

Correlation studies of combustion engines properties in dynamic states

The article represents a continuation of considerations on simplifying combustion engine model describing its operation in dynamic states from the form describing operator relationships, to the form describing functional relationships between parameters characterizing the engine operation. Authors mention the method of this transition which relies on narrowing of the time domain values (representing operator relationship arguments) to one discrete value. Since the justifiability of such a procedure requires verification, this paper proposes a verification method based on the correlation tests of combustion engines characteristics in the dynamic states. The paper defines, for this purpose, the basic concepts, presents several commonly used methods of correlation analysis. Then the authors discuss the necessary condition to fulfil in order for the engine model simplification method was justified and the possibility of verifying this condition by analyzing the correlation function of appropriate combinations of the courses of the engine operating parameters. After that article presents practically occurring correlation functions calculated for the courses of the engine operating parameters in dynamic states and discusses their characteristic properties useful to draw, based on them, conclusions about the engine model.

Keywords: correlation, dynamic, work state

Badania korelacyjne właściwości silników spalinowych w stanach dynamicznych

Artykuł stanowi rozwinięcie rozważań dotyczących upraszczania modelu silnika spalinowego opisującego jego pracę w stanach dynamicznych od postaci opisującej zależności operatorowe do postaci opisującej zależności funkcyjne pomiędzy wielkościami charakteryzującymi pracę silnika. Wspomniana jest w nim metoda takiego przejścia, polegająca na zawężeniu dziedziny czasowej wielkości (stanowiących argumenty zależności operatorowych) do jednej wartości dyskretnej. Ponieważ zasadność takiego zabiegu wymaga weryfikacji, w referacie proponowana jest metoda weryfikacji oparta na badaniach korelacyjnych właściwości silników spalinowych w stanach dynamicznych. Definiowane są w tym celu podstawowe pojęcia, przedstawianych jest kilka powszechnie stosowanych metod analizy korelacyjnej. Następnie omawiany jest warunek konieczny do spełnienia, aby metoda uproszczenia modelu silnika była uzasadniona oraz możliwość weryfikacji tego warunku za pomocą analizy funkcji korelacji odpowiednich kombinacji przebiegów parametrów pracy silnika. W dalszej części referat przedstawia praktycznie występujące funkcje korelacji obliczane dla przebiegów parametrów pracy silnika w stanach dynamicznych oraz omawia ich cechy charakterystyczne przydatne przy wyciąganiu na ich podstawie wniosków o modelu silnika.

Słowa kluczowe: korelacja, dynamika, stan pracy

1. Introduction

Correlation studies of the courses of combustion engines operating parameters may be used for many different purposes and in themselves carry often important cognitive information on the performance characteristics of these devices.

This article, however, will present certain specific application of the correlation analysis in order to verify the method of simplifying dynamic models of the engine from the operator relationships to the functional relationships. This method was described in detail in the article [4]. This work is therefore a continuation of the considerations included in the aforementioned article.

2. The essence of transforming the operator relationships to the functional relationships

In a general approach the relationships linking input and output parameters of the combustion engine model are of the operator character (generalized function) [4, 5], which is illustrated by the formula (1):

1. Wstęp

Badania korelacyjne przebiegów parametrów pracy silników spalinowych mogą być wykorzystywane w wielu celach i same w sobie niosą niejednokrotnie ważne informacje poznawcze dotyczące użytkowych właściwości tych urządzeń.

W niniejszym artykule zostanie jednak przedstawione pewne szczególne zastosowanie analizy korelacyjnej w celu weryfikacji metody upraszczania modeli dynamicznych silnika od zależności operatorowych do zależności funkcyjnych. Metoda ta została szczegółowo opisana w artykule [4]. Niniejsza praca jest więc niejako kontynuacją rozważań ujętych we wspomnianym artykule.

2. Istota sprowadzania zależności operatorowych do zależności funkcyjnych

W ogólnym podejściu zależności wiążące parametry wejściowe i wyjściowe modelu silnika spalinowego mają charakter operatorowy (funkcja uogólniona) [4, 5], który ilustruje wzór (1).

W wyniku narzucanych ograniczeń na dziedzinę argumentów operatora F_i postuluje się sprowadzenie zależności

$$y_i = F_i [x_1(k:1+b), x_2(k:1+b) \dots x_n(k:1+b)] \quad (1)$$

As a result of the restrictions imposed on the operator's domain of arguments F_i it is suggested to bring this relationship on the functional relationship (a function of numerical values):

$$y_i(b) = f_i [x_1(b), x_1'(b), x_j(b), x_j'(b) \dots x_n(b), x_n'(b)] \quad (2)$$

Equation (2) expresses the functional relationship between the arguments that are figures of the values equal to the input parameters in the current moment and values of the first degree derivatives on time of these parameters at the current moment [2].

Such procedure preserves the dynamic nature of the model, taking into account the variability of the individual parameters, but it ignores the impact of the parameter values in the moments prior to the current one. Although, such simplification has some theoretical justification, it is however a wasting simplification, losing some of the information that is deemed less important. Such an approach obviously requires verification to see if the lost information really is not very important. For this purpose, will be used analysis of mutual correlation function.

