

REAL & MODEL EXTERNAL CHARACTERISTICS OF COMBUSTION ENGINE

Lech J. Sitnik

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

Abstract

The characteristics of combustion engines be calculated from dawn. The characteristics, they are resulting from current theory, are giving as a smooth curves. This is a generalization. The current characteristics of combustion engines are much more complicated. The present engines which to fulfill have the rigorous norms of emission of toxic components of exhaust gases, they be controlled of many parameter, much more exactly as their equivalents in past. Today's controlling is the controlling in function of many influencing factors on row of processes realized in engines simultaneously. All this causes effect, that the course of characteristics, especially external is not monotonic. It the courses of characteristics of maximum output, maximum rotatory moment and specifically fuel consumption in work were appointed on basis of investigations 30 sparkle ignition engines. Characteristics these were calculated on basis of exact investigations on engine brake stand. Were affirmed the comparatively large deviations from idealized characteristics near simultaneously comparatively small dispersions of maximum output or else rotatory moment between investigated engines. The deviation from smooth curves in case of engine output are bigger by higher rotation speed of engine, in case of rotatory moment by medium engine speed and in case of specifically fuel consumption by lower to medium engine speed.

Key words: combustion engines, brake stand investigations, external characteristics.

RZECZYWISTE I MODELOWE CHARAKTERYSTYKI ZEWNĘTRZNE SILNIKA SPALINOWEGO

Streszczenie

Charakterystyki silników spalinowych wyznaczane są od zarania ich produkcji. Przedstawia się je w postaci krzywych. Jest to uogólnienie. Współczesne silniki, które spełniać muszą rygorystyczne normy emisji toksycznych składników spalin, sterowane są o wiele bardziej precyzyjnie jak ich odpowiedniki sprzed kilkunastu lat. Sterowanie to jest sterowaniem w funkcji wielu czynników wpływających jednocześnie na szereg procesów realizowanych w silnikach. Wszystko to powoduje, że przebieg charakterystyk, zwłaszcza zewnętrznych nie jest monotoniczny. W pracy przedstawiono przebiegi charakterystyk maksymalnej mocy, maksymalnego momentu obrotowego oraz odpowiadającego im jednostkowego zużycia paliwa, wyznaczone na podstawie badań 30 silników o zapłonie iskrowym. Charakterystyki te wyznaczono na podstawie dokładnych badań na hamowni silnikowej. Stwierdzono stosunkowo duże odstępstwa od krzywych wyidealizowanych przy jednocześnie stosunkowo niewielkich rozrzutach maksymalnej mocy czy też momentu obrotowego między poszczególnymi egzemplarzami silników

Słowa kluczowe: silniki spalinowe, charakterystyki zewnętrzne, badania hamowniane.

1. Wstęp

Teoria silników spalinowych znana jest w od kilkudziesięciu już lat. Jej rozwijanie uległo jednak, jak się wydaje, częściowemu zahamowaniu. Dzieje się tak z kilku przyczyn – najważniejsza to rozwój metod modelowania cyfrowego. Projektując silnik nikt już dziś nie zaczyna od obliczeń tzw. podstawowych od wyznaczania ogólnych jego wymiarów. Raczej dąży się do modelowania poszczególnych procesów zachodzących w silniku dążąc przy tym do jednoczesnego modelowania zarówno procesów zachodzących w czynniku roboczym jak też w strukturze konstrukcyjnej (np. [2]). Można postawić pytanie czy zmiana narzędzi projektowania i optymalizacji powoduje, że zależności wyprowadzone z zasad termodynamiki tracą swą ogólną, a może lepiej powiedziawszy uogólniającą wartość. Odpowiedź na to pytanie nie jest oczywiście prosta zwłaszcza, że aspektów w których problem może być analizowany jest wiele. Nie oznacza to jednak, że wysiłku takiego nie należy podejmować. W pracy, której częścią są wyniki prezentowane w niniejszym artykule przyjęto założenie, że optymalizacja parametrów silników musi prowadzić do takich ich osiągnięć, które odbiegają od tych jakie wynikają z ogólnych charakterystyk. Właśnie te odstępstwa mogą być miarą wysiłków optymalizacyjnych. Rozważania w omawianej tematyce potwierdzono badaniami silników opuszczających taśmy produkcyjne jednej z fabryk dużego koncernu samochodowego

W niniejszym artykule przedstawiono maksymalne osiągi tych silników. Pozwoliło to wyznaczyć charakterystyki zewnętrzne silników, a te skonfrontować z poglądami co do kształtu takich charakterystyk i odstępstw od nich.

