

MODELLING OF HE SPARK-IGNITION ENGINE OPERATIONAL PERFORMANCE

Krzysztof Malewicz

Opole University of Technology
ul. St. Mikołajczyka 5, 45 – 271 Opole, Poland
tel.: +48 77 4006272, fax.+48 77 4006342
e-mail: malewicz@klio.po.opole.pl

Sławomir Prokop

Opole University of Technology
ul. St. Mikołajczyka 5, 45 – 271 Opole, Poland
tel.: +48 77 4006272, fax.+48 77 4006342
e-mail: slawomir_prokop@poczta.onet.pl

Jarosław Mamala

Opole University of Technology
ul. St. Mikołajczyka 5, 45 – 271 Opole, Poland
tel.: +48 77 4006272, fax.+48 77 4006342
e-mail: mamala@po.opole.pl

Abstract

In this paper potential of artificial neural network to modelling and approximation SI engine characteristics using digital technique tests is presented. Correctly designed and trained artificial neural network is able to modelling of torque engine characteristic on the basis of tests in real traffic conditions. Presented that neural network which was trained in real traffic conditions generate better interactions in powertrain, so there is possibility to change “Look-up Table” technique which approximate engine characteristic by artificial neural network.

The article presented particularly approximation results of static performance at use of various methods in relating to the engine torque and the fuel consumption, the relative operate performance of the power engine mapped with the neural network as well as results of simulation at application of neuronal operative engine performance for real speed profile.

An essential advantage of proposed method is that the acquired knowledge by the neural network issues from real, not static, working engine conditions.

Keywords: *SI combustion engine, engine performance, modelling, simulation, neural networks*

MODELOWANIE CHARAKTERYSTYKI EKSPLOATACYJNEJ SILNIKA O ZAPŁONIE ISKROWYM

Streszczenie.

Autorzy artykułu dowodzą możliwości wykorzystania sztucznych sieci neuronowych do modelowania i aproksymacji charakterystyk silnika spalinowego o zapłonie iskrowym w badaniach realizowanych techniką symulacji cyfrowej. Wykazano, iż poprawnie zaprojektowana i wytrenowana sztuczna sieć neuronowa nadaje się do modelowania charakterystyki mocy silnika na podstawie wyników pomiarów zrealizowanych w rzeczywistych warunkach ruchu. Wykazano, że sieć neuronowa wytrenowana w oparciu o wyniki pomiarów uzyskanych

podczas normalnego ruchu drogowego, lepiej odwzoruje rzeczywiste zależności w układzie napędowym. Tym samym istnieje możliwość zastąpienia dotychczasowej techniki „Look-up Table” służącej do aproksymacji charakterystyk silnika przez sztuczne sieci neuronowe.

Artykuł prezentuje w szczególności wyniki aproksymacji charakterystyki statycznej przy wykorzystaniu różnych metod w odniesieniu do momentu obrotowego silnika oraz zużycie paliwa, względną eksploatacyjną charakterystykę mocy silnika odwzorowaną za pomocą sieci neuronowej jak również wyniki symulacji przy wykorzystaniu neuronowej charakterystyki eksploatacyjnej silnika dla rzeczywistego profilu prędkości.

Istotną zaletą proponowanej metody jest to, że wiedza nabyta przez sieć neuronową wynika z rzeczywistych a nie statycznych warunków pracy silnika.

Słowa kluczowe: silnik spalinowy ZI, charakterystyki silnika, modelowanie, symulacja, sieci neuronowe

1. Wprowadzenie

Kluczowym zagadnieniem w badaniach realizowanych techniką symulacji cyfrowej jest modelowanie charakterystyki silnika spalinowego. Silnik spalinowy charakteryzuje wieloetapowy proces przetwarzania energii dostarczonej w paliwie, a istniejące modele silnika nie pozwalają na określenie występujących w nim zależności w prosty sposób [1 – 4, 8]. Wielowymiarowość charakterystyk silnika i ich nieliniowy charakter, stopień złożoności i jedynie częściowe odwzorowanie niektórych zależności, ogranicza ich przydatność. Stąd opracowanie poprawnego modelu silnika, obejmującego cały obszar jego pracy, za pomocą równań analitycznych jest mocno skomplikowane i pochłaniające duże moce obliczeniowe. Dlatego w badaniach realizowanych techniką symulacji cyfrowej wykorzystuje się modele silnika oparte o charakterystyki statyczne zapisane w postaci macierzy liczbowej w pamięci komputera. Przyjęte uproszczenia skutkują błędami obliczeniowymi i wymagają przeprowadzania czasochłonnych badań stanowiskowych silnika spalinowego.

