

MODELOWANIE ZUŻYCIA PALIWA W SILNIKU WYSOKOPRĘŻNYM TYPU DI Z WYKORZYSTANIEM SIECI NEURONOWYCH

Krzysztof BALAWENDER, Kazimierz LEJDA¹

W artykule zostało przedstawione modelowanie zużycia paliwa w silniku wysokoprężnym z bezpośrednim wtryskiem paliwa, wyposażonym w układ wtryskowy Common Rail, z wykorzystaniem sieci neuronowych.

1. WSTĘP

Wzrost wymagań ekologicznych, spowodowanych m.in. znacznym udziałem CO₂ w ociepleniu klimatu (efekt cieplarniany), wywiera presję na producentów samochodów dotyczącą obniżenia emisji tego związku. Najlepszym rozwiązaniem jest obniżenie zużycia paliwa. Obecnie stosowanych jest kilka wariantów zmierzających do rozwiązania tego problemu, m.in. przez zastosowanie napędów elektrycznych i hybrydowych. Niestety rozwiązania te są dość kosztowne i przenoszą problem emisji z jednego miejsca w inne. Silnik spalinowy pozostaje w dalszym ciągu głównym źródłem napędu pojazdów samochodowych. Stąd też prowadzone są w dalszym ciągu badania zmierzające do zmniejszenia zużycia paliwa przez tego typu silniki.

Badania eksperymentalne silników spalinowych są bardzo kosztowne i czasochłonne. Możliwości regulacyjne parametrów wtrysku, jakie daje układ wtryskowy Common Rail, są bardzo duże. Dlatego badania wpływu poszczególnych parametrów procesu wtrysku na parametry silnika wymagałyby przeprowadzenia doświadczeń w bardzo dużej ilości punktów pracy silnika. Analiza wpływu poszczególnych parametrów procesu wtrysku jest złożona ze względu na oddziaływanie jednych parametrów na inne, co utrudnia ich jednoznaczną interpretację. W Zakładzie Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych prowadzone są prace dotyczące obniżenia zużycia paliwa i ilości toksyn w spalinach. Dzięki zastosowaniu planu badań PS/DS-P: λ [3] ograniczono liczbę punktów pracy silnika do 82, w których określono godzinowe i jednostkowe zużycie paliwa. Wyniki te pozwalają na przybliżone określenie charakteru zmian parametrów wyjściowych silnika pod wpływem zadanych wskaźników regulacyjnych procesu wtrysku paliwa.

Celowe jest więc użycie odpowiedniej metodyki dla zbudowania modelu symulacyjnego zużycia paliwa, która pozwoli na uzyskanie wyników w dowolnym punkcie pracy silnika w odniesieniu do parametrów regulacyjnych aparatury wtryskowej zawartych w obszarze badań.

Przeprowadzona próba określenia funkcji obiektu badań w postaci wielomianu na podstawie pomiarów zrealizowanych według programu PS/DS-P: λ nie dała zadowalających wyników, ze względu na negatywną ocenę adekwatności funkcji regresji [1]. Konieczne zatem stało się użycie „narzędzia”, które pozwoli na aproksymację dowolnej rzeczywistej funkcji ciągłej określonej na n-wymiarowym zbiorze. Warunek ten jest możliwy do spełnienia z użyciem sieci neuronowych [4], które są wyrafinowaną techniką modelowania, zdolną do odwzorowania nadzwyczaj złożonych funkcji. Sieci umożliwiają także kontrolę nad złożonym problemem wielowymiarowości, który przy stosowaniu innych metod znacząco utrudnia próby modelowania funkcji nieliniowych z dużą liczbą zmiennych niezależnych [2]. W związku z tym do badań modelowych wybrano właśnie tą metodę, co stanowi treść niniejszego artykułu.

