

The model of compression ignition engine with artificial neural networks

The paper presents an application of artificial neural network in modelling the working process in compression ignition engine. In order to determine the usefulness of proposed method the optimisation task has been formulated. The aim of optimisation process was to find the engine control parameters which enable reduction of the NOx emission. In order to solve the problem, the model equations has to be integrated for values of control parameters whose are given as output from the neural networks implemented.

Key words: compression ignition engine, artificial neural network, modelling, emission, nitrogen oxides

Sztuczne sieci neuronowe w identyfikacji modelu silnika ZS

W artykule przedstawiono zastosowanie sztucznych sieci neuronowych w modelu obliczeniowym cyklu roboczego silnika ZS. W celu oceny przydatności zaproponowanej metody rozwiązano zadanie doboru wartości parametrów regulacyjnych, tak aby uzyskać zmniejszenie zawartości tlenków azotu w spalinach. Zadanie to sformułowano jako problem optymalizacji. Rozwiązanie wymaga całkowania równań modelu, dla wartości parametrów uzyskiwanych jako odpowiedź sieci neuronowych na zmienne parametry regulacyjne, w tym z uwzględnieniem zmian emisji związków szkodliwych i zadymienia.

Słowa kluczowe: silnik o zapłonie samoczynnym, sztuczna sieć neuronowa, modelowanie, emisja, tlenki azotu

1. Introduction

Many different mathematical models can be used in research of engine technology. Besides the CFD models, simpler tools like semi-empirical models are widely used. Semi-empirical model has many simplifying assumptions and parameters mostly based on relations obtained from experimental measurements. The parameters of this kind of model can be obtained by application of the optimisation methods as presented in papers [1, 6]. The semi-empirical models of the working cycle are based on measurement data obtained for different conditions of engine work. Thus approximation of discrete data is necessary in order to obtain the semi-empirical model which ensure good correlation between results of modelling and measurements. The accuracy of the model predictions for engine conditions (in which measurements data are not available) is determined by the approximation method used.

2. The computational model of the working cycle of a CI engine

The basic assumptions made for semi-empirical model of the working cycle of engine presented in the paper allow numerical calculations of pressure, temperature and mass courses in the cylinder [5, 6]. Vector of independent input parameters of the model of the working cycle (later called the engine control parameters) has the form:

$$X = [n, B_o, \varphi_w, p_d, T_d, X_{EGR}]^T \quad (1)$$

where: n – crankshaft rotational speed, B_o – injected fuel mass, φ_w – injection advance angle, p_d – intake manifold pressure, T_d – temperature in the intake manifold, X_{EGR} – degree of exhaust gas recirculation.

1. Wprowadzenie

W pracach rozwojowych dotyczących silników spalinowych wykorzystuje się modele matematyczne o różnej strukturze. Oprócz modeli klasy CFD stosuje się także modele teoretyczno-empiryczne, wymagające określenia wielu parametrów empirycznych. Dobór tych parametrów może odbywać się w sposób opisany w pracach [1, 6], gdzie identyfikacji modelu dokonano przez odpowiednio sformułowane zadanie optymalizacji. Modele teoretyczno-empiryczne, formułowane są na podstawie posiadanej informacji badawczej, dotyczącej jednakże pewnych dyskretnych stanów pracy silnika. Wymagana jest zatem aproksymacja danych dyskretnych, tak aby zapewnić dobre odwzorowanie modelu dla całego zakresu pracy silnika. Sposób aproksymacji danych, zarejestrowanych w wyniku eksperymentu badawczego, bezpośrednio wpływa na poprawność wnioskowania o zachowaniu się badanych wielkości w stanach silnika, dla których nie wykonywano badań.

2. Model procesu roboczego silnika o zapłonie samoczynnym

Formułując model teoretyczno-empiryczny założono, że w wyniku jego stosowania możliwe będzie obliczanie przebiegu ciśnienia i temperatury oraz masy czynnika w cylindrze [5, 6]. Wektor podstawowych parametrów stanowiących niezależne zmienne wejściowe modelu cyklu roboczego (zwane dalej parametrami regulacyjnymi silnika) ma postać (1),

gdzie: n – prędkość obrotowa, B_o – dawka paliwa, φ_w – kąt wyprzedzenia wtrysku, p_d – ciśnienie czynnika w kolektorze dolotowym, T_d – temperatura czynnika w kolektorze dolotowym, X_{EGR} – stopień recyrkulacji spalin.

