BIULETYN WAT
VOL. LV, NR 3, 2006

Charakterystyka rozruchowej prędkości obrotowej silnika o zapłonie samoczynnym

JÓZEF PSZCZÓŁKOWSKI, KAZIMIERZ KOLIŃSKI

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny,
Instytut Pojazdów Mechanicznych i Transportu,
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

Streszczenie. Scharakteryzowano cechy przebiegu zmian wartości chwilowej i średniej prędkości obrotowej wału korbowego silnika o zapłonie samoczynnym podczas jego napędzania za pomocą elektrycznego układu rozruchowego. Zaproponowano parametry oceny zmian chwilowej prędkości obrotowej: nierównomierności i asymetrii przebiegów jej wartości. Dokonano analizy wpływu wartości prędkości obrotowej wału korbowego na proces rozruchu silnika ze szczególnym uwzględnieniem jej wpływu na parametry sprężanego powietrza i charakterystyki rozpylania wtryskiwanego do cylindrów silnika paliwa. Scharakteryzowano kryteria identyfikacji i podano charakterystyczne dla rozruchu silników o zapłonie samoczynnym wartości rozruchowej prędkości obrotowej.
Słowa kluczowe: silniki spalinowe, rozruch w niskiej temperaturze
Symbole UKD: 621.43

1. Wprowadzenie

Zapoczątkowanie realizacji użytkowych procesów roboczych przez dowolne urządzenie techniczne określane jest jako jego rozruch i wiąże się z koniecznością dostarczenia do niego energii z zewnątrz. Rozruch tłokowego silnika spalinowego polega na zainicjowaniu procesów spalania mieszanki paliwowo-powietrznej. Podstawowy sposób dostarczania do niego energii w tym okresie i równocześnie jedyną metodę uruchamiania stanowi napędzanie wału korbowego za pomocą układu rozruchowego. Inne formy dostarczania energii do silnika w okresie uruchamiania określane są mianem wspomagania rozruchu. Różne formy i metody wspomagania rozruchu (świece żarowe i płomieniowe, nagrzewnice elektryczne

powietrza w kolektorach dolotowych, elektryczne i spalinowe podgrzewacze rozruchowe, płyny łatwo parujące i łatwo zapalne) zostały rozwinięte zwłaszcza w odniesieniu do silników o zapłonie samoczynnym, których rozruch naturalny jest określany jako trudniejszy niż dla silników zasilanych paliwami lekkimi.

Prędkość obrotowa wału korbowego jest najważniejszym czynnikiem, od którego zależy możliwość uruchomienia silnika w danych warunkach określonych przede wszystkim wartością temperatury otoczenia i silnika. W przypadku silników o zapłonie samoczynnym wartość wymuszanej prędkości obrotowej wału korbowego podczas rozruchu wywiera wpływ na warunki termodynamiczne — temperaturę i ciśnienie sprężanego w cylindrach silnika powietrza, a także na jakość rozpylenia paliwa oraz jego przygotowania do zaistnienia jego przemian fizycznych i chemicznych, prowadzących do samozapłonu. Podczas rozruchu realizowanego w warunkach eksploatacji dostrzegany jest zawsze pozytywny wpływ wzrostu prędkości obrotowej na procesy rozruchowe silnika. Wynika to z tego, że zwiększenie prędkości obrotowej wału korbowego, zgodnie z I zasadą termodynamiki, powoduje wzrost parametrów termodynamicznych sprężanego w cylindrze powietrza. O ich wartości decyduje bowiem ilość ciepła wymienionego ze ściankami cylindra i wielkość strat ładunku przez nieszczelności zespołu tłok-pierścienie tłokowe-cylinder. Są one proporcjonalne do czasu trwania przemiany, a więc odwrotnie proporcjonalne do wartości prędkości obrotowej. Ponadto w warunkach rozruchu wtrysk paliwa nie ma charakteru ciągłego i przebiega przy wielokrotnym osiadaniu iglicy wtryskiwacza w gnieździe. Zwiększenie prędkości zmniejsza stopień nieciągłości procesu wtrysku. Przyczynia się również do poprawy jakości tworzenia mieszaniny paliwa i powietrza.

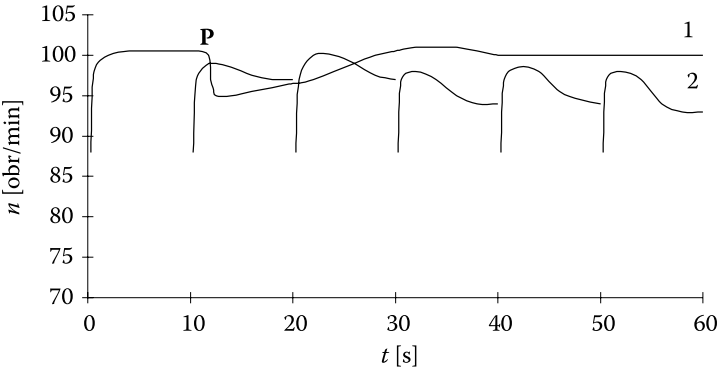
Podstawowym symptomem trudności uruchomienia silnika w niskiej temperaturze, ujemnej wg skali Celsjusza, jest to, że zapłony wytworzonej w cylindrach mieszanki nie występują bezpośrednio po rozpędzeniu przez rozrusznik wału korbowego do określonej prędkości obrotowej. Podczas rozruchu można tutaj wyróżnić dwie zasadnicze fazy. W fazie pierwszej, wstępnej, układ rozruchowy napędza wał korbowy przy braku zapłonów mieszanki paliwowo-powietrznej w cylindrach. W komorach spalania silnika o zapłonie samoczynnym wytwarzane są w tym czasie odpowiednie warunki dla powstania zapłonu wtryskiwanego paliwa. Druga faza rozruchu charakteryzuje się występowaniem w cylindrach zapłonów mieszanki, przy czym dla podtrzymania takiego stanu pracy silnika niezbędne jest także napędzanie jego wału korbowego przez rozrusznik. Zapłony mieszanki występują w coraz większej liczbie cylindrów silnika i sprawność spalania paliwa stopniowo się zwiększa. Silnik może podjąć samodzielną pracę, gdy moc indykowana równoważy moc jego oporów wewnętrznych. Podstawowe znaczenie dla możliwości uruchomienia silnika ma faza wstępna rozruchu, a stąd również wartość prędkości obrotowej wału korbowego wymuszanej w tym okresie przez układ rozruchowy.