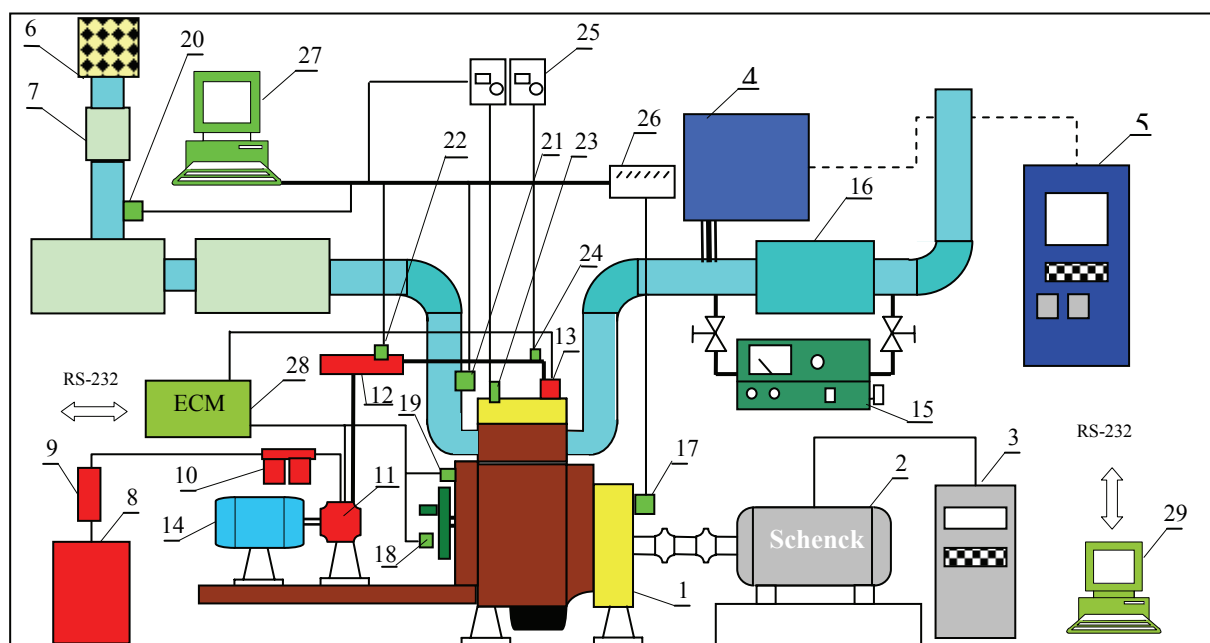
¹ Dr inż. Krzysztof Balawender, Prof. dr hab. inż. Kazimierz Lejda, Politechnika Rzeszowska, Zakład Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych

2. OBIEKT BADAŃ

Obiektem wykorzystywanym do badań był jednocylindrowy silnik badawczy z zapłonem samoczynnym typu SB3.1/CR, wyposażony w zasobnikowy układ wtryskowy typu Common Rail, umożliwiający wtrysk pięciu dawek paliwa na cykl roboczy silnika przy różnych ciśnieniach wtrysku. Silnik ten jest zmodyfikowaną wersją silnika badawczego SB3.1 wyprodukowanego przez Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Sprzętu Komunikacyjnego w Mielcu.

3. STANOWISKO BADAWCZE

W celu przeprowadzenia badań doświadczalnych wpływu parametrów procesu wtrysku na zużycie paliwa zostało zbudowane stanowisko doświadczalne. Szczególny nacisk położono na duże możliwości zmian parametrów wtrysku, które umożliwiłyby przeprowadzenie zamierzonych badań. Schemat stanowiska pomiarowego został przedstawiony na rys. 1



Rys. 1. Schemat stanowiska pomiarowego [1]: 1 – silnik badawczy SB3.1/CR5, 2 – hamulec hydrauliczny, 3 – pulpit sterowniczy hamulca hydraulicznego, 4 – układ poboru próbek spalin systemu pomiaru emisji PM, 5 – pulpit sterowniczy systemu pomiaru emisji PM, 6 – filtr powietrza, 7 – przepływomierz powietrza ze zbiornikami kompensacyjnymi, 8 – system pomiaru zużycia paliwa, 9 – pompa zasilająca, 10 – zespół filtrów, 11 – pompa wysokiego ciśnienia CR, 12 – zasobnik ciśnienia CR, 13 – wtryskiwacz CR, 14 – silnik elektryczny napędzający pompę wysokiego ciśnienia, 15 – układ pomiaru zadymienia spalin, 16 – tłumik wydechu, 17 – czujnik indukcyjny pomiaru GMP, 18 – czujnik indukcyjny pomiaru położenia wału rozrządu, 19 – czujnik indukcyjny pomiaru prędkości obrotowej silnika, 20, 21 – czujniki ciśnienia bezwzględne, 22 – czujnik ciśnienia w zasobniku CR, 23 – czujnik piezokrystaliczny ciśnienia w cylindrze, 24 – czujnik ciśnienia w przewodzie paliwowym łączącym zasobnik ciśnienia z wtryskiwaczem, 25 – wzmacniacze ładunku elektrycznego, 26 – kondycjoner sygnału, 27 – komputer rejestrujący szybkozmienne sygnały elektryczne, 28 – elektroniczny sterownik układu CR, 29 – komputer sterujący parametrami układu CR

Stanowisko badawcze składa się z:

- silnikowego hamulca hydraulicznego typu D-630E firmy Schenck,
- systemu masowego pomiaru zużycia powietrza firmy AVL,
- systemu do indykowania silnika firmy AVL,

- komputerowego systemu rejestracji wielkości szybkozmiennych (m.in. napięcia sterującego pracą wtryskiwacza, prądu w obwodzie wtryskiwacza, sygnałów czujników położenia wału rozrządu i prędkości obrotowej silnika, ciśnień bezwzględnych powietrza w układzie dolotowym silnika) opartego na karcie pomiarowej National Instruments NI PCI-6229 o częstotliwości próbkowania 1 MHz.

