

MODEL NAPĘDZANIA WAŁU KORBOWEGO JAKO NARZĘDZIE DIAGNOZOWANIA SILNIKÓW

Józef PSZCZÓLKOWSKI, Kazimierz KOLIŃSKI

Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Pojazdów Mechanicznych i Transportu
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2, tel. (022) 683 71 46, fax. (022) 683 97 65,
e-mail: jpszczola@wme.wat.edu.pl, kolinski@wme.wat.edu.pl

Streszczenie

Dokonano analizy wykorzystania sygnałów rozruchu silnika tłokowego jako jego parametrów diagnostycznych. Przedstawiono koncepcję modelu matematycznego procesu napędzania wału korbowego silnika przez rozrusznik elektryczny umożliwiającego uzyskanie informacji diagnostycznej o stanie jego zespołów. Wyodrębniono cztery elementy składowe modelu stanowiące odrębne procedury opisu jego elementów strukturalnych: rozrusznika, akumulatora zasilającego rozrusznik, model przemian ładunku powietrza w cylindrze oraz opory ruchu wału korbowego silnika. Informacja diagnostyczna powinna umożliwiać ocenę stanu wymienionych elementów, a znaczenie podstawowe ma możliwość oceny szczelności cylindrów silnika – wartości maksymalnego ciśnienia sprężania ładunku powietrza.

Słowa kluczowe: diagnostyka silników spalinowych, rozruch w niskiej temperaturze.

THE MODEL OF CRANKSHAFT DRIVING AS A TOOL OF ENGINES DIAGNOSING

Summary

There is made the analysis of using the piston engine start-up signals as its diagnostic parameters. The idea of a mathematical model of combustion engine crankshaft driving by electric starter allowing obtaining the diagnostic information on its units technical state is presented. The four components of the model are isolated being the separate procedures of its structural elements description: the starter, battery supplying the starter, cylinder air charge change model and the engine crankshaft resistance torque. The diagnostic information should make possible to apprise the mentioned above elements state and the fundamental meaning have the possibility to evaluate the engine cylinder tightness – maximum compression pressure value of air charge.

Keywords: combustion engine diagnosing, start-up at low temperature conditions.

1. WPROWADZENIE

Rozwój diagnostyki technicznej powoduje powstawanie nowych metod i środków diagnozowania urządzeń oraz doskonalenie istniejących już metod rozpoznawania ich stanu. Jako typowy w tym zakresie przykład metody rozpoznawania stanu silników spalinowych można wskazać metodę oceny szczelności cylindrów wykorzystującą sygnały wyjściowe procesu napędzania wału korbowego przez rozrusznik elektryczny. Sygnałami tymi są natężenie prądu pobieranego przez rozrusznik, napięcie na zaciskach akumulatora lub rozrusznika oraz prędkość obrotowa wału korbowego. Najczęściej w klasycznych metodach diagnozowania silników wykorzystywano natężenie prądu pobieranego przez rozrusznik [3]. Parametr ten służy również do oceny względnej szczelności cylindrów silnika we współczesnych systemach diagnostycznych [4], gdzie wykorzystanie komputerowych systemów rejestracji i przetwarzania sygnałów zwiększa

szybkość dostępu do informacji diagnostycznej. W pracy [5] wskazano na możliwości diagnostycznego wykorzystania prędkości obrotowej wału korbowego silnika napędzanego przez rozrusznik oraz oceny wartości rzeczywistego ciśnienia sprężania powietrza w cylindrach z zastosowaniem funkcji regresji. Przy tym jednak warunki napędzania wału korbowego silnika powinny być ściśle zdefiniowane. W artykule przedstawiono koncepcję diagnozowania silnika na podstawie sygnałów napędzania wału korbowego z wykorzystaniem modelu jako narzędzia pozwalającego uzyskać wtórną informację diagnostyczną.

Diagnostyka techniczna odgrywa coraz większą rolę w systemach eksploatacji urządzeń umożliwiając znaczne zwiększenie ich niezawodności i gotowości do wypełniania funkcji, dla wykonania których urządzenie zostało zaprojektowane i wytworzone. Ma ona szczególne znaczenie w tych systemach eksploatacji, w których procesy obsługowe i naprawcze realizowane są

według metody tzw. dynamicznej. W tym przypadku zakres działań obsługowo-naprawczych jest ściśle związany z rzeczywistym stanem urządzenia i istniejącymi w tym zakresie potrzebami. Zasadność tego typu działań jest zależna od dokładnego rozpoznania stanu urządzenia, a zwłaszcza prognozy przyszłych zmian stanu. Wzrost znaczenia diagnostyki w systemach eksploatacji wynika z kilku istotnych przyczyn. Podstawową jest potrzeba racjonalizacji procesów eksploatacji, z czym bezpośrednio związana jest minimalizacja kosztów eksploatacji i przestojów urządzeń. Zgodnie z tym kryterium należy dążyć do ograniczenia zakresu czynności naprawczych poprzez wykonanie odpowiednio wcześniej zabiegów profilaktycznych polegających na planowej wymianie zespołów, zmniejszając skutki uszkodzeń i koszty przestojów. Ważne znaczenie ma również zmiana cech obiektów eksploatacji, związana ze stosowaniem nowych materiałów konstrukcyjnych, eksploatacyjnych oraz technologii produkcji. Dzięki temu uzyskuje się ich zwiększoną trwałość, a przy dużych kosztach produkcji naprawy elementów lub zespołów funkcjonalnych urządzenia są opłacalne, w stosunku do kosztów zakupu urządzenia nowego. Współczesne obiekty wyposażone są w dużą ilość różnego rodzaju układów pomiarowych wielkości, które pełniąc inne funkcje w urządzeniu (np. sterowania), mogą być również wykorzystywane dla celów diagnostyki. Ponadto postęp technologiczny powoduje wzrost możliwości technicznych jak i metodologicznych diagnostyki związanych z intensywnym rozwojem środków i metod diagnozowania. Ich rozwój umożliwia użycie wielu nowych parametrów diagnostycznych (symptomów stanu) dla celów diagnostyki wykorzystujących nie stosowane dotychczas cechy procesów roboczych, dla których zwiększa się dostępność diagnostyczna. Dotyczy to również rozwoju metod rejestracji i przetwarzania sygnałów diagnostycznych w związku z wykorzystaniem do tych celów techniki komputerowej.