Equations of the theoretical model of phenomena occurring in the engine cylinder have the following form [1, 6]:

$$\frac{dm_c}{dt} = \frac{dm_d}{dt} + \frac{dm_w}{dt} + B_0 \cdot \frac{dx}{dt}, \quad (2a)$$

$$\begin{aligned} c_v \cdot T_c \cdot \frac{dm_c}{dt} + c_v \cdot m_c \cdot \frac{dT_c}{dt} + p_c \cdot \frac{dV}{dt} = \\ y \cdot B_0 \cdot W \cdot \frac{dx}{dt} + h \cdot A \cdot (T_s - T_c) + \\ + c_p \cdot T_d \cdot \frac{dm_d}{dt} + c_p \cdot T_c \cdot \frac{dm_w}{dt} \end{aligned} \quad (2b)$$

where: A – heat transfer area, c_p , c_v – specific heat of the medium at constant pressure and at constant volume respectively, h – heat transfer coefficient, m_c , m_d , m_w – mass of the medium in the cylinder and mass of the medium flowing through inlet valves and exhaust valves respectively, p_c – cylinder pressure, T_c – cylinder temperature, T_s – wall temperature, t – time, V – cylinder volume, W – fuel caloric value, x – fuel mass burning rate, y – degree of fuel dose used.

The additional relations defining quantities appearing in equations (2) are introduced by the following vector of model parameters [6]:

$$Z = [\mu_d, \mu_w, \Delta\varphi_s, \varphi_z, m_v]^T \quad (3)$$

where: μ_d – valve flow coefficient through inlet valve, μ_w – valve flow coefficient through exhaust valve, $\Delta\varphi_s$ – total combustion duration, φ_z – start of combustion, m_v – exponent of the combustion dynamic of the Vibe function.

Additionally the following relationships exist:

$$\alpha = f_a(t, X, Z) \quad \text{for} \quad \alpha \in \{p_c, m_c, T_c\} \quad (4)$$

In order to choose appropriate vector of model parameters Z an optimisation method is used. The numerical method used in order to define vector Z for different combination of control parameters is presented in papers [1, 4, 6]. As the results of applied method, for given from measurements vectors $X^{(j)}$ (where $j = 1, \dots, 230$) the model parameters $Z^{(j)}$ are estimated. In the next step, has to be found the relations:

$$z_i = f_i^{(z)}(X) \quad (5)$$

where z_i is i -th component of the vector Z . These functions will enable us to use the proposed model of the working cycle of a CI engine for any operating conditions i.e. for any possible vectors of engine control parameters.

In order to generalize above relation approximation by artificial neural networks was used, with radial type of neuron activation function, in form [4]:

$$f_i^{(z)} = \sum_{l=1}^s w_l \eta_l(X) \quad (6)$$

where: w_l – weight of l -th neuron on hidden layer, s – number of neurons on hidden layer, η_l – base functions.

As was shown in paper [4] an acceptable accuracy of the semi-empirical model can be achieved using proposed approximation by artificial neural networks.

Równania wykorzystywanego w pracy teoretycznego modelu zjawisk zachodzących w cylindrze silnika mają postać [1, 6] (2a) oraz (2b),

gdzie: A – powierzchnia wymiany ciepła, c_p , c_v – ciepło właściwe czynnika odpowiednio przy stałym ciśnieniu i objętości, h – współczynnik wymiany ciepła, m_c , m_d , m_w – masa czynnika w cylindrze odpowiednio doprowadzona, wyprowadzona, p_c – ciśnienie czynnika w cylindrze, T_c – temperatura czynnika w cylindrze, T_s – średnia temperatura ścianek cylindra, t – czas, V – objętość cylindra, W – wartość opałowa paliwa, x – stopień spalania dawki paliwa, y – współczynnik wykorzystania dawki paliwa.