W artykule wskazuje się na możliwości wykorzystania sztucznych sieci neuronowych do modelowania i aproksymacji charakterystyk silnika ZI w badaniach realizowanych techniką symulacji cyfrowej. Sztuczne sieci neuronowe ze względu na swoje możliwości nadają się do modelowania zjawisk silnie nieliniowych [1, 3].

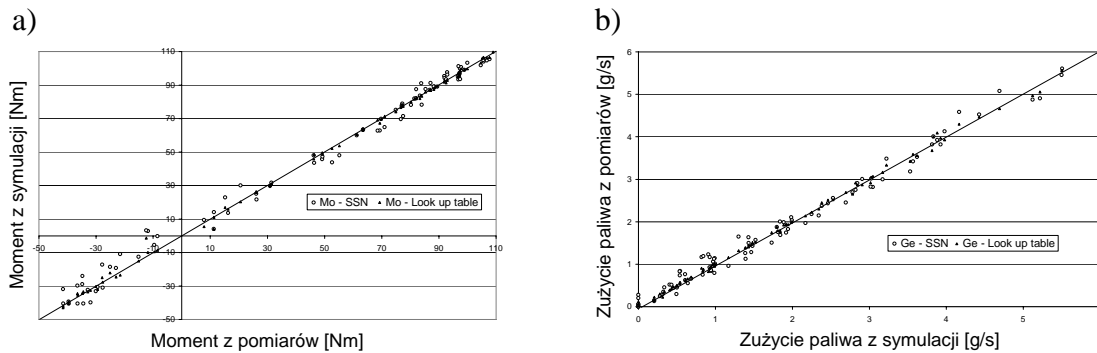
2. Modelowanie charakterystyki silnika

W badaniach symulacyjnych wykorzystywane są charakterystyki ogólne silnika, które są zapisane w pamięci komputera za pomocą macierzy liczbowych zawierających węzły równomiernej siatki obejmującej całe pole pracy silnika [6, 9]. Najczęściej są to charakterystyki momentu obrotowego silnika oraz czasowego zużycia paliwa wyrażone jako funkcja prędkości obrotowej i uchylenia przepustnicy lub podciśnienia w kolektorze dolotowym. Podjęty w opracowaniu problem rozpatrzono na przykładzie charakterystyk silnika ZI, którego podstawowe parametry zestawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Parametry techniczne silnika ZI
Tab. 1. The technical of SI engine parameters

Nazwa	Parametr
Typ Silnika	CE
Pojemność skokowa w cm ³	1598
Moc maksymalna wg DIN w kW	59
Prędkość obrotowa mocy maksymalnej w obr/min	5200
Maksymalny moment obrotowy wg DIN w N·m	125
Prędkość obrotowa maksymalnego momentu w obr/min	3200

Pomiary przeprowadzono na stanowisku badawczym [5, 7] określając charakterystykę ogólną silnika dla charakterystyki prędkościowej, przy arbitralnie przyjętych wartościach uchylenia przepustnicy i prędkości obrotowej silnika zmieniającej się co 1000 obr/min. Proces modelowania charakterystyki w postaci macierzy liczbowej jest pracochłonny i wymaga zastosowania szeregu procedur przetwarzania danych pomiarowych. Problem ten jest szeroko opisywany w pracach [6, 8]. Do odczytu charakterystyki z macierzy stosuje się technikę „Look-up table” z liniowym mechanizmem aproksymacji. Alternatywną metodą dla tej techniki jest modelowanie charakterystyki silnika za pomocą sztucznych sieci neuronowych bezpośrednio na wynikach pomiaru otrzymanych z hamowni silnikowej [6]. Użycie sieci neuronowych skraca czas opracowania modelu silnika oraz daje możliwość wykorzystania ich do aproksymacji wskaźników pracy. Jakość odwzorowania charakterystyki dla punktów węzłowych za pomocą tych dwóch technik przedstawiono na rys. 1, gdzie na osiach odniesiono rzeczywiste wartości uzyskane podczas pomiaru do wartości otrzymanych w wyniku aproksymacji charakterystyki. Z przedstawionego rysunku wynika, iż punkty aproksymacji leżą blisko linii idealnego odwzorowania.