Duża szybkość przetwarzania sygnałów powoduje, że znacznie zwiększają się możliwości uzyskania informacji wtórnej na podstawie zmierzonych wartości sygnałów diagnostycznych, stosowania sztucznej inteligencji i komputerowych systemów ekspertowych w diagnostyce. Dzięki zastosowaniu techniki komputerowej istotnej zmianie ulegają zasady i zakres modelowania diagnostycznego obiektów. Typowym analitycznym modelem diagnostycznym obiektu technicznego jest model regresyjny określający związek między określonym parametrem stanu urządzenia a sygnałem lub zbiorem sygnałów diagnostycznych, czyli sygnałów rejestrowanych na wyjściu urządzenia. W szczególnych przypadkach tego rodzaju modele mogą być zastępowane modelem typu obrazu lub probabilistyczna macierz diagnostyczna. Do budowy optymalnych algorytmów diagnozowania wykorzystywane są modele topologiczne lub binarne macierze

diagnostyczne. Uzyskanie wtórnej informacji diagnostycznej jest związane z przetwarzaniem zmierzonego sygnału diagnostycznego, który stanowi daną wejściową modelu funkcjonowania urządzenia lub jego układów funkcjonalnych. Realizacja procesów roboczych urządzenia jest najczęściej związana z przetwarzaniem energii, stąd też opis fizyczno-matematyczny tych procesów w urządzeniu jest związany ze spełnieniem jednego z podstawowych praw fizycznych – zasady zachowania energii. Zasada zachowania energii pod względem matematycznym, jest najczęściej wyrażana za pomocą równań różniczkowych. Dlatego w rozwiniętych modelach diagnostycznych jako opis funkcjonowania obiektu występują równania różniczkowe, traktowane w tym przypadku również jako modele diagnostyczne urządzenia technicznego.

2. DIAGNOZOWANIE SILNIKA PODCZAS NAPĘDZANIA WAŁU KORBOEGO

W pracy [9] wykazano, że rozruch silnika tłokowego (napędzania wału korbowego przez rozrusznik elektryczny) jest procesem diagnostycznym – generuje sygnały wyjściowe, które zawierają informację o stanie jego zespołów. Napędzanie wału korbowego tłokowego silnika spalinowego przez układ rozruchowy jest w sensie diagnostycznym procesem przetwarzania jego parametrów stanu: moment oporu, rzeczywista moc mechaniczna rozrusznika, rzeczywista (użyteczna) pojemność akumulatora kwasowego, przełożenie między wieńcem koła zamachowego a zębnikiem rozrusznika w wartości odpowiednich parametrów diagnostycznych. Parametrami procesu o znaczeniu diagnostycznym są:

- natężenie prądu pobieranego przez rozrusznik – I ;
- napięcie na zaciskach obciążonego akumulatora (lub rozrusznika) – U ;
- prędkość obrotowa wału korbowego wymuszana przez rozrusznik – n .

Parametry te są ze sobą sprzężone – ściśle powiązane poprzez zbiór charakterystyk rozrusznika, czy bardziej dokładnie, zbiór charakterystyk układu rozruchowego, który poza wymienionymi wyżej zawiera również charakterystyki momentu siły rozrusznika (oraz mocy rozwijanej przez rozrusznik). Istnienie związków między parametrami oznacza, że zawierają one podobną informację o stanie obiektu diagnozy. Jak zaznaczono wyżej, najczęściej dla celów diagnostycznych wykorzystywane jest natężenie prądu pobieranego przez rozrusznik [3] ze względu na łatwość jego pomiaru, a przede wszystkim, że jako parametr diagnostyczny odznacza się największą czułością. Natężenie prądu pobieranego przez rozrusznik jest wykorzystywane w diagnostyce silnika do oceny jakościowej ciśnienia sprężania w cylindrach, tj. oceny równomierności sprężania w poszczególnych cylindrach. Nie wyznacza się natomiast na tej podstawie

bezwzględnej wartości ciśnienia sprężania wobec jego zależności od wielu czynników nie związanych z ciśnieniem sprężania ładunku powietrza.

