

EFFECTS OF APPLICATION OF NEW COMBUSTION SYSTEM IN A COMMERCIAL SPARK IGNITION ENGINE

Abstract: The research results of a new combustion system with semi-open combustion chamber for SI engines with use of the rapid compression machine (RCM) and visualisation experimental engine (VEE) shown up that the application of this system could be resulted in shortening of the combustion time, increasing of the maximum cycle pressure and, in effect, higher combustion efficiency. The aim of the research with using a commercial spark ignition engine was to prove that the similar results (as with RCM and VEE) could be obtained at a wide range of automotive engine operating parameters. In this research modified two cylinder, four stroke air cooled SI engine, with volume displacement 650 cm³, from Fiat 126, motorcar was used. This engine was fitted with a modified cylinder heads and ignition distributor. Two types of prechamber with different shape were installed in different locations in the cylinder head but the ignition distributor enabled to keep fixed level, preadjusted, ignition advance angle at the full range of engine speed. The wide open throttle characteristics including: power, specific fuel consumption and exhaust emission versus engine speed and load characteristics including: specific fuel consumption and exhaust emission versus engine torque were determined for different ignition advance angles. The research results show that improvement of the engine characteristics can be obtained in the full range of operating parameters if the ignition advance angle is varied continuously with the variation of engine speed.

Keywords: SI engines, combustion, combustion chamber of piston engines, exhaust emission

Efekty zastosowania nowego systemu spalania w produkcyjnym silniku tłokowym o zapłonie iskrowym

Streszczenie: Wyniki badań przy zastosowaniu maszyny pojedynczego sprężu oraz badawczego silnika wizualizacyjnego, pokazują, że zastosowanie systemu z półotwartą komorą spalania może spowodować: skrócenie czasu spalania w komorze spalania, zwiększenie ciśnienia maksymalnego cyklu oraz zwiększenie sprawności spalania. Celem badań w silniku produkcyjnym było wykazanie, że takie pozytywne efekty można uzyskać również w szerokim zakresie parametrów pracy trakcyjnego silnika spalinowego. Badania prowadzono przy zastosowaniu zmodyfikowanego silnika samochodu Fiat 126p. Określono charakterystyki zewnętrzne i obciążeniowe przy różnych konfiguracjach komory spalania i różnych wartościach kąta wyprzedzenia zapłonu. Uzyskane wyniki pokazują, że dzięki zastosowaniu systemu z półotwartą komorą spalania, o właściwie dobranych parametrach systemu, można uzyskać poprawę osiągnięć silnika oraz zmniejszenie toksyczności spalin.

Słowa kluczowe: silniki spalinowe o zapłonie iskrowym, spalanie, komory spalania silników tłokowych, toksyczność spalin.

1. Wstęp

Nowe systemy spalania w produkowanych silnikach spalinowych muszą spełniać bardzo ostre wymagania legislacyjne dotyczące emisji spalin oraz bezpieczeństwa. W ostatnich latach coraz większy jest także nacisk na ustalenie limitów zużycia paliwa. Z jednej strony chodzi tu o zmniejszenie kosztów eksploatacji, co jest istotne dla użytkowników silników, ale bardziej istotny społecznie jest problem rosnącej zawartości CO₂ w powietrzu atmosferycznym oraz problem wyczerpywania się źródeł ropy naftowej. W ciągu ostatnich sześćdziesięciu lat nastąpił szczególnie duży wzrost zawartości CO₂ w powietrzu atmosferycznym; o ile w roku 1900 wynosił on 290 ppmv to w roku 1950 312ppmv, a w roku 2000 364 ppmv. Trzeba wziąć pod uwagę, że silniki spalinowe mają

w tym znaczący udział, ponieważ udział emisji silników spalinowych w ogólnej emisji CO₂ wynosi ok. 33%. Udział silników spalinowych w emisji CO₂ może w najbliższych latach rosnąć, jeśli nie ograniczy się zużycia paliwa, ponieważ bardzo intensywnie rośnie ilość samochodów w krajach o największej liczbie ludności: Indii, Chinach. Kraje te nie dysponują odpowiednio dużymi własnymi źródłami ropy naftowej i dlatego ich zaopatrzenie będzie pokrywane importem z dotychczasowych źródeł zewnętrznych. Tymczasem prognozy wskazują, że wydobycie ropy naftowej od 2012 roku będzie się zmniejszało z powodu wyeksploatowania istniejących źródeł i braku nowych, o odpowiednio wysokiej wydajności.

