

## Research concept of the combustion engines properties in dynamic states

*This work concerns problems associated with the analysis of engine operating states creating a dynamic process. Using the example of the model, regarded as an automatics system, article presents the basic concepts of dynamic processes in combustion engines. Authors analyzed the current state of knowledge and research conducted on the dynamic states of the combustion engines operation, emphasising that these are the issues rarely taken on and still require a lot of research work. Then an article discusses one of the most important problems encountered but researchers approaching this issue: operator relationships between model inputs and output figures. The authors propose the solution to this problem, as a method of transition from operator relationships to the functional relationships. It is possible to perform by minimizing the time domain of the function representing the arguments of the existing operators to two discrete points in time. Then the values of the function at these points can be replaced with a single point value and its derivative with respect to time. This procedure, although leading to the creation of functional relationships, requires introduction of significant simplifications. The considerations are summarized by the analysis of the justification for such a course of conduct, and especially using the described simplifications. There is a postulate for repeated verification if the method used does not change the nature of relationships governing engine operation in the dynamic states.*

Keywords: dynamics, process, model, engine

## Koncepcja badań właściwości silników spalinowych w stanach dynamicznych

*Praca dotyczy problemów związanych z analizą stanów pracy silnika tworzących proces dynamiczny. Na przykładzie modelu, traktowanego jako układ automatyki, przedstawiono podstawowe pojęcia związane z procesami dynamicznymi w silniku spalinowym. Przeanalizowano istniejący stan wiedzy i prowadzone badania w zakresie dynamicznych stanów pracy silników spalinowych, podkreślając, że są to zagadnienia stosunkowo rzadko podejmowane i wymagają przeprowadzenia jeszcze wielu prac badawczych. Następnie poruszany jest jeden z najważniejszych problemów, z którym spotykają się badacze podchodzący do tego zagadnienia: operatorowe zależności wiążące wielkości wejściowe i wyjściowe modelu. Proponowane jest następnie rozwiązanie tego problemu, jako metoda przejścia od zależności operatorowych do zależności funkcyjnych. Jest to możliwe do wykonania przy minimalizacji dziedziny czasowej funkcji stanowiących argumenty istniejących operatorów do dwóch dyskretnych punktów czasowych. Wówczas wartości funkcji w tych dwóch punktach można zastąpić wartością w jednym punkcie oraz jej pochodną względem czasu. Taki zabieg, jakkolwiek prowadzi do tworzenia zależności funkcyjnej, wymaga wprowadzenia znaczących uproszczeń. Rozważania podsumowane są analizą zasadności takiego toku postępowania, a szczególnie wprowadzenia opisanych uproszczeń. Przedstawiany jest postulat o konieczności każdorazowej weryfikacji, czy zastosowana metoda nie zmieni charakteru zależności rządzących pracą silnika w stanach dynamicznych.*

Słowa kluczowe: dynamika, proces, model, silnik

### 1. Introduction

The internal combustion engine is a device in which complex phenomena occur in such fields such as mechanics, chemistry and thermodynamics [7]. For these reasons, analytical description of these phenomena is, even with considerable simplifications, very difficult. Therefore, to describe the characteristics of internal combustion engines, the empirical results are widely used.

In the description of internal combustion engines one can distinguish physical parameters that characterize the operation of the engine. Some of the parameters, characterizing operation of the internal combustion engine, describe the phenomena occurring inside them. These values determine the state of the internal combustion engine operation [8]. Other parameters, characterizing the combustion engine operation, determine their operating. These are the conditions of the internal combustion engine [8]. There might be a situation where some parameters, characterizing the combustion engine operating conditions, can also be regarded

### 1. Wstęp

Silnik spalinowy jest urządzeniem, w którym zachodzą skomplikowane zjawiska z zakresu m.in. mechaniki, chemii i termodynamiki [7]. Z tych powodów analityczny opis tych zjawisk jest, nawet na poziomie znacznych uproszczeń, bardzo trudny. W związku z tym do opisu właściwości silników spalinowych stosuje się w bardzo szerokim zakresie wyniki badań empirycznych.

W opisie silników spalinowych można wyróżnić wielkości fizyczne, które charakteryzują pracę silnika. Niektóre z wielkości, charakteryzujących pracę silnika spalinowego, opisują zjawiska w nim zachodzące. Wielkości te określają stan pracy silnika spalinowego [8]. Inne wielkości, charakteryzujące pracę silnika spalinowego, determinują jego warunki pracy. Są to warunki pracy silnika spalinowego [8]. Może zachodzić sytuacja, w której niektóre wielkości, opisujące warunki pracy silnika spalinowego, mogą być również traktowane jako wielkości jego stanu, np. sterowanie silnika przez operatora

---

as the parameters of its state, such as: engine control by the operator is one of the operating conditions, and at the same time determines its state [8].

