

PARAMETERS OF ENGINE CRANKSHAFT MOTION EQUATION DRIVEN BY STARTER

Józef Pszczółkowski, Kazimierz Koliński

Military Academy of Technology
Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, Poland
tel.: +48 22 6837146, fax: +48 22 6839765
e-mail: j.pszczolkowski@wme.wat.edu.pl

Abstract

The changes of engine crankshaft temporary rotational speed during its start-up depend on relation between crankshaft resistance torque and the torque of starting system. Rotational speed value calculating is possible using motion of crankshaft equation driven by starter. But for such complicated mechanical set, which is piston combustion engine, determining of equation parameters is difficult problem.

There is made the analysis of analytical description methods of engine resistance torque. There were separated the constant and changeable components of engine crankshaft resistance torque and there were taken the appropriate methods of their determining at starting conditions. There were made an assumption that the changeable component of resistance torque depends on the whole gaseous force impacting on engine pistons. Its value was determining using a coefficient of friction for bearings connections. As a criterion of determining of motion equation parameters was taken the compatibility degree of engine resistance torque computing results and experimental findings.

Keywords: combustion engines, start-up at low temperature, resistance torque

PARAMETRY RÓWNANIA RUCHU WAŁU KORBOWEGO SILNIKA NAPĘDZANEGO PRZEZ ROZRUSZNIK

Streszczenie

Zmiany wartości chwilowej prędkości obrotowej wału korbowego silnika podczas rozruchu zależne są od relacji między wartością jego momentu oporów ruchu a momentem siły wytwarzanym przez układ rozruchowy. Obliczenie wartości prędkości jest możliwe na podstawie równania ruchu wału korbowego napędzanego przez rozrusznik. Jednak dla tak skomplikowanego układu mechanicznego, jakim jest tłokowy silnik spalinowy, zdefiniowanie parametrów równania ruchu stanowi trudny problem.

Dokonano analizy metod opisu analitycznego wartości średniej momentu oporu silnika. Wyodrębniono składowe stałą i zmienną momentu oporów ruchu wału korbowego i przyjęto odpowiednie metody ich wyznaczania w warunkach rozruchu. Przyjęto, że składowa zmienna momentu oporu jest zależna od wypadkowej wartości sił gazowych działających na tłoki silnika. Jej wartość wyznaczano wprowadzając współczynnik tarcia dla skojarzenia czopów wału korbowego w łożysku. Jako kryterium wyznaczania wartości parametrów równania ruchu przyjęto stopień zgodności wyników obliczeń wartości momentu oporu silnika z wynikami eksperymentu.

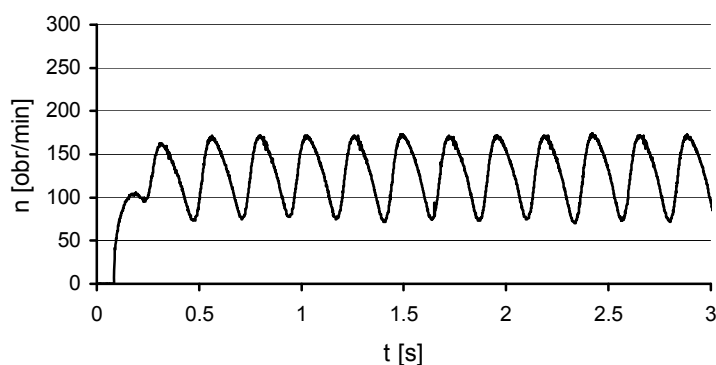
Słowa kluczowe: silniki spalinowe, rozruch w niskiej temperaturze, moment oporów ruchu

1. Wstęp

Prędkość obrotowa wału korbowego napędzanego przez układ rozruchowy jest podstawowym parametrem wymuszającym procesy tworzenia i zapłonu mieszanki paliwowo-powietrznej w fazie rozruchu silnika spalinowego. Chwilowa wartość prędkości obrotowej jest zależna od mocy rozwijanej przez układ rozruchowy i całkowitego momentu oporów ruchu wału korbowego silnika. Wartości chwilowe rozruchowego momentu oporów ruchu silnika, a stąd i prędkości

obrotowej wału korbowego zmieniają się w znacznym zakresie. Ich zmiany są wynikiem cyklicznego charakteru pracy silnika tłokowego, a przede wszystkim realizacji procesów wymiany i sprężania ładunku powietrza. Wraz z obniżaniem temperatury otoczenia i silnika ulegają pogorszeniu właściwości reologiczne oleju, następuje także spadek mocy układu rozruchowego. Stąd w obniżonej temperaturze zmniejsza się wartość prędkości obrotowej wału korbowego i zwiększają trudności uruchomienia silnika. Możliwość zapoczątkowania samodzielnej pracy silnika w różnych temperaturach otoczenia wynika także z wielu jego cech konstrukcyjnych, eksploatacyjnych i regulacyjnych.

