

Artur JAWORSKI
Politechnika Rzeszowska

WPŁYW POCZĄTKU WTRYSKU CIEKŁEGO LPG NA PROCES SPALANIA SILNIKA O ZI

W artykule przedstawiono wybrane wyniki dotyczące badań wpływu parametrów wtrysku sekwencyjnego ciekłego LPG na przebieg średniego ciśnienia w cylindrze silnika, w fazie procesu spalania. Do parametrów wtrysku paliwa, które mają bardzo istotny wpływ na tworzenie mieszanki, jej rozkład w cylindrze oraz proces spalania, należy kąt początku wtrysku. Badania realizowano dla wtrysku sekwencyjnego pojedynczego oraz podwójnego. Prezentowane wyniki wykazują, że rola kąta początku wtrysku jest tym większa, im mniejsze jest obciążenie silnika.

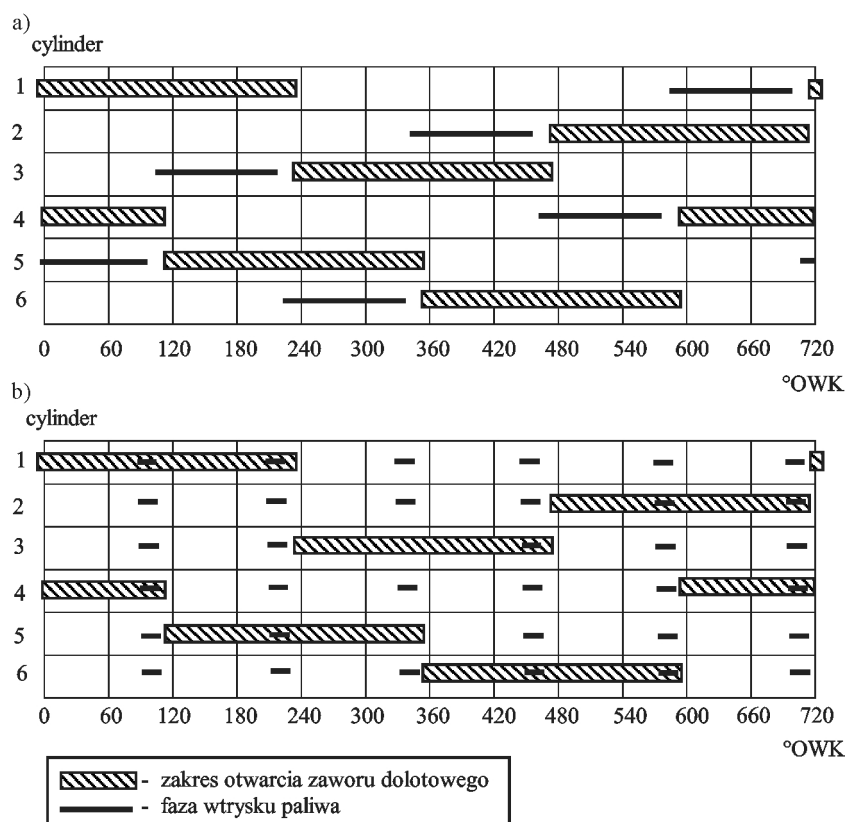
Wykaz oznaczeń i skrótów

- LPG** – skroplona mieszanina propanu-butanu,
GMP – górne zwrotne położenie tłoka w suwie napełniania,
GMP* – górne zwrotne położenie tłoka w suwie sprężania,
n – prędkość obrotowa wału korbowego, obr./min,
 p_c – ciśnienie w cylindrze, MPa,
TPD* – kąt obrotu wału korbowego odpowiadający czasowi wtrysku dawki pilotującej, °OWK,
TPD – czas wtrysku dawki pilotującej, ms.

1. Wprowadzenie

Podczas analizy danych dotyczących wyników uzyskiwanych parametrów użytkowych przy zasilaniu benzyną w relacji do zastosowanego systemu wtrysku okazało się, że w przypadku wtrysku pośredniego benzyny wtrysk sekwencyjny jest znacznie korzystniejszy od wtrysku symultanicznego [1]. W systemach z wtryskiem sekwencyjnym paliwo jest podawane do każdego cylindra podczas jednego wtrysku realizowanego w określonej fazie (rys. 1a). Przy zasilaniu w systemie wtrysku symultanicznego (rys. 1b) paliwo jest podawane jednocześnie do wszystkich cylindrów w tej samej chwili (dawka paliwa na cykl jest sumą wtryskiwanych dawek). Silnik pracujący pod obciążeniem przy wtry-