3. Application of mutual correlation to verify combustion engines modelling with the functional relationships [3]

Having two courses of two different parameters, it is possible to consider various criteria of similarity between them. It is possible to consider similarity in the aspect of the scope of the present values, the probability of occurrence of the individual values, frequency of their changes, etc. All this information can in some way prove a mutual relationship between the two courses, but do not represent the knowledge on this, which could be interpreted unambiguously. For this reason, it is necessary to use information about the direct connection between the changes in one course, and changes in the other. In such a situation, the causal relationship is postulated, although – in fact – sometimes it is difficult to determine, course of which parameter, can be considered as the cause, and which the effect. Therefore the concept of mutual correlation is introduced.

The mutual correlation coefficient is defined for the courses considered as discrete as the sum of the products of the subsequent values in the courses of two parameters [7]. Used here is the phenomenon that the multiplication of two similar values gives greater result than multiplying high value with a small one. Therefore, if both courses are increasing and decreasing at the same time, then the sum of products of their successive values will be much higher than in case if large values in one courses would correspond to small values in the second, and vice versa.

The mutual correlation coefficient is thus a single number informing about the link between the two courses. It should also be noted that the coefficient value depends not only on the existence of the link, but also on the value of the courses

tej do zależności funkcyjnej (funkcji o wartościach liczbowych) – wzór (2).

Wzór (2) wyraża zależność funkcyjną od argumentów będących liczbami o wartościach równych wartościom parametrów wejściowych w chwili bieżącej oraz wartościom pochodnych rzędu pierwszego względem czasu tych parametrów w chwili bieżącej. [2]

Taki zabieg zachowuje dynamiczny charakter modelu, uwzględniając zmienność poszczególnych parametrów, ale pomija wpływ wartości parametrów w chwilach wcześniejszych od bieżącej. Jakkolwiek takie uproszczenie ma pewne uzasadnienie teoretyczne, jest to jednak uproszczenie stratne, czyli tracące część informacji uznanych za mniej istotne. Takie podejście wymaga oczywiście weryfikacji, aby przekonać się, czy tracone informacje rzeczywiście są mało istotne. W tym celu zostanie wykorzystana analiza funkcji korelacji wzajemnej.

3. Wykorzystanie korelacji wzajemnej do weryfikacji modelowania silników spalinowych zależnościami funkcyjnymi [3]

Mając dwa przebiegi dwóch różnych parametrów, można rozważać różne kryteria podobieństwa między nimi. Można rozpatrywać podobieństwo w kategorii zakresu występujących wartości, prawdopodobieństwa występowania poszczególnych wartości, częstotliwości ich zmiany itp. Wszystkie te informacje mogą w pewien sposób świadczyć o wzajemnej zależności między dwoma przebiegami, ale nie stanowią na ten temat wiedzy, którą można interpretować w sposób jednoznaczny. Z tego powodu potrzebne jest wykorzystanie informacji o bezpośrednim powiązaniu między zmianami w jednym przebiegu, a zmianami w drugim. Postuluje się w takiej sytuacji zależność przyczynową, chociaż – w istocie – niekiedy trudno jest określić, którego parametru przebieg można uznać za przyczynę, a którego za skutek. W związku z tym wprowadza się pojęcie korelacji wzajemnej.

Współczynnik korelacji wzajemnej jest zdefiniowany dla przebiegów rozpatrywanych jako dyskretne jako suma iloczynów kolejnych wartości w przebiegach dwóch parametrów [7]. Wykorzystywane jest tutaj zjawisko, zgodnie z którym wymnożenie przez siebie dwóch podobnych wartości daje większy wynik, niż wymnożenie dużej wartości z małą. Dlatego, jeśli obydwie przebiegi rosną i maleją w tym samym czasie, wówczas suma iloczynów ich kolejnych wartości będzie znacznie większa, niż w przypadku, gdyby duże wartości w jednym przebiegu odpowiadały małym wartościom w drugim, i na odwrót.

Współczynnik korelacji wzajemnej jest więc pojedynczą liczbą informującą o powiązaniu między dwoma przebiegami. Trzeba też zauważyć, że wartość współczynnika zależy nie tylko od istnienia samego powiązania, ale także od wartości badanych przebiegów oraz od ich długości (liczności dyskretnych próbek czasowych). Dlatego interpretacja wielkości wyniku jest sprawą bardzo względną. Rozwiązanie tego problemu zostanie podane poniżej.

Może się zdarzyć, że silne powiązanie między dwoma przebiegami istnieje, ale jest ono przesunięte w czasie. Mię-

investigated and of their length (multiplicity of the discrete time samples). Therefore the interpretation of the magnitude of the result is a very relative matter. The solution to this problem will be given below.

It may happen that a strong correlation exists between the two courses, but it is shifted in time. It is also due to this phenomenon that usually a single mutual correlation coefficient is not used, but the mutual correlation function. After moving the courses investigated, relative to each other by one time sample it is possible to re-establish the mutual correlation coefficient for the courses offset in phase. A collection of so-calculated mutual correlation coefficients for the individual phase shifts is called the mutual correlation function [2]. Its domain is time, though it does not indicate the passage of time, but the relative shift in time.

Creating a mutual correlation function also solves the problem of the lack of reference to the values of mutual correlation coefficients alone. If there is a connection between the two courses, there is very little chance that it remains at a constant level throughout the entire range of the phase shifts. Therefore, when proposing a correlation there should be clearly visible variability of the mutual correlation function. In turn, it is assumed that, in practice, only the lack of correlation may extend over the entire range of phase shifts. So clear and possible to be physically interpreted variability of the mutual correlation function is the simplest, yet effective way to assess the presence or absence of links between the courses studied.

