

Tadeusz Dziulak

Instytut Techniki Ciepłej

KIERUNKI ROZWOJU W KONSTRUKCJI
NOWOCZESNYCH DWUSUWOWYCH SILNIKÓW SAMOCHODOWYCH
Z ZAPŁONEM ISKROWYM

Streszczenie. W pracy przedstawiono zasadnicze cechy, zalety i parametry charakteryzujące dwusuwowe silniki samochodowe z zapłonem iskrowym na tle zagadnienia toksyczności spalin. Omówione zostały również nowe kierunki rozwoju szybkoobrotowych silników dwusuwowych, szczególnie z zastosowaniem zasilania wtryskowego.

Cechą główną dwusuwowego silnika spalinowego jako maszyny energetycznej jest realizacja cyklu pracy w optymalnym zakresie jednego pełnego obrotu wału korbowego. Wykorzystanie tłoka jako elementu sterującego rozrządem silnika i eliminującego klasyczny rozrząd zaworowy wiąże się ściśle z odmiennym niż w silniku czterosuwowym przebiegiem procesu wymiany ładunku.

W oparciu o dane statystyczne, odnoszące się do szybkoobrotowych silników spalinowych z zapłonem iskrowym stwierdzić można, że kąt otwarcia (napełniania) cylindra wyrażony kątem rozrządu jest w silniku dwusuwowym przeciętnie dwukrotnie mniejszy w porównaniu z okresem otwarcia zaworu ssącego w silniku czterosuwowym. Oznacza to, że całkowite kąty otwarcia organów sterujących napełnieniem cylindra silnika czterosuwowego α_{S_4} oraz dwusuwowego α_{D_2} są w przybliżeniu odwrotnie proporcjonalne do częstotliwości suwów pracy

$$\tau = \frac{\alpha_{D_2}}{\alpha_{S_4}} \approx \frac{1}{2}$$

Biorąc pod uwagę, że w dwusuwowym silniku spalinowym napełnianie cylindra odbywa się równocześnie z usuwaniem produktów spalania, w innym aniżeli w silniku czterosuwowym zakresie prędkości tłoka oraz przy odmiennym charakterze występujących zjawisk dynamicznych, zrozumiałym stał się fakt, że zagadnieniem istotnym dla silnika dwusuwowego jest problem sprawności procesu wymiany ładunku cylindra. Od sprawności przebiegu tego procesu zależać będzie ekonomia pracy silnika dwusuwowego oraz zakres jego zastosowań jako silnika trakcyjnego.

Przebieg procesu wymiany ładunku charakteryzują następujące, główne wskaźniki:

- a) współczynnik przechwycenia ładunku $\mathcal{P}_p = \frac{V_p}{V_{oo}}$
- b) współczynnik sprawności wymiany ładunku $\mathcal{P}_w = \frac{V_p}{V_p + V_r}$
- c) współczynnik sprawności efektywnego napełnienia cylindra $\mathcal{P}_{en} = \frac{V_p}{V_s(1 - \sigma_w)}$,

gdzie:

- V_p - ilość czynnika znajdującego się w cylindrze po zakończeniu procesu wymiany ładunku,
- V_{oo} - całkowita ilość czynnika, która przepłynęła przez układ: skrzynia korbową - cylinder,
- V_r - ilość wilgotnych spalin pozostałych w cylindrze, odniesiona do warunków normalnych,
- V_s - geometryczna objętość skokowa,
- σ_w - względna wysokość okien wylotowych.

Skład ładunku (czynnika roboczego) określa poza rzeczywistym współczynnikiem nadmiaru powietrza λ , współczynnik wymieszania ładunku:

$$\delta = \frac{V_{ps}}{V_{oo}},$$

gdzie:

- V_{ps} - oznacza część ładunku wymieszanego ze spalinami.