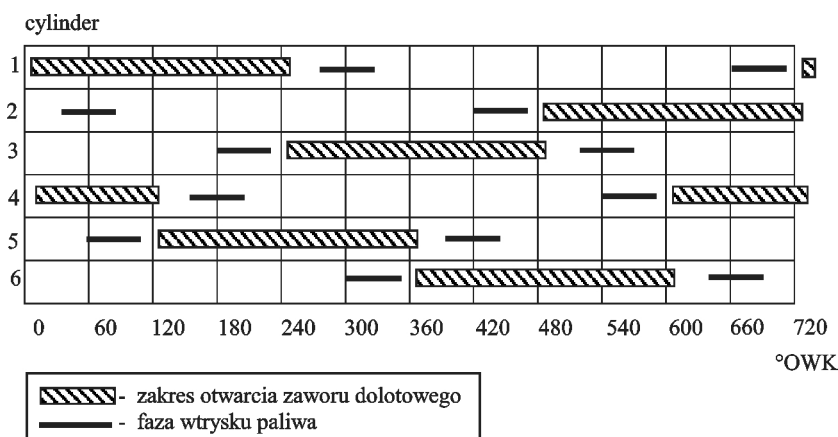
sku sekwencyjnym, w porównaniu z zasilaniem z wtryskiem symultanicznym, charakteryzuje się zmniejszonym zużyciem paliwa i mniejszą zawartością składników szkodliwych w spalinach [1, 2].



Rys. 1. Fazy wtrysku wielopunktowego silnika sześciocylindrowego: a) w systemie sekwencyjnym, b) w systemie symultanicznym

Systemy z wielopunktowym wtryskiem paliwa różnią się miejscem podawania paliwa (układy z wtryskiem LPG do przewodu dolotowego, układy z wtryskiem LPG przed zawór dolotowy (do kanału dolotowego), układy z wtryskiem LPG bezpośrednio do cylindra) oraz czasem jego podawania. Spotykane są rozwiązania działające w systemie wtrysku sekwencyjnego oraz wtrysku symultanicznego (jednoczesnego), [3, 4]. Wyróżnia się wtrysk synchroniczny, w którym paliwo jest podawane do kolektora w fazie otwarcia zaworu dolotowego, oraz wtrysk asynchroniczny, realizowany w okresie zamknięcia zaworu dolotowego.

Poprawę parametrów pracy silnika można osiągnąć poprzez zastosowanie dwukrotnego sekwencyjnego wtrysku paliwa, którego schemat przedstawia rys. 2. Podział wtrysku paliwa na dwie części umożliwia dopasowanie początku wtrysku do wymagań, które są stawiane silnikowi w warunkach zmieniających się obciążeń, prędkości obrotowych i stanu cieplnego. Istotnym parametrem jest tutaj kąt początku wtrysku poszczególnych dawek paliwa.



Rys. 2. Schemat dwukrotnego sekwencyjnego wtrysku paliwa

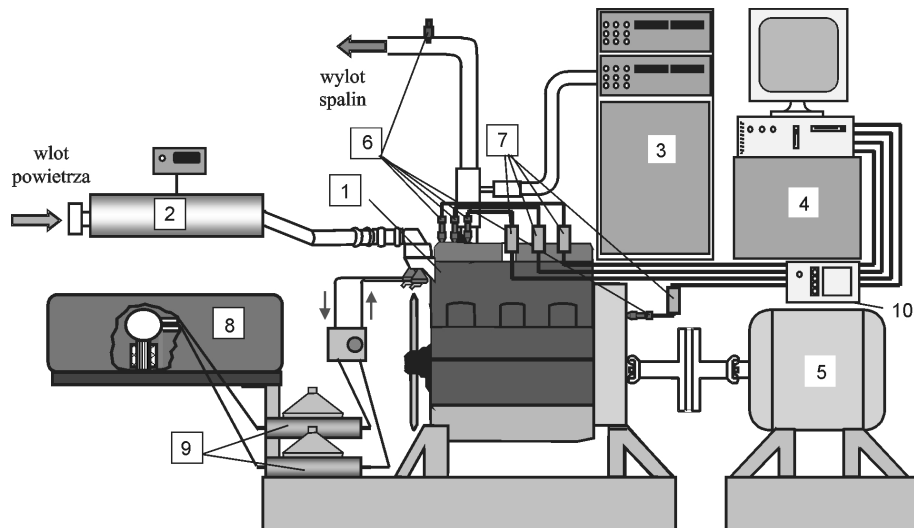
2. Opis badań

Badania przeprowadzono w Laboratorium Silników Spalinowych Zakładu Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych Politechniki Rzeszowskiej na stanowisku przedstawionym na rys. 3. Obiektem wykorzystywanym do badań był sześciocyłindrowy turbodoładowany silnik z zapłonem iskrowym typu MD-111ET, z turbosprężarką Čz K36. Silnik ten jest zmodyfikowaną konstrukcją silnika wysokoprężnego typu MD-111E.1 produkcji Wytwórni Silników Wyso-
koprężnych „PZL-Mielec”. Badania eksperymentalne realizowano pod kątem analizy zależności pomiędzy parametrami wtrysku sekwencyjnego ciekłej mieszaniny propanu i butanu a wskaźnikami pracy silnika [5].