2. Charakterystyki prędkościowe silnika w zapisie ogólnym

Nie wdając się w tym miejscu w szczegółowy zapis wyprowadzenia zależności mocy, momentu obrotowego czy też jednostkowego zużycia paliwa, który można znaleźć np. w [1], zależności te przedstawić można następująco:

$$N = K \eta_v(n) \frac{\eta_c(n)}{\lambda(n)} \eta_m(n) n, \quad (1)$$

gdzie:

- N - jest mocą silnika,
- K - jest współczynnikiem zależnym od konstrukcji i rodzaju silnika,
- λ - jest współczynnikiem nadmiaru powietrza,
- η_v - jest sprawnością napełnienia silnika,
- η_c - jest sprawnością cieplną silnika,
- η_m - jest sprawnością mechaniczną silnika,
- n - jest prędkością obrotową wału korbowego silnika.

Prędkość obrotowa wału korbowego silnika jest, w przypadku silników trakcyjnych, wielkością zmienną. Jeśli zatem założyć, że pozostałe wartości prawej strony równania (1) przyjmują w jej funkcji wartości stałe, to wówczas moc silnika jako jej funkcja byłaby zależnością liniową z zerem w początku układu współrzędnych. Jak wiadomo tak nie jest gdyż wszystkie wielkości prawej strony równania są zmienne. Najczęściej zatem przebieg mocy silnika w funkcji prędkości obrotowej jego wału korbowego przedstawia się tak jak tu pokazano na rysunku 1.

Moment obrotowy silnika przedstawić można jako:

$$M = C \eta_v(n) \frac{\eta_c(n)}{\lambda(n)} \eta_m(n), \quad (2)$$

gdzie

- M - jest momentem rozwijanym przez silnik,
- C - jest stałą zależną od cech silnika i przyjętych jednostek.

Moment obrotowy silnika przyjmuje w funkcji prędkości obrotowej wału korbowego silnika wartości stałe. W rzeczywistości jego przebieg odbiega od prostej ze względu na fakt, że pozostałe wielkości w funkcji prędkości obrotowej wału korbowego silnika nie są stałymi.

Przebieg momentu obrotowego w funkcji prędkości obrotowej wału korbowego silnika przedstawia rysunek 1.

Jednostkowe zużycie paliwa przestawić można jako:

$$g_e = \frac{G_e(n)}{\eta_v(n) \frac{\eta_c(n)}{\lambda(n)} \eta_m(n) n}, \quad (3)$$

gdzie

g_e - jest jednostkowym zużyciem paliwa,

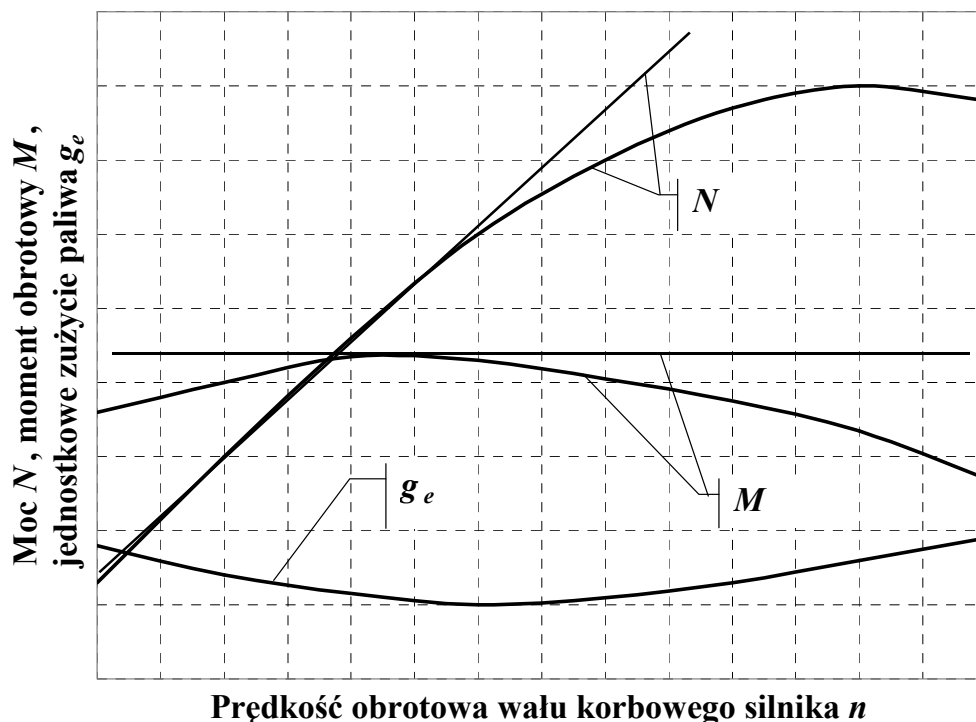
G_e - jest masą paliwa zużytej przez silnika w jednostce czasu.