Depending on requirements also some modifications are applied of the basic form of coefficients and the correlation functions. The most popular are the covariance, which can be called a normalized correlation function (net of expected value) [2]. Another example is the Pearson correlation, i.e. the correlation following normalization and standardization [2].

All such modifications operate on the same principle, and their effect is practically the same as the different ways of modifying the value scale.

Also ranked correlation is worth to be discerned. It differs in that the chosen type of the correlation function is formed not directly based on the course data. The original courses are replaced with their ranked equivalents, thus eliminated is in them the information about the non-linear variability. Such operation allows to obtain a more clear result of the correlation function in case of two courses, between which there is a relationship characterized by being disproportionate.

4. The application of correlation tests to verify the methods of simplifying dynamic engine model

As a result of the simplification of the dynamic engine model used there is information lost about the impact of input parameters values in the moments prior to the current one. Verification of this approach will be based on an assessment of whether lost information will actually have negligible impact on the current values of the output parameters.

The prerequisite for the method adopted to be right, can be defined as follows: there must be a strong relationship

dzy innymi ze względu na to zjawisko zazwyczaj nie stosuje się pojedynczego współczynnika korelacji wzajemnej, ale funkcję korelacji wzajemnej. Po przesunięciu badanych przebiegów względem siebie o jedną próbkę czasu można ponownie wyznaczyć współczynnik korelacji wzajemnej dla przebiegów przesuniętych względem siebie w fazie. Zbiór tak obliczonych współczynników korelacji wzajemnej dla poszczególnych przesunięć fazowych nazywa się funkcją korelacji wzajemnej [2]. Jej dziedziną jest czas, choć wskazuje on nie na przebieg czasu, ale na względne przesunięcie w czasie.

Tworzenie funkcji korelacji wzajemnej rozwiązuje też problem braku odniesienia dla wartości samych współczynników korelacji wzajemnej. Jeśli istnieje powiązanie między dwoma przebiegami, istnieje niezwykle mała szansa na to, że utrzymuje się ono na stałym poziomie w całym zakresie przesunięć fazowych. Dlatego w przypadku postulowania korelacji powinna być wyraźnie widoczna zmienność funkcji korelacji wzajemnej. Z kolei zakłada się, że w praktyce tylko brak korelacji może rozciągać się na cały przedział przesunięć fazowych. Tak więc wyraźna i możliwa do interpretacji fizycznej zmienność funkcji korelacji wzajemnej jest najprostszym, a zarazem skutecznym sposobem oceny występowania lub braku występowania powiązania między badanymi przebiegami.

W zależności od potrzeb stosuje się również pewne modyfikacje podstawowej formy współczynników i funkcji korelacji. Do najpopularniejszych należy kowariancja, którą można nazwać znormalizowaną funkcją korelacji (pomniejszoną o wartość oczekiwaną) [2]. Innym przykładem może być korelacja Pearsona, czyli korelacja po normalizacji i standaryzacji [2].

Wszystkie tego typu modyfikacje działają na tej samej zasadzie, a ich efekt jest w praktyce tożsamy z różnymi sposobami modyfikacji skali wartości.

Wartą wyróżnienia jest również korelacja rangowa. Różni się ona tym, że wybrany rodzaj funkcji korelacji tworzony jest nie bezpośrednio na podstawie danych przebiegów. Przebiegi oryginalne są zastąpione ich odpowiednikami rangowymi, czyli jest wyeliminowana w nich informacja o zmienności nieliniowej. Taka operacja pozwala na otrzymanie nieco bardziej czytelnego wyniku funkcji korelacji w przypadku dwóch przebiegów, między którymi istnieje powiązanie charakteryzujące się nieproporcjonalnością.

4. Wykorzystanie badań korelacyjnych do weryfikacji metody uproszczenia dynamicznego modelu silnika

W wyniku stosowanego uproszczenia dynamicznego modelu silnika tracone są informacje o wpływie wartości parametrów wejściowych w chwilach wcześniejszych niż bieżące. Weryfikacja tego podejścia będzie polegała na ocenie, czy rzeczywiście tracone informacje będą miały pomijalnie mały wpływ na bieżące wartości parametrów wyjściowych.

Warunek konieczny, żeby przyjęta metoda była słuszna, można zdefiniować następująco: musi występować silne

(correlation) between the actual values of the input and output of the respective model and at the same time relatively weak connection between the values at the current moment for output parameters and at the moments prior to the current one for the input parameters.

With regard to the mutual correlation function, it is possible to specify what properties this function should have, for this condition to be met. Given the fact that the assessment of the presence or absence of the correlation is a relative matter, one can only say that for the phase shift values close to zero, mutual correlation function value should be significantly higher than for all other phase shifts.

This condition is defined only for a single input and output parameter. Of course, in the case of a model having more parameters for input and output, one should consider correlational relationships for all combinations of pairs of input and output parameters.

A certain special case in the evaluation of the method to simplify the engine model is the absence of correlation between the considered courses parameters of its operation. Formally, if the j -th input parameter is not correlated with i -th output parameter, it is possible to delete the current value of this parameter and the value of its derivative as arguments of the relationship function of this model. However, it may be a case in which the relationship between these parameters is present only in certain states of the engine operation. It is therefore possible to maintain this parameter, although then the desirability of its simplification to the functional relationship remains unverified.

5. An example of studying the mutual correlation function of the engine operating parameters courses in the dynamic states

When examining the relationships between the engine operating parameters courses, the derived properties of mutual correlation function usually tend to be quite difficult to interpret. Theoretically, the most convenient to evaluate shape would be one in which the value of the mutual correlation function would assume the value zero for all arguments except for the argument zero, for which the value of the function would be non-zero. It is worth noting a few characteristic features of actually existing mutual correlation function.

