

Marian CICHY*

Jacek KROPIWNICKI**

Sławomir MAKOWSKI***

Model silnika spalinowego w formie grafów wiązań (GW)

Przedstawiono uzasadnienie użycia metody grafów wiązań do modelowania silnika spalinowego jako źródła energii w systemach energetycznych, składających się z elementów o różnej naturze fizycznej. Jako przykład takiego systemu zaprezentowano model pojazdu hybrydowego. Podano przykłady definicji głównych parametrów silnika wynikające z przyjętej konwencji GW. Przedstawiono propozycję formalizacji charakterystyki silników spalinowych wynikającą z przyjętej metody modelowania. Analityczną formę charakterystyki przedstawiono jako wielowymiarową funkcję wektorową. Podano przykład aproksymacji charakterystyki silnika z zastosowaniem funkcji splejanych stosując własne programy komputerowe.

Słowa kluczowe: modelowanie systemów energetycznych, silnik spalinowy

A model of the IC engine in the form of the bond graph (BG)

Grounds for the use of the bond graph method in the modeling of internal combustion (IC) engines, which are energy sources in systems consisting of different physical nature elements have been presented. The model of hybrid vehicle, as an example of such system, has been presented. Examples of definitions of the main engine parameters, which follow the established BG convention have been given. A proposal of formalization of the IC engine characteristics, which follows the selected method of modeling, has been presented as well as an analytic form of the characteristic as the multidimensional vector function. Example of the engine characteristic approximation with the use of the "Spline" functions and author's computer programs has been given.

Key words: modeling of energy systems, internal combustion engine

1. Wprowadzenie

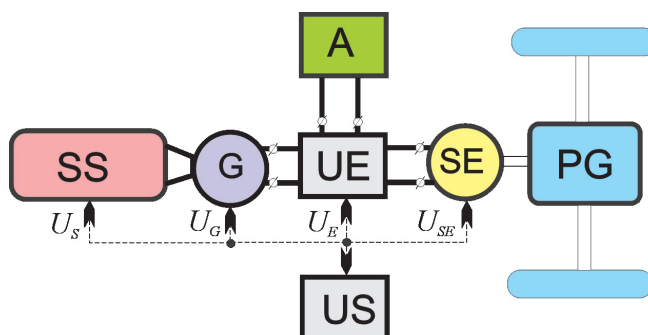
Silnik spalinowy stosowany jest w systemach energetycznych, w których zachodzą procesy energetyczne o różnej naturze fizycznej. Przykładem takiego systemu jest pojazd hybrydowy, w którym wyodrębnić można dwa źródła energii: silnik spalinowy i akumulator elektrochemiczny. Na rysunku 1 przedstawiony jest schemat doświadczalnego pojazdu hybrydowego zbudowanego w Politechnice Gdańskiej (PG) w ramach projektu badawczego KBN 9T12D04110 [1] a następnie rozwijanego w ramach projektu badawczego KBN 8T12D00820 [2].

W rozważanym systemie energetycznym zachodzą procesy przetwarzania energii zawartej w paliwie na energię mechaniczną. Energia ta w generatorze przetwarzana jest na energię elektryczną, której część akumulowana jest w akumulatorze elektrochemicznym, a druga część przetwarzana jest w silniku elektrycznym na energię mechaniczną wykorzystywaną do napędu pojazdu. Głównym celem zastosowania metody grafów wiązań i równań stanu do modelowania

1. Introduction

The IC engine is used in energy systems, where different physical nature processes take place. An example of such a system is a hybrid vehicle, where two sources of energy can be separated: IC engine and electrochemical accumulator. In figure 1 a scheme of experimental hybrid vehicle has been shown. This vehicle was built in Gdańsk University of Technology following the research project KBN 9T12D04110 [1] and it was subsequently developed following the next research project KBN 8T12D00820 [2].

In the energy system, which is taken into consideration, processes of conversion of energy comprised in fuel into mechanical energy take place. This energy is converted in the generator, into electrical energy, part of which is accumulated in the electrochemical battery and the second part is converted in the electric engine into mechanical energy, which is used for vehicle propulsion. The main purpose of use of the bond graph and state equation method for the

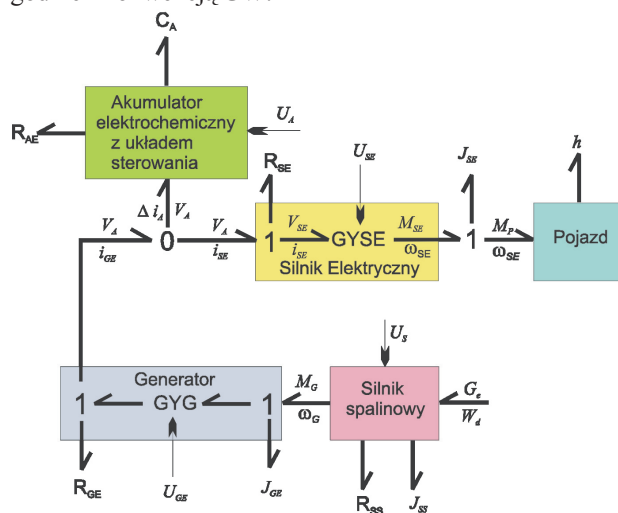


Rys. 1. Schemat zbudowanego w PG pojazdu hybrydowego; SS – silnik spalinowy, G – generator, UE – układ elektryczny, A – akumulator elektrochemiczny, US – układ sterowania, SE – silnik elektryczny, PG – przekładnia główna

Fig. 1. Scheme of the hybrid vehicle, which has been built in Gdańsk University of Technology; SS – IC engine, G – generator, UE – electric system, A – electrochemical battery, US – control system, SE – electric engine, PG – main transmission

złożonych systemów energetycznych jest **zastosowanie jednolitych podstaw formalnych do modelowania elementów systemu o różnej naturze fizycznej** [3, 4, 5, 6].

Na rysunku 2 przedstawiono uproszczony model pojazdu w formie GW, którego schemat funkcjonalny znajduje się na rysunku 1. Oznaczenia na tym rysunku przedstawione są zgodnie z konwencją GW.