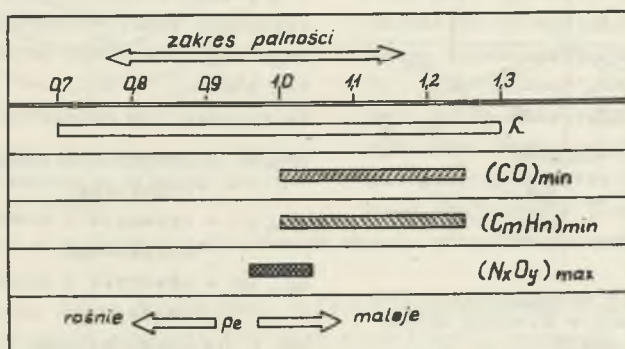
Dotychczasowe kryteria oceny pracy silników spalinowych oparte były na bilansach cieplnych, które powinny być rozpatrywane dla różnych warunków pracy oraz na wartościach wskaźników porównawczych, jak np. średnie ciśnienie użyteczne p_e .

W silnikach typu trakcyjnego, a więc szybkoobrotowych decydowały dotychczas te wskaźniki, które bezpośrednio rzutują na osiągi pojazdów samochodowych. W dążeniu do osiągnięcia maksymalnych wartości tych wskaźników mniejszą uwagę zwracano dotychczas na zagadnienie "czystości" spalin emitowanych przez silniki bezpośrednio do otoczenia.

Obecnie, w dobie walki o ochronę naturalnego środowiska człowieka, sprawność procesu spalania określona m.in. zawartością toksycznych składników w spalinach stała się decydującym kryterium wartości eksploatacyjnych silników trakcyjnych. W związku z tym dalsze unowocześniania silników spalinowych powinno polegać w pierwszym rzędzie na wprowadzaniu nowych paliw i systemów zasilania.

Układy zasilania i rozrządu silników samochodowych powinny zapewnić odpowiedni skład spalin w szerokim zakresie obciążeń i prędkości obrotowych. W dwusuwowym silniku samochodowym zagadnienie składu spalin nabiera decydującego znaczenia i na tej płaszczyźnie silniki te porównywane są z silnikami czterosuwowymi.

W wyniku utleniania węglowodorów w czasie procesu spalania w spalinach występuje zawsze tlenek węgla CO, węglowodory C_mH_n , związki azotu N_xO_y oraz związki ołowiu, bromu i chloru, które dodawane są do benzyn jako środki przeciwstukowe. Rysunek 1 przedstawia schematycznie zakresy występowania najmniejszych ilości toksycznych składników CO, C_mH_n oraz największych ilości N_xO_y , w zależności od współczynnika nadmiaru powietrza λ . Zaznaczono również wpływ λ na średnie ciśnienie użyteczne p_e , względnie moment obrotowy M_o .

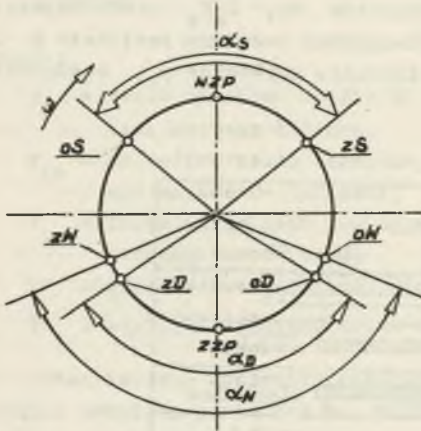


Rys. 1. Zakresy występowania składników toksycznych w spalinach w zależności od współczynnika nadmiaru powietrza λ . Wpływ tych składników na średnie ciśnienie użyteczne p_e

Zmiany w konstrukcji nowoczesnych silników samochodowych zmierzają obecnie w dwóch kierunkach: polepszenia sprawności przebiegu samego procesu spalania oraz redukcji do minimum produktów niezupełnego spalania. Ponieważ sam proces spalania wewnątrz cylindra silnika uzależniony jest od systemu zasilania, więc zmiany w tym układzie polegają na wprowadzaniu nowych rozwiązań gaźników, umożliwiających stosowanie możliwie ubogich mieszanek oraz na automatyczną regulację kąta wyprzedzenia zapłonu. Niezależnie od rozwoju konstrukcji samych gaźników coraz częściej pojawiają się silniki samochodowe z elektronicznym układem wtryskowym (tzn. z wewnętrznym wytwarzaniem mieszanki).