One such property is the symmetry of the mutual correlation function graph. The mutual correlation function usually reaches high values for phase shifts close to zero and shifts close to the length of the courses examined, which are also approaching the zero shift. Thus obtained shape is often close to the symmetrical one in such a way that at its ends there are two "slopes" of one maximum.

Another feature is a non-zero mutual correlation value for the whole domain. One ought to keep in mind that the mutual correlation function values are the sum of the products of the following values of the two courses. These courses rarely take the zero value, so the sum of the products will form relatively large values in almost entire domain. Assessment of the correlation is based, therefore, on a relative comparison of values.

powiązanie (korelacja) między wartościami bieżącymi wartości wejściowych i wyjściowych rozważanego modelu oraz jednocześnie względnie słabe powiązanie między wartościami w chwili bieżącej dla parametrów wyjściowych i w chwilach poprzednich od bieżącej dla parametrów wejściowych.

W odniesieniu do funkcji korelacji wzajemnej można określić, jakie właściwości powinna mieć ta funkcja, żeby powyższy warunek był spełniony. Zważywszy na fakt, że ocena występowania lub braku występowania korelacji jest sprawą względną, należy stwierdzić jedynie, że dla przesunięć fazowych bliskich zeru wartość funkcji korelacji wzajemnej powinna być wyraźnie większa, niż dla wszystkich pozostałych przesunięć fazowych.

Powyższy warunek jest zdefiniowany jedynie dla pojedynczego parametru wejściowego i wyjściowego. Oczywiście w przypadku modelu mającego więcej parametrów na wejściu i wyjściu należy rozważyć zależności korelacyjne dla wszystkich kombinacji par parametrów wejściowych i wyjściowych.

Pewnym przypadkiem szczególnym w ocenie metody upraszczania modelu silnika jest brak występowania korelacji między rozważanymi przebiegami parametrów jego pracy. Formalnie, jeśli j -ty parametr wejściowy nie jest skorelowany z i -tym parametrem wyjściowym, można usunąć wartość bieżącą tego parametru oraz wartość bieżącą jego pochodnej jako argumenty funkcji zależności modelu. Może jednak istnieć przypadek, w którym zależność między tymi parametrami istnieje tylko w niektórych stanach pracy silnika. Możliwe jest więc zachowanie tego parametru, choć wówczas celowość jego uproszczenia do zależności funkcyjnej pozostaje niezwyfikowana.

5. Przykład badania funkcji korelacji wzajemnej przebiegów parametrów pracy silnika w stanach dynamicznych

Podczas badania zależności między przebiegami parametrów pracy silnika, otrzymywane właściwości funkcji korelacji wzajemnej zazwyczaj bywają dość trudne do interpretacji. Teoretycznie najwygodniejszym do oceny kształtem byłby ten, w którym wartość funkcji korelacji wzajemnej przyjmowałaby wartości zerowe dla wszystkich argumentów z wyjątkiem argumentu zerowego, dla którego wartość funkcji byłaby niezerowa. Warto jednak zwrócić uwagę na kilka charakterystycznych cech rzeczywiście występujących funkcji korelacji wzajemnej.

Jedną z takich właściwości jest symetria wykresu funkcji korelacji wzajemnej. Funkcja korelacji wzajemnej osiąga zwykle duże wartości dla przesunięć fazowych bliskich zeru oraz dla przesunięć bliskich długości badanych przebiegów, które również zbliżają się do przesunięcia zerowego. Otrzymany w ten sposób kształt jest często zbliżony do symetrycznego w taki sposób, że na jego krańcach widnieją dwa „zbocza” jednego maksimum.

Inną cechą jest niezerowa wartość korelacji wzajemnej dla całej dziedziny. Trzeba pamiętać, że wartości funkcji korelacji wzajemnej są sumą iloczynów kolejnych warto-

The presence of other (smaller) local maxima of the mutual correlation function may be a source of important information. If the tested courses of the input and output parameters vary in time, one can usually find in them some periodic phenomena. Often no special attention is paid on that, particularly when such periodicity is not identified based on the known relationships. However, this phenomenon will have a very strong impact on the mutual correlation function, which for periodic courses is also periodic. So it can often happen that in the analyzed mutual correlation function, additional local maxima will be seen. Then it is necessary every time to assess whether the local maximum results from correlation of the phenomena occurring in the engine for a given time interval, or is it merely the effect of superposition of random periodic shapes of the courses examined.

It is possible to analyze the small value of the derivative of the mutual correlation function in respect to the time shift (so called steepness) in the neighbourhood of the global maximum. It should also be noted that the steepness of the mutual correlation function around the maximum depends on the steepness of the peaks in the courses examined, and from their "extent" in time. If, therefore, subjected to the correlation analysis are the courses, in which local maxima are relatively not steep, and then in the mutual correlation function of any possible global maximum will be extended in time.

The values of the mutual correlation function, as a sum of products, may take both positive and negative values. If there is such a link between the examined courses that the increase in the value of one course (for positive values) goes hand in hand with a decrease in the second course value (for negative values), the maximum of the correlation function may occur within the negative values.

The interpretation of the mutual correlation function graphs of the combustion engine operational parameters courses are presented on the example of the results of Detroit Diesel Series 50 engine HDDTT dynamic test (Heavy Duty Diesel Transient Test).