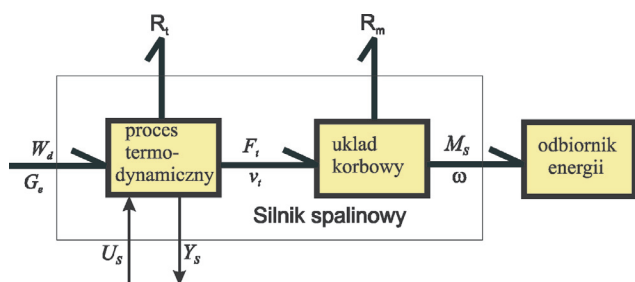


Rys. 2. Model GW pojazdu hybrydowego przedstawionego na rys. 1: **R** – elementy dyssypacyjne (straty energetyczne); **U** – elementy sterowania; **J** – akumulatory energii kinetycznej; **h** – akumulator energii potencjalnej

Celowo pominięto w tej pracy stosowaną w teorii GW analizę przyczynowości, która pozwala na wykrycie błędów uniemożliwiających ułożenie równań stanu. Bliższe informacje na ten temat znajdują się w pracy [7].

2. Model silnika spalinowego jako źródła energii

Jedną z zalet metody GW jest możliwość upraszczania i rozwijania modelu energetycznego w zależności od celu, któremu służyć ma ten model. Model silnika spalinowego może uwzględniać cykliczne procesy termodynamiczne i mechaniczne (przetwarzanie energii w mechanizmie korbowym). Uproszczony model GW silnika w takim podejściu pokazany jest na rysunku 3. Model tego rodzaju stosowany jest na przykład przy określaniu przebiegu prędkości kątowej wału silnika wywołanej zmiennym momentem obrotowym. Problem ten przedstawiony jest w pracy [8].



Rys. 3. Uproszczony model GW silnika z uwzględnieniem cykliczności funkcjonowania: **R_t** – straty w procesie termodynamicznym, **R_m** – straty mechaniczne, **U_s** – wektor sterowania silnikiem, **Y_s** – wektor parametrów wyjściowych silnika

modeling of complex energy systems is **the application of unified formal basis for modeling systems of different physical nature** [3, 4, 5, 6].

In Fig. 2 a simplified model of vehicle in the form of BG has been presented, whose functional scheme is placed in Fig. 1. Notations in this figure follow the convention of BG.

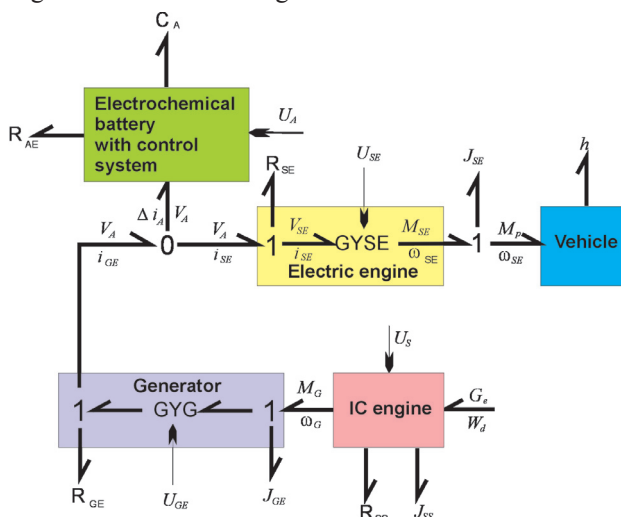


Fig. 2. BG model of hybrid vehicle, which has been presented on figure 1: **R** – dissipative elements (energy losses); **U** – control elements; **J** – kinetic energy elements; **h** – potential energy accumulator

The analysis of causality used in BG theory has been omitted intentionally in this work. The analysis of causality allows to detect errors, which make impossible to establish the state equations. Paper [7] deals with the details of this problem.

2. A model of IC engine as the source of energy

One of the advantages of the BG method is the possibility of simplifying and developing the energy model with respect to the purpose of the model itself. The model of IC engine can comprise cyclic thermodynamical and mechanical processes (transfer of energy in the crankshaft system). The simplified BG model of the engine, which follows this approach is shown in figure 3. This type of model is used, for example, in the determination of function of angular speed of the crankshaft caused by variable torque. This problem is presented in document [8].

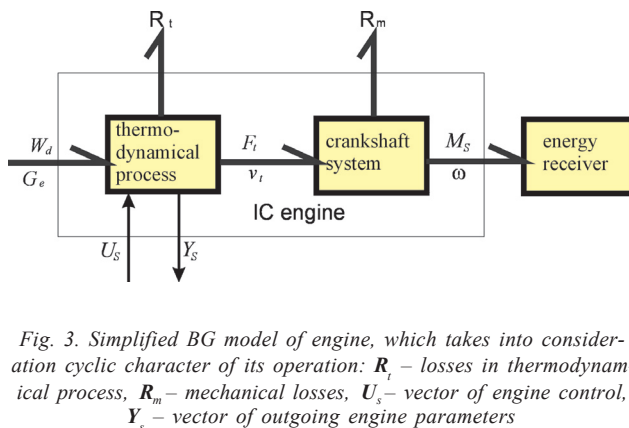
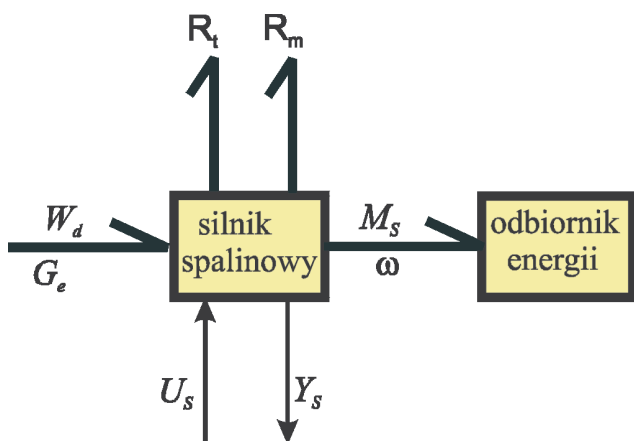