Na tle podanych skrótowo tendencji w rozwoju konstrukcji silników samochodowych należy rozpatrzeć problem szybkobieżnych silników dwusuwowych. Stosowane obecnie szybkobieżne dwusuwowe silniki samochodowe z zapłonem iskrowym charakteryzują się jedną wspólną cechą, a mianowicie: wykorzystana

niem skrzyni korbowej w procesie wymiany ładunku. Od sprawności napełnienia skrzyni korbowej, która w tym rozwiązaniu spełnia rolę pompy ładującej, zależy dalszy przebieg wymienionego procesu obejmującego: swobodny wypływ spalin z cylindra, przepływ wstępnie sprężonego w skrzyni korbowej czynnika do cylindra oraz wytłaczanie spalin z cylindra z udziałem czynnika roboczego. W takim rozwiązaniu istnieje złożona współzależność układów zasilania i rozrządu, względnie przebiegu fazy przygotowawczej i fazy głównej (płukania cylindrów) zachodzących w komorze roboczej silnika.



Rys. 2. Wykres symetrycznych faz wymiany ładunku w silniku dwusuwowym

W większości stosowanych rozwiązań konstrukcyjnych tłok spełnia wyłączną rolę elementu sterującego wymienionymi fazami, realizując w ten sposób rozrząd symetryczny względem punktów zwrotnych WZP, ZP. Rysunek 2 przedstawia usytuowanie charakterystycznych punktów rozrządu symetrycznego względem linii zwrotnych położenia tłoka.

Na rysunku tym oznaczają:

oW, zW – otwarcie i zamknięcie okna wylotowego

oD, zD – otwarcie i zamknięcie okna dolotowego

oS, zS – otwarcie i zamknięcie okna ssącego.

α_W – okres wylotu

α_D – okres dolotu czynnika do komory roboczej i płukania

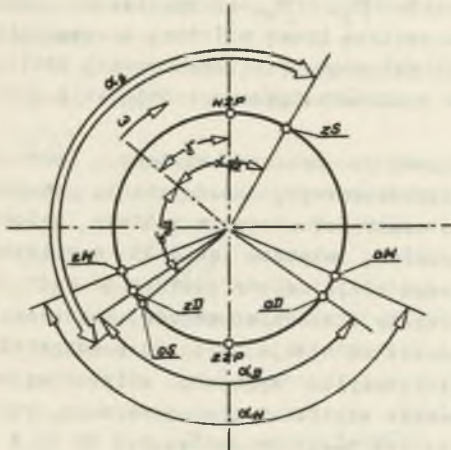
α_S – okres ssania czynnika do skrzyni korbowej.

W systemie tym szczególnie występuje niekorzystne zjawisko "ucieczki" części ładunku do układu wylotowego oraz możliwość cofania się części spalin do kanału dolotowego, co w efekcie powoduje, że silniki te odznaczają się mniejszą wartością współczynnika przechwycenia ładunku η_p . Zastosowanie rozrządu asymetrycznego umożliwia zmniejszenie intensywności cofania się ładunku przy powrotnym ruchu tłoka oraz wykorzystanie w większym stopniu efektu ładującego, wywołanego działaniem przewodu ssącego. Ma to szczególne znaczenie w zakresie pracy silnika z małymi prędkościami obrotowymi. Na rysunku 3 wielkość asymetrii określona jest kątem ϕ , tj. kątem, przy którym następuje całkowite otwarcie okna ssącego przed WZP tłoka. Rozrząd asymetryczny fazy napełniania realizowany jest przez zastosowanie dodatkowych urządzeń sterowniczych w postaci suwaków względnie przepustnic obrotowych. W opracowanych dotychczas rozwiązaniach jako element sterujący wykorzystywana jest często jedna z tarcz korbowych, co zapewnia sterowanie napływem ładunku w kierunku promieniowym lub osiowym.

Zastosowanie asymetrii fazy zasysania pozwala na korzystne powiększenie kąta α_S , tzn. na przedłużenie okresu napływu ozyńnika do skrzyni korbowej i tym samym na wzrost wartości współczynnika sprawności efektywnego

napełnienia cylindra η_{en} . Jako przykład służyć może rozwiązanie asymetrii rozrządu w silniku P 63 samochodu Trabant 601, w którym kąt $\alpha_S = 180^\circ$ przy kącie $\phi = 45^\circ$. Rozrząd asymetryczny zrealizować również można przez zastosowanie silników z podwójnymi cylindrami, tzw. dwutłokowych.