Figures 1-4 show the courses of the emission intensity.

The charts 4-7 show the mutual correlation function graphs for the courses of the selected operating parameters.

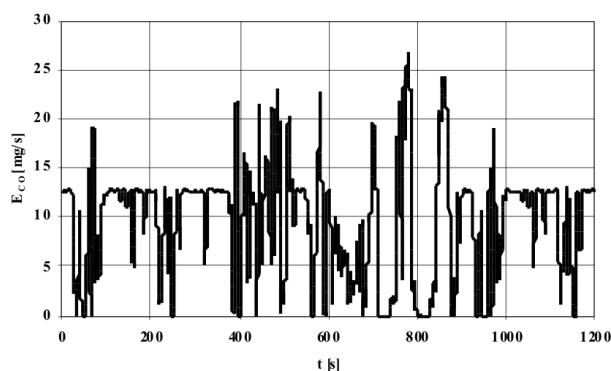


Fig. 1. Course of the carbon monoxide emission intensity – E_{CO}

Rys. 1. Przebieg natężenia emisji tlenku węgla – E_{CO}

ści dwóch przebiegów. Owe przebiegi rzadko przyjmują wartości zerowe, tak więc suma iloczynów będzie tworzyła niemal w całej dziedzinie wartości stosunkowo duże. Ocena występowania korelacji opiera się w związku z tym na porównaniu względnym wartości.

Występowanie innych (mniejszych) maksimów lokalnych funkcji korelacji wzajemnej może być źródłem istotnych informacji. Jeżeli badane przebiegi parametrów wejściowych i wyjściowych są zmienne w czasie, zazwyczaj można doszukać się w nich pewnych zjawisk okresowych. Często nie zwraca się na to większej uwagi, szczególnie kiedy taka okresowość nie jest identyfikowana na podstawie znanych zależności. Jednak to zjawisko będzie miało bardzo silny wpływ na funkcję korelacji wzajemnej, która dla przebiegów okresowych jest również okresowa. Często może się więc zdarzyć, że w analizowanej funkcji korelacji wzajemnej widoczne będą dodatkowe, lokalne maksima. Każdorazowo trzeba wówczas ocenić, czy maksimum lokalne wynika z korelacji zjawisk zachodzących w silniku dla danego odstępu czasowego, czy jest to jedynie efekt nałożenia na siebie przypadkowych kształtów okresowych badanych przebiegów.

Można analizować niewielką wartość pochodnej funkcji korelacji wzajemnej względem przesunięcia czasowego (tzw. stromość) w okolicy maksimum globalnego. Warto zwrócić także uwagę, że stromość funkcji korelacji wzajemnej w okolicy maksimum zależy od stromości maksimów w badanych przebiegach oraz od ich „rozległości” w czasie. Jeżeli więc analizie korelacyjnej poddawane są przebiegi, w których maksima lokalne są stosunkowo mało strome, to w funkcji korelacji wzajemnej ewentualne maksimum globalne będzie rozciągnięte w czasie.

Wartości funkcji korelacji wzajemnej, jako sumy iloczynów, mogą przyjmować zarówno wartości dodatnie, jak i ujemne. Jeżeli więc istnieje takie powiązanie między badanymi przebiegami, że wzrost wartości jednego przebiegu (w zakresie wartości dodatnich) idzie w parze ze spadkiem wartości przebiegu drugiego (w zakresie wartości ujemnych), to maksimum funkcji korelacji wzajemnej może występować w obrębie wartości ujemnych.

Interpretację wykresów funkcji korelacji wzajemnej przebiegów parametrów pracy silnika spalinowego przedstawiono na przykładzie wyników badań silnika Detroit Diesel Series 50 w warunkach testu dynamicznego HDDTT (*Heavy Duty Diesel Transient Test*).

Na rysunkach 1-4 przedstawiono przebiegi natężenia emisji zanieczyszczeń.

Na wykresach 4-7 przedstawiono wykresy funkcji względnej korelacji wzajemnej dla przebiegów wybranych parametrów pracy. Funkcje zostały przeskalowane w taki sposób, aby wartości maksymalne były równe 1. Jest to zabieg o tyle pomocny, że sumy iloczynów potrafią osiągać wartości bardzo duże, sięgające niekiedy wielu setek milionów.

Na rysunku 5 jest widoczna silna zależność korelacyjna badanych przebiegów. Chociaż nigdzie funkcja nie przyjmuje wartości zerowych, a między maksimami globalnymi

The functions have been scaled so that the maximum values are equal to 1. This procedure is helpful in so that the sum of the products can reach very high values, sometimes of many hundreds of millions.

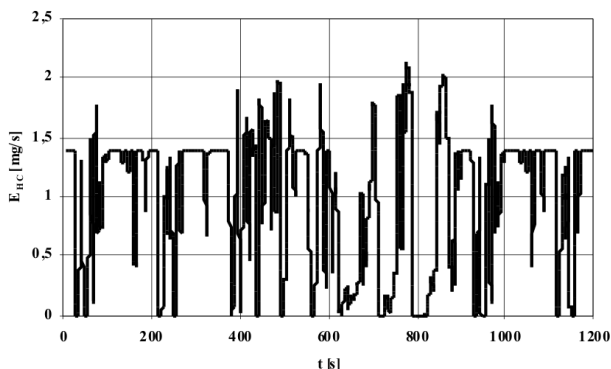


Fig. 2. Course of the hydrocarbon emission intensity – E_{HC}
Rys. 2. Przebieg natężenia emisji węglowodorów – E_{HC}

