

PSZCZÓŁKOWSKI Józef¹

MOMENT OPORÓW RUCHU TŁOKOWEGO SILNIKA SPALINOWEGO

Scharakteryzowano zależności momentu oporów ruchu wału korbowego silnika tłokowego głównie od jego prędkości obrotowej. Wyodrębniono i rozpatrzono dwa przedziały wartości prędkości obrotowej wału korbowego: zakres niskiej, rozruchowej prędkości wymuszanej przez rozrusznik podczas napędzania wału oraz prędkości obrotowej funkcjonującego silnika. Przedstawiono formuły analityczne opisujące zależności rozruchowego momentu oporu oraz charakterystykę zmienności średniej prędkości i momentu oporu wału napędzanego przez rozrusznik. Przedstawiono wyniki badań charakteryzujące zmienność momentu oporu silnika w zakresie wysokich wartości prędkości. Wskazano przyczyny odmiennej zależności momentu oporu od prędkości obrotowej w wymienionych przedziałach jej wartości.

RESISTANCE TORQUE OF THE PISTON COMBUSTION ENGINE

There is characterised dependences of moving piston engine crankshaft resistance torque mainly on its rotational speed. There were separated and analysed the two crankshaft rotational speed intervals: the range of low, starting speed extorted by starter during crankshaft driving and the rotational speed of operating engine. There are presented analytical formulae describing the dependences of starting resistance torque and variety characteristic of mean rotational speed and resistance torque of crankshaft driven by starter. There are presented test results characterising the variety of engine resistance torque at high crankshaft speed values. There are pointed the reasons of different dependences of resistance torque on crankshaft rotational speed at its value intervals.

1. WSTĘP

Występowanie sił i momentów sił jest związane z różnego rodzaju oddziaływaniami ciał w przyrodzie, które są przyczyną powstawania oporów ruchu. Do podstawowych typów oddziaływań – źródeł oporów można zaliczyć:

- oddziaływania grawitacyjne, elektryczne i magnetyczne (występowanie pól sił);
- występowanie sił bezwładności;
- opory przemian termodynamicznych;
- zjawiska tarcia.

¹Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny, 00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2.
Tel.: + 48 22 683 72 06, Fax.: +48 22 683 71 21, E-mail: jpszczolkowski@wat.edu.pl

Szczególne miejsce wśród wymienionych źródeł oporów, a stąd i szczególną uwagę w działaniach człowieka w dziedzinie techniki zajmują opory związane z występowaniem tarcia. Pokonywanie oporów tarcia jest zawsze związane ze zużyciem i stratami energii. Ponadto w technice występowaniu zjawisk tarcia towarzyszy zużycie elementów maszyn powodujące utratę zdolności do wypełniania funkcji użytkowych przez urządzenie. Powszechnie znane są zarówno pozytywne jak też i negatywne aspekty występowania zjawisk tarcia. Istnieje (wyróżnia się) wiele rodzajów tarcia i czynników determinujących wartość siły tarcia. Dlatego wartości oporu tarcia mogą zmieniać się w szerokim zakresie w zależności od jego rodzaju i różnych czynników. Stąd istnieje możliwość oddziaływania, szczególnie w technice, na wartość pożądaną, bądź niepożądaną oporów tarcia.

W przypadku urządzeń technicznych (maszyn w szczególności) występowanie zjawisk tarcia jest istotne i w głównej mierze określa ich wewnętrzne opory ruchu. Szczególnie istotnym zagadnieniem jest występowanie oporów wewnętrznych (ruchu wału korbowego) dla tłokowego silnika spalinowego. Opory wewnętrzne obniżają ogólną sprawność silnika spalinowego, w znacznej mierze obniżają możliwości uruchomienia silnika, zwłaszcza w niskiej temperaturze otoczenia oraz mogą stanowić źródło sił hamujących pojazd mechaniczny po wyłączeniu silnika lub podczas zjazdu ze wzniesienia. Celem prezentowanej pracy jest analiza oporów wewnętrznych tłokowego silnika spalinowego.