Do pomiaru zużycia paliwa metodą masową użyto elektronicznej wagi z interfejsem RS 232 i urządzeniem pomiarowym dokonującym pomiaru w interwałach czasowych 30 sekund, mającym możliwość dokonania dowolnej ilości wyników pomiarów i ich uśrednienia.

4. PLAN BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH

Na potrzeby niniejszego artykułu do analizy wybrano jedną prędkość obrotową silnika SB3.1 (1600 obr/min), przy której występuje maksymalny moment obrotowy. W zasobniku paliwa zastosowano stałe ciśnienie równe 120 MPa. W badaniach zastosowano podział dawki paliwa wtryskiwanej w jednym cyklu roboczym silnika na trzy części: dawkę pilotującą, dawkę przedwtrysku i dawkę główną.

Zastosowanie podziału dawki paliwa wtryskiwanej w jednym cyklu roboczym na trzy części daje sześć różnych parametrów regulacyjnych procesu wtrysku, tj.: kąt wyprzedzenia wtrysku dawki pilotującej, czas trwania dawki pilotującej, kąt wyprzedzenia przedwtrysku, czas trwania przedwtrysku, kąt wyprzedzenia dawki głównej i czas trwania dawki głównej. Pod pojęciem czasu trwania odpowiedniej dawki wtrysku występuje faktycznie czas trwania sygnału elektrycznego sterującego cewką wtryskiwacza elektromagnetycznego, a pod pojęciem kąta wyprzedzenia wtrysku – kąt wyprzedzenia sygnału elektrycznego sterującego cewką wtryskiwacza przed GMP silnika w suwie sprężania.

Tabela 1. Wartości parametrów aparatury wtryskowej dla poszczególnych punktów pomiarowych według planu PS/DS-P: λ : **dp** – czas wtrysku dawki pilotującej, **dpr** – czas wtrysku dawki przedwtrysku, **dg** – czas wtrysku dawki głównej, **kp** – kąt wyprzedzenia dawki pilotującej, **kpr** – kąt wyprzedzenia dawki przedwtrysku, **kg** – kąt wyprzedzenia dawki głównej

punkt pracy silnika	dp	dpr	dg	kp	kpr	kg	punkt pracy silnika	dp	dpr	dg	kp	kpr	kg
	μs	μs	μs	$^{\circ}\text{OWK}$	$^{\circ}\text{OWK}$	$^{\circ}\text{OWK}$		μs	μs	μs	$^{\circ}\text{OWK}$	$^{\circ}\text{OWK}$	$^{\circ}\text{OWK}$
1	370	370	1570	88	41	19	25	370	310	710	88	41	19
2	370	370	1570	88	41	10	26	370	310	710	88	41	10
3	370	370	1570	88	34	19	27	370	310	710	88	34	19
4	370	370	1570	88	34	10	28	370	310	710	88	34	10
5	370	370	1570	63	41	19	29	370	310	710	63	41	19
6	370	370	1570	63	41	10	30	370	310	710	63	41	10
7	370	370	1570	63	34	19	31	370	310	710	63	34	19
8	370	370	1570	63	34	10	32	370	310	710	63	34	10
9	370	370	710	88	41	19	33	310	370	1570	88	41	19
10	370	370	710	88	41	10	34	310	370	1570	88	41	10
11	370	370	710	88	34	19	35	310	370	1570	88	34	19
12	370	370	710	88	34	10	36	310	370	1570	88	34	10
13	370	370	710	63	41	19	37	310	370	1570	63	41	19
14	370	370	710	63	41	10	38	310	370	1570	63	41	10
15	370	370	710	63	34	19	39	310	370	1570	63	34	19
16	370	370	710	63	34	10	40	310	370	1570	63	34	10
17	370	310	1570	88	41	19	41	310	370	710	88	41	19
18	370	310	1570	88	41	10	42	310	370	710	88	41	10
19	370	310	1570	88	34	19	43	310	370	710	88	34	19
20	370	310	1570	88	34	10	44	310	370	710	88	34	10
21	370	310	1570	63	41	19	45	310	370	710	63	41	19
22	370	310	1570	63	41	10	46	310	370	710	63	41	10
23	370	310	1570	63	34	19	47	310	370	710	63	34	19
24	370	310	1570	63	34	10	48	310	370	710	63	34	10