W niskiej temperaturze, ujemnej wg skali Celsjusza, można wyróżnić dwie zasadnicze fazy rozruchu. W fazie pierwszej, wstępnej układ rozruchowy napędza wał korbowy przy braku zapłonów w cylindrach silnika. W komorach spalania silnika wytwarzane są w tym czasie odpowiednie warunki dla powstania zapłonu paliwa. Druga faza rozruchu charakteryzuje się występowaniem zapłonów w cylindrach, przy czym dla podtrzymania tego stanu pracy niezbędne jest także napędzanie wału korbowego przez rozrusznik. Zapłony mieszanki występują w coraz większej liczbie cylindrów silnika wielocylindrowego i sprawność spalania paliwa stopniowo zwiększa się i silnik może podjąć samodzielną pracę. Podstawowe znaczenie dla oceny właściwości rozruchowych i możliwości uruchomienia silnika ma faza wstępna rozruchu. Wynika to z faktu, że zasadniczym czynnikiem wymuszającym procesy tworzenia mieszanki i jej zapłonu jest prędkość obrotowa wału korbowego. Przykład przebiegu prędkości obrotowej wału korbowego silnika AD4.236 w fazie wstępnej rozruchu przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Przebieg prędkości obrotowej wału korbowego silnika AD4.236 podczas jego rozruchu
Fig. 1. The course of crankshaft rotational speed during AD4.236 engine start-up

Wartość chwilową prędkości obrotowej wału korbowego, zależną od relacji między wartością jego momentu oporów ruchu a momentem siły wytwarzanym przez układ rozruchowy można wyznaczyć na podstawie równania ruchu wału korbowego napędzanego przez rozrusznik:

$$M_r = M_s + M_z + I \frac{d\omega}{dt}, \quad (1)$$

gdzie:

M_r – moment siły rozrusznika,

M_s – składowa stała momentu oporu silnika,

M_z – składowa zmienna oporu,

I – moment bezwładności mas wirujących,

ω – prędkość kątowa wału korbowego silnika.

Moment bezwładności mas wirujących pełni rolę czynnika stabilizującego obciążenie rozrusznika, zatem jego zwiększenie powoduje zmniejszenie stopnia nierównomierności prędkości obrotowej. W równaniu wyodrębniono składowe stałą i zmienną momentu oporów ruchu wału korbowego. Dla tak skomplikowanego układu, jakim jest tłokowy silnik spalinowy, zdefiniowanie parametrów równania ruchu stanowi trudny problem. Dlatego podjęto próbę ich wyznaczenia w

sposób przybliżony. Przyjęto, że składowa zmienna momentu oporu jest zależna od wypadkowej wartości sił gazowych działających na tłoki silnika i jest sumą momentu sprężania ładunku i momentu tarcia w łożyskach. Moment tarcia wyznaczano wprowadzając współczynnik tarcia dla skojarzenia czopów wału korbowego w łożysku. Kolejnym parametrem równania ruchu jest moment bezwładności elementów ruchomych związanych kinematycznie z wałem korbowym silnika. Jako kryterium wyznaczania wartości parametrów równania ruchu przyjęto stopień zgodności wyników obliczeń wartości prędkości wału korbowego z wynikami eksperymentu.

2. Rozruchowy moment oporu silnika

Podawane w literaturze wyrażenia określające rozruchowy moment oporu silników dotyczą zazwyczaj jego wartości średnich w pełnym cyklu rozruchowym. Stosowane dla warunków obniżonej temperatury formuły uzależniają moment oporu zarówno od prędkości obrotowej wału korbowego, jak też i lepkości oleju. Bardzo często moment oporu silnika definiowany jest za pomocą średniej wartości ciśnienia tarcia, określanego z ogólnej zależności:

$$p_i = p_e + p_t, \quad (2)$$

gdzie:

p_i – średnie ciśnienie indykowane,

p_e – średnie ciśnienie efektywne,

p_t – średnie ciśnienie tarcia, wynikające ze strat wewnętrznych.