Fig. 3. Simplified BG model of engine, which takes into consideration cyclic character of its operation: **R_t** – losses in thermodynamical process, **R_m** – mechanical losses, **U_s** – vector of engine control, **Y_s** – vector of outgoing engine parameters

W dużej grupie systemów energetycznych z silnikami spalinowymi zmiany prędkości kątowej wywołane cykliczną pracą silnika nie mają praktycznego znaczenia (maszyny robocze, pojazdy). Dla takich systemów stosuje się uproszczony model silnika tworzony przy założeniu, że strumień energii na wejściu ($G_e W_d$) oraz strumień energii na wyjściu ($M_s \omega$) przedstawiają uśrednione w czasie cyklu ciągłe funkcje czasu. Model GW silnika przy takim podejściu przedstawiony jest na rysunku 4. Taki model silnika jest przedmiotem rozważań w niniejszej pracy.



Rys. 4. Model energetyczny silnika spalinowego w postaci GW, przy założeniu ciągłych uśrednionych procesów energetycznych

3. Podstawowe parametry silnika w konwencji GW

W konwencji GW każdy przepływ energii (przetwarzanie, akumulacja, rozpraszanie), niezależnie od jego fizycznej postaci, określony jest dwoma parametrami: uogólnionym potencjałem e i uogólnionym przepływem f [6]. Przy przytaczanych parametrach podano jednostki podkreślając tym samym istotność ich stosowania przy eksperymentach symulacyjnych z użyciem modeli matematycznych w postaci równań stanu [6].

Moc, czyli strumień energii określona jest zależnością:

$$N = ef \text{ [W]}. \quad (1)$$

Ilość przekazanej energii wyznacza związek:

(2)

W przypadku modelu silnika przedstawionego na rysunku 3 uogólnionymi potencjałami e są:

- wartość opałowa paliwa W_d [J/kg],
- siła działająca na tłok w procesie termodynamicznym F_t [N]
- moment obrotowy M_s [N·m].

Uogólnionymi przepływami f są:

- sekundowe zużycie paliwa G_e [kg/s],
- prędkość tłoka v_t [m/s],
- prędkość kątowa wału silnika ω [rad/s].

Głównymi składowymi wektora parametrów wyjściowych Y_s (rys. 4, 5) są:

- moc silnika $N_e = M_s \cdot \omega$,
- dawka paliwa na cykl m_c ,
- sekundowe zużycie paliwa G_e ,
- jednostkowe zużycie paliwa $g_e = G_e / (M_s \cdot \omega)$,
- sprawność ogólna silnika $\eta_o = M_s \cdot \omega / G_e \cdot W_d$.

For the numerous classes of energy systems with IC engine the angular speed variations caused by cyclic work of the engine have no practical meaning (heavy machines, vehicles). For such systems a simplified model of engine is used. This model is constructed, making the assumption that the input energy flux ($G_e W_d$) and the output energy flux ($M_s \omega$) are averaged continuous functions of time over the time of cycle. The BG model of the engine, which follows such approach is presented in Fig. 4. Such model of the engine is a research object in this paper.

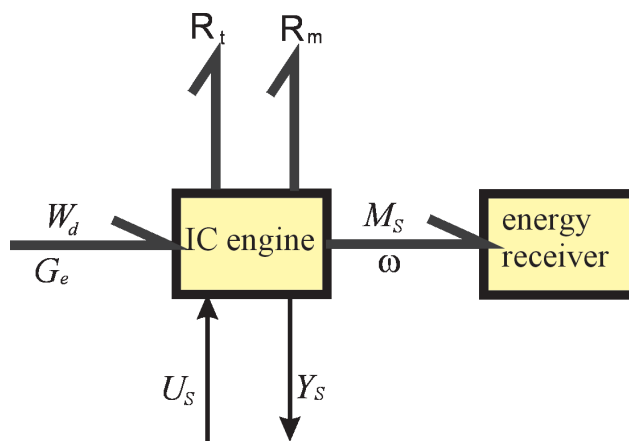


Fig. 4. Energetic model of an IC engine in the BG form according to the assumption of averaged energetic processes

3. Basic engine parameters in BG convention

In the BG convention every flow of energy (conversion, accumulation, dissipation), despite its physical form, is described by two parameters: generalized effort e and generalized flow f [6]. For given parameters adequate units have been pointed out to underline signification of their using in experimental simulations with using of mathematical models in the form of state equations [6].

Power or energy flow is defined by relation:

$$N = ef \text{ [W]}. \quad (1)$$

Quantity of transferred energy is described by relation:

(2)

For model of engine, which has been shown on Fig. 3, generalized efforts e are:

- caloric value of fuel W_d [J/kg],
- force exerted on piston in thermodynamic process F_t [N]
- torque M_s [N·m].

Generalized flows f are:

- fuel consumption G_e [kg/s],
- piston speed v_t [m/s],
- angular speed of crankshaft ω [rad/s].

Main elements of vector of output parameters Y_s (Fig. 4, 5) are:

- engine power $N_e = M_s \cdot \omega$,
- fuel rate over the cycle m_c ,
- fuel consumption G_e ,
- specific fuel consumption $g_e = G_e / (M_s \cdot \omega)$,
- general efficiency $\eta_o = M_s \cdot \omega / G_e \cdot W_d$.

- położenie organu sterowania silnikiem $U_s \in [0, 1]$,
- kąt wyprzedzenia zapłonu α_z ,
- jednostkowa emisja składników toksycznych.

Określone w taki sposób parametry silnika wykorzystywane są do tworzenia modelu matematycznego całego systemu energetycznego [6] w postaci równań stanu:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{X}} &= \mathbf{f}_1(\mathbf{X}, \mathbf{U}) \\ \mathbf{Y} &= \mathbf{f}_2(\mathbf{X}, \mathbf{U}),\end{aligned}\quad (3)$$

gdzie: \mathbf{X} – wektor zmiennych stanu, \mathbf{U} – wektor sterowań, \mathbf{Y} – wektor parametrów wyjściowych systemu energetycznego.