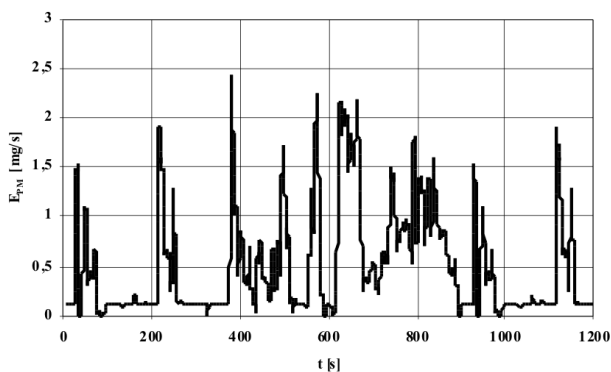


Fig. 4. Course of the particles intensity – E_{PM}
Rys. 4. Przebieg natężenia cząstek stałych – E_{PM}

Figure 5 shows a strong correlation relationship of the courses being examined. Although function does not assume null values anywhere, and between global maxima, there are clear local maxima, but there is no doubt that the only cause and effect relationship between the examined courses exists for zero phase shift.

Figure 6, in turn, presents a slightly weaker (but still visible) correlation relationship. The local function peak should be noted, occurring for the arguments close to 1050 s. It is apparently the result of a phenomenon described in the previous section of this paper. Its interpretation as the relationship between the courses examined is eliminated, based on the knowledge of the combustion engine operating principles because the emission intensity value at the present moment can not depend on the value of rotational speed which occurred 150 seconds earlier, if the relationship between these parameters of the engine operation fades away throughout the entire period of time between these phenomena.

Figure 7 shows a complete lack of relationship correlation. It should be noted that in assessing the existence of links between the courses studied, the absolute value of the mutual

istnieją wyraźne maksima lokalne, jednak nie ma najmniejszych wątpliwości, że jedyna zależność przyczynowo-skutkowa między badanymi przebiegami występuje dla zerowej wartości przesunięcia fazowego.

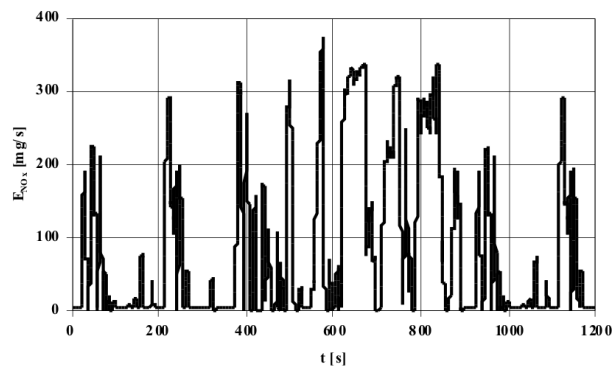


Fig. 3. Course of the nitrogen oxides emission intensity – E_{NOx}
Rys. 3. Przebieg natężenia emisji tlenków azotu – E_{NOx}

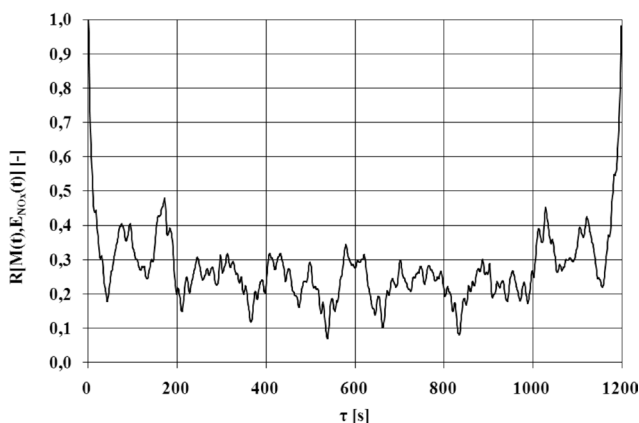


Fig. 5. The relative mutual correlation function – R between the torque courses – M and the nitrogen oxides emission intensity – E_{NOx}
Rys. 5. Funkcja względnej korelacji wzajemnej – R między przebiegami momentu obrotowego – M i natężenia emisji tlenków azotu – E_{NOx}

Na rysunku 6 z kolei przedstawiono nieco słabszą (choć wciąż widoczną) zależność korelacyjną. Warto zwrócić uwagę na maksimum lokalne funkcji występujące dla argumentów bliskich 1050 s. Najwyraźniej jest ono wynikiem zjawiska opisanego w poprzednim punkcie pracy. Jego interpretacja jako zależności między badanymi przebiegami jest wykluczona na podstawie znajomości zasad działania silnika spalinowego, ponieważ wartość natężenia emisji w chwili bieżącej nie może zależeć od wartości prędkości obrotowej, która wystąpiła 150 sekund wcześniej, jeżeli zależność między tymi parametrami pracy silnika zanika w całym przedziale czasu między tymi zjawiskami.

Na rysunku 7 przedstawiono całkowity brak zależności korelacyjnej. Należy podkreślić fakt, że w ocenie istnienia powiązania między badanymi przebiegami nie jest istotna sama wartość bezwzględna funkcji korelacji wzajemnej, ale różnica między wartością maksymalną i minimalną.

Dość ciekawą zależność ilustruje wykres przedstawiony na rysunku 4.

correlation function alone, is not relevant, but the difference between the maximum and minimum values.

