

DIESEL ENGINE STARTING PROPERTIES AND ITS STARTING AREAS

Józef Pszczółkowski, Kazimierz Koliński

Wojskowa Akademia Techniczna

Instytut Pojazdów Mechanicznych i Transportu

00-908 Warszawa 49, ul. S. Kaliskiego 2

tel. (022) 683-71-46, fax. (022) 683-97-96

e-mail: jpszczola@wme.wat.edu.pl; kolinski@wme.wat.edu.pl

Abstract

The crankshaft rotational speed is the basic factor forcing processes of creating and change of fuel and air mixture in a diesel engine cylinders under its starting. The impact of crankshaft rotational speed value on these processes course and fuel autoignition occurring is complex and there exist some characteristic its values. There are characterised engine starting rotational speeds in the paper. Specifying of them makes possible to mark on the plane with temperature-crankshaft rotational speed coordinates the so called engine starting areas, in which diesel engine has certain starting properties. If on in such way defined plane the dependence of crankshaft rotational speed extorted by starting system on temperature is drawn, then its cutting points with starting rotational speed curves determine the lowest temperatures of engine start-up using different methods of engine starting. Obtained points let define combustion engine starting properties and also let specify the necessary kind of engine starting aid mean at any temperature conditions of engine exploiting.

WŁAŚCIWOŚCI ROZRUCHOWE SILNIKA O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM A JEGO OBSZARY ROZRUCHOWE

Streszczenie

Prędkość obrotowa wału korbowego jest podstawowym czynnikiem wymuszającym procesy tworzenia i przemian mieszaniny paliwa i powietrza w cylindrach silnika o zapłonie samoczynnym podczas jego uruchamiania. Wpływ wartości prędkości na przebieg tych procesów i powstanie samozapłonu jest złożony i wyraża się istnieniem kilku jej charakterystycznych wartości. W referacie scharakteryzowano rozruchowe prędkości obrotowe silnika. Ich wyróżnienie umożliwia wyznaczenie na płaszczyźnie o współrzędnych: temperatura, prędkość obrotowa wału korbowego tzw. obszarów rozruchowych silnika, w których silnik wykazuje określone właściwości rozruchowe. Jeżeli na tak zdefiniowanej płaszczyźnie zostanie wykreślona zależność prędkości obrotowej wału korbowego silnika wymuszanej przez układ rozruchowy od temperatury, to punkty jej przecięcia z krzywymi rozruchowych prędkości obrotowych wyznaczają wartości najniższej temperatury uruchomienia silnika różnymi metodami. Wyznaczone punkty pozwalają zdefiniować rzeczywiste właściwości rozruchowe silnika spalinowego, w tym także określić rodzaj koniecznego środka wspomagającego rozruch w danych warunkach temperaturowych eksploatacji silnika.

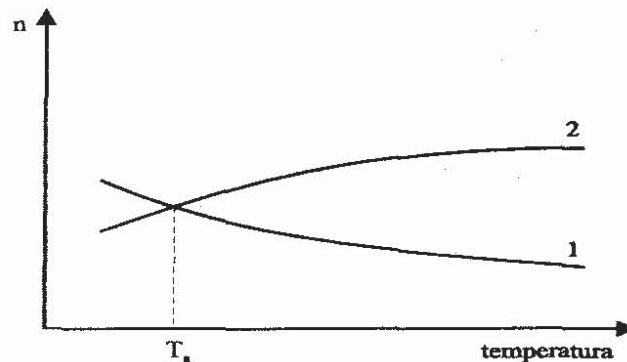
1. Wprowadzenie

Rozruch urządzenia technicznego, więc i spalinowego silnika tłokowego, to proces jego przejścia ze stanu spoczynku do stanu wypełniania funkcji użytkowych. W celu uruchomienia dowolnego urządzenia, dla zainicjowania jego procesów roboczych, konieczne jest dostarczenie energii z zewnątrz. W przypadku tłokowego silnika spalinowego w praktyce jedynym sposobem doprowadzenia energii zewnętrznej jest napędzanie jego wału korbowego za pomocą układu rozruchowego.