Rys. 1. Wyniki aproksymacji charakterystyki statycznej przy wykorzystaniu różnych metod
 a) moment obrotowy silnika, b) zużycie paliwa
 Fig. 1. Approximation results of static characteristics with use different methods
 a) engine torque , b) fuel consumption

Określenie jakości odwzorowania charakterystyki z przedstawionego rysunku jest trudne. Dlatego za kryterium porównawcze przyjęto wartość błędu względnego obu sposobów aproksymacji charakterystyki silnika:

$$\Delta x = \frac{\sum_{i=1}^n (x_p - x_s)^2}{\sum_{i=1}^n (x_p)^2} \times 100\% , \tag{1}$$

gdzie: x_p – wynik pomiaru z hamowni silnikowej, x_s – wynik aproksymacji modelu.

Wartość powyższego równania oznacza sumę kwadratów błędów aproksymacji charakterystyki silnika odniesioną do sumy kwadratów wartości zmierzonych. Błąd ten zestawiono w tabeli 2.

Tab. 2. Względny błąd obliczeń wskaźników silnika
 Tab. 2. Relative computation error of coefficients of engine

Metoda aproksymacji	Błąd względny %	
	Moment	Zużycie paliwa
Look-up table	0,06	0,07
SSN	0,49	0,50

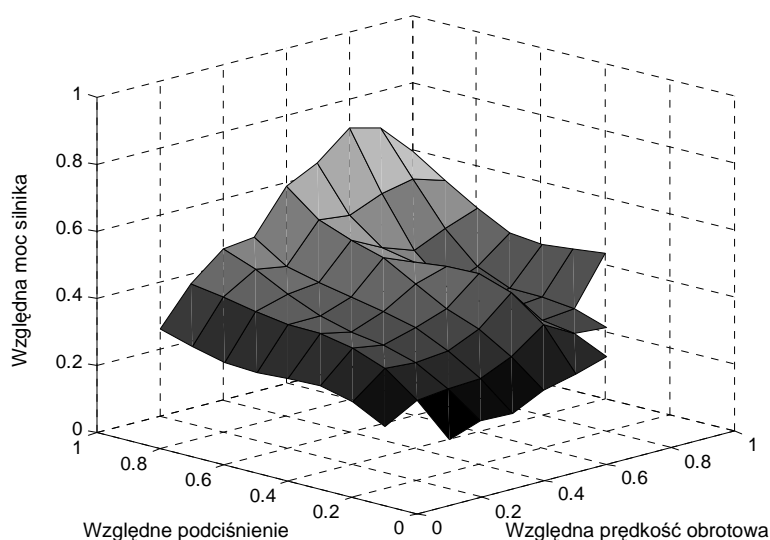
Przyjęte sposoby aproksymacji charakterystyki statycznej silnika skutkują błędem względnym nie przekraczającym 0,5%.

3. Modelowanie charakterystyki eksploatacyjnej silnika

Jednak cechą charakterystyczną samochodu poruszającego się w rzeczywistych warunkach ruchu są częste zmiany mocy silnika, dlatego wykorzystanie modelu silnika opartego o statyczną charakterystykę silnika skutkuje błędem. Błąd ten wynika z nieuwzględnienia stanów przejściowych pracy silnika. Szczególnie w warunkach jazdy miejskiej, gdzie częstotliwość, zakres i dynamika zmian jest bardzo duża. W rezultacie prędkość obrotowa silnika i podciśnienie w kolektorze dolotowym nie są stałe jak w przypadku pomiarów wykonywanych podczas wyznaczania charakterystyki ogólnej silnika na hamowni silnikowej.