Przyjmując następnie dodatkowe zależności określające wielkości wchodzące w skład równań (2), wprowadza się wektor parametrów modelu [6] określony wzorem (3), gdzie: μ_d – współczynnik przepływu przez zawór dolotowy, μ_w – współczynnik przepływu przez zawór wylotowy, $\Delta\varphi_s$ – kąt spalania, φ_z – kąt początku spalania, m_v – wykładnik formuły Vibego.

Ponieważ zachodzą relacje (4), to identyfikację wartości składowych wektora Z sformułowano jako odpowiednie zadanie optymalizacji. W pracach [1, 4, 6] przedstawiono opis zaproponowanej metody identyfikacji, wyznaczając numerycznie wartości parametrów modelu cyklu roboczego silnika dla różnych wartości parametrów regulacyjnych. W wyniku tego postępowania dla poszczególnych wektorów $X^{(j)}$, gdzie $j = 1, \dots, 230$ określono wartości parametrów modelu cyklu roboczego, a więc wektory $Z^{(j)}$. W następnym etapie poszukiwano ogólnej zależności postaci (5), gdzie z_i jest i -tą składową wektora Z , tak aby proponowany model cyklu roboczego silnika można było zastosować dla dowolnego wektora parametrów regulacyjnych. Do uogólnienia (aproksymacji) zastosowano sztuczne sieci neuronowe z radialną funkcją aktywacji neuronu [4] (6), gdzie: w_l – waga neuronu l z warstwy ukrytej, s – liczba neuronów na warstwie ukrytej, η_l – funkcje aktywacji.

Wykorzystując zaproponowane sieci neuronowe do predykcji parametrów modelu, stwierdzono akceptowalną dokładność modelu teoretyczno-empirycznego [4].

Do modelu włączono również informacje o emisji tlenku węgla (CO), węglowodorów (HC), tlenków azotu (NO_x) oraz o zadyminieniu spalin (D). Ponownie wykorzystano sieci neuronowe do aproksymacji emisji składników toksycznych i zadyminienia spalin w zależności od parametrów regulacyjnych silnika, znajdując [2,3] (7),

gdzie e_i jest i -tą składową wektora $E = [e_{CO}, e_{HC}, e_{NO_x}, e_D]^T$. Szczegółowo postępowanie opisano w pracach [2, 3, 4]. Ogólny schemat zaproponowanego modelu ilustruje rys. 1.

3. Dobór parametrów regulacyjnych

Przedstawiony model można wykorzystać do sformułowania zadania optymalizacji, którego celem byłoby ograniczenie bądź minimalizacja emisji związków toksycznych i zadyminienia, przy zapewnieniu odpowiednich (założonych) parametrów eksploatacyjnych silnika. Analogicznie jak w pracy [6] poszukiwano takich wartości składowych wektora X spełniających zależności (8),

Later, the model was extended by adding data concerning total emission of carbon monoxide (CO), hydrocarbons (HC), nitrogen oxides (NO_x) and smoke (D) which, were also measured for given values of control parameters. Approximation of emission of toxic components and soot was also performed in dependence on vector of engine control parameters by using additional artificial neural networks [2, 3]:

$$e_i = f_i^{(e)}(X) \tag{7}$$

where e_i is i -th component of vector $E = [e_{CO}, e_{HC}, e_{NO_x}, e_D]^T$. More details on this procedure can be found in papers [2, 3, 4]. Schematic layout of the model is presented in Fig. 1.

3. Design of the engine control parameters

The model can be used in optimisation task for reduction or minimisation of the emission of toxic exhaust gases and soot. Additionally in the optimisation task the engine traction parameters should be ensured. This task can be formulated as in paper [6] by appropriate choice of components of vector X which fulfil the following conditions:

$$x_{i \min} \leq x_i \leq x_{i \max} \quad \text{for } i=1, \dots, 6 \tag{8}$$

where $x_{i \min}, x_{i \max}$ are minimal and maximal possible values of parameter x_i respectively, in order to find the minimum of the expression:

$$\bar{\Omega}(X) = \sum_{i=1}^4 C_i^e \cdot e_i + \sum_{i=1}^4 C_i^l \cdot l_i \tag{9}$$

where: C_i^e, C_i^l – coefficients, l_i – component of vector $L = [p_i, \eta_c, p_{\max}, T_{\max}]^T$, p_i – indicated mean pressure in the cylinder, η_c – thermal efficiency, p_{\max} – maximal cylinder pressure, T_{\max} – maximal cylinder temperature, with boundary conditions in the form:

$$e_{i \min} \leq e_i \leq e_{i \max} \quad \text{and} \quad l_{i \min} \leq l_i \leq l_{i \max} \quad \text{for } i = 1, \dots, 4 \tag{10}$$

where $e_{i \min}, e_{i \max}, l_{i \min}, l_{i \max}$ – acceptable, minimal and maximal values of e_i and l_i respectively.