The parameters, characterizing the combustion engine operation are used for the analytical description of the engine. This is the modelling task [3]. The mathematical model can be considered, as it is done universally in automation, as the structure with the input and output values. The values describing the engine operating conditions, as those which do not depend on its state, are usually treated as a model input values. In turn, the values describing the engine operating state, usually play the role of the output values of the model. Of course it is possible also to adopt other conventions.

Among many possibilities for classification of mathematical models [3] one should pay attention to the classification of particular importance in the theory of internal combustion engines, namely the division of mathematical models into static and dynamic ones. Static models are those which do not take into account the variability of the values of the model in time, and the dynamic models are those that take into account such variability [3, 8].

Without getting into details of formal mechanisms of qualifying the processes as static and dynamic [8], it is possible to say that the operation of the internal combustion engine during normal use is primarily of dynamic character. Nevertheless, in many cases, it is appropriate to interpret physical phenomena as constant in time and create a static model. This leads to a simplification of the many relationships describing the operation of the internal combustion engine.

## **2. Selected problems of modelling combustion engines**

The function of numerical values for which the independent variable is time or monotonic function of time is called a process. Consequently, with the adopted names of parameters describing the engine combustion operation, the following processes can be identified: the engine operation, the engine operating conditions and the engine operating state.

When the process varies in time, it is called dynamic. In internal combustion engines therefore one can identify: dynamic engine operating process, dynamic engine operating conditions process and the dynamic process of the engine operating state. Its static processes are analogously classified in the description of the engine operation. Due to the traditional terminology and to justifiably simplify the terminology it has been adopted to briefly call: dynamic engine operating conditions processes - dynamic engine operating conditions (in short as dynamic conditions); dynamic processes of the engine operating state- the engine operation dynamic states (in short dynamic states). Similarly simplified is terminology of conditions and static states.

In the dynamic models of internal combustion engines there may be both static and dynamic conditions and states occurring. For example, in certain periods the processes can be of static character, and in other – dynamic. There is then a local static condition occurring of the operating states and

zalicza się do warunków pracy silnika, a jednocześnie określa jego stan [8].

Wielkości, charakteryzujące pracę silnika spalinowego, są wykorzystywane do opisu analitycznego silnika. Jest to zadanie modelowania [3]. Model matematyczny można traktować, podobnie jak czyni się to powszechnie w automatyce, jako strukturę z wielkościami wejściowymi i wyjściowymi. Wielkości opisujące warunki pracy silnika, jako te, które nie zależą od jego stanu, są zazwyczaj traktowane jako wielkości wejściowe modelu. Z kolei wielkości opisujące stan pracy silnika, odgrywają najczęściej rolę wielkości wyjściowych modelu. Oczywiście możliwe jest również przyjęcie innych konwencji.

Spośród wielu możliwości klasyfikowania modeli matematycznych [3] warto zwrócić uwagę na klasyfikację szczególnie ważną w teorii silników spalinowych, mianowicie na podział modeli matematycznych na statyczne i dynamiczne. Modelami statycznymi nazywa się te, które nie uwzględniają zmienności wielkości modelu w czasie, zaś modelami dynamicznymi te, które taką zmienność uwzględniają [3, 8].

Nie wdając się szczegółowo w formalizmy kwalifikowania procesów na statyczne i dynamiczne [8], można stwierdzić, że praca silnika spalinowego w warunkach typowego użytkowania ma charakter przede wszystkim dynamiczny. Niemniej jednak w wielu przypadkach celowa jest interpretacja zjawisk fizycznych jako stałych w czasie i stworzenie modelu statycznego. Prowadzi to wówczas do uproszczenia wielu zależności, opisujących pracę silnika spalinowego.

## **2. Wybrane problemy modelowania silników spalinowych**

Funkcja o wartościach liczbowych, której zmienną niezależną jest czas lub monotoniczna funkcja czasu jest nazywana procesem. Konsekwentnie do przyjętych nazw wielkości, opisujących pracę silnika spalinowego, można wyróżnić procesy: pracy silnika, warunków pracy silnika oraz stanu pracy silnika.

