

STATISTICAL VERIFICATION OF POSSIBILITY OF CREATING OF THE COMBUSTION ENGINE SETS

Lech J. Sitnik

Wroclaw University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering
Institute of Machine Design and Operation
Ign. Łukasiewicza 7/9, 50-371 Wroclaw, Poland
tel. (Fax) +48 22 713477918
e-mail: lech.sitnik@pwr.wroc.pl

Abstract

The investigations were conducted hamowniane of party of 30 combustion engines about sparkle ignition of the same type and kind. The row of parameters in investigations was marked characterizing the engines. Got results were analyzed statistical. With verification this results, that some parameters of engines (how for example maximum rotational moment) they characterize from value of average with comparatively small dispersions. Deviations these contain in borders several percentage what it was it been possible to treat as value in borders of measuring mistakes. Different however, (how for example the temperature of fumes) the larger fluctuations show. It the unexpectedly large dispersions were noticed was near steering parameters of engine such how the relation of air to fuel or else the angle of outdistancing the ignition. Dispersions these come, near small speeds of crank rampart, to tens percentage and get smaller to a dozen or so percentage in measure of growth of rotational speed. There where both set the dispersions the engine how and they are his parameters essential checking seemed purposeful or the correlation exists between values set, and the parameters of engine. This question in present work was introduced on example of correlation of value temperature fumes from two the steering parameters for example the proportion of air and fuel as well as angle of outdistancing the ignition. Decide simultaneously to check, or possible it is the utilizations the statistical methods to creating of value set the engine, and in result this optimizations of his parameters.

Keywords: combustion engines, sets, performance, statistical verification

STATYSTYCZNA WERYFIKACJA MOŻLIWOŚCI KREOWANIA NASTAW SILNIKA SPALINOWEGO

Streszczenie

Przeprowadzono badania hamowniane partii 30 silników spalinowych o zapłonie iskrowym tego samego typu i rodzaju. W badaniach wyznaczono szereg parametrów charakteryzujących silniki. Przeanalizowano statystycznie uzyskane rezultaty. Z weryfikacji tej wynika, że niektóre parametry silników (jak np. maksymalny moment obrotowy) charakteryzują się stosunkowo małymi rozrzutami od wartości średniej. Odchylenia te zawierają się w granicach kilku procent co można potraktować jako wartości w granicach błędów pomiarowych. Inne natomiast, (jak np. temperatura spalin) wykazują fluktuacje większe. Nieoczekiwanie duże rozrzuty zauważono przy nastawach silnika takich jak stosunek powietrza do paliwa czy też kąt wyprzedzenia zapłonu. Rozrzuty te dochodzą, przy małych prędkościach wału korbowego, do kilkudziesięciu procent i zmniejszają się do kilkunastu procent w miarę wzrostu prędkości obrotowej. Tam gdzie zarówno rozrzuty nastaw silnika jak i jego parametrów są istotne wydawało się celowym sprawdzenie czy istnieje korelacja między wartościami nastaw, a parametrami silnika. W niniejszej pracy przedstawiono to zagadnienie na przykładzie korelacji wartości temperatury spalin z dwoma nastawami tj. proporcją powietrza i paliwa oraz kątem wyprzedzenia zapłonu. Jednocześnie postanowiono sprawdzić, czy możliwe jest wykorzystania metod statystycznych do kreowania wartości nastaw silnika, a w rezultacie tego optymalizacji jego parametrów.

Słowa kluczowe: silniki spalinowe, nastawy, osiągi, weryfikacja statystyczna

1. Wstęp

Produkcja silników spalinowych jest od kilkadziesiąt już lat produkcją wielko seryjną. Produkty tak uzyskiwane charakteryzują się nieodzownym rozrzutem cech, a w przypadku silników spalinowych również rozrzutem osiąarów. Jednak postępujący wzrost wymagań, wynikający głównie z potrzeby sprostania coraz ostrzejszym normom emisji toksycznych składników spalin, przy wzroście jednostkowej mocy i obniżaniu jednostkowego zużycia paliwa, a także koniecznością zapewnienia trwałości i niezawodności silników, prowadzą do konieczności zaostżania reżimów produkcyjnych. Jednak trwałość i niezawodność maszyn i urzążeń linii produkcyjnych ulega w trakcie wytwarzania silników zmianom. Skutkuje to zmianami parametrów technologicznych silników i w ślad za tym również zmianami ich osiąarów, w tym proekologicznych. Pokazano to w przykłądnie opisanym w niniejszej publikacji.

