] przedstawiono model matematyczny, wykorzystywany do symulacji pracy w stanach dynamicznych wtryskiwacza

w zasobnikowym układzie zasilania. W monografii [12], opracowanej w ETH Zürich, przedstawiono współczesny stan wiedzy na temat modelowania procesów roboczych w silnikach spalinowych ze względu na ich wykorzystanie w systemach sterowania stosowanych w silnikach. W publikacji [14] model matematyczny procesów zachodzących w silniku spalinowym został wykorzystany do sterowania procesów w silniku o systemie spalania HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition – samozapłon mieszanki jednorodnej). W pracy [17] jest przedstawiony wielowymiarowy model, wykorzystywany do opracowywania algorytmów sterowania silników spalinowych, z zastosowaniem logiki rozmytej. W artykule [23] przedstawiono wyniki badań parametrów sterowania silnika samochodowego w rzeczywistych warunkach eksploatacji.

Badane są również właściwości samochodowych silników spalinowych w konkretnych warunkach użytkowania w czasie rzeczywistej eksploatacji pojazdów [15, 16, 19], m.in. z zastosowaniem mobilnych systemów pomiarowych PEMS (Portable Emissions Measurement System). W [15] są przedstawione wyniki badań emisji zanieczyszczeń z silników pojazdów o zastosowaniach innych niż samochodowe (tzw. non-road), a w pracy [16] – z silników samochodowych. W pracy [19] analizowano wpływ parametrów ruchu samochodu osobowego na zużycie paliwa i emisję zanieczyszczeń w czasie rzeczywistego użytkowania pojazdu w warunkach ruchu w mieście.

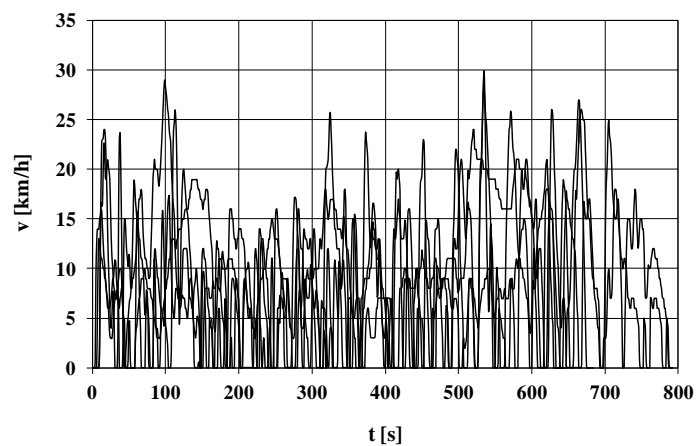
Część prac dotyczy badań procesów przepływów, tworzenia mieszanki palnej, spalania i powstawania poszczególnych składników spalin w silnikach spalinowych znajdujących się w stanach dynamicznych [22, 24].

Większość prac dotyczy silników samochodowych, jednak w artykule [13] przedstawiono wyniki badań emisji zanieczyszczeń z okrętowego tłokowego silnika spalinowego w czasie jego rozruchu, a w pracy [15] z silnika ciągnika rolniczego.

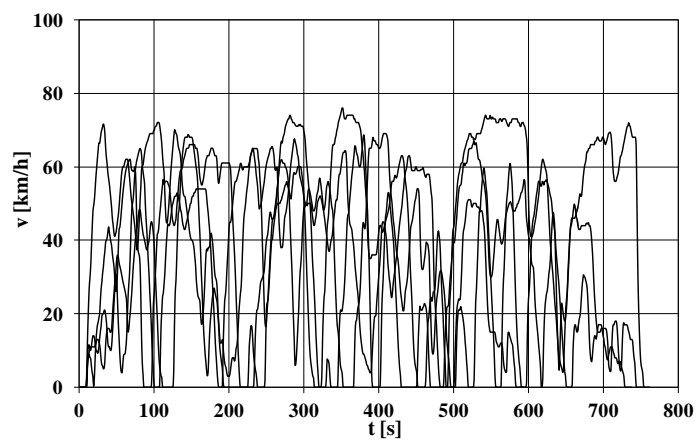
W niniejszej pracy postanowiono wykorzystać do badań testy opracowane przez autorów w ramach realizacji pracy [7], nazwane testami PIMOT. W pracy tej przyjęto oryginalną koncepcję wyznaczania testów do symulacji rzeczywistych warunków jazdy samochodu osobowego [6]. Zarejestrowane przebiegi prędkości samochodu w porównywalnych warunkach ruchu (w zatorach ulicznych, w miastach, poza miastami oraz na autostradach i drogach ekspresowych) potraktowano jako realizacje procesów stochastycznych prędkości samochodu w rozpatrywanych warunkach ruchu. Na podstawie analizy tych procesów stochastycznych wyznaczono dla każdego z warunków ruchu samochodu po kilka przebiegów prędkości, stanowiących realizacje procesu stochastycznego, będącego testem jezdny w każdym z rozpatrywanych warunkach. Poszczególne realizacje prędkości pojazdu zostały wyznaczone zgodnie z kryterium wiernej symulacji w dziedzinie czasu. Jako kryteria porównawcze przy wyznaczaniu testów jezdnych przyjęto podobieństwo zerowymiarowych charakterystyk procesów stochastycznych prędkości: w rzeczywistym użytkowaniu oraz testów, mianowicie: wartości oczekiwanej, wartości ekstremalnych oraz wariancji.