Stąd prędkość obrotowa wału korbowego silnika wymuszana przez układ rozruchowy jest głównym czynnikiem wpływającym na procesy jego rozruchu naturalnego. Jest ona dla uruchamianego w określonych warunkach silnika jedynym parametrem, od którego zależy przebieg procesów tworzenia mieszanki paliwa i powietrza i jej zapłonu. Wpływ prędkości obrotowej wału korbowego jest szczególnie istotny i złożony w przypadku rozruchu silników o zapłonie samoczynnym, głównie ze względu na fakt oddzielnego dostarczania do jego cylindrów paliwa i powietrza. W opracowaniu dokonano analizy zdefiniowanych rozruchowych prędkości obrotowych silników o zapłonie samoczynnym, podano interpretację ich oddziaływania na procesy rozruchu oraz wyznaczono najniższe temperatury rozruchu silnika na płaszczyźnie wyznaczającej jego obszary rozruchowe.

2. Prędkości obrotowe rozruchu naturalnego silnika

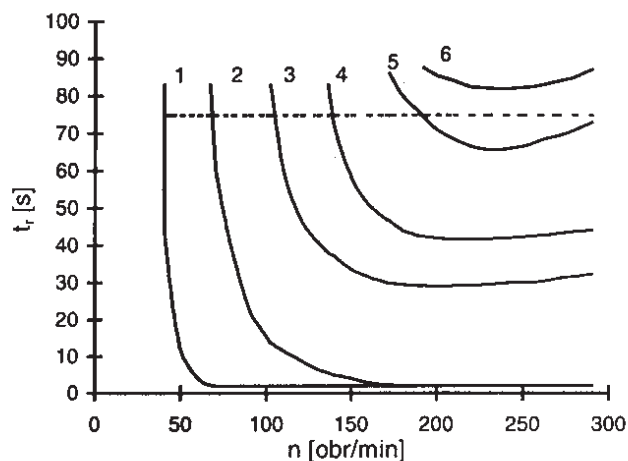
Minimalna rozruchowa prędkość obrotowa silnika. Charakterystyka rozruchowa silnika o zapłonie samoczynnym przedstawiona na rys. 1 najlepiej ilustruje wpływ temperatury na rozruch [3, 4]. Wyraża ona zależność od temperatury: prędkości obrotowej wału korbowego napędzanego przez rozrusznik – krzywa 2 oraz tzw. minimalnej prędkości obrotowej, przy której możliwy jest rozruch silnika – krzywa 1. Dla realizacji rozruchu przy minimalnej prędkości wału korbowego wielkością normowaną jest dopuszczalny czas pracy rozrusznika oraz sposób przeprowadzania rozruchu. 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 , określającej właściwości rozruchowe silnika, jest tutaj definiowana jako temperatura, w której prędkość obrotowa wału korbowego wymuszana przez układ rozruchowy jest równa minimalnej rozruchowej prędkości obrotowej.



Rys. 1. Zależność od temperatury: minimalnej prędkości rozruchowej silnika – 1, prędkości obrotowej wału korbowego wymuszanej przez rozrusznik – 2

Fig. 1. The dependences on temperature: the engine minimal starting speed – 1, crankshaft rotational speed extorted by starter – 2

Optymalna prędkość obrotowa rozruchu. Zarówno wyniki badań jak i doświadczenia eksploatacyjne wskazują, że wzrost prędkości obrotowej wału korbowego ułatwia rozruch silnika skracając czas jego trwania. Jednakże w pracach [1, 6], na podstawie badań silnika SW 680 wykazano, że nadmierne zwiększanie prędkości obrotowej wału korbowego, powoduje utrudnienie rozruchu silnika i wzrost czasu jego trwania. W efekcie, w każdej temperaturze istnieje taka wartość prędkości obrotowej wału korbowego, dla której czas trwania rozruchu silnika jest najmniejszy (rys. 2). Tę wartość prędkości obrotowej wału korbowego, odpowiadającą minimalnej wartości czasu rozruchu nazwano optymalną prędkością obrotową rozruchu silnika spalinowego. Z przedstawionych zależności wynika także, że wartość jej jest zależna od temperatury i wyższa w niższej temperaturze rozruchu silnika.