Tłokowy silnik spalinowy i elektryczny układ rozruchowy stanowią pod względem dynamicznym (ze względu na momenty sił oporu i momenty napędowe) złożony układ mechaniczny. Dlatego uzyskiwana prędkość napędzania wału korbowego wykazuje znaczną zmienność zarówno wartości chwilowej, jak i średniej w czasie trwania rozruchu (jego fazy pierwszej). Podczas analizy i oceny właściwości rozruchowych silników w niskiej temperaturze podawana jest zazwyczaj jedna wartość średnia prędkości obrotowej wału korbowego w procesie jego uruchamiania. Niewątpliwie jest to celowy i dogodny sposób charakteryzowania warunków realizacji rozruchu za pomocą jednej wartości parametru wymuszającego, ułatwiający analizę oraz przekazywanie wyników. Należy jednak uwzględnić fakt, że podczas rozruchu w niskiej temperaturze zarówno chwilowa wartość prędkości, jak i jej wartość średnia ulegają dość istotnym zmianom w czasie trwania fazy wstępnej, zwłaszcza gdy czas jej trwania znacznie się wydłuża. Zmiany chwilowej wartości prędkości wynikają z cykliczności pracy silnika tłokowego, zaś zmiany jej wartości średniej — ze zmian warunków tarcia skojarzeń tribologicznych silnika w czasie fazy wstępnej rozruchu oraz ograniczonej pojemności układu rozruchowego.

2. Wartość średnia prędkości w fazie wstępnej rozruchu

Analizę przyczyn oraz zakres zmian średniej wartości prędkości obrotowej wału korbowego silnika o zapłonie samoczynnym, napędzanego w fazie wstępnej rozruchu za pomocą elektrycznego układu rozruchowego, przedstawiono w pracy [1]. Proces uruchamiania silnika jest zapoczątkowywany w chwili włączenia rozrusznika. Włączenie rozrusznika elektrycznego rozpoczyna krótki okres pracy nieustalonej, ponieważ jego stała czasowa jest rzędu setnych części sekundy. Dlatego z punktu widzenia przebiegu procesów rozruchowych, w tym zmian prędkości obrotowej wału korbowego, właściwości dynamiczne rozrusznika w praktyce mogą być pominięte. Warunki pracy rozrusznika w fazie wstępnej rozruchu można określić jako stacjonarne. Zmiany średniej wartości prędkości obrotowej w fazie wstępnej rozruchu silnika AD4.236 w funkcji czasu pracy rozrusznika przedstawiono na rysunku 1.

Krzywa 1 ilustruje przebieg prędkości wału korbowego w warunkach ciągłej pracy rozrusznika, a krzywa 2 — podczas jego pracy w cyklach trwających 10 s z przerwą 30 s. Zmiany wartości średniej prędkości obrotowej wału korbowego w oczywisty sposób wynikają z odpowiednich zmian rozruchowego momentu oporu silnika oraz ze zmian mocy układu rozruchowego, powodowanych zużyciem pojemności akumulatora. W warunkach rozruchu podstawowym źródłem średnich oporów wewnętrznych silnika jest tarcie w łożyskach wału korbowego i zespole tłok-pierścienie tłokowe-cylinder. Stąd występujące zmiany średniej wartości prędkości obrotowej (wg krzywej 1) można zinterpretować w oparciu



Rys. 1. Przebieg prędkości obrotowej wału korbowego silnika AD4.236 podczas rozruchu realizowanego przy: 1 — ciągłej pracy rozrusznika; 2 — pracy w cyklach 10 s z przerwą 30 s

o analizę warunków tarcia w łożyskach wału korbowego. W łożyskach istnieją odpowiednie warunki do zapewnienia tarcia płynnego lub granicznego, mimo że z chwilą włączenia rozrusznika olej smarujący nie jest do nich tłoczony. Cienka warstwa olejowa pozostaje po zakończeniu jego pracy na wszystkich wewnętrznych powierzchniach silnika, także w skojarzeniach tribologicznych. Po włączeniu rozrusznika praca tarcia w łożyskach wału korbowego zamieniana jest na energię cieplną, która powoduje wzrost temperatury warstwy olejowej, zmniejszenie lepkości oleju i zmniejszenie rozruchowego momentu oporu. Dlatego w przedziale czasu od 0 do 10 s (rys. 1) obserwuje się przyrost prędkości obrotowej wału korbowego napędzanego przez układ rozruchowy. Wartości temperatury warstwy oleju w łożyskach, momentu oporu silnika i prędkości obrotowej stabilizują się, gdy następuje równowaga między ilością ciepła wytworzonego oraz odprowadzonego do czopów wału korbowego i przez panewki do masy silnika.

W punkcie *P* (rys. 1) następuje dość znaczny spadek wartości prędkości obrotowej wału korbowego. Jest to związane z rozpoczęciem dopływu oleju smarującego, tłoczonego przez pompę z miski olejowej do łożysk wału korbowego. Olej pochodzący z miski olejowej silnika ma temperaturę równą temperaturze początkowej silnika, a więc niższą niż temperatura warstwy olejowej w łożyskach w tym okresie rozruchu. Czas zwłoki dopływu tłoczonego oleju do łożysk wynosi zazwyczaj od kilku do kilkunastu sekund. Jest zależny od wartości prędkości obrotowej wału korbowego, lepkości oleju oraz cech konstrukcyjnych układu smarowania. Względna wartość zmian momentu oporu silnika i prędkości obrotowej wału korbowego spowodowana tłoczeniem oleju smarującego waha się najczęściej w granicach 3÷5%. Jest zależna również od początkowej lepkości oleju oraz prędkości obrotowej wału korbowego. Im wyższa jest wartość lepkości i średniej prędkości obrotowej, tym zmiany te są większe. Ich wartości decydują

bowiem o gęstości powierzchniowej energii cieplnej wydzielanej w łożysku, która jest równa mocy tarcia przypadającej na jednostkę powierzchni.