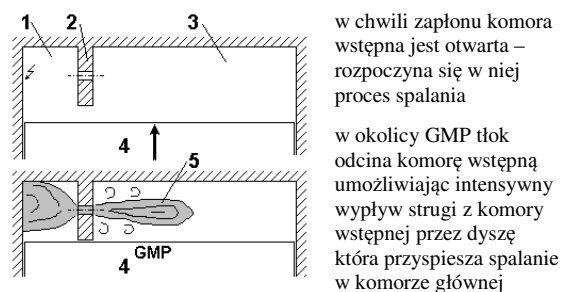
Prowadzone od początku istnienia silników spalinowych o zapłonie iskrowym (ZI) prace badawczo-rozwojowe doprowadziły do opracowania dwóch

systemów spalania z których jeden jest oparty na bezpośrednim wtrysku do komory spalania (GDI) a drugi na wtrysku do kanałów dolotowych (PFI). Te rozwiązania całkowicie opanowały systemy zasilania silników ZI. Początkowo wydawało się, że docelowym systemem dla silników ZI będzie system GDI, którego zasada pracy zmienia się w zależności od prędkości obrotowej i obciążenia silnika; w warunkach niskich obciążeń i niskich prędkości obrotowych praca na ubogiej mieszance i ładunku uwarstwionym, w warunkach wysokich obciążeń i wysokich prędkości obrotowych praca na mieszance jednorodnej, stechiometrycznej. Taki podział zakresów pracy spowodował, że układ zasilania silnika paliwem oraz system utylizacji toksycznych składników spalin stały się bardzo skomplikowane. Pomimo licznych zabiegów prowadzących do poprawy sprawności spalania nie można bowiem uzyskać na wyjściu z silnika poziomu zawartości toksycznych składników spalin wymaganego przez przepisy legislacyjne. Zastosowanie dobrze dopracowanego trójfunkcyjnego systemu utylizacji spalin (TWC) jest w przypadku silników GDI nieskuteczne, ponieważ system ten osiąga dobre efekty podczas pracy na mieszance stechiometrycznej natomiast silnik GDI w większości pracuje na zakresie niskich obciążeń, kiedy w spalinach jest dużo tlenu. Powoduje to znaczną komplikację systemu katalitycznego, co prowadzi w następstwie do zwiększenia zużycia paliwa. W efekcie system spalania GDI jest bardzo skomplikowany, drogi a jego osiągi są porównywalne z systemem PFI, który jest jednak nieco prostszy, chociaż też skomplikowany. W obecnie produkowanych silnikach ZI przeważają więc systemy PFI. Liczne prace ciągle prowadzone nad doskonaleniem systemów spalania wskazują, że nadal nie osiągnięto rozwiązania ostatecznego i należy sądzić, że takie rozwiązanie nie jest możliwe. Ciągłe będą pojawiały się nowe rozwiązania o zwiększonej sprawności i wyższych osiągnięciach chociaż często o mniej skomplikowanej budowie. Jednym z możliwych rozwiązań jest system spalania z półotwartą komorą spalania opracowany w Zakładzie Silników Lotniczych Instytutu Techniki Ciepłej Politechniki Warszawskiej. Został on wszechstronnie przebadany przy zastosowaniu licznych urządzeń badawczych takich jak: komora o stałej objętości, maszyna pojedynczego sprężu (RCM) oraz silnik wizualizacyjny. Przebadano wpływ: proporcji objętości komory wstępnej do całkowitej objętości, średnicy otworu w przegrodzie, miejsca zapłonu oraz kąta wyprzedzenia zapłonu na przebieg spalania. Wyniki badań wskazują, że możliwe jest uzyskanie istotnej poprawy sprawności spalania oraz obniżenie zawartości toksycznych składników spalin w całym zakresie pracy silnika. Badania na zmodernizowanym silniku spalinowym, w którym zastosowano nowy system spalania potwierdziły te oczekiwania. Urządzenia badawcze modelujące silnik spalinowy, na

których prowadzono badania mają bowiem pewne ograniczenia konstrukcyjne, które wynikają z konieczności uproszczenia pewnych zespołów silnikowych, aby umożliwić wizualizację procesu spalania. Wprowadzając te uproszczenia założono, że nie powinny one jednak wpływać na zniekształcenie efektów pracy silnika; obniżenie jednostkowego zużycia paliwa, zmniejszenie toksyczności spalin. W celu przeprowadzenia badań silnikowych zmodernizowano silnik samochodu Fiat 126p instalując w nim nowy system spalania. Wyniki przeprowadzonych badań wskazują, że możliwe jest uzyskanie zmniejszonego jednostkowego zużycia paliwa, zmniejszenie toksyczności spalin oraz zwiększenie mocy silnika, przy zmiennej wartości kąta wyprzedzenia zapłonu. Silnik pracował na jednorodnej, stechiometrycznej mieszance benzyna-powietrze, przy zasilaniu gaźnikowym. Sposób zasilania nie ogranicza jednak pracy systemu spalania, który jest znacznie prostszy, niż systemy GDI i PFI powszechnie obecnie stosowane w produkcyjnych silnikach ZI.

2. Zasada działania nowego systemu spalania

Zasada działania nowego systemu spalania została przedstawiona na rys. 1.