punkt pracy silnika	dp	dpr	dg	kp	kpr	kg	punkt pracy silnika	dp	dpr	dg	kp	kpr	kg
	μs	μs	μs	$^{\circ}\text{OWK}$	$^{\circ}\text{OWK}$	$^{\circ}\text{OWK}$		μs	μs	μs	$^{\circ}\text{OWK}$	$^{\circ}\text{OWK}$	$^{\circ}\text{OWK}$
49	310	310	1570	88	41	19	66	280	340	1140	75	37	15
50	310	310	1570	88	41	10	67	340	400	1140	75	37	15
51	310	310	1570	88	34	19	68	340	280	1140	75	37	15
52	310	310	1570	88	34	10	69	340	340	2000	75	37	15
53	310	310	1570	63	41	19	70	340	340	280	75	37	15
54	310	310	1570	63	41	10	71	340	340	1140	100	37	15
55	310	310	1570	63	34	19	72	340	340	1140	50	37	15
56	310	310	1570	63	34	10	73	340	340	1140	75	44	15
57	310	310	710	88	41	19	74	340	340	1140	75	30	15
58	310	310	710	88	41	10	75	340	340	1140	75	37	24
59	310	310	710	88	34	19	76	340	340	1140	75	37	-5
60	310	310	710	88	34	10	77	340	340	1140	75	37	15
61	310	310	710	63	41	19	78	340	340	1140	75	37	15
62	310	310	710	63	41	10	79	340	340	1140	75	37	15
63	310	310	710	63	34	19	80	340	340	1140	75	37	15
64	310	310	710	63	34	10	81	340	340	1140	75	37	15
65	400	340	1140	75	37	15	82	340	340	1140	75	37	15

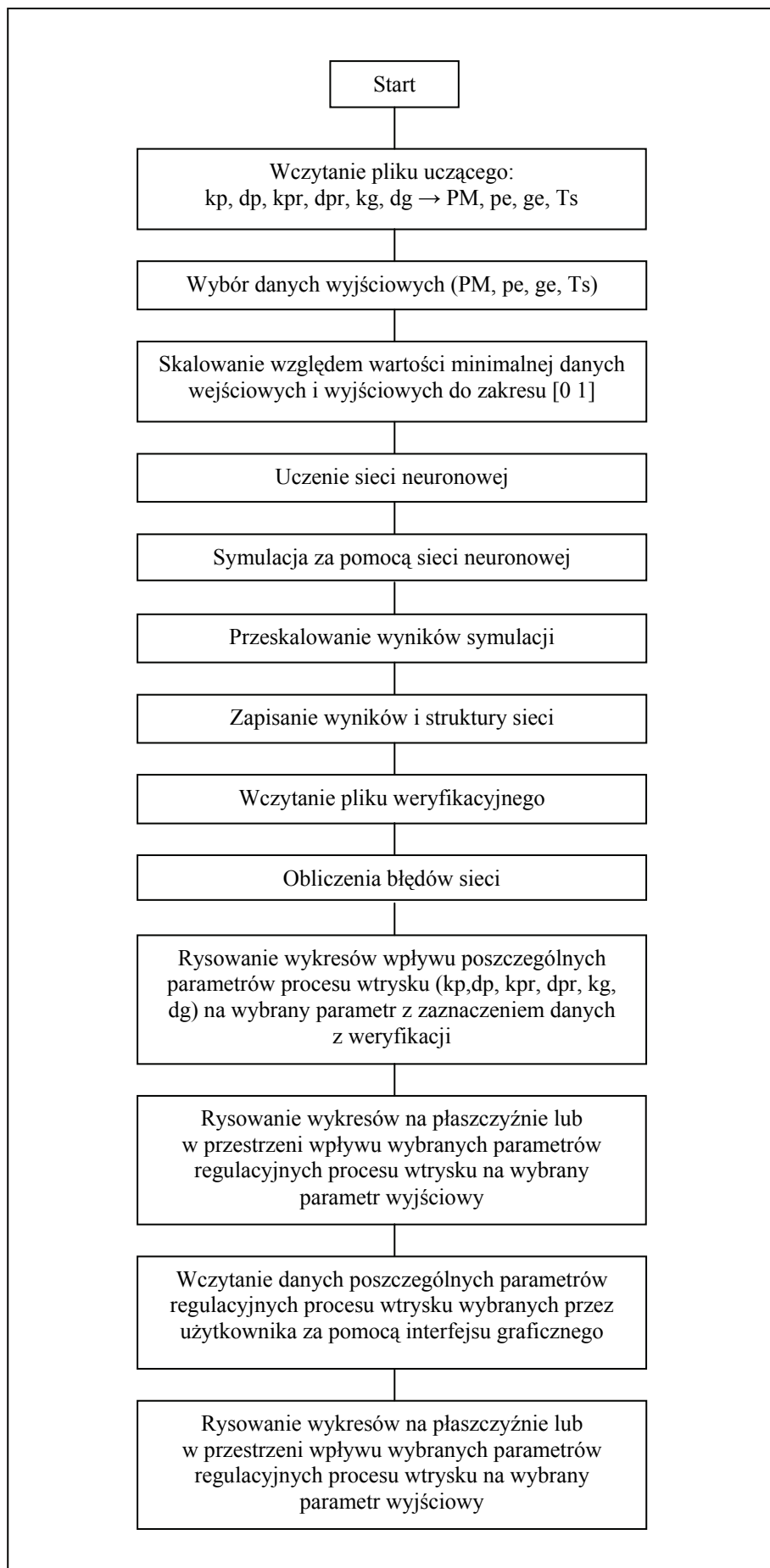
5. STRUKTURA I PARAMETRY WYKORZYSTANEJ SIECI NEURONOWEJ