2. MIARY OPORÓW TŁOKOWEGO SILNIKA SPALINOWEGO

Dla spalinowego silnika tłokowego, który jest źródłem energii mechanicznej, jego parametry efektywne różnią się od parametrów indykowanych (generowanych) o wartości spowodowane występowaniem strat mechanicznych. Moc efektywna N_e jest równa mocy indykowanej N_i pomniejszonej o moc strat mechanicznych N_m . Moc strat mechanicznych jest częścią mocy indykowanej, zużywanej w samym silniku, traconej a także warunkującej jego funkcjonowanie. Zatem efektywna moc (praca) mechaniczna silnika jest zawsze mniejsza od indykowanej o wartość strat mechanicznych, na które składają się straty tarcia, przepływowe i napędu mechanizmów (urządzeń) stanowiących tzw. osprzęt silnika i zapewniających jego prawidłowe funkcjonowanie. Straty mechaniczne mogą być więc oceniane wielkością mocy N_m .

Z uwagi na cechy użytkowe silnika spalinowego (wytwarzanie momentu siły) i zasadę jego działania (przemiana termodynamiczna ładunku związana ze zmianą ciśnienia) istnieje możliwość zamiennego stosowania różnych wielkości fizycznych dla wyrażenia jego parametrów pracy, między którymi istnieją jednoznaczne zależności. Zatem odpowiednie składowe mocy mogą być zastąpione składowymi momentów sił M lub ciśnienia p w cylindrach silnika. Wówczas:

$$M_e = M_i - M_m; \quad p_e = p_i - p_m \quad (1)$$

gdzie:

- $M_{e(i,m)}$ – odpowiednio średni moment efektywny (e), indykowany (i) i strat mechanicznych (m);
- $p_{e(i,m)}$ – odpowiednio średnie ciśnienie efektywne, indykowane i strat mechanicznych.

Związek pomiędzy określoną składową momentu, a odpowiadającym mu rodzajem ciśnienia wyznacza się porównując jego pracę w czasie jednego pełnego cyklu roboczego silnika do pracy średniego ciśnienia w objętości skokowej silnika, np. dla składowych strat mechanicznych silnika czterosuwowego będą to zależności:

$$M_m \cdot 4\pi = p_m V_s \quad \text{skąd:} \quad M_m = \frac{p_m V_s}{4\pi} \quad (2)$$

gdzie: V_s – pojemność skokowa silnika.

Istnienie strat mechanicznych w specyficzny sposób kształtuje także sprawność mechaniczną silnika, którą można zdefiniować jako:

$$\eta_m = \frac{N_e}{N_i} = \frac{N_i - N_m}{N_i} \quad (3)$$

Przy wzroście obciążenia (odpowiednio wzroście N_i) sprawność mechaniczna silnika wzrasta, a przy obniżeniu obciążenia zmniejsza się osiągając na biegu jałowym silnika wartość zero (silnik nie wykonuje pracy użytecznej). Moc strat mechanicznych pracującego silnika jest zależna głównie od prędkości obrotowej jego wału korbowego (średniej prędkości tłoka). Podobny wpływ ma wartość strat mechanicznych na ocenę jednostkowego zużycia paliwa na charakterystyce obciążeniowej silnika – bierze się dla jego wyznaczenia pod uwagę jedynie moc użyteczną.

O ile w przypadku pracującego (funkcjonującego) silnika przy analizie jego parametrów efektywnych celowe jest posługiwanie się pojęciem mocy, to w innych jego stanach, dla których występuje tylko moment jego oporu (rozruch oraz tzw. wybieg silnika) korzystniejsze jest stosowanie pojęcia momentu oporu lub też jego określanie za pomocą średniego ciśnienia tarcia. Stąd też szczególnie istotne są analizy momentu oporu silnika w warunkach rozruchu i wybiegu, po wyłączeniu jego zasilania paliwem.

3. SKŁADOWE MOMENTU OPORU TŁOKOWEGO SILNIKA SPALINOWEGO

W warunkach rozruchu silnika wartość i zmiany chwilowej wartości prędkości obrotowej napędzanego przez rozrusznik wału korbowego wynikają z równowagi momentu siły rozrusznika, oporów ruchu i pochodzących od momentów bezwładności mas w ruchu obrotowym. Z tego względu znajomość wielkości rozruchowego momentu oporu jest ważna przy analizie napędzania wału silnika przez rozrusznik. Na moment oporu kompletnego silnika składają się straty tarcia (i inne) powstające w głównych jego skojarzeniach tribologicznych, do których zalicza się:

- układ korbowo-tłokowy, w którym wyodrębnia się opory tarcia łożysk wału korbowego oraz tarcia tłoków i pierścieni tłokowych o powierzchnię cylindrów;
- układ rozrządu;
- urządzenia pomocnicze – układ zasilania paliwem, pompa oleju, pompa płynu chłodzącego, wentylator, prądnica, sprężarka powietrza;
- pozostałe: np. opory sprężania ładunku, przepływowe.