Od chwili rozpoczęcia dopływu oleju do łożysk następuje wzrost prędkości obrotowej wału korbowego. Jest to spowodowane zmniejszaniem momentu oporu silnika wskutek wydzielania ciepła w łożyskach, wzrostu temperatury warstwy olejowej i spadku jej lepkości. Stan termiczny warstwy olejowej staje się ponownie ustabilizowany wskutek równowagi ilości ciepła wytworzonego i odprowadzonego w określonym czasie. Dlatego też następuje stopniowy wzrost i stabilizacja wartości prędkości obrotowej. Długotrwała stabilność wartości prędkości w tym okresie wynika z odpowiednio proporcjonalnego zmniejszania momentu oporów ruchu silnika i zmniejszania mocy układu rozruchowego, powodowanego wspomnianym wyżej zużywaniem pojemności elektrycznej akumulatora. Przyczynami zmian rozruchowego momentu oporu silnika nie są jedynie omawiane tutaj zjawiska w łożyskach wału korbowego związane ze zmianami lepkości oleju, lecz także odpowiednie zmiany tarcia w skojarzeniu tłok-cylinder, powodowane wpływem wtryskiwanego paliwa na wartość oporów tarcia [1].

Z przedstawionej zależności prędkości obrotowej od czasu wynika, że dla oceny właściwości rozruchowych silnika, zwłaszcza wielkości wymuszających procesy rozruchowe, istotne jest, w jakim momencie czasu zostanie zmierzona (odczytana) wartość prędkości obrotowej wału korbowego wymuszanej przez rozrusznik. Na podstawie rysunku 1 można określić, że najbardziej odpowiedni byłby czas po upływie około 3÷5 s od chwili włączenia rozrusznika. Po tym okresie czasu na pracę układu rozruchowego praktycznie nie wpływa już siła elektromotoryczna polaryzacji elektrod akumulatora. Zazwyczaj nie rozpoczyna się też proces tłoczenia oleju do łożysk wału korbowego, który istotnie zmienia warunki jego napędzania. Jednakże po okresie wyraźnego zmniejszenia prędkość obrotowa wału korbowego wzrasta ponownie praktycznie do tej wartości, jaka występowała przed rozpoczęciem tłoczenia oleju.

Krzywa 2 na rysunku 1 przedstawia przebiegi zależności od czasu prędkości obrotowej wału korbowego silnika podczas pracy rozrusznika w cyklach trwających 10 s z przerwą 30 s. Przebiegi te pozwalają wyjaśnić wpływ cyklicznego włączania rozrusznika na zmiany momentu oporu silnika, prędkość obrotową wału korbowego i wykazywane przez silnik właściwości rozruchowe. Podczas ciągłej pracy rozrusznika, po okresie zmian prędkości spowodowanej dopływem świeżego oleju z miski olejowej silnika, następuje utrzymywanie się praktycznie stałej wartości prędkości obrotowej równej 100 ± 1 obr/min w przedziale czasu pracy rozrusznika od 28 do 60 s. Moment oporu silnika w tych warunkach jest ustabilizowany. Moc układu rozruchowego także ma w przybliżeniu stałą wartość w dostatecznie długim przedziale czasu (pod warunkiem poprawności jego doboru dla danego silnika). Podczas cyklicznej pracy rozrusznika wartość średniej wartości prędkości ulega znacznym zmianom. Na wartość momentu oporu i prędkości obrotowej silnika

w fazie wstępnej rozruchu znaczny wpływ, jak stwierdzono wyżej, mają zjawiska cieplne w łożyskach wału korbowego, polegające na zamianie pracy tarcia na energię wewnętrzną warstwy olejowej. Podczas przerw w pracy rozrusznika następuje odprowadzanie ciepła do czopów wału korbowego oraz przez panewki do kadłuba silnika. Powoduje to, że w kolejnym cyklu pracy rozrusznika temperatura warstwy olejowej jest niższa niż w warunkach ciągłej pracy rozrusznika. Dlatego zwiększona lepkość warstwy olejowej powoduje wzrost momentu oporu, a skutkiem tego jest zmniejszenie prędkości obrotowej wału korbowego wymuszanej przez rozrusznik w kolejnych cyklach jego włączenia.

Na kształtowanie wartości prędkości obrotowej wału korbowego wpływa tutaj również siła elektromotoryczna polaryzacji elektrod akumulatora oraz procesy jego rozładowania. Siła elektromotoryczna polaryzacji wywiera wpływ na pracę układu rozruchowego w ciągu około trzech sekund od chwili włączenia rozrusznika. Podczas przerw w pracy rozrusznika SEM polaryzacji elektrod zostaje odtworzona, dzięki czemu po ponownym włączeniu rozrusznika moc układu jest większa, a przez to także początkowa prędkość napędzania wału korbowego ulega zwiększeniu. Zwiększeniu początkowej prędkości napędzania wału korbowego w kolejnych cyklach może sprzyjać również pewne opóźnienie tłoczenia oleju do łożysk wału korbowego po przerwie w pracy rozrusznika. W efekcie w warunkach cyklicznego włączania rozrusznika w cyklu pierwszym, co jest oczywiste, wartości prędkości obrotowej wału korbowego w obydwu przypadkach są równe. Tylko w drugim cyklu pracy wymuszana prędkość obrotowa wału korbowego jest większa niż podczas ciągłej pracy rozrusznika. Wynika to z omawianych zjawisk związanych z rozpoczęciem tłoczenia oleju do łożysk podczas ciągłej pracy rozrusznika. W kolejnych cyklach jego włączenia, jedynie w ciągu około 3 s wartość prędkości obrotowej wału korbowego jest bliska wartości w warunkach pracy ciągłej, następnie staje się znacznie niższa. Różnica prędkości w końcowym okresie trwania cykli pracy rozrusznika jest przy tym coraz większa. Może to świadczyć o zaznaczającym się spadku mocy układu rozruchowego wskutek przyspieszonego rozładowania akumulatora wywołanego przez:

— pobór dużego natężenia prądu (prąd zwarcia) w chwili włączenia rozrusznika, który choć krótkotrwały, znacznie przyspiesza procesy rozładowania;
— pobór zwiększonej wartości natężenia prądu na pokonanie większych wartości momentu oporu podczas cyklicznej pracy rozrusznika.