The appropriate vector of initial values of engine control parameters X^{beg} , have to be known in order to solve the optimisation task presented. For initial values of $x_1^{\text{beg}}, \dots, x_6^{\text{beg}}$ given by the user, integrating model equations one can obtain the initial values of:

$$e_i = f_i^{(e)}(X^{\text{beg}}) \quad \text{for } i = 1, \dots, 4 \tag{11a}$$

$$l_i^{\text{beg}} = l_i[X^{\text{beg}}] \quad \text{for } i = 1, \dots, 4 \tag{11b}$$

It should be noticed, that calculation of the objective function and the boundary conditions L at each step of the optimisation procedure requires integration of model equations. Optimisation task can be solved by application of the Nelder-Mead method as was shown in the paper [6].

4. Numerical simulation

The model of the working cycle of a CI engine, with artificial neural networks for identification of model parameters, was used in optimisation task. In order to estimate emission and soot additional artificial neural networks are applied to

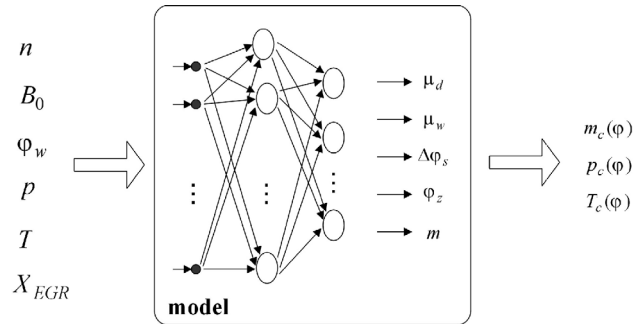


Fig. 1. Schematic layout of the model of the working cycle with the artificial neural networks used to identify model parameters
Rys. 1. Schemat modelu procesu roboczego w cylindrze przy wykorzystaniu sztucznych sieci neuronowych do identyfikacji jego parametrów

gdzie $x_{i \min}, x_{i \max}$ są odpowiednio minimalną i maksymalną dopuszczalną wartością x_i , tak aby zminimalizować wartość wyrażenia (9),

gdzie: C_i^e, C_i^l – współczynniki, l_i – składowa wektora $L = [p_i, \eta_c, p_{\max}, T_{\max}]^T$, p_i – średnie ciśnienie indykowane, η_c – sprawność cieplna cyklu roboczego, p_{\max} – maksymalne ciśnienie cyklu, T_{\max} – maksymalna temperatura cyklu, przy spełnieniu warunków ograniczających (10), gdzie $e_{i \min}, e_{i \max}, l_{i \min}, l_{i \max}$ – dopuszczalne, odpowiednio minimalne i maksymalne wartości e_i i l_i .

Rozwiązanie przedstawionego zadania optymalizacji wymaga podania właściwego przybliżenia początkowego, oznaczonego dalej X^{beg} . Znając podane przez użytkownika początkowe wartości $x_1^{\text{beg}}, \dots, x_6^{\text{beg}}$, można przez całkowanie równań modelu obliczyć (11a) oraz (11b).

Obliczenie wartości funkcji celu i ograniczeń L wymaga całkowania równań modelu matematycznego. Do optymalizacji można zastosować metodę pełzającego simpleksu, jak w pracy [6].