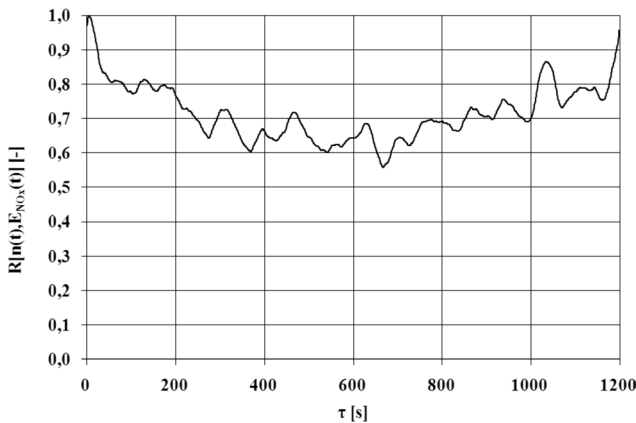


Fig. 6. The relative mutual correlation function – R between rotational speed courses – n and the nitrogen oxides emission intensity – E_{NOx}

Rys. 6. Funkcja względnej korelacji wzajemnej – R między przebiegami prędkości obrotowej – n i natężenia emisji tlenków azotu – E_{NOx}

Quite an interesting relationship illustrates the chart the shown on the Figure 4.

This drawing shows the relative mutual correlation function between the course of the derivative of the rotational speed and the nitrogen oxides emissions intensity. As it can be seen, not only the rotational speed course is correlated (Figure 2) with the studied course of the emission intensity. The correlation with the course derivative is clear result of the correlation of the course itself.

6. Summary

Because of the theoretical ambiguity of the assessment of the existence or non-existence of relationship (correlation) between the examined engine operational parameters courses there was an idea of using the tool of essentiality tests used to verify the relevance of statistical hypotheses. It would be possible then to define the basic hypothesis, for example, stating no existence of correlation and the alternative hypothesis. But then two problems arise.

First of all, there are no statistics independent from the concept of correlation, which could be used. The existing tools tend to refer to other characteristics of the courses, which could be used to infer of the existence of a correlation only indirectly. They are therefore less reliable tools pointing to the mutual cause and effect relationship between two courses.

The second problem concerns the possibility of building own statistics based on the concept of correlation. However, since the correlation alone is a very relative indicator, there is no reverence value, based on which it would be possible to valuate the results of such statistics. This problem is essentially the same as the problem of the interpretation of the properties ("shape") of the mutual correlation function.

In view of the above difficulties, the idea of a more rational assessment of correlations using the method of verification of hypotheses was abandoned. It should be noted that the existing assessment of the correlation occurrence based

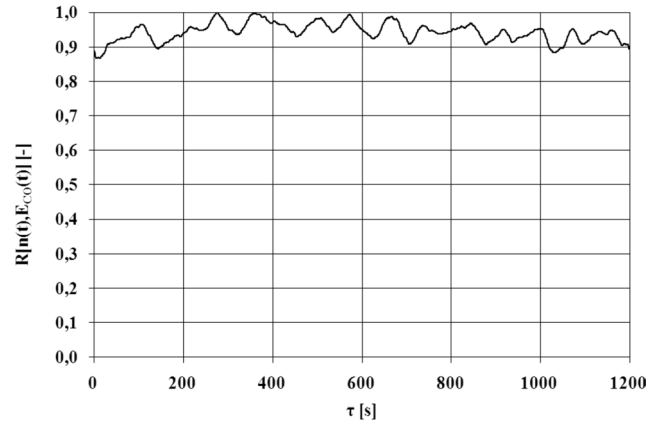


Fig. 7. The relative mutual correlation function – R between rotational speed courses – n and the carbon monoxide emission intensity – E_{CO}

Rys. 7. Funkcja względnej korelacji wzajemnej – R między przebiegami: prędkości obrotowej – n i natężenia emisji tlenku węgla – E_{CO}

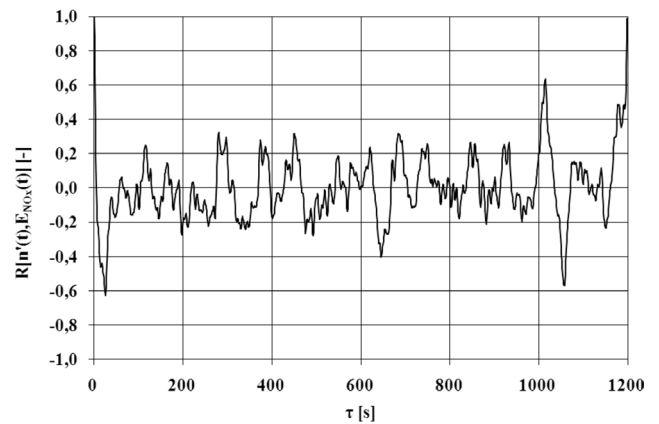


Fig. 8. The relative mutual correlation function – R between courses: of the rotational speed derivative on time – n' and the nitrogen oxides emission intensity – E_{NOx}

Rys. 8. Funkcja względnej korelacji wzajemnej – R między przebiegami: pochodnej prędkości obrotowej względem czasu – n' i natężenia emisji tlenków azotu – E_{NOx}

Na rysunku tym przedstawiono funkcję względnej korelacji wzajemnej między przebiegiem pochodnej prędkości obrotowej, a natężeniem emisji tlenków azotu. Jak widać, nie tylko sam przebieg prędkości obrotowej jest skorelowany (na rys. 2) z badanym przebiegiem natężenia emisji. Korelacja z pochodną przebiegu jest oczywistym skutkiem korelacji z samym przebiegiem.

