



## Czynniki determinujące tworzenie i samozapłon mieszanki podczas rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym

JÓZEF PSZCZÓŁKOWSKI

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

**Streszczenie.** Podstawowymi procesami warunkującymi rozruch silnika o zapłonie samoczynnym są wytworzenie i samozapłon mieszanki paliwowo-powietrznej. Sposobem doprowadzenia energii do uruchamianego silnika i równocześnie czynnikiem wymuszającym procesy rozruchowe jest napędzanie wału korbowego przez układ rozruchowy. W artykule dokonano analizy przebiegu procesów tworzenia i samozapłonu mieszanki podczas rozruchu silnika o ZS w niskiej temperaturze. Scharakteryzowano czynniki powodujące wytworzenie i samozapłon mieszanki paliwowo-powietrznej w kolejnych fazach rozruchu. Przedstawiono wyniki badań wpływu podstawowych parametrów regulacyjnych silnika na charakterystyki rozruchowe. Szczególną uwagę poświęcono parametrom regulacyjnym układu zasilania silnika oraz wpływowi zmian wartości prędkości obrotowej wału korbowego na procesy rozruchu. Przedstawiono interpretacje i modele wyjaśniające przyczyny istniejących zależności.

**Słowa kluczowe:** silniki spalinowe, rozruch w niskiej temperaturze

**Symbol UKD:** 621.43

### 1. Wstęp

Rozruch tłokowego silnika spalinowego oznacza jego przejście ze stanu spoczynku do stanu wykonywania funkcji użytkowych. Udany, skuteczny rozruch warunkuje więc możliwość celowego wykorzystania pojazdów i innych urządzeń wyposażonych w silnik spalinowy jako źródła napędu lub energii. W celu uruchomienia silnika tłokowego, podobnie jak też innych urządzeń, konieczne jest dostarczenie energii. Praktycznie jedynym sposobem doprowadzenia energii do uruchamianego silnika jest napędzanie jego wału korbowego za pomocą układu

rozruchowego. Możliwości zapoczątkowania samoczynnego cyklicznego powtarzania przez silnik procesów tworzenia mieszanki i jej spalania wynikają z jego cech konstrukcyjnych, parametrów regulacyjnych układów oraz właściwości stosowanych płynów eksploatacyjnych (paliwo, olej smarujący). Rozruch tłokowych silników spalinowych w dodatniej, według skali Celsjusza, temperaturze otoczenia na ogół nie sprawia trudności i jest określany jako łatwy. Trudności uzyskania rozruchu wznoszą się wraz z obniżaniem się temperatury (przy założeniu, że silnik znajduje się w równowadze termicznej z otoczeniem). Miarą właściwości rozruchowych i przystosowania tłokowego silnika spalinowego do podjęcia samodzielnej pracy w różnych warunkach otoczenia jest najczęściej graniczna temperatura rozruchu wyznaczana zgodnie z wymaganiami norm badań [3].

Dla każdego silnika istnieje więc taka wartość temperatury, poniżej której jego tzw. naturalny rozruch nie jest możliwy. Dla silników o zapłonie samoczynnym (ZS) można wskazać dwie grupy przyczyn trudności ich uruchomienia:

- pogorszenie warunków tworzenia mieszanki palnej i jej samozapłonu spowodowane niską temperaturą sprężanego powietrza i paliwa oraz jakością jego rozpylenia,
- zmniejszenie prędkości napędzania wału korbowego przez układ rozruchowy wskutek wzrostu momentu oporu silnika (lepkości oleju smarującego) oraz spadku mocy układu rozruchowego.

Trudny rozruch silnika w niskiej temperaturze to rozruch, w którym można wyróżnić dwie podstawowe fazy:

- napędzanie wału korbowego przez rozrusznik przy braku zapłonów w cylindrach,
- napędzanie wału korbowego przez rozrusznik przy istnieniu zapłonów do stanu, w którym silnik może podjąć samodzielną pracę.

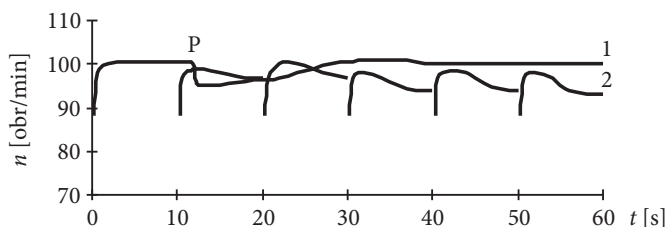
Dla trudnego rozruchu tłokowego silnika spalinowego istnieją zależności parametrów jego przebiegu (np. czasu trwania rozruchu) od wielkości charakteryzujących cechy konstrukcyjne, stanu regulacji układów oraz czynników eksploatacyjnych. Na charakterystyki rozruchowe silnika mają wpływ wszystkie te czynniki, od których zależne są procesy tworzenia i samozapłonu mieszanki paliwowo-powietrznej. Zależności te są na ogół dostatecznie dobrze poznane. Jednak w zakresie teorii i modelowania procesów rozruchu w niskiej temperaturze istnieją problemy wymagające dalszych prac badawczych i analitycznych. Mają miejsce trudności interpretacyjne wielu zależności i procesów o znaczeniu podstawowym dla poznania zjawisk rozruchowych, także dlatego, że podczas rozruchu procesy te zachodzą w warunkach granicznych: w pierwszej fazie rozruchu zapłony mieszanki nie występują. Dlatego w artykule podjęto zadanie przedstawienia wyników badań i analizy przebiegu procesów rozruchu oraz wybranych charakterystyk rozruchowych silników o ZS.

## 2. Czynniki determinujące powstanie samozapłonu podczas rozruchu

Podczas rozruchu silnika o ZS w niskiej temperaturze realizowane są, jako podstawowe dla jego zaistnienia, procesy tworzenia i spalania mieszanki paliwo-powietrznej. Sprężanie powietrza w cylindrach w warunkach rozruchu [1, 9] może być traktowane jako proces politropowy. Rozpad wtryskiwanego paliwa na krople powodowany jest jego turbulentnym ruchem wskutek przepływu przez otwór rozpylacza oraz przez opór ośrodka [7]. W warunkach rozruchu następuje zwiększenie średniej średnicy kropli paliwa wskutek wzrostu jego lepkości oraz niskiej prędkości przepływu przez otwory rozpylacza. Rozprzestrzenianie i przemiany paliwa w cylindrze silnika o ZS opisywane są z wykorzystaniem modeli strugi paliwa i tworzenia mieszaniny paliwo-powietrznej: kropłowego i strumieniowego [6, 8]. Samozapłon paliwa następuje w fazie gazowej i ma miejsce zazwyczaj w zewnętrznej strefie strugi, w obszarze nasyconym parami paliwa. Okres zwłoki samozapłonu zwiększa się wraz ze spadkiem temperatury.

Wymuszenie dla procesów tworzenia mieszanki stanowi napędzanie wału korbowego przez układ rozruchowy, najczęściej elektryczny. Zarówno wartość chwilowa, jak i średnia prędkości obrotowej wału ulega istotnym zmianom wynikającym głównie ze zmian momentu oporu silnika. Wartość chwilowa prędkości wykazuje znaczną nierównomierność wynikającą z realizacji cykli pracy silnika tłokowego. Jej najmniejsza wartość występuje w końcowym okresie sprężania powietrza i wtryskiwania paliwa — zmiany te są więc niekorzystne dla przebiegu procesów rozruchowych. Dla średniej wartości prędkości stwierdzono (rys. 1):

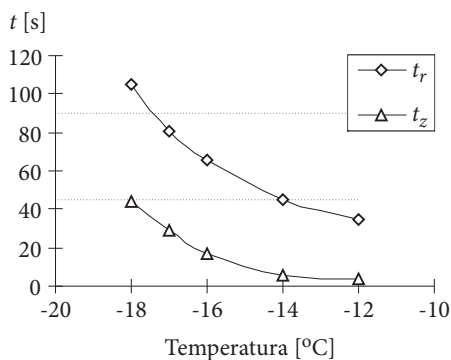
- przyrost prędkości obrotowej w początkowym okresie napędzania,
- gwałtowny, dość znaczny spadek wartości prędkości obrotowej w punkcie P wynikający z dopływu do łożysk oleju tłoczonego przez pompę oleju,
- ponowny wzrost prędkości wału wskutek nagrzewania oleju w łożyskach,
- średnia prędkość obrotowa wału korbowego jest mniejsza przy cyklicznym napędzaniu wału korbowego niż przy ciągłej pracy rozrusznika,



Rys. 1. Zależność od czasu prędkości obrotowej wału korbowego silnika A4.236 podczas rozruchu przy pracy rozrusznika: 1 — ciągłej; 2 — w cyklach 10 s z przerwą 30 s

- wtryskiwanie paliwa powoduje istotne zmiany średniej prędkości obrotowej wału,
- efekt zmian prędkości obrotowej wału wskutek wtryskiwania paliwa jest zależny od kąta wyprzedzenia wtrysku.

