

## CHARAKTERYSTYKI MECHANICZNE ELEKTRYCZNEGO UKŁADU ROZRUCHOWEGO SILNIKA SPALINOWEGO

*W artykule scharakteryzowano napędzanie wału korbowego przez rozrusznik jako proces diagnostyczny. Omówiono warunki pracy rozrusznika elektrycznego podczas napędzania wału korbowego silnika w aspekcie równowagi momentu oporu silnika i momentu siły wytwarzanego przez układ rozruchowy. Scharakteryzowano źródła oporów w silniku spalinowym oraz omówiono czynniki mające na nie wpływ, wskazano jego składowe oraz zależności pozwalające na ich wyznaczenie. Wskazano zmienność momentu oporu silnika w cyklu jego pracy oraz zmienność momentu i prędkości obrotowej wału korbowego w procesie napędzania wału. Przedstawiono stanowisko oraz metodykę badań rozruchu silnika spalinowego oraz wpływ wartości temperatury i mocy układu rozruchowego na rejestrowane sygnały rozruchu. Wskazano związki przyczynowo-skutkowe momentu oporu silnika i cech – parametrów pracy układu rozruchowego. Wykazano, że wartości sygnałów rejestrowanych podczas napędzania wału korbowego mają cechy parametrów diagnostycznych silnika w aspekcie oceny szczelności przestrzeni nadłokowej oraz wartości sumarycznych oporów silnika spalinowego.*

### WSTĘP

Diagnostyka jest dziedziną wiedzy i działalności człowieka, której przedmiotem i celem jest opracowanie zasad i metod oraz budowa środków umożliwiających rozpoznanie stanu badanego obiektu na podstawie charakterystycznych objawów jego funkcjonowania. Dla celów diagnostyki wykorzystuje się przede wszystkim parametry charakteryzujące podstawowe procesy robocze maszyn oraz procesy im towarzyszące. Diagnostyka wykorzystuje więc wszelkie stany pracy urządzeń niosące informacje o stanie obiektu. Istotą badania diagnostycznego jest pomiar wartości parametru diagnostycznego i wyznaczenie na tej podstawie wartości parametru stanu, którą porównuje się z ustaloną jego wartością dopuszczalną lub graniczną. W praktyce eksploatacyjnej istotne jest ustalenie klasy stanu podatności bądź niepodatności obiektu. Często dokonywane jest to także na podstawie wartości parametru sygnału diagnostycznego, jeżeli ustalono dla niego wymagania.

Badania diagnostyczne dogodnie jest realizować w ustalonych bądź stacjonarnych warunkach pracy maszyny. Zmniejsza to ilość zmiennych wpływających na wartości mierzonych parametrów diagnostycznych. Często jednak procesy dynamiczne są bardziej informatywne aniżeli stacjonarne stany pracy, bądź też z natury procesu wynika brak możliwości zapewnienia ustalonych stanów pracy. W dynamicznych warunkach pracy obiekty techniczne mają na ogół nieliniowe charakterystyki funkcjonowania. Wówczas stan pracy obiektu w danej chwili jest zależny od stanów pracy w chwilach poprzedzających. W takich warunkach nie jest możliwe wyznaczenie odpowiedzi układu na podstawie jego charakterystyki stacjonarnej – konieczne jest dla ustalenia parametrów wyjścia obiektu zbudowanie modelu jego procesów dynamicznych. Zazwyczaj, w związku ze złożonością obiektów rzeczywistych i procesów w nich zachodzących opracowanie modelu dynamicznego wymaga długotrwałych badań eksperymentalnych w celu wyznaczenia niezbędnych parametrów stałych i cech modelu.

Te zasady i procedury mają istotne znaczenie dla opracowania metody diagnozowania silnika i układu rozruchowego na podstawie sygnałów rozruchu (napędzania wału korbowego). Podjęcie przez

silnik spalinowy samodzielnej pracy wymaga dostarczenia energii w postaci napędzania jego wału korbowego. Energia elektryczna pobierana z akumulatora podczas rozruchu zamieniana jest przez rozrusznik na energię mechaniczną. Prędkość obrotowa wału korbowego jest determinowana przez moc układu rozruchowego oraz moment oporów ruchu silnika spalinowego. Istotny wpływ na prędkość obrotową wału korbowego podczas napędzania wału ma temperatura silnika i otoczenia (na ogół znajduje się on w równowadze termicznej z otoczeniem). Wraz ze zmniejszaniem wartości temperatury zwiększa się lepkość oleju silnikowego, co powoduje wzrost oporów ruchu wału korbowego. Ponadto wraz z obniżaniem temperatury wzrasta wartość rezystancji wewnętrznej akumulatora powodując spadek mocy układu rozruchowego. Wynika to ze zwiększenia lepkości elektrolitu w obniżonej temperaturze i zmniejszenia ruchliwości jonów będących nośnikami ładunku elektrycznego, a przez to przewodności elektrycznej elektrolitu.

W efekcie zmianie ulegają warunki, parametry pracy rozrusznika. Zmienia się moment oporu silnika, który musi być zrównoważony momentem siły rozrusznika. Zmienia się także moc elektryczna akumulatora jako źródła energii, co przy danym momencie oporu zmienia prędkość obrotową wału korbowego, a więc i napędzanego wału korbowego silnika. Podkreślić przy tym należy, że w elektrycznym układzie rozruchowym taka równoważność zmian mocy elektrycznej źródła i mocy mechanicznej rozrusznika nie zachodzi wprost – moc (moment siły i prędkość) rozrusznika wynika z jego transmitancji – funkcji przejścia (przekształcenia) energii elektrycznej na mechaniczną. Zależności te odzwierciedla zbiór charakterystyk elektryczno-mechanicznych rozrusznika.

Badania sygnałów rozruchu (napędzania wału korbowego) silnika spalinowego realizowane są przy zastosowaniu odpowiedniej metodyki oraz stanowiska pomiarowego umożliwiającego rejestrację sygnałów. Stanowisko umożliwia także płynną regulację wartości temperatury w szerokim zakresie jej zmienności. Układ umożliwia rejestrowanie parametrów pracy układu rozruchowego i silnika: natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik, napięcia na zaciskach obciążonego akumulatora i rozrusznika, prędkość obrotową wału korbowego oraz ciśnienia w komorze spalania każdego cylindra. Dodatkowo stanowisko wyposażone jest w tory pomiaru warto-

ści temperatury: otoczenia, oleju silnikowego, cieczy chłodzącej oraz powietrza w kolektorze dolotowym.

Spśród wymienionych sygnałów napędzania wału korbowego natężenie prądu pobieranego przez rozrusznik elektryczny stanowi sygnał diagnostyczny, wykorzystywany w praktyce przy ocenie szczelności komory spalania. Przyjmuje się przy tym, że stan rozrusznika w chwili formułowania diagnozy odpowiada stanowi zadatności. W przypadku rozruszników na ogół nie uwzględnia się zmiany charakterystyk roboczych w funkcji czasu eksploatacji. Zużywanie się elementów par kinematycznych rozruszników jest trudne do oceny diagnostycznej i na ogół nie realizowane w warunkach eksploatacji. Nie przewiduje się tu okresowych badań i obsługi rozruszników. Wymienia się je (ewentualnie naprawia) dopiero po wystąpieniu uszkodzenia lub osiągnięciu stanu granicznego, gdy uruchomienie silnika nie jest możliwe. Stosowane są tutaj strategii eksploatacyjne reaktywna bądź bierna. pozwalają na samochodzie. Operatorzy maszyn lub pojazdów podejmują na ogół próby uruchomienia silnika do chwili wyczerpania akumulatora. Zatem awaria układu, polegająca na braku możliwości uruchomienia silnika skutkuje przynajmniej całkowitym rozładowaniem akumulatora, brakiem wykonania lub opóźnieniem realizacji zadań. Dlatego istotne jest opracowanie metody diagnostycznej pozwalającej na ocenę stanu układu rozruchowego i silnika.

Celem artykułu jest analiza cech, właściwości mechanicznych układu rozruchowego i silnika w aspekcie równowagi momentu oporu silnika i momentu siły rozrusznika w warunkach napędzania wału korbowego. Analiza taka ma podstawowe znaczenie pod kątem informacji dla budowy modelu procesu diagnostycznego na podstawie rejestrowanych wielkości o znaczeniu diagnostycznym: natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik, napięcia na zaciskach obciążonego akumulatora, prędkości obrotowej wału korbowego wymuszanej przez rozrusznik. Natężenie prądu pobieranego przez rozrusznik podczas napędzania wału korbowego zawiera informację o ogólnym stanie układu rozruchowego, a także zawiera o wielkości momentu oporu silnika spalinowego. Napięcie na zaciskach obciążonego akumulatora dostarcza informacji o stanie źródła zasilania i potencjalnej mocy rozrusznika. Prędkość obrotowa wału korbowego dostarcza informacji o stanie układu rozruchowego i silnika, jako elementów współpracujących podczas napędzania wału korbowego silnika spalinowego.

## 1. MECHANICZNE OBCIĄŻENIA ROZRUSZNIKA

Mechaniczne cechy układu rozruchowego podczas napędzania wału korbowego, parametry jego pracy, determinowane są przede wszystkim przez moment oporu silnika. Wartość i zmiany chwilowej wartości momentu oporów ruchu silnika składają się z oporu związanego z tarciami, a więc o charakterze tribologicznym, związanego z procesami przemian ładunku w cylindrze i pochodzących od momentów bezwładności mas w ruchu obrotowym. Na moment oporu kompletnego silnika składają się powstające w zespołach funkcjonalnych straty tarcia w głównych jego skojarzeniach tribologicznych:

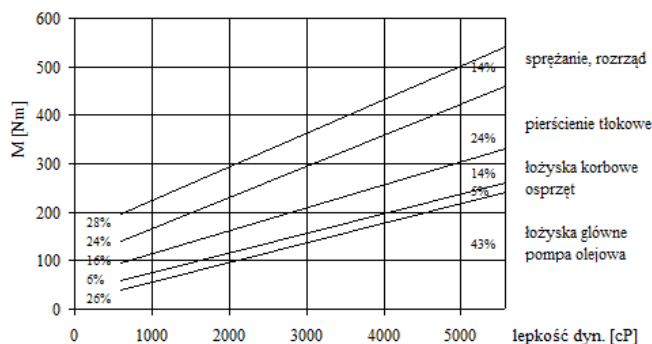
- układ korbowo-tłokowy, w którym wyodrębnia się opory tarcia łożysk wału korbowego, korbowodów oraz tłoków i pierścieni tłokowych o powierzchnię cylindrów,
- układ rozrządu,
- urządzenia pomocnicze – układ zasilania paliwem, pompa oleju, pompa cieczy chłodzącej, wentylator, prądnica, sprężarka powietrza,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

Brak jest jednoznacznej oceny udziału oporów poszczególnych układów silnika w jego oporze całkowitym [2]. Udziały te są istotnie zależne od temperatury silnika (lepkości oleju i cieczy chłodzącej),

prędkości obrotowej wału korbowego, stopnia sprężania. Udziały procentowe oporów ruchu silnika 359 w przedziale temperatury 253 ÷ 273 K są równe:

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

Badanie rozkładu momentu oporów ruchu polega na pomiarze oporów silnika w różnych jego stanach montażowych. Napędzanie zespołów realizowane jest za pomocą zewnętrznych źródeł napędu. Ocena wartości oporów dokonywana jest na podstawie różnicy wartości momentu oporu dla różnych stanów montażowych silnika lub badaniu zespołu silnika. Moment oporu kompletnego silnika wzrasta w przybliżeniu proporcjonalnie do pierwiastka kwadratowego lepkości oleju smarującego. Udziały procentowe składowych momentu oporu w zależności od lepkości oleju przedstawiono na rys. 1. Największy jest udział momentu oporu układu korbowo-tłokowego (szczególnie wzrasta udział strat tarcia łożysk), co wskazuje na decydujący wpływ lepkości oleju. Obserwuje się także wzrost momentu oporu wraz ze wzrostem prędkości obrotowej, przy czym gradient przyrostu oporu jest większy w niższych temperaturach i przedziale niskich wartości prędkości obrotowej.



**Rys. 1.** Wpływ lepkości dynamicznej oleju na składowe momenty oporu silnika 359 (dla prędkości obrotowej wału 120 obr./min) [2]

Składowe momenty oporu pochodzące od sprężania ładunku wynikają z strat obiegu i strat dodatkowych wywołanych tarciami tłoka i łożysk. Straty obiegu są praktycznie niezależne od temperatury i czasu napędzania wału korbowego. Najbardziej wiarygodne wyniki badań momentu oporu silników otrzymuje się wyznaczając go na podstawie parametrów i charakterystyk pracy rozrusznika, ponieważ odzwierciedla to dynamikę procesu.

Opracowano zależności empiryczne pozwalające wyznaczyć wartość średnią momentu oporów ruchu silnika [3]. Umożliwiają one przybliżoną ocenę momentu oporu silnika. Stosowane w warunkach obniżonej temperatury formuły uzależniają moment oporu od cech konstrukcyjnych silnika, prędkości obrotowej wału korbowego i lepkości oleju. Może on być wyznaczany na podstawie średniego ciśnienia tarcia, określanego z ogólnej zależności:

$$P_i = P_e + P_t \quad (1)$$

gdzie:

- $p_i$  – średnie ciśnienie indykowane,
- $p_e$  – średnie ciśnienie efektywne,
- $p_t$  – średnie ciśnienie tarcia.

Wówczas moment oporu  $M_o$  wyznacza się porównując jego pracę w czasie cyklu roboczego silnika do pracy średniego ciśnienia tarcia, w objętości skokowej silnika:

$$M_o \cdot 4\pi = p_t V_{ss} \quad (2)$$

gdzie:  $V_{ss}$  – pojemność skokowa silnika

Dla warunków rozruchu (napędzania wału korbowego) średnie ciśnienie tarcia najczęściej wyznacza się z zależności:

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

gdzie:

$\eta$  – lepkość dynamiczna oleju [mPas];

$n$  – prędkość obrotowa wału korbowego [obr./min].

Średnie ciśnienie tarcia, zatem i wartość momentu oporów ruchu wału korbowego zależy od lepkości dynamicznej oleju oraz prędkości obrotowej wału korbowego. Drugim, analogicznym sposobem określenia momentu oporu jest zależność postaci (4):

$$M_o = kA v^a n^b \quad (4)$$

gdzie:

$M_o$  – moment oporów ruchu [Nm],

$k, a, b$  – parametry stałe,

$A$  – parametr uwzględniający wymiary głównych powierzchni trących silnika [cm<sup>2</sup>],

$v$  – lepkość kinematyczna oleju [mm<sup>2</sup>/s],

$n$  – prędkość obrotowa wału korbowego [obr./min].

Przykładem zależności pozwalającej wyznaczyć moment oporów ruchu dla silników o zapłonie samoczynnym i liczbie cylindrów mniejszej i równej sześć jest (5).

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

gdzie:  $V_s$  – objętość skokowa silnika [dm<sup>3</sup>].

Do obliczania momentu oporu współczesnych silników spalinowych w pracy [3] podano współczynniki korygujące.

Podczas długotrwałego napędzania wału korbowego występują znaczne zmiany warunków, wynikające nie tylko ze zmian stanu układu rozruchowego (wyczerpywania energii akumulatora), ale także warunków tarcia w skojarzeniach tribologicznych silnika. Stąd też występują tu odpowiednie zmiany średniej, w cyklu pracy silnika, wartości prędkości obrotowej wału korbowego. Moc oporów wewnętrznych silnika można wyrazić zależnością:

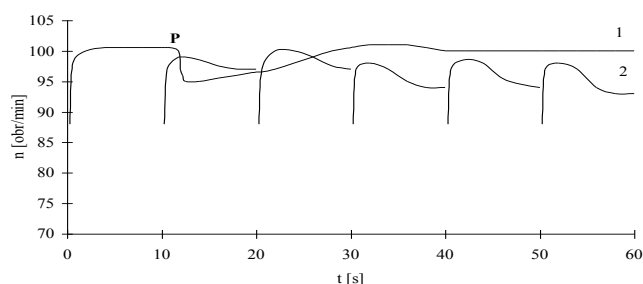
$$P_o = M_o \cdot \omega \quad (6)$$

gdzie:

$M_o$  – moment oporu silnika,

$\omega$  – prędkość kątowna wału korbowego.

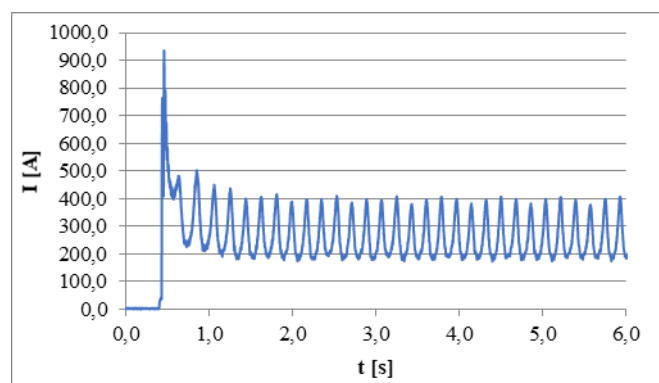
Wynika stąd, że zmiany średniej wartości momentu oporu i średniej prędkości obrotowej wału korbowego silnika są odwrotnie proporcjonalne. Stąd, na podstawie zmian prędkości obrotowej wału korbowego, można dokonać także oceny zmian rozruchowego momentu oporu silnika. Typowy przebieg zmian wartości średniej prędkości obrotowej wału korbowego napędzanego przez rozrusznik w sposób ciągły oraz w cyklach trwających 10 s z przerwą 30 s przedstawiono na rys. 2.



**Rys. 2.** Zależność prędkości obrotowej napędzania wału korbowego silnika A4.236 od czasu przy: 1 – ciągłej pracy rozrusznika, 2 – pracy rozrusznika w cyklach 10 s z przerwą 30 s [2]

W przedziale czasu od 0 do 10 s obserwuje się nieznaczny przyrost prędkości obrotowej wału korbowego. Wynika to ze wzrostu temperatury oleju w łożyskach po włączeniu rozrusznika – zmniejsza się jego lepkość, a stąd moment oporu silnika. W punkcie P następuje znaczny spadek wartości prędkości wału korbowego. Jest to związane z dopływem do łożysk wału korbowego oleju smarującego tłoczonego przez pompę oleju (czas zwłoki dopływu oleju do łożysk wynosi zazwyczaj od kilku do kilkunastu sekund). Od chwili rozpoczęcia dopływu oleju następuje stopniowy wzrost i stabilizacja temperatury warstwy olejowej w łożyskach. Powoduje to zmniejszenie momentu oporu silnika i obserwowany wzrost prędkości obrotowej wału korbowego. Stan termiczny warstwy oleju staje się ustabilizowany, gdy ilość ciepła odprowadzonego do masy silnika i przez olej ściekający z łożyska jest równa ilości energii wytworzonej wskutek pracy tarcia. Dodatkowe zmiany prędkości obrotowej wału korbowego podczas cyklicznej pracy rozrusznika wynikają ze zjawisk cieplnych podczas przerw w jego pracy i zmian siły elektromotorycznej polaryzacji akumulatora, gdzie podczas przerw w pracy rozrusznika zostaje ona odtworzona. Istotny jest także wpływ wtryskiwania paliwa na zmiany prędkości obrotowej i momentu oporów ruchu silnika. Wpływ ten wynika z wymiany ciepła między wtryskiwanym paliwem i sprężanym ładunkiem powietrza powodującej zmniejszenie ciśnienia sprężanego ładunku.

Moment oporu silnika musi być, podczas napędzania, równoważony przez moment siły rozrusznika. Jak zaznaczono wyżej, na moment oporu silnika składają się trzy główne elementy: moment oporu tarcia w głównych skojarzeniach tribologicznych silnika, moment oporu, którego źródłem jest ciśnienie sprężanego powietrza w przestrzeni nadłokowej oraz moment bezwładności pochodzący od elementów wirujących silnika. Moment siły rozrusznika jest proporcjonalny do natężenia pobieranego prądu. Dlatego przebieg zmian natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik odzwierciedla nie tylko przebieg momentu siły rozrusznika, ale także przebieg i dynamikę zmian momentu oporu silnika – rys. 3.



**Rys. 3.** Przebieg natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik silnika A4.236 podczas napędzania wału korbowego

Rys. 3 pokazuje, że moment oporu silnika nie jest zatem wielkością stałą. W sumarycznej wartości momentu oporu silnika można wyodrębnić składowe stałą i zmienną. Składowa stała związana jest głównie z tarciami w skojarzeniach tribologicznych. Moment oporu pochodzący od tarcia współpracujących elementów ma wartość stałą, wynikającą z konstrukcji współpracujących elementów oraz lepkości oleju smarującego. Składowa zmienna wynika z cykliczności pracy silnika spalinowego, a głównie sprężania ładunku w cylindrach. Duża ilość masy silnika znajdującej się w ruchu obrotowym pozwala także na wyodrębnienie składowej momentu oporu związanej z ich bezwładnością. Jest przy tym oczywiste, że występujące składowe momentu zmiennego i bezwładności w określonych przedziałach czasu (kąta obrotu wału korbowego) mają wartości dodatnie i ujemne – mają więc charakter momentu oporu i momentu napędzającego. Przy symetrii zmian ich wpływ sumaryczny na wartość średnią momentu oporu i prędkości obrotowej powinien być zrównoważony i niezauważalny. Bilans momentu siły rozrusznika i oporów silnika można zapisać w postaci równania (7):

$$M_r = M_s + M_z + I_b \frac{d\omega}{dt} \quad (7)$$

gdzie:

- $M_r$  – moment siły rozrusznika,
- $M_s$  – składowa stała momentu oporu silnika,
- $M_z$  – składowa zmienna momentu oporu silnika,
- $I_b$  – moment bezwładności elementów wirujących silnika,
- $\omega$  – prędkość kątowa wału korbowego.

Pozostałe sygnały napędzania wału korbowego silnika przez elektryczny układ rozruchowy – napięcie i prędkość obrotowa – wykazują znaczne podobieństwo i odpowiedniość faz zmienności do przebiegu natężenia prądu. Jest to spowodowane istnieniem związków przyczynowo-skutkowych między nimi wynikających z:

- właściwości akumulatora jako napięciowego źródła prądu, które wiążą jednoznacznie napięcie i natężenie prądu,
- zbioru charakterystyk rozrusznika, które jednoznacznie wiążą moment siły z natężeniem prądu i prędkość obrotową wałka z napięciem źródła zasilania.

## 1.1. Opór sprężania ładunku

Łokowy silnik spalinowy jest maszyną, której procesy robocze są realizowane dzięki ruchowi obrotowemu wału korbowego i posuwisto-zwrotnemu ruchowi tłoków. Jednym z procesów roboczych silnika jest sprężanie ładunku. W kontekście napędzania wału korbowego sprężanie jest źródłem oporu ruchu (rozprężanie powoduje napędzanie wału korbowego). Proces przemiany ładunku powietrza w cylindrze silnika można opisać za pomocą I zasady termodynamiki – zasady zachowania energii – w postaci różniczkowej dla układu otwartego jako:

$$dU = dQ_c - pdV + idm \quad (8)$$

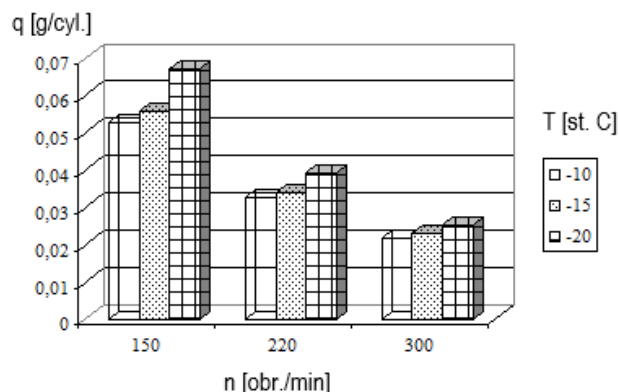
gdzie:

- $dU = mdu + udm$  – zmiana energii wewnętrznej sprężanego w cylindrze ładunku powietrza,
- $dQ_c$  – ilość ciepła wymienianego przez ładunek ze ściankami,
- $pdV$  – elementarna praca zmiany objętości,
- $i$  – entalpia właściwa gazu (entalpia:  $I = U + pV$ ).

Parametry stanu ładunku w procesie przemian można wyznaczyć poprzez scałkowanie równania (8). W warunkach napędzania wału korbowego przez rozrusznik z małą prędkością obrotową należy uwzględnić w równaniu przemiany ilość wymienionego ciepła

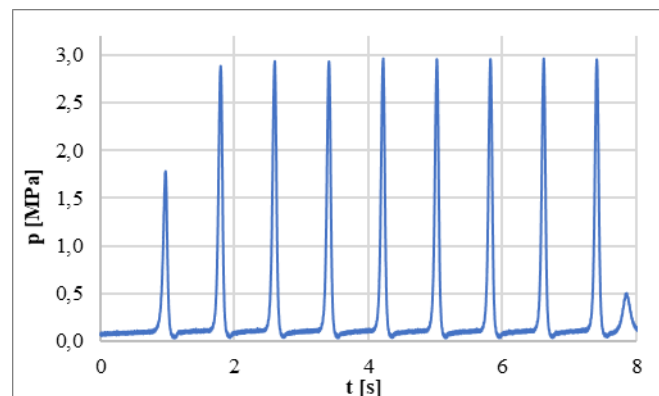
ze ściankami oraz przepływ powietrza do skrzyni korbowej przez nieszczelności zespołu tłok-pierścienie tłokowe-cylinder – wpływ strat ładunku na energię wewnętrzną jest wyrażony poprzez zmianę entalpii ładunku  $idm$ . Procesy wymiany ciepła jak też przepływu płynów w układach rzeczywistych są opisywane z wykorzystaniem współczynników, których wartości wyznaczane są eksperymentalnie: przejmowania ciepła oraz natężenia lub oporu przepływu. Dóbr lub wyznaczenie ich wartości stanowi podstawowy problem modelu przemian powietrza. Wartości parametrów charakteryzujących właściwości fizyczne powietrza (ciepło właściwe, wykładnik adiabaty, gęstość) można przyjąć jako stałe lub zależne od jego temperatury i ciśnienia. Spośród wielu znanych formuł określających wartość współczynnika przejmowania ciepła w komorach sprężania silników do obliczeń przyjęto wzór Woschni.

Wartość parametru charakteryzującego przepływ powietrza przez nieszczelności zespołu tłok-cylinder przyjęto na podstawie wyników badań własnych. Na rys. 4 przedstawiono wartość jednostkowych strat masy powietrza cylindra podczas napędzania wału korbowego silnika AD4.236 przy różnych wartościach prędkości obrotowej w różnej temperaturze.



Rys. 4. Wartość jednostkowych strat ładunku powietrza cylindra podczas napędzania wału korbowego silnika AD4.236 [2]

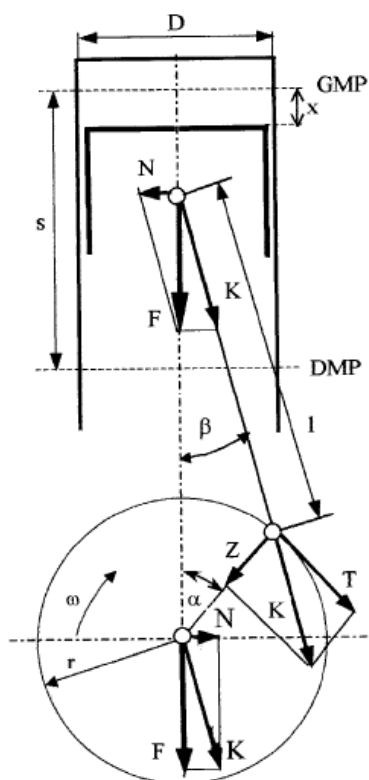
Dla uszczelnienia pierścieniowego między cylindrem i tłokiem zdefiniowano jednostkowy liniowy współczynnik objętościowego natężenia przepływu. Jego wartość przyjęto tak, aby obliczona i zmierzona wartość maksymalna ciśnienia sprężania w cylindrze były równe. Ostateczną weryfikację modelu przeprowadzono poprzez porównanie wyników obliczeń z wynikami eksperymentu (rys. 5). Powyższe wyniki badań wskazują, że podstawowe znaczenie ma zależność strat ładunku od wartości prędkości obrotowej, natomiast wraz ze spadkiem temperatury straty ładunku powietrza wzrastają nieznacznie.



Rys. 5. Zmiany ciśnienia sprężania w cylindrze silnika AD4.236 podczas napędzania wału korbowego silnika

Zależność strat masy sprężanego w cylindrze powietrza od temperatury może wynikać ze wzrostu nie szczelności zespołu tłok-pierścienie tłokowe-cylinder, ale także ze zmian właściwości reologicznych powietrza wraz ze zmianą temperatury. Można stwierdzić, że wzrost intensywności „przedmuchu” powietrza z cylindrów do skrzyni korbowej wraz ze spadkiem temperatury nie jest istotną przyczyną trudności uruchomienia silnika. Na wartość ciśnienia sprężania wpływa głównie szczelność przestrzeni nadłokowej cylindra, która zależy od stanu skojarzenia tłok-pierścienie tłokowe-gładź cylindra oraz skojarzenia zawór-gniazdo zaworowe.

Sprężanie ładunku w cylindrach silnika jest podstawową przyczyną zmienności momentu oporu w trakcie cyklu pracy i wynika z nacisku na tłok ciśnienia sprężonego gazu, a stąd na powierzchnię boczną cylindra i łożyska wału korbowego oraz zmiennego położenia ramienia wykorbienia wału korbowego i korbowodu. Rozkład sił w mechanizmie tłokowo-korbowym przedstawiono na rys. 6. Wynika stąd, że moment oporów ruchu pochodzący od sił gazowych przyjmuje wartości zmienne, zależne od kąтового położenia wału korbowego w cyklu pracy silnika.



**Rys. 6.** Rozkład sił powstających w układzie korbowo-tłokowym [2]

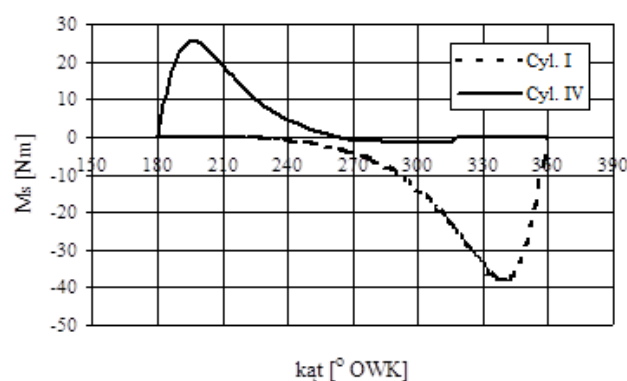
Znając wartość ciśnienia ładunku i rozkład sił w mechanizmie tłokowo-korbowym można wyznaczyć odpowiednią składową momentu oporu silnika. Dla 4-ro cylindrowego silnika typu AD4.236. podstawowy cykl pracy zawiera się w przedziale 180° obrotu wału korbowego. Wykonywano obliczenia momentu oporu sprężania ładunku w przedziale kątowym od 180° do 360° według cyklu pracy cylindra pierwszego. Uwzględniono także przebiegi natężenia prądu rozrusznika i prędkości obrotowej uzyskane jako wynik eksperymentu. 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 łożyskach. Jako kryterium wyznaczania wartości parametrów równania ruchu przyjęto stopień zgodności wyników obliczeń wartości prędkości obrotowej wału korbowego z wynikami eksperymentu.

Podczas wyznaczania składowej momentu oporu pochodzącej od sprężania ładunku uwzględniono, że jeden z cylindrów znajduje się w cyklu sprężania ładunku (np. I), jeden cylinder w cyklu rozprężania (IV), a pozostałe dwa cylindry, w których realizowane są suwy ssania i wydechu, nie wpływają w znaczący sposób na wyniki obliczeń. Moment siły sprężania ładunku wyznaczano z zależności wynikającej z przedstawionego na rys. 6 rozkładu sił:

$$M_p = T_p \cdot r = F \cdot r \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\sin \beta} \quad (9)$$

gdzie  $T_p$  – jest składową siły gazowej, prostopadłą do wykorbienia wału korbowego.

Na rys. 7 przedstawiono przebiegi obliczonych wartości momentów sił pochodzących od przemian ładunku w cylindrze I (sprężanie – wartość momentu oporu ujemna) i IV (rozprężanie – wartość momentu oporu dodatnia) silnika.



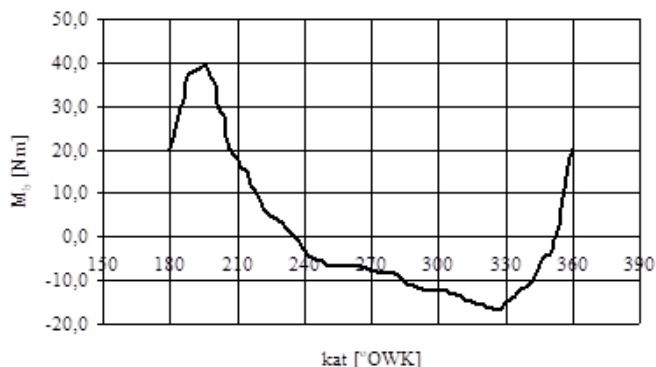
**Rys. 7.** Przebieg momentu sił sprężania ładunku w cylindrach I i IV silnika w przedziale kątowym 180 ÷ 360° obrotu wału korbowego

Składowa zmienna momentu oporu zawiera także moment tarcia w łożyskach wynikający z działania sił gazowych, który może być obliczany wg prawa tarcia Newtona z uwzględnieniem współczynnika tarcia. Ponadto występuje okresowość sił i momentów sił powodujących przemieszczanie zaworów, wtryskiwanie paliwa przez pompę wtryskową, zmiany prędkości przemieszczania tłoków, itd. Dodatkową składową zmienną momentu oporu silnika stanowi moment pochodzący od sił bezwładności.

## 1.2. Źródła oporów ruchu w silniku spalinowym

Moment oporu pochodzący od sił bezwładności mas znajdujących się w ruchu obrotowym lub związanych z tymi masami stanowi istotny składnik zmiennej składowej momentu oporu silnika. Moment oporu mas ruchomych związanych kinematycznie z wałem korbowym silnika jest elementem równania ruchu (6). Wartość tej składowej można wyznaczyć mnożąc moment bezwładności mas wirujących silnika przez przyspieszenie kątowe wału korbowego. Składową momentu pochodzącą od mas wirujących silnika wyznaczono na podstawie zarejestrowanego przebiegu prędkości obrotowej wału korbowego – jej zależności od kąta obrotu wału korbowego – rys. 8. Analiza przebiegu na rys. 8 i równania ruchu wału korbowego silnika (6) wskazuje, że moment bezwładności mas wirujących pełni rolę czynnika stabilizującego obciążenie rozrusznika. W początkowym okresie suwu sprężania danego cylindra (w przedziale 180° ÷ 360° obrotu wału korbowego) moment oporu silnika od sił bezwładności ma wartość dodatnią, tzn. stanowi on obciążenie rozrusznika zwiększając energię kinetyczną ruchu obrotowego, a w pozostałym przedziale kątowym energię tę oddaje (moment oporu ujemny) zwiększając przy tym prędkość obrotową wału korbowego w fazie sprę-

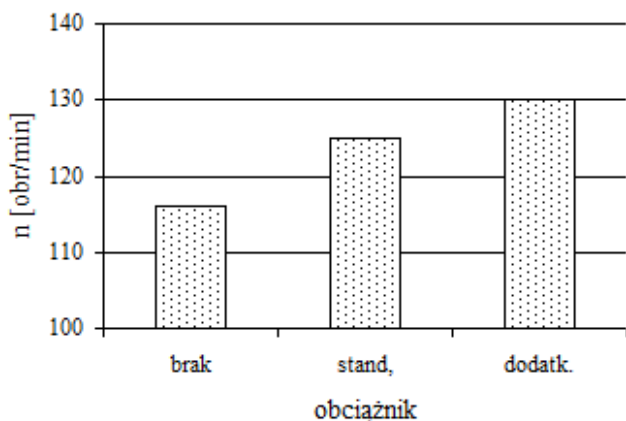
zania. Zatem zwiększenie momentu bezwładności powoduje przede wszystkim zmniejszenie stopnia nierównomierności prędkości obrotowej napędzania wału korbowego – analogiczna rola bezwładności mas wirujących wskazywana jest także w fazie pracy silnika.



**Rys. 8.** Przebieg momentu oporu silnika od sił bezwładności w przedziale kątowym  $180^\circ \div 360^\circ$  [2]

Wyniki badań prędkości wału korbowego wskazują jednak, że zmiana momentu bezwładności mas wpływa również na wartość średnią prędkości. Na rys. 9 przedstawiono wartości średnie prędkości obrotowej wału korbowego silnika AD4.236 podczas rozruchu w temperaturze  $-12^\circ\text{C}$  dla różnych wartości mas wirujących przy-mocowanych do jego koła zamachowego:

1. *brak* – wał korbowy pozbawiony był obciążników mocowanych do koła zamachowego,
2. *stand.* – do koła zamachowego mocowano tzw. obciążnik standardowy zastępujący masę i moment bezwładności sprzęgła (masa 29,4 kg, moment bezwładności około  $0,6 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ),
3. *dotatk.* – do koła zamachowego mocowano standardowy i dodatkowy obciążnik o masie 34 kg, momencie bezwładności około  $0,7 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ .

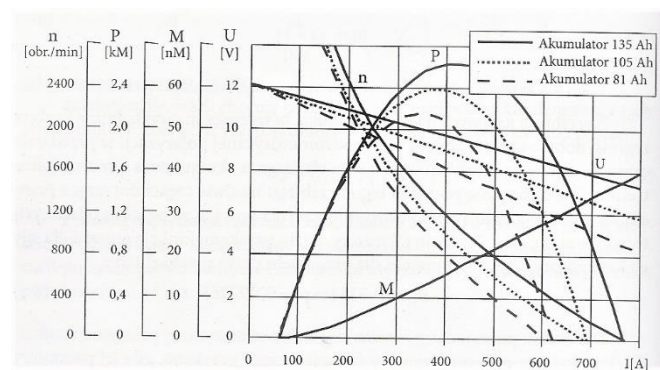


**Rys. 9.** Wartości średnie prędkości obrotowej napędzania wału korbowego silnika AD4.236 w zależności od momentu bezwładności mas wirujących [2]

Zmiana wartości średniej prędkości jest taka, że wzrasta ona wraz ze wzrostem momentu bezwładności. Wówczas zwiększa się niewątpliwie obciążenie łożysk wału korbowego i składowa stała momentu oporu powinna wzrosnąć. Takie zależności napędzania wału korbowego wynikają prawdopodobnie z charakterystycznych właściwości dynamicznych układu rozruchowego i zmiany jego charakterystyk w pojedynczym cyklu rozruchowym (pracy) silnika. Wartość chwilowej prędkości obrotowej napędzanego wału korbowego w tych warunkach zależy więc nie tylko od momentu oporów ruchu silnika, lecz również od właściwości układu rozruchowego.

## 2. CECHY MECHANICZNE UKŁADU ROZRUCHOWEGO

Właściwości elektryczne i mechaniczne układu rozruchowego można analizować i oceniać na podstawie zbioru charakterystyk dostarczanych przez producenta. Przykładowe charakterystyki rozrusznika o mocy znamionowej 1,3 kW przedstawiono na rys. 10.



**Rys. 10.** Charakterystyki rozrusznika o mocy 1,3 kW [2]

Zbiór charakterystyk rozrusznika zawiera zależności od natężenia prądu  $I$  [A] pobieranego przez rozrusznik: napięcia na zaciskach obciążonego akumulatora lub rozrusznika  $U$  [V], momentu obrotowego  $M$  [Nm] rozrusznika, prędkości obrotowej wałka rozrusznika  $n$  [obr./min] oraz mocy  $P$  będącej iloczynem momentu siły i prędkości obrotowej. Podstawowymi parametrami charakteryzującymi dobrany do silnika spaliniowego układ rozruchowy są: moc znamionowa rozrusznika, pojemność akumulatora i przełożenie między wieńcem koła zamachowego i zębnikiem rozrusznika. Najważniejszą charakterystyką rozrusznika, z punktu widzenia realizowanych zadań, jest zależność momentu od natężenia prądu. Moment obrotowy rozrusznika (moment elektromagnetyczny) powstaje jako wynik oddziaływania pola magnetycznego na przewodnik z prądem. Moment obrotowy na wałku rozrusznika osiąga wartości mniejsze – ze względu na nasycenie obwodu magnetycznego rozrusznika i począwszy od pewnej wartości natężenia prądu, przebieg momentu obrotowego ma charakter liniowy.

Charakterystyki rozruszników podawane przez producentów są sporządzane dla danej pojemności akumulatora zasilającego, przy określonej jego temperaturze i stopniu naładowania (rys. 10). Kształtując napięcie na zaciskach akumulatora (natężenie pobieranego prądu przy zachowaniu wartości napięcia) można w szerokim zakresie zmieniać wartość momentu, prędkości i mocy rozrusznika. Wartości nominalnych parametrów pracy, w szczególności mocy rozrusznika, dotyczą warunków, w których zostały wyznaczone. Przebiegi prędkości obrotowej wirnika oraz mocy rozrusznika w danych warunkach funkcjonowania zależne są od napięcia na zaciskach rozrusznika, a stąd od aktualnej zdolności rozruchowej akumulatora, jego stanu naładowania i temperatury.

Przebieg charakterystyk mocy rozrusznika jest zbliżony do paraboli i wskazuje na możliwość ich opisu za pomocą wielomianu drugiego stopnia w zależności od natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik. Można więc przyjąć tu funkcję regresji mocy rozrusznika postaci:

$$P = aI^2 + bI + c \quad (10)$$

gdzie:

$P$  – moc rozrusznika, [kW] lub [KM];

$a, b, c$  – współczynniki funkcji regresji;

$I$  – natężenie prądu pobieranego przez rozrusznik [A].

Dla dostępnych w literaturze charakterystyk rozruszników, np. rys. 10, intensywność zmian wartości poszczególnych współczynni-

ków – czułość na zmianę napięcia zasilania rozrusznika – jest różna. Najmniejsze względne zmiany wykazuje współczynnik  $b$  występujący przy wyrazie liniowym funkcji regresji. Fakt ten może być wykorzystany przy wyznaczaniu charakterystyki rzeczywistej mocy rozrusznika podczas jego pracy. Podczas badań rozruchowych (napędzania wału korbowego) silników natężenie prądu i prędkość obrotowa wału korbowego należą do podstawowych wielkości, których przebiegi są rejestrowane. Na podstawie wartości średniej natężenia prądu i charakterystyk rozrusznika można wyznaczyć jego moment siły  $M$ . Znając wartość przełożenia między wieńcem koła zamachowego a zębniakiem rozrusznika można określić wartość prędkości kątowej rozrusznika  $\omega_r$  z zależności:

$$\omega_r = i \omega_w \quad (11)$$

gdzie:

$i$  – wartość przełożenia między wałem korbowym silnika a zębniakiem rozrusznika;

$\omega_w$  – prędkość kątowa wału korbowego silnika wymuszana przez rozrusznik.

Stąd można obliczyć moc rozrusznika:

$$P_r = M \omega_r \quad (12)$$

Charakterystyka rzeczywista mocy w konkretnych warunkach napędzania wału korbowego silnika nie jest znana. Ponieważ jest ona opisywana równaniem drugiego stopnia, współczynniki funkcji regresji można byłoby wyznaczyć, gdyby były dane trzy różne punkty pracy rozrusznika. Wówczas należałoby rozwiązać układ trzech równań liniowych z trzema niewiadomymi współczynnikami  $a$ ,  $b$ ,  $c$ :

$$\begin{aligned} P_1 &= aI_1^2 + bI_1 + c \\ P_2 &= aI_2^2 + bI_2 + c \\ P_3 &= aI_3^2 + bI_3 + c \end{aligned} \quad (13)$$

gdzie:

$P_i, I_i; i = 1, 2, 3$  – parametry punktów pracy rozrusznika.

Zatem pierwszym ze sposobów wyznaczenia charakterystyki rzeczywistej mocy jest rozwiązanie układu równań (13), jeżeli znane są trzy różne punkty pracy rozrusznika. Podczas realizacji rozruchu silnika spalinowego, w jego fazie wstępnej, można zazwyczaj określić jeden punkt pracy rozrusznika, dla wartości średniej parametrów pracy. Punktem stałym charakterystyki mocy rozrusznika jest punkt odpowiadający prądowi biegu jałowego, w którym wartość mocy jest równa zero. Spośród współczynników  $a$ ,  $b$ ,  $c$  funkcji regresji, najmniejsze zmiany wykazuje współczynnik  $b$  występujący przy wyrazie liniowym. Możliwe jest zatem przyjęcie jego wartości jako stałej, określonej na podstawie znanej charakterystyki mocy rozrusznika, np. podawanej przez producenta. W efekcie możliwe jest uzyskanie charakterystyki mocy rozrusznika dla rzeczywistych warunków rozruchu silnika na podstawie znanej wartości jednego punktu pracy rozrusznika na poziomie wartości średnich natężenia prądu (momentu siły) i prędkości obrotowej.

Możliwym do zastosowania sposobem wyznaczenia charakterystyki rzeczywistej mocy rozrusznika jest wykorzystanie jako trzeciego znanego punktu pracy, stanu zablokowania rozrusznika. W tym stanie, w układzie rozruchowym płynie prąd zwarcia, a równanie obwodu może być zapisane w postaci (włączając tu również spadek napięcia na szczotkach rozrusznika):

$$E = I_z (R_a + R_r + R_p) = U_a + I_z (R_r + R_p) \quad (14)$$

gdzie:

$E$  – siła elektromotoryczna akumulatora;

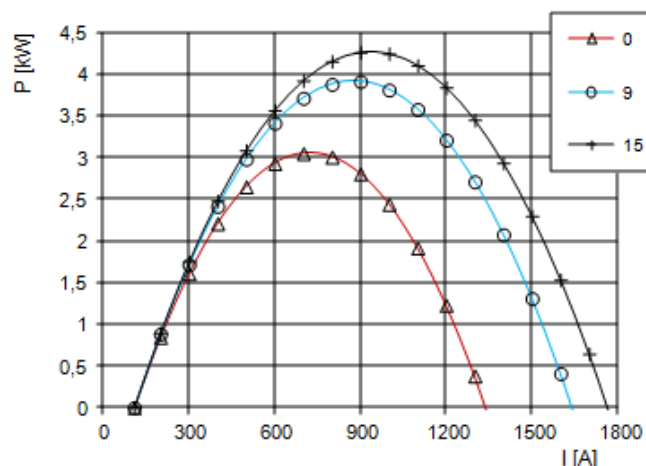
$R_a, R_r, R_p$  – odpowiednio rezystancja wewnętrzna akumulatora, rozrusznika i przewodów łączących akumulator z rozrusznikiem.

$U_a$  – napięcie na zaciskach akumulatora przy prądzie zwarcia.

Wielkości występujące w równaniu są względnie łatwe do wyznaczenia. Opór wewnętrzny akumulatora w danych warunkach może być wyznaczony na podstawie pomiaru podczas napędzania wału korbowego silnika napięcia na jego zaciskach i płynącego prądu podczas zasilania rozrusznika. Rezystancja rozrusznika może być wyznaczona na podstawie znanych jego charakterystyk podanych przez producenta lub zmierzona, jako stosunek napięcia na jego zaciskach w stanie zablokowania do wartości prądu zwarcia. Dla ewentualnego wyznaczenia napięcia akumulatora podczas przepływu prądu zwarcia rozrusznika niezbędna jest znajomość jego rezystancji wewnętrznej lub funkcji opisującej zależność napięcia od jego parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych. Należą do nich:

- pojemność znamionowa dwudziestogodzinna;
- stan naładowania (techniczny);
- natężenie pobieranego prądu;
- temperatura pracy.

Na rys. 11. przedstawiono wyznaczone na podstawie powyższej metodyki rzeczywiste charakterystyki mocy rozrusznika R11g podczas napędzania wału korbowego silnika AD4.236 w różnej temperaturze otoczenia.



**Rys. 11.** Przebieg charakterystyk mocy rozrusznika R11g w zmiennej temperaturze napędzania wału korbowego silnika

Na rysunku widoczna jest zmiana przebiegu rzeczywistej charakterystyki mocy rozrusznika wraz z obniżaniem wartości temperatury w kierunku malejących maksymalnych wartości mocy oraz zmniejszania wartości prądu zwarcia. Wynika to ze zmiany cech akumulatora kwasowego zasilającego rozrusznik, tj. wzrostu jego rezystancji wewnętrznej.

Podane metody wyznaczenia rzeczywistej charakterystyki rozrusznika są obarczone niewątpliwie znacznym i nieznanym dokładnym błędem wynikającym z braku danych dotyczących:

- charakterystyk pracy rozrusznika w warunkach dynamicznych,
- możliwości wyznaczenia analitycznego prądu zwarcia rozrusznika,
- napięcia na zaciskach akumulatora przy obciążeniu dużymi prądami, rzędu prądu zwarcia rozrusznika (wynika to między innymi z nieznanymi wartościami siły elektromotorycznej polaryzacji akumulatora w tych warunkach).

Brak metody bezpośredniego wyznaczenia charakterystyki rzeczywistej mocy rozrusznika powoduje konieczność realizacji badań eksperymentalnych, których celem jest wyznaczenie stałych nie-

zbędnych do wykonania tego zadania. Badania takie powinny obejmować:

- badania siły elektromotorycznej polaryzacji akumulatora w warunkach obciążenia prądami zwarcia,
- badania charakterystyk pracy rozrusznika w warunkach obciążenia dynamicznego,
- badania rozruszników elektrycznych w stanie zwarcia.

Układ rozruchowy to także układ elektryczny złożony z typowych elementów obwodu elektrycznego R, L, C oraz siły elektromotorycznej, dla którego istnieją możliwości budowy modelu elektrycznego, którego zadaniem jest wytworzenie momentu siły [1].

## PODSUMOWANIE

Wartości parametrów pracy układu rozruchowego, sygnały napędzania wału korbowego silnika spalinowego zależą od jego momentu oporu. Moment oporu silnika spalinowego jest wielkością zmienną i wynika to głównie z cykliczności procesów termodynamicznych sprężania ładunku powietrza w cylindrach. Składowa stała momentu oporu zależy od lepkości oleju smarnego, a przez to istotnie od temperatury otoczenia, w której realizowane jest napędzanie wału korbowego, prędkości obrotowej napędzania wału korbowego i konstrukcji węzłów tribologicznych silnika oraz dodatkowych elementów napędzanych od wału korbowego.

Składowa zmienna momentu oporu jest zależna głównie od ciśnienia sprężania ładunku powietrza w cylindrach silnika. W konsekwencji zależy od szczelności komory spalania i w sposób złożony od innych czynników, w tym również od mocy układu rozruchowego wykorzystywanego do napędzania wału. Zmienna składowa momentu oporu silnika to suma oporu wynikającego ze sprężania ładunku w jednym cylindrze (silnika 4-ro cylindrowego) oraz rozprężania w cylindrze, w którym realizowany jest suw pracy (rozprężania) oraz oporu tarcia w węzłach tribologicznych obciążonych siłami gazowymi, zależnego od lepkości oleju smarnego.

Składową zmienną momentu oporu silnika jest również moment wynikający z bezwładności mas wprawianych w ruch obrotowy podczas napędzania wału korbowego oraz dodatkowych elementów osprzętu silnika, które związane są z wałem korbowym. Moment oporu mas w ruchu obrotowym pełni rolę stabilizującą prędkość obrotową napędzanego wału korbowego – zmniejsza nierównomierność prędkości, ale wpływa także w sposób zaskakujący nieco na wartość średnią prędkości obrotowej – w przytoczonym przykładzie badań silnika AD4.236 wzrost momentu bezwładności mas powoduje zwiększenie średniej wartości prędkości.

Dokładne badanie w celu poznania tych zależności pozwoli na opracowanie metody diagnostycznej wyznaczania ciśnienia w cylindrach na podstawie sygnałów napędzania wału korbowego. Umożliwi zbudowanie modelu momentu oporu silnika spalinowego i modelu współpracy układu rozruchowego z silnikiem, jako źródłem momentu oporu. Podstawowym problemem w zakresie budowy modelu układu rozruchowego, reprezentującego jego właściwości mechaniczne jest wyznaczenie rzeczywistej charakterystyki mocy rozrusznika. Istnieją tu możliwości budowy modelu elektrycznego układu złożonego z typowych elementów obwodu elektrycznego R, L, C oraz siły elektromotorycznej, którego zadaniem jest wytworzenie momentu siły. Istnieje też możliwość bezpośredniego wyznaczenia charakterystyki rzeczywistej mocy mechanicznej rozrusznika przy założeniu jej opisu krzywą wielomianową drugiego stopnia. Uzyskanie w ten sposób praktycznie użytecznej i dokładnej informacji wymaga wielu dalszych badań układu rozruchowego i silnika

w aspekcie jego oporów ruchu, w tym w szczególności związanych ze sprężaniem ładunku powietrza.

W efekcie analiza sygnałów napędzania wału korbowego, tj. natężenia pobieranego prądu, spadku napięcia na zaciskach obciążonego akumulatora, prędkości obrotowej wału korbowego mogą stanowić źródło informacji diagnostycznej układu rozruchowego oraz silnika spalinowego. Na ich podstawie możliwe jest opracowanie metody i procedur wyznaczania wartości ciśnienia sprężania ładunku w cylindrach silnika.

## BIBLIOGRAFIA

1. Constantinescu L., Enache B., Lefter E., *Modeling aspects of an electric starter system for an internal combustion engine*, ECAI – International Conference, Bucharest, ROMANIA, 2014.
2. Pszczółkowski J., *Analiza i modelowanie procesu rozruchu silników o zapłonie samoczynnym*. WAT, Warszawa 2009.
3. Чижков Ю. П., *Сопротивление прокручиванию валов автомобильных двигателей при электростартерном пуске*. Известия Высших Учебных Заведений. Машиностроение, Но 10, 1971

### Mechanical features of the combustion engine electric starting system

*Engine crankshaft driving by the starter is characterised as a diagnostic process. The article discusses the working conditions of the electric starter when driving the engine crankshaft in terms of the equilibrium of the engine resistance torque and the moment of force generated by starting system. The resistance sources in the internal combustion engine were characterized and factors influencing them were discussed, its components and dependencies allowing for their determination were indicated. The variability of the engine resistance torque in the cycle of its operation as well as the variability of the torque and rotational speed of the crankshaft in the process of propelling the shaft are indicated. The stand and the methodology for testing the engine's internal combustion engine and the influence of the temperature and power of the starting system on registered start signals are presented. The cause and effect relationships of the engine resistance torque and the features – parameters of the starting system operation were indicated. It was shown that the values of signals recorded during the crankshaft driving have the features of engine diagnostic parameters in the aspect of the combustion chamber tightness and the total resistance of the internal combustion engine.*

Autorzy:

dr hab. inż. **Józef Pszczółkowski**, prof. WAT – Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego, Wydział Mechaniczny: 00-908 Warszawa: ul. Gen. W. Urbanowicza 2. Tel. 261 837 206, email: jozef.pszczolkowski@wat.edu.pl

JEL: L62 DOI: 10.24136/atest.2018.152

Data zgłoszenia: 2018.05.23 Data akceptacji: 2018.06.15