Rys.1. Zasada działania systemu spalania o półotwartej komorze wstępnej

1 – komora wstępna, 2 – przegroda z dyszą, 3 – komora główna, 4 – tłok, 5 – struga gazu

W tym systemie spalania dokonano podziału komory spalania w głowicy standardowego silnika ZI na komorę wstępną i zasadniczą wprowadzając przegrodę. W przegrodzie znajduje się jeden lub więcej otworów dyszowych. Komora wstępna ma objętość kilkakrotnie mniejszą, niż komora zasadnicza, ale jej objętość jest znacznie większa niż w znanych innych systemach spalania z komorą wstępną. Ponadto inny jest mechanizm działania komory wstępnej. Obie komory, wstępna i zasadnicza, są zasilane taką samą mieszaniną paliwo-powietrze; o

takim samym składzie chemicznym i takim samym współczynnikiem nadmiaru powietrza. Zapłon następuje w komorze wstępnej, za pomocą świecy elektrycznej. W związku z tym ciśnienie w komorze wstępnej rośnie szybciej niż w komorze zasadniczej. Kiedy różnica ciśnienia między komorą wstępną i komorą zasadniczą osiągnie odpowiednią wartość, to następuje wypływ strugi palącej się mieszaniny i produktów niezakończonych reakcji chemicznych, przez otwór w przegrodzie, z komory wstępnej do zasadniczej. Struga ta powoduje zapłon kolejnych warstw mieszaniny znajdującej się w komorze zasadniczej. Przy odpowiedniej konfiguracji parametrów badań wypływ powinien nastąpić wówczas, gdy tłok znajduje się w GMP, gdyż tylko wtedy istnieje wyraźny podział na komorę wstępną i zasadniczą (w przedziale około $\pm 10^0$ OWK w stosunku do GMP). Jeżeli zapłon nastąpi zbyt wcześnie lub zbyt późno, to wypływ może nastąpić przez szczelinę między przegrodą i denkiem tłoka, zamiast przez otwór w przegrodzie, ponieważ powierzchnia szczeliny będzie większa niż powierzchnia otworu w przegrodzie. Zwiększenie prędkości spalania osiąga się jednak tylko wówczas, kiedy następuje wypływ strugi przez otwór w przegrodzie. Wtedy struga najszybciej przemieszcza się przez całą zasadniczą komorę spalania. W badaniach przy zastosowaniu MPS, przy najbardziej korzystnym doborze parametrów systemu uzyskano: około trzykrotne skrócenie procesu spalania, najwyższe ciśnienie cyklu, najwyższą sprawność spalania. Przy innym zestawie parametrów badań efekty były mniejsze, chociaż w przypadku wszystkich pomiarów przeprowadzonych z zastosowaniem nowego systemu osiągi były lepsze, niż w przypadku standardowej komory spalania. Uzyskanie pozytywnych efektów wymaga właściwego doboru parametrów badań, a mianowicie: stosunku objętości komory wstępnej do całkowitej objętości komory spalania, jej położenia w głowicy i kształtu, średnicy otworu lub otworów i ich położenia w przegrodzie, miejsca zapłonu, kąta wyprzedzenia zapłonu. Parametry konstrukcyjne takie jak objętość i położenie komory spalania w głowicy położenie otworów w przegrodzie, miejsce zapłonu muszą być wybrane na drodze kompromisu z rozmieszczeniem innych elementów silnika i nie jest możliwe ich dowolne kształtowanie. W trakcie wszechstronnych badań silnikowych trzeba dokonać doboru: objętości komory wstępnej, średnicy otworu w przegrodzie i miejsca zapłonu a następnie do takiej konfiguracji parametrów badań, dokonać doboru kąta wyprzedzenia zapłonu. Jest to bowiem jedyny parametr, który może być zmieniany w sposób ciągły podczas pracy silnika.

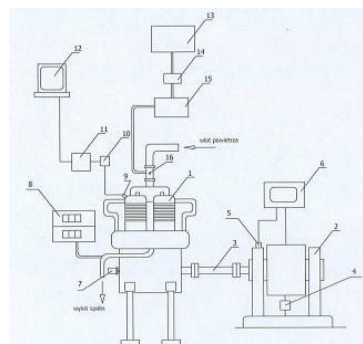
3. Stanowisko i obiekt badań

Badania przeprowadzono na silniku samochodu Fiat 126p typ 126A1.076E ze względu na prostą

budowę, małe wymiary, możliwość stosunkowo prostego wprowadzania zmian konstrukcyjnych oraz łatwość zakupu na rynku. Jest to dwucylindrowy, czterosuwowy, chłodzony powietrzem, wolnossący silnik o zapłonie iskrowym. Posiada on następujące parametry: średnica cylindra 77mm, skok tłoka 70mm, pojemność skokowa 652cm^3 , moc nominalna 17,6 kW przy prędkości obrotowej 4500 obr/min, moment obrotowy 42,5 Nm przy prędkości obrotowej 3000 obr/min. Na rys. 2 przedstawiono widok silnika na stanowisku badawczym.