Jedną z charakterystycznych cech trakcyjnego silnika dwusuwowego jest niestabilna praca w zakresie małych obciążeń względnie biegu luzem, przy częściowo otwartej przepustnicy gaźnika. W warunkach tych, wskutek "rozcielenia" spalinami dawki paliwa, mogą występować suwy jałowe, których częstotliwość uzależniona jest od stopnia



Rys. 3. Wykres asymetrycznej fazy zasysania ładunku w silniku dwusuwowym

uwarstwienia mieszanki i usytuowania strefy palnej w stosunku do świecy zapłonowej.

Ekonomiczną pracę dwusuwowego silnika samochodowego z zapłonem iskrowym, szczególnie w zakresie obciążeń częściowych, zapewnić może wyłącznie rozrząd asymetryczny przy dużych kątach otwarć α_S i odpowiednim kącie asymetrii ϕ .

Dla zapewnienia możliwości uzyskiwania dużych przyspieszeń, dwusuwowe silniki samochodowe muszą się odznaczać dużym współczynnikiem zasysania w zakresie prędkości obrotowych biegu jałowego oraz małym zużyciem jednostkowym paliwa. Zagadnienie to jest również ważne z uwagi na zależną od obciążenia silnika emisję toksycznych składników zawartych w spalinach. Badania w tym zakresie powinny więc dotyczyć opracowania takiego rozrządu, który przy uwzględnieniu współzależności między ciśnieniem zewnętrznym i panującym w układzie: skrzynia korbowa - rura ssąca, pozwalały na regulację jakościową ładunku w czasie pracy silnika, tzn. na dostosowanie faz otwarć okien ssących do chwilowego obciążenia silnika. Jest to problem węzłowy dla szybkobieżnych silników dwusuwowych o zasilaniu gaźnikowym z "zamkniętą" skrzynią korbową. W dążeniu do rozwiązania tego zagadnienia autor opracował nowy system rozrządu asymetrycznego w układzie ssącym, pozwalający na automatyczną regulację kąta asymetrii ϕ zależnie od obciążenia silnika. W rozwiązaniu tym zastosowany został regulator osiowy płaski wbudowany w jedną z taroz wału korbowego. Zmiana kąta asymetrii, przy

niezmienionym całkowitym okresie zasysania, wpłynie korzystnie na przebieg funkcji $p_z = f(n)$, przedstawiającej zależność współczynnika zasysania ładunku od prędkości obrotowej. Wykorzystanie zmian prędkości obrotowej jako impulsu wyjściowego w proponowanym układzie regulacji przyczyni się do poprawienia wartości współczynników η_p , η_w , co praktycznie oznaczać będzie bardziej ekonomiczną i równomierną pracę silnika, szczególnie w zakresie obciążeń ozięściowych i biegu jałowego, przy równoczesnym zmniejszeniu emisji składników toksycznych w spalinach. Opisane rozwiązanie jest przedmiotem zgłoszenia patentowego.

Konsekwencją włączenia skrzyni korbowej do procesu wymiany ładunku jest konieczność stosowania olejenia mieszankowego, tzn. dodawania pewnych ilości specjalnego oleju do paliwa. Od zawartości oleju w paliwie zależy ilość wydzielanych w spalinach węglowodorów, większa aniżeli w silniku czterosuwowym. Minimalna ilość dodawanego oleju zależy głównie od rodzaju i rozwiązania konstrukcyjnego ułożyskowania elementów układu korbowego. Do olejenia silników dwusuwowych stosowane są specjalne oleje o odpowiedniej wiskozie, zawierające dodatki detergencyjne "myjące", antykorozyjne i przeciwutleniające. Nowoczesne dwusuwowe silniki samochodowe mogą bezpiecznie pracować na mieszankach o stosunku oleju do paliwa 1 : 50 do 1 : 100, tzn. przy zawartości oleju wynoszącej 2 ÷ 1%.