W systemach energetycznych, w których źródłem energii jest silnik spalinowy [9], należy określić związki wyrażone drugim równaniem w zależności (3). W tym celu wprowadzono pojęcie wielowymiarowej, statycznej charakterystyki silnika zdefiniowanej jako funkcja wektorowa:

$$\mathbf{Y}_s = \mathbf{f}_2(\mathbf{M}_s, \omega); (\mathbf{M}_s, \omega) \in \mathbf{L}_s. \quad (4)$$

gdzie: \mathbf{L}_s – zbiór możliwych do osiągnięcia punktów pracy silnika (\mathbf{M}_s, ω) .

4. Aproksymacja wielowymiarowych statycznych charakterystyk silnika

4.1. Opis metody

W modelu matematycznym wyrażonym równaniami (3) charakterystyki silnika powinny być w postaci funkcji analitycznych określonych ogólnie zależnością (4). Silnik spalinowy został potraktowany jak „czarna skrzynka” [10, 11, 12], w której wejściem jest wektor parametrów sterowania, a wyjściem jest wektor parametrów wyjściowych. Charakterystyki wielowymiarowej \mathbf{Y}_s (4) określane są na podstawie aproksymacji wielkości mierzonych w stanach ustalonych. Rozkład punktów pomiarowych w polu pracy silnika z punktu widzenia metody aproksymacji może być całkowicie dowolny, najbardziej właściwe wydaje się jednak równomierne rozmieszczenie punktów pomiarowych w polu pracy lub wykorzystanie charakterystyki gęstości czasowej badanego obiektu energetycznego [13]. W ogólnej prezentacji metody aproksymacji zmieniono oznaczenia z zależności (4) przyjmując, że: $\mathbf{Y}_{s_i} \equiv z$ dla $i = 1, 2, \dots, m$, $\omega \equiv x$, $\mathbf{M}_0 \equiv y$.

Bazową funkcją użytą do aproksymacji jest funkcja typu „Spline” [14] składająca się z wielomianów stopnia N sklejanych w węzłach $j = 1 \dots K$. Spotykające się w węzłach wielomiany są tego samego stopnia (N), mają takie same wartości oraz wartości pochodnych do wysokości $N-1$. Do aproksymacji zbioru punktów pomiarowych użyta została funkcja dwóch zmiennych (x, y) sklejana w kierunkach: x i y [10, 11, 12]:

(5)

$$\text{gdzie: } a_i(y) = \sum_{j=0}^{N_y} [b_{i,j} \cdot y^j] + \sum_{j=1}^{K_y} [b_{i,(j+N_y)} \cdot (y - Y_j)^{N_y} \cdot h_{y,j}] \quad \text{dla}$$

$i = 0, 1, \dots, (N_x + K_x)$, N_x – stopień wielomianów sklejanych w kierunku x , N_y – stopień wielomianów sklejanych w kierunku y , K_x – ilość węzłów w kierunku x , K_y – ilość węzłów w kierunku y , X_i – współrzędna i -tego węzła, w którym sklejana jest

- position of mechanism of engine control $U_s \in [0, 1]$,
- ignition advance angle α_z ,
- specific emission of toxic components.

The engine parameters defined in this way are used to create the mathematical model of the whole energy system [6] in the form of state equations:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{X}} &= \mathbf{f}_1(\mathbf{X}, \mathbf{U}) \\ \mathbf{Y} &= \mathbf{f}_2(\mathbf{X}, \mathbf{U}),\end{aligned}\quad (3)$$

where: \mathbf{X} – vector of state variables, \mathbf{U} – vector of control parameters, \mathbf{Y} – vector of output parameters of energy system.

In energy systems, where an IC engine is the source of energy [9], relations defined by second equation (3) should be determined. For this purpose the multidimensional static characteristic of engine has been defined as a vector function:

$$\mathbf{Y}_s = \mathbf{f}_2(\mathbf{M}_s, \omega); (\mathbf{M}_s, \omega) \in \mathbf{L}_s. \quad (4)$$

where: \mathbf{L}_s – set of achievable points of engine operation (\mathbf{M}_s, ω) .

4. Approximation of multidimensional static characteristics of engine

4.1. Description of the method

In the mathematical model defined by equations (3) the characteristics of engine should be described by general analytical relation (4). The “black box” engine model has been used [10, 11, 12], where the coordinates of the vector of the initial parameters \mathbf{Y}_s (4) have been calculated using the approximated values of data set obtained from the steady state engine testing. The distribution of points of the data set over the engine field of operation can be absolutely random (this has no influence on the reliability of the method), but it is more appropriate to evenly distribute the points over the engine field of operation. On the other hand, the points could be distributed based on the time density function of the tested object [13]. In the following presentation of the new method notation (4) has been changed to the more universal: $\mathbf{Y}_{s_i} \equiv z$ for $i = 1, 2, \dots, m$, $\omega \equiv x$, $\mathbf{M}_0 \equiv y$.

The base function used for approximation purposes is “Spline” function [14]. It consists of polynomials, which are linked in points called knots $j = 1 \dots K$. Polynomials have the same degree (N), they are equal and they have the same value of derivatives of up to $N-1$ in the knots. For approximation of the data set the function of two variables (x, y) linked in directions: x and y [10, 11, 12] has been used:

(5)

$$\text{where: } a_i(y) = \sum_{j=0}^{N_y} [b_{i,j} \cdot y^j] + \sum_{j=1}^{K_y} [b_{i,(j+N_y)} \cdot (y - Y_j)^{N_y} \cdot h_{y,j}] \quad \text{for}$$

$i = 0, 1, \dots, (N_x + K_x)$, N_x – order of polynomials linked in direction x , N_y – order of polynomials linked in direction y , K_x – number of knots in direction x , K_y – number of knots in direction y , X_i – knot, where the function has been linked (x direc-

funkcja w kierunku x , dla $i = 1, \dots, K_x$, Y_j – współrzędna j -tego węzła, w którym sklejana jest funkcja w kierunku y , dla $j = 1, \dots, K_y$,

$$h_{x_i} = \begin{cases} 0 & \text{jeżeli } x \leq X_i \\ 1 & \text{jeżeli } x > X_i \end{cases} \quad \text{dla } i = 1, \dots, K_x,$$

$$h_{y_j} = \begin{cases} 0 & \text{jeżeli } y \leq Y_j \\ 1 & \text{jeżeli } y > Y_j \end{cases} \quad \text{dla } j = 1, \dots, K_y,$$

$b_{i,j}$ – współczynnik macierzy \mathbf{b} o wymiarach: $(N_x + K_x + 1) \times (N_y + K_y + 1)$, dla $i = 0, 1, \dots, (N_x + K_x)$, $j = 0, 1, \dots, (N_y + K_y)$.