Przeprowadzono badania hamowniane partii 30 silników spalinowych o zapłonie iskrowym tego samego typu i rodzaju. W badaniach wyznaczono szereg parametrów charakteryzujących silniki. Przeanalizowano statystycznie uzyskane rezultaty. Z weryfikacji tej wynika, że niektóre parametry silników (jak np. maksymalny moment obrotowy) charakteryzują się stosunkowo małymi rozrzutami od wartości średniej. Odchylenia te zawierają się w granicach kilku procent co można potraktować jako wartości w granicach błędów pomiarowych. Inne natomiast, (jak np. temperatura spalin) wykazują fluktuacje większe (rysunek 1). Nieoczekiwane duże rozrzuty zauważono przy nastawach silnika takich jak stosunek powietrza do paliwa czy też kąt wyprzedzenia zapłonu. Rozrzuty te dochodzą, przy małych prędkościach wału korbowego, do kilkadziesiąt procent i zmniejszają się do kilkunastu procent w miarę wzrostu prędkości obrotowej. Jest to wynik nieoczekiwany zwłaszcza, że rozrzuty wartości nastaw praktycznie nie wpływają na niektóre osiągi silników takie jak maksymalny moment obrotowy czy też jednostkowe zużycie paliwa. Jednak tam gdzie zarówno rozrzuty nastaw silnika jak i jego parametrów są istotne to celowym wydaje się sprawdzenie czy istnieje korelacja między wartościami nastaw z parametrami silników. W niniejszej pracy przedstawiono to zagadnienie na przykłądnie korelacji wartości temperatury spalin z nastawami stosunku powietrza i paliwa oraz kąta wyprzedzenia zapłonu.

2. Metoda wyznaczania korelacji między nastawami a parametrami silnika

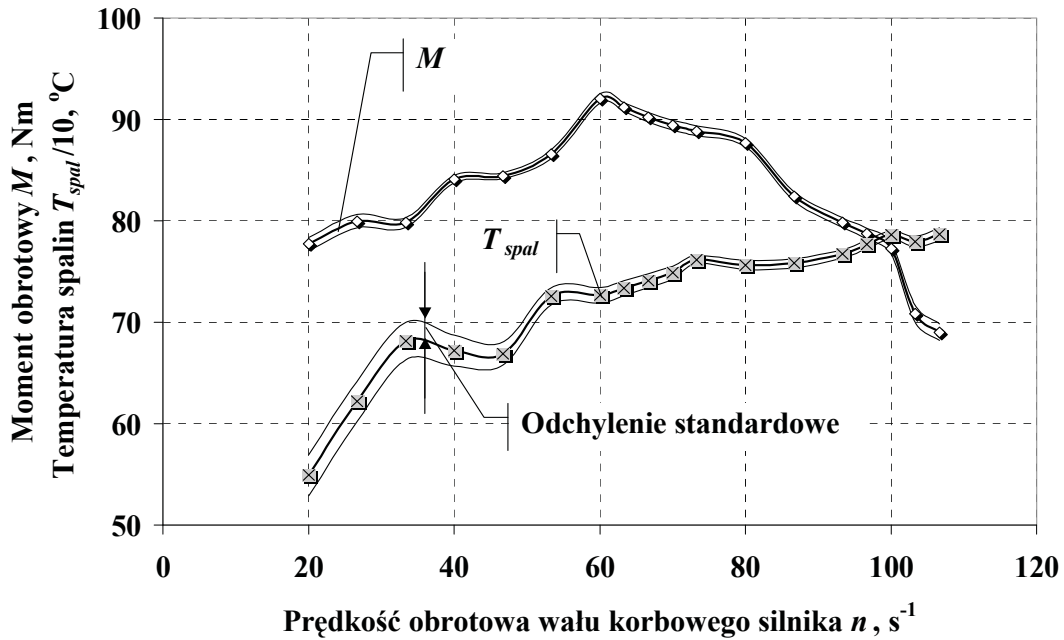
Na rysunku 1. przedstawiono przebiegi maksymalnego momentu obrotowego i odpowiadającej mu temperatury spalin w funkcji prędkości obrotowej wału korbowego silnika. Przedstawiono również wielkość odchylenia standardowego od wartości średniej.