W opracowaniu zaproponowano wykorzystanie sztucznych sieci neuronowych do modelowania charakterystyki silnika bezpośrednio z pomiarów rzeczywistych zarejestrowanych podczas prób drogowych samochodu doświadczalnego na odcinku 7,5 km w czasie 11 min. Samochód doświadczalny był wyposażony w identyczny silnik jak podczas badań stanowiskowych oraz została wykorzystana identyczna aparatura pomiarowa, na którą składał się m.in. układ do pomiaru momentu obrotowego na wale napędowym [5], z którego obliczono moc silnika w układzie napędowym.

Poniżej (rys. 2) przedstawiono eksploatacyjną charakterystykę mocy silnika otrzymaną bezpośrednio z badań drogowych w rzeczywistych warunkach ruchu, wyznaczoną za pomocą sztucznej sieci neuronowej.

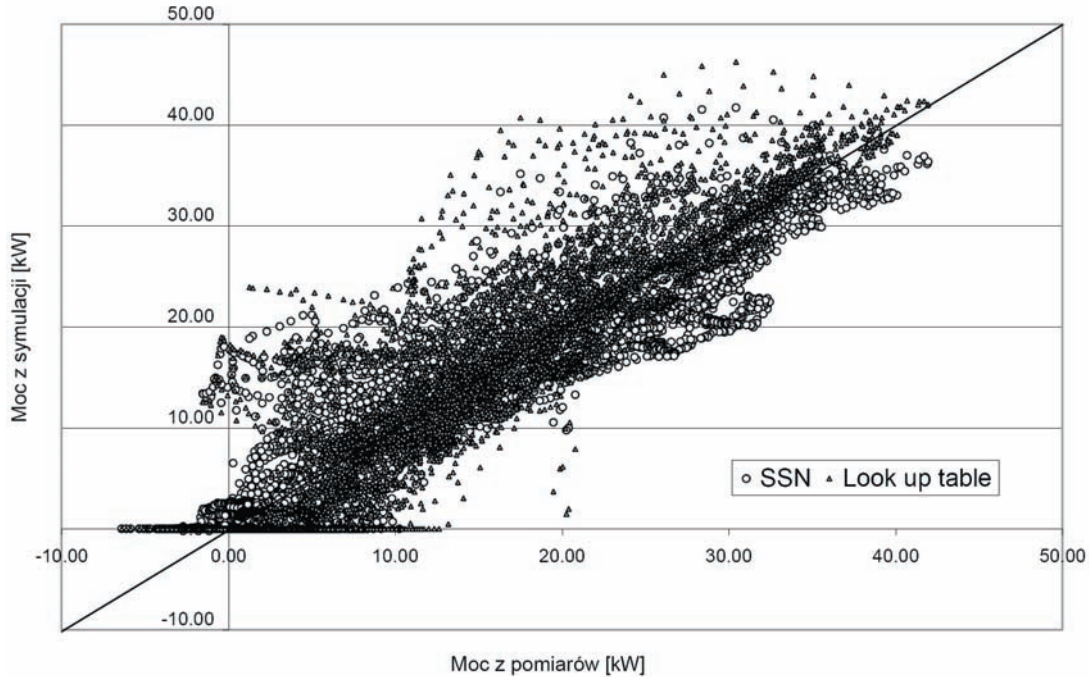


Rys. 2. Względna eksploatacyjna charakterystyka mocy silnika odwzorowana za pomocą sieci neuronowej
Fig. 2. Relative operating engine power map represented with artificial neural network

Określone za pomocą sztucznych sieci neuronowych charakterystyki silnika można, jak wykazano w pracy [6], wykorzystać do aproksymacji parametrów wybranego punktu pracy silnika, w tym przypadku mocy w zależności od zadanej wartości prędkości obrotowej i podciśnienia w przewodzie dolotowym.

Zgodnie z przyjętymi założeniami, zaprojektowane sieci neuronowe odwzorujące charakterystyki mocy silnika: statyczną i eksploatacyjną poddano weryfikacji. W tym celu przeprowadzono badania symulacyjne wykorzystując nakładkę *Simulink* z pakietu *Matlab*.