Rys.2. Widok stanowiska badawczego



Rys.3. Schemat stanowiska badawczego. 1-silnik FIAT 126A, 2-hamulec elektrowirowy E90, 3-wał Kardana, 4-czujnik momentu obrotowego, 5-czujnik prędkości obrotowej, 6- sterownik hamulca, 7-przetwornik PFI, 8-analizatory spalin, 9-czujnik ciśnienia, 10-wzmacniacz 5011, 11-indyskopy 427, 12- komputer z kartą pomiarową, 13- zbiornik paliwa, 14-filtr, 15-waga do pomiaru zużycia paliwa, 16- zespół gaźnika i przepustnicy

Na rys. 3 przedstawiono schemat stanowiska badawczego. Zostało ono wyposażone w hamulec elektrowirowy typ E90 firmy Schenck z aparaturą do pomiarów momentu obrotowego i prędkości obrotowej. Hamulec został połączony wałem Kardana z silnikiem. Pomiar zużycia paliwa prowadzono metodą wagową za pomocą aparatury firmy Pierburg, z komputerową akwizycją wyników pomiarów. W układzie zasilania powietrzem umieszczono zbiornik wyrównawczy oraz lemniskatę do pomiarów ilości zasysanego powietrza. W układzie wydechowym zainstalowano sondę do poboru pró-

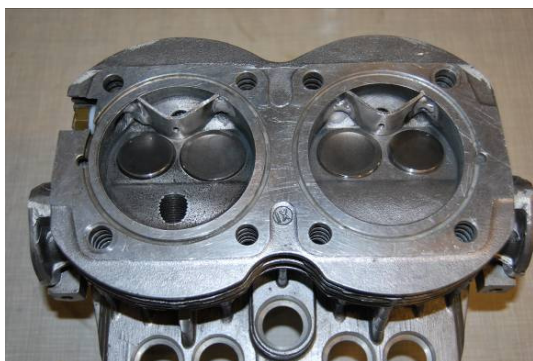
bek spalin. Pomiarów toksyczności spalin dokonywano za pomocą aparatury firmy Arcon-Olivier, typ K4500, w zakresie CO, HC, NO_x oraz dodatkowo analizator firmy Rosemount-Beckman, typ 951, w zakresie NO_x.

Badania silnikowe przeprowadzono przy zastosowaniu dwóch głowic, które różniły się kształtem i lokalizacją wstępnych komór spalania oraz miejscem zapłonu. Objętość komory wstępnej wynosiła około 30% całkowitej objętości komory spalania. W wyniku wprowadzenia komory wstępnej nieznacznie zwiększyła się całkowita objętość komory spalania, co spowodowało zmniejszenie stopnia sprężania od wartości 8 do 7,5. Na rys. 4 przedstawiono widok głowicy nr 1 z komorą wstępną cylindryczną, która została umieszczona między zaworem dolotowym i zaworem wydechowym po stronie popychaczy rozrządu i po stronie przeciwnej do świecy zapłonowej w standardowej głowicy.



Rys.4. Widok głowicy z cylindryczną komorą wstępną nr.1

W związku z tym konieczne było wykonanie nowego otworu na świecę, co przysporzyło określonych trudności technicznych, ponieważ w tym miejscu jest dość cienka ścianka głowicy i ozebrowanie. Konieczne było wykonanie specjalnego systemu uszczelnienia świecy zapłonowej.



Rys.5. Widok głowicy z komorą wstępną nr.2

Na rys. 5 przedstawiono widok głowicy nr 2, jak widać komora ma kształt zbliżony do trójkątnego. Umieszczono ją w pobliżu świecy zapłonowej w standardowej głowicy. Dzięki temu nie trzeba było wykonywać nowego otworu dla świecy zapłonowej.

Na rys. 6 przedstawiono widok zmodernizowanego aparatu zapłonowego w którym możliwe było ustalenie stałej wartości kąta wyprzedzenia zapłonu dla całego zakresu prędkości obrotowych. W aparacie zapłonowym standardowego silnika kąt wyprzedzenia zapłonu zmieniał się wraz z prędkością obrotową silnika.