Jednostkowe zużycia paliwa jest wielkością, generalnie rzecz ujmując, odwrotnie proporcjonalną do prędkości obrotowej wału korbowego silnika. W rzeczywistości, wobec faktu, że wielkości występujące po prawej stronie równania (3) są funkcjami prędkości obrotowej wału korbowego silnika, jej przebieg podaje się jak na rysunku 1.

3. Charakterystyki prędkościowe silnika

Charakterystyki prędkościowe współczesnych silników spalinowych odbiegają od charakterystyk wyidealizowanych.

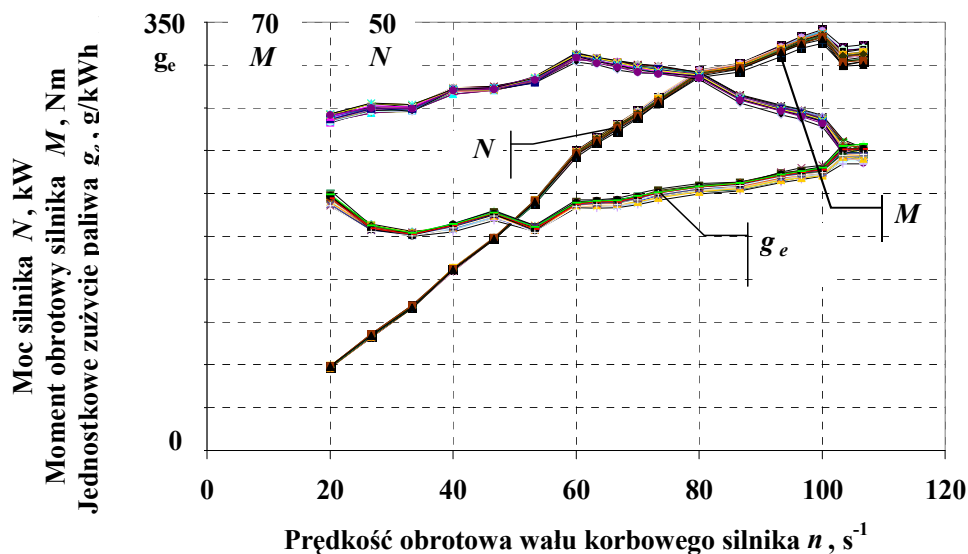
Widać to dobrze na przykładzie przeprowadzonych badań partii 30-tu silników



Rysunek 1. Wyidealizowane charakterystyki zewnętrzne silnika

Fig. 1. The idealized external profiles of engine

Na rysunku 2 przedstawiono graficznie prędkościowe charakterystyki zewnętrzne partii 30 silników o zapłonie iskrowym. Badania wykonano na hamowni silnikowej po procesie wstępnego docierania silnika. Hamownia jest wyposażona we wszystkie układy pozwalające wykonać w sposób powtarzalny procedury badań.



Rys. 2. Charakterystyki zewnętrzne badanych silników
 Fig. 2. External profiles of investigates engines

Widać, że rozrzut wartości mocy wzrasta w miarę wzrostu prędkości obrotowej silnika. Natomiast rozrzuty zarówno momentu obrotowego jak też jednostkowego zużycia paliwa w całym zakresie tej prędkości utrzymują się mniej więcej na tym samym poziomie.

Przebiegi nie są monotoniczne. Jest to odstępstwo od przebiegów teoretycznych.

Dalej przeprowadzono analizę statystyczną uzyskanych wyników. Analizowano poszczególne parametry silników przy każdej prędkości obrotowej ich wału korbowego traktując je jako 30-to elementowe próby z populacji generalnej. Wyznaczono szereg parametrów statycznych. Dla przykładu podano tu wynik analizy statystycznej wartości momentu obrotowego przy prędkości 40 s⁻¹.

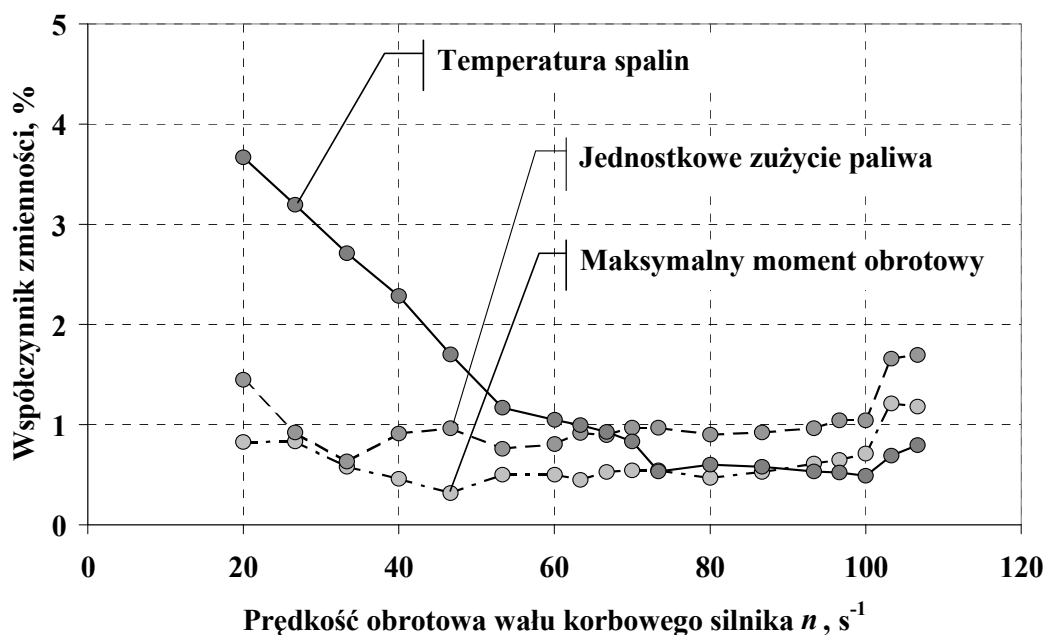
Tab 1. Przykład analizy statystycznej momentu obrotowego silnika przy prędkości obrotowej jego wału korbowego równej 40 s⁻¹

Tab. 1. Example of statistical analysis of engine torque by crank rampart rotatory speed even 40 s⁻¹

Średnia, Nm	84,10933
Błąd standardowy, Nm	0,070332
Mediana, Nm	84,135
Tryb, Nm	83,95
Odchylenie standardowe, Nm	0,385227
Wariancja próbki, (Nm) ²	0,1484
Kurtoza	0,657659
Skośność	-0,54362
Zakres	1,59
Minimum, Nm	83,19
Maksimum, Nm	84,78
Suma	2523,28
Licznik	30
Poziom ufności(95,0%)	0,143846

Podobne analizy wykonano dla wszystkich parametrów i przy każdej wyznaczonej prędkości obrotowej wału korbowego silnika. Tu na dalszych wykresach, dla przejrzystości obrazu, zaprezentowano jedynie wartości średnie.

Jest charakterystycznym, że rozrzut wartości poszczególnych parametrów od wartości średniej wyznaczany jako proporcja odchylenia standardowego do wartości średniej (co oznaczono jako współczynnik zmienności) jest niewielki (rysunek 3.) – kształtuje się poniżej 2%.