Rys. 2. Zależność czasu rozruchu silnika SW680 od prędkości obrotowej wału korbowego dla temperatur:

1 – 273K, 2 – 268K, 3 – 263K, 4 – 260,5K, 5 – 258K, 6 – 255K (wg [6])

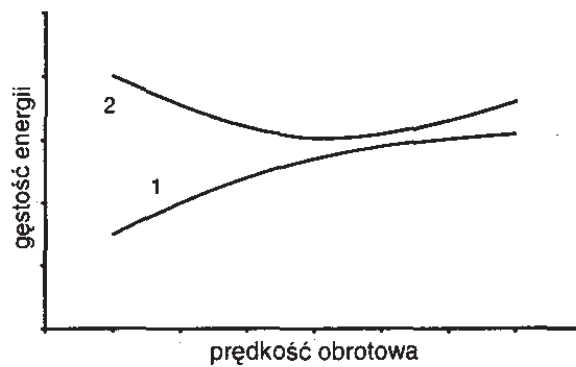
Fig. 2. The dependence of SW680 engine start-up time on crankshaft rotational speed at temperature:

1 – 273K, 2 – 268K, 3 – 263K, 4 – 260,5K, 5 – 258K, 6 – 255K ([6])

W zakresie niskich prędkości obrotowych zmiana czasu rozruchu silnika wynika przede wszystkim z dużego wpływu prędkości na stan termodynamiczny ładunku powietrza w cylindrze. W miarę wzrostu prędkości obrotowej przyrosty temperatury i ciśnienia sprężania ładunku są coraz mniejsze, co uzasadnia obserwowaną stabilizację czasów trwania rozruchu. W tym zakresie prędkości obrotowych wału korbowego jej zmiany nie powodują istotnego wpływu na jakość rozpylenia paliwa. Wtrysk paliwa realizowany jest przy wielokrotnym osiadaniu iglicy wtryskiwacza w gnieździe i stąd ciśnienie wtrysku nieznacznie tylko przekracza wartość ciśnienia otwarcia wtryskiwacza. Przy tym, im wyższa jest prędkość obrotowa, tym mniejsza jest liczba cykli podnoszenia i osiadania iglicy.

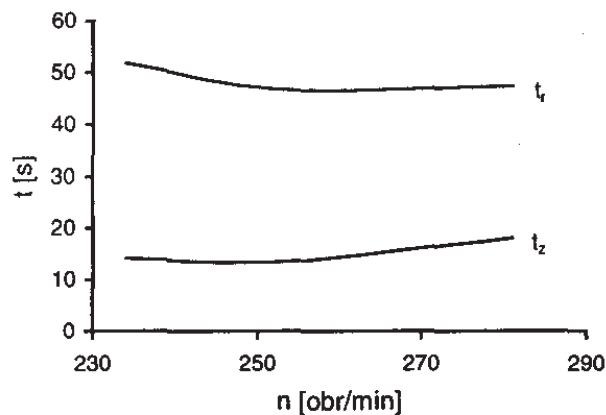
Istnienie optymalnej prędkości obrotowej wynika z jej wpływu na charakterystykę rozpylenia paliwa w warunkach, gdy przyrost temperatury ładunku wskutek zwiększania prędkości obrotowej nie jest już znaczny. Dla pompy wtryskowej silnika SW680 przedział prędkości obrotowych wału korbowego 150 ÷ 200 obr/min jest tym zakresem, w którym wtryskiwanie paliwa zaczyna mieć charakter procesu ciągłego [2] (bez osiadania iglicy wtryskiwacza w gnieździe rozpylacza). Zwiększenie prędkości obrotowej powoduje istotne zmniejszenie stopnia nieciągłości procesu wtryskiwania lub nawet wzrost maksymalnego ciśnienia wtryskiwania. Powoduje to poprawę jakości rozpylenia paliwa, ale równocześnie w wyniku wymiany ciepła między strugą rozpylonego paliwa a ładunkiem sprężonego powietrza następuje obniżenie temperatury w jej strefie. Obniżenie temperatury strefy strugi i jej otoczenia utrudnia powstanie zapłonu rozpylonego paliwa. Istnienie optymalnej prędkości obrotowej rozruchu wyraża więc pewien stan równowagi pomiędzy dodatnimi (wzrost parametrów termodynamicznych, poprawa jakości rozpylenia paliwa) i ujemnymi (wzrost intensywności wymiany ciepła między strugą paliwa i 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, która jest większa w niższej temperaturze, na jakość rozpylenia oleju napędowego. Dlatego, im niższa jest temperatura rozruchu silnika, więc i paliwa, przy wyższej prędkości obrotowej osiągana jest wymieniona wyżej „równowaga” poprawy jakości rozpylenia paliwa i wzrostu intensywności wymiany ciepła ze sprężonym powietrzem.

Uzasadnienie zjawiska optymalnej rozruchowej prędkości obrotowej wału korbowego silnika o zapłonie samoczynnym można także przedstawić poglądowo jak na rys. 3.



Rys. 3. Ilustracja mechanizmów determinujących optymalną rozruchową prędkość silnika:
 1 – gęstość energii ładunku powietrza, 2 – gęstość energii niezbędnej dla przemian wtryskiwanego paliwa
 Fig. 3. The illustration of mechanisms determining the optimal engine starting speed:
 1 – the energy density of air charge, 2 – the energy density indispensable for injected fuel change

Krzywa 1 ilustruje gęstość energii zgromadzonej w procesie sprężania ładunku powietrza, proporcjonalną do jego temperatury, w zależności od prędkości obrotowej wału korbowego. Krzywa 2 odpowiednio zależność od prędkości obrotowej gęstości energii niezbędnej dla spowodowania zapłonu wtryskiwanego paliwa. Współrzędna linii najmniejszej odległości obydwu krzywych w kierunku prostopadłym do osi odciętych wyznacza optymalną prędkość obrotową wału korbowego i determinuje czas rozruchu silnika przy tej prędkości. Występująca tutaj różnica gęstości energii jest doprowadzana do ładunku powietrza w fazie wstępnej rozruchu. Zwiększona różnica energii (odległość między krzywymi) przy innych wartościach prędkości obrotowej wału korbowego jest kompensowana odpowiednim zwiększeniem czasu trwania rozruchu, zarówno przy zmniejszaniu jak i zwiększaniu prędkości obrotowej wału korbowego wymuszanej przez układ rozruchowy



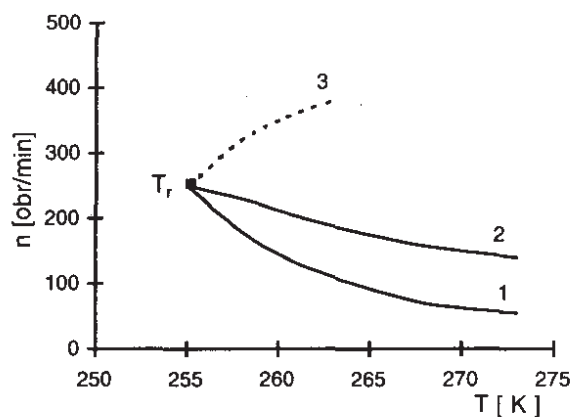
Rys. 4. Zależność czasu powstania zapłonu t_2 i rozruchu t_1 silnika AD4.236 od prędkości obrotowej wału korbowego podczas rozruchu w temperaturze -17°C
 Fig. 4. The dependence of first ignition time occurring t_2 and start-up time t_1 of AD4.236 engine on crankshaft rotational speed under its starting at the temperature of -17°C

Przedstawioną na rys. 2 charakterystykę wykonano przy użyciu zewnętrznego urządzenia napędzającego wał korbowy silnika w zakresie bardzo niskich dla rozruchu silnika temperatur otoczenia [6]. Dlatego istotne było uzyskanie potwierdzenia eksperymentalnego zjawiska przy napędzaniu wału korbowego silnika za pomocą rozrusznika elektrycznego. Badania takie przeprowadzono dla silnika AD4.236, w następujących warunkach:
 — temperatura realizacji badań była równa -17°C ,
 — dokonano zmian w układzie zasilania paliwem dla wyeksponowania zjawiska,

— w układzie rozruchowym zastosowano rozrusznik R20z o napięciu znamionowym 24 V i mocy 5,5 kW (standardowo rozrusznik R11g, 12V, 3 kW) zasilany za pomocą akumulatorów o pojemnościach do 180 Ah.

Wyniki badań – zależności czasów powstania zapłonu i rozruchu silnika od prędkości obrotowej wału korbowego wymuszanej przez układ rozruchowy przedstawiono na rys. 4. Widoczne jest, że ich wartości ulegają zwiększeniu wraz ze wzrostem prędkości obrotowej wału korbowego powyżej 250 obr/min.

Maksymalna prędkość obrotowa rozruchu. Dla charakterystyki na rys. 2 łączny dopuszczalny czas trwania próby równy 75 s wg kryterium normy firmy Leyland wyznacza graniczną temperaturę rozruchu. Zatem punkty przecięcia krzywych z poziomą linią czasu o wartości 75 s wyrażają zależność granicznej temperatury rozruchu silnika od prędkości obrotowej wału korbowego. Natomiast zależność prędkości w tych punktach od temperatury ilustruje krzywą minimalnej prędkości obrotowej rozruchu silnika. Po przekroczeniu wartości optymalnej prędkości obrotowej dla każdej temperatury równej i niższej od $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (263 K) obserwowano zwiększenie czasów rozruchu silnika. Zatem dalsze zwiększanie prędkości obrotowej powodowałoby wzrost czasu rozruchu do wartości wyższych od 75 s. W związku z tym osiągnięta zostałaby ponownie graniczna temperatura rozruchu silnika. Prędkość obrotowa, wyższa od optymalnej, dla której czas rozruchu silnika jest równy dopuszczalnej przez daną normę wartości, jest więc największą możliwą prędkością obrotową wyznaczającą górną granicę rozruchu naturalnego silnika. Jest to dla silnika o zapłonie samoczynnym maksymalna prędkość obrotowa rozruchu. Zależność od temperatury rozruchowych prędkości: minimalnej, optymalnej i maksymalnej silnika przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Rozruchowe prędkości obrotowe silnika SW680 wyznaczone na podstawie jego charakterystyki uniwersalnej: 1 – minimalna, 2 – optymalna, 3 – maksymalna

Fig. 5. The SW680 engine starting rotational speeds specified on the base of its starting universal characteristic: 1 – minimal, 2 – optimal, 3 – maximal

Wynika stąd, że w każdej temperaturze naturalny rozruch silnika można uzyskać, jeżeli prędkość napędzania wału korbowego ma wartość pomiędzy minimalną a maksymalną prędkością rozruchową. O istnieniu i wartości rozruchowych prędkości obrotowych dla danego silnika: minimalnej, optymalnej i maksymalnej decyduje relacja między gęstością energii w sprężonym ładunku powietrza a gęstością energii niezbędną dla zainicjowania samozapłonu wtryskiwanego paliwa. Taką interpretację umożliwia schemat na rys. 3.

Należy zwrócić uwagę na fakt (rys. 5), że na płaszczyźnie (T, n) (temperatura, prędkość obrotowa wału korbowego) znajduje się punkt, który jest wspólnym dla trzech krzywych ilustrujących zależności rozruchowych prędkości obrotowych silnika o zapłonie samoczynnym od temperatury. Jest to: „**potrójny punkt rozruchowy silnika**” – T_r . W punkcie tym trzy wartości rozruchowych prędkości obrotowych: minimalnej, optymalnej

i maksymalnej są równe. Wyznacza on najniższą temperaturę rozruchu naturalnego silnika (bez użycia środków wspomagających) przy jednej tylko, ściśle określonej wartości prędkości obrotowej wału korbowego.

3. Prędkości obrotowe wspomaganego rozruchu silnika

Przy mniejszej od minimalnej prędkości obrotowej wału korbowego naturalny rozruch silnika w danej temperaturze nie jest możliwy. Konieczne staje się wówczas doprowadzenie do silnika dodatkowej energii za pomocą środków wspomaganego rozruchu w celu zainicjowania zapłonów wtryskiwanego paliwa w cylindrach silnika. W zakresie szczególnie niskich wartości prędkości obrotowej wału korbowego wymuszanej przez układ rozruchowy istotnym problemem staje się zapewnienie zasilania silnika paliwem.

Konieczna prędkość obrotowa rozruchu. Warunkiem koniecznym spowodowania podjęcia samodzielnej pracy przez silnik tłokowy jest zasilanie go w odpowiednich ilościach paliwem i powietrzem. Szczególnie przy tym istotne jest zapewnienie zasilania paliwem. Wskutek przepływu paliwa przez nieszczelności elementów tłoczących pompy wtryskowej istnieje taka wartość prędkości obrotowej wałka pompy, przy której jego wtryskiwanie do cylindrów silnika nie wystąpi. Zatem najmniejsza wartość prędkości obrotowej wału korbowego, przy której układ zasilania zapewnia wtryskiwanie odpowiedniej dla podjęcia pracy przez silnik o zapłonie samoczynnym ilości paliwa jest jego konieczną rozruchową prędkością obrotową. Napędzanie wału korbowego silnika z taką prędkością obrotową stanowi warunek konieczny rozruchu. Problem ten rozpatrzono w pracy [5].

Graniczna prędkość obrotowa rozruchu silnika. Doprowadzana podczas rozruchu wspomaganego silnika o zapłonie samoczynnym dodatkowa energia powinna spowodować samozapłon paliwa, wydzielenie energii w procesie spalania i odpowiednie przyspieszenie wału korbowego by zapewnić podjęcie samodzielnej pracy. Również w pracy [5] przedstawiono wyniki badań wskazujące, że w pewnych warunkach powstający podczas rozruchu zapłon paliwa nie powoduje przyspieszenia, lecz chwilowe zablokowanie wału korbowego. Dzieje się tak wskutek spalania przy małej wartości prędkości wału paliwa w cylindrze przed przejściem tłoka poza GMP. Wartość prędkości, przy której ma miejsce to zjawisko nazwano graniczną prędkością obrotową rozruchu silnika. Zatem dla zapewnienia rozruchu wspomaganego silnika o zapłonie samoczynnym konieczne jest napędzanie wału korbowego z prędkością większą od granicznej (lub stosowanie małych wartości kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa podczas takiego rozruchu silnika.)

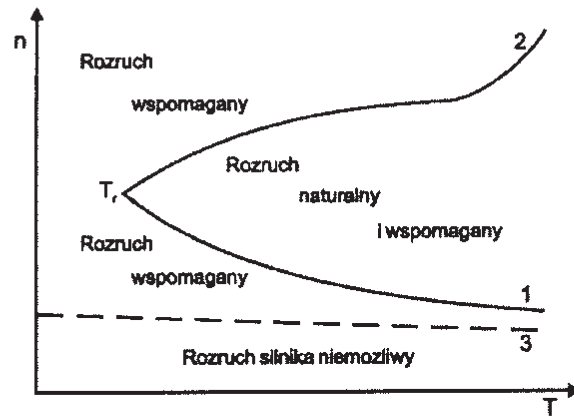
4. Obszary i właściwości rozruchowe silnika o zapłonie samoczynnym

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:

- rozruch silnika jest niemożliwy;
- możliwy jest rozruch silnika z użyciem środków wspomaganego;
- możliwy jest rozruch naturalny (i wspomagany) silnika.

Obszar, w którym rozruch silnika nie jest w ogóle możliwy, niezależnie od rodzaju użytych środków wspomaganego, jest ograniczony od góry krzywą granicznej lub koniecznej rozruchowej prędkości obrotowej. Drugi charakterystyczny obszar wyznaczają współrzędne punktów płaszczyzny: temperatura i prędkość obrotowa wału korbowego, w których można uzyskać naturalny (więc i 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.



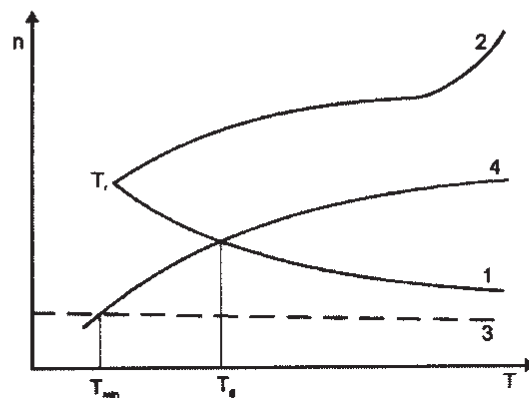
Rys. 6. Podział płaszczyzny (T, n) na obszary rozruchowe silnika o zapłonie samoczynnym: 1 – minimalna; 2 – maksymalna; 3 – graniczna (lub konieczna) rozruchowa prędkość obrotowa; T_r – potrójny punkt rozruchowy silnika

Fig. 6. Division of the (T, n) plane on diesel engine starting areas: 1 – minimal; 2 – maximal; 3 – border (or requisite) starting speed; T_r – the triple engine starting point

Istotne jest, że gdyby stosowane układy rozruchowe silników mogły napędzać wał korbowy z prędkością obrotową większą od maksymalnej, konieczne byłoby stosowanie także w tym przypadku środków wspomagających rozruch.

