

PIOTR BERA, ROBERT PILCH, JAN SZYBKĄ*

ZASTOSOWANIE SIECI NEURONOWYCH DO OCENY ZUŻYCIA PALIWA PRZEZ SAMOCHÓD

APPLICATION OF NEURAL NETWORKS FOR EVALUATION OF THE FUEL CONSUMPTION BY CAR

Streszczenie

W artykule przedstawiono metodę oceny zużycia paliwa przez samochody osobowe z zastosowaniem sieci neuronowych i wpływ szkodliwych produktów spalania na środowisko. Wykazano, że sieci neuronowe nadają się do przeprowadzenia tego typu ocen i mogą służyć do weryfikacji danych o zużyciu paliwa w teście NEDC (New European Driving Cycle), podawanych przez producentów każdego typu pojazdu samochodowego. Badania przeprowadzono w rzeczywistych warunkach eksploatacji na samochodzie Fiat Punto.

Słowa kluczowe: sieci neuronowe, zużycie paliwa, samochody

Abstract

The following paper discusses evaluation of the fuel consumption by cars with use of neural networks and influence of exhaust components on the environment. This paper proves that neural networks can be successfully applied in such case. They can also be used to verify the producers' data referring to fuel consumption in NEDC test for all vehicles. Research was conducted on Fiat Punto in real exploitation conditions.

Keywords: neural networks, fuel consumption, cars

* Piotr Bera, dr inż. Robert Pilch, dr hab. inż. Jan Szybka, prof. AGH, Katedra Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie.

Oznaczenia

- $f^1(n_m^1)$ – funkcja przeniesienia warstwy ukrytej ($m = 1, \dots, M$),
 $f^2(n_i^2)$ – funkcja przeniesienia warstwy wyjściowej,
 L – liczba danych w zbiorze uczącym,
 M – liczba neuronów w warstwie ukrytej,
 \mathbf{W}^1 – macierz wag warstwy pierwszej (ukrytej),
 \mathbf{W}^2 – macierz wag warstwy drugiej (wyjściowej),
 x_i^1 – i -te wejście ($i = 1, \dots, 6$),
 y_i^2 – wyjście sieci.

1. Wstęp

Stały wzrost liczby samochodów połączony z brakiem dostosowanej infrastruktury drogowej prowadzi do znacznego wzrostu zanieczyszczenia powietrza, wzrostu zachorowań na choroby dróg oddechowych i niszczenia środowiska naturalnego.

Utrzymanie płynności ruchu samochodowego jest jednym z ważniejszych warunków zmniejszenia emisji zanieczyszczeń do środowiska.

Niepotrzebne wydłużenie czasu oczekiwania na skrzyżowaniu jest przyczyną nadmiernego zużycia paliwa i źródłem dodatkowych zanieczyszczeń oraz niekorzystnie wpływa na czas przejazdu.

W artykule przeanalizowano zużycie paliwa w zależności od warunków eksploatacji na przykładzie popularnego samochodu Fiat Punto. Do oceny zużycia zastosowano sieci neuronowe, które z powodzeniem mogą być wykorzystane do weryfikacji norm zużycia paliwa podawanych przez producenta.

2. Aspekty ekologiczne

2.1. Charakterystyka produktów spalania

Transport drogowy jest źródłem emisji zanieczyszczeń pochodzących ze spalania paliw oraz zużycia podzespołów, takich jak klocki hamulcowe, sprzęgła cieme czy opony.

Składniki spalin silnika spalinowego można podzielić ogólnie na składniki toksyczne i nietoksyczne. Do składników toksycznych zalicza się: tlenek węgla (CO), tlenki azotu (NO_x) oraz węglowodory (HC). Wśród głównych składników nietoksycznych wyróżnia się: dwutlenek węgla (CO_2), tlen (O_2), azot (N_2) i parę wodną (H_2O).

Szczególnie istotne są emisje wszystkich związków toksycznych oraz dwutlenku węgla, który przyczynia się do tzw. efektu cieplarnianego.