W celu najdokładniejszego odwzorowania zbioru punktów pomiarowych $Z_p = f(x_p, y_p)$ dla $p = 1, 2, \dots, p_{\max}$ funkcją (5) posłużono się metodą najmniejszych kwadratów [15] poszukując minimum funkcji:

$$\text{Min} = \sum_{p=1}^{p_{\max}} [Z_p(x, y) - z_p(x, y)]^2 \quad (6)$$

gdzie: $Z_p(x, y)$ – wielkość zmierzona w punkcie: $\{x_p, y_p\}$, dla $p = 1, 2, \dots, p_{\max}$, $z_p(x, y)$ – wielkość aproksymowana w punkcie: $\{x_p, y_p\}$, dla $p = 1, 2, \dots, p_{\max}$, p_{\max} – ilość punktów w aproksymowanym zbiorze.

Niektórzy autorzy aproksymują przebiegi wtórnych parametrów jak jednostkowe zużycie paliwa, jednostkowa emisja składników toksycznych [g/(kW·h)] lub moc [16, 17], które wynikają z dwóch zmierzonych parametrów. Powyższa metodyka stwarza możliwość popełnienia poważnego błędu, szczególnie gdy niezależnej aproksymacji poddaje się wielkości pierwotnie odczytane z pomiarów, np.: godzinowe zużycie paliwa i wielkości wtórne, np.: jednostkowe zużycie paliwa. Wówczas ścisła zależność między tymi wielkościami nie jest spełniona.

W kolejnym rozdziale zamieszczono przykłady implementacji komputerowej kilku przebiegów przy zastosowaniu funkcji (5) o różnej ilości węzłów i różnych stopniach wielomianów. Dobór stopni wielomianów oraz ilości węzłów w funkcjach użytych do aproksymacji podlegał optymalizacji przy następującym kryterium:

– średni względny błąd aproksymacji powinien być jak najmniejszy.

Dobór funkcji aproksymacyjnej odbywał się również przy następujących ograniczeniach:

- stopień zastosowanych wielomianów sklejanych oraz ilości węzłów musi być ograniczony do ilości zapewniającej możliwie wierne odwzorowanie charakteru rzeczywistego przebiegu (wyeliminowanie zjawiska generowania sztucznych ekstremów między punktami pomiarowymi);
- stopień zastosowanych wielomianów sklejanych oraz ilości węzłów nie mogą być tak duże by maksymalny błąd aproksymacji był mniejszy niż maksymalny błąd pomiarowy (nie następuje wówczas zjawisko wygładzania błędów pomiarowych). W praktyce drugie ograniczenie jest trudno przekroczyć nie naruszając wcześniej ograniczenia pierwszego.

Opracowane przykłady aproksymacji przebiegów parametrów pracy silnika nie pozwoliły na sformułowanie jednoznacznych wskazówek dotyczących doboru położenia wę-

tion), for $i = 1, \dots, K_x$, Y_j – knot, where the function has been linked (y direction), for $j = 1, \dots, K_y$,

$$h_{x_i} = \begin{cases} 0 & \text{if } x \leq X_i \\ 1 & \text{if } x > X_i \end{cases} \quad \text{for } i = 1, \dots, K_x,$$

$$h_{y_j} = \begin{cases} 0 & \text{if } x \leq X_i \\ 1 & \text{if } x > X_i \end{cases} \quad \text{for } j = 1, \dots, K_y,$$

$b_{i,j}$ – coefficient of the matrix \mathbf{b} of dimensions: $(N_x + K_x + 1) \times (N_y + K_y + 1)$, for $i = 0, 1, \dots, (N_x + K_x)$, $j = 0, 1, \dots, (N_y + K_y)$.

For the optimum transformation of the data set $Z_p = f(x_p, y_p)$ for $p = 1, 2, \dots, p_{\max}$ into function (5), the last square method was applied [15]. Consequently, the minimum of the functions (6) must be calculated:

$$\text{Min} = \sum_{p=1}^{p_{\max}} [Z_p(x, y) - z_p(x, y)]^2 \quad (6)$$

where: $Z_p(x, y)$ – measured quantity for point: $\{x_p, y_p\}$, for $p = 1, 2, \dots, p_{\max}$, $z_p(x, y)$ – computed quantity for point: $\{x_p, y_p\}$, for $p = 1, 2, \dots, p_{\max}$, p_{\max} – number of points in the approximated set.

Some authors approximate such parameters as: specific fuel consumption, specific toxic component emission [g/(kW·h)] or power [16, 17], which depend on two measured parameters. Above methodology gives possibility to make a more serious error, especially, when measured parameters, for example: fuel consumption, and recalculated parameters, for example: specific fuel consumption are approximated independently. Consequently, the accurate relation between them is not fulfilled.

Next chapter deals with examples of computer implementation of data using function (5) with different order of polynomials and different number of knots. The optimum polynomial order and number of knots were selected according to the following criterion:

– mean relative error of approximation should be as small as possible.

The selection of applied function was also performed taking into account the following restrictions:

- polynomial order and the number of knots must be reduced to the number which ensures accurate representation of approximated data (exclusion of artificial extremes generated between points of data);
- polynomial order and the number of knots must be reduced to the number which ensures that the maximum approximation error is greater than the maximum measurement error (otherwise, measurement errors are not smoothed).

In practice the second restriction is very hard to overcome if the first restriction has not been overcome previously.