Jak już wspomniano, w pewnym okresie trudnego rozruchu silnika nie występują samozapłony mieszanki. Wzrost trudności uruchomienia silnika wraz ze spadkiem temperatury wyrażany jest poprzez wzrost czasu rozruchu  $t_r$  (rys. 2). Miarą właściwości rozruchowych silnika jest graniczna temperatura rozruchu —  $T_g$ , dla której jego czas rozruchu jest nie większy od zadanej wartości (np. według wymagań normy badań)  $t_{rmax}$ . Zgodnie z przedstawioną charakterystyką graniczna temperatura rozruchu silnika AD3.152UR jest równa  $-17^\circ\text{C}$ , jeżeli dopuszczalna wartość czasu rozruchu jest równa 90 s, lub  $-14^\circ\text{C}$ , jeżeli wartość czasu wynosi 45 s.

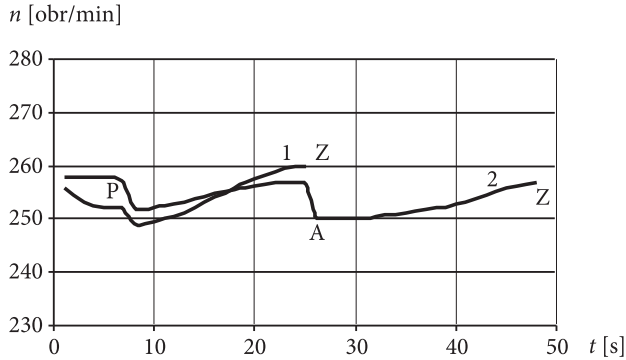


Rys. 2. Zależność czasu rozruchu  $t_r$  i czasu zaistnienia pierwszego samozapłonu  $t_z$  silnika AD3.152UR od temperatury

W okresie do pierwszego samozapłonu w cylindrach silnika zachodzą procesy, których rezultatem jest wytworzenie odpowiednich warunków dla jego zaistnienia [2, 7]:

- wzrost temperatury ścianek komory spalania w wyniku przejmowania ciepła od sprężanego powietrza oraz wskutek tarcia w zespole tłok–cylinder,
- osiadanie kroplek wtryskiwanego paliwa na ściankach tłoka i cylindra, przez co zwiększa się stopień zmiany objętości sprężanego w cylindrze powietrza,
- działanie paliwa powodujące uszczelnienie skojarzenia tłok–pierścienie tłokowe–cylinder.

Ocenę wpływu wymienionych czynników na przebieg fazy wstępnej przeprowadzono na podstawie wyników badań rozruchów realizowanych według różnych metod. Przykład przebiegu fazy wstępnej rozruchu silnika 6CT 107 w przypadku realizacji i braku wtryskiwania paliwa przedstawiono na rysunku 3. Rozruch realizowano przy ciągłej pracy rozrusznika.



Rys. 3. Zależność prędkości obrotowej wału korbowego silnika 6CT107 od czasu pracy rozrusznika w fazie wstępnej rozruchu: 1 — wtrysk paliwa realizowany od początku próby rozruchu; 2 — wtrysk paliwa realizowany od punktu A; Z — moment powstania pierwszego samozapłonu mieszanki w cylindrze silnika

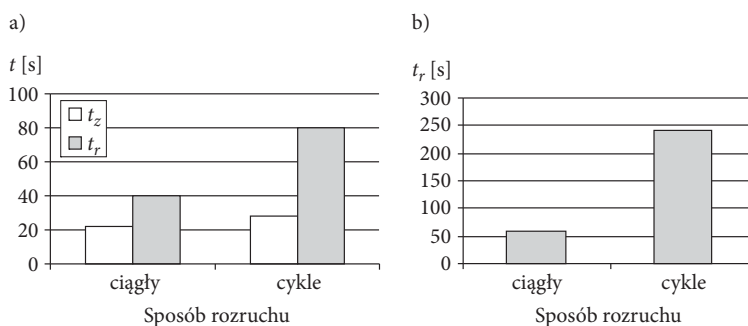
Krzywą 1 otrzymano podczas normalnej próby rozruchu silnika z wtryskiwaniem paliwa od chwili włączenia rozrusznika. W punkcie Z po czasie 25 s trwania fazy wstępnej stwierdzono powstanie pierwszego samozapłonu w cylindrze. Krzywą 2 otrzymano przy napędzaniu wału korbowego bez wtryskiwania paliwa do cylindrów, do chwili oznaczonej punktem A, odpowiadającej chwili zapłonu Z na krzywej 1. Celem tak przeprowadzonej próby rozruchu było określenie istotności wymienionych wyżej czynników na wytworzenie w cylindrze warunków do powstania pierwszego samozapłonu podczas rozruchu silnika o ZS w niskiej temperaturze. W tym przypadku pierwszy samozapłon nastąpił po łącznym czasie pracy rozrusznika 49 s. Wskazuje to więc na zasadniczy wpływ wtryskiwanego paliwa na kształtowanie warunków zaistnienia samozapłonu w fazie wstępnej rozruchu.

Część wtryskiwanego i rozpylonego paliwa osiada na ściankach denka tłoka, głowicy i cylindra. Powoduje ono zmniejszenie objętości komory sprężania, w efekcie zwiększa się rzeczywisty stopień zmiany objętości ładunku powietrza w suwie sprężania, a stąd wzrost jego parametrów termodynamicznych. Paliwo osiadające na ściankach cylindrów, w połączeniu z warstwą olejową pozostałą z poprzedniej pracy silnika, powoduje także uszczelnienie tłoka w cylindrze. Jest to czynnik zmniejszający ubytki masy ładunku powietrza w fazie sprężania, a przez to przyczyniający się również do wzrostu ciśnienia i temperatury podczas suwu sprężania. W bezpośrednim badaniu rozruchu wykazano więc wpływ wtryskiwania paliwa na kształtowanie warunków powstania pierwszego samozapłonu mieszanki w cylindrach silnika.

W wyniku długotrwałego napędzania wału korbowego następuje wzrost temperatury ścianek komory sprężania. Wpływ czynników cieplnych na przebieg procesów zapłonowych wykazano także poprzez odpowiedni dobór metodyki rozruchu. Podczas realizacji rozruchu silnika Z 8703 w temperaturze 262 K przy ciągłej pracy rozrusznika pierwszy zapłon wystąpił po 22 s. W tych samych wa-

runkach, przy pracy rozrusznika w cyklach trwających 5 s z przerwą 60 s, pierwszy samozapłon wystąpił po 28 s (rys. 4). Obserwowane wydłużenie czasu trwania fazy wstępnej wynosi około 27%. Zwiększenie czasu fazy wstępnej wynika tu zarówno ze zmniejszenia prędkości obrotowej wału korbowego przy napędzaniu cyklicznym (rys. 1), jak też zjawisk wymiany ciepła. Wskazuje to, że optymalne jest realizowanie rozruchu w sposób ciągły.

Druga faza rozruchu charakteryzuje się występowaniem zapłonów w cylindrach, przy czym dla podtrzymania danego stanu pracy niezbędne jest także napędzanie wału korbowego przez rozrusznik. Dla fazy drugiej rozruchu identyfikację czynników warunkujących występowanie procesów samozapłonu i spalania paliwa przeprowadzono także na podstawie badań rozruchu silników realizowanych wg różnych sposobów włączania rozrusznika. Przy ciągłej pracy rozrusznika silnik Z 8703 w temperaturze 262 K uzyskał stan samodzielnej pracy po 40 s, a w cyklach trwających 5 s z przerwą 60 s w czasie 80 s (rys. 4). Jeszcze większe zmiany czasu rozruchu stwierdzono w przypadku silnika RABA MAN, który przy realizacji rozruchu w cyklach pracy rozrusznika 45 s z przerwą 30 s uzyskał stan samodzielnej pracy po 60 s, zaś przy włączaniu rozrusznika na okres 10 s z przerwą 30 s w czasie 240 s.