Rys.6. Widok zmodernizowanego aparatu zapłonowego

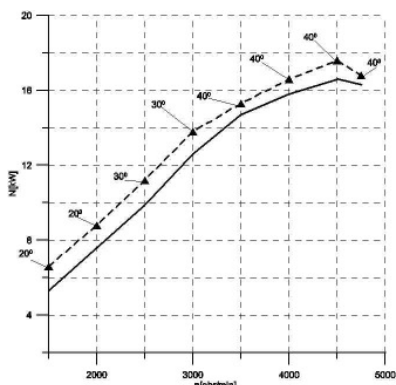
Badania miały charakter porównawczy. W trakcie badań silnikowych określono charakterystyki zewnętrzne (moment obrotowy, moc, zużycie paliwa, toksyczność spalin w funkcji prędkości obrotowej, przy pełnym otwarciu przepustnicy) oraz charakterystyki obciążeniowe (zużycie paliwa, toksyczność spalin w funkcji momentu obrotowego silnika) kolejno dla konfiguracji standardowej, dla silnika wyposażonego w głowicę nr 1 i dla silnika wyposażonego w głowicę nr 2, dla różnych wartości kąta wyprzedzenia zapłonu. Charakterystyki zewnętrzne określano w zakresie prędkości obrotowych od 1500 obr/min do 4750 obr/min, co 500 obr/min. Charakterystyki obciążeniowe określono przy prędkościach obrotowych 2000 obr/min, 3000 obr/min, 4000 obr/min. Przyjęcie punktów pomiarowych wynikało stąd, że chciano zapewnić możliwość porównania wyników badań przy zastosowaniu różnych elementów silnikowych. Przeprowadzono badania przy zasilaniu silnika mieszanką stechiometryczną a następnie przy zasilaniu ubogą mieszanką o współczynniku nadmiaru powietrza $\lambda \approx 1,1$.

4. Wyniki badań

W badaniach silnikowych, które miały charakter badań porównawczych, okazało się, że przy różnych wartościach kąta wyprzedzenia zapłonu uzyskuje się pozytywne efekty w zakresie różnych prędkości obrotowych silnika. Okazało się, że wykreślone na podstawie badań charakterystyki silnika były znacznie korzystniejsze przy zastosowaniu głowicy nr 1 niż głowicy nr 2. Dlatego też szersze badania wykonano przy zastosowaniu silnika z głowicą nr 1, zwłaszcza, że przegroda w głowicy nr 2 szybko i permanentnie ulegała przepaleniu. Po jej naprawie dalsze badania można było prowadzić przez równie krótki okres czasu. W związku z tym

większość wyników badań została uzyskana w badaniach przy zastosowaniu głowicy nr 1, w tym także badania przy zasilaniu ubogą mieszanką. Ze względu jednak na to, że te ostatnie wyniki były mniej korzystne niż silnika zasilanego mieszanką stechiometryczną, to tutaj zaprezentowano tylko wyniki badań uzyskane przy zasilaniu mieszanką stechiometryczną.

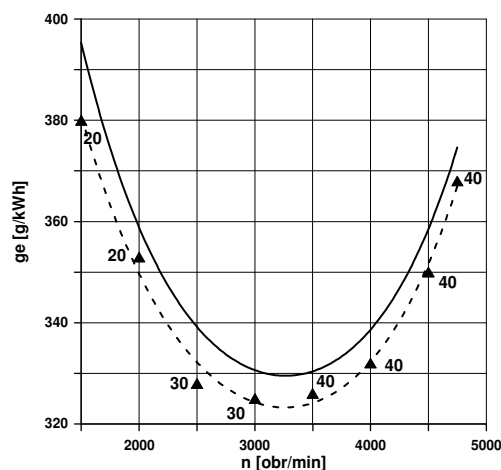
Na rys. 7 porównano przebieg mocy w funkcji prędkości obrotowej silnika standardowego oraz silnika z komorą wstępną nr 1 przy pełnym otwarciu przepustnicy.



Rys.7. Porównanie mocy silnika standardowego z maksymalnymi wartościami mocy silnika z komorą nr. 1 uzyskanymi przy różnych wartościach kąta wyprzedzenia zapłonu

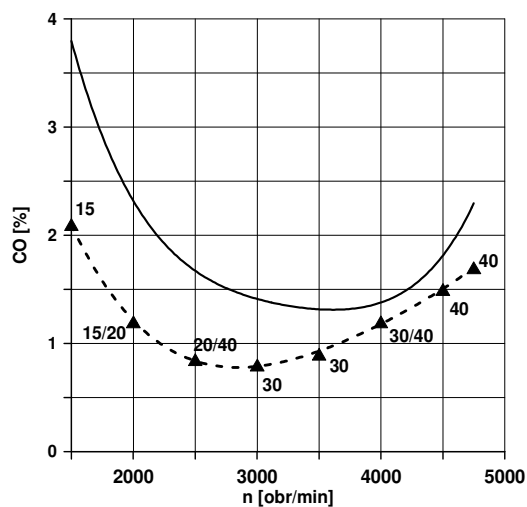
Charakterystyka silnika standardowego została przedstawiona w postaci ciągłej, natomiast punktami oznaczono wartości najkorzystniejsze, uzyskane na charakterystykach silnika z komorą spalania nr 1, przy różnych wartościach kąta wyprzedzenia zapłonu, które zostały podane w tych punktach. Łatwo można zauważyć, że można uzyskać poprawę osiągnięć w całym zakresie prędkości obrotowych silnika, jeżeli wraz z ze zmianą prędkości obrotowej będzie realizowana zmiana kąta wyprzedzenia zapłonu.