Moment oporu M_o wyznacza się porównując jego pracę w czasie jednego pełnego cyklu roboczego silnika do pracy średniego ciśnienia tarcia, w objętości skokowej silnika:

$$M_o \cdot 4\pi = p_t V_s, \quad (3)$$

gdzie:

V_s – pojemność skokowa silnika.

Spośród istniejących wzorów empirycznych [1] wartość średniego ciśnienia tarcia w warunkach rozruchu najlepiej opisuje wzór:

$$p_t = 19,6 + 11,31 \cdot \eta^{0,333} \cdot n^{0,25} \text{ [kPa]} \quad (4)$$

uzależniając jego wartość od lepkości dynamicznej oleju η [mPas] i prędkości obrotowej wału korbowego n [obr/min].

Drugim prezentowanym w literaturze sposobem analitycznego określenia momentu oporu jest zależność przedstawiona w pracy [2] o ogólnej postaci:

$$M_o = kA \nu^a n^b, \quad (5)$$

gdzie:

k, a, b – parametry stałe,

A – parametr uwzględniający wymiary głównych powierzchni trących silnika,

ν – lepkość kinematyczna oleju [mm^2/s].

Uwzględniając powyższe założenia podano wzory empiryczne, określające wartość momentu oporu rozruchowego silników, np.:

— o zapłonie samoczynnym i liczbie cylindrów $z \leq 6$:

$$M_o = 133,8 \cdot 10^{-3} V_s \nu^{0,5} n^{0,38} \text{ [Nm]}, \quad (6)$$

gdzie:

V_s – objętość skokowa silnika [dm^3].

— dla silników o zapłonie samoczynnym i pojemności skokowej do 10 dm^3 (zależność zaproponowana przez P. I. Dawjatina):

$$M_o = 58,65 \cdot 10^{-2} V_s \nu^{0,35} n^{0,25} \text{ [Nm]}. \quad (7)$$

Moment oporu silników jest w przybliżeniu proporcjonalny do pierwiastka kwadratowego z lepkości oleju silnikowego, inne współczynniki różnią się dość znacznie.

Na podstawie wyników badań dokonano korekty wyżej przedstawionych zależności w odniesieniu do eksploatowanych obecnie silników [3]. Moment oporu wyznaczano wykorzystując charakterystyki rozruszników. Uzyskane wyniki wskazują przede wszystkim na konieczność wprowadzenia zmian ze względu na liczbę cylindrów silnika. Istniejące formuły wyodrębniły jedynie silniki o liczbie cylindrów $z \leq 6$ oraz większej ich liczbie. W związku z powyższym dokonano podziału silników na grupy według liczby cylindrów. Dla każdej z powstałych grup wyznaczono wartości współczynnika D (tabela 1) korygującego istniejące formuły empiryczne obliczania rozruchowego momentu oporu silników. Proponowana ich postać jest następująca:

$$M_o = kADv^a n^b \quad (8)$$

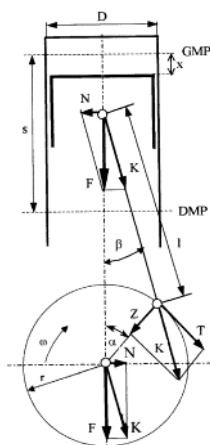
Tab. 1. Wartości współczynnika korekcyjnego D dla formuł empirycznych rozruchowego momentu oporu silników
 Tab. 1. Values of correction coefficient D for empirical formulae for starting engine resistance torque

Lp.	liczba cylindrów silnika	Wartość współczynnika D	
		zależność 4 i 6	zależność 7
1.	$z = 6$	0,85	1,20
2.	$z = 4 \vee z = 3$	1,55	2,10
3.	$z = 2$	2,00	2,80

Tak określone wartości średnie rozruchowego momentu oporu mają istotne odniesienie do jego składowej stałej w równaniu ruchu, która może być wyznaczana za pomocą powyższych formuł.

3. Wyznaczanie parametrów równania ruchu wału korbowego silnika

Składową stałą momentu oporu silnika można wstępnie wyznaczyć na podstawie wyników badań odczytując z charakterystyki rozrusznika wartość momentu dla chwili, gdy natężenie prądu jest minimalne, uwzględniając przy tym przełożenie rozrusznika. Ostatecznie wielkość składowej stałej momentu korygowano w procesie porównania sumarycznego momentu oporu silnika wynikającego z równania ruchu oraz momentu określonego na podstawie wyników badań.