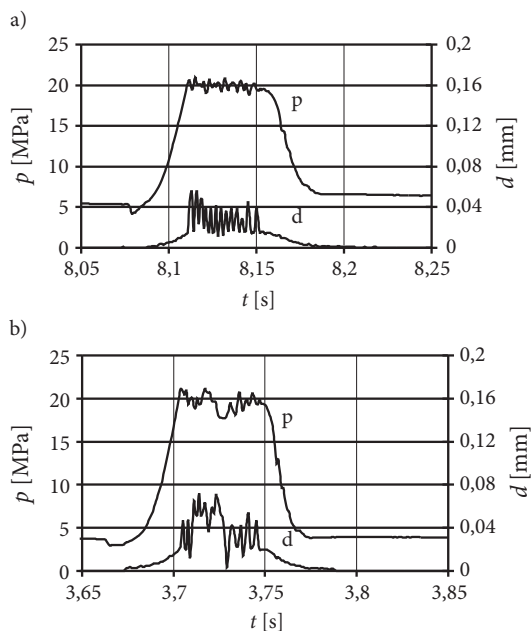
Rys. 4. Zależność czasu powstania samozapłonu ( $t_z$ ) i rozruchu silnika ( $t_r$ ) Z 8703 (a) oraz rozruchu silnika RABA MAN (b) od metody uruchamiania

Przyczyny tak znacznego wydłużenia czasu rozruchu realizowanego w krótkich cyklach pracy rozrusznika można wyjaśnić w sposób następujący: jeżeli w danym cyklu, zwłaszcza w końcowej jego fazie, proces spalania przebiega z większą sprawnością, to mniejsza część paliwa osiada na ściankach cylindrów. W związku z tym zmniejsza się również stopień uszczelnienia tłoka przez wtryskiwane paliwo. W trakcie trwania tego cyklu intensywniej wzrasta temperatura ścianek otaczających sprężany ładunek, jednak obniża się ona w okresie przerwy po jego zakończeniu. W konsekwencji pogarszają się warunki powstania samozapłonu i spalania paliwa w cyklu następnym. Z kolei w tym cyklu większa ilość paliwa osiada na ściankach cylindrów, zwiększając szczelność zespołu tłok-cylinder. Wskutek tego, w cyklu

kolejnym sprawność spalania jest większa. W drugiej fazie rozruchu realizowanej w cyklach pracy rozrusznika sprawność procesu spalania zależy więc zarówno od przyrostu temperatury ścian komory spalania, jak też od uszczelnienia tłoka przez wtryskiwane paliwo. Przy ciągłej pracy rozrusznika możliwe jest obniżenie granicznej temperatury rozruchu silników o  $1\div 2$  K.

### 3. Przebieg tworzenia i samozapłonu mieszanki podczas rozruchu silnika o ZS

Wtryskiwanie paliwa w warunkach uruchamiania silnika — napędzania wału korbowego przez układ rozruchowy silnika z małą prędkością obrotową — charakteryzuje się istotną specyfiką. Wartość dawki wtryskiwanego paliwa, czasowy przebieg wtryskiwania i kąt wyprzedzenia wtryskiwania paliwa zależne są od parametrów konstrukcyjnych pompy wtryskowej, jej parametrów regulacyjnych i prędkości wałka pompy. Na rysunku 5 przedstawiono przebieg wzniosu iglicy wtryskiwacza i ciśnienia wtrysku podczas wtryskiwania maksymalnej dawki paliwa w temperaturze  $-12^{\circ}\text{C}$  przez rozdzielaczową pompę wtryskową DPA silnika AD4.236 przy średnicy tłoczków głowicy pompy równej 7 mm oraz 8,5 mm. Średnia prędkość obrotowa



Rys. 5. Przebieg ciśnienia wtryskiwania paliwa  $p$  przez pompę DPA i wzniosu iglicy  $d$  wtryskiwacza podczas rozruchu silnika — średnica tłoczków głowicy 7 mm (a) i 8,5 mm (b)

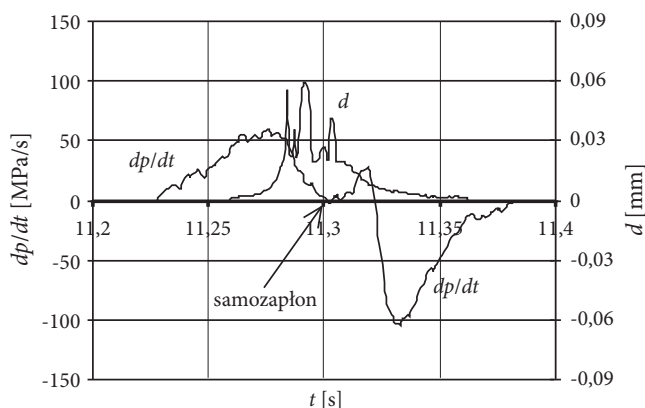
wału korbowego była równa około 120 obr/min, a w okresie wtryskiwania paliwa, ze względu na jej nierównomierność, około 65 obr/min.

Widoczne jest, że w tym zakresie prędkości wtryskiwanie paliwa zachodzi przy ciśnieniu praktycznie równym ciśnieniu otwarcia wtryskiwacza, a wtrysk paliwa następuje przy wielokrotnym osiadaniu jego iglicy w gnieździe — nie ma on charakteru ciągłego. Stopień nieciągłości wtryskiwania paliwa — liczba i czas trwania fazy osiadania iglicy w gnieździe — znacznie zmniejsza się w przypadku stosowania tłoczków głowicy pompy o zwiększonej średnicy, tj. 8,5 mm.

Kolejne fazy rozruchu charakteryzują się wzrostem wartości prędkości obrotowej wału korbowego i czasu wtryskiwania dawki paliwa do cylindrów uruchamianego silnika. Wtrysk paliwa może mieć już charakter procesu ciągłego, następuje wzrost ciśnienia wtryskiwania paliwa oraz zmiana charakteru przemieszczeń iglicy wtryskiwacza — nie obserwuje się jej osiadania w gnieździe. Konsekwencją tego jest zwiększenie intensywności przepływu paliwa przez otwory rozpylacza.

Dla powstania samozapłonu wtryskiwanego paliwa konieczne jest uzyskanie właściwej koncentracji reagentów i odpowiednich warunków zaistnienia reakcji. Na rysunku 6 przedstawiono wykres zależności wzniosu iglicy wtryskiwacza oraz gradientu ciśnienia dla czasu rozruchu silnika AD4.236, w którym powstał pierwszy samozapłon paliwa w cylindrze. Widoczne jest, że samozapłon następuje w chwili, gdy wtrysk paliwa jest praktycznie zakończony. W okresie wtryskiwania paliwa obszar nasycony parami paliwa jest wychłodzony w wyniku zachodzących procesów wymiany ciepła między wtryskiwanym paliwem i ładunkiem powietrza.

Intensywność wydzielania ciepła jest na tyle mała, że w okresie spalania gradient wzrostu ciśnienia w cylindrze nie przekracza jego wartości uzyskiwanych podczas sprężania. Taki proces spalania nie powoduje wzrostu maksymalnego ciśnienia w cylindrze silnika, ponieważ ma on miejsce po osiągnięciu maksimum ciśnienia



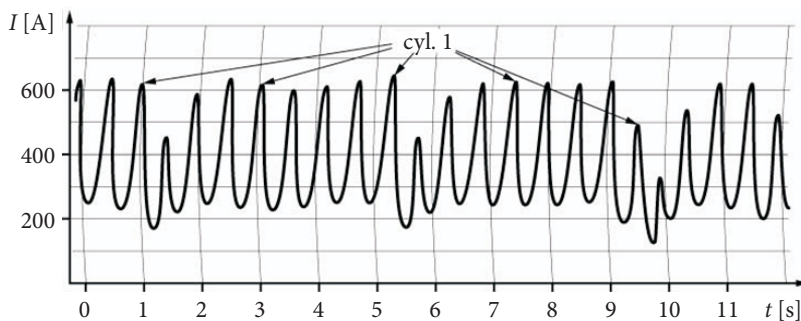
Rys. 6. Ilustracja przebiegu gradientu ciśnienia  $dp/dt$  w cylindrze silnika AD4.236 i wzniosu  $d$  iglicy wtryskiwacza podczas powstania pierwszego zapłonu w warunkach rozruchu



podczas sprężania (zauważalny jest jednak niewielki wzrost prędkości obrotowej wału korbowego silnika). Przebieg spalania z niewielkim wydzielaniem ciepła, trwający względnie długi okres czasu świadczy, że w spalaniu bierze udział niewielka ilość paliwa, które uległo odparowaniu w okresie zwłoki samozapłonu i spalanie ma charakter jednofazowy, kinetyczny. Ponadto przebieg procesu (jego długotrwałość) może wskazywać na istnienie więcej niż jednego ośrodka samozapłonu w różnych obszarach komory spalania (strefach objętych strugą paliwa).