Na rys. 8 umieszczono charakterystyki jednostkowego zużycia paliwa. Jednostkowe zużycie paliwa silnika standardowego przedstawiono linią ciągłą a przerywaną silnika z nowym systemem spalania. Punktami oznaczono najlepsze rezultaty wraz z wartością kąta wyprzedzenia zapłonu przy jakim je osiągnięto. Szczupłość miejsca nie pozwala zamieścić pełnych charakterystyk na których można odczytać zakresy wartości najkorzystniejszych przy określonych wartościach kąta wyprzedzenia zapłonu. Jeżeli więc zmiany kąta wyprzedzenia zapłonu będą następowały w sposób ciągły, to pozytywne efekty zostaną uzyskane w całym zakresie prędkości obrotowych.



Rys.8. Charakterystyka jednostkowego zużycia paliwa dla komory nr 1

Na rys. 9 przedstawiono przebieg charakterystyk emisji tlenku węgla, uzyskanych w warunkach badań charakterystyki zewnętrznej, przy różnych wartościach kąta wyprzedzenia zapłonu. Podobnie jak w przypadku mocy i jednostkowego zużycia paliwa linią ciągłą zaznaczono charakterystykę silnika standardowego a punktami najkorzystniejsze wartości w danym punkcie pomiarowym z podaną wartością kąta wyprzedzenia zapłonu. Efekty w danym zakresie prędkości obrotowych były zależne od wartości kąta wyprzedzenia zapłonu.

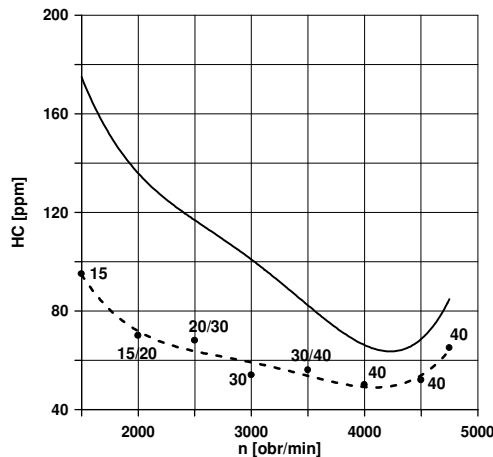


Rys.9. Charakterystyki emisji CO w warunkach charakterystyki zewnętrznej dla komory wstępnej nr 1

W zakresie mniejszych wartości kąta wyprzedzenia zapłonu korzystniejsze efekty uzyskiwano przy mniejszych wartościach prędkości obrotowych. Wraz ze wzrostem prędkości obrotowej korzystniejsze efekty uzyskiwano dla rosnącej wartości kąta wyprzedzenia zapłonu. Przy tym stwierdzono, że zwiększanie wartości kąta wyprzedzenia zapłonu powyżej 45° OWK, przy prędkościach obrotowych zbliżonych do nominalnych, nie dawało już pozytywnych efektów. Na wykresie można zauważyć,

że przy zastosowaniu nowego systemu spalania uzyskiwano poprawę, czyli zmniejszenie emisji CO w całym zakresie prędkości obrotowych.

Na rys. 10 przedstawiono przebieg charakterystyk emisji węglowodorów w funkcji prędkości obrotowej silnika, uzyskany w warunkach charakterystyki zewnętrznej, przy różnych wartościach kąta wyprzedzenia zapłonu.



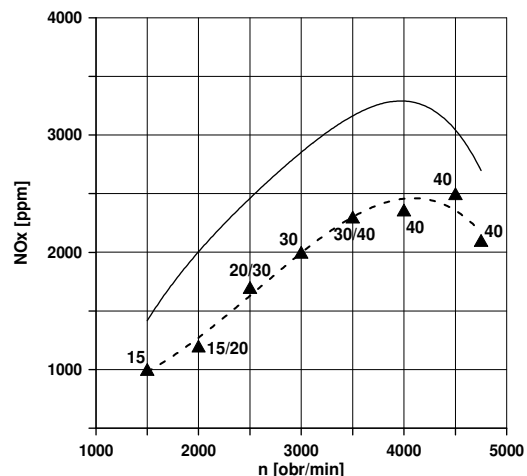
Rys.10. Charakterystyki emisji HC, w warunkach charakterystyki zewnętrznej, dla komory wstępnej nr 1

Linia ciągłą zaznaczono charakterystykę emisji HC dla silnika standardowego a punktami oznaczono najkorzystniejsze wartości dla silnika z nowym systemem spalania oraz wartości kąta wyprzedzenia zapłonu jakim je uzyskano.