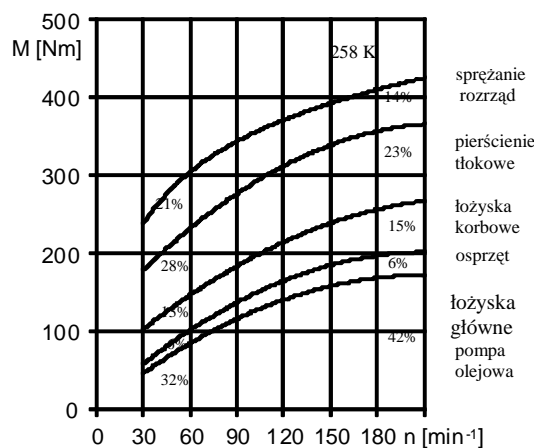
Metoda badań rozkładu momentu oporu polega na jego wartości w różnych stanach montażowych silnika. Napędzanie zespołów realizowane jest za pomocą zewnętrznych źródeł napędu umożliwiających uzyskanie określonej prędkości obrotowej. Przy napędzaniu wału korbowego w kompletnym silniku nie realizuje się wtrysku paliwa, aby zapobiec jego uruchomieniu. Brak jest jednoznacznej oceny udziałów oporów poszczególnych układów silnika w jego oporze całkowitym. W pracy [2] przedstawiono wyniki badań rozkładu wielkości oporów silnika jednocylindrowego. Moment obracania kompletnego silnika, jak też i poszczególnych zespołów wzrasta w przybliżeniu z pierwiastkiem kwadratowym lepkości.

W pracy [2] podano udziały procentowe oporów przy rozruchu silnika 359 w przedziale temperatury 253 ÷ 273 K:

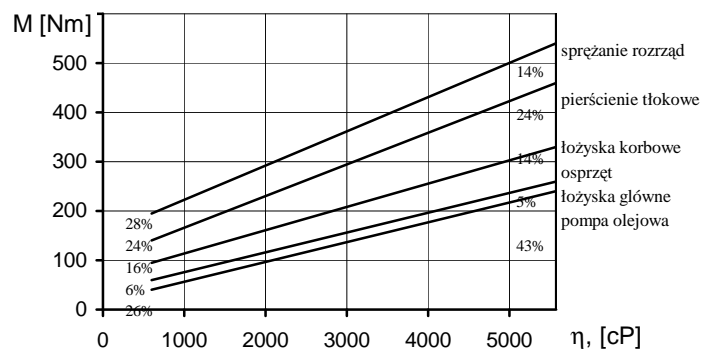
- udział tarcia łożysk głównych i pompy oleju zmienia się w zakresie 43 ÷ 26 %;
- łożysk korbowodowych 14 ÷ 16 %;
- tarcia pierścieni 25 % - stały;
- sprężania i napędu rozrządu 14 ÷ 28 %;
- osprzęt 6 %.

Zatem w tych warunkach około 94 % oporów pochodzi od układu tłokowo-korbowego i rozrządu. W pracy [3] podano, że dla pracującego silnika KDM-35 przy prędkości obrotowej 1400 obr/min około 74 % oporów pochodzi od tarcia tych układów, zaś pozostałe 26 % generuje osprzęt silnika, z czego aż 13 % napęd wentylatora.

Udziały procentowe składowych momentu oporu w zależności od prędkości obrotowej silnika przedstawiono na rys. 1, natomiast na rys. 2 od lepkości oleju. Największy udział w wielkości rozruchowego momentu oporu kompletnego silnika ma moment oporu układu korbowo-tłokowego (szczególnie, wraz ze spadkiem temperatury, wzrasta udział strat tarcia łożysk), co wskazuje na decydujący wpływ lepkości oleju. Wzrost momentu oporu wraz ze wzrostem prędkości obrotowej jest bardziej intensywny w niższych temperaturach.