W miarę trwania rozruchu silnika następuje zmniejszenie czasu zwłoki samozapłonu i czasu spalania paliwa. Zwiększa się też ilość wydzielonego ciepła. Rozwój procesów samozapłonu i spalania, a w konsekwencji wzrost prędkości obrotowej wału korbowego powodują, że silnik może podjąć samodzielną pracę.

Charakterystyczną cechą rozruchu silników o ZS w niskiej temperaturze jest zjawisko zaniku samozapłonu w tym cylindrze, w którym wystąpił on w poprzednim cyklu pracy silnika. Zjawisko to jest nazywane pracą silnika w „ośmiotakcie”. Jako główną przyczynę takiego przebiegu procesów zapłonowych wskazano ich losowy charakter [5]. Przykład rozruchu silnika AD4.236 ilustrujący zjawisko pracy w „ośmiotakcie” przedstawiono na rysunku 7. W wyodrębnionym cylindrze (cylinder ten oznaczony: cyl. 1) dwukrotnie wystąpiło zjawisko pracy silnika w ośmiotakcie.



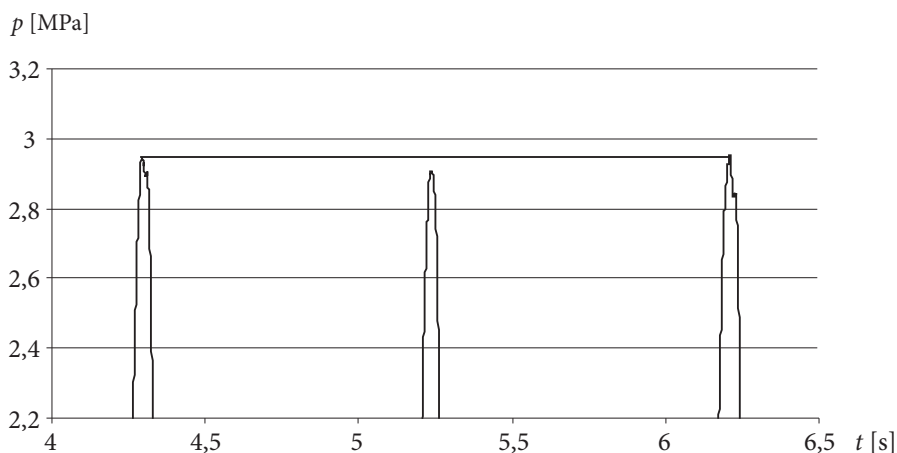
Rys. 7. Przebieg zmian natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik silnika AD4.236 od czasu ilustrujący efekt pracy w ośmiotakcie podczas rozruchu w niskiej temperaturze

Istnieje szereg prawidłowości występowania zjawiska pracy w ośmiotakcie, które sformułowano na podstawie wyników badań własnych:

- intensywność występowania zjawiska zwiększa się w miarę obniżania temperatury,
- efekt zaniku samozapłonu może wystąpić w kilku kolejnych cyklach — praca silnika w „wielotakcie”,
- zjawisko zaniku ma miejsce również po kolejnych dwu lub nawet trzech samozapłonach w tym samym cylindrze silnika, jeżeli ich intensywność jest niewielka,

- zanik samozapłonu może wystąpić w wielu cylindrach silnika po krótkotrwałym zwiększeniu (wskutek spalania paliwa) prędkości obrotowej wału korbowego,
- przebieg zjawiska jest zależny od intensywności poprzedzającego go procesu spalania — jeżeli intensywność spalania jest duża, brak samozapłonu może mieć miejsce nawet w wielu kolejnych cyklach pracy silnika, a przy małej intensywności spalania efekt pracy w ośmiotakcie może nie wystąpić.

Wykazano, że dla powstania podczas rozruchu silnika o ZS efektu pracy w „ośmiotakcie” podstawowe znaczenie ma zaburzenie działania uszczelniającego łożek przez wtryskiwane i osiadające na powierzchni cylindra paliwo. Zjawisko zaniku samozapłonu w jednym z cylindrów silnika AD4.236 przedstawiono na rysunku 8, gdzie pokazano zarejestrowany przebieg ciśnienia sprężania (przedział maksymalnych jego wartości) w trzech kolejnych cyklach jego pracy. Wskazuje on jednoznacznie na relacje wartości maksymalnych ciśnienia w kolejnych cyklach pracy we wskazanym cylindrze.



Rys. 8. Przebieg ciśnienia w cylindrze silnika AD4.236 przedstawiający efekt pracy w ośmiotakcie podczas rozruchu w niskiej temperaturze

W pierwszym i trzecim pokazanym cyklu pracy wystąpił samozapłon paliwa, na tyle mało intensywny, że maksymalna wartość ciśnienia ładunku nie uległa zmianie (wzrost ciśnienia nastąpił po osiągnięciu jego wartości maksymalnej). Najwyższa wartość ciśnienia maksymalnego wystąpiła w tym cylindrze w cyklach pracy, w których wystąpił zapłon, m.in. w cyklu pierwszym. W kolejnym cyklu, drugim na rysunku, wartość ciśnienia była najniższa i w tym cyklu nie wystąpił samozapłon wtryskiwanego paliwa. W trzecim cyklu ciśnienie (i odpowiednio temperatura) ładunku w cylindrze ponownie wzrosło, co stało się warunkiem

wystarczającym do powstania samozapłonu. Różnice wartości maksymalnej ciśnienia niewątpliwie wynikają tu ze zróżnicowania stopnia uszczelnienia cylindra przez wtryskiwane paliwo.

#### 4. Zależność procesu rozruchu od parametrów regulacyjnych silnika

Zależności właściwości rozruchowych silnika spalinowego od cech konstrukcyjnych, parametrów regulacyjnych jego układów i czynników eksploatacyjnych nazywane są jego regulacyjnymi charakterystykami rozruchowymi. Makroskopowym parametrem oceny może być wartość granicznej temperatury rozruchu lub czas uruchomienia silnika przy stałej wartości temperatury otoczenia. Dodatkowy parametr oceny może stanowić tu czas powstania pierwszego samozapłonu w cylindrach silnika. Podstawowe znaczenie zarówno poznawcze, jak i aplikacyjne, mają charakterystyki regulacyjne silników w funkcji parametrów układu zasilania: kąta wyprzedzenia wtrysku, dawki paliwa i ciśnienia otwarcia wtryskiwacza.

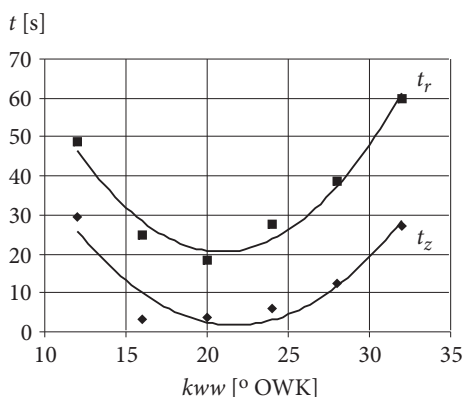
Często charakterystyki rozruchowe silników można opisać za pomocą prostych funkcji regresji. Stanowią one matematyczne modele empiryczne badanego obiektu lub procesu, tzw. funkcje obiektu badań. Pozwalają na uogólnienie wyników eksperymentu i rozszerzenie zakresu wnioskowania o procesach, m.in. poprzez wykonanie operacji matematycznych na uzyskanych funkcjach, np. poszukiwanie wartości optymalnych, ekstrapolacja, itp.