4. Obliczenia symulacyjne

Przedstawiony w artykule model cyklu roboczego silnika, po identyfikacji parametrów modelu z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych oraz dołączeniu sieci neuronowych aproksymujących emisję i zadymienie, wykorzystano w zadaniu minimalizacji. Minimalizowano emisję NO_x jako najtrudniejszą do ograniczenia w silnikach o zapłonie samoczynnym, przy nałożeniu ograniczeń na dopuszczalną emisję pozostałych składników toksycznych, zadymienie spalin, średnie ciśnienie indykowane, sprawność cieplną cyklu roboczego, maksymalne ciśnienie i temperaturę cyklu roboczego. W wektorze X składową x_1 , a więc prędkość obrotową, przyjęto jako stałą. W funkcji celu (9) przyjmowano odpowiednio (12),

gdzie $C_3^{e, \text{beg}}$ jest wartością stężenia NO_x dla X^{beg} . Nałożenie ograniczeń wspomnianych wcześniej wymagało przyjęcia związków postaci (13a) i (13b),

gdzie: k_1^l – ograniczenie dla średniego ciśnienia indykowanego p_i : $k_1^l = 1,0$, k_2^l – ograniczenie dla sprawności cieplnej η_c : $k_2^l = 0,9$, k_3^l – ograniczenie dla maksymalnego ciśnienia cyklu roboczego p_{\max} : $k_3^l = 1,1$, k_4^l – ograniczenie dla maksymalnej temperatury cyklu roboczego T_{\max} : $k_4^l = 1,1$.

the model of working cycle as well. The aim of the optimisation task performed was to find the engine control parameters that enable us to minimise emission of NO_x . Nitrogen oxides was chosen because in modern compression ignition engine it is a real control problem. Moreover, additional boundary conditions were formulated and taken into optimisation task, such as: emission of other exhaust component and soot were limited, computed values of mean indicated pressure, thermal efficiency, maximal pressure and temperature in the cylinder had to ensure proper engine operating parameters. Crankshaft rotational speed which is the component x_1 of the vector X was set constant. In the object function (9) values of coefficients were as follows:

$$C_1^e = C_2^e = C_4^e = 0, \quad C_3^e = (C_3^{e,\text{beg}})^{-1}, \quad C_1^L = 0 \quad (12)$$

where $C_3^{e,\text{beg}}$ means emission of NO_x for X^{beg} . Additional boundary conditions in forms:

$$e_i \leq 1.5 \cdot e_i^{\text{beg}} \quad \text{for } i = 1, 2, 4 \quad (13a)$$

$$l_i \geq k_i^L \cdot l_i [X^{\text{beg}}] \quad \text{for } i = 1, 2, 3, 4 \quad (13b)$$

where k_i^L – are relative threshold value for: k_1^L – indicated mean pressure p_i : $k_1^L = 1.0$, k_2^L – thermal efficiency η_c : $k_2^L = 0.9$, k_3^L – maximal pressure p_{max} : $k_3^L = 1.1$, k_4^L – maximal temperature T_{max} : $k_4^L = 1.1$, were taken into account as well.

Conditions (13a) allow increasing of emission CO, HC and soot up to 50% in relation to values for X^{beg} , while conditions (13b) in relation to values for X^{beg} ensure equal mean indicated pressure and allow decreasing of thermal efficiency, maximal pressure p_{max} and maximal temperature T_{max} down to 10%.

Numerical simulation were performed for two different crankshaft rotational speeds and three values of engine torque. As a result of simulation new vector of engine control parameters X^{opt} was obtained. Table 1 presents initial and calculated (optimal) values of engine control parameters.

Comparison of calculated (for optimal engine control parameters) emissions and soot versus their initial values is presented in Table 2.

After analysis of the data presented in Tables 1 and 2 one can found that optimal set of control parameters can be achieved for considered in the pa-

Warunki (13a) oznaczają, że dopuszczono wzrost o 50% emisji CO, HC oraz zadymienia spalin w odniesieniu do wielkości wynikających z X^{beg} , natomiast warunki (13b) w odniesieniu do wartości dla X^{beg} oznaczają odpowiednio utrzymanie średniego ciśnienia indykowanego, dopuszczalny spadek sprawności cieplnej o 10% oraz dopuszczalny wzrost p_{max} i T_{max} o 10%.

Obliczenia symulacyjne przeprowadzono dla dwóch wartości prędkości obrotowej i trzech wartości momentu obrotowego i otrzymano nowe wartości parametrów regulacyjnych – X^{opt} . W tabeli 1 zestawiono początkowe i obliczone (optymalne) wartości parametrów regulacyjnych.