Istnieje możliwość znacznego rozszerzenia zakresu wnioskowania diagnostycznego na podstawie sygnałów uzyskanych podczas napędzania wału korbowego [9]. Dla tego celu niezbędna jest znaczna rozbudowa modelu diagnostycznego o dalsze modele regresyjne elementów oraz modele ich funkcjonowania. Obiektem diagnozy może być kompletny układ: silnik spalinowy – rozrusznik – akumulator rozruchowy, gdyż współpraca i cechy wszystkich elementów decydują o przebiegu napędzania wału korbowego i generowaniu sygnałów diagnostycznych. Podstawowy model diagnostyczny silnika podczas napędzania wału korbowego przedstawiono również w pracy [9]. Głównym parametrem wejściowym wpływającym na charakterystyki napędzania wału silnika jest temperatura. Przede wszystkim charakteryzuje ona warunki zewnętrzne, w których realizowany jest proces, zwłaszcza przy założeniu, że układ pozostaje w stanie równowagi cieplnej z otoczeniem. Przy tym poszczególnym parametrom można przypisać następujące znaczenie diagnostyczne:

- natężenie prądu pobieranego przez rozrusznik – zawiera największą ilość informacji o stanie diagnozowanego układu. Charakteryzuje zdolność akumulatora do oddawania prądu w warunkach obciążenia, zależy od stanu rozrusznika charakteryzując związek między poborem prądu a wytworzonym momentem siły, zawiera informacje o wielkości momentu oporów ruchu silnika spalinowego, jeżeli charakterystyki rozrusznika są znane. Zawiera ono składową stałą i zmienną (jak i pozostałe parametry), co pozwala na przyporządkowanie ich do różnych miejsc powstawania oporów, a przede wszystkim wyodrębnienia składowej wynikającej z realizacji procesów sprężania ładunku powietrza;
- napięcie na zaciskach obciążonego akumulatora (lub rozrusznika) – zawiera informacje diagnostyczne o stanie źródła energii zasilającego rozrusznik. Jest wielkością zależną od pojemności znamionowej akumulatora wynikającej z jego budowy, natężenia pobieranego prądu, temperatury oraz stanu akumulatora (jego stopnia naładowania i stanu zużycia);
- prędkość obrotowa wału korbowego wymuszana przez rozrusznik – jest wypadkową cech elementów biorących udział w rozruchu: silnika jako obiektu reprezentowanego przez moment oporów ruchu, elektromechanicznych charakterystyk rozrusznika i zdolności rozruchowej akumulatora. Od jej wartości zależne są również parametry stanu silnika, np. jego moment oporów ruchu oraz diagnostyczne,

przede wszystkim ciśnienie sprężania powietrza w cylindrach silnika.

Jak zaznaczono wyżej, zastosowanie procedur diagnostycznych do oceny stanu urządzenia wymaga zbudowania modeli diagnostycznych obiektu, modeli opisujących funkcjonowanie jego układów oraz algorytmów diagnozowania. Wstępny algorytm diagnozowania kompletnego układu silnik – układ rozruchowy podano w pracy [9].

3. MODEL NAPĘDZANIA WAŁU KORBOWEGO PRZEZ ROZRUSZNIK

Kompletny model napędzania wału korbowego silnika przez rozrusznik powinien zawierać szereg równań charakteryzujących procesy zachodzące w poszczególnych układach funkcjonalnych silnika, mających istotny wpływ na zachodzące procesy. Należy przy tym podkreślić wzajemne związki występujące między charakterystykami poszczególnych elementów układu: silnika, akumulatora i rozrusznika. Model matematyczny napędzania wału korbowego przez rozrusznik powinien opisywać bilans energetyczny układów silnika w tych warunkach. Budowa modelu kompleksowego, ze względu na złożoność procesów, nie w pełni poddających się opisowi analitycznemu i wymagających dysponowania dużym zbiorem danych eksperymentalnych, jest zadaniem trudnym. Równaniem podstawowym modelu napędzania wału korbowego silnika tłokowego jest równanie pozwalające na wyznaczenie prędkości obrotowej wału korbowego silnika. Równaniem tym jest równanie bilansu energii rozrusznika, które zgodnie z drugą zasadą dynamiki Newtona dla ruchu obrotowego można zapisać:

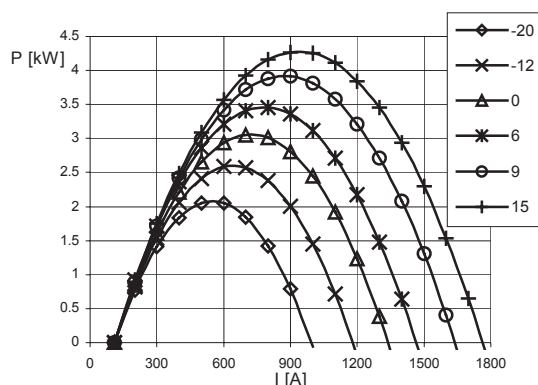
$$M_r + M_i = M_o + I \frac{d\omega}{dt} \quad (1)$$

gdzie: M_r – moment obrotowy (moment siły) rozrusznika, M_i – moment pochodzący od sił gazowych w cylindrach silnika, M_o – moment oporu silnika, I – moment bezwładności mas wirujących, ω – prędkość kątowna wału korbowego.

W powyższym równaniu wyodrębniono składową stałą i zmienną momentu oporu silnika. Składowa stała momentu oporu jest zależna od cech konstrukcyjnych silnika, lepkości oleju smarującego jak też prędkości obrotowej wału. Składowa zmienna pochodząca od sił gazowych jest tutaj szczególnie istotna z uwagi na przeznaczenie modelu do określania ciśnienia sprężania ładunku w cylindrach silnika. Z równania wynika, że dla sformułowania modelu napędzania wału korbowego konieczne jest opracowanie zasad i metod wyznaczenia charakterystyk momentu (i mocy) rozrusznika, zależnych od właściwości źródła energii – akumulatora, momentu oporów i momentu bezwładności mas wirujących silnika oraz momentu sił pochodzącego od sił gazowych.