The worked out examples of approximation of engine parameters did not give direct indications about the selection of knots placement. This problem is very complex and differs significantly from the approximation of two-dimensional functions using spline functions, where such indications have been worked out [18].

złów sklejania. Zagadnienie to w swej złożoności odbiega znacznie od problemu aproksymacji dwuwymiarowych przebiegów funkcjami sklejającymi, gdzie wskazówki takie zostały opracowane [18].

4.2. Przykład numeryczny

Opracowano charakterystykę wielowymiarową wg podanego algorytmu dla silnika ZS (IVECO) aby zweryfikować dokładność i skuteczność zaproponowanej metody. W tabeli 1 przedstawiony został opis funkcji (stopień wielomianu, ilość węzłów oraz ich położenie) użytej do aproksymacji przebiegów uzyskanych z badań stanowiskowych silnika oraz dokładność uzyskanych odwzorowań. Poniżej zamieszczono mapy tegoż silnika w tradycyjnej formie (rys. 5–8). Otrzy-

4.2. Numerical example

The multidimensional characteristic of a Diesel engine (IVECO) according to the presented method has been worked out in order to verify the accuracy and efficiency of the method. The description of the applied functions (order of polynomial, number of knots and their coordinates) for approximation of the data set obtained from testing the engine and the accuracy of approximation have been shown in Table 1. The traditional engine maps have been presented in Fig. 5 – 8. They were obtained by approximation of the measured values of: G_e [kg/h], CO [kg/h], HC [kg/h], NO_x [kg/h], and consequently recomputed.

– Characteristic of fuel consumption (Fig. 5).

Tabela 1. Cechy funkcji zastosowanych do aproksymacji przebiegów wybranych parametrów pracy silnika oraz dokładności uzyskanych odwzorowań

Table 1. Description of the applied functions for selected parameters of engine and the accuracy of approximation

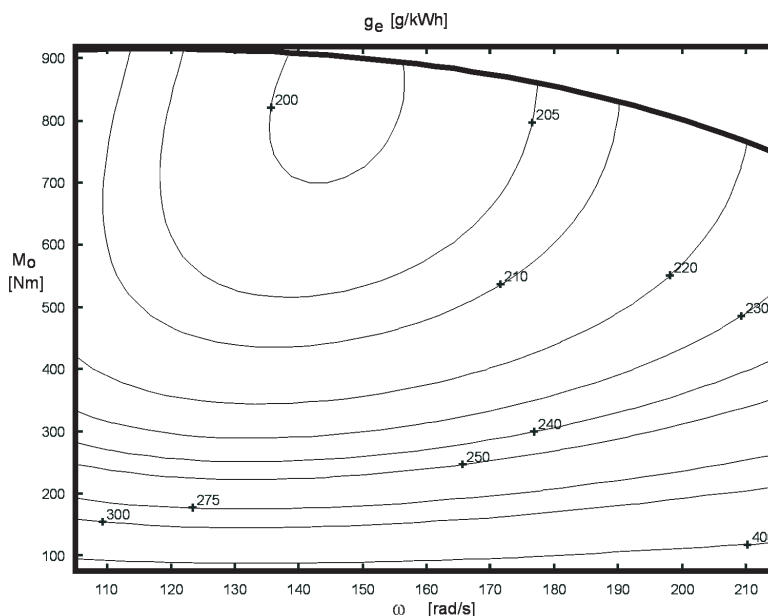
Przebieg	Stopień wielomianu		Ilość węzłów		Współrzędne węzłów			δ_r [%]	Reprezentacja graficzna i podstawowa zależność
	Kierunek:		Kierunek:		Lp.	Kierunek:			
	x / ω	y / M_o	x / ω	y / M_o		x / ω	y / M_o		
	N_x	N_y	K_x	K_y		$X_{Lp.}$	$Y_{Lp.}$		
Ge [kg/h]	2	2	-	-	-	-	-	0,36	$g_e = G_e / (\omega \cdot M_o)$ [g/kWh] rys. 5
CO [kg/h]	5	5	1	1	1	149	581	0,40	$e_{CO} = CO / (\omega \cdot M_o)$ [g/kWh] rys. 6
HC [kg/h]	5	5	-	-	-	-	-	1,67	$e_{HC} = HC / (\omega \cdot M_o)$ [g/kWh] rys. 7
NO _x [kg/h]	2	2	1	1	1	170	590	0,54	$e_{NOx} = NO_x / (\omega \cdot M_o)$ [g/kWh] rys. 8

mano je po przez aproksymację wielkości pomierzonych w czasie badań: G_e [kg/h], CO [kg/h], HC [kg/h], NO_x [kg/h], które następnie podane zostały odpowiednim przekształceniom.

- Charakterystyka zużycia paliwa (rys. 5).
- Charakterystyka emisji tlenku węgla (rys. 6).
- Charakterystyka emisji węglowodorów (rys. 7).
- Charakterystyka emisji tlenków azotu (rys. 8).