Porównanie obliczonych (optymalnych wg modelu) i wejściowych wartości emisji i zadymienia spalin zestawiono w tab. 2.

Analiza danych zawartych w tabelach 1 i 2 wskazuje, że rozwiązanie zadania optymalizacji w analizowanym polu pracy silnika wymaga odpowiedniego doboru dawki paliwa, kąta wyprzedzenia wtrysku, stopnia recyrkulacji spalin oraz ciśnienia i temperatury ładunku w układzie dolotowym. W wyniku rozwiązania zadania optymalizacji uzyskano znaczne obniżenie emisji tlenków azotu w analizowanym polu pracy silnika przy utrzymaniu założonej wartości średniego ciśnienia indykowanego. Równocześnie nastąpił dopuszczony wzrost emisji tlenku węgla i węglowodorów przy jednoczesnym przekraczaniu dozwolonego poziomu zadymienia spalin.

5. Podsumowanie

Obliczone i przedstawione w rozdz. 4 „optymalne” wartości parametrów regulacyjnych są wartościami przybliżonymi i po zastosowaniu podanych nastaw w obiekcie

Table 1. Initial and calculated (optimal) values of control engine parameters

Tabela 1. Początkowe i obliczone (optymalne) wartości parametrów regulacyjnych

Torque/ obciążenie	Engine control parameters/para- metry regulacyjne	Crankshaft rotational speed/prędkość obrotowa			
		2610		3340	
		X^{beg}	X^{opt}	X^{beg}	X^{opt}
0.25 M_{max}	B_o [kg]	9.68E-06	10.46 E-06	10.22E-06	10.82E-06
	φ_w [°OWK]	-10.5	-2.2	-13	-5.7
	X_{EGR} [%]	0	2.2	0	2.5
	p_d [hPa]	1360	1416	1420	1544
	T_d [°C]	55	60	54	60
0.5 M_{max}	B_o [kg]	15.88E-06	16.19E-06	14.95E-06	15.57E-06
	φ_w [°OWK]	-12	-2	-13,5	-7,6
	X_{EGR} [%]	0	6	0	8,7
	p_d [hPa]	1460	1400	1470	1400
	T_d [°C]	55	60	54	58
0.75 M_{max}	B_o [kg]	21.73E-06	22.7E-06	20.87E-06	20.1E-06
	φ_w [°OWK]	-14	-6	-13	-8.9
	X_{EGR} [%]	0	0	0	0
	p_d [hPa]	1520	1515	1520	1600
	T_d [°C]	57	50	55	50

per range of engine operating conditions by appropriate choice of: injected fuel mass, injection advance angle, degree of exhaust gas recirculation, intake manifold pressure and temperature in the intake manifold. Significant reduction of nitrogen oxides emission was achieved in engine operating conditions considered with desired value of mean indicated pressure. Emission of carbon monoxide and hydrocarbons was increased in acceptable range but the soot limit was passed simultaneously.

5. Conclusions

It is important to underline that the calculated (optimal) values of engine control parameters showed in previous paragraph should be treated as approximated values only i.e. after using those values in control emission of real engine results can deviate from optimum.

Deviation can be caused by errors, such as: prediction errors of artificial neural networks, measurement errors or caused by assumptions formulated for physical and mathematical models.

The optimal engine control parameters X^{opt} that enable reduction of nitrogen oxides according to boundary conditions implemented were used in new series of engine measurements in order to check the correctness and accuracy of the model. The additional measurements were carried out for values of crankshaft rotational speed and torques like in section 4. Results of validation measurements are presented in Table 3 as relative percentage errors (in relation to measured value) for each case considered.