Tworząc z tych wielkości tzw. współczynnik zmienności tj. proporcję odchylenia standardowego do wartości średniej danego parametru, uzyskać można wyraźniejszy obraz wartości rozrzutów. Przebieg współczynnika zmienności obu parametrów przedstawiono na rysunku 2. Widać, że odchylenia od wartości średniej temperatury spalin sięgające 8% są dużo wyższe jak w przypadku momentu obrotowego silnika gdzie odchylenia te ledwie przekraczają 2%, a zatem wartość mieszcząca się praktycznie w granicach błędu pomiarowego.

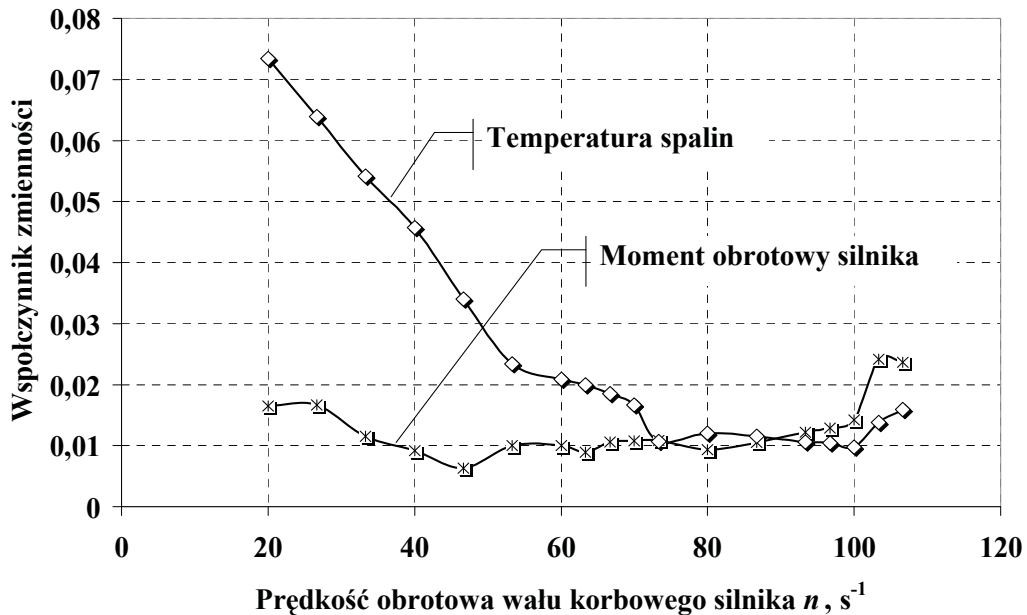
Poszukując zależności między wartościami temperatury spalin, a nastawami silnika analizowano jak kształtują się współzależności między stosunkiem powietrza do paliwa oraz kąta wyprzedzenia zapłonu przy poszczególnych prędkościach obrotowych wału korbowego silnika. Współzależności te, dla wybranego arbitralnie zakresu prędkości obrotowej (zakres ten zaznaczono na rysunku 2), przedstawiono na rysunku 3.

Analizując dane z rysunku 3. stwierdzić można, że pola w których zawarte są odpowiednie wartości są różnej wielkości przy poszczególnych prędkościach obrotowych jak też, że w zasadzie nie pokrywają się. Rozrzut kąta wyprzedzenia zapłonu jest dużo większy jak proporcji powietrza do paliwa. Rozrzut kąta wyprzedzenia zapłonu jest co prawda stosunkowo znaczny (trzeba