Do badań modelowych zbudowano wstępnie sieć neuronową, która została „umieszczona” w programie pozwalającym na symulację zużycia paliwa w zależności od ustawionych wybranych parametrów procesu wtrysku. Algorytm programu został przedstawiony na rys. 2. Opracowana struktura sieci pozwoliła na przeprowadzenie symulacji wpływu wybranych parametrów regulacyjnych procesu wtrysku na godzinowe i jednostkowe zużycie paliwa. Symulację przeprowadzono kolejno dla wszystkich wybranych parametrów regulacyjnych procesu wtrysku (tabela 1). Na podstawie tej symulacji wybrano 13 charakterystycznych punktów, dla których przeprowadzono weryfikację na silniku badawczym SB3.1/CR. Z wyników tych badań został zbudowany plik weryfikacyjny.

Porównanie wartości uzyskanych na podstawie symulacji i na podstawie badań pozwoliło na obliczenie wartości błędów względnych i bezwzględnych w poszczególnych punktach. Wartości tych błędów stanowiły podstawę ostatecznego doboru struktury i parametrów sieci tak, aby uzyskać jak najmniejsze ich wartości. Ostatecznie, struktura sieci neuronowej dla jednostkowego zużycia paliwa przyjęła parametry zamieszczone w tabeli 2. Ponieważ program był napisany w strukturze MATLABA, w opisie parametrów sieci w nawiasach przytoczono nazwy z tego programu.

Tabela 2. Struktura wykorzystanych sieci neuronowych

Typ sieci	Sieć o strukturze jednokierunkowej (feedforward) z algorytmem propagacji wstecznej (backpropagation)
Ilość wejść	6
Ilość wyjść	1
Ilość warstw	2
Wymiar 1 warstwy	25
Funkcja transferu 1 warstwy	sigmoidalna bipolarna (tansig)
Wymiar 2 warstwy	1
Funkcja transferu 2 warstwy	liniowa (purelin)
Wymiar 3 warstwy	-
Funkcja transferu 3 warstwy	-
Rodzaj treningu dla sieci	algorytm Levenberga – Marquardta (trainlm)
Rodzaj nauki	metoda spadku gradientu i momentum (learngdm)



Rys. 2. Algorytm programu do symulacji parametrów wyjściowych silnika

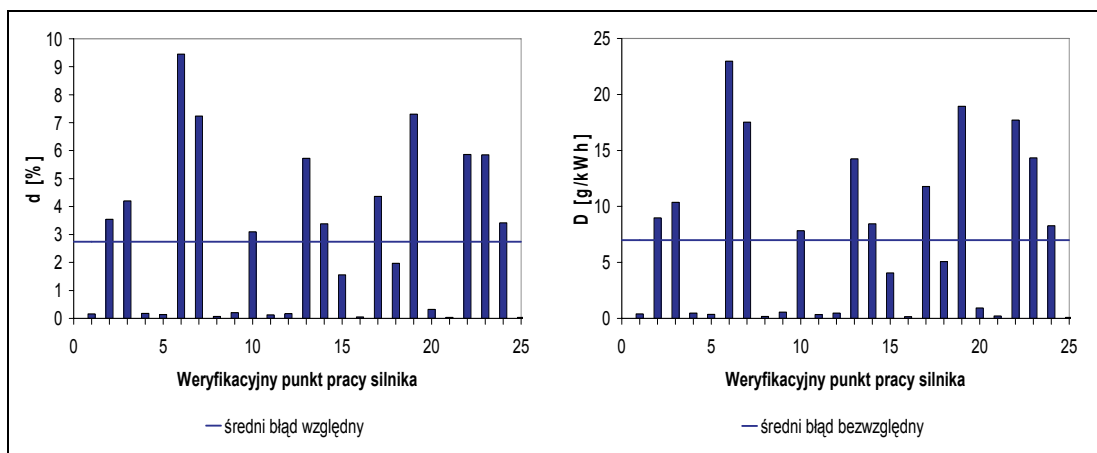
6. WERYFIKACJA EKSPERYMENTALNA MODELU OBLICZENIOWEGO NA PODSTAWIE BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH

Weryfikację modelu obiektu, w którym wykorzystano sieci neuronowe, przeprowadzono dla każdego z wybranych parametrów regulacyjnych. Zmianom wartości podlegał badany parametr regulacyjny, natomiast wartości pozostałych parametrów regulacyjnych były stałe i równe wartościom centralnym z gwiazdnych punktów pracy silnika według planu badań PS/DS-P: λ .

Wyniki uzyskane z symulacji za pomocą „wyuczonej” sieci neuronowej w charakterystycznych punktach (tabela 3) zostały porównane (oddzielnie dla każdego wybranego parametru regulacyjnego procesu wtrysku) z wynikami uzyskanymi podczas badań weryfikacyjnych przeprowadzonych na silniku badawczym SB3.1/CR.