Na wykresach widać, że największe zmniejszenie emisji uzyskano w zakresie mniejszych prędkości obrotowych; w tym zakresie emisja HC silnika standardowego była też niska, a więc efekty względne nie są zbyt wysokie. Analiza wyników pokazuje że silnik wyraźnie reaguje na niewłaściwy dobór kąta wyprzedzenia zapłonu przy danej prędkości obrotowej, co objawia się szybkim wzrostem emisji HC. Takiej wyraźnej reakcji nie obserwowano w odniesieniu do emisji CO, gdzie charakterystyki emisji były bardziej płaskie. Efekty właściwego doboru kąta wyprzedzenia zapłonu były wyczuwalne w pracy silnika, gdyż w przypadku niewłaściwego doboru wartości kąta wyprzedzenia zapłonu silnik zaczynał pracować niestabilnie, tzn. występowały dość duże wahania prędkości obrotowej lub obciążenia silnika (w zależności od stosowanej opcji pracy na hamowni). Wyniki badań pokazują, że możliwe jest uzyskanie pozytywnych efektów w postaci obniżenia emisji HC w całym zakresie prędkości obrotowych silnika, jeśli będzie zmieniany kąt wyprzedzenia zapłonu. Można także zauważyć, że przebieg emisji HC jest najlepszym wskaźnikiem tego czy dobrze został wybrany kąt wyprzedzenia zapłonu; lepszym niż inne osiągi silnika. Silnik bowiem najbardziej wyraźnie reaguje na

emisje HC w przypadku niewłaściwego doboru kąta wyprzedzenia zapłonu.

Na rys. 11 przedstawiono przebieg charakterystyk emisji tlenków azotu w funkcji prędkości obrotowej silnika, przy pełnym otwarciu przepustnicy, przy różnych wartościach kąta wyprzedzenia zapłonu. Linia ciągłą zaznaczono charakterystykę emisji NO_x dla silnika standardowego a punktami oznaczono wartości dla silnika z nowym systemem spalania, przy najkorzystniejszej emisji HC, gdyż przy najniższych wartościach NO_x silnik pracował niestabilnie, oraz wartości kąta wyprzedzenia zapłonu przy jakich je uzyskano. Można było uzyskać zmniejszenie emisji NO_x praktycznie w całym zakresie prędkości obrotowych silnika, przy ciągłej zmianie kąta wyprzedzenia zapłonu. Zmniejszenie emisji NO_x było największe w zakresie wysokich prędkości obrotowych, co wskazywałoby na decydującą rolę czasu spalania, który był krótszy niż w silniku standardowym, gdyż temperatura spalin silnika z komorą badawczą była podobna jak temperatura spalin silnika standardowego.



Rys.11. Charakterystyki emisji NO_x, w warunkach charakterystyki zewnętrznej, dla komory wstępnej nr 1.

Wyniki badań silnika z nowym systemem spalania pokazują, że dla określonych wartości kąta wyprzedzenia zapłonu występuje wyraźny zakres pozytywnych efektów, zarówno jeżeli chodzi o moc, jednostkowe zużycie paliwa, jak i toksyczność spalin (CO, HC, NO_x). Wyniki badań wskazują, że możliwe jest uzyskanie tych pozytywnych efektów, jeżeli wraz ze zmianą prędkości obrotowej będzie następowała zmiana wartości kąta wyprzedzenia zapłonu. Przy małych wartościach prędkości obrotowych uzyskiwano korzystne efekty przy małych wartościach kąta wyprzedzenia zapłonu; wówczas silnik pracował stabilnie, co znajdowało wyrażne odzwierciedlenie w emisji HC. Wraz ze wzrostem prędkości obrotowych konieczne było zwiększanie kąta wyprzedzenia zapłonu, gdyż w przeciwnym przypadku silnik wchodził w zakres niestabilnej

pracy, czego efektem był wzrost emisji HC, a także w duże wahania prędkości obrotowej przy ustalonej pracy silnika. Dlatego też przy małych wartościach kąta wyprzedzenia zapłonu nie prowadzono badań w odniesieniu do wysokich prędkości obrotowych i kończono je przy 4000 obr/min. W przypadku wysokich wartości kąta wyprzedzenia zapłonu nie prowadzono badań w zakresie niskich prędkości obrotowych i kończono je przy prędkości 2000 obr/min.