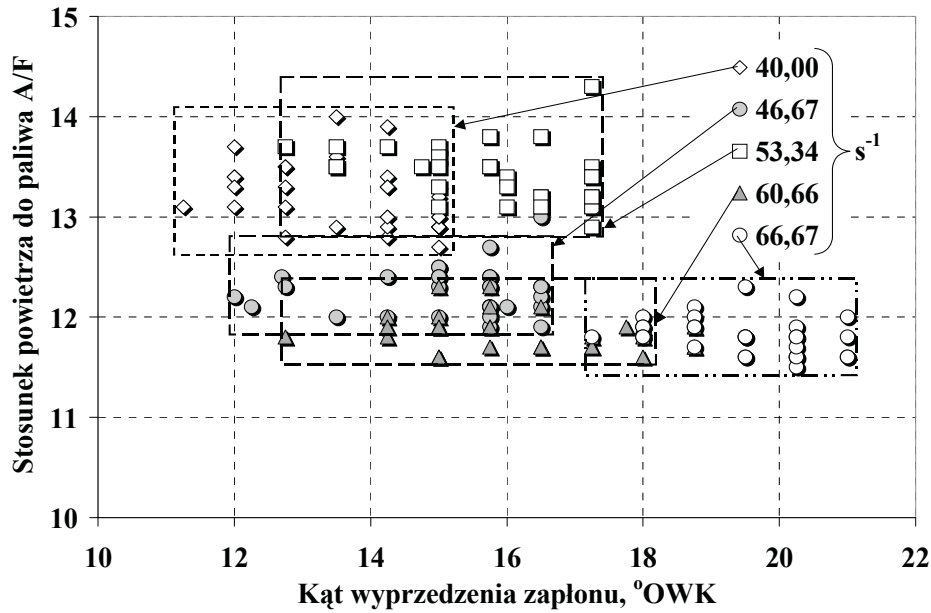
pamiętać, że analizowane są dane z charakterystyk zewnętrznych 30 teoretycznie identycznych silników) ale w zasadzie niewiele zmienia się przy poszczególnych prędkościach wału korbowego silnika, podczas gdy rozrzut proporcji powietrza do paliwa zmienia się w węższych granicach ale wyraźnie jest inny przy poszczególnych prędkościach wału korbowego silnika.



Rys. 1. Przebieg maksymalnego momentu obrotowego oraz odpowiadającej mu temperatury spalin w funkcji prędkości obrotowej wału korbowego silnika
 Fig. 1. The course of maximum rotational moment as well as the answering him temperature of fumes in function of rotational speed of rampart crank engine



Rys. 2. Przebieg współczynnika zmienności momentu obrotowego silnika oraz temperatury spalin w funkcji prędkości obrotowej silnika
 Fig. 2. Course of coefficient of changeability moment rotational engine as well as temperature fumes in function of rotational speed of engine



Rys. 3. Stosunek powietrza do paliwa oraz kąt wyprzedzenia zapłonu przy poszczególnych prędkościach obrotowych wału korbowego silnika

Fig. 3. Relation of air to fuel as well as angle outdistancing the ignition near individual rotational speeds of rampart of crank engine

Poszukując zależności korelacyjnych między analizowanymi nastawami silnika, a temperaturą spalin postanowiono zbudować zależność funkcyjną typu wielomian drugiego stopnia dwu zmiennych. Poszukiwano zatem zależności typu:

$$w_n = k_{0n} + k_{1n}v_1 + k_{2n}v_2 + k_{3n}v_1^2 + k_{4n}v_2^2 + k_{5n}v_1v_2, \quad (1)$$

gdzie:

- w_n - odpowiedź obiektu (temperatura spalin) przy n -tej prędkości obrotowej silnika,
- v_1 - wartość kąta wyprzedzenia zapłonu, °OWK (stopnie Obrotu Wału Korbowego silnika),
- v_2 - wartość stosunku powietrza do paliwa,
- k_{0n}, \dots, k_{5n} - wartości współczynników modelu matematycznego odpowiednie przy poszczególnych wartościach prędkości obrotowej wału korbowego n .