Analysis of the validation data shows that using vector X^{opt} of optimal control engine parameters lead us to similar values of decreased emissions of nitrogen oxides obtained

Table 2. Calculated values of e_i according to X^{beg} i X^{opt}

Tabela 2. Obliczone wartości e_i odpowiadające X^{beg} i X^{opt}

Torque/ obciążenie	e_i	Crankshaft rotational speed/prędkość obrotowa					
		2610			3340		
		beg	opt	opt/beg	beg	opt	opt/beg
0.25 M_{max}	CO [%]	0.015	0.022	1.47	0.009	0.013	1.44
	HC [ppm]	54	70	1.30	45	51	1.13
	NO _x [ppm]	281	159	0.57	313	140	0.45
	D [°BOSCH]	0.41	0.33	0.80	0.4	0.76	1.90
0.5 M_{max}	CO [%]	0.013	0.015	1.15	0.006	0.009	1.50
	HC [ppm]	47	55	1.17	46	49	1.07
	NO _x [ppm]	561	233	0.42	527	241	0.46
	D [°BOSCH]	0.16	0.33	2.06	0.2	0.41	2.05
0.75 M_{max}	CO [%]	0.011	0.014	1.27	0.008	0.011	1.38
	HC [ppm]	55	53	0.96	51	48	0.94
	NO _x [ppm]	878	482	0.55	652	442	0.68
	D [°BOSCH]	0.4	0.8	2.00	0.42	0.7	1.67

Table 3. Validation of e_i values for X^{opt}

Tabela 3. Weryfikacja wartości e_i odpowiadających X^{opt}

Torque/ obciążenie	e_i	Crankshaft rotational speed/prędkość obrotowa					
		2610			3340		
		calc.	exp.	error [%]	calc.	exp.	error [%]
0.25 M_{max}	CO [%]	0.022	0.019	16	0.013	0.02	35
	HC [ppm]	70	61	15	51	59	13
	NO _x [ppm]	159	172	8	140	136	3
	D [°BOSCH]	0.33	0.6	45	0.76	0.6	26
0.5 M_{max}	CO [%]	0.015	0.012	25	0.009	0.019	52
	HC [ppm]	55	68	19	49	60	18
	NO _x [ppm]	233	300	22	241	206	16
	D [°BOSCH]	0.33	0.5	34	0.41	1	59
0.75 M_{max}	CO [%]	0.014	0.006	43	0.011	0.009	22
	HC [ppm]	53	63	16	48	49	2
	NO _x [ppm]	482	678	29	442	433	2
	D [°BOSCH]	0.8	0.6	33	0.7	0.8	12

rzeczywistym nie muszą zachować cech optymalności. Spowodowane jest to błędem predykcji sieci neuronowych oraz założeniami przyjętymi przy opracowaniu modelu fizycznego i matematycznego jak też błędami pomiarów.

Aby zweryfikować poprawność wniosku, iż stosowanie optymalnych nastaw X^{opt} prowadzi do rzeczywistego obniżenia emisji tlenków azotu i zachowania ograniczeń opisanych poprzednio, przeprowadzono badania stanowiskowe, weryfikacyjne. Badania weryfikacyjne przeprowadzono dla prędkości obrotowych i obciążeń uzyskanych w wyniku postępowania opisanego w rozdz. 4. Wyniki badań weryfikacyjnych przedstawiono w tab. 3, zestawiając względny (w odniesieniu do wartości zarejestrowanej w badaniach) błąd procentowy.

Analiza wyników weryfikacji pomiarowej wskazuje, że w rezultacie zastosowania parametrów regulacyjnych X^{opt} , zarówno w obliczeniach, jak i w pomiarach weryfikacyjnych

by model and validation measurements. The above was achieved with no change in mean indicated pressure and with allowable increasing of emission of carbon monoxide and hydrocarbons. Results of selected experimental measurements carried out in order to validate the model and algorithm for founding X^{opt} enable us to claim that the model with artificial neural networks works properly. However, validation results show that new set of experimental measurements is necessary in order to improve the weak current accuracy for predicting emission of carbon monoxide and hydrocarbon.

It is obvious that using measurements for predicting the real-word vector of optimal engine control parameters X_p^{opt} are time-consuming and expansive. It is reasonable to consider that

$$X_p^{\text{opt}} \approx X^{\text{opt}} \quad (14)$$

which means that the vector of optimal parameters X^{opt} obtained from the model presented can replace the vector of real-word optimal engine control parameters.