Kąt wyprzedzenia wtrysku paliwa jest podstawowym parametrem regulacyjnym układu zasilania paliwem silnika o ZS. Jego istotną zaletą jest względnie duża łatwość realizacji technicznej zmiany wartości zależnie od warunków pracy silnika, w tym także w warunkach rozruchu poprzez stosowanie przestawiaczy kąta wtrysku. Dodatkowe możliwości w zakresie sterowania parametrami regulacyjnymi układu zasilania paliwem stwarzają elektroniczne układy sterujące pracą silnika. Wyniki badań charakterystyki regulacyjnej jako funkcji kąta wyprzedzenia wtrysku dla silnika AD4.236 przedstawiono na rysunku 9. Zależności czasu wystąpienia pierwszego samozapłonu  $t_z$  i czasu rozruchu  $t_r$ , wyrażone w sekundach od wartości kąta wyprzedzenia wtrysku  $\varphi$ , wyrażonego w stopniach obrotu wału korbowego, opisano za pomocą wielomianów drugiego stopnia:

$$t_z = 0,2555\varphi^2 - 11,1\varphi + 122,3, \quad (1)$$

$$t_r = 0,331\varphi^2 - 13,82\varphi + 164,9. \quad (2)$$

Wyznaczono optymalne dla rozruchu wartości kąta wyprzedzenia wtrysku, które są w przybliżeniu równe: dla czasu zapłonu — 22°OWK i czasu rozruchu



Rys. 9. Zależność czasu wystąpienia pierwszego samozapłonu  $t_z$  i czasu rozruchu  $t_r$  silnika AD4.236 od wartości kąta wyprzedzenia wtrysku w temperaturze  $-12^\circ\text{C}$

—  $21^\circ\text{OWK}$ . Interpretację wpływu kąta wyprzedzenia wtrysku na rozruch silnika można uzyskać, rozważając zależność okresu zwłoki samozapłonu paliwa od parametrów termodynamicznych ładunku powietrza w cylindrze. Okres opóźnienia samozapłonu można podzielić na odcinki czasowe  $t_i$ , w których temperatura i ciśnienie ładunku są określone przez wartości:  $T_i$ ,  $p_i$ . W związku z tym w każdym okresie  $t_i$  zachodzi część reakcji przedpłomiennych równa  $\frac{t_i}{\tau_i}$ , gdzie  $\tau_i$  jest wartością czasu zwłoki samozapłonu przy danych parametrach powietrza  $T_i$ ,  $p_i$ . Oczywiście jest, że optymalną dla czasu samozapłonu wartość kąta wyprzedzenia wtrysku można określić poprzez spełnienie kryterium (w pewnym okresie trwania rozruchu samozapłony paliwa nie występują):

$$\sum_i \frac{t_i}{\tau_i} \rightarrow \max, \quad (3)$$

w którym granice sumowania określa początek i koniec wtrysku paliwa.

Zatem optymalne dla warunków rozruchu silnika wartości kąta wyprzedzenia wtrysku są w przybliżeniu równe połowie kąta trwania wtryskiwania paliwa względem położenia kąтового tłoka, w którym osiągnięta jest maksymalna wartość temperatury i ciśnienia sprężanego ładunku powietrza. Wiadomo, że maksymalne wartości parametrów termodynamicznych sprężanego ładunku powietrza nie są osiągnięte w GMP tłoka, lecz kilka stopni obrotu wału przed GMP, zależnie od prędkości obrotowej wału korbowego [4]. Wynika stąd również, że optymalna wartość kąta wyprzedzenia wtrysku jest także zależna od prędkości obrotowej wału korbowego.

W początkowej fazie rozruchu silnika o ZS w niskiej temperaturze ciśnienie wtryskiwania paliwa jest praktycznie równe ciśnieniu otwarcia wtryskiwacza. Determinuje ono prędkość wypływu i jakość rozpylenia paliwa wtryskiwanego do cylindrów

uruchamianego silnika. Wpływa na tworzenie mieszanki paliwowo-powietrznej i możliwość jej zapłonu, a przez to na właściwości rozruchowe silników.

Zależności parametrów rozruchu silnika AD4.236 od ciśnienia otwarcia wtryskiwacza opisano za pomocą wielomianów drugiego stopnia [4]. Istnieją również optymalne wartości ciśnienia otwarcia dla czasu powstania samozapłonu i rozruchu silnika, przy tym różnią się one dość znacznie. Optymalna w warunkach rozruchu wartość ciśnienia otwarcia wtryskiwacza dla czasu powstania samozapłonu jest równa około 29 MPa, zaś dla czasu rozruchu silnika 18,7 MPa. Tak znaczne zróżnicowanie optymalnej wartości ciśnienia otwarcia wtryskiwacza dla różnych faz rozruchu wynika niewątpliwie z dynamicznego oddziaływania prędkości obrotowej wału korbowego na rzeczywiste parametry wtryskiwania paliwa w drugiej fazie rozruchu, tj. w okresie podejmowania przez silnik samodzielnej pracy. Dla niskich wartości ciśnienia wzrasta czas trwania pierwszej fazy rozruchu, a czas trwania drugiej fazy rozruchu znacznie wzrasta dla dużych wartości ciśnienia. Wskazuje to na dużą złożoność wpływu tego parametru na rozruch silnika w różnych jego fazach.

W fazie wstępnej rozruchu jakość rozpylenia paliwa zadowalającą dla szybkości tworzenia i samozapłonu mieszaniny palnej uzyskano przy wartościach ciśnienia otwarcia wtryskiwacza większych od 20 MPa. Świadczy o tym mała wartość czasu powstania pierwszego samozapłonu w cylindrach silnika. Przy niższych wartościach ciśnienia pogorszenie jakości rozpylenia jest kompensowane postępującym w miarę trwania rozruchu zwiększaniem stopnia zmiany objętości ładunku w procesie sprężania wskutek osiadania paliwa na dnie tłoka. Wraz ze wzrostem wartości ciśnienia otwarcia wtryskiwacza zwiększa się czas trwania drugiej fazy rozruchu silnika, gdzie wskutek zwiększenia prędkości obrotowej wału korbowego następuje istotny wzrost ciśnienia wtryskiwania paliwa przewyższający znacznie ciśnienie otwarcia wtryskiwacza. Jest to korzystne w przedziale małych wartości ciśnienia otwarcia wtryskiwacza, gdzie następuje poprawa warunków tworzenia mieszanki i jej samozapłonu. Natomiast w przedziale zwiększonych wartości ciśnienia otwarcia wtryskiwacza wzrost ciśnienia wtryskiwania paliwa powoduje zwiększenie intensywności wymiany ciepła ze sprężonym powietrzem i nadmierne obniżenie temperatury strefy strugi paliwa. Jest to czynnik zmniejszający szybkość reakcji przedpłomiennych i sprawność spalania, stąd wydłużenie czasu podjęcia samodzielnej pracy przez silnik.

W pompie wtryskowej eksploatowanego silnika sterowanie zmianą dawki paliwa następuje poprzez zmianę skoku czynnego elementu tłoczącego. Analogicznie dotyczy to także zmiany dawki paliwa uruchamianego silnika. Zrealizowano badania wpływu dawki paliwa na rozruch silnika AD4.236 zmienianej zarówno poprzez zmianę wartości skoku elementu tłoczącego, jak również średnicy tłoczków pompy wtryskowej DPA. Wartości skoku tłoczków głowic regulowano za pomocą zmiany położenia płytki regulacyjnej pompy wtryskowej. Podczas badań zostały ustalone cztery stałe położenia płytki regulacyjnej, które określono w odniesieniu do wartości

dawki paliwa zmierzonej dla głowicy pompy o średnicy tłoczków 8,5 mm przy prędkości obrotowej wałka pompy 100 obr/min. Kolejne położenia płytki regulacyjnej odpowiadały tłoczonej względnej dawce paliwa  $q$  równej 1 (dawka maksymalna), 0,75, 0,54, 0,37. Podczas badań stosowano głowice o średnicach tłoczków 7, 8,5 oraz 9 mm. W temperaturze  $-12^{\circ}\text{C}$  nie było możliwe uzyskanie rozruchu silnika przy zastosowaniu głowicy z tłoczkami o średnicy 7 mm dla ustalonej najmniejszej wartości dawki paliwa 0,37  $q$  (nie uzyskano także rozruchu silnika w przypadku średnicy tłoczków — 6 mm).