Wyniki symulacji przedstawiono na rys. 3, gdzie porównano moc silnika zarejestrowaną podczas badań drogowych do mocy silnika aproksymowanej z charakterystyk: statycznej i eksploatacyjnej.



Rys. 3. Wyniki symulacji przy wykorzystaniu neuronowej charakterystyki eksploatacyjnej silnika dla rzeczywistego profilu prędkości

Fig. 3. Simulation results with use neural network exploitation characteristics of engine in real profile speed

Określono także błąd względny odwzorowania równania nr 1, przyjmując jako wartość odniesienia moc zmierzoną podczas badań drogowych w rzeczywistych warunkach ruchu. Wartość otrzymanego błędu przedstawiono w tabeli 3.

Tab. 3. Względny błąd obliczeń mocy silnika w układzie napędowym

Tab. 3. Relative computation error of engine power

Metoda aproksymacji	Błąd odwzorowania %
	Moc
Look-up table	7,15
SSN	5,86

Jak widać (tab. 3), względny błąd jest większy w przypadku odwzorowania mocy silnika dla rzeczywistego profilu prędkości przy użyciu charakterystyki statycznej.

4. Podsumowanie

W pracy dowiedziono, że odpowiednio zaprojektowana i wytrenowana sztuczna sieć neuronowa dobrze odwzoruje silnie nieliniowe, wielowymiarowe zależności wynikające z działania samochodowego układu napędowego. Sieć neuronowa wytrenowana na zbiorze danych pomiarowych zebranych w rzeczywistych warunkach ruchu umożliwia symulacyjne badania układu napędowego. Tym samym możliwe jest określenie wybranych wskaźników pracy dla dowolnego profilu prędkości, również syntetycznego. Istotną zaletą proponowanej metody jest to, że wiedza nabyta przez sieć neuronową, wynika z rzeczywistych a nie statycznych warunków pracy silnika.

Literatura

- [1] Arsie, L., Pianese, C., Pizzo, G., *Enhancement of control oriented engine model using neural network*, 2003.
- [2] Ghazi Zadeh, A., Fahim, A., El-Gindy, M., *Neural network and fuzzy logic applications to vehicle systems: literature survey*, International Journal of Vehicle Design, 1997.
- [3] He, J., Rutland, C., *Application of artificial neural network for integration of advanced engine simulation methods*, Peoria, 2000.
- [4] Howlett, R. J., Zoysa, M. M., Walters, S. D., Howson, P. A., *Neural network techniques for monitoring and control of internal combustion engines*, Presented at Int. Symposium on Intelligent Industrial Automation 1999, Italy, Genova 1999.
- [5] Jantos, J., Mamala, J., *Stanowiskowy symulator obciążenia drogowego silnika*, Teka Komisji Naukowo-Problemovej Motoryzacji PAN oddział w Krakowie, Konstrukcja, badania, eksploatacja, technologia pojazdów samochodowych i silników spalinowych, Kraków 1999, t.18, ss. 113-119
- [6] Mamala, J., Jantos, J., *Odwzorowanie charakterystyk silnika za pomocą sztucznych sieci neuronowych*, Zeszyt naukowy Politechniki Opolskiej, seria Mechanika, Opole 2005 (w druku).
- [7] Mamala, J., Jantos, J., *Stanowisko dynamiczne do badań układu pojazd - silnik techniką symulacji stanowiskowej*, VI Międzynarodowa Konferencja Naukowo - Techniczna AUTOPROGRES'98, Jachranka 1998, ss. 19-27.
- [8] Yoon, P., Myoungcho, S., *A nonlinear modelling of SI engines for controller design*, International Journal of Vehicle Design, Vol. 26, No 2/3, 2001, s. 277-297
- [9] Zuranda, J., Barski, M., Jędruch, W., *Sztuczne sieci neuronowe*, PWN, Warszawa 1996

Artykuł powstał w ramach Projektu ZPORR, współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej z Europejskiego Funduszu Społecznego i budżetu państwa