Rys. 2. Rozkład sił w mechanizmie korbowym
 Fig. 2. Force layout in crankshaft-piston mechanism

Składową zmienną momentu oporu można zdefiniować na podstawie rozkładu sił w mechanizmie korbowym silnika pochodzących od ciśnienia powietrza sprężanego w cylindrze – (rys. 2.). Wartość siły gazowej F określano na podstawie modelu obliczeniowego zbudowanego na

bazie I zasady termodynamiki pozwalającego na wyznaczenie ciśnienia powietrza w cylindrze. Składowa zmienna momentu oporu zawiera dodatkowy moment tarcia w łożyskach wynikający z działania sił gazowych (obliczany wg prawa tarcia Newtona z uwzględnieniem współczynnika tarcia)

$$M_T = r \cdot P_g \cdot \mu, \quad (9)$$

gdzie:

μ – współczynnik tarcia;

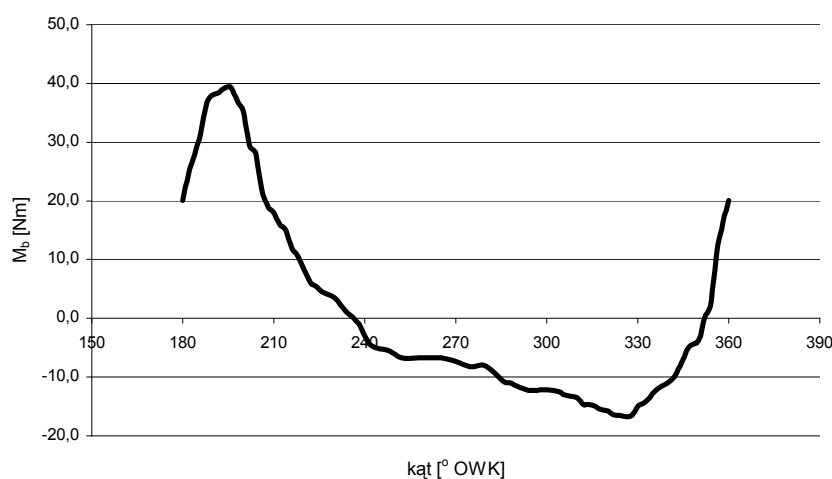
r – promień wykorbienia.

Siłę nacisku gazów otrzymuje się dodając do ciśnienia w cylindrze, w którym gaz jest sprężany, ciśnienie w cylindrze, w którym jest on rozprężany. Moment siły sprężania ładunku wyznaczano z zależności:

$$M_p = T \cdot r = F \cdot r \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\sin \beta}. \quad (10)$$

W związku z tym, że podstawowy cykl rozruchowy silnika 4-ro cylindrowego zawiera się w zakresie 180° obrotu wału korbowego obliczenia momentu sprężania wykonywano w przedziale kątowym od 180° do 360° . Dodatkową składową momentu silnika stanowi moment pochodzący od sił bezwładności, który wyznaczano mnożąc znany moment bezwładności silnika przez przyśpieszenie wału korbowego uzyskane na podstawie pomiarów jego prędkości obrotowej.

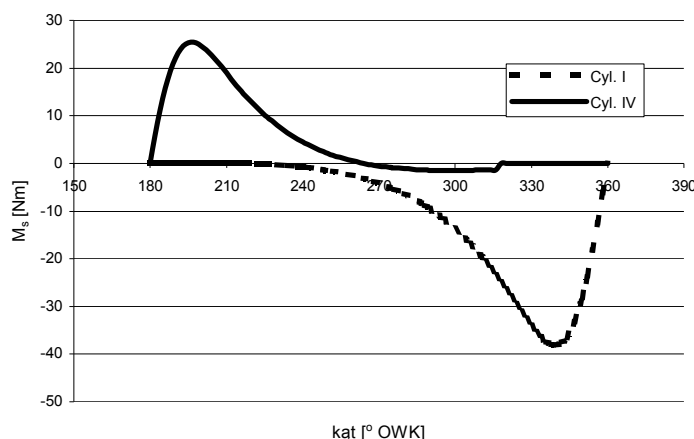
Podstawowe znaczenie dla wyznaczenia parametrów równania ruchu miały przebiegi natężenia prądu rozrusznika i prędkości obrotowej w wymienionym wyżej przedziale kątowym. Na podstawie przebiegu prędkości (po jej przekształceniu w zależność od kąta obrotu wału korbowego) wyznaczano składową momentu pochodzącą od mas wirujących silnika – rys. 3.