Również w tym przypadku rozruchowe charakterystyki regulacyjne silnika można na ogół opisać za pomocą wielomianów drugiego stopnia i istnieje tutaj także optymalna wartość dawki rozruchowej paliwa ustalana zarówno za pomocą czynnego skoku tłoczka, jak też i jego średnicy. Stwierdzono, że istnieje wzajemna zależność (korelacja odwrotna) oddziaływania na parametry rozruchowe silnika ustalonej wartości dawki paliwa za pomocą czynnego skoku tłoczków pompy wtryskowej oraz ich średnicy.

Określając mechanizmy oddziaływania dawki paliwa na przebieg fazy wstępnej rozruchu (do wystąpienia pierwszego zapłonu), należy uwzględnić jej wpływ na:

- zmianę parametrów termodynamicznych sprężanego ładunku powietrza w trakcie trwania rozruchu,
- charakterystykę wtrysku i rozpylenia paliwa oraz procesy zapłonowe.

Zmiana czynnego skoku tłoczków pompy wtryskowej oraz zmiana ich średnicy, powodując zmianę objętości wtryskiwanego do cylindra paliwa, w odmienny sposób wpływa na zmianę parametrów wtryskiwania dawki paliwa, charakterystykę jego rozpylenia, a przez to na przebieg tworzenia i zapłonu mieszanki paliwa i powietrza podczas rozruchu silnika. Zmiana objętości dawki paliwa za pomocą zmiany czynnego skoku tłoczka nie powoduje zmian charakterystyk wtrysku i rozpylenia paliwa, zmienia jedynie czas trwania wtrysku. Zmiana średnicy tłoczków powodowałyby zmiany intensywności wypływu paliwa z dysz rozpylaczy, a więc zmiany jakości rozpylenia paliwa, gdyby wtrysk paliwa miał charakter procesu ciągłego. Jednak przy nieciągłym wtryskiwaniu paliwa, stałej wartości ciśnienia wtrysku, zwiększenie średnicy tłoczków powoduje zmianę stopnia nieciągłości wtrysku paliwa, rozumianego jako stosunek czasu rzeczywistego wtryskiwania paliwa do nominalnego czasu trwania wtrysku.

Zwiększenie objętości wtryskiwanej dawki paliwa, niezależnie od mechanizmu jej zmiany, zwiększa ilość paliwa osiadającego na ściankach komory cylindra. Powoduje to przyspieszenie procesu uszczelniania tłoka, zwiększenia rzeczywistego stopnia zmiany objętości sprężanego w cylindrze powietrza i jest czynnikiem zmniejszającym czas trwania fazy wstępnej i odpowiednio czas rozruchu. Równocześnie jednak, wtryskiwanie zwiększonej dawki paliwa powoduje obniżenie parametrów sprężanego powietrza w cylindrze, w wyniku wymiany ciepła ze strugą paliwa. Ma to miejsce zarówno przy zwiększeniu czasu trwania wtrysku (skoku czynnego

łoczków) jak też i wzrostu intensywności wtryskiwania paliwa przy zwiększeniu średnicy tłoczków. Dlatego istnieje tu optymalna wartość dawki zarówno ze względu na wartość skoku czynnego jak też średnicę tłoczków.

W przypadku zmiany dawki wtryskiwanego paliwa uzyskiwanej poprzez zmiany czynnego skoku elementu tłoczącego pompy wtryskowej, wartość optymalna dawki paliwa wynika z relacji okresu zwłoki samozapłonu i czasu wtryskiwania paliwa. Przy wartości dawki mniejszej od optymalnej, samozapłon paliwa nie wystąpi w danych warunkach, ponieważ okres zwłoki samozapłonu jest większy od czasu wtryskiwania paliwa. W okresie wtryskiwania paliwa mieszanka nie osiąga składu w granicach zapalności. Dla dawki większej od optymalnej samozapłon nie występuje, ponieważ obszar objęty strugą paliwa staje się nadmiernie wychłodzony wskutek nadmiernego wydłużenia procesu wtryskiwania paliwa. Konieczne jest wówczas zwiększenie czasu napędzania wału korbowego przez układ rozruchowy — wydłużenie czasu trwania fazy wstępnej w celu podwyższenia parametrów termodynamicznych sprężanego powietrza.

Występowanie optymalnej dawki ze względu na skok tłoka pompy świadczy też, że pierwsze zapłony mieszanki paliwa i powietrza podczas rozruchu silnika występują w fazie gazowej, w obszarze objętym strugą, po zakończeniu wtryskiwania paliwa. Z kolei przy zmianie średnicy tłoczków pompy — stopnia nieciągłości wtryskiwania paliwa — nadmierne jej zmniejszenie powoduje, że szybkość tworzenia mieszaniny paliwa jest zbyt niska i nie osiąga ona składu w granicach zapalności. W przypadku zbyt dużej średnicy tłoczków powstaje duża ilość kropel paliwa, które pobierają dużo ciepła na ogrzanie przy jednocześnie ograniczonej intensywności parowania. Następuje nadmierne obniżenie temperatury ładunku w strefie strugi i zapłon również nie występuje. Wówczas konieczne jest odpowiednie wydłużenie czasu pracy rozrusznika do zainicjowania procesów zapłonu i spalania. Przy tym dla większej średnicy tłoczków optymalna dla warunków rozruchu jest wartość dawki uzyskiwana przy mniejszym ich skoku czynnym i podobnie, przy ustalonym zwiększonym skoku tłoczka optymalną dawkę uzyskuje się dla mniejszej średnicy. Istnienie wartości optymalnej dawki paliwa świadczy, że większe znaczenie dla przebiegu fazy wstępnej ma mechanizm wpływu na zapłon pojedynczej dawki paliwa niż efekt uszczelnienia tłoka w cylindrze przez wtryskiwane paliwo.

W fazie drugiej rozruchu, przy występowaniu samozapłonów, wzrost prędkości obrotowej wału korbowego powoduje wzrost ciśnienia wtrysku i natężenia wypływu paliwa z rozpylaczy. Powoduje to poprawę jakości rozpylenia i parowania paliwa, zwiększa intensywność wymiany ciepła między rozpylanym paliwem i powietrzem. Stwierdzono to zwłaszcza dla dyszy o średnicy 9 mm i maksymalnego skoku tłoczków, gdzie występuje znaczny wzrost czasu trwania drugiej fazy rozruchu.

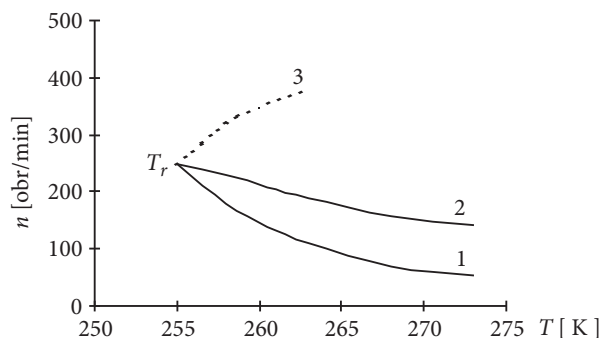


## 5. Wpływ prędkości obrotowej wału korbowego na rozruch silnika o ZS

Prędkość obrotowa jest czynnikiem wymuszającym procesy rozruchowe silnika i złożoność jej wpływu na rozruch wyraża się istnieniem szeregu jej różnych wartości. Dla rozruchu naturalnego silnika o ZS podstawowe znaczenie ma minimalna rozruchowa prędkość obrotowa silnika. Jej istnienie wyraża fakt, że dla rozruchu naturalnego silnika (w ustalonym czasie maksymalnym) konieczne jest zapewnienie prędkości obrotowej wału nie mniejszej od tej wartości. Jednakże, zwłaszcza w zakresie najniższej temperatury uruchamiania silników, możliwości poprawy właściwości rozruchowych silnika poprzez zwiększenie prędkości obrotowej są ograniczone — istnieje optymalna prędkość obrotowa rozruchu. Istnienie optymalnej prędkości obrotowej rozruchu wyraża stan równowagi pomiędzy dodatnimi (wzrost temperatury i ciśnienia ładunku, poprawa jakości rozpylenia paliwa) i ujemnymi (obniżenie temperatury strefy strugi wskutek wzrostu intensywności wymiany ciepła między paliwem i ładunkiem powietrza) skutkami zwiększania prędkości obrotowej wału korbowego w tym zakresie jej wartości, co utrudnia powstanie zapłonu rozpylonego paliwa. Jej wartość jest większa w niższej temperaturze, co wynika z wpływu lepkości, która jest większa w niższej temperaturze, na jakość rozpylenia paliwa. Im niższa jest temperatura silnika i paliwa, przy tym wyższej prędkości obrotowej osiągnąta jest „równowaga” skutków jej wzrostu.