Na rysunkach 1–4 przedstawiono testy jezdne PIMOT, stanowiące po cztery realizacje procesów stochastycznych prędkości samochodu, charakteryzujących jego ruch:

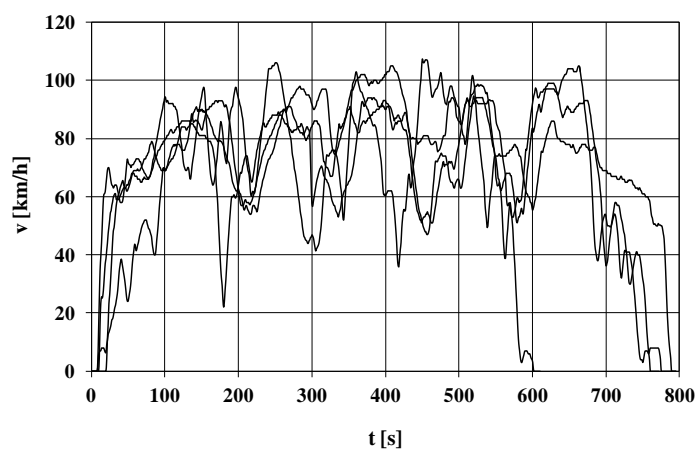
- w zatorach ulicznych – oznaczenie CT,
- w miastach z wyłączeniem zatorów ulicznych – UT,
- poza miastami – RT,
- na autostradach i drogach ekspresowych – HT.



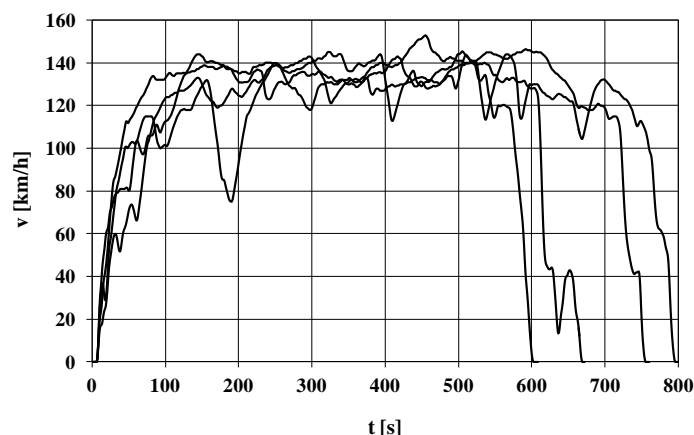
Rys. 1. Przebiegi prędkości – v w testach jazdy w zatorach ulicznych – CT



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



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



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

2. Metodyka, obiekt i wyniki badań

W celu oceny wpływu stanów dynamicznych silnika spalinowego na jego właściwości przeprowadzono badania w testach w warunkach odpowiadających przyspieszeniu samochodu w testach: ujemnemu i dodatniemu. Właściwościami, które poddano badaniu, były: emisja zanieczyszczeń i zużycie paliwa. Oceny wpływu stanów dynamicznych silnika spalinowego na jego właściwości dokonywano w warunkach pracy silnika w samochodzie w testach PIMOT.

Obiekt badań stanowił samochód osobowy Honda Civic z silnikiem o zapłonie iskrowym o objętości skokowej 1396 cm^3 .

Badania samochodu zostały przeprowadzone na stanowisku hamowni podwoziowej Schenk Komeg EMDY 48. Do badań emisji wykorzystano stanowisko do analizy spalin, w skład którego wchodzi system Horiba Mexa 7200 wyposażony w analizatory Horiba:

- AIA-721A (pomiar stężenia tlenku węgla),
- AIA-722 (pomiar stężenia dwutlenku węgla),
- MPA-720 (pomiar stężenia tlenu),
- CLA-755A (pomiar stężenia tlenków azotu),
- FIA-725A (pomiar stężenia węglowodorów).