Rys. 3. Współczynnik zmienności jako funkcja prędkości obrotowej wału korbowego silnika
Fig. 3. Coefficient of changeability as function of rotatory speed of engine crank rampart

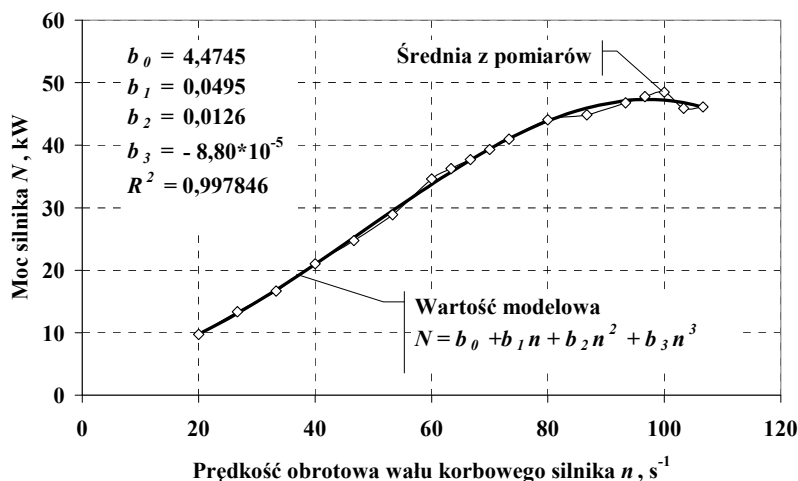
Na uwagę zasługuje fakt, że rozrzuty poszczególnych wielkości są zmienne w funkcji prędkości obrotowej. Rozrzuty wartości momentu obrotowego czy też jednostkowego zużycia paliwa są stosunkowo nieznaczne. Nie jest to reguła. Ze zbioru danych podano dla przykładu również przebieg współczynnika zmienności temperatury spalin. Jakkolwiek i w przypadku tej wielkości rozrzuty statystyczne nie są znaczne tym nie mniej przy niskich prędkościach obrotowych są kilkukrotnie większe jak rozrzuty wartości momentu obrotowego. Jest interesujące, że rozrzuty te z kolei przy wysokich prędkościach obrotowych są niższe jak rozrzuty momentu obrotowego.

Ponieważ rozrzuty, generalnie rzecz biorąc, są niewielkie (w przypadku prezentowanych w tabeli 1 przykładowych danych jest to wartość 0,458 %), w dalszej analizie zatem przedstawiono tu na rysunkach 4 – 6 jedynie wartości średnie.

Dane przedstawione na rysunku 2 pozwalają sądzić o istnieniu odstępstw od charakterystyk modelowych. Należało zatem znaleźć miarę tego odstępstwa. Przyjęto, że miarą tą będzie jeden ze współczynników predykcji np. współczynnik korelacji R^2 . To proste założenie jest trudne w zastosowaniu gdyż, w przypadku charakterystyk zewnętrznych silnika, nie podaje się w zasadzie odpowiadających im równań modelowych. Zatem skoro nie ma równań modelowych to i nie ma możliwości wyznaczenia ich dopasowania do wyników pomiarów. W tej sytuacji do opisu przebiegów charakterystyk zewnętrznych silnika przyjęto arbitralnie wielomiany wyższych stopni, a po analizie obliczeniowej okazało się, że najlepsze dopasowanie uzyskano stosując wielomian stopnia trzeciego.

Rysunek 4 przedstawia wartości średnie maksymalnego momentu rozwijanego przez silnik przy poszczególnych prędkościach obrotowych jego wału korbowego. Na rysunku przedstawiono również przebieg krzywej wielomianu trzeciego stopnia, którym wartości te aproksymowano.

Już na pierwszy rzut oka widać stosunkowo dobre dopasowanie krzywej modelowej do wyników uzyskanych z pomiarów. Potwierdzeniem tego faktu jest wysoka wartość współczynnika korelacji R^2 . Trzeba jednak wyraźnie podkreślić, że jakkolwiek krzywa aproksymująca, generalnie rzecz ujmując, dobrze odpowiada wynikom badań, to jednak odstępstwa od niej nie są przypadkowe i nie mieszczą się w wartościach wyznaczonych przez odchylenie standardowe.