Jeśli przyjąć dalej, że:

\bar{v}_1 - średnia wartość kąta wyprzedzenia zapłonu, °OWK,

\bar{v}_2 - średnia wartość stosunku powietrza do paliwa,

$\Delta v_1 = (v_{1\max} - v_{1\min})/2$ oraz

$\Delta v_2 = (v_{2\max} - v_{2\min})/2$,

(przy czym max oraz min są odpowiednio wartościami największymi i najmniejszymi poszczególnych zmiennych), to obliczyć można wartości standaryzowane obu zmiennych z zależności:

$$x_1 = \frac{v_1 - \bar{v}_1}{\Delta v_1}, \quad x_2 = \frac{v_2 - \bar{v}_2}{\Delta v_2}, \quad (2)$$

gdzie:

- x_1 - zmienna standaryzowana kąta wyprzedzenia zapłonu,
- x_2 - zmienna standaryzowana stosunku powietrza do paliwa,

a model matematyczny (1) przybierze postać:

$$w_n = b_{0n} + b_{1n}x_1 + b_{2n}x_2 + b_{3n}x_1^2 + b_{4n}x_2^2 + b_{5n}x_1x_2, \quad (3)$$

gdzie:

b_{0n}, \dots, b_{5n} - wartości współczynników modelu matematycznego odpowiednie przy poszczególnych standaryzowanych wartościach prędkości obrotowej wału korbowego n .

Z danych rysunku 3 wynika, że kąt wyprzedzenia zapłonu zmieniał się w granicach 11,25 do 21,00 °OWK (Obrotu Wału Korbowego) skąd wynika jego średnia wartość równa 16,125 °OWK oraz wartość $\Delta v_1 = 4,875$ °OWK.

Z kolei proporcja powietrza do paliwa zmieniała się w granicach 11,50 do 14,30 co oznacza, że średnia wartość tej proporcji wynosi 12,90 natomiast $\Delta v_2 = 1,40$.

Biorąc powyższe pod uwagę można było przeprowadzić standaryzację obu zmiennych wg wyżej opisanej procedury. Po tej operacji wartości poszczególnych zmiennych są bezwymiarowe oraz zawierają się w granicach od -1 do 1.

Mając tak zmodyfikowane dane można było przystąpić do wyznaczania współczynników b modelu 3. Tworzono w tym celu przy każdej prędkości obrotowej wału korbowego silnika odpowiednie macierze stanowiące części tabeli 1. Analizę korelacyjną prowadzono wykorzystując standardowe narzędzia programu *Microsoft Excel* zawarte w narzędziach pod nazwą *Regresja*. Jako „Zakres wejściowy Y ” programu traktowano kolumny „6” tabeli typu tabeli 1. Jako „Zakres wejściowy X ” traktowano kolumny „1” do „5” tabeli typu tabeli 1.

Po przeprowadzeniu odpowiednich obliczeń uzyskiwano dane zawierające współczynniki modelu matematycznego (3) oraz szereg współczynników statystycznych obejmujących statystyki regresji oraz analizy wariancji. Współczynniki modelu matematycznego oraz dane z analizy statystycznej zebrano w tabeli 2.

Uzyskane równanie modelowe przedstawia się zatem następująco:

$$w_{46,67} = 690,51094 - 42,87056x_1 + 56,95167x_2 - 8,67199x_1^2 + 42,66853x_2^2 - 64,56740x_1x_2, \quad (4)$$

W kolumnie „7” tabeli 1. przedstawiono wartości temperatury spalin obliczone przy wykorzystaniu modelu 4. Natomiast w kolumnie „8” tej tabeli przedstawiono, wyrażone w procentach, odchylenie wartości obliczonej od wartości zmierzonej odniesione do wartości zmierzonej. Odchylenie to nie przekracza 0,9%, a więc mieści się w granicach błędu pomiaru wartości temperatury spalin.

Tab. 1. Standaryzowane wartości czynników wymuszających oraz wartości temperatury pomierzone i obliczone przy pomocy modelu matematycznego, a także błąd procentowy odchylenia wartości obliczonej od zmierzonej wyznaczone przy prędkości obrotowej 46,67 s⁻¹

Tab. 1. The proportional mistake of deviation of value the standardized values of factors extorting the as well as value of temperature measured and counted near help of mathematical model, and counted also from measured, appointed near rotational speed 46,67 s⁻¹

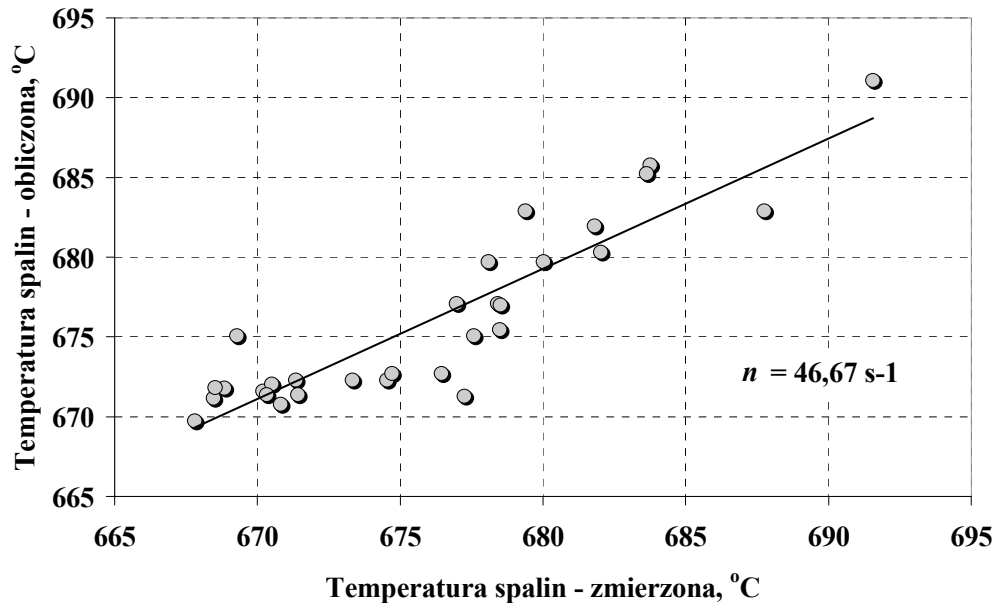
Nr	x_1	x_2	x_1^2	x_2^2	x_1x_2	T_{pom} °C	T_{obl} °C	Odchylenie, %
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0,076923	0,071429	0,005917	0,005102	0,005495	691,56	691,09	0,07
2	-0,230769	-0,285714	0,053254	0,081633	0,065934	679,38	682,90	-0,52
3	-0,076923	-0,142857	0,005917	0,020408	0,010989	683,75	685,78	-0,30
4	-0,076923	-0,357143	0,005917	0,127551	0,027473	676,97	677,09	-0,02
5	-0,076923	-0,357143	0,005917	0,127551	0,027473	678,41	677,09	0,20
6	-0,230769	-0,285714	0,053254	0,081633	0,065934	687,75	682,90	0,71
7	-0,702564	-0,357143	0,493596	0,127551	0,250916	683,62	685,25	-0,24

Nr	x_1	x_2	x_1^2	x_2^2	x_1x_2	T_{pom} °C	T_{obl} °C	Odchylenie, %
	1	2	3	4	5	6	7	8
8	-0,384615	-0,357143	0,147929	0,127551	0,137363	681,80	681,95	-0,02
9	-0,692308	-0,428571	0,479290	0,183673	0,296703	682,03	680,31	0,25
10	-0,846154	-0,500000	0,715976	0,250000	0,423077	678,49	675,45	0,45
11	-0,076923	-0,714286	0,005917	0,510204	0,054945	677,25	671,30	0,88
12	-0,230769	-0,428571	0,053254	0,183673	0,098901	678,51	676,99	0,22
13	-0,230769	-0,357143	0,053254	0,127551	0,082418	678,08	679,72	-0,24
14	-0,230769	-0,357143	0,053254	0,127551	0,082418	680,01	679,72	0,04
15	-0,076923	-0,571429	0,005917	0,326531	0,043956	674,53	672,31	0,33
16	-0,384615	-0,642857	0,147929	0,413265	0,247253	670,82	670,77	0,01
17	-0,076923	-0,428571	0,005917	0,183673	0,032967	669,29	675,06	-0,86
18	0,076923	-0,428571	0,005917	0,183673	-0,032967	674,71	672,72	0,29
19	-0,076923	-0,571429	0,005917	0,326531	0,043956	671,35	672,31	-0,14
20	-0,076923	-0,642857	0,005917	0,413265	0,049451	670,20	671,59	-0,21
21	-0,230769	-0,642857	0,053254	0,413265	0,148352	671,42	671,39	0,01
22	-0,538462	-0,642857	0,289941	0,413265	0,346154	667,80	669,75	-0,29
23	-0,025641	-0,571429	0,000657	0,326531	0,014652	670,51	672,05	-0,23
24	-0,794872	-0,571429	0,631821	0,326531	0,454212	668,47	671,17	-0,40
25	0,076923	-0,714286	0,005917	0,510204	-0,054945	668,84	671,80	-0,44
26	0,076923	-0,571429	0,005917	0,326531	-0,043956	670,33	671,39	-0,16
27	0,076923	-0,500000	0,005917	0,250000	-0,038462	668,51	671,84	-0,50
28	-0,076923	-0,571429	0,005917	0,326531	0,043956	673,33	672,31	0,15
29	0,076923	-0,428571	0,005917	0,183673	-0,032967	676,45	672,72	0,55
30	-0,076923	-0,428571	0,005917	0,183673	0,032967	677,58	675,06	0,37