Rys. 1. Wpływ prędkości obrotowej silnika na udziały względne składowych momentu oporu silnika w temperaturze 258 K (-15°C) [wg 2]



Rys. 2. Wpływ lepkości dynamicznej oleju na składowe momentu oporu i ich udziały w oporze silnika dla prędkości obrotowej wału korbowego równej 120 min^{-1} [wg 2]

Straty pochodzące od sprężania ładunku (rys. 1) składają się ze strat obiegu i dodatkowych strat wywołanych tarciami tłoka i łożysk. Istotne jest, że opór tarcia pierścieni zależy od lepkości oleju, co świadczy o występowaniu smarującej warstwy oleju na powierzchni cylindra. Straty obiegu są praktycznie niezależne od temperatury i czasu napędzania wału korbowego.

W celu zmniejszenia momentu oporu i ułatwienia rozruchu silników stosuje się niekiedy rozcieńczanie olejów benzyną, naftą lub olejem napędowym, podgrzewanie oleju lub całej masy silnika przed rozruchem. Obniżenie wartości momentu oporu w łożyskach wału korbowego można także osiągnąć przez wstępne przetłaczanie oleju o podwyższonej temperaturze lub podgrzewanie łożysk głównych wału.

4. FORMUŁY ANALITYCZNE ROZRUCHOWEGO MOMENTU OPORU

Opracowano wzory empiryczne służące do wyznaczania momentu oporów ruchu silników spalinowych zarówno dla normalnych warunków pracy, jak też dla warunków rozruchu w niskiej temperaturze. Spośród istniejących wzorów empirycznych definiujących moment oporu silnika za pomocą średniej wartości ciśnienia tarcia, wartość średniego ciśnienia tarcia w warunkach pracy silnika i rozruchu najlepiej opisuje wzór [3]:

$$p_t = 19,6 + 11,31 \cdot \eta^{0,333} \cdot n^{0,25} \quad [\text{kPa}] \quad (4) \quad ([3])$$

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 [4] o ogólnej postaci:

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

gdzie: k , a , b – parametry stałe, A – parametr uwzględniający wymiary głównych powierzchni trących silnika, ν – lepkość kinematyczna oleju, n – prędkość obrotowa wału korbowego.

Wartość parametru A wyznaczana jest wg zależności:

$$A = F_{it} \frac{S}{\pi} + F_k \frac{d_k}{2} + F_{kd} \frac{d_{kd}}{2} + 0,1F_{it} \frac{d_k + d_{kd}}{2} \quad [\text{cm}^3] \quad (6)$$

gdzie: F_{it} – powierzchnia boczna tłoków [cm^2], S – skok tłoka [cm], F_k, F_{kd} – powierzchnia panewek głównych i korbowodowych [cm^2], d_k, d_{kd} – średnica panewek głównych i korbowodowych [cm].

Stwierdzono, że zależność parametru A od pojemności skokowej silników ma charakter liniowy o postaci:

— dla silników o zapłonie iskrowym:

$$A = 300 + 2050V_s \quad (7)$$

— dla silników o zapłonie samoczynnym:

$$A = 2550V_s \quad (8)$$

Uwzględniając powyższe zależności podano wzory empiryczne, określające wartość rozruchowego momentu oporu silników:

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

$$M_o = (15,85 + 107,6V_s) \cdot 10^{-3} \nu^{0,5} n^{0,38} \quad [\text{Nm}] \quad (9)$$

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

$$M_o = 133,8 \cdot 10^{-3} V_s \nu^{0,5} n^{0,38} \quad [\text{Nm}] \quad (10) \text{ ([1])}$$

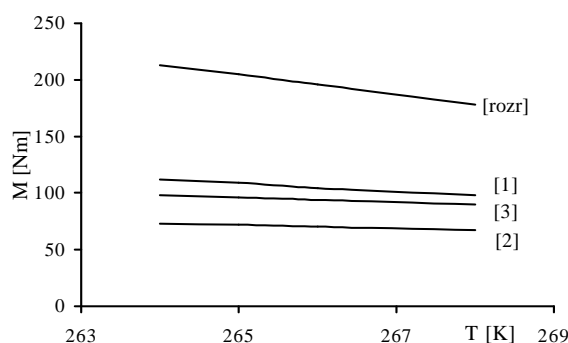
gdzie: V_s – objętość skokowa silnika [dm^3], ν – lepkość kinematyczna oleju [mm^2/s], n – prędkość obrotowa wału korbowego [obr/min].

Stwierdzono również, że najbardziej zbliżone do rzeczywistych wyniki badań momentu oporu silników podczas rozruchu otrzymuje się przy jego wyznaczaniu na podstawie parametrów pracy i charakterystyki rozrusznika, gdyż odzwierciedla to w pełni dynamikę tego procesu [4].

W pracy [1] przedstawiono między innymi zależność do wyznaczania rozruchowego momentu oporu dla silników o zapłonie samoczynnym i pojemności skokowej do 10 dm^3 (zależność zaproponowana przez P. I. Dawjatina):

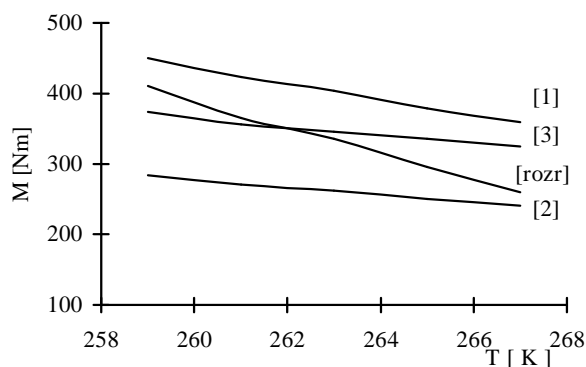
$$M_o = 58,65 \cdot 10^{-2} V_s \nu^{0,35} n^{0,25} \quad [\text{Nm}] \quad (11) \text{ ([2])}$$

Na podstawie przeprowadzonych w WAT badań wielu typów silników dokonano korekty wyżej przedstawionych zależności empirycznych w odniesieniu do eksploatowanych w kraju silników. Uwzględniono przy tym zależności: (10) – oznaczana numerem 1, (11) – nr 2, (4) – nr 3. Moment oporu silników wyznaczano wykorzystując charakterystyki rozruszników. Uzyskane wyniki wskazują na wyraźną zależność stosunku momentu wyznaczonego za pomocą formuł empirycznych i charakterystyki rozrusznika od liczby cylindrów silnika. Najmniejszą zgodność otrzymano w przypadku dwucylindrowego silnika S 312C – rys. 3, a największą dla silników 6-cio cylindrowych.



Rys. 3. Zależność rozruchowego momentu oporu silnika S 312C od temperatury według formuł empirycznych: [1], [2], [3] oraz charakterystyki rozrusznika [rozzr]

Zróznicowanie wyników w grupie silników 6-cio i 4-ro cylindrowych mogło wynikać z osiąganych przez nie wartości prędkości obrotowej wału korbowego podczas napędzania rozrusznikiem. Dla silnika 359, którego prędkości obrotowe mieściły się w przedziale $100 \div 200$ obr./min, krzywa momentu oporu wyznaczona na podstawie charakterystyki rozrusznika znajdowała się w obszarze pomiędzy krzywymi wyznaczonymi z zależności analitycznych – rys. 4.



Rys. 4. Zależność rozruchowego momentu oporu silnika 359 od temperatury wyznaczonego według formuł empirycznych: [1], [2], [3] oraz charakterystyki rozrusznika [rozzr]

Uzyskane wyniki wskazały przede wszystkim na konieczność wprowadzenia zmian w formułach obliczeniowych momentu oporu ze względu na liczbę cylindrów silnika. W związku z powyższym dokonano podziału silników na grupy według liczby cylindrów. Dla każdej z powstałych w ten sposób grup wyznaczono wartości współczynnika D (tabela 1) korygującego istniejące formuły empiryczne rozruchowego momentu oporu silników.

Tabela 1. Wartości współczynnika korekcyjnego D dla formuł empirycznych wyznaczania rozruchowego momentu oporu silników o zapłonie samoczynnym z wtryskiem bezpośrednim

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

Zatem, w celu obliczenia rozruchowego momentu silnika, należy znać jego podstawowy parametr konstrukcyjny, jakim jest objętość skokowa, wartość prędkości obrotowej wału korbowego oraz lepkość oleju smarującego. Formuły empiryczne mogą dawać dość rozbieżne wyniki obliczeń – wskazuje na to dość istotne zróżnicowanie ich postaci. Nie uwzględniają one tak istotnego czynnika wpływającego na wartość momentu oporu, jak fazy rozrządu silnika, zwłaszcza kąt zamknięcia zaworu dolotowego. Problemem może być także ocena lepkości oleju smarującego, której wartość może być różna w skojarzeniach tribologicznych silnika ze względu na zróżnicowanie ich temperatury.

Wartość średnia rozruchowego momentu oporu zmienia się także wskutek:

- nagrzewania skojarzeń podczas napędzania wału,
- dostarczania oleju smarującego do łożysk,
- smarowania tulei cylindrowych przez wtryskiwane paliwo,
- wymiany energii przez ładunek sprężonego powietrza z wtryskiwanym paliwem (zależnie od wartości kąta wyprzedzenia wtrysku).

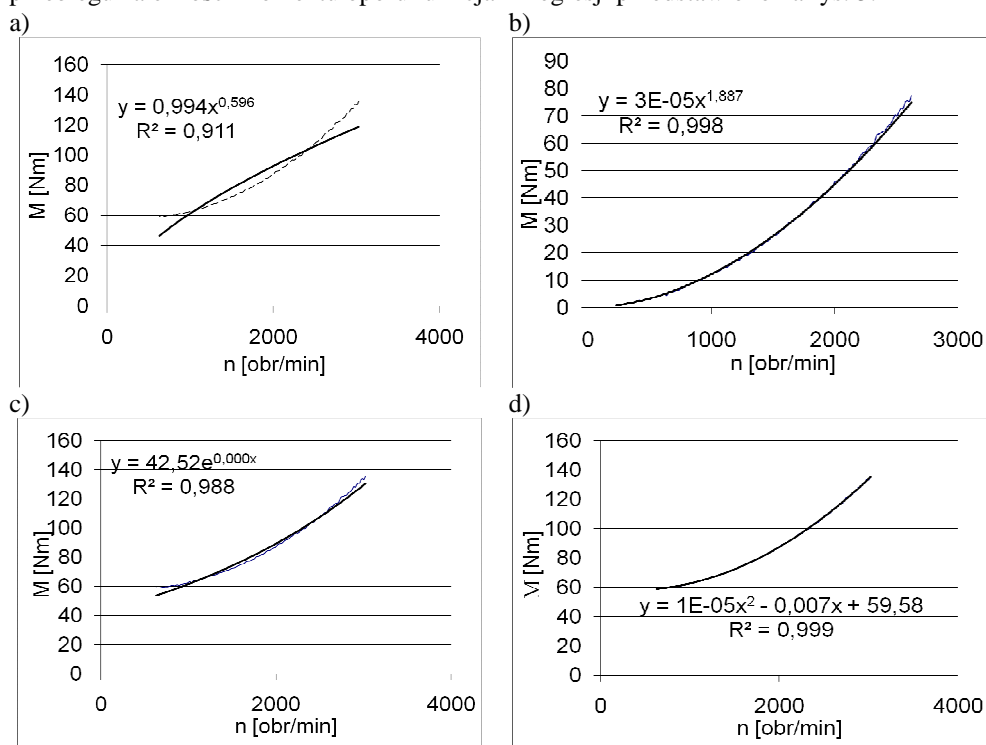
5. ZALEŻNOŚCI OBLICZANIA MOMENTU OPORU SILNIKA

Przytoczone w pkt 3 zależności do wyznaczania momentu oporu tłokowych silników spalinowych dotyczą ściśle określonych warunków ich pracy, tj. uruchamiania silników w niskiej temperaturze. Mogą mieć zastosowanie dla zakresu prędkości obrotowych wału korbowego wymuszanych przez układ rozruchowy silnika, od około 50 do 250 obr/min, oraz zakresu lepkości kinematycznej olejów smarujących większych na ogół od 500 mm/s^2 oraz specyficznych dla tych warunków procesów tarcia w skojarzeniach tribologicznych.

Przeprowadzono weryfikację zakresu stosowalności podanych zależności poprzez porównanie wyników badań eksperymentalnych momentu oporu silnika 359 oraz jego wartości wyznaczonych za pomocą formuł [1], [2], [3]. Badania momentu oporu w zakresie roboczych prędkości obrotowych wału korbowego zrealizowano na stanowisku do badań charakterystyk dynamicznych silników tłokowych w fazie jego wybiegu. Stwierdzono, że:

- stopień przybliżenia przebiegu rzeczywistego momentu oporu przez zależności regresyjne jest przeciętny (kwadrat współczynnika korelacji równy około 0,87);
- wartości średnie momentu oporu wyznaczone na podstawie funkcji regresji oraz eksperymentalnie w zakresie jego określoności różnią się przeciętnie o około 15 %;
- charakter zależności rzeczywistego momentu oporu i wartości wyznaczonych za pomocą funkcji regresji od prędkości obrotowej jest odmienny – druga pochodna przebiegu eksperymentalnego jest dodatnia (krzywa wypukła do dołu), a krzywych regresji jest ujemna (krzywe wypukłe ku górze).