W przypadku, gdy proces jest zmienny w czasie, nazywamy go dynamicznym. W silnikach spalinowych można zatem wyróżnić: dynamiczny proces pracy silnika, dynamiczny proces warunków pracy silnika i dynamiczny proces stanu pracy silnika. Analogicznie klasyfikuje się w opisie pracy silnika jego procesy statyczne. Ze względu na tradycyjnie stosowane nazewnictwo oraz w celu uzasadnionego uproszczenia terminologicznego przyjęło się skrótowo nazywać: procesy dynamiczne warunków pracy silnika – warunkami dynamicznymi pracy silnika (w skrócie warunkami dynamicznymi), procesy dynamiczne stanu pracy silnika – stanami dynamicznymi pracy silnika (w skrócie stanami dynamicznymi). Analogicznie upraszcza się nazewnictwo warunków i stanów statycznych.

W modelach dynamicznych silników spalinowych mogą występować warunki i stany zarówno statyczne, jak i dynamiczne. Przykładowo w pewnych przedziałach czasu procesy mogą mieć charakter statyczny, a w innych dynamiczny. Zachodzi wówczas statyczność lokalna warunków i stanów pracy silnika spalinowego.

conditions of the combustion engine. An example of such situation are states and conditions of combustion engine operation in the dynamic tests, such as HDDTT test (Heavy Duty Diesel Transient Test) [16]. Even with relatively not very rigorous criteria, identifying individual engine operating states as static ones, about half of the states adopted by the engine (in the form of a discrete function of time) are of dynamic character. This is despite the fact that the test envisages very large stretches of time with engine idling, simulating the vehicle stoppage. During engine operation in dynamic states most of pollutants are emitted from the engine. This leads inevitably to the conclusion that the dynamic operating states of the combustion engines represent an important topic for discussion and there should be practical methods of modelling engines in the dynamic states.

Testing and modelling of combustion engines in the dynamic states of their operation is not, however, easy. It is worth mentioning three key issues in this regard:

- complex (operator) relationships binding the input and output parameters of the model,
- increasing the number of parameters describing the engine operation (in connection with the need to take into account the values describing variability of the processes),
- increased uniqueness of measurements results in the individual engine operating states [10].

In connection with the above difficulties the subject of testing and modelling combustion engines in dynamic conditions is rarely undertaken in the scientific literature. Among the existing work on this topic one should list the following approaches:

- theoretical deliberations on the engines operation in the dynamic states [2, 4–8, 15],
- comparing engines operating parameters in the static states of the corresponding dynamic states [1, 2, 5, 7, 8],
- dynamic tests, enabling to determine the average combustion engine operating performance in the time aspect of the entire test [1, 4, 8],
- modelling the combustion engine operation or of its part in the selected dynamic states [5, 7–10, 13–15],
- detailed analysis of one selected dynamic state or a group of similar states [11, 14].

It should be noted that there are no studies comprehensively showing the problem of dynamic states, allowing examination and comparison of any states or seeking relationships between the individual dynamic states.

In the dynamic states of combustion engines there are complex operator relationships between the individual input and output values of the model. In the static model dependence of the selected output value on the input value may in general be written in the following form as a function of the numerical values:

$$y_i = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

For a similar discrete dynamical model such relationship is as follows:

Przykładem takiej sytuacji są warunki i stany pracy silnika spalinowego w dynamicznych testach badawczych, np. w teście HDDTT (*Heavy Duty Diesel Transient Test*) [16]. Nawet przy dość mało rygorystycznych kryteriach, kwalifikujących poszczególne stany pracy silnika jako statyczne, około połowa przyjmowanych przez silnik stanów (w postaci dyskretnej funkcji czasu) ma charakter dynamiczny. Dzieje się tak pomimo faktu, że rozważany test bardzo duże odcinki czasu przewiduje na pracę na biegu jałowym, symulującą postój pojazdu. W czasie pracy silnika w stanach dynamicznych emitowana jest większość substancji zanieczyszczających z silnika. Prowadzi to jednoznacznie do wniosku, że stany dynamiczne pracy silników spalinowych stanowią ważny temat do rozważań i powinny istnieć praktyczne metody modelowania silników w stanach dynamicznych.

Badanie i modelowanie silników spalinowych w dynamicznych stanach ich pracy nie jest jednak łatwe. Warto wymienić trzy najważniejsze problemy w tym względzie:

- złożone (operatorowe) zależności wiążące wielkości wejściowe i wyjściowe modelu,
- zwiększenie liczby wielkości opisujących pracę silnika (m.in. w związku z koniecznością uwzględnienia wielkości opisujących zmienność procesów),
- zwiększona niepewtarzalność wyników pomiarów w poszczególnych stanach pracy silnika [10].