6. Podsumowanie

Ze względu na teoretyczną niejednoznaczność oceny istnienia lub braku istnienia powiązania (korelacji) między rozpatrywanymi przebiegami parametrów pracy silnika powstał pomysł wykorzystania narzędzia, jakim są testy istotności służące do weryfikacji hipotez statystycznych. Możliwe byłoby wówczas zdefiniowanie hipotezy podstawowej, na przykład stwierdzającej brak istnienia korelacji oraz hipotezy alternatywnej. Jednak wówczas powstają dwa problemy.

Po pierwsze, nie istnieją niezależne od pojęcia korelacji statystyki, którymi można by się posłużyć. Istniejące narzędzia

on the variation of the mutual correlation function and the possibility of its physical interpretation – although difficult to express numerically – is quite clear. Therefore, one may regard the analysis of mutual correlation function to be useful, in the practice, way of verifying method of simplifying combustion engines dynamic models.

In light of the presented correlation studies it can also be possible to try to assess the method of simplifying engine models, itself. Although this method still requires a lot of research carried out on many objects, in their various operating conditions, based on the preliminary studies carried out it can be expected that it will prove justified and useful for a comprehensive look at the problem of testing the performance of combustion engines in the dynamic states.

Nomenclature/Skróty i oznaczenia

y_i	<i>i</i> -th output parameter/ <i>i</i> -ty parametr wyjściowy
x_j	<i>j</i> -th input parameter/ <i>j</i> -ty parametr wejściowy
<i>n</i>	number of the input parameters/liczba parametrów wejściowych
F_i	<i>i</i> -th operator relationship/ <i>i</i> -ta zależność operatorowa
<i>k</i>	discrete value of time taking values from 1 up to present moment – <i>b</i> /dyskretna wartość czasu przyjmująca wartości od 1 do chwili bieżącej – <i>b</i>
x_i'	first degree derivative on time of the <i>i</i> -th input parameter/pochodna rzędu pierwszego względem czasu <i>i</i> -tego parametru wejściowego
f_i	<i>i</i> -th functional relationship/ <i>i</i> -ta zależność funkcyjna

dzia odnoszą się zazwyczaj do innych cech przebiegów, na których podstawie można wnioskować o istnieniu korelacji jedynie pośrednio. Są to więc narzędzia mniej wiarygodnie świadczące o wzajemnym powiązaniu przyczynowo-skutkowym dwóch przebiegów.

Drugi problem dotyczy możliwości zbudowania własnej statystyki opartej na pojęciu korelacji. Ponieważ jednak sama korelacja jest wskaźnikiem bardzo względnym, nie istnieje żadna wartość odniesienia, na podstawie której możliwe byłoby wartościowanie wyników takiej statystyki. Problem ten w swojej istocie jest identyczny, jak problem interpretacji właściwości („kształtu”) funkcji korelacji wzajemnej.

Wobec powyższych trudności pomysł bardziej wymiernej oceny istnienia korelacji za pomocą metod weryfikacji hipotez został zarzucony. Trzeba jednak zaznaczyć, że dotychczasowa ocena występowania korelacji na podstawie zmienności funkcji korelacji wzajemnej oraz możliwości jej interpretacji fizycznej – jakkolwiek trudna do ujęcia w sposób liczbowy – jest dość jednoznaczna. Można więc uznać analizę funkcji korelacji wzajemnej za przydatny w praktyce sposób weryfikacji metody upraszczania modeli dynamicznych silników spalinowych.

W świetle przedstawionych badań korelacyjnych można również spróbować ocenić samą metodę upraszczania modeli silników. Chociaż metoda ta wymaga jeszcze wielu badań prowadzonych na wielu obiektach, w różnych warunkach ich pracy, na podstawie przeprowadzonych wstępnych badań można się spodziewać, że okaże się ona uzasadniona i przydatna do kompleksowego spojrzenia na problem badania właściwości użytkowych silników spalinowych w stanach dynamicznych.

Bibliography/Literature

- [1] Banach S.: Teoria operacji. Tom I. Operacje liniowe. Wydawnictwo Kasy im. Mianowskiego Instytutu Popierania Nauki. Warszawa 1931.
- [2] Bendat J. S., Piersol A. G.: Metody analizy i pomiaru sygnałów losowych. PWN. Warszawa 1976.
- [3] Chłopek Z., Rostkowski J.: Analiza emisji zanieczyszczeń z silników o zapłonie samoczynnym w warunkach dynamicznych. Archiwum Motoryzacji 3/2003. 119–140.
- [4] Chłopek Z., Szczepański T.: Koncepcja badań właściwości silników spalinowych w stanach dynamicznych. Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów Politechniki Warszawskiej. (Praca w druku).
- [5] Chłopek Z.: Some remarks on engine testing in dynamic states. Silniki Spalinowe – Combustion Engines 4/2010 (143). 60–71.
- [6] Sobczyk K.: Metody dynamiki statystycznej. PWN. Warszawa 1973.
- [7] Zieliński T.: Cyfrowe przetwarzanie sygnałów. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności. Warszawa 2005.

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

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



Tomasz Szczepański, MEng. – Motor Transport Institute, Warsaw.

Mgr inż. Tomasz Szczepański, Instytut Transportu Samochodowego w Warszawie.