Badaniom poddano procesy: natężenia przepływu paliwa zużywanego przez silnik oraz procesy natężenia emisji zanieczyszczeń. Sygnały zostały zsynchronizowane w miejscu poboru spalin w układzie wylotowym za wielofunkcyjnym reaktorem katalitycznym: uwzględniono opóźnienie poszczególnych sygnałów, związane z analizą spalin, natomiast natężenie przepływu paliwa wyznaczono z bilansu masy węgla w sygnałach natężenia emisji składników spalin. Badane sygnały poddano przetwarzaniu w celu wyeliminowania błędów grubych i zmniejszenia udziału zakłóceń o dużych częstotliwościach. Pomiary były próbkowane z częstotliwością 10 Hz, a następnie uśredniane dla 10 kolejnych wyników pomiarów. Przetwarzane sygnały miały zatem odstęp próbkowania równy czasowi 1 s. Błędy grube identyfikowano metodą analizy bieżącej wariancji wyników pomiarów. Do zmniejszenia udziału w sygnałach szumów o dużych częstotliwościach zastosowano filtr dolnoprzepustowy Golaya-Savitzky'ego [20] z wielomianem drugiego stopnia oraz z aproksymacją obustronną po 2 punkty.

Niech zbiory E_{CO} , E_{HC} , E_{NOx} , E_{CO2} oraz G_f zawierają zdyskretyzowane wartości natężeń emisji zanieczyszczeń i natężenia przepływu paliwa oraz przyspieszenia samochodu dla każdej z realizacji testów z częstotliwością próbkowania 1 Hz. Moc każdego z tych zbiorów wynosi N . Każdy ze zbiorów może być przedstawiony w postaci sumy zbiorów

zawierających elementy charakteryzujące się tą właściwością, że przyspieszenie samochodu jest dodatnie lub ujemne:

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_{(a<0)} \cup \mathbf{X}_{(a>0)} \quad (21)$$

gdzie: $\mathbf{X} = \mathbf{E}_{CO}, \mathbf{E}_{HC}, \mathbf{E}_{NOx}, \mathbf{E}_{CO2}, \mathbf{G}_f$.

Niech moc zbiorów $\mathbf{X}_{(a<0)}$ wynosi $N_{(a<0)}$, zaś zbiorów $\mathbf{X}_{(a>0)}$ – $N_{(a>0)}$. Wartość średnia elementów zbiorów $\mathbf{X}_{(a<0)}$ wynosi:

$$\mathbf{X}_{(a<0)AV} = \frac{1}{N_{(a<0)}} \sum_{i=1}^{N_{(a<0)}} \mathbf{X}_{(a<0)i} \quad (22)$$

Zaś zbiorów $\mathbf{X}_{(a>0)}$

$$\mathbf{X}_{(a>0)AV} = \frac{1}{N_{(a>0)}} \sum_{i=1}^{N_{(a>0)}} \mathbf{X}_{(a>0)i} \quad (23)$$

gdzie: $\mathbf{X}_{(a<0)AV} = \mathbf{E}_{CO(a<0)j}, \mathbf{E}_{HC(a<0)j}, \mathbf{E}_{NOx(a<0)j}, \mathbf{E}_{CO2(a<0)}, \mathbf{G}_{f(a<0)j}$,

$\mathbf{X}_{(a>0)AV} = \mathbf{E}_{CO(a>0)j}, \mathbf{E}_{HC(a>0)j}, \mathbf{E}_{NOx(a>0)j}, \mathbf{E}_{CO2(a>0)}, \mathbf{G}_{f(a>0)j}$,

$j = 1, 2, 3, 4$ – numer realizacji każdego z testów.

Przykładowe wyniki badań przedstawiono dla testów:

- CT na rysunkach 5 i 6,
- UT na rysunkach 7 i 8,
- RT na rysunkach 9 i 10,
- HT na rysunkach 11 i 12.

Na rysunkach tych przedstawiono wartość średnią oraz względny rozstęp średniego natężenia przepływu paliwa i średniego natężenia emisji zanieczyszczeń dla wyników badań dla ujemnego i dodatniego przyspieszenia samochodu w poszczególnych realizacjach testów.

Wartość średnia średniego natężenia emisji zanieczyszczeń dla realizacji każdego z testów wynosi:

$$\mathbf{E}_{x(a>0)} = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 \mathbf{E}_{x(a>0)j} \quad (24)$$

gdzie: $x = CO, HC, NOx, CO_2$,

a dla średniego natężenia przepływu paliwa

$$\mathbf{G}_{f(a>0)} = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 \mathbf{G}_{f(a>0)j} \quad (25)$$