Podstawowymi parametrami, które podlegały rejestracji, były m.in.:

- natężenie przepływu zasysanego powietrza,
- zużycie paliwa,
- czas sygnału wtrysku sterownika nadrzędnego sterującego wtryskiem,
- czas sygnału wtrysku sterownika LPG,
- prędkość obrotowa i położenie wału korbowego,

- parametry determinujące przebieg wtrysku paliwa: ciśnienie wtrysku, początek wtrysku, temperatura paliwa, gęstość paliwa,
- wznios zaworu dolotowego i wydechowego,
- temperatura otoczenia, cieczy chłodzącej, spalin,
- stężenie węglowodorów HC, tlenku węgla CO, tlenków azotu NO_x w spalinach,
- przebieg ciśnienia w komorze spalania 1 i 6 cylindra.



Rys. 3. Schemat stanowiska badawczego: 1 – silnik, 2 – system pomiaru masowego natężenia przepływu powietrza, 3 – analizatory spalin, 4 – komputer sterujący z kartą rejestrującą, 5 – hamulec, 6 – czujniki pomiarowe wielkości szybkozmiennych, 7 – wzmacniacze pomiarowe, 8 – zbiornik LPG, 9 – przepływomierz paliwa, 10 – separator sygnału

Do sterowania procesem wtrysku paliwa zastosowano moduł sterujący DTE_GAZ opracowany przez firmę Delta Tech-Electronics. Moduł wykorzystuje sygnały fazy pracy silnika, które są generowane przez system złożony z tarczy sygnałowej (wykorzystano tarczę stosowaną w układzie zapłonowym) oraz czujnika indukcyjnego.

Sterowanie początkiem wtrysku było związane z ograniczeniem kątowym wynikającym z właściwości sterownika wtrysku DTE_GAZ. Suma zadanego kąta (kątów) wtrysku oraz kąta (kątów) opóźnienia wtrysku nie mogła przekraczać 360° OWK. Zmiana zakresu możliwości regulacji początku wtrysku względem otwarcia zaworu dolotowego jest możliwa poprzez zmianę położenia czujnika tarczy sygnałowej.

Kąt obrotu wału korbowego odpowiadający czasowi wtrysku dawki pilotującej wyraża zależność:

$$\text{TPD}^* = \frac{\text{TPD} \cdot 6 \cdot n}{1000} \quad (1)$$

gdzie: TPD^* – kąt obrotu wału korbowego odpowiadający czasowi wtrysku dawki pilotującej, °OWK,

TPD – czas wtrysku dawki pilotującej, ms,

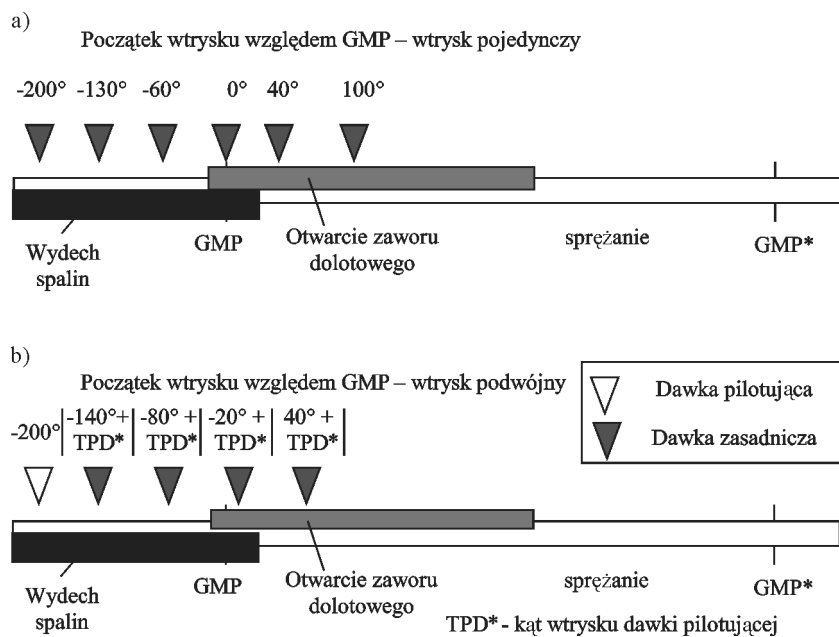
n – prędkość obrotowa silnika, obr./min.