Tabela 3. Weryfikacyjne punkty pracy silnika

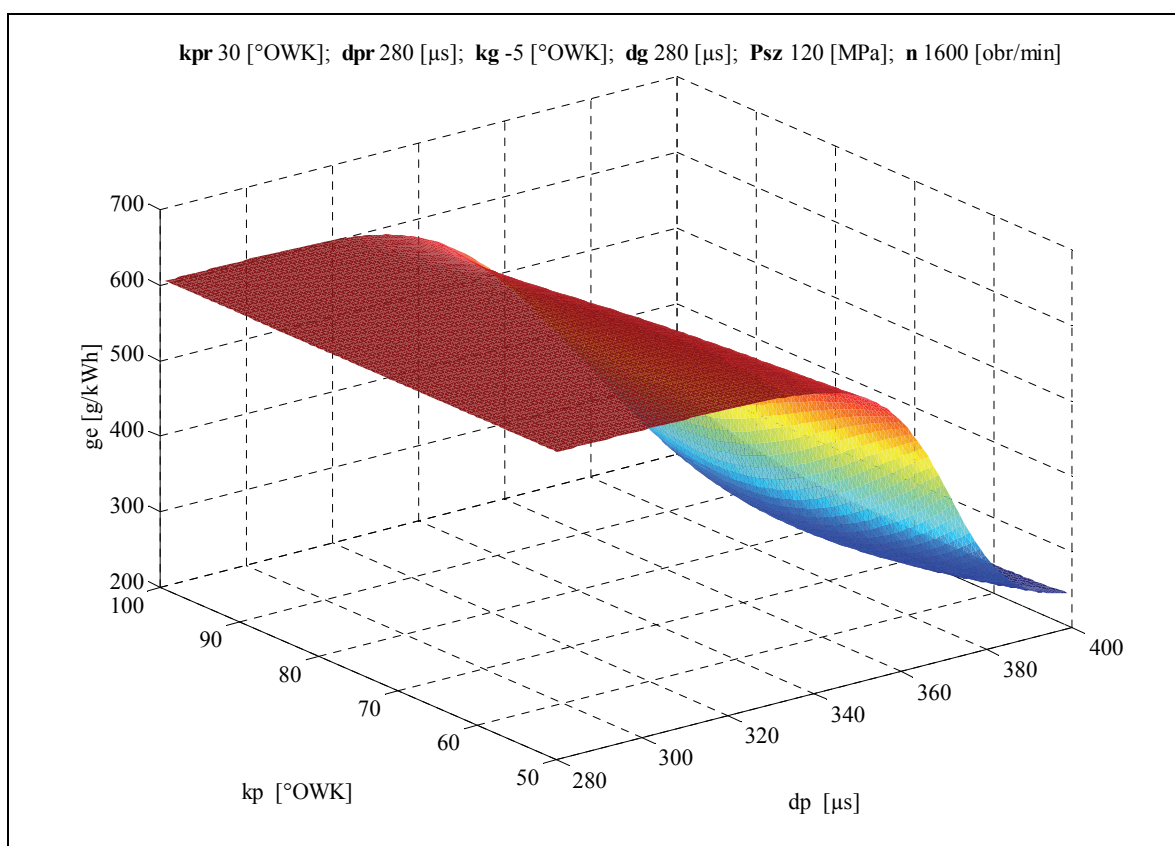
Weryfikacyjny punkt pracy silnika	kp	dp	kpr	dpr	kg	dg	ge	Zmieniany parametr
	°OWK	μ s	°OWK	μ s	°OWK	μ s	G/kWh	
1	50	340	37	340	15	1140	250,00	kp
2	63	340	37	340	15	1140	253,09	
3	94	340	37	340	15	1140	246,79	
4	100	340	37	340	15	1140	258,12	
5	75	280	37	340	15	1140	270,22	dp
6	75	310	37	340	15	1140	243,06	
7	75	360	37	340	15	1140	242,09	
8	75	400	37	340	15	1140	264,88	
9	75	340	30	340	15	1140	267,61	kpr
10	75	340	38	340	15	1140	253,29	
11	75	340	44	340	15	1140	273,97	
12	75	340	37	280	15	1140	274,62	dpr
13	75	340	37	320	15	1140	249,17	
14	75	340	37	365	15	1140	250,00	
15	75	340	37	400	15	1140	260,69	
16	75	340	37	340	-5	1140	286,54	kg
17	75	340	37	340	4	1140	270,52	
18	75	340	37	340	16	1140	256,76	
19	75	340	37	340	22	1140	259,19	
20	75	340	37	340	24	1140	287,88	
21	75	340	37	340	15	280	608,33	dg
22	75	340	37	340	15	650	302,33	
23	75	340	37	340	15	1200	245,19	
24	75	340	37	340	15	1600	242,35	
25	75	340	37	340	15	2000	266,06	