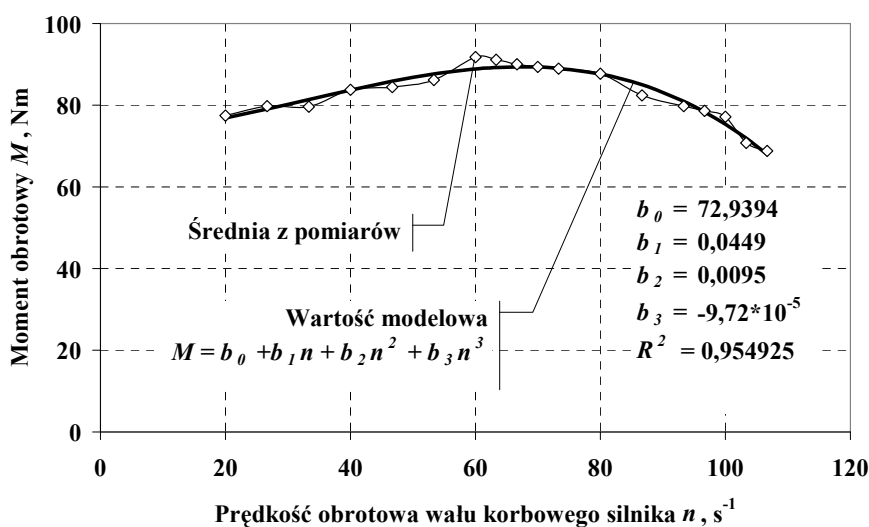


Rys. 4. Wartości średnie maksymalnej mocy w funkcji prędkości obrotowej wału korbowego silnika
 Fig 4. The averages value of maximum output in function of rotatory speed of engine crank rampart

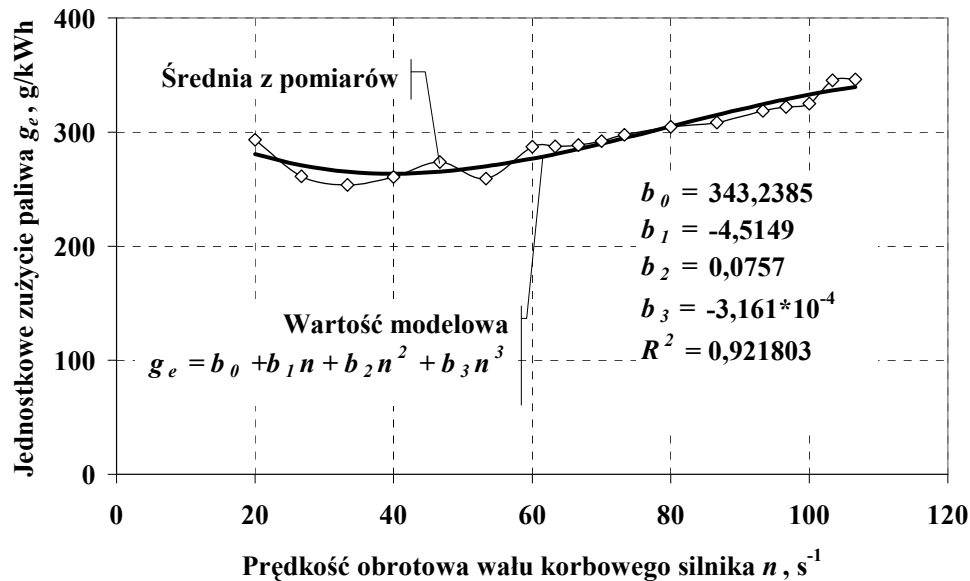
Podobnie jak w przypadku maksymalnej mocy silnika, również w przypadku maksymalnego momentu obrotowego uzyskano stosunkowo dobre dopasowanie krzywej modelowej do wyników pomiarów – rysunek 5. Tu jednak odstępstwa od krzywej modelowej są większe jak w przypadku maksymalnej mocy. Widać to nie tylko z rysunku ale również współczynnik korelacji R^2 ma wartość niższą. Również w tym przypadku odstępstwa od średniej są większe jak odchylenie standardowe.

Jeszcze większe odstępstwa dają się zauważyć w przypadku jednostkowego zużycia paliwa – rysunek 6. Tu również opis wyników pomiarów wielomianem trzeciego stopnia daje, statystycznie rzecz ujmując, bardzo dobre wyniki. Jednak i tu odstępstwa są większe jak odchylenie standardowe. Wszystko to odbija się ujemnie na wartości współczynnika korelacji, która jakkolwiek wysoka, to jednak jest niższa jak w przypadkach poprzednich.