Artykuł recenzowany

Nomenclature and Abbreviation/Skróty i oznaczenia

A	heat transfer area/powierzchnia wymiany ciepła
B_o	injected fuel mass/dawka paliwa
c	specific heat of the medium/ciepło właściwe czynnika
h	heat transfer coefficient/współczynnik wymiany ciepła
m	mass of the medium/masa czynnika
n	crankshaft rotational speed/prędkość obrotowa
p	pressure/ciśnienie
t	time/czas
T	temperature/temperatura
V	cylinder volume/objętość cylindra
W	fuel calorific value/wartość opalowa paliwa
x	fuel mass burning rate/stopecień spalania dawki paliwa
X_{EGR}	degree of exhaust gas recirculation/stopecień recyrkulacji spalin
y	degree of fuel dose used/współczynnik wykorzystania dawki paliwa
φ_w	injection advance angle/kąt wyprzedzenia wtrysku
η_c	efficiency/sprawność

Mr Krzysztof Brzozowski, DSc, MEng – University of Bielsko-Biala, doctor in Department of Mechanics and Computer Science at Faculty of Mechanical Engineering and Computer Science.

Dr hab. inż. Krzysztof Brzozowski – Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Bialej, adiunkt w Katedrze Mechaniki i Informatyki na Wydziale Budowy Maszyn i Informatyki.



uzyskano zbliżone wartości obniżenia emisji tlenków azotu przy utrzymaniu założonej wartości średniego ciśnienia indukowanego. Równocześnie nastąpił zbliżony (dopuszczony) wzrost emisji tlenku węgla i węglowodorów. Przedstawione częściowe wyniki eksperymentalnej weryfikacji poprawności modelu układu i postępowania zmierzającego do ustalenia optymalnych zestawów parametrów regulacyjnych X^{opt} , upoważniają do stwierdzenia poprawności identyfikacji modelu z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych. Wskazują jednocześnie na potrzebę uzupełnienia badań w zakresie emisji tlenku węgla i zadymienia spalin, ze względu na małą zgodność wyników modelowania i badań eksperymentalnych dla tych składników spalin.

Znalezienie wektora X_p^{opt} (według badań) wymaga przeprowadzenia wielu czasochłonych i kosztownych pomiarów. Stąd sensowne wydaje się przyjęcie równania (14), a więc utożsamienie wektora optymalnych parametrów regulacyjnych z wektorem wyznaczonym obliczeniowo.

Bibliography/Literatura

- [1] Brzozowski K., Nowakowski J.: Application of optimisation to scalling of the mathematical model of the working cycle of CI engine. The Archive of Mechanical Engineering Vol. 52 No.1 s. 21-39, 2005.
- [2] Brzozowska L., Brzozowski K., Nowakowski J.: An application of artificial neural network to Diesel engine modelling. IDAACS'2005, Proceedings of the Third IEEE Workshop, s. 142-146, 2005.
- [3] Brzozowski K., Nowakowski J.: Zastosowanie sztucznych sieci neuronowych do modelowania emisji z silnika o zapłonie samoczynnym. Journal of KONES: Internal Combustion Engines vol.12 nr 1-2 s. 51-59, 2005.
- [4] Brzozowski K., Nowakowski J.: Zastosowanie sztucznych sieci neuronowych do identyfikacji modelu cyklu roboczego silnika o zapłonie samoczynnym. PTNSS Congress, P05-C147 s. 1-9, 2005.
- [5] Nowakowski J., Brzozowski K.: Model cyklu roboczego silnika ZS z recyrkulacją spalin. Badania Symulacyjne w Technice Samochodowej, Teza Komisji Naukowo-Problemovej Motoryzacji, nr 26-27 s. 335-340, 2003.
- [6] Nowakowski J.: Model cyklu roboczego silnika o zapłonie samoczynnym i jego zastosowanie do doboru parametrów regulacyjnych. Rozprawy Naukowe, Akademia Techniczno-Humanistyczna, nr 15, 2005.

Mr Jacek Nowakowski, DSc, MEng – University of Bielsko-Biala, doctor in Department of Combustion Engines and Vehicles at Faculty of Mechanical Engineering and Computer Science.

Dr hab. inż. Jacek Nowakowski – Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Bialej, adiunkt w Katedrze Silników Spalinowych i Pojazdów na Wydziale Budowy Maszyn i Informatyki.