Względny rozstęp jest zdefiniowany jako stosunek wartości bezwzględnej rozstępu R i wartości średniej AV :

$$\delta = \frac{|R|}{AV} \quad (26)$$

gdzie: $AV = \mathbf{E}_{x(a<0)}, \mathbf{E}_{x(a>0)}, \mathbf{G}_{f(a<0)}, \mathbf{G}_{f(a>0)}$,

przy czym

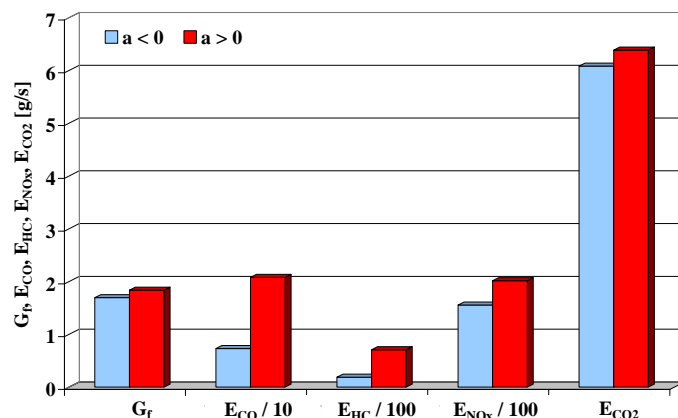
$$R = \max(y) - \min(y) \quad (27)$$

gdzie: $y = \mathbf{E}_{x(a<0)}, \mathbf{E}_{x(a>0)}, \mathbf{G}_{f(a<0)}, \mathbf{G}_{f(a>0)}$,

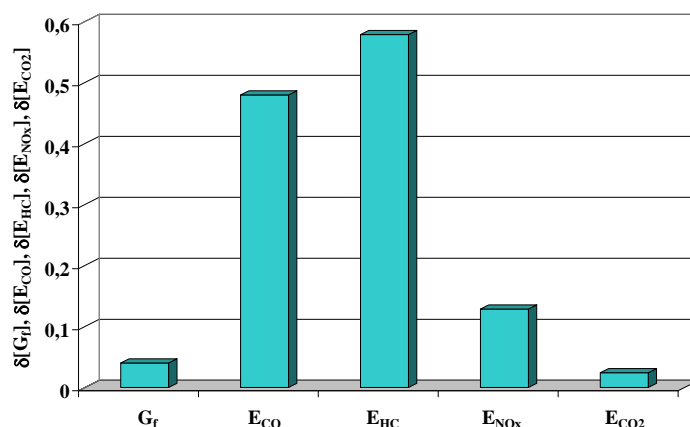
\max – operator wartości maksymalnej elementów zbioru,

\min – operator wartości minimalnej elementów zbioru.

Na poniższych wykresach indeksy $(a<0)$ i $(a>0)$ zamieszczono w legendach.

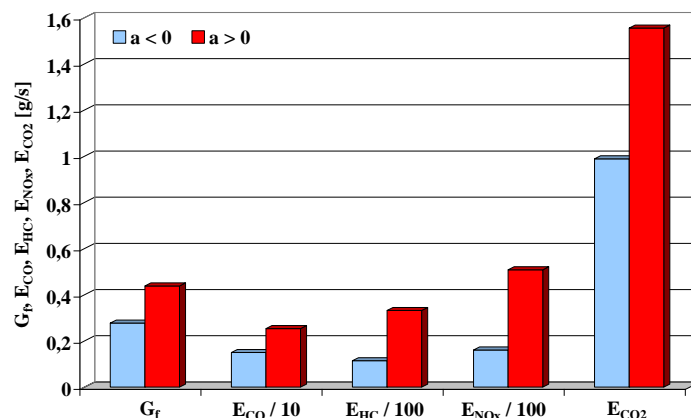


Rys. 5. Wartość średnia średniego natężenia przepływu paliwa – G_f oraz średniego natężenia emisji: tlenku węgla – E_{CO} , węglowodorów – E_{HC} , tlenków azotu – E_{NOx} i dwutlenku węgla – E_{CO2} dla ujemnego ($a < 0$) i dodatniego ($a > 0$) przyspieszenia samochodu w teście CT

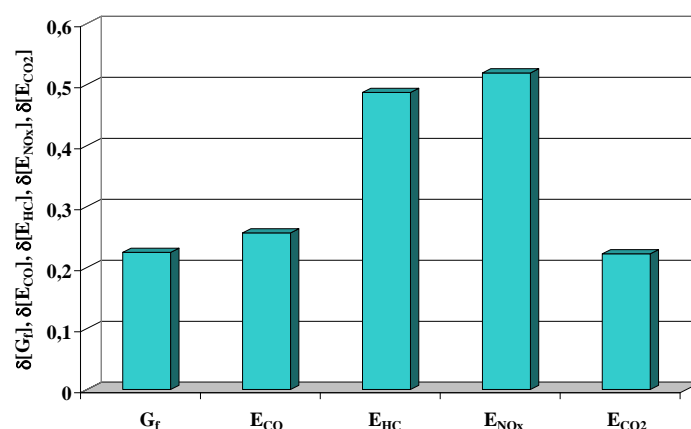


Rys. 6. Względny rozstęp średniego natężenia przepływu paliwa – G_f oraz średniego natężenia emisji: tlenku węgla – E_{CO} , węglowodorów – E_{HC} , tlenków azotu – E_{NOx} i dwutlenku węgla – E_{CO2} dla ujemnego i dodatniego przyspieszenia samochodu w teście CT