W porównaniu do silników czterosuwowych, olejenie mieszankowe silników dwusuwowych jest wybitnie proste. Uwzględniając w silnikach czterosuwowych tworzenie i osadzanie się osadu, straty nieuszczelnności, wentylacji skrzyni korbowej oraz konieczność okresowej wymiany oleju dochodzi się do wniosku, że faktyczne zużycie oleju w silnikach dwusuwowych jest tylko nieznacznie większe. Zużycie oleju w silnikach dwusuwowych można zmniejszyć przez zastosowanie specjalnych pomp dawkujących olej do układu ssącego, lub do łożysk układu korbowego. W rozwiązaniach tych ilość podawanego oleju uzależniona jest od prędkości obrotowej silnika i położenia przepustnicy gaźnika (konstrukcje f-my Bosch).

Analizując ogólnie tendencje rozwojowe szybkobieżnych silników samochodowych z zapłonem iskrowym na tle zagadnienia toksyczności spalin, dochodzi się do wniosku, że konwencjonalne zasilanie gaźnikowe silników musi zostać zastąpione przez o wiele droższe zasilanie wtryskowe. Odnosi się to również do silników dwusuwowych, z tym, że system wtryskiwania paliwa musi być dostosowany do przyjętego systemu płukania. Zastosowanie w silnikach dwusuwowych zasilania wtryskowego pozwala na wyłączenie skrzyni korbowej z procesu wymiany ładunku, względnie w przypadku użycia oddzielnej pompy przepłukującej wykorzystanie jej jako komory wyrównawczej.

Zasilanie wtryskowe pozwala na zautomatyzowanie układów regulacji mocy ilościowej lub jakościowej, co w konsekwencji spowoduje poprawienie parametrów pracy silnika, szczególnie w zakresie małych obciążeń, zwiększenie średniego ciśnienia użytecznego p_e i wskaźnika elastyczności silnika oraz zmniejszenie jednostkowego zużycia paliwa.

Istnieje obecnie kilka rozwiązań układów wtryskowych silników dwusuwowych. W najprostszym z nich, przy wykorzystaniu tylko pompy paliwowej, uzyskano regulację początku wtrysku i objętości dawki paliwa w zależności od parametrów pracy silnika, z uwzględnieniem wpływu ciśnienia i temperatury. Autor opracował zmodyfikowany bezstykowy elektroniczny układ wymienionego systemu regulacji.

Przy zasilaniu wtryskowym "jakość" emitowanych spalin przez silnik dwusuwowy ulegnie wyraźnej zmianie: zmniejszy się zawartość w spalinach CO i $C_m H_n$.

Na podstawie badań laboratoryjnych przeprowadzonych między innymi na trzy cylindrowym silniku dwusuwowym AWE 353 o zasilaniu gaźnikowym stwierdzono, że spaliny samochodowych silników dwusuwowych zawierają mniejsze ilości CO i $N_x O_y$, a łączna ilość tych składników toksycznych jest w odniesieniu do silników czterosuwowych około dwukrotnie wyższa.

W świetle przedstawionych skrótowo problemów należałoby zrewidować dotychczasowe opinie o dwusuwowych silnikach samochodowych z zapłonem iskrowym. Wyniki badań nad zastosowaniem sterowanego elektronicznie wtrysku paliwa lekkiego dały pozytywne rezultaty, mimo że badania te przeprowadzane były na przebudowanych silnikach gaźnikowych. Należy podkreślić, że w celu wykorzystania w pełni zalet systemu wtryskowego, muszą zostać opracowane nowe konstrukcje, uwzględniające optymalne kształty i parametry komór spalania. Obecny etap w zakresie konstrukcji silników dwusuwowych z zapłonem iskrowym należy uznać za zakończony. Nowych rozwiązań wymaga system wymiany ładunku oraz olejenia, tzn. użycia czystego powietrza jako czynnika biorącego udział w procesie usuwania produktów spalania oraz zastosowania oddzielnego układu olejenia pod ciśnieniem, podobnie jak w silnikach czterosuwowych.

Jeżeli weźmie się pod uwagę, że pojemnościowe wskaźniki mocy silników dwusuwowych będą zawsze większe w stosunku do silników czterosuwowych nawet przy obniżonych stopniach sprężania i niższych wartościach p_e , to wydaje się, że prace zmierzające do stworzenia w pełni nowoczesnego szybkobieżnego silnika dwusuwowego, są całkowicie uzasadnione i celowe.