Jeżeli na rys. 6 nanieść linię przedstawiającą zależność od temperatury prędkości wału korbowego wymuszanej przez układ rozruchowy silnika (krzywa 4 na rys. 7), to:

- punkt jej przecięcia z krzywą prędkości minimalnej wyznacza wartość granicznej temperatury rozruchu naturalnego silnika T_g ;
- punkt przecięcia z krzywą prędkości granicznej (lub koniecznej) wyznacza wartość najniższą temperatury rozruchu silnika T_{min} przy użyciu środków wspomaganie wpływających jedynie na warunki tworzenia i samozapłonu mieszaniny paliwowo-powietrznej.



Rys. 7. Wyznaczanie temperatur rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym na podstawie płaszczyzny obszarów rozruchowych

Fig. 7. The determining of diesel engine start-up temperatures on its starting areas plane

Uzyskanie rozruchu w temperaturze niższej wymagałoby użycia takich środków wspomaganie, które umożliwiają zmianę wartości wymuszanej prędkości obrotowej wału korbowego. Należą do nich podgrzewacze rozruchowe (elektryczne i spalinowe), których zastosowanie powoduje zmianę stanu termicznego całej masy silnika, w tym oleju smarującego w łożyskach wału korbowego, a przez to momentu oporu silnika. Stąd, na

podstawie danych obszarów rozruchowych silnika – zwłaszcza przebiegów prędkości minimalnej i granicznej oraz wymuszanej przez rozrusznik, można określić kompleksowo właściwości rozruchowe danego silnika oraz rodzaj koniecznych do zastosowania środków wspomagania rozruchu dla jego eksploatacji w konkretnych warunkach termicznych.

5. Podsumowanie

Przedstawiona analiza i wyniki badań wpływu prędkości obrotowej na przebieg rozruchu silników o zapłonie samoczynnym oraz ich właściwości rozruchowe wskazuje, że jest to parametr o istotnym znaczeniu dla poznania procesów rozruchowych tego typu silników. O złożoności zjawisk rozruchowych silnika w związku ze zmianami prędkości obrotowej wału korbowego wymuszanej przez układ rozruchowy świadczy przede wszystkim fakt możliwości wyodrębnienia jej pięciu charakterystycznych wartości wyznaczających granice dla określonych typowych procesów rozruchowych. Punkt wspólny trzech zależności prędkości rozruchu naturalnego: minimalnej, optymalnej i maksymalnej, określony jako potrójny punkt rozruchowy wyznacza ściśle określone warunki rozruchu naturalnego – najniższą możliwą temperaturę rozruchu przy jednej wartości prędkości obrotowej. Prędkości obrotowe charakterystyczne dla rozruchu wspomaganego: konieczna i graniczna pozwalają na sformułowanie warunku koniecznego i wystarczającego rozruchu silnika oraz stwierdzenie, że przy braku wspomagania zapewnienie minimalnej prędkości obrotowej jest warunkiem koniecznym i wystarczającym rozruchu – w zakresie temperatur wyższych od temperatury rozruchowego punktu potrójnego silnika. Wyznaczenie obszarów rozruchowych silnika pozwala na pełne określenie jego właściwości rozruchowych, w tym także niezbędnych do zastosowania środków wspomagania rozruchu w danych warunkach temperaturowych.

Literatura

- [1] Hładun J.: *Badania rozruchowe silnika spalinowego z zapłonem samoczynnym z wtryskiem bezpośrednim do samochodu ciężarowego*, Prace Naukowe Politechniki Szczecińskiej, Nr 359, 1988
- [2] Jackowski J., Rojczyk J.: *Wpływ czynników regulacyjnych na pracę aparatury wtryskowej silnika wysokoprężnego przy małej prędkości obrotowej*. Biuletyn WAT Nr 7, 1987
- [3] Микулин Ю. В. Карницкий В. В. Энглин В. А.: *Пуск холодных двигателей при пусковой температуре*. Машиностроение, Москва, 1971
- [4] Mysłowski J.: *Rozruch silników samochodowych z zapłonem samoczynnym*, WNT, Warszawa, 1996
- [5] Pszczołkowski J.: *Wartość konieczna rozruchowej prędkości obrotowej silnika o zapłonie samoczynnym*. 30th International Scientific Conference on Combustion Engines KONES 2004, Zakopane 2004
- [6] Rummel A.: *Termodynamiczne aspekty rozruchu silników wysokoprężnych w niskich temperaturach*, Archiwum Termodynamiki i Spalania, Nr 7, 1976