W czasie jazdy w zatorach ulicznych są bardzo specyficzne warunki ruchu, charakteryzujące się niedużymi bezwzględnymi wartościami przyspieszenia. Z tego powodu natężenie emisji dwutlenku węgla i natężenie przepływu paliwa nie różnią się znacznie w fazach przyspieszania i opóźniania ruchu samochodu, szczególnie uwzględniając „uśredniające” właściwości układu poboru spalin do analizy. Wyraźnie widoczny jest znaczny wzrost w fazie przyspieszania natężenia emisji węglowodorów oraz – w następnej kolejności – tlenku węgla.

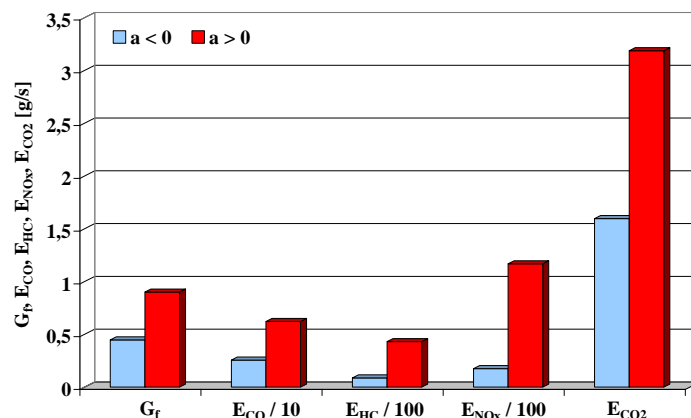


Rys. 7. Wartość średnia średniego natężenia przepływu paliwa – G_f oraz średniego natężenia emisji: tlenku węgla – E_{CO} , węglowodorów – E_{HC} , tlenków azotu – E_{NOx} i dwutlenku węgla – E_{CO2} dla ujemnego ($a < 0$) i dodatniego ($a > 0$) przyspieszenia samochodu w teście UT

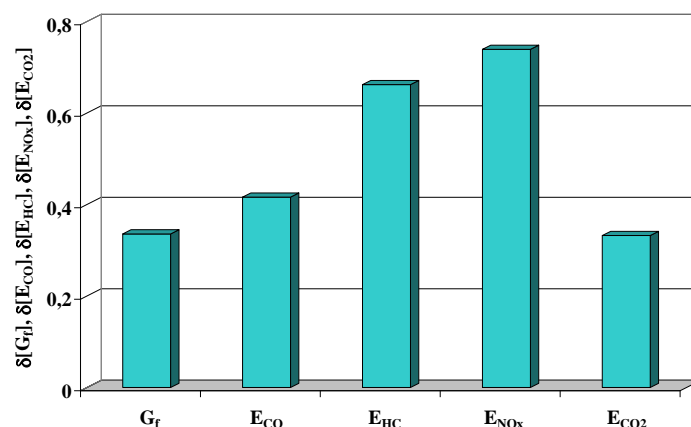


Rys. 8. Względny rozstęp średniego natężenia przepływu paliwa – G_f oraz średniego natężenia emisji: tlenku węgla – E_{CO} , węglowodorów – E_{HC} , tlenków azotu – E_{NOx} i dwutlenku węgla – E_{CO2} dla ujemnego i dodatniego przyspieszenia samochodu w teście UT

W czasie jazdy w miastach (bez uwzględniania ruchu w warunkach zatorów ulicznych) dużo większa jest różnica – niż w wypadku jazdy w zatorach ulicznych – natężenia emisji zanieczyszczeń i natężenia przepływu paliwa dla faz przyspieszania i opóźniania ruchu samochodu. Szczególnie duży jest ponad 50-procentowy względny rozstęp natężenia emisji tlenków azotu, co ma związek z dużym obciążeniem silnika w czasie przyspieszania samochodu.

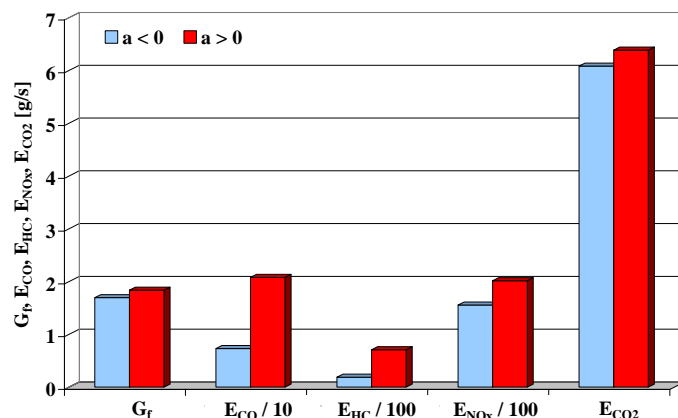


Rys. 9. Wartość średnia średniego natężenia przepływu paliwa – G_f oraz średniego natężenia emisji: tlenku węgla – E_{CO} , węglowodorów – E_{HC} , tlenków azotu – E_{NOx} i dwutlenku węgla – E_{CO2} dla ujemnego ($a < 0$) i dodatniego ($a > 0$) przyspieszenia samochodu w teście RT