Wynikłe ze zmniejszenia stopnia sprężania (wskutek konieczności stosowania benzyn o zmniejszonych IO) spadki mocy i wskaźników eksploatacyjnych w sposób bardziej niekorzystny wystąpią w silnikach czterosuwowych.

Dotychczasowe osiągnięcia w dziedzinie zastosowań zasilania wtryskowego nie mogą być wyłącznie zastrzeżone dla silników czterosuwowych. Twierdzenie, że dla spełnienia wymaganionych postulatów konstrukcja silników dwusuwowych stanie się niepotrzebnie skomplikowana, nie jest słuszne, zwłaszcza że silniki czterosuwowe z wtryskiem benzyny i oprogramowanym systemie sterowania elektronicznego oraz zapłonem tyrystorowym nie są tanie i nie odznaczają się prostotą konstrukcji (rozwiązania firmy Bosch).

Wykorzystując największą zaletę silnika dwusuwowego, tzn. dwukrotnie większą częstotliwość suwów ekspansji w porównaniu z silnikiem czterosuwowym, należy prowadzić dalsze badania w tej dziedzinie, tak aby szybkobieżny dwusuwowy silnik z zapłonem iskrowym, równorzędnie z silnikiem czterosuwowym, stał się powszechnym źródłem napędu pojazdów samochodowych.

LITERATURA

- [1] Bernhardt M. - Silniki samochodowe, WKŁ, Warszawa 1968 r., s. 70, 90, 149.
- [2] Bernhardt M. - Teoria silników spalinowych tłokowych, WNT, Warszawa 1963, s. 69, 80.
- [3] Dziulak T. - Elastyczność silnika spalinowego w świetle nowych wskaźników porównawczych, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Energetyka, z. 34, 1970.
- [4] Dziulak T. - Perspektywy rozwoju dwusuwowych silników samochodowych, Przegląd Techniczny nr 3, NOT Warszawa 1973.
- [5] Dziulak T. - Kryteria oceny wskaźników pracy i perspektywy rozwoju dwusuwowych szybkobieżnych silników spalinowych z zapłonem iskrowym, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Energetyka z. 46, 1973.
- [6] Dziulak T. - Możliwość zwiększenia równomierności pracy dwusuwowych samochodowych silników z zapłonem iskrowym jako środek do redukcji toksycznych składników w spalinach, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Energetyka, 1974.
- [7] KFT, Kraftfahrzeugtechnik VEB, Berlin 1972.
- [8] Kordziński Cz. - Silniki dwusuwowe z zapłonem iskrowym. WNT, Warszawa 1963, s. 25, 53, 66, 250.
- [9] Kordziński Cz. - Zwiększanie osiągnięć silników do samochodów i motocykli, WKiŁ, Warszawa 1964, s. 42, 60.
- [10] Niewiarowski K. - Tłokowe silniki spalinowe, WKiŁ, Warszawa 1968, s. 181.
- [11] Majand J. - Doładowanie tłokowych silników spalinowych, WNT, Warszawa 1963.
- [12] Werner J. - Silniki spalinowe małej i średniej mocy, WNT, Warszawa 1971.

НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ В КОНСТРУИРОВАНИИ СОВРЕМЕННЫХ
ДВУХТАКТНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ИСКРОВОМ ЗАЖИГАНИЕМ

Р е з ю м е

В работе представлены основные черты, преимущества и параметры, характеризующие двухтактные автомобильные двигатели с искровым зажиганием, связанные с проблемой токсичности выхлопных газов. Рассмотрены были тоже новые направления развития быстроходных двухтактных двигателей, особенно с применением впрыскового питания.

TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF CONSTRUCTIONS OF MODERN
TWO-STROKE CAR ENGINES WITH SPARK IGNITION

S u m m a r y

The paper discusses the fundamental characteristics, advantages and parameters of two-stroke car engines with spark ignition against the background of the problem of the toxicity of exhaust gases. Moreover, the paper deals with new trends to be observed in the development of high-speed two-stroke engines, particularly with the application of injection feeding.