5. Wnioski

1. Wyniki badań silnika produkcyjnego z systemem spalania o dzielonej komorze spalania wskazują, że przy odpowiednim doborze systemu spalania (proporcja objętości komory wstępnej do całkowitej, średnica otworu w przegrodzie, miejsce zapłonu, kąt wyprzedzenia zapłonu) można uzyskać poprawę osiągnięć silnika, w stosunku do silnika standardowego w odniesieniu do: mocy, jednostkowego zużycia paliwa oraz toksyczności spalin.
2. Aby uzyskać poprawę osiągnięć silnika z dzieloną komorą spalania, w całym zakresie parametrów pracy, konieczne jest sterowanie zmianą kąta wyprzedzenia zapłonu w funkcji prędkości obrotowej silnika, przy czym wraz ze wzrostem prędkości obrotowej silnika powinna rosnąć wartość kąta wyprzedzenia zapłonu.
3. Wyznaczenie zmian wartości kąta wyprzedzenia zapłonu wymaga pracochłonnych, długotrwałych badań eksperymentalnych na silniku, w celu wyznaczenia mapy charakterystyk.
4. Przy prawidłowym doborze wartości kąta wyprzedzenia zapłonu, dla określonej konfiguracji pozostałych parametrów systemu spalania, uzyskuje się pozytywne efekty, zarówno w zakresie osiągnięć silnika (moc, jednostkowe zużycie paliwa), jak i toksyczności spalin (CO , HC , NO_x).
5. Nowy system spalania jest czuły na zmiany wartości kąta wyprzedzenia zapłonu, w stosunku do wartości optymalnej, co zostało ujawnione w badaniach mechanizmu spalania przy zastosowaniu maszyny pojedynczego sprężu i potwierdzone w badaniach silnikowych; nie można uzyskać korzystniejszych efektów w zakresie osiągnięć zwiększając toksyczność spalin i uzyskać zmniejszenie toksyczności spalin kosztem

osiągnięć, co wynika z mechanizmu działania systemu.

6. W przypadku niskich wartości kąta wyprzedzenia zapłonu korzystne rezultaty uzyskiwano przy małych prędkościach obrotowych natomiast niekorzystne rezultaty występowały przy wysokich wartościach prędkości obrotowych, objawiające się przede wszystkim brakiem stabilności obrotów silnika i wysoką emisją węglowodorów.
7. W przypadku wysokich wartości kąta wyprzedzenia zapłonu korzystne rezultaty uzyskiwano przy wysokich wartościach prędkości obrotowych, natomiast silnik pracował niestabilnie w zakresie niskich prędkości obrotowych, co znajdowało odbicie w dużych wahańach obrotów i szybkim wzroście emisji węglowodorów.
8. Porównanie wyników badań na hamowni silnikowej, z wynikami badań wizualizacyjnych przy zastosowaniu maszyny pojedynczego sprężu, wskazuje, że najbardziej korzystne efekty uzyskuje się wówczas, kiedy wypływ strugi palącej się mieszanki i rodników, z komory wstępnej do zasadniczej, następuje wówczas, kiedy tłok znajduje się w położeniu GMP; zarówno więc wartości kąta wyprzedzenia zapłonu zbyt małe, jak i zbyt duże, są niekorzystne co znajduje odbicie w osiągnięciach silnika.
9. Badania silnikowe pokazały, że pozytywne efekty w badaniach silnika z nowym systemem spalania, występowały przy wyższych wartościach kąta wyprzedzenia zapłonu niż w przypadku silnika standardowego, co najprawdopodobniej jest spowodowane koniecznością zapewnienia odpowiedniego czasu dla spalania w komorze wstępnej.
10. Również większe wartości kąta wyprzedzenia zapłonu należało stosować w przypadku zasilania silnika ubogą mieszanką, niż mieszanką stechiometryczną, co można wiązać z mniejszą prędkością spalania ubogiej mieszanki.
11. W wyniku badań na silniku produkcyjnym znalazły potwierdzenie wyniki badań uzyskane przy zastosowaniu maszyny pojedynczego sprężu i silnika wizualizacyjnego, które wskazywały na możliwość uzyskania pozytywnych efektów, w postaci zwiększenia osiągnięć silnika oraz zmniejszenia toksyczności spalin poprzez zastosowanie nowego systemu spalania.

Bibliography/Literatura

1. Leżański T. *Badania silnika o zapłonie iskrowym wyposażonego w nowy system spalania z półotwartą komorą spalania*. Sprawozdanie merytoryczne z realizacji projektu badawczego Nr 4T12D 029 30, Warszawa 2009

2. Leżański T., Sęczyk J., Wolański P. *Influence of ignition advance angle on combustion in internal combustion spark ignition engines with semi open combustion chamber* . ., Combustion Engines-Silniki Spalinowe. No PTNSS-2009-SC-169, 2009

3. Leżański T., Rychter T., Teodorczyk A.: *Pre-chamber Combustion System Studies Using Rapid Compression Machine*. Journal of KONES. International Combustion Engines. Vol.7, o 1-2. Warsaw-Lublin 2000

4. Glinka W, Leżański T. Wolański P. *Zastosowanie fotografii szybkiej do badań spalania w silni-*

mgr inż. Tomasz Leżański – Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej.

Prof. dr hab. Piotr Wolański .profesor na Wydziale Mechanicznym Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej

kach SI z półotwartą komorą wstępną. Journal of KONES. Internal Combustion Engines, Vol.14,2007

5. Heywood J.B: *Internal Combustion Engine Fundamentals*. McGraw-Hill, New York, 1988 .

mgr inż. Janusz Sęczyk – Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej