

STATISTICAL VERIFICATION OF COMBUSTION ENGINES PARAMETERS

Lech J. Sitnik

Wroclaw University of Technology
Faculty of Mechanical Engineering
Institute of Machine Design and Operation
ul. Ign. Lukaszewicza 7/9
50-371 Wroclaw (PL)
tel./fax: +48 71 347 79 18
e-mail: lech.sitnik@pwr.wroc.pl

Abstract

There were conducted of the brake stand investigations of party 30 small output sparkle ignition combustion engines. The row of parameters in investigations was marked characterizing the engines. Got results were analyzed statistically. With verification this results, that some parameters of engines such how for example maximum rotatory moment characterize the comparatively small dispersions from value of average for statistical sample. Deviations these contain in borders 2% what it was it been possible to treat as value in borders of measuring mistakes. Other however, as for example the temperature of exhaust gases, show the larger fluctuations - going beyond, especially by some values of rotatory speed, beyond area of standard deviation. It the unexpectedly large dispersions were noticed was by control parameters of engine such how the relation of air to fuel or else the crank angle of the ignition. Dispersions these come, by small speeds of crank rampart, to tens percentage, and they get smaller to a dozen or so percentage in measure of growth of rotatory speed. It is then unexpected result especially that set the dispersions of value practically they do not influence on parameters of engine. It was it been possible was obviously to put that control parameters about which speech do not are decisive for parameters of engine however foundation such should be as it seems, supported with wider investigations.

Keywords: combustion engines, parameters, statistical verification

STATYSTYCZNA WERYFIKACJA OSIĄGÓW SILNIKÓW SPALINOWYCH

Streszczenie

Przeprowadzono badania hamowniane partii 30 silników spalinowych małych mocy o zapłonie iskrowym. W badaniach wyznaczono szereg parametrów charakteryzujących silniki. Przeanalizowano statystycznie uzyskane rezultaty. Z weryfikacji tej wynika, że niektóre parametry silników takie jak np. maksymalny moment obrotowy charakteryzują się stosunkowo małymi rozrzutami od wartości średniej dla próbki statystycznej. Odchylenia te zawierają się w granicach 2% co można potraktować jako wartości w granicach błędów pomiarowych. Inne natomiast, jak np. temperatura spalin, wykazują fluktuacje większe – wykraczające, zwłaszcza przy niektórych wartościach prędkości obrotowej, poza obszar odchylenia standardowego. 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. Jest to wynik nieoczekiwany zwłaszcza, że rozrzuty wartości nastaw praktycznie nie wpływają na osiągi silnika. Oczywiście można założyć, że nastawy o których mowa nie są decydujące dla osiągnięć silnika jednak założenie takie powinno być, jak się wydaje, poparte szerszymi badaniami.

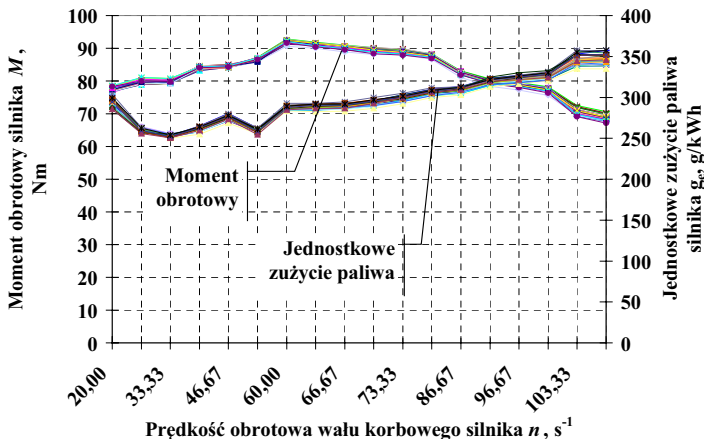
Słowa kluczowe: silniki spalinowe, osiągi, weryfikacja statystyczna

1. Wstęp

Produkcja silników spalinowych jest od kilkadziesiątu już lat produkcją wielkoseryjną. Produkty tak uzyskiwane charakteryzują się nieodzownym rozrzutem cech, a w przypadku silników spalinowych w wyniku tego również rozrzutem osiągnięć. Jednak postępujący wzrost wymagań, wynikający głównie z potrzeby sprostanania jakości coraz ostrzejszym normom emisji toksycznych składników spalin przy wzroście jednostkowej mocy i obniżaniu jednostkowego zużycia paliwa prowadzą do konieczności zaostrzania reżimów produkcyjnych. To wpływa pozytywnie zarówno na jakość jak i osiągi silników, zwłaszcza na ich fluktuacje. Celem niniejszej pracy jest potwierdzenie tego, wydaje się oczywistego spostrzeżenia. Przeprowadzono zatem badania hamowniane partii 30 silników jednego ze znanych koncernów samochodowych. Po zgromadzeniu wyników na kartach pomiarowych stworzono odpowiednią bazę danych. Z bazy tej wybrano dane służące do sporządzenia prędkościowych charakterystyk zewnętrznych. W pracy przedstawiono charakterystyki zewnętrzne maksymalnego momentu obrotowego i odpowiadającego mu jednostkowego zużycia paliwa. Dla tych wielkości wykonano analizy statystyczne wyznaczając podstawowe wielkości analizy statystycznej takie jak średnia, odchylenie standardowe czy współczynnik zmienności, a także rozkłady statystyczne. Wyznaczono również niektóre parametry tych rozkładów w tym kurtozę i skośność. Współczynnik zmienności, kurtoza i skośność w funkcji prędkości obrotowej wału korbowego silnika były podstawą dalszych analiz. Okazało się, że są one zmienne w całym zakresie prędkości obrotowych, przy czym w stosunku do niektórych parametrów silnika zmienność ta jest stosunkowo duża. Wy tłumaczenia tych prawidłowości poszukiwania na drodze wstępnej analizy nastaw silnika. Uzyskane rezultaty okazały się być zaskakujące.

2. Wyniki hamownianych badań silników i ich opracowanie

Przeprowadzono badania hamowniane partii 30-tu silników spalinowych o zapłonie iskrowym. Badania przeprowadzono na w pełni wyposażonej hamowni produkcyjnej. Hamownia jest w pełni zautomatyzowana, co pozwala wykluczyć błędy popełniane przez obsługę. Ponadto pozwala to na zapewnienie powtarzalności warunków badań. Badane silniki były wstępnie dotarte wg cyklu fabrycznego. Na rysunku 1. przedstawiono przebieg zewnętrznej charakterystyki momentu obrotowego poszczególnych silników jak również przebieg, odpowiadającego temu momentowi, jednostkowego zużycia paliwa.



Rys. 1. Moment obrotowy i odpowiadające mu jednostkowe zużycie paliwa badanych silników
Fig. 1. Engine rotatory moment and specifically fuel consumption of investigated engines

Przy każdej prędkości obrotowej wału korbowego silnika występuje rozrzut wartości. Rodzi się pytanie czy rozrzut ten jest znaczący. Odpowiedź na to pytanie uzyskać można między innymi po przeprowadzeniu analizy statystycznej – uwzględniając przynajmniej niektóre, podstawowe jej parametry. W tym celu zgrupowano dane w ten sposób by przy każdej prędkości obrotowej wału korbowego uzyskać 30-to elementowe zbiory wartości. Zbiory te traktowano jako próby z populacji generalnych. Przykład takich zbiorów odniesionych wybranych prędkości obrotowych oraz odpowiadającym im wartościom momentu obrotowego przedstawia poniższa tabela.

Tabela 1. Przykład danych pomiarowych i ich weryfikacji statystycznej
Table 1. Example of measuring data and their statistical verification

Liczba porządkowa	1200	2000	2800	3600	4400	5200	6000
	Prędkość obrotowa wału korbowego silnika n , s^{-1}						
	20,00	33,33	46,67	60,00	73,33	86,67	100,00
Moment obrotowy M , Nm							
1	77,71	79,85	84,49	92,37	89,19	82,98	77,86
2	77,71	79,85	84,49	92,37	89,19	82,98	77,86
3	77,79	80,20	84,69	92,54	89,44	82,49	77,60
4	76,91	79,62	84,31	92,06	88,74	82,75	77,83
5	78,21	80,72	84,50	92,86	89,46	83,08	78,19
6	77,76	79,98	84,58	92,13	89,12	82,62	77,46
7	77,39	79,87	84,58	92,26	89,07	82,68	77,47
8	76,51	79,34	84,69	92,09	89,27	82,72	77,26
9	76,82	79,34	84,13	91,24	88,45	82,19	76,90
10	78,42	80,46	85,08	92,34	89,77	82,91	77,82
11	78,43	79,72	84,53	92,48	89,21	82,48	77,40
12	77,98	80,07	84,59	91,99	88,88	82,59	77,36
13	77,28	79,19	84,16	91,70	88,28	82,19	76,91
14	76,82	79,34	84,13	91,24	88,45	82,19	76,90
15	76,89	79,39	84,29	91,84	89,28	82,80	77,90
16	78,57	80,24	84,99	92,72	89,82	82,90	77,58
17	77,86	79,65	84,60	92,32	88,82	82,66	77,64
18	77,49	79,87	84,30	92,37	88,87	82,50	77,94
19	77,21	79,99	84,05	91,92	88,64	81,93	76,94
20	78,74	80,22	84,56	92,24	89,17	82,38	76,94
21	76,77	79,32	84,21	91,68	88,62	82,22	76,76
22	77,97	80,09	84,74	92,51	88,85	82,63	77,53
23	77,09	79,56	83,94	91,85	88,34	81,98	77,01
24	78,02	79,36	84,38	92,19	88,19	81,86	76,91
25	78,58	79,10	84,22	90,68	88,04	81,12	75,60
26	77,31	79,73	84,46	92,20	89,04	82,10	76,91
27	77,90	80,21	84,60	91,96	88,63	82,27	76,77
28	78,32	80,77	84,17	92,42	88,75	82,13	77,20
29	78,55	80,73	84,63	92,04	88,26	82,02	76,87
30	78,34	79,85	84,30	91,65	87,96	81,82	76,36
Średnia, Nm	77,712	79,854	84,446	92,075	88,860	82,406	77,256
Błąd standardowy, Nm	0,117	0,084	0,048	0,084	0,088	0,079	0,100
Mediana, Nm	77,775	79,850	84,490	92,160	88,860	82,485	77,310
Tryb, Nm	77,710	79,850	84,490	92,370	89,190	82,190	76,910
Odchylenie standardowe, Nm	0,642	0,461	0,265	0,461	0,484	0,435	0,549
Wariancja próbki (Nm) ²	0,412	0,212	0,070	0,213	0,234	0,189	0,302

Kurtoza	-1,115	-0,518	0,083	1,861	-0,567	1,018	1,363
Skośność	-0,175	0,369	0,309	-1,105	0,019	-0,756	-0,772
Zakres	2,230	1,670	1,140	2,180	1,860	1,960	2,590
Minimum, Nm	76,510	79,100	83,940	90,680	87,960	81,120	75,600
Maksimum, Nm	78,740	80,770	85,080	92,860	89,820	83,080	78,190
Suma, Nm	2331,35	2395,63	2533,39	2762,26	2665,80	2472,17	2317,68
Licznik	30	30	30	30	30	30	30
Największy(1), Nm	78,740	80,770	85,080	92,860	89,820	83,080	78,190
Najmniejszy(1), Nm	76,510	79,100	83,940	90,680	87,960	81,120	75,600
Poziom ufności (95,0%)	0,240	0,172	0,099	0,172	0,181	0,162	0,205
Współczynnik zmienności, %	0,826	0,577	0,314	0,501	0,545	0,528	0,711

W wierszach ponumerowanych od 1 do 30 zapisano przykładowe wartości momentu obrotowego.

W dolnej części tabeli 1. podano wyznaczone charakterystyki statystyczne poczynając od wartości średniej, a na współczynniku zmienności kończąc. Współczynnik zmienności zdefiniowano jako stosunek odchylenia standardowego do wartości średniej. Wartość tego współczynnika podano w procentach.

Analizując 30 wartości dowolnej wielkości wyznaczyć można jej rozkład statystyczny. Każdy z kolei rozkład statystyczny opisać można kilkoma parametrami charakterystycznymi w tym kurtozą oraz skośnością.

Kurtoza charakteryzuje względną szczytowość lub płaskość rozkładu. Dodatnia wartość kurtozy oznacza rozkład o stosunkowo dużej szczytowości. Ujemna jej wartość oznacza rozkład stosunkowo płaski.

Wartość kurtozy wyznaczono z zależności

$$\frac{n(n-1)}{(n-1)(n-2)(n-3)} \sum \left(\frac{x_i - \bar{x}}{s} \right)^4 - \frac{3(n-1)^2}{(n-2)(n-3)}, \quad (1)$$

gdzie

n - liczba elementów próbki statystycznej,

x_i - wartość kolejnego elementu próbki statystycznej,

\bar{x}_i - średnia wartość elementu z elementów próbki statystycznej,

s - odchylenie standardowe od wartości średniej.

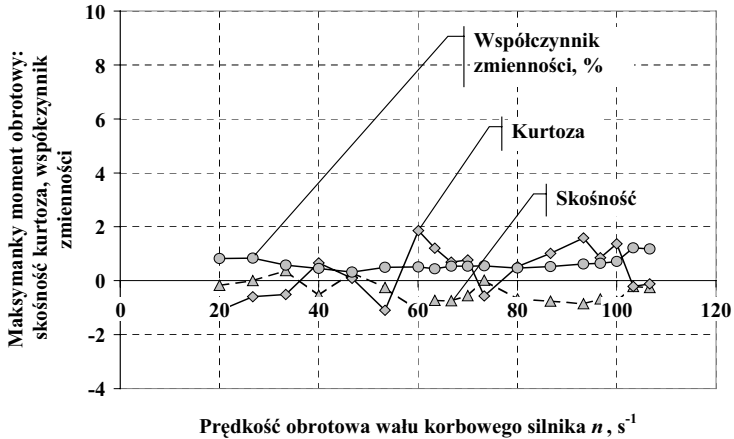
Skośność charakteryzuje stopień asymetrii rozkładu wokół jego średniej. Wyznaczoną ją z zależności:

$$\frac{n}{(n-1)(n-2)} \sum \left(\frac{x_i - \bar{x}}{s} \right)^3. \quad (2)$$

Skośność dodatnia oznacza rozkład z asymetrycznym ogonem rozciągającym się w kierunku do wartości bardziej dodatnich. Skośność ujemna oznacza rozkład z asymetrycznym ogonem rozciągającym się w kierunku wartości bardziej ujemnych.

Obliczenia przeprowadzone odpowiednio dla analizowanych parametrów silnika dały następujące rezultaty.

W odniesieniu do maksymalnego momentu obrotowego silnika (rys. 2.):



Rys. 2. Kurtoza, skośność i współczynnik zmienności maksymalnego momentu obrotowego silnika w funkcji prędkości obrotowej jego wału korbowego

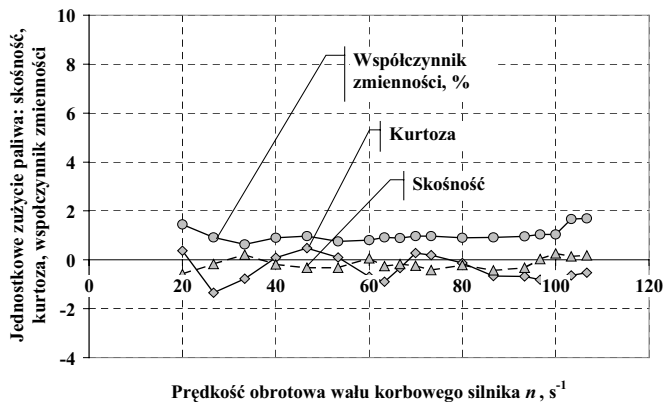
Fig. 2. Kurtosis, skewness and coefficient of variation of maximum rotatory engine moment in function of rotatory speed his crank rampart

W odniesieniu do jednostkowego zużycia paliwa uzyskano następujące wartości (rysunek 3);

Natomiast w odniesieniu do temperatury spalin odpowiadającej maksymalnemu momentowi obrotowemu silnika uzyskano (rysunek 4.):

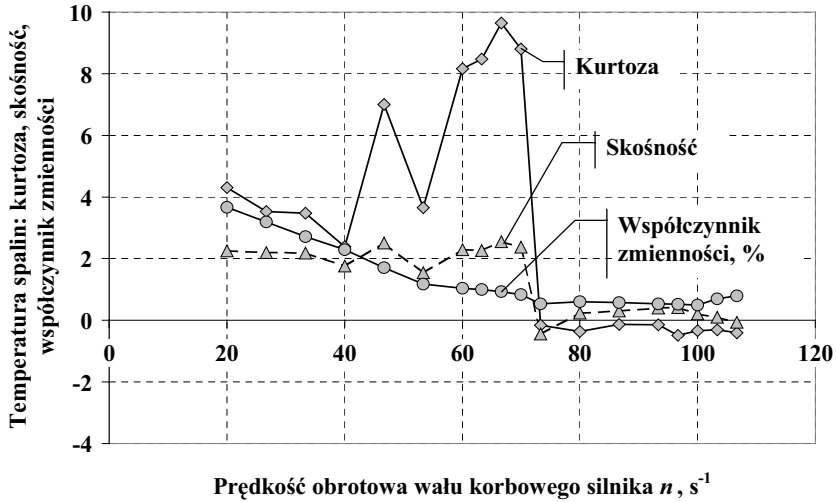
Przeprowadzone obliczenia zilustrowano wykresem zbiorczym (rysunek 5.):

Z obliczeń wynika, że największe zmiany w funkcji prędkości obrotowej silnika uzyskano w przypadku temperatury spalin. Szczególnie duże zmiany wykazuje kurtoza. W zakresie średnich wartości prędkości obrotowej wału korbowego silnika kurtoza ma wartości dodatnie co oznacza, że rozkład statystyczny opisujący tę zmienną charakteryzuje się stosunkowo dużą szczytowością tzn. większość wartości skupia się dookoła wartości średniej. Charakter ten zmienia się przy większych prędkościach wału korbowego silnika. Wówczas kurtoza przyjmuje wartości ujemne co oznacza, że rozkład statystyczny opisujący tą zmienną jest bardziej płaski, czyli występuje większy rozrzut poszczególnych wartości od wartości średniej.



Rys. 3. Kurtoza, skośność i współczynnik zmienności jednostkowego zużycie paliwa silnika w funkcji prędkości obrotowej jego wału korbowego

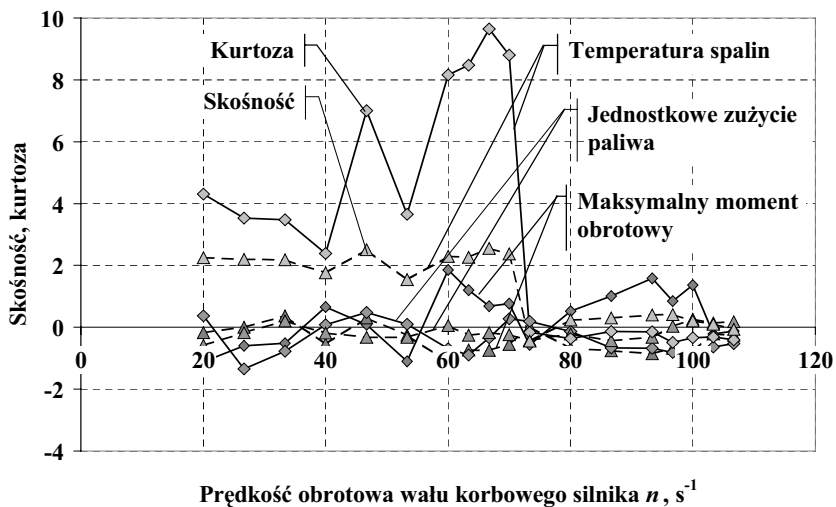
Fig. 3. Kurtosis, skewness and coefficient of variation of specifically fuel consumption in function of rotatory speed engine crank rampart



Rys. 4. Kurtoza, skośność i współczynnik zmienności temperatury spalin silnika w funkcji prędkości obrotowej jego wału korbowego

Fig. 4. Kurtosis, skewness and coefficient of variation of engine exhaust gas temperature in function of rotatory speed engine crank rampart

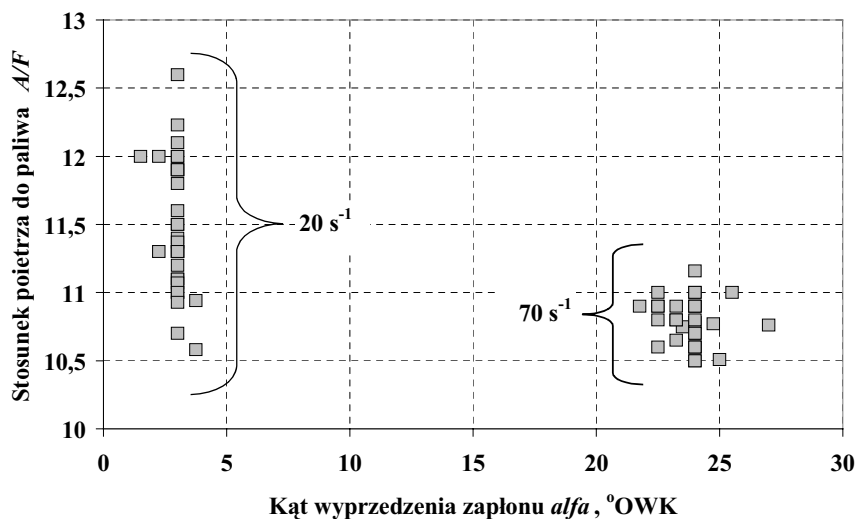
Współczynnik zmienności zarówno przy maksymalnym momencie obrotowym jak również przy jednostkowym zużyciu paliwa jest niewielki i prawie stały w całym zakresie prędkości obrotowej silnika. Oznacza to, że rozrzuty tych zmiennych od wartości średnich są w całym zakresie prędkości obrotowych stosunkowo nieznaczne. Kurtoza i skośność w przypadku obu zmiennych są również niewielkie, ale w funkcji prędkości obrotowej wału korbowego silnika kilkakrotnie przechodzą od wartości dodatniej do ujemnej i odwrotnie. Nie jest przedmiotem niniejszej publikacji analizowanie przyczyn takiego stanu rzeczy.



Rys. 5. Kurtoza, skośność i współczynnik zmienności parametrów silnika w funkcji prędkości obrotowej jego wału korbowego

Fig. 5. Kurtosis, skewness and coefficient of variation of engine parameters in function of rotatory speed engine crank rampart

Wydaje się, że podstawową rolę odgrywają nastawy silnika. Warto zatem zwrócić uwagę np. na zależności między nastawami silnika, w szczególności proporcją powietrza do paliwa w odniesieniu do kąta wyprzedzenia zapłonu.



Rys. 6. Stosunek powietrza do paliwa jako funkcja kąta wyprzedzenia zapłonu przy różnych prędkościach obrotowych wału korbowego silnika

Fig. 6. Air to fuel ratio as function of ignition crank angle by different rotatory speed engine crank rampart

Uzyskany wynik jest nieoczekiwany. Przy niskich prędkościach obrotowych wału korbowego silnika ($20 s^{-1}$) występują stosunkowo duże rozrzuty stosunku powietrza do paliwa (ok. 60 %) przy dużo mniejszych rozrzutach kąta wyprzedzenia zapłonu (ok. 15 %). W tych warunkach zarejestrowano dość duże rozrzuty temperatury spalin przy niewielkich rozrzutach maksymalnego momentu obrotowego czy odpowiadającego mu jednakowego zużycia paliwa. Z kolei przy wyższych prędkościach obrotowych silnika ($80 s^{-1}$) rozrzuty stosunku powietrza do paliwa wynoszą ok. 13 %, a kąta wyprzedzenia zapłonu 6 %. Przy tych stosunkowo mniejszych rozrzutach wartości nastaw rozrzuty maksymalnego momentu obrotowego, odpowiadającego mu jednostkowego zużycia paliwa oraz temperatury spalin są stosunkowo niewielkie. Wynika stąd, że nawet duże rozrzuty nastaw nie wpływają znacznie na osiągi silnika takie jak moment obrotowy czy zużycie paliwa natomiast wpływają na takie parametry jak temperatura spalin czyli pośrednio również na emisję toksycznych składników spalin.

3. Zakończenie

Przeprowadzono badania hamowniane partii 30 silników spalinowych małej mocy o zapłonie iskrowym. W badaniach tych prowadzonych na tzw. hamowni produkcyjnej wyznaczono szereg parametrów charakteryzujących silniki. Zakładając, że zautomatyzowana hamownia daje dużą powtarzalność warunków badań przeanalizowano statystycznie uzyskane rezultaty. Z weryfikacji statystycznej wynika, że niektóre parametry silników takie jak maksymalny moment obrotowy charakteryzują się stosunkowo małymi rozrzutami od wartości średniej dla próbki statystycznej. Odchylenia te zawierają się w granicach 2% co można potraktować jako wartości w granicach błędów pomiarowych. Inne natomiast, jak np. temperatura spalin, wykazują fluktuacje większe – wykraczające, zwłaszcza przy niektórych wartościach prędkości obrotowej, poza obszar odchylenia standardowego.

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. Jest to wynik nieoczekiwany zwłaszcza, że rozrzuty wartości nastaw praktycznie nie wpływają na osiągi silnika. Oczywiście można założyć, że nastawy o których mowa nie są decydujące dla osiągnięć silnika jednak założenie takie powinno być, jak się wydaje, poparte szerszymi badaniami.