Analizując dane przedstawione na rysunkach 4 – 6 można zauważyć pewną ciekawostkę. Otóż największe odchylenia w przypadku maksymalnej mocy silnika występują przy wysokich prędkościach jego wału korbowego, Największe odchylenia od wartości modelowych w przypadku momentu obserwuje się w średnim zakresie prędkości obrotowych, natomiast największe odchylenia jednostkowego zużycia paliwa występują w zakresie małych do średnich prędkości obrotowych wału korbowego silnika.



Rys. 5. Średnie wartości maksymalnego momentu obrotowego jako funkcja prędkości obrotowej wału korbowego silnika
 Fig. 5. The averages value of maximum engine torque as function of rotatory speed of engine crank rampart



Rys. 6. Jednostkowe zużycie paliwa jako funkcja prędkości obrotowej wału korbowego silnika
 Fig 6. Specifically fuel consumption as function of rotatory speed of engine crank rampart

4. Zakończenie i wnioski

Pomimo już ponad stuletniego rozwoju teorii silników spalinowych wiele zagadnień, w tym podstawowych, nie zostało w niej adekwatnie ujętych. Przykładem mogą tu być charakterystyki zewnętrzne silników. Znane są zależności opisujące ich przebieg podające jednak jedynie jakie czynniki powinny być ujęte w konkretnej postaci funkcyjnej niż samą postać. Jeśli jednak przyjąć, że przebiegi te są krzywoliniowe to można próbować choćby arbitralnie przyjąć jej postać. W mniejszym artykule przyjęto arbitralnie wielomian trzeciego stopnia jako funkcję opisującą przebiegi maksymalnej mocy silnika, maksymalnego momentu czy też jednostkowego zużycia paliwa w funkcji prędkości obrotowej wału korbowego silnika. Stwierdzono, na podstawie wyników badań hamownianych partii 30 silników o zapłonie iskrowym, iż wielomian ten pozwala stosunkowo dokładnie aproksymować średnie maksymalnych wartości wymienionych parametrów silnika. Stwierdzono jednocześnie, że krzywa ta najlepiej aproksymuje moc silnika, nieco gorzej moment obrotowy a najgorzej (choć wciąż bardzo dobrze) średnie wartości jednostkowego zużycia paliwa.

Zauważono odchylenia średnich wartości od krzywej modelowej. Odchylenia te są większe jak odchylenie standardowe od wartości średniej. W przypadku maksymalnej mocy silnika największe odchylenia występują przy wysokich prędkościach jego wału korbowego, Największe odchylenia od wartości modelowych w przypadku momentu obserwuje się w średnim zakresie prędkości obrotowych, natomiast największe odchylenia jednostkowego zużycia paliwa występują w zakresie małych do średnich prędkości obrotowych wału korbowego silnika. Odchylenia te wynikają, jak się wydaje, z dążenia do uzyskiwania założonych parametrów silnika, zwłaszcza konieczności sprostania wymogom norm emisji. Miarą tych odchylen może być jedna z miar statystycznych dopasowania krzywej modelowej do aproksymowanych danych. W przypadku przeprowadzonych prac miarą tą był współczynnik korelacji R^2 .

Zauważono stosunkowo nieznaczne rozrzuty wartości poszczególnych parametrów od ich wartości średnich przy poszczególnych wartościach prędkości obrotowej wału korbowego silnika. Świadczy to o dobrze opanowanym procesie produkcji analizowanego typu silnika.

Wnioski nasuwające się z przeprowadzonej pracy są dwa:

- należy prowadzić prace nad znalezieniem postaci funkcyjnej charakterystyk zewnętrznych silnika – pozwoliłoby to na łatwiejsze porównywanie osiągnięć silników,
- należy sprawdzić czy zaważone tu prawidłowości są charakterystyczne dla określonego (badanego) silnika czy też są one charakterystyczne dla całej populacji silników.

Literatura

- [1] Werner, J., Wajand, J. A., *Silniki spalinowe małej i średniej mocy*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne. Warszawa 1983.
- [2] Wiśniewski, P., *Metoda kojarzenia modeli procesu roboczego i struktury konstrukcyjnej obiektu na przykładzie silnika spalinowego*. Rozprawa doktorska. Politechnika Wroclawska. Wrocław 2001.