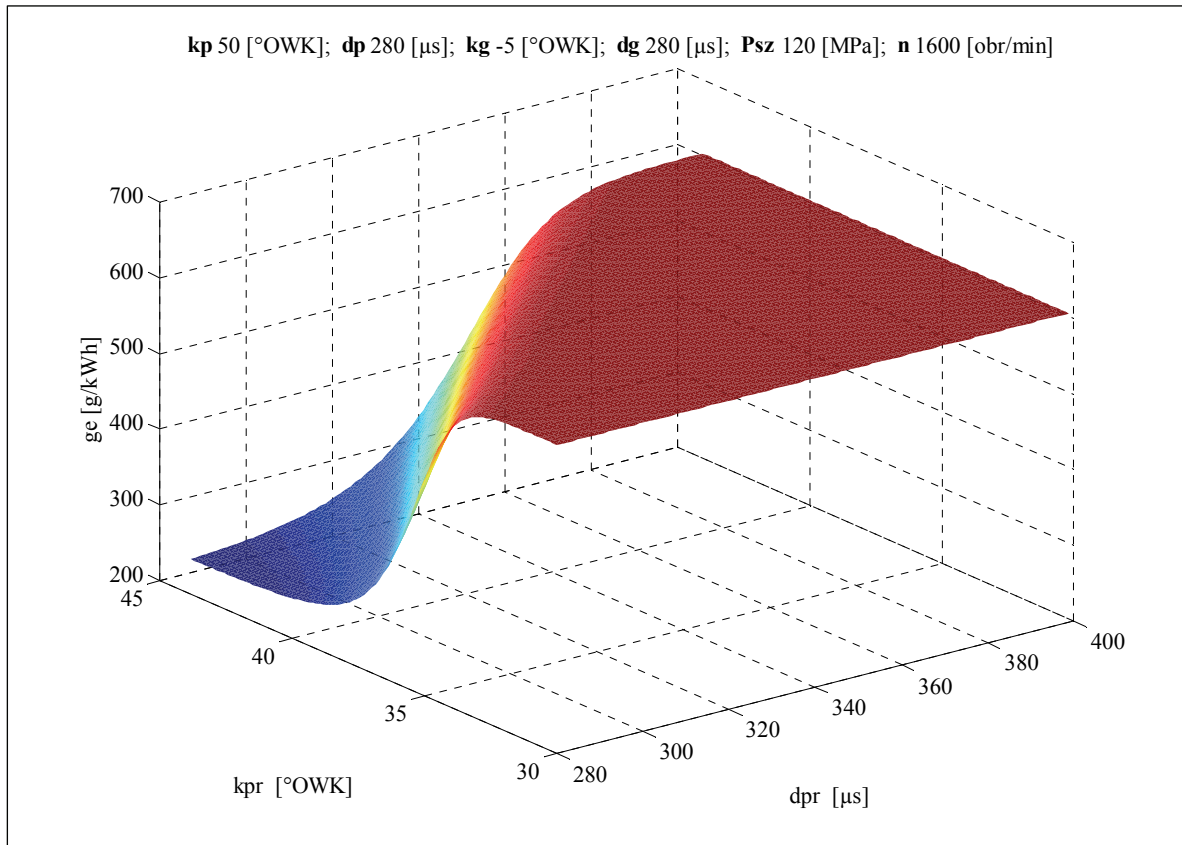
Rys. 3. Błędy w poszczególnych weryfikacyjnych punktach pracy silnika dla jednostkowego zużycia paliwa ge: d – procentowy błąd względny, D – błąd bezwzględny