W związku z opisanymi trudnościami temat badania i modelowania pracy silników spalinowych w warunkach dynamicznych jest stosunkowo rzadko podejmowany w literaturze naukowej. Wśród istniejących prac na ten temat warto wymienić następujące podejścia:

- rozważania teoretyczne na temat pracy silników w stanach dynamicznych [2, 4–8, 15],
- porównywanie parametrów pracy silników w stanach statycznych i odpowiadającym im stanach dynamicznych [1, 2, 5, 7, 8],
- testy dynamiczne, umożliwiające wyznaczenie uśrednionych właściwości użytkowych silnika spalinowego w dziedzinie czasu całego testu [1, 4, 8],
- modelowanie pracy silnika spalinowego lub jego części w wybranych stanach dynamicznych [5, 7–10, 13–15],
- szczegółowa analiza jednego, wybranego stanu dynamicznego lub grupy podobnych stanów [11, 14].

Trzeba przy tym zauważyć, że brak jest opracowań przedstawiających problem stanów dynamicznych w ujęciu kompleksowym, umożliwiającym badanie i porównywanie dowolnych stanów lub poszukujących zależności pomiędzy poszczególnymi stanami dynamicznymi.

W stanach dynamicznych silników spalinowych istnieją złożone zależności operatorowe między poszczególnymi wielkościami wejściowymi i wyjściowymi modelu. W modelu statycznym zależność wybranej wielkości wyjściowej od wielkości wejściowych można w ogólności zapisać w następującej postaci funkcji o wartościach liczbowych – wzór (1).

Dla podobnego dyskretnego modelu dynamicznego zależność taką przedstawiono w postaci (2).



$$y_i = F_i [x_1(k:l+b), x_2(k:l+b) \dots x_n(k:l+b)] \quad (2)$$

Existing here operator relationship makes its value dependent not only on the momentary values of the input parameters, but on their entire courses.

In the most general case, one has to take such form of relationship binding on the input and output values. One has to admit though, that it is not suitable for analysis, or even to empirical research. It is possible to suggest approximating the operator relationship by the functional relationship of the numerical values of infinite number of arguments. Even assuming a finite number of arguments, the practical feasibility of testing such a model is not realistic. Need are radical simplifications of the operator relationship.

Simplification of the operator relationship must rely on such limiting the "volume" of the operator arguments, so that the replacement of it by a function of the numerical values enabled effective testing of the model.

If the operator makes its value dependent on the full courses of the input values, it is possible to replace them with the point characteristics – the values. These point characteristics ought to be representative of the courses of the input values, resulting from their analysis and provide the most important information contained in the courses.

In the systems with strong integrating properties the output values may depend as much on the current values of input variables and the values of these quantities in the much earlier moments. The systems without integrating features will make the output values dependent only on the current values of the input variables.

In the case of combustion engines operating in a stabilized thermal state it can be expected that the integrating properties will, to some extent, be limited. This means that the values of the output figures will, to a larger degree, depend on the values of the input figures at moments close to the current one, and the early moments of time are being considered, the smaller effect they will have on the result.

It is appropriate to reduce the operators arguments' time domain. The equation (2) then will take the form:

$$y_i = F_i [x_1(k:p+b), x_2(k:p+b) \dots x_n(k:p+b)] \quad (3)$$

This procedure is of a formal character and the actual simplification of the operator relationship will apply only when selecting the parameter  $p$ . A few special cases of its selection can be seen.

Of course if the parameter  $p$  takes the value 1, the form of the relationship given by the equation (3) will be the same as in formula (2), because considered will be courses of the input values from the initial moment, to the current time. The second extreme case is the assignment of the value  $b$  to the parameter  $p$  (corresponding to the current time). Such procedure eliminates from the relationship all the moments of time, except the current one, which will bring discussion to the static model, described by the formula (1). It is, therefore, expected to obtain interesting results for  $p$ -values close to, but not equal to  $b$ . As a special case, it is worth

Istniejąca tutaj zależność operatorowa uzależnia swoją wartość nie tylko od chwilowych wartości parametrów wejściowych, ale od ich całych przebiegów.

W najogólniejszym przypadku trzeba przyjąć właśnie taką postać zależności wiążącej wielkości wejściowe i wyjściowe. Trzeba jednak przyznać, że nie nadaje się ona do analizy, ani nawet do badań empirycznych. Można postulować aproksymowanie zależności operatorowej zależnością funkcyjną o wartościach liczbowych nieskończenie dużej liczbie argumentów. Nawet przy założeniu skończonej liczby argumentów praktyczne możliwości badania takiego modelu są mało realne. Potrzebne są więc radykalne uproszczenia zależności operatorowej.