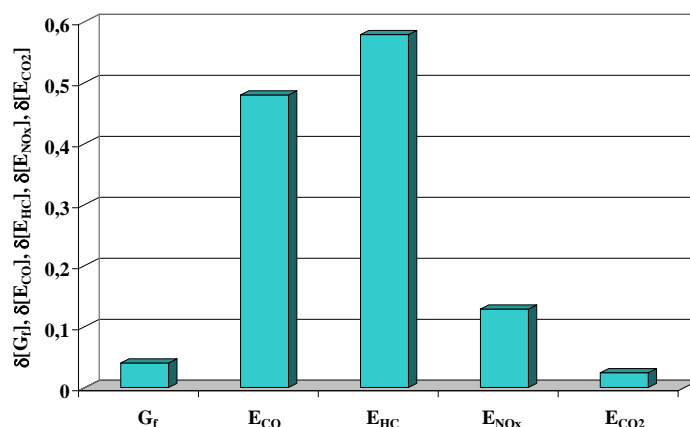


Rys. 10. Względny rozstęp średniego natężenia przepływu paliwa – G_f oraz średniego natężenia emisji: tlenku węgla – E_{CO} , węglowodorów – E_{HC} , tlenków azotu – E_{NOx} i dwutlenku węgla – E_{CO2} dla ujemnego i dodatniego przyspieszenia samochodu w teście RT

W warunkach jazdy poza miastami występują podobne zależności jak w wypadku jazdy w miastach, przy czym wpływ przyspieszania samochodu na przyrost natężenia emisji zanieczyszczeń i natężenia przepływu paliwa jest jeszcze bardziej wyraźny.



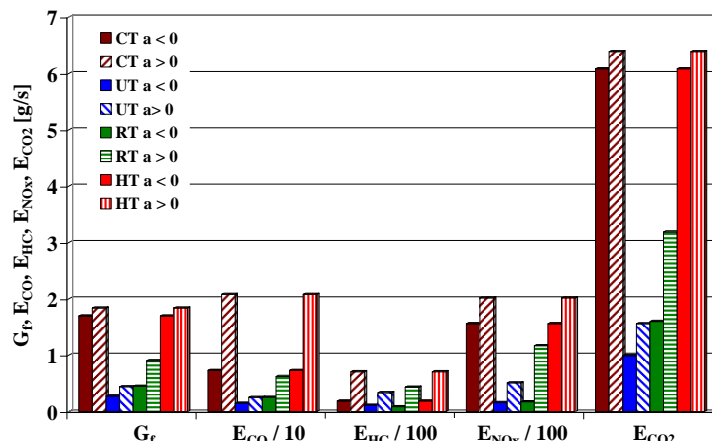
Rys. 11. Wartość średnia średniego natężenia przepływu paliwa – G_f oraz średniego natężenia emisji: tlenku węgla – E_{CO} , węglowodorów – E_{HC} , tlenków azotu – E_{NOx} i dwutlenku węgla – E_{CO2} dla ujemnego ($a < 0$) i dodatniego ($a > 0$) przyspieszenia samochodu w teście HT



Rys. 12. Względny rozstęp średniego natężenia przepływu paliwa – G_f oraz średniego natężenia emisji: tlenku węgla – E_{CO} , węglowodorów – E_{HC} , tlenków azotu – E_{NOx} i dwutlenku węgla – E_{CO2} dla ujemnego i dodatniego przyspieszenia samochodu w teście HT

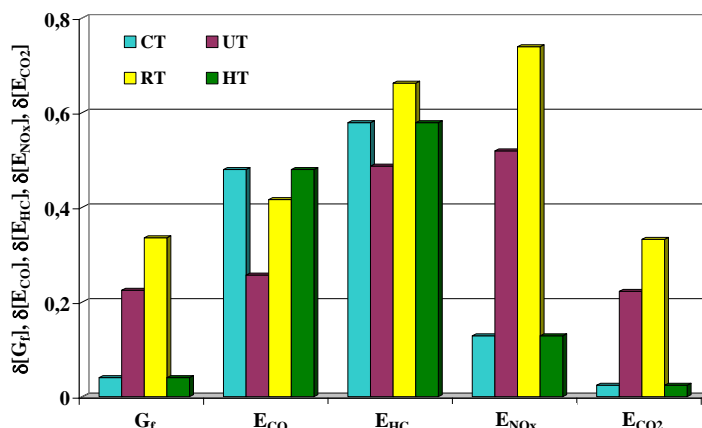
W czasie jazdy samochodu na autostradach i drogach ekspresowych wartość bezwzględna przyspieszenia ma nieduże wartości. W związku z tym nie ma dużej różnicy między natężeniem przepływu paliwa i natężeniem emisji dwutlenku węgla w fazach przyspieszania i opóźniania samochodu. Podobnie jest w wypadku natężenia emisji tlenków azotu. Różnice występują natomiast dla natężenia emisji tlenku węgla i węglowodorów.