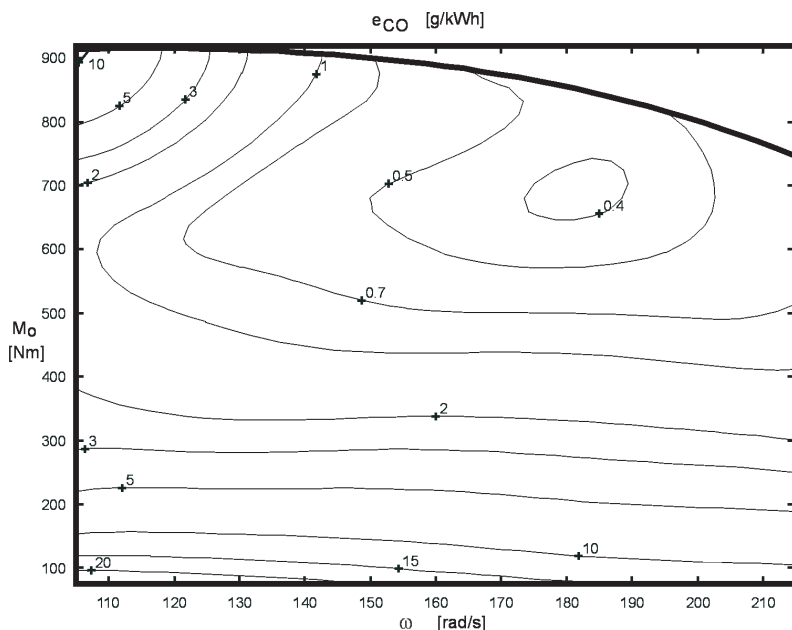
5. Uwagi końcowe

Główną zaletą stosowania metody grafów wiązań i równań stanu do modelowania systemów energetycznych o złożonej strukturze (siłownie okrętowe, pojazdy hybrydowe) jest możliwość modelowania elementów systemu o różnej naturze fizycznej przy zastosowaniu jednakowych podstaw teoretycznych. Dalszą istotną zaletą metody grafów wiązań jest możliwość upraszczania i rozwijania modelu energetycznego systemu w zależności od celu, któremu ma służyć wykonywany model. Na przykład przy analizie dynamiki agregatu prądotwórczego [8]



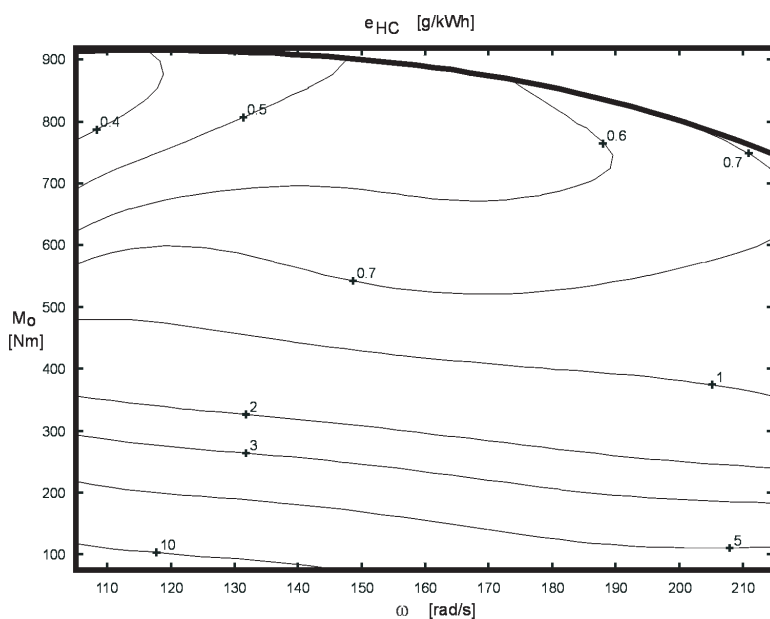
Rys. 5. Mapa jednostkowego zużycia paliwa silnika ZS IVECO (Dane zostały udostępnione dzięki uprzejmości Centrum Badawczego Fiata)

Fig. 5. Map of specific fuel consumption of IVECO Diesel engine (All data courtesy of Fiat Research Center)



Rys. 6. Mapa jednostkowej emisji tlenku węgla silnika ZS IVECO (Dane zostały udostępnione dzięki uprzejmości Centrum Badawczego Fiata)

Fig. 6. Map of specific carbon dioxide emission of IVECO Diesel engine (All data courtesy of Fiat Research Center)



Rys. 7. Mapa jednostkowej emisji węglowodorów silnika ZS IVECO (Dane zostały udostępnione dzięki uprzejmości Centrum Badawczego Fiata)

Fig. 7. Map of specific hydrocarbons emission of IVECO Diesel engine (All data courtesy of Fiat Research Center)

stosowany jest model przedstawiony na rys. 3, natomiast dynamikę wzdłużną pojazdu analizować się będzie stosując uproszczony model przedstawiony na rys. 4.

Zaproponowana w pracy metoda potraktowania procesów fizycznych zachodzących w silniku jako ciągłych uśrednionych w zakresie cyklu funkcji czasu umożliwia stosunkowo prosty opis składowych wektora parametrów wyjściowych. Charakterystykę wielowymiarową silnika (4) można

- Characteristic of carbon dioxide emission (Fig. 6).
- Characteristic of hydrocarbons emission (Fig. 7).
- Characteristic of nitrogen oxides emission (Fig. 8).

5. Final conclusions

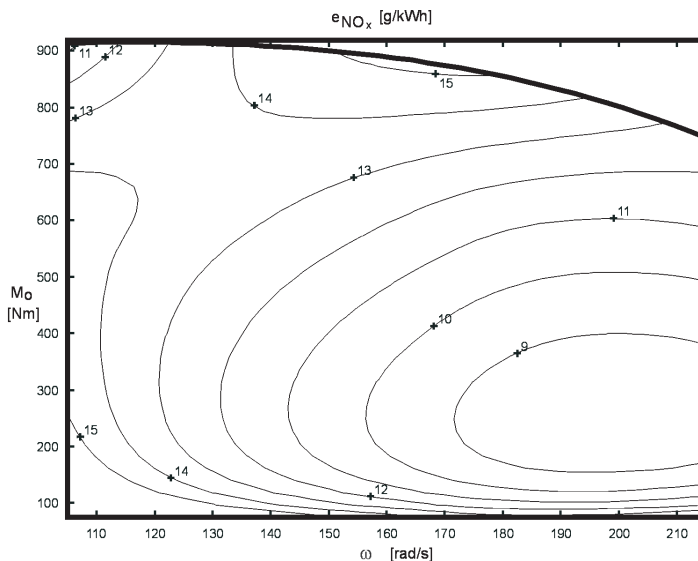
The main advantage of the use of bond graph and state equations methods for modeling of complex energy systems (ship power plants, hybrid vehicles) is the possibility of application of the unified theoretical basis. Next significant advantage of the bond graph method is the possibility of simplification and developing of model of an energy system with regard to purpose for which the produced model is dedicated. For example, during the analysis, the dynamic of a generator set [8] model presented in Fig. 3 is used. On the contrary, longitudinal dynamic of the vehicle will be analyzed using simplified model, which is presented in Fig. 4. The method proposed in this work, related to treating physical processes, which take place in the engine, as averaged continuous functions over the cycle makes possible to describe elements of a vector of the output parameters in a simple way. The multidimensional characteristic of an engine (4) can be then evaluated by approximation of values measured in steady states. Such simplifications are possible with respect to the present knowledge and give, at the same time, advantages in the modeling of bigger structures, such as cars or hybrid vehicles, through a shorter time of calculation and simpler identification of model parameters. Proposed function (5) for the approximation of multidimensional static characteristic of an engine enables, as the enclosed numerical example shows, the presentation of very complex functions, for example: carbon monoxide emission or nitrogen oxide emission, assuring high quality of approximation.