Istnienie maksymalnej prędkości obrotowej rozruchu jest konsekwencją istnienia jej wartości minimalnej i optymalnej. Zależność rozruchowych prędkości: minimalnej, optymalnej i maksymalnej silnika od temperatury dla silnika SW680 przedstawiono na rysunku 10.

Na płaszczyźnie  $(T, n)$  (temperatura, prędkość obrotowa wału korbowego — rys. 10) znajduje się punkt, w którym wartości trzech rozruchowych prędkości obrotowych silnika o zapłonie samoczynnym: minimalnej, optymalnej i maksymal-

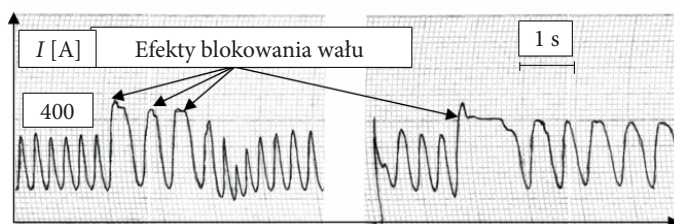


Rys. 10. Rozruchowe prędkości obrotowe silnika SW680 wyznaczone na podstawie charakterystyki uniwersalnej: 1 — minimalna; 2 — optymalna; 3 — maksymalna



nej są równe. Punkt ten nazwano: „potrójny punkt rozruchowy silnika o zapłonie samoczynnym” —  $T_r$ . Jego współrzędne wyznaczają najniższą temperaturę rozruchu naturalnego silnika przy jednej tylko, ściśle określonej wartości prędkości obrotowej wału korbowego. Oznacza to, że istnieje wynikająca z właściwości procesów zachodzących w silniku granica możliwości jego uruchomienia.

W rozruchu wspomaganym silnika o ZS wyróżniono graniczną prędkość obrotową silnika — jest to najwyższa wartość prędkości obrotowej wału, przy której powstaniu samozapłonu paliwa towarzyszą zjawiska chwilowego blokowania wału korbowego (rys. 11).



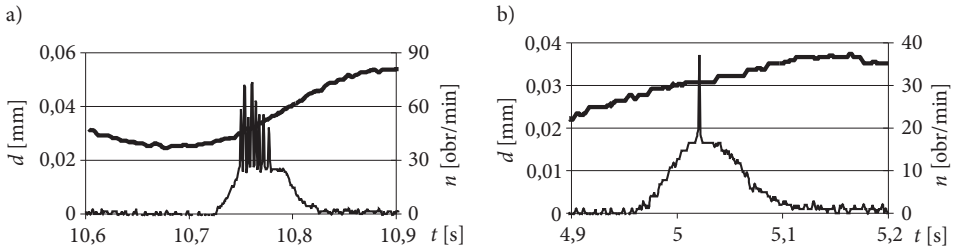
Rys. 11. Przebiegi natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik podczas wspomaganego za pomocą świecy płomieniowej rozruchu silnika AD4.236 — efekt blokowania wału korbowego

Przyczyną blokowania wału korbowego jest powstanie samozapłonu i spalanie wtrysniętej dawki paliwa przed przejściem tłoka za GMP. Korzystne warunki samozapłonu paliwa stwarza np. działanie świecy płomieniowej, co przy niskiej wartości prędkości obrotowej wału korbowego powoduje powstanie wysokiego ciśnienia gazów hamującego jego ruch. Ta wartość prędkości obrotowej (rzędu 70÷80 obr/min), przy której występuje efekt blokowania wału, stanowi więc pewnego rodzaju granicę możliwości uruchomienia silnika.

Przy niskiej wartości prędkości napędzania wału korbowego może nastąpić przerwanie tłoczenia paliwa przez pompę wtryskową. Najniższa wartość prędkości, przy której realizowane jest jeszcze wtryskiwanie paliwa do cylindrów silnika, jest więc konieczną rozruchową prędkością obrotową silnika. Wartość koniecznej rozruchowej prędkości obrotowej silnika jest zależna od średnicy tłoczków pompy i dawki paliwa ustalonej poprzez wartość czynnego skoku tłoczków oraz lepkości paliwa i ciśnienia otwarcia wtryskiwacza.

Na rysunku 12 pokazano rezultaty badań wzniosu iglicy wtryskiwacza podczas rozruchu silnika AD4.236 — przy prędkości wału korbowego 30 obr/min zarejestrowano jedynie pojedynczy wznios iglicy umożliwiający wtryskiwanie paliwa — praktycznie więc wtryskiwanie nie wystąpiło.

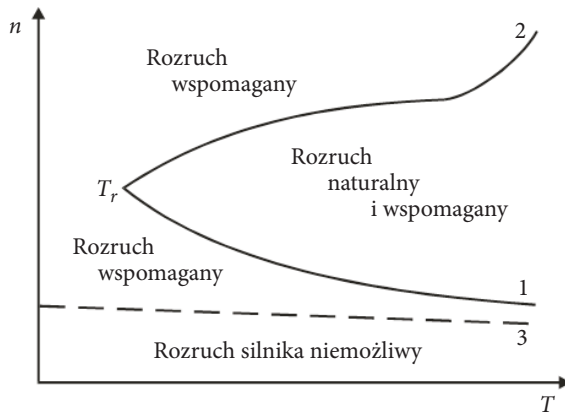
Fakt istnienia minimalnej, maksymalnej i granicznej (lub koniecznej) rozruchowej prędkości obrotowej wału korbowego pozwala na dokonanie podziału



Rys. 12. Przemieszczenie iglicy wtryskiwacza  $d$  przy różnych wartościach prędkości wału korbowego silnika AD4.236  $n$ : a) około 45÷50 obr/min; b) około 30 obr/min

płaszczyzny we współrzędnych temperatura–prędkość obrotowa wału korbowego ( $T, n$ ) na trzy „obszary rozruchowe silnika” (rys. 13), w których odpowiednio:

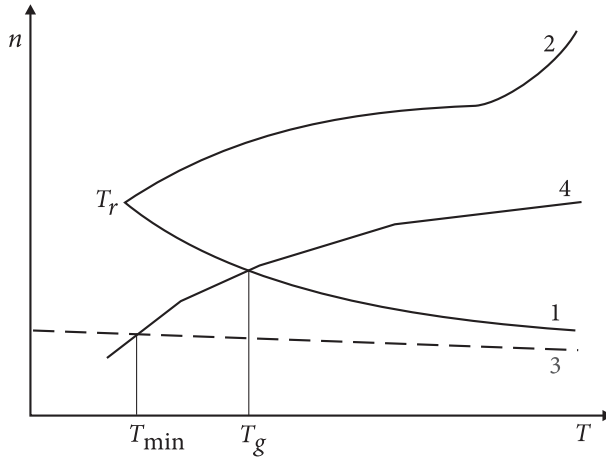
- rozruch silnika nie jest możliwy;
- możliwy jest rozruch silnika z użyciem środków wspomagania;
- możliwy jest rozruch naturalny (i wspomagany) silnika.



Rys. 13. Podział płaszczyzny  $(T, n)$  na obszary rozruchowe silnika o zapłonie samoczynnym: 1, 2, 3 — odpowiednio: minimalna, maksymalna, graniczna (lub konieczna) rozruchowa prędkość obrotowa silnika;  $T_r$  — potrójny punkt rozruchowy

Jeżeli na rysunku 13 zaznaczyć linię przedstawiającą zależność od temperatury prędkości obrotowej wału korbowego wymuszanej przez układ rozruchowy (krzywa 4 na rysunku 14), 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



Rys. 14. Wyznaczanie temperatur rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym na podstawie obszarów rozruchowych: 1, 2, 3, 4 — odpowiednio: minimalna, maksymalna, graniczna (lub konieczna) rozruchowa prędkość obrotowa, prędkość obrotowa wymuszana przez układ rozruchowy;  $T_r$  — potrójny punkt rozruchowy

wspomagania wpływających na warunki tworzenia i samozapłonu mieszanki paliwowo-powietrznej,

- uzyskanie rozruchu w temperaturze niższej od  $T_{\min}$  wymaga użycia takich środków wspomagania, które umożliwiają także zmianę wartości wymuszanej prędkości obrotowej wału korbowego (podgrzewacze rozruchowe elektryczne i spalinowe).