Tlenek węgla jest efektem niedokończonego procesu spalania węgla w komorze silnika przy niedoborze powietrza (mieszanka bogata). Przy zatruciach CO jest pochłaniany przez płuca, skąd przenika do krwi i łączy się trwale z hemoglobina, tworząc karboksyhemoglobina, niezdolną do przenoszenia tlenu. Ponieważ powinowactwo CO do hemoglobiny jest ok. 300 razy większe niż tlenu, następuje gwałtowne obniżenie zawartości oksyhemoglobiny i w konsekwencji niedotlenienie organizmu (głównie mózgu i mięśnia sercowego). Po zatruciach mogą występować powikłania w postaci nerwobóli, uszkodzeń ośrodkowego układu

nerwowego oraz zmiany w czynnościach płuc i serca. Stężenie od 0,10–0,20% tlenku węgla przez 30 minut powoduje już śmierć człowieka.

Węglowodory (HC) są to niespalone lub częściowo spalone cząsteczki paliwa o bardzo negatywnym działaniu na organizm człowieka. Najbardziej niebezpieczną grupą są węglowodory aromatyczne jednopierścieniowe, a wśród nich benzen, który w dużych stężeniach powoduje śmierć. Rozpuszczając się w tłuszczach, węglowodory mogą kumulować się tkankach ludzi oraz zwierząt.

Wielkość emisji tlenków azotu zależy od ciśnienia i szczytowych temperatur podczas procesu spalania w komorze silnika. W wyżej wymienionym procesie azot wchodzi w reakcję z tlenem, tworząc tlenek azotu (NO) oraz niewielkie ilości dwutlenku azotu (NO₂) i podtlenku azotu (N₂O). Zaliczane są one do najbardziej toksycznych gazów spalinowych. Tlenek azotu (NO) jest gazem bezbarwnym, w organizmie ludzkim szybko reaguje z hemoglobina, w tkankach utlenia się do (NO₂). Dwutlenek azotu w kolorze czerwono-brązowym o ostrym zapachu i trujących właściwościach występuje zawsze w towarzystwie innych nitrogenów. W małych stężeniach wywołuje podrażnienie dróg oddechowych, a przy stężeniu w powietrzu powyżej 0,38 [mg/dm³] prowadzi również do zatrucia śmiertelnego.

Dwutlenek węgla jest gazem bezbarwnym, nietoksycznym, bez zapachu, niepalnym, 1,5 raza cięższym od powietrza. Nadmierny wzrost zawartości tego gazu w atmosferze powoduje tzw. efekt cieplarniany. Powstaje jako produkt spalania węgla (C) w komorze spalania silnika. Im wyższa procentowo zawartość CO₂ w spalinach, tym efektywniej pracuje silnik. Największe wartości stężenia CO₂ osiągane są przy współczynniku nadmiary powietrza równym 1, a więc dla mieszanki stechiometrycznej. W pojazdach posiadających silniki z zapłonem iskrowym wyposażonych w trójfunkcyjny reaktor katalityczny, pozostałe po procesie spalania tlenek węgla (CO) i węglowodory (HC) są utleniane, a tlenki azotu zredukowane, w efekcie czego powstaje dwutlenek węgla (CO₂) i para wodna (H₂O).

Dokładne określenie wpływu spalin na organizm człowieka jest jednak trudne, gdyż zależy od wielu czynników, takich jak: wiek, odporność organizmu, stężenie zanieczyszczeń i czas ich oddziaływania, jak również warunki klimatyczne. Jednak spaliny samochodowe są znacznie bardziej szkodliwe dla ludzi niż zanieczyszczenia pochodzące z przemysłu. Wynika to z faktu, że rozprzestrzeniają się one w dużych stężeniach na niskich wysokościach, czyli w bezpośrednim sąsiedztwie ludzi.