Tab. 2. Wartości współczynników modelu (3) oraz statystyki regresji i analizy wariancji
 Tab. 2. The value of coefficients of model (3) as well as the statistics of regress and analysis of variances

	Prędkość obrotowa wału korbowego silnika n , s^{-1}					
	40,00	46,67	53,33	60,00	66,67	
Wartości współczynników						
b_0	667,84072	690,51094	727,52421	714,63060	801,06457	
b_1	-8,00334	-42,87056	-6,02153	-26,87644	-74,78052	
b_2	15,32258	56,95167	21,71591	-116,49337	10,29489	
b_3	-2,47204	-8,67199	4,08647	-14,54147	21,38982	
b_4	16,87837	42,66853	9,28438	-104,95599	-43,33950	
b_5	-10,71369	-64,56743	-1,25318	-32,17376	-52,19427	
Statystyki regresji						
Wielokrotność R	0,90	0,90	0,86	0,78	0,84	
R^2	0,82	0,82	0,73	0,61	0,71	
Dopasowany R^2	0,78	0,78	0,68	0,53	0,65	
Błąd standardowy	4,15	2,87	4,78	4,51	3,96	
Obserwacje	30	30	30	30	30	
	Stopni swobody	Analiza wariancji				
Regresja	5	1 845,47	878,01	1 494,27	779,12	926,38
Resztkowy	24	413,71	198,18	549,16	488,82	376,72
Razem	29	2 259,17	1 076,19	2 043,43	1 267,94	1 303,10

Ilustracją dającą odchylenia wartości obliczonych temperatury spalin od wartości zmierzonych jest rysunek 4.



Rys. 4. Odchylenia wartości temperatury spalin obliczonych z wykorzystaniem modelu (4) od wartości zmierzonych
 Fig. 4. Counted the deviations of value of temperature fumes from utilization the model (4) from measured values

Z czysto statystycznego punktu widzenia wysoka korelacja wartości obliczonych temperatury I wartości zmierzonych nie może dziwić, gdyż współczynniki statystyk regresji, a tu np. wartość współczynnika wielowymiarowej korelacji R^2 są stosunkowo wysokie (poza modelem wyznaczonym przy prędkości obrotowej wału korbowego równej $60,00 \text{ s}^{-1}$).

Znając współczynniki równań typu (3) wyznaczyć można ekstremalne wartości czynników wymuszających, przy których odpowiedzi obiektu (w tym przypadku temperatura spalin) przyjmują wartości minimalne lub maksymalne. Różniczkując równanie (3) względem poszczególnych zmiennych x_1 i x_2 uzyskuje się:

$$\frac{dw_n}{dx_1} = b_1 + 2b_3x_1 \quad \frac{dw_n}{dx_2} = b_2 + 2b_4x_2, \quad (5)$$

stąd wartości ekstremalne temperatury spalin występują gdy powyższe pochodne równe są zeru tzn. gdy:

$$x_1 = \frac{-b_1}{2b_3}, \quad x_2 = \frac{-b_2}{2b_4}, \quad (6)$$

O tym jaki rodzaj ekstremum występuje (minimum czy maksimum) decyduje wartość drugiej pochodnej, która wynosi odpowiednio

$$\frac{d^2w_n}{dx_1^2} = 2b_3, \quad \frac{d^2w_n}{dx_2^2} = 2b_4. \quad (7)$$

Odpowiednie wartości tych wielkości przedstawiono w tabeli (3).