It is expected that the above solutions will be used for the optimization of propulsion system control of the hybrid vehicle, built in Combustion Engines and Compressors Department of Gdańsk University of Technology.

wówczas wykonać dokonując aproksymacji wielkości pomierzonych w stanach ustalonych. Takie uproszczenia są możliwe przy obecnym stanie wiedzy oraz dają jednocześnie wyraźne zalety w modelowaniu większych struktur, takich jak pojazd samochodowy czy pojazd hybrydowy, w postaci krótszego czasu obliczeń i prostej identyfikacji parametrów modelu. Zaproponowana funkcja (5) do aproksymacji wielowymiarowych statycznych charakterystyk silnika pozwala, jak pokazuje zamieszczony przykład numeryczny, na odwzorowanie bardzo złożonych funkcji, np. emisji tlenku węgla czy emisji tlenku azotu z zachowaniem wysokiej dokładności ich odwzorowania.

Przewiduje się wykorzystanie powyższych rozwiązań do optymalizacji sterowania układem napędowym pojazdu hybrydowego zbudowanego w Katedrze Silników Spalinowych i Sprężarek Politechniki Gdańskiej.

Artykuł recenzowany



Rys. 8. Mapa jednostkowej emisji tlenków azotu silnika ZS IVECO (Dane zostały udostępnione dzięki uprzejmości Centrum Badawczego Fiata)

Fig. 8. Map of specific nitrogen oxides emission of IVECO Diesel engine

Literatura/Bibliography

1. Makowski S., Cichy M., Karkosiński D.: Metody konstrukcji napędów hybrydowych za szczególnym uwzględnieniem wpływu na środowisko. Sprawozdanie z projektu badawczego KBN 9T12D04110, Gdańsk 1999.
2. Makowski S., Cichy M., Kneba Z.: Sterowanie pracą silnika ZI w hybrydowym i konwencjonalnym układzie napędowym pojazdu celem ograniczenia emisji toksycznych składników spalin i zużycia paliwa w warunkach testu jezdny. Sprawozdanie z projektu badawczego KBN 8T12D00820, Gdańsk 2004.
3. Cichy M., Makowski S.: Energy flows modelling of series hybrid electric vehicle. MOTAUTO'02, Volume II, Russe 2002, ss. 21-26.
4. Karnopp D.C., Rosenberg R.C.: System Dynamic: A Unified Approach. Wiley, New York 1975.
5. Thoma J. U.: Simulation by Bondgraphs. Belin, Springer 1990.
6. Cichy M.: Modelowanie systemów energetycznych. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2001.
7. Cichy M., Konczakowski M.: Bond graph model of the IC engine as an element of energetic systems. Mechanism and machine theory. Elsevier Science Ltd. 2001.
8. Cichy M., Carlini M., Abenavoli I. R.: Analysis of the non uniformity angular velocity in internal combustion engines coupled with loads. Proc. of the 24th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. August 6-11, 1989.
9. Cichy M., Makowski S.: Modelowanie systemów energetycznych z silnikami spalinowymi za pomocą grafów wiązań i równań stanu. Archiwum Motoryzacji 1-2, ss. 3-19, 1999.
10. Cichy M., Makowski S., Kropiwnicki J.: Aproksymacja wielowymiarowych charakterystyk silnikowych. Mat.: Sympozjum Ekodiesel'98, Warszawa 1998, ss. 154-160.
11. Kropiwnicki J.: The application of spline function for approximation of engine characteristics. Archiwum Motoryzacji nr 4, 2000.
12. Kropiwnicki J.: Model układu silnik-pojazd z wykorzystaniem charakterystyk statycznych silnika. Praca doktorska. Promotor: Cichy M. Gdańsk 2001.
13. Cichy M.: Nowe teoretyczne ujęcie charakterystyki gęstości czasowej. Silniki spalinowe nr 2-3, 1986.
14. De Boor C.: A Practical Guide to Splines. Springer-Verlag, New York 1978.
15. Fortuna Z., Macukow B., Wąsowski J.: Metody numeryczne. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1982.
16. Bernhardt M., Dobrzyński S., Loth E.: Silniki samochodowe. WKiŁ, Warszawa 1988.
17. Białek P.: Badanie wpływu warunków pracy agregatu rolniczego na jego ogólny bilans energetyczny. Rozprawa doktorska. Politechnika Poznańska 1996.
18. Cichy M., Cichy R.: Aproksymacja charakterystyk silników spalinowych. Teka Komisji Naukowo-Problemovej Motoryzacji, Zeszyt 2, Kraków 1990.

* Prof. dr hab. inż. Marian Cichy – profesor na Wydziale Mechanicznym Politechniki Gdańskiej.
Marian Cichy D.Sc., Ph.D., M.E. – Professor in the Mechanical Faculty at Gdańsk University of Technology.



** Dr inż. Jacek Kropiwnicki – adiunkt na Wydziale Mechanicznym Politechniki Gdańskiej.
Mr Jacek Kropiwnicki Ph.D., M.E. – University Lecturer in the Mechanical Faculty at Gdańsk University of Technology.



*** Dr inż. Sławomir Makowski – adiunkt na Wydziale Mechanicznym Politechniki Gdańskiej.
Mr Sławomir Makowski Ph.D., M.E. – University Lecturer in the Mechanical Faculty at Gdańsk University of Technology.