Na podstawie danych obszarów rozruchowych — przebiegów prędkości minimalnej i granicznej oraz wymuszanej przez rozrusznik — można określić właściwości rozruchowe silnika oraz rodzaj koniecznych środków wspomagania rozruchu.

Na podstawie analizy oddziaływania prędkości obrotowej napędzanego wału korbowego można sformułować makroskopowe, z punktu widzenia wymuszeń zewnętrznych, warunki rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym:

- napędzanie wału korbowego z prędkością większą lub równą prędkości granicznej (koniecznej) oraz maksymalnej stanowi warunek konieczny rozruchu. Dla podjęcia przez silnik samodzielnej pracy wystarcza wówczas spowodowanie samozapłonu wytworzonej mieszanki (np. przy użyciu środków wspomagania rozruchu);
- napędzanie wału korbowego z prędkością nie mniejszą niż minimalna i nie większą niż maksymalna jest warunkiem koniecznym i wystarczającym rozruchu silnika w zakresie temperatury, w którym one istnieją, a więc wyższej od temperatury potrójnego punktu rozruchowego.

Sformułowano również kryteria powstania samozapłonu (rozruchu) w skali mikro (z punktu widzenia procesów zachodzących w cylindrach silnika), które

mogą być zamiennie użyte w modelach obliczeniowych dla rozruchu danego silnika realizowanego w różnych warunkach, np. dla różnych wartości kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa, różnych prędkości obrotowych wału korbowego:

- dla powstania samozapłonu (rozruchu silnika) konieczna jest równość temperatury sprężanego powietrza w okresie rozpoczęcia wtryskiwania paliwa (przed GMP);
- dla powstania samozapłonu (rozruchu) konieczna jest równość całki działania temperatury  $K$  sprężonego powietrza w cylindrach silnika:

$$K = \int_{t_1}^{t_2} T \cdot dt \frac{\pi}{6}, \quad (4)$$

gdzie granice całkowania określa czas początku i końca wtryskiwania paliwa.

Dokonano weryfikacji tak określonych kryteriów rozruchu, wyznaczając przebieg minimalnej prędkości obrotowej rozruchu silnika AD4.236 w funkcji temperatury według opracowanego modelu obliczeniowego [4].

## 6. Podsumowanie

Spowodowanie samozapłonu wtryskiwanego do cylindrów silnika może być sformułowane jako cel działań związanych z uruchamianiem silnika oraz jako ogólne kryterium rozruchu. Spośród zjawisk powodujących powstanie samozapłonu i rozwój procesów zapłonowych najistotniejsze znaczenie ma wtryskiwanie do cylindrów paliwa, które, osiadając na ściankach komory sprężania, uszczelnia tłok w cylindrze i zwiększa rzeczywisty stopień zmiany objętości sprężanego powietrza. Optymalne wykorzystanie tych zjawisk i procesów zachodzących w cylindrach silnika o ZS dla spowodowania pierwszego samozapłonu i rozwoju procesów zapłonowych we wszystkich fazach jego rozruchu zapewnia metoda stosowania ciągłej pracy rozrusznika podczas napędzania wału korbowego uruchamianego silnika.

Jedną z charakterystycznych cech przebiegu rozruchu silników o ZS jest zjawisko tzw. pracy silnika w ośmiotakcie, czyli zaniku samozapłonu paliwa w tym cylindrze silnika, w którym wystąpił on w cyklu poprzednim. Wykazano, że przyczyną tego jest zanik działania uszczelniającego tłok w cylindrze przez wtryskiwane paliwo przy wystąpieniu samozapłonu.

Możliwość powstania samozapłonu i rozruchu silnika o ZS jest zależna od jego cech konstrukcyjnych, regulacyjnych i eksploatacyjnych wpływających na procesy sprężania ładunku i wtryskiwania paliwa do cylindrów. Szczególnie istotne znaczenie mają tu zależności procesów rozruchu od parametrów regulacyjnych układu zasilania paliwem, takich jak kąt wyprzedzenia wtrysku, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza i dawka paliwa. Istnieją wartości optymalne tych parametrów

zapewniające minimalne wartości czasu powstania samozapłonu i rozruchu silnika. Przedstawiono odpowiednie interpretacje, uzupełniające istniejące modele uzasadniające istnienie optymalnych wartości parametrów regulacyjnych dla warunków rozruchu.

Najbardziej złożony jest wpływ prędkości obrotowej wału korbowego wymuszanej przez rozrusznik na rozruch silnika o zapłonie samoczynnym. Wyraża się on istnieniem jej charakterystycznych wartości odpowiednio dla rozruchu naturalnego i wspomaganego: minimalnej, optymalnej, maksymalnej, granicznej i koniecznej. Istnienie prędkości obrotowych rozruchu naturalnego wynika z relacji gęstości energii ładunku sprężanego powietrza i niezbędnej dla zaistnienia przemian paliwa. Potrójny punkt rozruchowy silnika wyznacza granicę jego rozruchu naturalnego.

Na płaszczyźnie: temperatura, prędkość obrotowa wału korbowego wyznaczono obszary rozruchowe silnika, w których odpowiednio możliwy jest rozruch naturalny lub wspomagany silnika oraz uzyskanie rozruchu nie jest możliwe. Obszary rozruchowe mogą być wykorzystane jako narzędzie do interpretacji lub wyznaczania właściwości rozruchowych silników o ZS. Dokonana analiza zjawisk tworzenia mieszanki i zapłonu umożliwiła sformułowanie kryteriów rozruchu silników o ZS.

Artykuł wpłynął do redakcji 20.07.2009 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano we wrześniu 2009 r.

#### LITERATURA

- [1] Н. Х. Дяченко, *Теория двигателей внутреннего сгорания*, Машиностр., Ленинград, 1974.
- [2] W. E. MEYER, J. J. D. CAROLIS, *Compression temperatures in diesel engines under starting*, SAE Transactions, 1962.
- [3] J. MYSŁOWSKI, *Przegląd procedur badań rozruchowych*, VI symposium nt. „Rozruch silników spalinowych”, Szczecin, 1998.
- [4] J. PSZCZÓŁKOWSKI, *Charakterystyki rozruchowe silników o zapłonie samoczynnym*, Stowarzyszenie Edukacyjne Pedagogów Praktyków „Cogito”, Zbąszynek, 2004.
- [5] A. RUMMEL, *Termodynamiczne aspekty rozruchu silników wysokoprężnych w niskich temperaturach*, Archiwum Termodynamiki i Spalania, 7, 1976.
- [6] B. J. SVIRIDOV, *O teorii tworzenia mieszanki w strudze rozpylonego paliwa w silniku wysokoprężnym*, Silniki spalinowe, 3-4, 1980.
- [7] J. A. WAJAND, *Silniki o zapłonie samoczynnym*, WNT, Warszawa, 1988.
- [8] St. WÓJCICKI, *Spalanie*, WNT, Warszawa, 1969.
- [9] Н. С. Ждановский, А. И. Николаенко, Г. С. Кузмин, *Термодинамический анализ параметров конца сжатия при пуске дизеля*, Энергомашиностроение, 8, 1973.

J. PSZCZÓŁKOWSKI

**Factors determining creation of air-fuel mixture and its autoignition during self-ignition engine starting**

**Abstract.** The basic processes determining the self-ignition engine starting are: creating and autoignition of air-fuel mixture. The way of energy delivering to the started engine and simultaneously the factor extorting starting processes is crankshaft driving by a starting system. In the paper, the analysis of creating and self-ignition processes of air-fuel mixture during self-ignition engine starting at low temperature conditions is made. The factors causing creating and self-ignition of air-fuel mixture in the following starting stages are characterized. There are presented the research results of the basic adjustment parameters on engine starting characteristics. Special attention was devoted to adjustment parameters of the engine supply system and to the influence of crankshaft rotational speed on starting processes. There are presented the interpretations and models explaining the causes of existing dependences.

**Keywords:** combustion engines, low temperature starting

**Universal Decimal Classification:** 621.43