Wobec niezbyt dokładnego odwzorowania przebiegu eksperymentalnego przez wyżej wymienione funkcje regresji dokonano doboru funkcji aproksymujących badaną zależność momentu oporu silnika 359 od prędkości obrotowej wału korbowego. Możliwe opisy przebiegu zależności momentu oporu funkcjami regresji przedstawiono na rys. 5.



Rys. 17. Funkcje regresji zależności momentu oporu silnika 359 od prędkości obrotowej: a) potęgowa, b) potęgowa przesunięta, c) wykładnicza; d) wielomian drugiego stopnia

Analiza przedstawionych zależności i wartości kwadratu współczynnika korelacji wskazuje, że z wyjątkiem bezpośredniego użycia funkcji potęgowej, dla której $R^2 = 0,9118$, wszystkie pozostałe dają bardzo dobry opis przebiegu zależności ze współczynnikiem korelacji bliskim jedności. Można zatem podać wzory opisujące te zależności i przyjąć je do stosowania dla silnika 359 (liczba cylindrów 6, pojemność skokowa $6,842 \text{ dm}^3$):

— funkcja wykładnicza przesunięta (n : – 400 obr/min, M_o : 58 Nm):

$$M_o = 58 + 3 \cdot 10^{-5} \cdot (n - 400)^{1,89} \quad [\text{Nm}] \quad (12)$$

— funkcja wykładnicza:

$$M_o = 42,5 \exp(0,0004n) \quad [\text{Nm}] \quad (13)$$

— wielomian drugiego stopnia:

$$M_o = 10^{-5} \cdot n^2 - 0,0078 \cdot n + 59,6 \quad [\text{Nm}] \quad (14)$$

Przeprowadzona analiza wskazuje na potrzebę opracowania przydatnych dla obliczania momentu oporu tłokowych silników spalinowych wyrażeń o charakterze funkcji regresji. Dla tego celu wymagana jest przede wszystkim dostatecznie duża ilość danych eksperymentalnych – wyników badań momentu oporu podczas tzw. wybiegu silnika.

6. WNIOSKI

Tłokowy silnik spalinowy jest obiektem złożonym w zakresie mechaniki i tribologii. Wyznaczenie jego momentu oporu metodami analitycznymi wymienionych dziedzin wiedzy jest praktycznie niemożliwe. Dlatego opis zależności momentu oporu od podstawowych czynników determinujących jego wartość: cech konstrukcyjnych, lepkości oleju i prędkości obrotowej wału korbowego, może być uzyskany metodami eksperymentalnymi. Moment oporu jest złożoną funkcją wymienionych cech.

Szczególnie złożona jest zależność momentu oporu od prędkości obrotowej wału korbowego. W zakresie niskich jej wartości, odpowiadających prędkości napędzania wału korbowego przez rozrusznik, moment oporu jest w przybliżeniu proporcjonalny do pierwiastka kwadratowego prędkości (a także lepkości). Wskazuje to, że głównym źródłem oporu są tu siły tarcia wynikające z lepkości oleju smarującego.

W zakresie prędkości obrotowych pracy silnika można mówić o proporcjonalności momentu oporu do kwadratu prędkości obrotowej silnika – to z kolei wskazuje, że w tym zakresie prędkości o wartości momentu oporu decydują procesy przemian gazowych. Niekiedy w stanie termicznym funkcjonującego silnika pomija się zależność od lepkości oleju, ponieważ w tym zakresie temperatury lepkość różnych olejów smarujących ma wartości zbliżone.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Cajun N.: *Dobór mocy urządzeń rozruchowych*, Prace Naukowe Politechniki Szczecińskiej nr 491, Szczecin 1992.
- [2] Kilar H., Uzdownski M.: *Wpływ niskich temperatur na opory wewnętrzne zespołów spalinowego silnika tłokowego*. Rozprawa doktorska, WAT, Warszawa, 1987.
- [3] Дяченко Н. Х.: *Теория двигателей внутреннего сгорания*, Машиностроение, Ленинград, 1974.
- [4] Чижков Ю. П.: *Сопротивление прокручиванию валов автомобильных двигателей при электростартерном пуске*, Известия Высших Учебных Заведений, Машиностроение, Nr 10, 1971.