2.2. Normy emisji spalin

Aby ograniczyć emisję szczególnie szkodliwych, toksycznych związków, wprowadzono europejski standard emisji spalin, który w formie dyrektyw europejskich (od Euro I z 1993 r. przez aktualną Euro V z 2009 r. po planowaną Euro VI na 2014 r.) określa dopuszczalną emisję toksycznych składników spalin w nowych samochodach. Każda kolejna dyrektywa charakteryzowała się większą restrykcyjnością. Konstruktorzy, aby sprostać tym wymaganiom, początkowo udoskonalali proces spalania. Jednak gdy trafiło to na fizyczne bariery i nie zapewniało już ewidentnej poprawy czystości spalin, musieli skupić się na ich oczyszczaniu. W tabeli poniżej przedstawiono przykładowo dopuszczalne wartości emisji według norm Euro.

Dopuszczalne wartości emisji spalin w normach Euro dla pojazdów z silnikiem benzynowym z zapłonem iskrowym o masie do 3500 kg

[g/km]	EURO I	EURO II	EURO III	EURO IV	EURO V	EURO VI
CO	2,72	2,2	2,3	1	1	1
HC	–	–	0,2	0,1	0,1	0,1
NO _x	–	–	0,15	0,08	0,06	0,06
HC + NO _x	0,97	0,5	–	–	–	–
PM	–	–	–	–	0,005	0,005

Opracowywane standardy nie dotyczą jednak pojazdów już jeżdżących, tylko samochodów nowych, dopuszczanych do sprzedaży. Ponadto należy zwrócić uwagę na fakt, że liczba samochodów ciągle rośnie. Ich szczególne zagęszczenie występuje na terenach miejskich, gdzie poruszają się często w korkach, na krótkich dystansach, przebywając znaczną część trasy, gdy silnik jest w fazie nagrzewania i emituje zdecydowanie większy poziom szkodliwych składników [1].

W dalszej części opracowania podjęto próbę określenia wpływu wybranych czynników na zużycie paliwa, a tym samym emisję składników spalin przez samochód eksploatowany na terenie miejskim.

3. Ocena zużycia paliwa z zastosowaniem sieci neuronowych

3.1. Charakterystyka warunków przeprowadzania badań

Na wielkość zużycia paliwa, a tym samym na emisję szkodliwych składników spalin ma wpływ wiele czynników. Na podstawie obowiązującego cyklu jezdnego NEDC (New European Driving Cycle) można wyszczególnić 3 główne grupy: warunki drogowe, warunki atmosferyczne i sposób eksploatacji przez użytkownika.

Warunki drogowe określa wykres prędkości w czasie, warunki atmosferyczne określa temperatura otoczenia i wilgotność powietrza, a sposób eksploatacji jest uwzględniany poprzez ściśle określone wartości przyspieszeń samochodu oraz zmiany biegów przy odpowiednich prędkościach pojazdu.

W poniżej przedstawionym przykładzie obliczania zużycia paliwa, z wykorzystaniem sztucznej sieci neuronowej, zostały uwzględnione następujące czynniki: warunki drogowe, warunki atmosferyczne i sposób eksploatacji przez użytkownika.

Do pomiarów został użyty Fiat Punto o objętości skokowej silnika 1,2 dm³ i mocy 44 kW (60 KM). Pomiarów dokonywano na obszarze miasta Krakowa ze względu na płaską rzeźbę terenu (przeprowadzono pomiary zużycia paliwa na trasach zamkniętych – koniec trasy jest jednocześnie początkiem), co pozwala na pominięcie wpływu oporów wzniesienia na sumaryczne zużycie paliwa.

Aby zwiększyć prawdopodobieństwo, że wartość zużycia paliwa obliczona przez sieć będzie jak najlepiej odzwierciedlała rzeczywistość i w celu wyeliminowania błędów pomia-

rowych, na początku sformułowano niezbędne wymagania odnośnie sposobu przeprowadzania badań.

Zgodnie z założeniem muszą być zachowane poniższe wymagania:

- utrzymanie stałego ciśnienia w oponach, utrzymanie stałego poziomu oleju w silniku, utrzymanie stałego poziomu płynu w układzie chłodzenia, eksploatacja tylko z jednym pasażerem bez dodatkowego bagażu, samochód eksploatowany przez tego samego kierowcę oraz samochód tankowany tylko na stacjach jednej marki.