Na rysunku 13 przedstawiono zbiorczy wykres średniego natężenia przepływu paliwa oraz średniego natężenia emisji zanieczyszczeń dla ujemnego i dodatniego przyspieszenia samochodu w testach PIMOT.



Rys. 13. Wartość średnia średniego natężenia przepływu paliwa – G_f oraz średniego natężenia emisji: tlenku węgla – E_{CO} , węglowodorów – E_{HC} , tlenków azotu – E_{NOx} i dwutlenku węgla – E_{CO_2} dla ujemnego ($a < 0$) i dodatniego ($a > 0$) przyspieszenia samochodu w testach PIMOT

Na rysunku 14 jest przedstawiony zbiorczy wykres względnego rozstępu natężenia przepływu paliwa oraz względnego rozstępu natężenia emisji zanieczyszczeń dla ujemnego i dodatniego przyspieszenia samochodu w testach PIMOT.



Rys. 14. Względny rozstęp średniego natężenia przepływu paliwa – G_f oraz średniego natężenia emisji: tlenku węgla – E_{CO} , węglowodorów – E_{HC} , tlenków azotu – E_{NOx} i dwutlenku węgla – E_{CO_2} dla ujemnego i dodatniego przyspieszenia samochodu w testach PIMOT

3. Wnioski

Na podstawie badań przeprowadzonych w stanach dynamicznych silnika spalinowego można sformułować następujące wnioski:

- 1) Jednoznacznie stwierdzono, że w warunkach przyspieszania samochodu większe są wartości natężenia emisji zanieczyszczeń i natężenia przepływu paliwa niż w wypadku opóźniania ruchu pojazdu. Wartości różnic są znacznie zróżnicowane w zależności od badanych wielkości i warunków ruchu, zdeteminowanych testami. Względny rozstęp średniego natężenia emisji zanieczyszczeń i średniego natężenia przepływu paliwa mieści

się w granicach od 0,024 do 0,739 – najmniejsza wartość dla natężenia emisji dwutlenku węgla w warunkach ruchu samochodu w zatorach ulicznych, największa dla natężenia emisji tlenków azotu w warunkach ruchu poza miastami.

- 2) Nie stwierdzono jednoznacznych zależności zwiększania się natężenia emisji zanieczyszczeń i natężenia przepływu paliwa przy przyspieszaniu samochodu w stosunku do sytuacji opóźniania ruchu pojazdu w różnych rodzajach testów. Przykładowo w warunkach zatorów ulicznych oraz dla jazdy na autostradach i drogach ekspresowych największa jest wrażliwość na oceniane stany dynamiczne dla natężenia emisji węglowodorów, a w warunkach jazdy w miastach i poza miastami dla natężenia emisji tlenków azotu.
- 3) Największy względny rozstęp natężenia emisji zanieczyszczeń i natężenia przepływu paliwa wystąpił w warunkach ruchu poza miastami, zaś najmniejszy w ruchu w zatorach ulicznych.
- 4) Największy względny rozstęp natężenia emisji w fazie przyspieszania samochodu jest w przypadku węglowodorów, zaś najmniejszy jest względny wzrost natężenia emisji dwutlenku węgla i natężenia przepływu paliwa.

Ogólnie można stwierdzić, że w stanach pracy silnika spalinowego odpowiadających dodatniemu przyspieszeniu samochodu średnie natężenie przepływu zużywanego paliwa oraz średnie natężenie emisji zanieczyszczeń są większe niż w stanach odpowiadających ujemnemu przyspieszeniu. W niektórych przypadkach różnica jest bardzo duża – względny rozstęp badanych wielkości przekracza nawet 70%.

Podziękowanie: Artykuł opracowano na podstawie wyników badań realizowanych w pracy N N509 556440 „Wrażliwość emisji zanieczyszczeń i zużycia paliwa na warunki użytkowania trakcyjnego silnika o zapłonie iskrowym”, finansowanej ze środków Narodowego Centrum Nauki.