3.1. Charakterystyki mocy rozrusznika

Z punktu widzenia spełnianych przez rozrusznik zadań najważniejszą jego charakterystyką jest zależność momentu od natężenia prądu. Moment siły rozrusznika jako funkcja natężenia prądu przepływającego przez rozrusznik zwiększa się prawie proporcjonalnie do wartości natężenia prądu i jest niezależny od cech źródła energii – charakterystyka momentu rozrusznika ma przebieg zależny tylko od wartości natężenia pobieranego prądu. Natomiast kształtując napięcie na zaciskach akumulatora można w szerokim zakresie zmieniać wartość prędkości wirnika i mocy rozrusznika. Dlatego charakterystyka podawana przez producenta nie jest bezpośrednio przydatna do analizy parametrów pracy rozrusznika w rzeczywistych warunkach napędzania wału korbowego silnika głównie ze względu na zmiany rezystancji wewnętrznej akumulatora wraz ze zmianą temperatury elektrolitu. Na rys. 1 przedstawiono rzeczywiste charakterystyki mocy rozrusznika R11g podczas napędzania wału silnika AD4.236 w różnych temperaturach otoczenia. W układzie smarowania silnika stosowano olej silnikowy mineralny klasy lepkości wg SAE 15W/40. Rozrusznik zasilano za pomocą akumulatorów o pojemności 120 Ah wychłodzonych do temperatury badania. Widoczna jest zmiana przebiegu rzeczywistej charakterystyki mocy rozrusznika wraz z obniżaniem wartości temperatury w kierunku malejących mocy maksymalnych oraz zmniejszania wartości prądu zwarcia, co wynika ze zmiany cech źródła prądu – akumulatora kwasowego.



Rys. 1. Przebieg charakterystyk mocy rozrusznika R11g dla różnych temperatur pracy podczas napędzania wału korbowego silnika AD4.236

Ponadto należy zauważyć, że podawane przez producentów charakterystyki rozruszników otrzymywane są na stanowiskach badawczych w warunkach obciążania ich stałym momentem siły. Podczas napędzania wału korbowego silnika moment oporu ulega znacznym zmianom powodowanym cyklicznością pracy (realizacją procesów sprężania ładunku w poszczególnych cylindrach silnika). Przebieg charakterystyk mocy

rozrusznika zbliżony do paraboli wskazuje na możliwość ich opisu za pomocą wielomianu drugiego stopnia [6] w zależności od natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik:

$$P = aI^2 + bI + c \quad (2)$$

gdzie: P – moc rozrusznika, [kW] lub [KM]; a , b , c – współczynniki funkcji regresji; I – natężenie prądu pobieranego przez rozrusznik [A].

Zatem charakterystyka rzeczywista mocy w konkretnych warunkach napędzania wału korbowego silnika nie jest znana. Ponieważ jest ona opisywana równaniem drugiego stopnia, współczynniki funkcji regresji można wyznaczyć, jeżeli na podstawie wyniku eksperymentu dane są trzy różne chwilowe punkty pracy rozrusznika. Wówczas należy rozwiązać układ trzech równań liniowych z trzema niewiadomymi współczynnikami a , b , c . Punktem stałym charakterystyki mocy rozrusznika jest punkt odpowiadający prądowi biegu jałowego, w którym wartość mocy jest równa zero. Jeżeli podczas napędzania wału korbowego silnika parametry pracy określane są na poziomie wartości średnich, można wówczas dokładnie określić tylko jeden punkt pracy rozrusznika. Na tej podstawie możliwe jest wyznaczenie dwu współczynników funkcji regresji. Spośród współczynników funkcji regresji, najmniejsze zmiany wykazuje współczynnik b występujący przy wyrazie liniowym [6]. Zatem jego wartość można przyjąć jako stałą, określoną na podstawie znanej charakterystyki mocy rozrusznika, np. podawanej przez producenta. W ten sposób, wykorzystując wynik eksperymentu można wyznaczyć charakterystykę mocy rozrusznika, a stąd przy znanej wartości momentu oporu, wartość prędkości obrotowej wirnika rozrusznika i wału korbowego silnika.

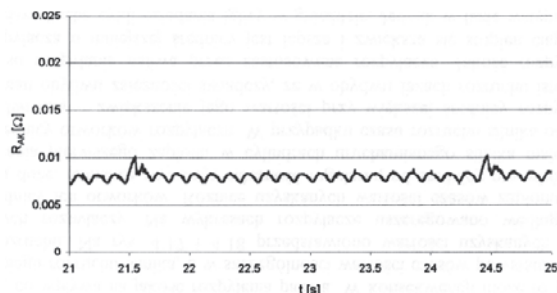
3.2. Charakterystyki akumulatora kwasowego

Zbiór charakterystyk mocy rozrusznika elektrycznego wykazuje zależność od parametrów źródła energii – akumulatora kwasowego. Przebiegi prędkości obrotowej wirnika oraz mocy rozrusznika zależne są od napięcia na zaciskach rozrusznika, a stąd od aktualnej zdolności rozruchowej akumulatora, jego stanu naładowania i temperatury. Dlatego właściwości akumulatora mają podstawowy wpływ na możliwość napędzania wału korbowego silnika spalinowego. Dla akumulatora kwasowego zależność napięcia od natężenia ma w przybliżeniu charakter liniowy. Napięcie na zaciskach obciążonego akumulatora zmienia się w funkcji temperatury wskutek zmian jego rezystancji wewnętrznej. Przy danym natężeniu pobieranego prądu napięcie na zaciskach akumulatora zależy więc od jego pojemności znamionowej Q , temperatury elektrolitu T oraz stanu naładowania k , który może być utożsamiany ze stanem technicznym źródła energii. Zależność napięcia na zaciskach akumulatora U od parametrów charakteryzujących jego stan (stopień naładowania) i obciążenie może

być w warunkach obciążenia stałego przyjęta jako funkcja liniowa typu:

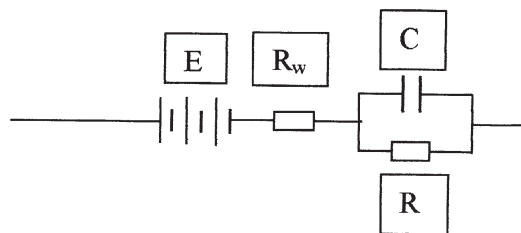
$$U = U(Q, I, T, k) \quad (3)$$

Pewnym problemem jest oznaczanie pojemności akumulatorów, a zwłaszcza ich zdolności rozruchowej przez różnych producentów według różnych norm. Najczęściej stosowane są normy: DIN (Deutsches Institut für Normung), IEC (International Electrotechnical Commission), EN (EURONORM – European standard), ISO (International Organization for Standardization), SAE (Society of Automotive Engineers). Ponadto podczas napędzania wału korbowego silnika wartość chwilowa natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik ulega znacznym zmianom. Powoduje to również znaczne zmiany chwilowej wartości rezystancji (modułu impedancji – zawady) akumulatora (rys. 2). Akumulator kwasowy jest więc źródłem prądu wykazującym znaczne cechy dynamiczne i chwilowe napięcie na jego zaciskach jest zależne od szybkości zmian natężenia pobieranego prądu. Cykliczność zmian rezystancji jest zgodna z cyklicznością prędkości obrotowej wału korbowego. Widoczne na rys. 2 dwukrotne nagłe zwiększenie wartości pozornej rezystancji akumulatora jest związane z wystąpieniem zapłonów w cylindrach silnika podczas próby rozruchowej. Wówczas następuje wzrost chwilowej prędkości obrotowej wału korbowego i towarzyszące mu zmniejszenie natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik. Ponieważ zmiany napięcia na zaciskach akumulatora „nie nadążają” za zmianami natężenia prądu, to oczywistym jest w tym przypadku wzrost pozornej rezystancji akumulatora.



Rys. 2. Zmiany pozornej rezystancji wewnętrznej akumulatora w warunkach rozruchu silnika

Stąd też na chwilową wartość rozwijanego momentu siły, a zwłaszcza mocy rozrusznika wpływają dynamiczne właściwości źródła energii – akumulatora, powodowane występowaniem siły elektromotorycznej polaryzacji elektrod. Jest ona powodowana zmianami stanu warstwy przyściennej płyt akumulatora oraz stężenia elektrolitu wokół nich. Dlatego elektryczny schemat zastępczy akumulatora kwasowego powinien być przedstawiany jak na rys. 3 [7]. Na schemacie E reprezentuje siłę elektromotoryczną akumulatora, R_w – opór wewnętrzny, C , R – parametry elektryczne związane z istnieniem siły elektromotorycznej polaryzacji.



Rys. 3. Elektryczny schemat zastępczy akumulatora kwasowego

Dynamiczne właściwości akumulatora kwasowego związane z jego siłą elektromotoryczną polaryzacji powodują, że podczas napędzania wału korbowego, przy zmiennym obciążeniu, rozrusznik uzyskuje korzystniejsze parametry efektywne aniżeli osiągałby w warunkach analogicznego obciążenia stałego. Oznacza to, że w chwili obciążenia prądem o wartości maksymalnej, napięcie na zaciskach akumulatora, a więc i rozrusznika jest odpowiednio większe, ale też przy obciążeniu prądem minimalnym pobieranym przez rozrusznik napięcie to jest niższe niż w warunkach obciążenia stacjonarnego.

3.3. Model przemian ładunku powietrza w cylindrze silnika

Jednym z podstawowych celów przedstawianej koncepcji modelu napędzania wału korbowego jest możliwość określenia, jako wtórnej informacji diagnostycznej, wartości ciśnienia sprężanego powietrza w cylindrach silnika. Stąd model przemian powietrza ma tu znaczenie zasadnicze. Proces przemiany gazu w cylindrze można opisać za pomocą zasady zachowania energii – I zasady termodynamiki w postaci różniczkowej dla układu otwartego:

$$dU = dQ - pdV + idm \quad (4)$$

gdzie:

- $dU = mdu + udm$ – zmiana energii wewnętrznej sprężanego w cylindrze ładunku powietrza (wyrażenie: $dU = mc_v dT$ – iloczyn masy powietrza m , jego ciepła właściwego c_v i przyrostu temperatury dT służy do wyznaczenia chwilowego przyrostu temperatury);
- dQ – ilość ciepła wymienianego przez ładunek ze ściankami;
- pdV – elementarna praca zmiany objętości;
- i – entalpia właściwa gazu ($I = U + pV$).

Zmianę energii i parametry ładunku w procesie przemian można wyznaczyć poprzez scałkowanie równania (4). Zarówno procesy wymiany ciepła jak też przepływu płynów w rzeczywistych układach fizycznych są opisywane z wykorzystaniem wyznaczanych eksperymentalnie współczynników: przejmowania ciepła oraz natężenia lub oporu

przepływu. Dobór lub wyznaczenie ich wartości stanowi podstawowy problem przy opracowaniu omawianego modelu przemian powietrza. Znanych jest wiele formuł empirycznych określających wartość współczynnika przejmowania ciepła w komorach sprężania silników, zamieszczonych m.in. w pracy [10]. Formuły te mają najczęściej postać ogólną:

$$\alpha = A(v_t p)^a (d)^b (T)^c \quad (5)$$

gdzie: A , a , b , c – parametry stałe, v_t – średnia prędkość tłoka, d – średnica cylindra.

W proponowanym modelu obliczeń parametrów gazu w cylindrze wybrano [8] stosowanie wzorów Woschni, które innymi zależnościami opisują przejmowanie ciepła w fazie wymiany ładunku i przy zamkniętych zaworach układu rozrządu. Ponieważ wyrażenie określające wartość współczynnika przejmowania ciepła przyjęto na podstawie dostępnych danych literaturowych, wartość drugiego eksperymentalnie określanego parametru charakteryzującego przepływ powietrza przez nieszczelności zespołu tłok-cylinder przyjęto na podstawie wyników badań własnych. Przepływ powietrza może być traktowany jako przepływ płynu nieściśliwego lub ściśliwego. Duże różnice ciśnienia pomiędzy przestrzenią cylindra i skrzyni korbowej wskazują na możliwy nawet nadkrytyczny charakter przepływu, jednak z drugiej strony duże opory przepływu przez uszczelnienia pierścieniowe powodują znaczne ograniczenie prędkości przepływu powietrza. Przyjmując dla nieszczelności zespołu tłok-pierścienie-cylinder model pojedynczej szczeliny pierścieniowej, dla przepływu powietrza zdefiniowano jednostkowy liniowy współczynnik objętościowego natężenia przepływu μ_l , wobec czego objętość ΔV powietrza przepływającego w czasie Δt można wyrazić (jeżeli rozpatrywany jest przepływ płynu nieściśliwego):

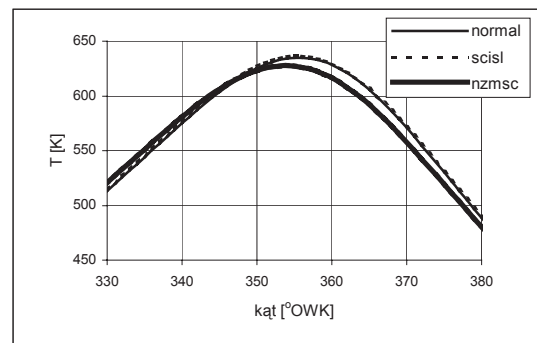
$$\Delta V = \pi d \mu_l \Delta t \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho}} \quad (6)$$

gdzie: d – średnica cylindra, Δp – różnica ciśnień w cylindrze i skrzyni korbowej silnika, ρ – gęstość powietrza w cylindrze (dla przepływu płynu ściśliwego należy uwzględnić odpowiednią zmianę formuły określającej prędkość przepływu [11]).

Wartość zdefiniowanego wyżej jednostkowego liniowego współczynnika objętościowego natężenia przepływu przyjmuje się tak, aby obliczona na podstawie modelu i zmierzona eksperymentalnie wartość maksymalna ciśnienia sprężania ładunku powietrza w cylindrze były równe. Jak zaznaczono wyżej, chwilowa wartość prędkości obrotowej wału korbowego napędzanego przez elektryczny układ rozruchowy zmienia się w znacznym stopniu. Współczynnik nierównomierności napędzania wału korbowego silnika przez elektryczny układ rozruchowy w warunkach niskiej temperatury może osiągać wartości do około 0,3 (większe wartości występują w zakresie bardzo niskiej temperatury lub złym stanie naładowania akumulatora). Aktualnie

brak jest dostatecznych danych do jej wyznaczenia analitycznego i w tym zakresie można się jedynie posłużyć wynikami eksperymentu. Dla określenia istotności wpływu poszczególnych założeń dotyczących modelu przemian gazu w cylindrze na uzyskiwane wyniki obliczeń, na rys. 4 przedstawiono fragment przebiegu (otoczenie GMP) zależności obliczonych wartości temperatury ładunku powietrza dla różnych warunków jego przepływu przez nieszczelności zespołu tłok-cylinder oraz zmian prędkości chwilowej wału korbowego (wartość średnia – 120 obr/min, temperatura otoczenia 260 K). Obliczenia dotyczą silnika AD4.236, a na rysunku przyjęto następujące oznaczenia:

- *normal* – założony przepływ nieściśliwy, prędkość obrotowa stała;
- *scisl* – przepływ gazu ściśliwy, prędkość stała;
- *nzmsc* – przepływ gazu ściśliwy, prędkość zmienna.



Rys. 4. Fragment zależności obliczonych wartości temperatury ładunku od kąta obrotu wału korbowego dla różnych warunków przepływu gazu i zmian prędkości obrotowej wału

Dla każdego z rozpatrywanych procesów przemian gazu konieczne było przyjęcie różnych wartości współczynnika objętościowego natężenia przepływu, przy zachowaniu kryterium równości wartości ciśnień maksymalnych. Z rysunku wynika, że różnice obliczonych wartości temperatur są nieznaczne niezależnie od przyjętego mechanizmu przepływu powietrza, nieco większe znaczenie ma uwzględnienie zmian chwilowej prędkości obrotowej wału korbowego. Maksymalne względne różnice wartości parametrów charakteryzujących przebiegi, tj. temperatury, ciśnienia i ubytku masy powietrza w odniesieniu do wyników przebiegu traktowanego jako przepływ nieściśliwy przy stałej prędkości obrotowej są równe:

- dla przebiegu uwzględniającego przepływ płynu ściśliwego przy stałej prędkości wału korbowego: temperatura – 0,55 %, ciśnienie – 2 % (największe poza GMP tłoka ok. 430 °OWK), ubytek masy – 1,5 %;
- dla przebiegu uwzględniającego przepływ płynu ściśliwego przy zmiennej chwilowej prędkości wału korbowego: temperatura – 2,3 %, ciśnienie – 9 % (największe poza GMP tłoka ok. 430 °OWK), ubytek masy – 8 % (ok. 430 °OWK).

3.4. Moment oporów ruchu wału korbowego silnika

Przyczynami powstawania momentu oporów ruchu wału korbowego tłokowego silnika spalinowego są opory tarcia w skojarzeniach tribologicznych, siły i momenty bezwładności oraz siły pochodzące od sprężania powietrza w cylindrach. Na moment oporu kompletnego silnika pochodzący od sił tarcia składają się straty powstające w głównych jego skojarzeniach tribologicznych, do których zalicza się:

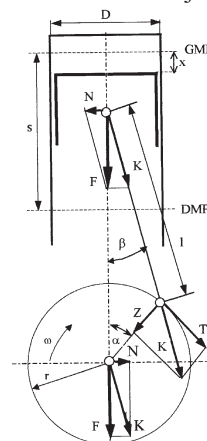
- układ korbowo-tłokowy – wyodrębnia się opory tarcia łożysk głównych i korbodowodowych wału korbowego oraz tarcia tłoków i pierścieni tłokowych o powierzchnię cylindrów. Udział oporu układu korbowo-tłokowego w wielkości momentu oporu kompletnego silnika jest największy, szczególnie w warunkach niskich temperatur wzrasta udział strat tarcia łożysk wału korbowego, co wskazuje na decydujący wpływ wzrostu lepkości oleju;
- sprężanie powietrza w cylindrach silnika – opory ruchu wynikają z wykonania pracy sprężania przez tłok oraz dodatkowego nacisku w skojarzeniach tribologicznych układu korbowego;
- urządzenia pomocnicze – układ zasilania paliwem, pompa oleju, pompa płynu chłodzącego, wentylator, prądnica, sprężarka powietrza;
- układ rozrządu.

W tak skomplikowanym systemie tribologicznym, jakim jest tłokowy silnik spalinowy opory tarcia nie mogą być wyznaczone analitycznie, lecz jedynie na podstawie danych eksperymentalnych w postaci zależności regresyjnej. W literaturze istnieje wiele wzorów empirycznych [1], określających wartość średniego momentu oporu silnika w warunkach rozruchu, czyli napędzania wału korbowego za pomocą rozrusznika. Wiążą one moment oporu głównie z prędkością obrotową wału korbowego n (lub prędkością średnią tłoka), lepkością kinematyczną oleju smarującego ν i rozmiarami silnika i różnią się między sobą wartościami stałych współczynników. W pracy [2], na podstawie analizy wyznaczonych wartości momentu oporu silników o zapłonie samoczynnym, których badania rozruchowe były realizowane w Wojskowej Akademii Technicznej, do podanych w pracy [1] wzorów wprowadzono współczynnik D korygujący istniejące formuły empiryczne. Wartości średnie współczynnika korekcyjnego były różne dla silników o liczbie cylindrów równej 6, 4 lub 3 oraz 2. Zależności te ostatecznie mają więc postać ogólną:

$$M_o = kAD\nu^a n^b \quad (7)$$

gdzie: k , a , b – parametry stałe, A – parametr uwzględniający wymiary głównych powierzchni trących silnika.

Rozruchowy moment oporu nie jest wielkością stałą w trakcie jednego cyklu pracy silnika. Jego zmienność wynika z cykliczności realizacji pracy sprężania ładunku w poszczególnych cylindrach i wywieranego przez ciśnienie gazu nacisku na tłok, a stąd i na łożyska wału korbowego. Na rys. 5 przedstawiono rozkład sił w mechanizmie korbowym silnika pochodzących od sił gazowych – ciśnienia sprężanego w cylindrze powietrza. Siły gazowe stanowią bezpośrednio obciążenie łożysk wału korbowego i zwiększają moment oporu niezbędny do zrównoważenia sił tarcia w łożyskach (podczas napędzania wału korbowego przez rozrusznik w jego łożyskach występuje tarcie płynne lub graniczne) oraz powstanie siły bocznej N działającej na tłok i będącej przyczyną występowania oporów tarcia tłoka o gładź cylindra. Ponadto siły gazowe powodują powstanie momentu oporu pochodzącego od siły składowej T , który musi być zrównoważony przez moment siły rozrusznika dla wykonania pracy sprężania ładunku. Wzajemne relacje między tymi składowymi oporów pochodzących od ciśnienia sprężonych gazów decydują o wielkości chwilowej wartości składowej zmiennej momentu oporu silnika. Dla modelu diagnostycznego określenie relacji odwrotnej stanowi podstawę do uzyskania użytecznej dla określenia stanu silnika informacji diagnostycznej.