Dodatkowe parametry, przy których były dokonywane pomiary:

- stałe użycie świateł mijania, używanie ogrzewania tylko dla temperatury otoczenia mniejszych od 7–5°C, używanie nawiewu w samochodzie przez cały czas eksploatacji, jazdy tylko i wyłącznie z zamkniętymi szybami oraz używanie opon letnich dla temperatur powyżej 7°C (średnia tygodniowa temperatura), pomiary nie były dokonywane przy wietrznej pogodzie i przy dużych opadach śniegu.

Aby było możliwe zaprogramowanie sieci trenowanej z nauczycielem, niezbędne jest zbudowanie zbioru uczącego. Opiera się on na pomiarze głównych czynników mających wpływ na zużycie paliwa w czasie kolejnych przejazdów po zamkniętych trasach, a mianowicie: średnia szybkość samochodu, procentowy czas postoju, liczba zimnych rozruchów na 100 km, liczba startów na 1 km, styl jazdy, temperatura otoczenia oraz samego zużycia paliwa w dm³ dla każdego takiego przejazdu przeliczonego na 100 km.

Tabela 2

Wybrane dane eksploatacyjne ze zbioru uczącego

Parametry/nr pomiaru	1	2	3	4	5	6	...	L
Styl jazdy	1	3	1	2	2	1	3	2
Średnia temp, otoczenia [°C]	6,5	5,8	3,2	-1,2	5,4	12,3	13	8,9
Średnia prędkość samochodu [km/h]	21,8	21,9	22,2	19,2	37,9	45,9	34,8	32,9
Procentowy czas postoju	19,6	26,9	24,9	30,9	13,9	9,3	19,6	22,2
Liczba zimnych rozruchów na 100 [km]	7	7	7,2	9	4,2	4,2	5,3	4
Liczba ruszeń na 1 [km] drogi	1,9	2,1	2,1	2,6	0,7	0,2	0,9	1,2
Zużycie paliwa w dm ³ na 100 [km]	6,93	8,33	7,25	8,08	6,26	4,95	6,50	6,48

3.2. Zastosowanie sieci neuronowych

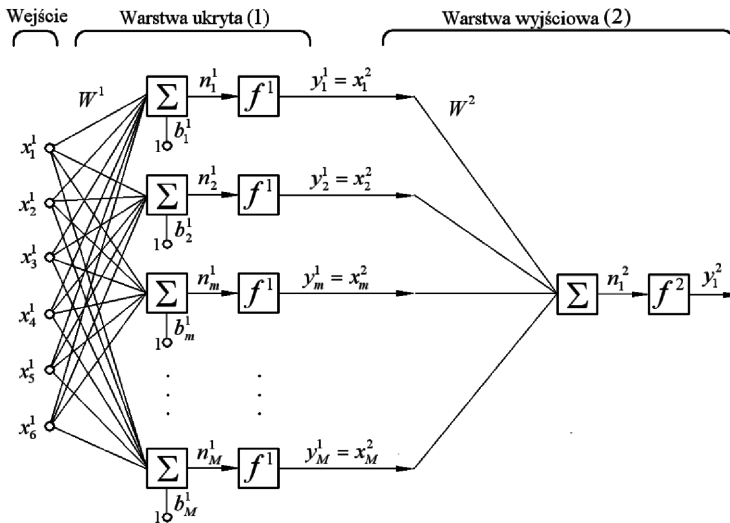
Sztuczna sieć neuronowa jest to struktura składająca się z wielu prostych elementów przetwarzających równolegle informacje.

Sieć mająca za zadanie rozwiązanie nieliniowego problemu musi zawierać przynajmniej jedną warstwę ukrytą, składającą się z neuronów o nieliniowych funkcjach przejścia oraz warstwę wyjściową z neuronami o liniowych lub nieliniowych funkcjach przejścia (w zależności od rozwiązywanego problemu). Liczba wejść i wyjść zależy od rozpatrywanego zagadnienia, ale liczba neuronów w warstwach ukrytych – od osoby projektującej sieć.