8. PRZYKŁADOWE WYNIKI SYMULACJI

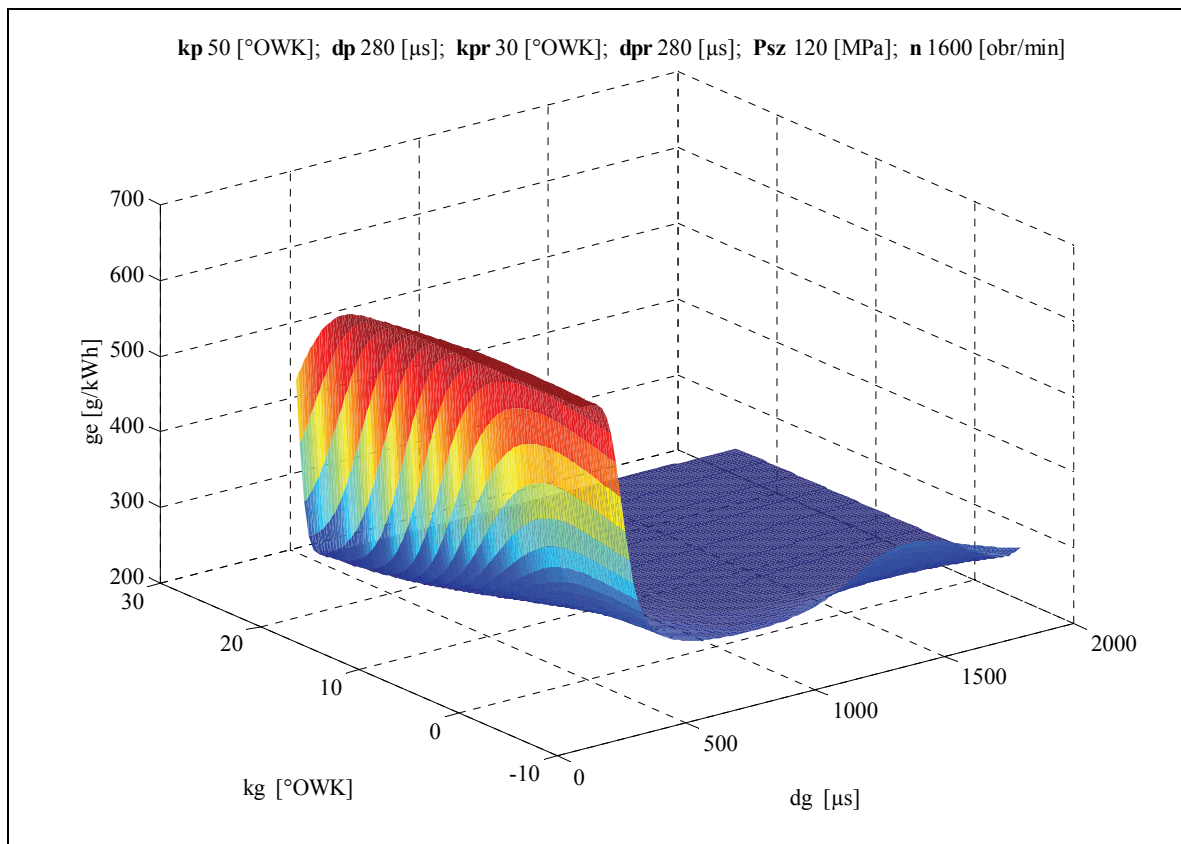
Symulacja została przeprowadzona dla parametrów wtrysku poszczególnych dawek: kąta wyprzedzenia wtrysku i czasu trwania sygnału elektrycznego. Zmianie podlegały parametry jednej dawki w pełnym zakresie jej stosowania podczas badań, natomiast parametry pozostałych dawek były stałe. Symulacji dokonano dla prędkości obrotowej silnika $n=1600$ obr/min i ciśnienia w zasobniku ciśnienia CR $Ps_z=120$ MPa.



Rys. 4. Wpływ czasu trwania d_p i kąta wyprzedzenia k_p dawki głównej na zużycie jednostkowe paliwa przy stałych parametrach pozostałych części dawki



Rys. 5. Wpływ czasu trwania **dpr** i kąta wyprzedzenia **kpr** dawki głównej na zużycie jednostkowe paliwa przy stałych parametrach pozostałych części dawki



Rys. 6. Wpływ czasu trwania **dg** i kąta wyprzedzenia **kg** dawki głównej na zużycie jednostkowe paliwa przy stałych parametrach pozostałych części dawki

5. WNIOSKI

Przeprowadzona weryfikacja modelu zużycia paliwa opartego na sieciach neuronowych wykazała, że średni błąd względny nie przekroczył 3 %. W przeprowadzonych badaniach według planu PS/DS-P: λ możliwe jest określenie błędu powtarzalności pomiaru poprzez przeprowadzenie 6-krotnych pomiarów dla tych samych parametrów. Błąd powtarzalności pomiaru jest mniejszy od 2 %. Dla rozpatrywanych parametrów wyjściowych modelu zachowany jest charakter ich zmian, który jest zgodny z wynikami weryfikacji.

Opracowany program pozwala badać wpływ wybranych parametrów regulacyjnych aparatury wtryskowej na zużycie paliwa przez silniki wysokoprężne z bezpośrednim wtryskiem, wyposażone w układ wtryskowy typu Common Rail umożliwiający podział dawki paliwa wtryskiwanego w jednym cyklu roboczym. Może on znaleźć zastosowanie w optymalizacji parametrów wtrysku w tych silnikach.

5. LITERATURA

- [1] Balawender K.: Wpływ wybranych parametrów regulacyjnych procesu wtrysku na emisję cząstek stałych w silniku wysokoprężnym typu DI. Praca doktorska. Politechnika Rzeszowska 2007.
- [2] Duch W., Korbicz J., Rutkowski L., Tadeusiewicz R.: Sieci neuronowe. Biocybernetyka i inżynieria biomedyczna 2000. Tom 6, Akademicka Oficyna Wydawnicza Exit, Warszawa 2000.
- [3] Polański Z.: Metody optymalizacji w technologii maszyn. PWN, Warszawa 1977.
- [4] Rutkowski L.: Metody i techniki sztucznej inteligencji. PWN, Warszawa 2005.

MODELING FUEL TYPE IN A DIESEL ENGINE DI USING NEURAL NETWORKS

Modeling of fuel in diesel engine with direct fuel injection, equipped with common rail injection system, using neural networks in the paper has been presented.