W warunkach eksploatacji, dla zakresu występujących wartości prędkości napędzania wału korbowego przez układy rozruchowe dostrzega się pozytywny wpływ wzrostu prędkości na wykazywane przez silniki właściwości rozruchowe. Dlatego zrozumiałe jest, że łatwiej można uruchomić silnik o zapłonie samoczynnym podczas ciągłej pracy rozrusznika aniżeli włączając go na krótkie cykle pracy z długotrwałymi przerwami.

3. Wartość chwilowa rozruchowej prędkości obrotowej silnika

Wartość chwilowa prędkości obrotowej napędzanego przez elektryczny układ rozruchowy wału korbowego silnika w fazie wstępnej rozruchu wynika z równości mocy układu rozruchowego i mocy niezbędnej na pokonanie momentu oporu silnika oraz momentów bezwładności. Rozruchowy moment oporów silnika nie jest wielkością stałą. Podczas analizy chwilowej wartości prędkości obrotowej celowe jest wyodrębnienie jego składowej stałej i zmiennej. Równanie ruchu napędzanego wału korbowego można zatem zapisać:

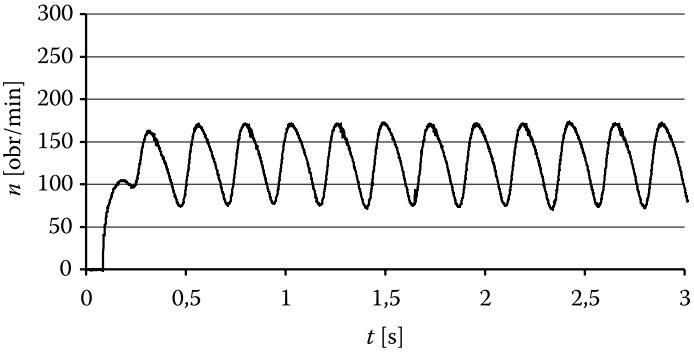
$$M_r = M_s + M_z + I\varepsilon, \tag{1}$$

gdzie: M_r — moment siły rozrusznika;
M_s — składowa stała momentu oporu silnika;
M_z — składowa zmienna momentu oporu;
I — moment bezwładności mas wirujących;
ε — przyspieszenie kątowe wału korbowego silnika.

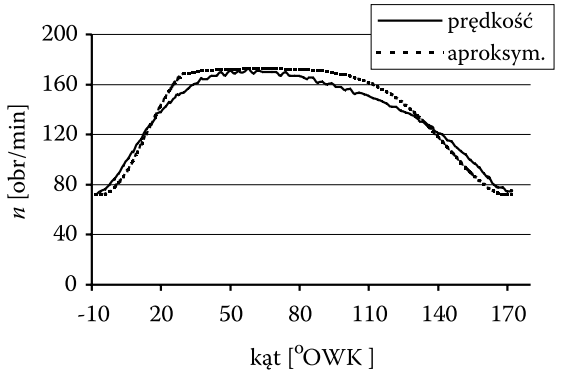
Analityczne wyznaczenie przebiegu prędkości jest niemożliwe ze względu na brak odpowiednio dokładnych danych o wartości momentu oporu silnika oraz momentu siły rozrusznika. Zmienność rozruchowego momentu oporów ruchu silnika w trakcie jednego cyklu pracy wynika z cykliczności sprężania ładunku w poszczególnych cylindrach i wywieranego przez ciśnienie gazu nacisku na tłok i łożyska wału korbowego. Szczególnie istotne jest tu więc wyodrębnienie składowej zmiennej momentu oporu, której głównymi przyczynami są: momenty sił przemieszczających tłok, równoważące siły gazowe oraz pochodzące od tych sił dodatkowe obciążenia łożysk wału korbowego. Podczas napędzania wału korbowego przez rozrusznik, momenty bezwładności mas wpływają na sumaryczną wartość oporów oraz szybkość zmian prędkości obrotowej wału korbowego. Są czynnikiem stabilizującym wartość prędkości napędzania wału korbowego i zmniejszają jej wahania. Przykładowy przebieg prędkości obrotowej wału korbowego przedstawiono na rysunku 2.

Na rysunku 3 przedstawiono fragment tego przebiegu w zakresie jednego cyklu zmian prędkości silnika w funkcji kąta obrotu wału korbowego. Uzyskany przebieg prędkości nie daje się opisać za pomocą prostych, elementarnych funkcji matematycznych. Dla jego opisu analitycznego przy pomocy funkcji regresji przyjęto metodę aproksymacji fazy prędkości funkcją liniową i kwadratową, co pozwoliło na uzyskanie dużego stopnia zgodności przebiegu krzywych — wartość kwadratu współczynnika korelacji równa 0,985.