Z danych tych wynika, że tam gdzie statystyki regresji były stosunkowo wysokie to wartości modelowe minimum i maksimum temperatury spalin mieszczą się poza obszarem tych wartości wyznaczonych w badaniach eksperymentalnych silników, natomiast przy prędkości obrotowej wału korbowego silnika $60,00 \text{ s}^{-1}$, przy której adekwatność modelu typu (3) nie była zadawalająca wyniki obliczeń nie są zadawalające.

Ta. 3. Wartości modelowe minimalnej i maksymalnej temperatury spalin obliczone i zmierzone
 Tab. 3. The of minimum and maximum temperature of fumes counted model values and measured

Wielkość	Prędkość obrotowa wału korbowego silnika n , s^{-1}				
	40,00	46,67	53,33	60,00	66,67
Ekstremum x_1	-1,6187721	-2,4717839	0,7367631	-0,9241305	1,74804
d^2w/dx_1^2	-4,9440791	-17,343975	8,1729472	-29,082946	42,77963
Rodzaj ekstremum	max	max	min	max	min
Ekstremum x_2	-0,4539115	-0,6673732	-1,1694862	-0,554963	0,11877
d^2w/dx_2^2	33,7567495	85,337061	18,568765	-209,91198	-86,679
Rodzaj ekstremum	min	min	min	max	max
Minimum x_1	1	-1	0,7367631	-1	1
Minimum x_2	-0,4539115	-0,6673732	-1	1	0,11877
Maksimum x_1	-1	1	-1	-0,9241305	-1
Maksimum x_2	1	-1	1	-0,554963	-1
Minimum w_{no} - obliczone	658,75	662,61	713,80	537,69	742,09
Maksimum w_{no} - obliczone	716,29	689,25	769,89	742,87	791,41
Minimum w_{po} - zmierzone	663,99	667,8	724,85	729,38	741,46
Maksimum w_{po} - zmierzone	699,31	691,56	757,13	753,89	767,86

3. Zakończenie

Przedstawiono koncepcję wyznaczania statystycznej korelacji między wartościami parametrów silników a ich nastawami. Koncepcję tą zweryfikowano wynikami badań partii 30 silników o zapłonie iskrowym. Badane silniki były tego samego typu i rodzaju.

Pokazano, że zaobserwowane w badaniach hamownianych silników rozrzuty ich parametrów mogą być skorelowane z wartościami odpowiednich nastaw silników, a w konkretnym przykładzie temperatura spalin obserwowana przy maksymalnym momencie obrotowym silnika zależna może być zarówno od kąta wyprzedzenia zapłonu jak i od proporcji powietrza do paliwa podawanych do silnika.

Przedstawiono obliczenia, z których wynika, że znając model matematyczny zależności temperatury od kąta wyprzedzenia zapłonu i proporcji powietrza do paliwa i wykorzystując go można kreować zarówno minimalne jak i maksymalne wartości temperatury spalin.

Należy przypuszczać, że prowadząc dalsze badania wg opisaney procedury możliwe będzie kreowanie parametrów silnika nie tylko w obrębie jego charakterystyki zewnętrznej, ale również w całym polu charakterystyki uniwersalnej.

Jakkolwiek przedstawione rozważania wymagają dalszej weryfikacji to przedstawiona procedura kreowania modelu matematycznego, składającego się z szeregu równań modelowych tego samego typu, jednak o zmiennych wartościach współczynników w odniesieniu do każdego punktu charakterystyki uniwersalnej silnika, może być pomocna przy aktywnym kreowaniu nastaw silnika. Należy spodziewać się, iż jest to jedna z dróg dalszej poprawy parametrów silnika, zwłaszcza tzw. proekologicznych.