Proces programowania sztucznej sieci neuronowej można podzielić na trzy etapy: pierwszy do zbudowanie zbioru uczącego, drugi to definiowanie sieci, jej parametrów, trzeci to

proces trenowania. Przy czym należy zaznaczyć, że wszystkie te obszary mają wzajemnie na siebie wpływ i nigdy nie powinny być rozpatrywane oddzielnie [3, 4].

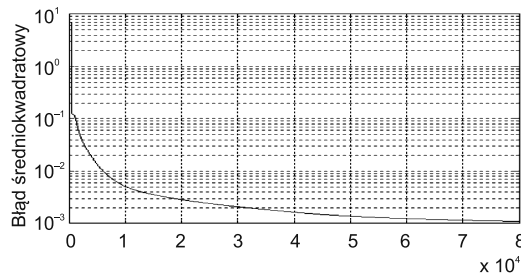
Sieć neuronowa realizująca powyższe zadanie ma strukturę zaprezentowaną na poniższym rysunku nr 1.



Rys. 1. Dwuwarstwowa sieć neuronowa z sześcioma wejściami, M neuronami ukrytymi i jednym wyjściem, służąca do obliczania zużycia paliwa

Fig. 1. A two-layer network with six inputs, M hidden neurons and one output for computing fuel consumption in car

Odpowiednia analiza zbioru danych pod kątem ich bezpośredniego wpływu na zużycie paliwa pozwala na ograniczenie liczby neuronów w warstwie ukrytej oraz skrócenie procesu trenowania. Do uczenia sieci zastosowano metodę gradientową ze zmiennym współczynnikiem uczenia. Wykres błędu przedstawiono na rysunku 2.



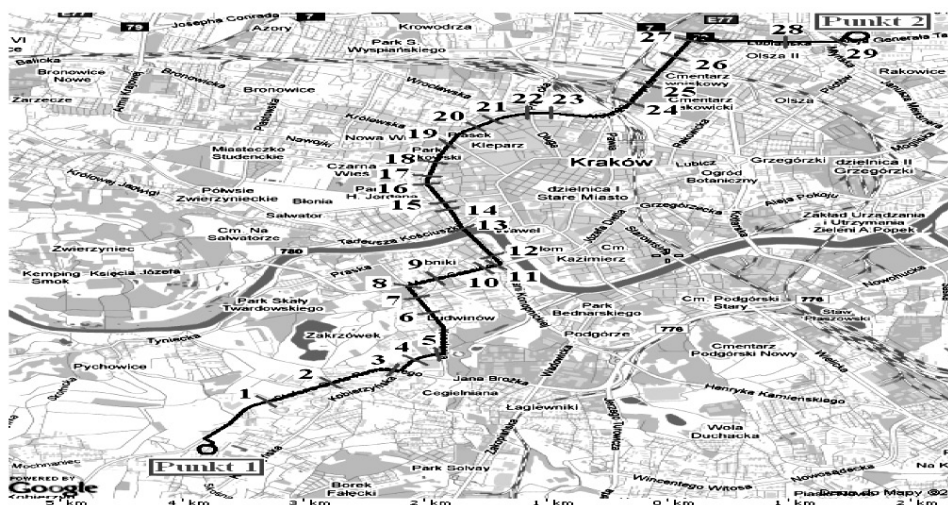
Rys. 2. Wykres błędu w procesie uczenia

Fig. 2. Mean square error vs training epochs

Tak nauczona sieć (z wartościami wag zapewniającymi minimalny błąd średniokwadratowy) jest w stanie dla dowolnych danych wejściowych obliczyć wartość zużycia paliwa [3, 4].

3.3. Ocena zużycia paliwa na przykładzie samochodu punto

Po zakończonym procesie trenowania możliwe jest symulowanie sieci dowolnymi wartościami wejściowymi. Na rysunku 3 przedstawiona została symulacja przejazdu w różnych warunkach ruchu drogowego i różnym sposobie jazdy. W zależności od godziny przejazdu i sposobu użytkowania uzyskuje się różne wartości zużycia paliwa.



Rys. 3. Symulowana trasa przejazdu przez Kraków

Fig. 3. The track of simulated ride in Cracow

Tabela poniżej przedstawia wyniki symulacji sieci neuronowej dla powyższej trasy – rano z punktu 1 do punktu 2, po południu z punktu 2 do punktu 1 (trasa zamknięta).