Uproszczenie zależności operatorowej musi polegać na takim ograniczeniu „objętości” argumentów operatora, żeby zastąpienie go przez funkcję o wartościach liczbowych umożliwiło skuteczne badania modelu.

Jeżeli operator uzależnia swoją wartość od pełnych przebiegów wielkości wejściowych, można zastąpić je charakterystykami punktowymi – wartościami. Owe charakterystyki punktowe powinny być reprezentacją przebiegów wielkości wejściowych, wynikającą z ich analizy i stanowiąc najważniejsze informacje zawarte w przebiegach.

W układach o silnych właściwościach całkujących wielkości wyjściowe mogą zależeć w równym stopniu od bieżących wartości wielkości wejściowych, jak i od wartości tych wielkości w chwilach znacznie wcześniejszych. Z kolei układy bez cech całkujących będą uzależniały wielkości wyjściowe jedynie od bieżących wartości wielkości wejściowych.

W przypadku silników spalinowych pracujących w ustabilizowanym stanie cieplnym można się spodziewać, że właściwości całkujące będą w pewnym stopniu ograniczone. Oznacza to, że wartości wielkości wyjściowych będą w większym stopniu zależały od wartości wielkości wejściowych w chwilach bliskich bieżącej, a im wcześniejsze chwile czasu będą rozważane, tym mniejszy wpływ będą one miały na wynik.

Celowe jest wprowadzenie ograniczenia dziedziny czasowej argumentów operatora. Wzór (2) przyjmie wówczas postać (3).

Taki zabieg ma charakter formalny, a rzeczywiste uproszczenie zależności operatorowej nastąpi dopiero po dobraniu parametru  $p$ . Można zauważyć kilka przypadków szczególnych jego doboru.

Oczywiście jeżeli parametr  $p$  przyjmie wartość 1, postać zależności podana wzorem (3) będzie identyczna, jak we wzorze (2), ponieważ rozważane będą przebiegi wielkości wejściowych od chwili początkowej do chwili bieżącej. Drugim, skrajnym przypadkiem jest przyporządkowanie parametrowi  $p$  wartości  $b$  (odpowiadającej chwili bieżącej). Taki zabieg wyeliminuje z zależności wszystkie chwile czasu oprócz bieżącej, co sprowadzi rozważania do modelu statycznego, opisanego wzorem (1). Należy, w związku z tym, spodziewać się ciekawych wyników dla wartości  $p$  bliskich, lecz nie równych  $b$ . Jako przypadek szczególny warto rozważyć  $p = b - 1$ . Jest to największa wartość  $p$ , dla

to consider  $p = b - 1$  It is the largest  $p$  value for which the model still takes into account the dynamic properties of the system, and also eliminates almost all the previous moments of time. This procedure greatly reduces the above-mentioned "volume" of arguments.

Operator relationship taking into account the  $n$  of the discrete courses of the values of the samples numerousness equal to  $m$  is the same as the functional relationship of numerical values taking into account the  $n \times m$  arguments. For full courses of the input values the figure  $n \times m$  is too large for such a conversion to be purposeful. However, following the restrictions imposed on the time domain of the input values, the number of arguments of the functional relationship with numerical values is:  $n \times (b - p + 1)$ . For the case considered  $p = b - 1$ , the number of arguments decreases to  $n \times (b - (b - 1) + 1) = 2 \times n$ .

Formula (3) can then be converted to the following form:

$$y_i = f_i [x_1(b), x_1(b-1), x_2(b), x_2(b-1), \dots, x_n(b), x_n(b-1)] \quad (4)$$

As it can be seen, it represents the functional relationship of numerical values.

For successively smaller values of the  $p$  parameter, the number of arguments of the functional relationship would be as follows:  $3 \times n, 4 \times n \dots$  etc.

It should also be noted that two consecutive values of any engine operation parameter bring in the exact same information as the current value of this parameter and the value of its derivative with respect to time at the present moment. This statement is certainly true with the assumption of the causality of the system, so that the value of the derivative was not calculated for the moments later than the current one [17]. The relationship given in formula (4) can then be expressed as follows:

$$y_i = f_i [x_1, x_1', x_2, x_2' \dots x_n, x_n'] \quad (5)$$

Therefore, the three successive value of a given engine operation parameter carry the same information as the current value of this parameter and the values of the derivatives of the first and second degree on time. Similarly, the introduction of further, more recent values of the considered parameter can, in the discrete model, be regarded as identical with the introduction of the next degree derivative on time.