Wynika stąd, że wartości chwilowe prędkości obrotowej wału korbowego napędzanego przez rozrusznik zmieniają się w dość szerokim zakresie (wywołane odpowiednimi zmianami rozruchowego momentu oporu silnika). Znaczne



Rys. 2. Przebieg prędkości obrotowej wału korbowego silnika AD4.236 podczas rozruchu



Rys. 3. Fragment przebiegu chwilowej prędkości obrotowej wału korbowego silnika AD4.236 napędzanego przez układ rozruchowy wraz z linią aproksymującą

zmniejszanie wartości prędkości obrotowej następuje w okresach zbliżania się tłoka do położenia GMP (na rysunku 3 około 8 stopni obrotu wału korbowego przed GMP), co niekorzystnie wpływa na parametry termodynamiczne sprężanego powietrza i charakterystykę wtryskiwania paliwa, a w efekcie — na rozruch silnika. Maksymalna wartość prędkości występuje w zakresie położenia kątowego wału korbowego około 60 stopni poza GMP dla cylindra, w którym realizowany jest suw pracy (rozprężania).

Przebieg chwilowej prędkości obrotowej wału korbowego podczas napędzania za pomocą układu rozruchowego charakteryzuje się zatem znaczną nierównomiernością. Dla pracującego silnika tłokowego stopień nierównomierności jego prędkości obrotowej definiowany jest jako stosunek różnicy jej wartości maksymalnej i minimalnej do średniej arytmetycznej tych dwóch wielkości:

$$\delta = \left(n_{\max} - n_{\min}\right) : \frac{n_{\max} + n_{\min}}{2} = 2\frac{n_{\max} - n_{\min}}{n_{\max} + n_{\min}}. \tag{2}$$

Dla oceny stopnia nierównomierności prędkości wału korbowego w warunkach rozruchu silnika (napędzania przez rozrusznik) celowe jest zdefiniowanie współczynnika nierównomierności δ_r jako stosunku amplitudy prędkości do średniej arytmetycznej jej wartości minimalnej i maksymalnej:

$$\delta_r = \frac{n_{\max} - n_{\min}}{2} : \frac{n_{\max} + n_{\min}}{2} = \frac{n_{\max} - n_{\min}}{n_{\max} + n_{\min}}. \tag{3}$$

Takie zdefiniowanie współczynnika nierównomierności δ_r prędkości napędzanego wału korbowego ma swe uzasadnienie przede wszystkim w tym, że jego wartość maksymalna mogłaby być równa co najwyżej 1 w przypadku gdy $n_{\min}$ byłaby równa zeru. Wówczas wartość współczynnika wg (2) byłaby równa 2. Zazwyczaj jednak współczynniki bezwymiarowe (wskaźniki) definiowane są tak, by ich zakres zmienności był ograniczony przedziałem $\langle 0;\ 1\rangle$, co ułatwia interpretację zmian charakteryzowanej współczynnikiem wielkości. Ten warunek spełnia wyrażenie (3). Stopień nierównomierności prędkości chwilowej w fazie wstępnej rozruchu jest zależny od liczby cylindrów silnika i mocy układu rozruchowego, a więc pośrednio — od średniej wartości prędkości obrotowej wału korbowego.

Równie charakterystyczna dla przebiegu prędkości napędzanego rozrusznikiem wału korbowego silnika (rys. 3) jest jego asymetria. Pod tym pojęciem rozumieć należy, że okres (przedział czasu) napędzania wału ze zwiększoną prędkością obrotową (powyżej jej wartości średniej arytmetycznej) nie jest równy okresowi napędzania z prędkością w niższym zakresie jej wartości. W efekcie średnia arytmetyczna wartości minimalnej i maksymalnej prędkości nie jest równa jej wartości średniej całkowej n_{sr} w charakterystycznym okresie jej zmian (dwa pełne obroty wału korbowego). Miarą asymetrii prędkości może być stosunek wymienionych wielkości:

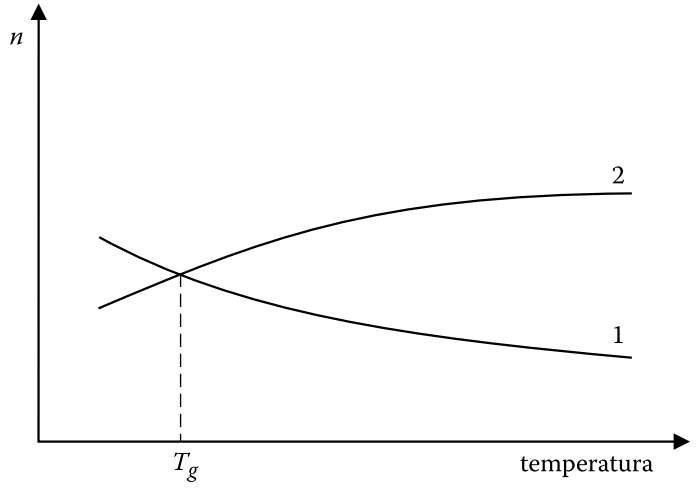
$$A = \frac{n_{\max} + n_{\min}}{2n_{sr}}. \tag{4}$$

Tak zdefiniowany współczynnik asymetrii prędkości napędzanego przez rozrusznik wału korbowego przyjmuje wartość 1, gdy średnia arytmetyczna minimalnej i maksymalnej wartości prędkości jest równa jej średniej całkowej. Wartość mniejsza od 1 świadczy o istotnym zmniejszeniu wartości prędkości wału korbowego, gdy tłok znajduje się w otoczeniu GMP, zwłaszcza w końcowym okresie procesu sprężania powietrza i wtryskiwania paliwa.

4. Zależność procesu rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym od prędkości obrotowej

Wymuszana przez układ rozruchowy prędkość obrotowa wału korbowego jest dla uruchamianego w określonych warunkach silnika jedynym parametrem, od którego zależy przebieg procesów tworzenia mieszanki paliwa i powietrza oraz powstanie jej samozapłonu. Złożoność jej wpływu na procesy rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym wyraża się istnieniem kilku charakterystycznych wartości zarówno dla rozruchu naturalnego, jak i wspomaganego. Rozruch naturalny silnika spalinowego to taki rozruch, podczas którego energia zewnętrzna doprowadzana jest do niego tylko poprzez napędzanie wału korbowego za pomocą urządzenia rozruchowego. Podczas rozruchu wspomaganego do silnika, a właściwie do tworzonej mieszaniny paliwa i powietrza, doprowadzana jest dodatkowa energia za pomocą środków wspomagania rozruchu. Należą do nich: świece żarowe i nagrzewnice elektryczne, świece płomieniowe, podgrzewacze elektryczne i spalinowe silników oraz płyny rozruchowe na bazie eteru.

Dla rozruchu naturalnego silnika o zapłonie samoczynnym jedną z charakterystyk podstawowych jest przedstawiona na rysunku 4 zależność od temperatury: prędkości obrotowej wału korbowego napędzanego przez rozrusznik (krzywa 2) oraz najmniejszej prędkości obrotowej, przy której możliwy jest rozruch silnika (krzywa 1). Ta najmniejsza wartość prędkości zapewniająca uruchomienie silnika definiowana jest jako jego *minimalna rozruchowa prędkość obrotowa*. Dla realizacji rozruchu przy prędkości minimalnej wielkością normowaną jest dopuszczalny czas pracy rozrusznika oraz sposób przeprowadzania rozruchu (wartości czasu



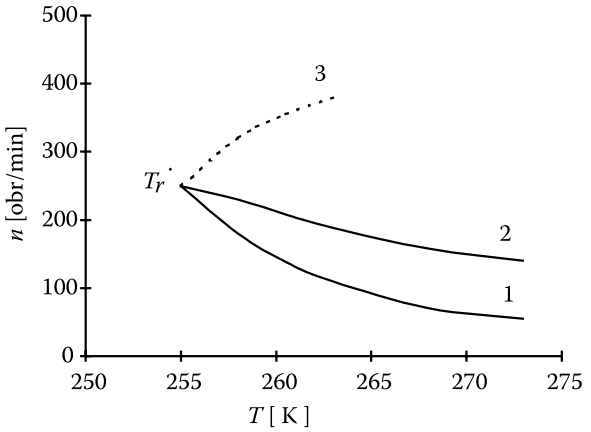
Rys. 4. Zależność od temperatury: 1 — minimalnej prędkości obrotowej rozruchu silnika n_{min}; 2 — prędkości obrotowej wału korbowego wymuszanej przez rozrusznik

pracy i przerw w pracy rozrusznika). Wartość $n_{\min}$ wzrasta, natomiast wartość prędkości obrotowej wału korbowego wymuszana przez rozrusznik maleje wraz z obniżaniem temperatury. Wartość granicznej temperatury rozruchu silnika T_g jest definiowana jako temperatura, w której prędkość obrotowa wału korbowego wymuszana przez układ rozruchowy jest równa minimalnej rozruchowej prędkości obrotowej. Charakterystyka ta najpełniej ilustruje wpływ temperatury na rozruch silnika o zapłonie samoczynnym.

Zarówno wyniki badań, jak i doświadczenia eksploatacyjne wskazują, że wzrost prędkości obrotowej wału korbowego powyżej wartości minimalnej ułatwia rozruch silnika, skracając czas jego trwania. Powodem jest zwiększenie wartości parametrów termodynamicznych sprężanego w cylindrze powietrza oraz poprawa jakości rozpylenia paliwa. Nadmierne zwiększanie prędkości obrotowej wału korbowego powoduje jednak utrudnienie rozruchu silnika, wyrażające się wzrostem czasu jego trwania, zwłaszcza w zakresie najniższych wartości temperatury rozruchu silnika, w których jego uruchomienie jest jeszcze możliwe. Wartość prędkości obrotowej wału korbowego, odpowiadającą minimalnej wartości czasu rozruchu w danej temperaturze nazwano *optymalną rozruchową prędkością obrotową silnika* spalinowego o zapłonie samoczynnym [4]. Jej wartość jest zależna od temperatury i wyższa w niższej temperaturze rozruchu silnika.

Istnienie optymalnej prędkości obrotowej wynika z jej wpływu na charakterystykę rozpylenia paliwa w warunkach rozruchu, gdy wtryskiwanie paliwa zaczyna mieć charakter procesu ciągłego (bez osiadania iglicy wtryskiwacza w gnieździe rozpylacza). Wówczas zwiększenie prędkości obrotowej powoduje zmniejszenie stopnia nieciągłości procesu wtryskiwania lub nawet wzrost maksymalnego ciśnienia wtryskiwania paliwa. Uzyskuje się dzięki temu poprawę jakości rozpylenia paliwa, ale równocześnie w wyniku wymiany ciepła między jego strugą a ładunkiem sprężonego powietrza następuje obniżenie temperatury w jej strefie. Obniżenie temperatury strefy strugi i jej otoczenia utrudnia powstanie samozapłonu rozpylonego paliwa. Istnienie optymalnej prędkości obrotowej rozruchu wyraża więc pewien stan równowagi pomiędzy dodatnimi (wzrost ciśnienia i temperatury ładunku, poprawa jakości rozpylenia paliwa) i ujemnymi (wzrost intensywności wymiany ciepła między zimną strugą paliwa i sprężonym ładunkiem powietrza) skutkami zwiększania prędkości obrotowej wału korbowego w tym zakresie jej wartości. Zwiększanie się wartości optymalnej prędkości obrotowej wraz ze spadkiem temperatury wynika z wpływu lepkości paliwa na jakość rozpylenia oleju napędowego. Ponieważ lepkość paliwa jest większa w niższej temperaturze, im niższa jest temperatura rozruchu silnika, a więc również paliwa, przy wyższej prędkości obrotowej osiągana jest wymieniona wyżej „równowaga" poprawy jakości rozpylenia paliwa i wzrostu intensywności wymiany ciepła ze sprężonym w cylindrze powietrzem na procesy prowadzące do samozapłonu wtryskiwanego do cylindra paliwa.

Z faktu istnienia minimalnej i optymalnej prędkości obrotowej rozruchu naturalnego silnika o zapłonie samoczynnym wynika także konieczność istnienia *maksymalnej prędkości obrotowej rozruchu*. Kryterium wyznaczania granicznej temperatury rozruchu silnika jest maksymalna wartość czasu trwania rozruchu dopuszczalna przez daną normę badań silnika. Po przekroczeniu wartości optymalnej prędkości obrotowej obserwuje się zwiększenie czasów rozruchu silnika. Z chwilą przekroczenia wartości dopuszczalnej czasu rozruchu zostanie więc ponownie osiągnięta graniczna temperatura rozruchu silnika. Prędkość obrotowa, wyższa od optymalnej, dla której czas rozruchu silnika jest równy wartości dopuszczalnej przez daną normę, jest zatem największą możliwą prędkością obrotową wyznaczającą górną granicę rozruchu naturalnego silnika. Zależność rozruchowych prędkości: minimalnej, optymalnej i maksymalnej silnika SW680 od temperatury przedstawiono na rysunku 5 [3].



Rys. 5. Rozruchowe prędkości obrotowe silnika SW680: 1 — minimalna; 2 — optymalna; 3 — maksymalna

Na płaszczyźnie (*T, n*) (temperatura, prędkość obrotowa wału korbowego) znajduje się punkt, który jest wspólny dla trzech krzywych ilustrujących zależności wymienionych rozruchowych prędkości obrotowych silnika o zapłonie samoczynnym od temperatury. Jest to **potrójny punkt rozruchowy silnika** — T_r. Wyznacza on najniższą temperaturę rozruchu naturalnego silnika (bez użycia środków wspomagających) przy jednej tylko, ściśle określonej wartości prędkości obrotowej wału silnika. Istnieje więc rzeczywista, wynikająca z właściwości procesów zachodzących w silniku, granica możliwości jego uruchomienia.

Warunkiem koniecznym do podjęcia samodzielnej pracy przez silnik tłokowy jest jego zasilanie w odpowiednich ilościach paliwem i powietrzem. W zakresie

szczególnie niskich wartości prędkości obrotowej wału korbowego, wymuszanej przez układ rozruchowy, istotnym problemem staje się zapewnienie zasilania silnika paliwem. Istnieje bowiem taka wartość prędkości obrotowej wałka pompy, przy której wtryskiwanie paliwa do cylindrów silnika nie wystąpi [2] wskutek jego przepływu przez nieszczelności elementów tłoczących pompy wtryskowej. Jest to szczególnie realne w warunkach rozruchu silnika, ponieważ, jak stwierdzono wyżej, w okresie wtryskiwania paliwa chwilowa wartość prędkości wału korbowego ulega znacznemu obniżeniu. Istnieje zatem najmniejsza wartość prędkości obrotowej wału korbowego, przy której układ zasilania zapewnia wtryskiwanie odpowiedniej dla podjęcia pracy przez silnik o zapłonie samoczynnym ilości paliwa. Ta wartość prędkości obrotowej silnika jest jego *konieczną rozruchową prędkością obrotową*.

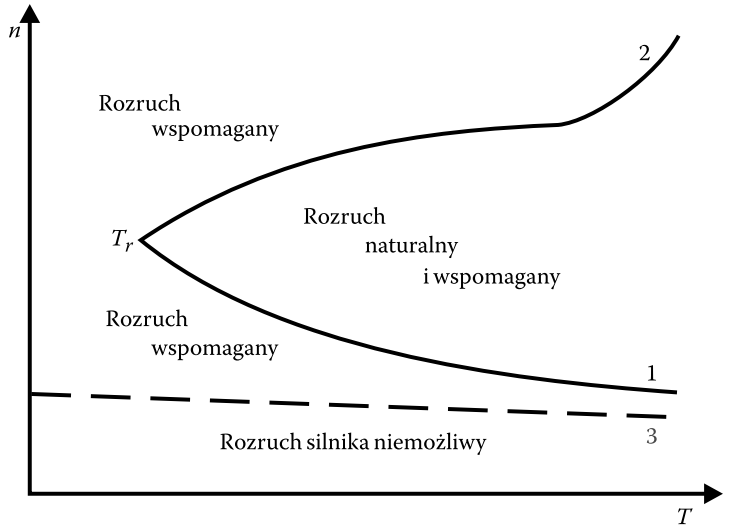
Dla warunków rozruchu wspomaganego można zdefiniować pojęcie *granicznej rozruchowej prędkości obrotowej silnika*. Przyczyną jej istnienia jest spalanie wtryskiwanej dawki paliwa przed przejściem tłoka za zwrot wewnętrzny (GMP). Wówczas powstaniu zapłonu i spalaniu paliwa w cylindrach uruchamianego silnika towarzyszy zjawisko chwilowego blokowania wału korbowego. Korzystne warunki zapłonu paliwa stwarza działanie urządzenia wspomagającego rozruch, co przy niskiej wartości prędkości obrotowej wału korbowego powoduje powstanie wysokiego ciśnienia gazów hamującego ruch wału korbowego. Dlatego powstanie zapłonu nie powoduje przyspieszenia wału korbowego i rozruch silnika nie może wystąpić. Zwiększa się przy tym znacznie obciążenie układu rozruchowego — następuje duży wzrost średniego natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik. Ta wartość prędkości obrotowej stanowi więc pewnego rodzaju granicę możliwości uruchomienia silnika. Przy prędkości wału korbowego niższej od granicznej uruchomienie silnika nie jest możliwe — bez względu na rodzaj użytych środków ułatwiających rozruch. Wskutek powstania zapłonu nie następuje bowiem wzrost prędkości obrotowej wału korbowego, lecz jego chwilowe zablokowanie. Spośród parametrów regulacyjnych układów silnika, podstawowym, decydującym o istnieniu i wartości granicznej rozruchowej prędkości obrotowej jest kąt wyprzedzenia wtrysku paliwa. Zjawisk związanych z blokowaniem wału korbowego podczas rozruchu można uniknąć, jeżeli wartości kąta wyprzedzenia wtrysku są nie większe niż około 10°OWK przed GMP.

Napędzanie wału korbowego z prędkością większą lub równą granicznej rozruchowej prędkości obrotowej stanowi więc również warunek konieczny rozruchu silników o zapłonie samoczynnym. Dla podjęcia przez silnik samodzielnej pracy wystarcza wówczas spowodowanie samozapłonu wytworzonej mieszanki paliwowo-powietrznej, co jest warunkiem wystarczającym rozruchu (przy spełnionym warunku koniecznym).

Możliwości uruchomienia silnika zależne są więc przede wszystkim od prędkości napędzania jego wału korbowego przez układ rozruchowy. Fakt istnienia

minimalnej, maksymalnej i granicznej (lub koniecznej) rozruchowej prędkości obrotowej wału korbowego pozwala na dokonanie podziału płaszczyzny we współrzędnych temperatura-prędkość obrotowa wału korbowego (T, n) na trzy „obszary rozruchowe silnika" (rys. 6), w których odpowiednio:

— rozruch silnika jest niemożliwy;
— możliwy jest rozruch silnika z użyciem środków wspomagania;
— możliwy jest rozruch naturalny (i wspomagany) silnika.



Rys. 6. Podział płaszczyzny (T, n) na obszary rozruchowe silnika o zapłonie samoczynnym: 1 — minimalna; 2 — maksymalna; 3 — graniczna (lub konieczna) rozruchowa prędkość obrotowa; T_r — potrójny punkt rozruchowy silnika

Obszar, w którym rozruch silnika w ogóle nie jest możliwy, niezależnie od rodzaju użytych środków wspomagania, jest ograniczony od góry krzywą granicznej (lub koniecznej) rozruchowej prędkości obrotowej. Drugi charakterystyczny obszar wyznaczają współrzędne punktów płaszczyzny: temperatura-prędkość obrotowa wału korbowego, w których można uzyskać naturalny (a więc także wspomagany) rozruch silnika. Obszar ten ograniczony jest od dołu przez krzywą minimalnej rozruchowej prędkości obrotowej wału korbowego, a od góry — krzywą prędkości maksymalnej. Pozostałą część płaszczyzny (T, n) zajmuje obszar, w którym możliwy jest wspomagany rozruch silnika. Istotne jest, że gdyby stosowane układy rozruchowe silników mogły napędzać wał korbowy z prędkością obrotową większą od maksymalnej prędkości rozruchowej, konieczne byłoby stosowanie także w tym przypadku środków wspomagających rozruch.

5. Podsumowanie

Prędkość obrotowa wału korbowego silnika jest w warunkach jego rozruchu podstawowym parametrem wymuszającym procesy tworzenia i zapłonu mieszanki paliwowo-powietrznej. Charakteryzuje się ona znaczną złożonością przebiegu w czasie i złożonym wpływem na przebieg procesów rozruchowych silnika, zwłaszcza o zapłonie samoczynnym. Wartość prędkości obrotowej wału korbowego silnika wymuszanej przez układ rozruchowy nie jest stała zarówno w odniesieniu do jej wartości chwilowej w cyklu pracy silnika, jak i do średniej w czasie trwania rozruchu silnika. Na zmiany wartości średniej wpływają przede wszystkim czynniki cieplne, powodujące zmiany temperatury i lepkości warstwy olejowej w łożyskach. Ponadto na zmiany jej wartości (średniej i chwilowej) wpływ ma wtryskiwanie paliwa do cylindrów silnika oraz fakt zużywania (wyczerpywania) pojemności akumulatora kwasowego. Jako istotne charakterystyki chwilowej wartości prędkości można wskazać, poza jej wartością średnią, współczynnik nierównomierności napędzania wału korbowego oraz współczynnik asymetrii przebiegu prędkości.

Złożoność wpływu prędkości obrotowej na procesy rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym pozwala na wyróżnienie jej charakterystycznych wartości: minimalnej, optymalnej, maksymalnej oraz koniecznej i granicznej. Umożliwia to wyznaczenie na płaszczyźnie o współrzędnych: temperatura, prędkość obrotowa wału korbowego tzw. obszarów rozruchowych silnika, w których wykazuje on określone właściwości rozruchowe. Jeżeli na tak zdefiniowanej płaszczyźnie zostanie wykreślona zależność prędkości obrotowej wału korbowego silnika wymuszanej przez układ rozruchowy od temperatury, to jej punkty przecięcia z krzywymi rozruchowych prędkości obrotowych wyznaczą wartości najniższej temperatury uruchomienia silnika różnymi metodami. Punkty te pozwalają na zdefiniowanie rzeczywistych właściwości rozruchowych silnika spalinowego, w tym także na określenie rodzaju koniecznego środka wspomagającego rozruch w danych warunkach temperaturowych jego eksploatacji.

LITERATURA

[1] J. Pszczółkowski, *Zmiany prędkości obrotowej i rozruchowego momentu oporów ruchu tłokowych silników spalinowych*, Biul. WAT, nr 9, 1997.

[2] J. Pszczółkowski, *Prędkości obrotowe rozruchu wspomaganego silnika o zapłonie samoczynnym*, Biul. WAT, nr 10, 2004.

[3] J. Pszczółkowski, *Właściwości rozruchowe silnika o zapłonie samoczynnym jako funkcja jego prędkości rozruchowych*, Biul. WAT, nr 11, 2004.

[4] A. Rummel, *Termodynamiczne aspekty rozruchu silników wysokoprężnych w niskich temperaturach*, Archiwum Termodynamiki i Spalania, nr 7, 1976.

J. PSZCZÓŁKOWSKI, K. KOLIŃSKI

Characteristic of starting rotational speed of self-ignition engine

Abstract. Features of the course of temporary and mean values change of engine crankshaft rotational speed during its driving by an electric starting system were characterized. The parameters for evaluation of its temporary value change are proposed: irregularity and asymmetry of its course. There is made the analysis of crankshaft rotational speed influence on diesel engine start-up process taking into account its impact on compressed air load parameters and characteristics of cylinders fuel spraying injected into engine. The identification criterions are given and characteristic values of diesel engine start-up rotational speed are defined.

Keywords: diesel engine, starting at low temperature
Universal Decimal Classification: 621.43