Tabela 3

Wartości zużycia paliwa w dm³ na 100 km dla różnych warunków drogowych i stylów prowadzenia samochodu przy stałych warunkach pogodowych

temp. = 8°C, liczba rozruchów = 8/100 km	Styl 1 (ekonomiczny)	Styl 2 (normalny)	Styl 3 (dynamiczny)
5:30 i 14:00; vsr = 38 km/h czas postoju = 6.5%; liczba ruszeń = 0,5/km	5,98	6,45	6,54
6:15 i 15:00; vsr = 23 km/h czas postoju = 21%; liczba ruszeń = 1,7/km	6,26	7,11	7,78
7:00 i 16:00; vsr = 17,8 km/h czas postoju = 33%; liczba_ruszeń = 2,9/km	7,63	8,15	8,25

Styl 2 odpowiada zakresom prędkości w teście europejskim NEDC.

Z przeprowadzonej analizy można wyciągnąć następujące wnioski:

- użytkowanie samochodu w godzinach wcześniejszych przy ekonomicznym stylu jazdy pozwala zmniejszyć zużycie paliwa o **21,6%** w porównaniu z najniekorzystniejszymi warunkami eksploatacji,
- w tych samych warunkach drogowych niewłaściwy sposób użytkowania zwiększa zużycie paliwa nawet o **24,3%**,
- użytkowanie samochodu w godzinach największego ruchu ulicznego, przy niestosowaniu się do zasad ekonomicznej jazdy powoduje wzrost zużycia paliwa o blisko **38%** w porównaniu z najkorzystniejszymi warunkami drogowymi i ekonomicznym stylem jazdy.

Zakładając więc, że spalanie 1 dm³ benzyny powoduje powstanie 2370 g CO₂, można założyć, że wybierając odpowiednią porę użytkowania pojazdu oraz ekonomiczny styl jazdy przy przejechaniu w mieście w ciągu roku tylko 10 000 km, można zmniejszyć maksymalnie emisję samego CO₂ aż o 537 990 g, czyli o ponad pół tony z każdego samochodu. Na warunki jazdy nie zawsze jednak mamy wpływ. Mimo to poprzez stosowanie tylko ekonomicznego stylu jazdy przy 10 000 km rocznie można średnio zmniejszyć emisję CO₂ o ponad 0,2 Mg, a maksymalnie nawet o ponad 0,36 Mg z każdego samochodu. Po przejechaniu więcej niż 10 000 km rocznie wartości te jeszcze odpowiednio wzrosną.

4. Wnioski

Przeprowadzona za pomocą sieci neuronowej analiza pozwala na ocenę ilościowego wpływu warunków drogowych i sposobu użytkowania na zużycie paliwa przez samochody osobowe. Wskazuje jednocześnie na konkretne oszczędności w wydatkach na paliwo przy eliminowaniu złych nawyków i dokonaniu zmian, jeśli chodzi o godziny użytkowania samochodu.

Niezależnie od sposobu eksploatacji samochodów istotnym czynnikiem ograniczającym niekorzystne oddziaływanie na środowisko komunikacji samochodowej jest właściwa organizacja ruchu pojazdów. Każdy przestój na skrzyżowaniu lub w korkach samochodowych połączony jest z zatrzymaniem pojazdu i kolejnym ruszaniem, powodując intensywniejsze emitowanie szkodliwych związków do środowiska.

Literatura

- [1] Brzeżański M., *Emisja toksycznych składników spalin w fazie nagrzewania się silnika spalinowego o zapłonie iskrowym z zastosowaniem akumulatora ciepła*. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2006.
- [2] Rokosch U., *Układy oczyszczania spalin i pokładowe systemy diagnostyczne samochodów OBD*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2007.
- [3] Tadeusiewicz R., *Sieci Neuronowe*, Akademicka Oficyna Wydawnicza, Warszawa 1993.
- [4] Mathworks, <http://www.mathworks.com/> (2010).