Unsolved remains the problem of selecting the optimal value of the  $p$  parameter, defining how many samples prior to the current one should be considered in the dynamic model of the engine. One possibility is the adoption of the  $b - 1$ . This solution, as the only one, minimizes the number of arguments of the functional relationship of numerical values, while leaving the information of variability (dynamics) of the input values.

Furthermore, it is assumed that the earlier moment of time would have less and less influence on the output values. Although one can not assume that the earlier moments of time are of no importance, but it can be assumed that this

której model uwzględnia jeszcze właściwości dynamiczne układu, a zarazem eliminuje niemal wszystkie wcześniejsze chwile czasowe. Taki zabieg zmniejsza również bardzo znacznie wspomnianą „objętość” argumentów.

Zależność operatorowa uwzględniająca  $n$  dyskretnych przebiegów wielkości o liczności próbek równej  $m$  jest tożsama z zależnością funkcyjną o wartościach liczbowych uwzględniającą  $n \times m$  argumentów. Dla pełnych przebiegów wielkości wejściowych liczba  $n \times m$  jest zbyt duża, aby takie przekształcenie było celowe. Jednak po ograniczeniach narzuconych na dziedzinę czasową wielkości wejściowych liczba argumentów zależności funkcyjnej o wartościach liczbowych wynosi:  $n \times (b - p + 1)$ . Dla rozważanego przypadku  $p = b - 1$ , liczba argumentów maleje do:  $n \times (b - (b - 1) + 1) = 2 \times n$ .

Wzór (3) można wówczas przekształcić do postaci (4).

Jak widać, reprezentuje ona zależność funkcyjną o wartościach liczbowych.

Dla kolejno mniejszych wartości parametru  $p$  liczba argumentów zależności funkcyjnej wynosiłaby odpowiednio:  $3 \times n, 4 \times n \dots$  itd.

Warto również zauważyć, że dwie kolejne wartości dowolnej wielkości pracy silnika niosą w sobie dokładnie takie same informacje, jak wartość bieżąca tej wielkości oraz wartość jej pochodnej względem czasu w chwili bieżącej. Stwierdzenie to jest oczywiście prawdziwe przy założeniu przyczynowości układu, aby wartość pochodnej nie była liczona dla chwil późniejszych od bieżącej [17]. Zależność podaną we wzorze (4) można wówczas wyrazić jako (5).

W związku z tym trzy kolejne wartości danej wielkości pracy silnika niosą ze sobą taką samą informację, co wartość bieżąca tej wielkości oraz wartości pochodnych tej wielkości rzędu pierwszego i drugiego względem czasu. Analogicznie wprowadzenie kolejnych, coraz wcześniejszych wartości rozpatrywanych wielkości można w modelu dyskretnym traktować za tożsame z wprowadzaniem pochodnych kolejnych rzędów względem czasu.

Nierozstrzygnięty jest problem wyboru optymalnej wartości parametru  $p$ , określającego ile próbek wcześniejszych od bieżącej powinno być rozpatrywane w dynamicznym modelu silnika. Jedną z możliwości jest przyjęcie wartości  $b - 1$ . Takie rozwiązanie jako jedyne ogranicza do minimum liczbę argumentów zależności funkcyjnej o wartościach liczbowych, pozostawiając przy tym informacje o zmienności (dynamicie) wielkości wejściowych.

Ponadto zakłada się, że wcześniejsze chwile czasu miałyby coraz mniejszy wpływ na wartości wielkości wyjściowych. Chociaż nie można zakładać, że wcześniejsze chwile czasu nie mają żadnego znaczenia, jednak można przypuszczać, że takie uproszczenie nie pozbawia modelu zbyt cennych informacji.

Jeśli wziąć pod uwagę fakt, że kolejne wcześniejsze chwile czasu odpowiadają uwzględnianiu pochodnych wielkości wejściowych względem czasu o kolejnych rzędach, trudno o interpretację fizyczną w tak uproszczonym modelu dynamicznym wzięcia pod uwagę pochodnych

---

simplification does not deprive the model of too very valuable information.

If one takes into account the fact that the next earlier moments of time correspond to taking into account the derivatives of the input values on time of the next degrees, it is difficult to interpret physically, in such a simplified dynamic model, of the taking into account the derivatives of the input values on of the degree higher the first one.

### 3. Discussion on the proposed solution

One should be aware that the proposed solution is only a certain simplification of the general model. The domain of the input parameters considered has been imposed with certain restrictions impairing the interpretation of the dynamic properties of the model. Therefore certain consequences are to be expected.

The main consequence is the resignation of the part of the information concerning the characteristics of the engine in the dynamic states. Although this is a conscious resignation and having some support in theoretical considerations, it may turn out that in some situations it may not be beneficial. The example of a situation in which, despite the assumptions of limited integrating properties of a system, which the combustion engine is, the proposed simplification would require modification, is the case in which the system would have a certain time lag between the values of input parameters and their influence on the parameters of the engine operating state. This shift could be different for different parameters. In such a case, the reduction of function arguments to the values for the current moment and the value of the derivative on time in the current moment would amount to search for the parameters that do not carry in themselves too much useful information. This would be a fairly simple problem to solve by introducing phase shifts between the parameters of the engine operation states under consideration.

But one has to reckon with the possibility of other problems occurring, such as stronger integrating characteristics of the engine, than expected. Therefore, this simplification requires verification each time. Such verification methods will not be discussed in this article, but it is also prepared by the authors.

It is worth noting that the properties, which make the proposed simplification of the operator relationships to the functional relationships of numerical values can prove effective, are not a characteristic of a particular type of engine, or even an actual given engine, but it also depends on the engine operating conditions under which the tests are conducted. Therefore, verification of the suitability of the proposed method is needed each time when analyzing each type of test.

Replacing operator relationships with functional relationships of the numerical values may represent a sufficient simplification of the dynamic model of combustion engines to make a more detailed analysis of the results of the dynamic tests. The authors hope that this will enable a comprehensive look at the issues of dynamic states of the engines operation.

wielkości wejściowych względem czasu rzędu większego niż pierwszy.

### 3. Dyskusja proponowanego rozwiązania

Trzeba mieć świadomość, że proponowane rozwiązanie jest jedynie pewnym uproszczeniem modelu ogólnego. Na dziedzinie rozpatrywanych wielkości wejściowych zostały narzucone określone ograniczenia zubażające interpretację dynamicznych właściwości modelu. Należy się w związku z tym liczyć z pewnymi konsekwencjami.

Podstawową konsekwencją jest rezygnacja z części informacji, dotyczących właściwości silnika w stanach dynamicznych. Jakkolwiek jest to rezygnacja świadoma i mająca pewne poparcie w rozważaniach teoretycznych, może się okazać, że w niektórych sytuacjach może nie być korzystna. Przykładem sytuacji, w której pomimo założeń o ograniczonych właściwościach całkujących układu, jakim jest silnik spalinowy, proponowane uproszczenie wymagałoby modyfikacji jest przypadek, w którym układ charakteryzowałby się pewnym opóźnieniem pomiędzy wartościami wielkości wejściowych, a ich wpływem na wielkości stanu pracy silnika. Przesunięcie to mogłoby być różne dla różnych wielkości. W takiej sytuacji ograniczenie argumentów funkcji do wartości dla chwili bieżącej i wartości pochodnej względem czasu w chwili bieżącej sprowadzałoby się do poszukiwania zależności od wartości, które nie niosą w sobie zbyt wielu użytecznych informacji. Byłby to akurat problem dość prosty do rozwiązania za pomocą wprowadzenia przesunięć fazowych pomiędzy rozważanymi wielkościami pracy silnika.

Trzeba się jednak liczyć z możliwością wystąpienia innych trudności, jak choćby nieco silniejsze właściwości całkujące silnika, niż spodziewane. Dlatego takie uproszczenie wymaga każdorazowej weryfikacji. Metody takiej weryfikacji nie będą omawiane w obrębie tego artykułu, ale jest to ona również przygotowana przez autorów.

Warto podkreślić, że właściwości sprawiające, iż proponowane uproszczenie zależności operatorowych do zależności funkcyjnych o wartościach liczbowych może okazać się skuteczne, nie jest jedynie cechą określonego typu silnika, ani nawet danego egzemplarza silnika, ale zależy także od warunków pracy silnika, w jakich są prowadzone badania. Dlatego weryfikacja przydatności proponowanej metody jest potrzebna każdorazowo przy analizie każdego rodzaju badań.

Zamiana zależności operatorowych na zależności funkcyjne o wartościach liczbowych może stanowić wystarczające uproszczenie dynamicznych modeli silników spalinowych dla dokonania nieco bardziej szczegółowej analizy wyników badań dynamicznych. Autorzy mają nadzieję, że umożliwi to kompleksowe spojrzenie na problematykę stanów dynamicznych pracy silników.