Rys. 5. Rozkład sił w mechanizmie korbowym

Należy również podkreślić istotną rolę momentu bezwładności mas silnika znajdujących się w ruchu obrotowym na charakterystykę zmian średniego i chwilowego momentu oporu silnika, a co za tym idzie natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik oraz prędkości obrotowej napędzanego wału korbowego. Zgodnie z równaniem (1) moment bezwładności mas wirujących pełni rolę czynnika stabilizującego obciążenie rozrusznika. Zatem jego zwiększenie powoduje zmniejszenie stopnia nierównomierności prędkości obrotowej wału korbowego i natężenia prądu rozrusznika. Jednak wpływa on również na wartość średniej prędkości obrotowej wału korbowego (obciążenia rozrusznika momentem siły i natężenia pobieranego prądu) powodując jej zwiększanie wraz ze wzrostem wartości momentu bezwładności mas wirujących

[7]. Fakt zwiększenia wartości średniej prędkości obrotowej wraz ze wzrostem momentu bezwładności wynika z cech dynamicznych układu rozruchowego.

4. PODSUMOWANIE

Współczesne metody i środki diagnostyki technicznej umożliwiają szerokie jej stosowanie we wszystkich etapach istnienia urządzeń technicznych oraz zmianę zasad wnioskowania diagnostycznego. Zmiana zasad polega na coraz szerszym zakresie przetwarzania pierwotnej informacji diagnostycznej i uzyskiwanie informacji wtórnej przy wykorzystaniu modeli funkcjonowania urządzeń lub tych ich elementów, których proces diagnostyczny dotyczy. Sygnały wyjściowe procesu napędzania wału korbowego silnika przez rozrusznik elektryczny: natężenie pobieranego przez rozrusznik prądu, napięcie na zaciskach akumulatora i prędkość obrotowa wału korbowego mogą być traktowane jako parametry diagnostyczne silnika i jego układu rozruchowego. Istotne przy tym jest zwiększenie zakresu decyzji diagnostycznych na podstawie wtórnej informacji diagnostycznej. Zaproponowany model napędzania wału korbowego przez rozrusznik, którego koncepcję przedstawiono, może stanowić podstawę do realizacji dalszych prac analitycznych i badań eksperymentalnych mających na celu opracowanie kompletnej metody diagnostycznej.

LITERATURA

- [1] Чишков Ю. П.: Сопротивление прокручиванию валов автомобильных двигателей при электростартерном пуске; Известия Высших Учебных Заведений, Машиностроение, Nr 10, 1971.
- [2] Dziubak T., Pszczółkowski J.: Rozruchowy moment oporu silników spalinowych; Biuletyn WAT, nr 8–9, 1999r, str.: 149 ÷ 166.
- [3] Hebda M., Niziński S., Pelc H.: Podstawy diagnostyki pojazdów Mechanicznych; WKŁ, Warszawa, 1980.
- [4] Pięta A., Juszcak M., Olchowik W., Trawiński G.: Komputerowy zestaw diagnostyczny silników 359, KONSPAL'96, Wrocław, 1996.
- [5] Pięta A., Trawiński G.: Ocena szczelności cylindrów na podstawie pomiarów chwilowej prędkości obrotowej wału korbowego silnika. Journal of KONES. Nr 3-4, 2004r, str.: 100 ÷ 107.
- [6] Pszczółkowski J.: Metoda wyznaczania charakterystyki mocy rozrusznika; Biuletyn WAT, nr 9, 2001r, str.: 143 ÷ 157.
- [7] Pszczółkowski J., Koliński K.: Napędzanie wału korbowego silnika przez elektryczny układ rozruchowy. 28th International Scientific Conference on Combustion Engines KONES 2002, Jurata, 2002. str. 208 – 215.
- [8] Pszczółkowski J., Koliński K.: Problemy modelowania obiegu termodynamicznego silnika w warunkach rozruchu; Konstrukcja, Badania, Eksploatacja, Technologia Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych. Polska Akademia Nauk, Oddział w Krakowie, Zeszyt Nr 26-27, Kraków 2003, str. 417 ÷ 424.
- [9] J. Pszczółkowski: Rozruch silnika tłokowego jako proces diagnostyczny. Diagnostyka, vol. 27, 2002, str.: 48 – 53.
- [10] S. Wiśniewski: Obciążenia cieplne silników tłokowych; WKŁ, Warszawa, 1972.
- [11] S. Wiśniewski: Termodynamika techniczna; WNT, Warszawa, 1980.

Dr inż. Kazimierz KOLIŃSKI – Kierownik Zakładu



Silników Pojazdów Mechanicznych w Instytucie Pojazdów Mechanicznych i Transportu Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie. Zajmuje się problematyką eksploatacji pojazdów mechanicznych i urządzeń specjalnych w warunkach niskich temperatur otoczenia.

Dr inż. Józef PSZCZÓŁKOWSKI jest adiunktem



w Instytucie Pojazdów Mechanicznych i Transportu WAT. Zajmuje się problemami rozruchu silników spalinowych w niskiej temperaturze.