Rys. 3. Przebieg momentu oporu silnika od sił bezwładności w przedziale kątowym 180 -360°

Fig. 3. The course of engine torque caused by force of inertia at angle interval 180 -360°

Podczas wyznaczania składowej momentu oporu pochodzącej od sprężania ładunku uwzględniono, że w danym przedziale kątowym jeden z cylindrów znajduje się w cyklu sprężania ładunku (np. I), jeden cylinder w cyklu rozprężania (IV) a pozostałe dwa cylindry nie wpływają w znaczący sposób na wyniki obliczeń. Należy tu uwzględnić także ciśnienie działające na tłok od strony skrzyni korbowej. Na rys. 4 przedstawiono momenty sił pochodzące od przemian ładunku.



Rys. 4. Przebieg momentu sił sprężania ładunku w cylindrach silnika w przedziale kątowym 180 -360°

Fig. 4. The course of engine cylinders charge compression torque at angle interval of 180 -360°

Wyznaczenia parametrów równania ruchu wału korbowego napędzanego przez rozrusznik dokonano dla silnika czterosuwowego rzędogo o zapłonie samoczynnym z bezpośrednim wtryskiem paliwa typu AD4.236. Jako kryterium wyznaczania wartości parametrów równania ruchu przyjęto stopień zgodności wyników obliczeń wartości momentu oporu silnika z wynikami eksperymentu – momentu oporu wyznaczonego na podstawie zmierzonego natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik. Jako miarę zgodności przebiegów przyjęto wartość kwadratu współczynnika korelacji.

W tabeli 1 podano wybrane wartości wyznaczonych parametrów równania ruchu wału korbowego dla wyników prób rozruchowych przeprowadzanych w różnych warunkach temperaturowych oraz dla różnych wartości momentu bezwładności mas wirujących. Wyznaczanymi parametrami były: składowa stała momentu oporu, współczynnik tarcia w łożysku oraz weryfikowana poprawność określenia momentu bezwładności silnika (w tym dodatkowych mas wirujących dołączanych do wału korbowego).

Tab. 1. Wyznaczone wartości parametrów równania ruchu wału korbowego napędzanego przez rozrusznik

Tab. 1. The determined values of engine crankshaft motion equation driven by starter

	Warunki rozruchu silnika AD4.236			
	-2 °C	-10 °C	-15 °C	-15 °C, obciążnik dodatk.
Moment stały [Nm]	75	80	90	100
Współcz. tarcia	0,05	0,06	0,07	0,08
Moment bezwł. [kg·m ²]	1,7	1,7	1,7	1,8
Kwadr. wsp. korelacji	0,94	0,90	0,89	0,89

Podane w tabeli dane wskazują zmienność wyznaczanych parametrów równania ruchu od warunków realizacji próby rozruchowej silnika. Uzyskano dostatecznie wysoką zbieżność wyników badań eksperymentalnych momentu oporu silnika z wynikami obliczeń określoną wartością kwadratu współczynnika korelacji równą około 0,9.

4. Podsumowanie

Celem przeprowadzonej analizy było wyznaczenie parametrów równania ruchu wału korbowego napędzanego przez rozrusznik. Wynik tej analizy wskazuje, że określenie wyżej

wymienionych parametrów równania: składowej stałej momentu oporu, współczynnika tarcia i momentu bezwładności mas wirujących jest wystarczające dla przeprowadzenia analitycznego wyznaczania parametrów przebiegu rozruchu silnika spalinowego z dostateczną dla praktycznych zastosowań dokładnością. Aby jednak możliwe było wyznaczenie za pomocą równania ruchu parametrów przebiegu rozruchu silnika konieczne jest niezależne zdefiniowanie przy pomocy bezpośrednio mierzalnych cech silnika i materiałów eksploatacyjnych (oleju smarującego) wartości wielkości, które stanowią tu parametry rozpatrywanego równania ruchu.

Literatura

- [1] Дяченко, Н. Х., *Теория двигателей внутреннего сгорания*, Машиностроение, Ленинград, 1974.
- [2] Чижков, Ю. П., *Сопротивление прокручиванию валов автомобильных двигателей при электростартерном пуске*, Известия Высших Учебных Заведений. Машиностроение, Но 10, 1971.
- [3] Dziubak, T., Pszczółkowski, J., *Rozruchowy moment oporu silników spalinowych*, Biuletyn WAT, nr 8–9, 1999r, str.: 149 ÷ 166.