## Nomenclature/Skróty i oznaczenia

$y_i$	i-th output value/ <i>i-ta wielkość wyjściowa</i>
$f_i$	i-th functional relationship/ <i>i-ta zależność funkcyjna</i>
$x_j$	j-th input value/ <i>j-ta wielkość wejściowa</i>
$n$	number of the input values/ <i>liczba wielkości wejściowych</i>
$F_i$	i-th operator relationship/ <i>i-ta zależność operatorowa</i>

$k$	discrete value of time taking values from 1 up to present moment – <i>b/dyskretna wartość czasu przyjmująca wartości od 1 do chwili bieżącej – b</i>
$p$	initial moment of time, before which the input values are not taken into account/ <i>początkowa chwila czasu, przed którą wartości wielkości wejściowych nie są brane pod uwagę</i>
$x_j'$	first degree derivative on time of the j-th input value/ <i>pochodna rzędu pierwszego względem czasu j-tej wielkości wejściowej</i>

## Bibliography/Literature

- [1] Black J. et al: Diesel engine transient control and emissions response during a European extra-urban drive cycle (EUDC), Paper No. 2007-01-1938. SAE 2007.
- [2] Chłopek Z., Pawlicki M., Sypowicz R.: Analiza statystyczna natężeń emisji zanieczyszczeń z silnika spalinowego w warunkach symulujących użytkowanie dynamiczne. *Archiwum Motoryzacji*. 1/2005. 77–88.
- [3] Chłopek Z., Piaseczny L.: Remarks about the modelling in science researches. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* Nr 4(11)/2001. 47–57.
- [4] Chłopek Z., Rostkowski J.: Analiza emisji zanieczyszczeń z silników o zapłonie samoczynnym w warunkach dynamicznych. *Archiwum Motoryzacji* 3/2003. 119–140.
- [5] Chłopek Z.: Analiza emisji zanieczyszczeń z trakcyjnego silnika spalinowego, *Mechanics and Mechanical Engineering* 1/2005. Volume 9. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej. Łódź 2005. 43–68.
- [6] Chłopek Z.: Metody badań właściwości silników spalinowych w warunkach przypadkowych modelujących użytkowanie. *Archiwum Motoryzacji* 4/2010. 187–210.
- [7] Chłopek Z.: Modelowanie procesów emisji spalin w warunkach eksploatacji trakcyjnej silników spalinowych. *Prace Naukowe. Seria „Mechanika”* z. 173. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 1999.
- [8] Chłopek Z.: Some remarks on engine testing in dynamic states. *Silniki Spalinowe – Combustion Engines* 4/2010 (143). 60–71.
- [9] Cichy M.: Nowe metody badawcze silników spalinowych i środki techniczne ich realizacji. KBN 1998.
- [10] Longwic R.: Charakterystyka działania silnika o zapłonie samoczynnym w warunkach swobodnego rozprężania. *Politechnika Lubelska*. Lublin 2011.
- [11] Lotko W., Longwic R., Górski K.: Analiza wybranych parametrów procesu spalania oleju napędowego w stanach nieustalonych pracy silnika spalinowego. *Journal of KONES Internal Combustion Engines* 2000. Vol. 7, No 1–2.
- [12] Mamala J., Jantos J.: Charakterystyki eksploatacyjne silnika samochodowego. *Journal of KONES Internal Combustion Engines* 2005. Vol. 12.
- [13] Ogawa H., Miyamoto N., Reksowardojo I.: Cycle-to-cycle transient characteristics of exhaust gas emissions from a diesel engine with different increasing and decreasing load patterns. Paper No. 970750. SAE 1997.
- [14] Serrano J. et al.: Cycle-to-cycle diesel combustion characterization during engine transient operation, Paper No. 2001-01-3262. SAE 2001.
- [15] 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*. Volume 40, Issue 11. November 2006.
- [16] Worldwiede emission standards. Heavy duty & off-road vehicles. Delphi. Innovation for the real world. 2012/2013.
- [17] Zieliński T.: Cyfrowe przetwarzanie sygnałów. WKŁ. Warszawa 2005.

Zdzisław Chłopek, DSc., DEng. – Professor, Motor Transport Institute, Warsaw.

*Prof. dr hab. inż. Zdzisław Chłopek, Instytut Transportu Samochodowego w Warszawie.*



Tomasz Szczepański, MSc, Eng. – Motor Transport Institute, Warsaw.

*Mgr inż. Tomasz Szczepański, Instytut Transportu Samochodowy w Warszawie.*