Piśmiennictwo

1. Arregle J, Bermudez V, Serrano J R, Fuentes E. Procedure for engine transient cycle emissions testing in real time. *Experimental Thermal and Fluid Science* 2006; 30(5): 485–496.
2. Banach S. *Théorie des opérations linéaires*. Monografie Matematyczne 1. Warszawa, 1932.
3. Bermúdez V, Luján J M, Serrano J R, Pla B. Transient particle emission measurement with optical techniques. *Measurement Science and Technology* 2008; 19(6): 065404.
4. Bianchi G M, Falfari S, Parotto M, Osbat G. Advanced modeling of common rail injector dynamics and comparison with experiments. SAE paper 2003–01–0006.
5. BUWAL, INFRAS AG. Luftschadstoffemissionen des Strassenverkehrs 1950–2010. BUWAL–Bericht Nr. 255, 1995.
6. Chłopek Z, Biedrzycki J, Lasocki J, Wójcik P. Investigation of the motion of motor vehicles in Polish conditions. *The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji* 2013; 60(2): 3–20.
7. Chłopek Z, Biedrzycki J, Lasocki J, Wójcik P. Sprawozdanie z pracy N N509 556440 „Wrażliwość emisji zanieczyszczeń i zużycia paliwa na warunki użytkowania trakcyjnego silnika o zapłonie iskrowym”. Warszawa, 2013. (Praca nie publikowana).
8. Chłopek Z. Modelowanie procesów emisji spalin w warunkach eksploatacji trakcyjnej silników spalinowych. *Prace Naukowe. Seria „Mechanika”* z. 173. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 1999.

9. Chłopek Z, Piaseczny L. Remarks about the modelling in science researches. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2001; 11(4): 47–57.
10. Chłopek Z. Some remarks on engine testing in dynamic states. *Silniki Spalinowe – Combustion Engines* 2010; 143(4): 60–72.
11. Daw C S, Kennel M B, Finney C E A, Connolly F T. Observing and modeling nonlinear dynamics in an internal combustion engine. *Physical Review E* 1998; 57(3): 2811–2819.
12. Guzzella L, Onder Ch. Introduction to modeling and control of internal combustion engine systems. Springer Verlag. 2nd ed., 2010.
13. Kniaziewicz T, Piaseczny L, Zdraż R. Toksyczność spalin okrętowego silnika spalinowego podczas jego rozruchu. *Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej* 1999; 2: 51–63.
14. Ma H, Xu H M, Wang J H. Real-time control oriented HCCI engine cycle-to-cycle dynamic modelling. *International Journal of Automation and Computing* 2011; 8(3): 317–325.
15. Merkisz J, Lijewski P, Fuć P, Weymann S. Exhaust emission tests from non-road vehicles conducted with the use of PEMS analyzers. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2013; 15(4): 364–368.
16. Merkisz J, Gis W. Exhaust emission from vehicles under real conditions. Proceedings of the Ninth Asia–Pacific International Symposium on Combustion and Energy Utilization. APISCEU. Beijing, 2008.
17. Piltan F, Sulaiman N, Talooki I A, Ferdosali P. Control of IC engine: design a novel MIMO fuzzy backstepping adaptive based fuzzy estimator variable structure control. *International Journal of Robotics and Automation* 2011; 2(5): 360–380.
18. Quintero H F, Romero C A, Vanegas Useche L V. Thermodynamic and dynamic analysis of an internal combustion engine with a noncircular-gear based modified crank-slider mechanism. 12th IFToMM World Congress, Besançon (France), June 18–21, 2007: 1–6.
19. Romaniszyn K, Nowak A. Analiza wpływu parametrów ruchu pojazdu na zużycie paliwa i emisję zanieczyszczeń przy przejeździe przez Bielsko-Białą. *Zeszyty Naukowe OBRSM BOSMAL* 2004; 23(1): 43–49.
20. Savitzky A, Golay M J E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Analytical Chemistry* 1964; 36: 1627–1639.
21. Wang J, Storey J, Domingo N, Huff S, Thomas J, West B. Studies of diesel engine particle emissions during transient operations using an engine exhaust particle size. *Aerosol Science and Technology* 2006; 40(11): 1002–1015.
22. Wang Z-s, Liu D-g, Xu Ch-s. The dynamic modelling and simulation for air supplying mechanism of internal combustion engine based on Bond graph. *Intelligent System Design and Engineering Application* 2010;. 2: 647–650.
23. Wendeker M, Godula A. Research on variability in control parameters for spark ignition engines in real-life operation. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2002; 16(4): 12–23.
24. Whitelaw J H W, Payri F, Desantes J M. Thermo- and fluid-dynamic processes in diesel engines. Springer 2002.
25. Worldwide emission standards. Heavy duty & off-road vehicles. Delphi. Innovation for the real world. 2013/2014.
26. Worldwide emission standards. Passenger cars and light duty vehicles. Delphi. Innovation for the real Word. 2014/2015.