Badania realizowano dla dwóch ustawień czujnika sygnału położenia tarczy sygnałowej (rys. 4. i 5.). W pierwszym przypadku początek wtrysku był realizowany względem GMP w suwie napełniania, w punktach: -200° , -130° , -60° , 0° , 40° , 100° . Wartość kąta 100° była realizowana przy najniższej dawce paliwa. Wraz ze wzrostem dawki utrzymanie tego kąta nie było możliwe z uwagi na wspomniane ograniczenia sterownika wtrysku. Dla każdego punktu pomiarowego, w przypadku wtrysku podwójnego, dokonywano zmian początku wtrysku dawki zasadniczej 4-krotnie, przy stałym początku wtrysku dawki pilotującej 200° przed GMP w suwie napełniania. Początek wtrysku dawki zasadniczej względem GMP w suwie ssania, w przypadku wtrysku podwójnego, wynosił: $-140 + \text{TPD}^*$ (kąt obrotu wału korbowego odpowiadający czasowi wtrysku dawki pilotującej), $-80 + \text{TPD}^*$, $-20 + \text{TPD}^*$, $40 + \text{TPD}^*$.

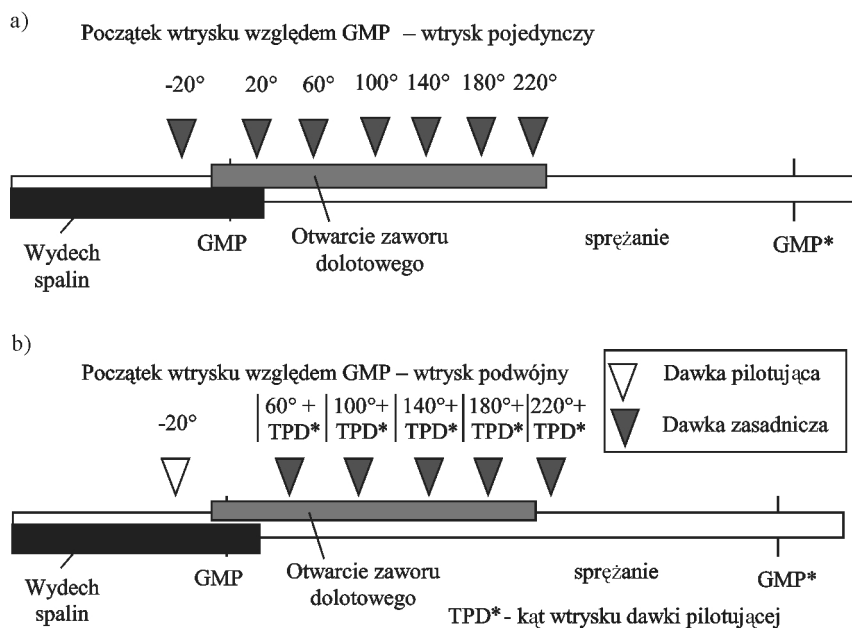
Przypadek pierwszego ustawienia czujnika umożliwił analizę wpływu początku wtrysku realizowanego przed otwarciem zaworu dolotowego oraz w zakresie jego początkowego otwarcia na parametry silnika.

Dla drugiego ustawienia czujnika położenia tarczy sygnałowej początek wtrysku przy wtrysku pojedynczym wynosił: -20° , 20° , 60° , 100° , 140° , 180° , 220° . W przypadku wtrysku podwójnego początek wtrysku pilotującego był stały i wynosił -20° , natomiast zasadniczego wynosił: $60^\circ + \text{TPD}^*$, $100^\circ + \text{TPD}^*$, $140^\circ + \text{TPD}^*$, $180^\circ + \text{TPD}^*$, $220^\circ + \text{TPD}^*$. Wartość kąta 220° była realizowana przy najniższej dawce paliwa, z uwagi na ograniczenia sterownika. W tym przypadku celem była realizacja początków wtrysku w całym zakresie otwarcia zaworu dolotowego.

Do pomiaru przebiegu ciśnienia w cylindrach zastosowano czujnik piezokwarcowy firmy AVL typu GU13X (o zakresie pomiarowym 20 MPa i czułości ok. 15 pC/bar), czujnik piezokwarcowy AVL typu QP500ca (o zakresie pomiarowym 15 MPa i czułości ok. 12 pC/bar) oraz wzmacniacze ładunku AVL 3057-A01 o regulowanej za pomocą potencjometru cyfrowego czułości (1,0÷99,99 pC/bar), co umożliwia dostrojenie wzmacniaczy do czułości czujnika piezokwarcowego (czujnik GU13X zamontowano w specjalnym adapterze świecy zapłonowej typu ZC-32 firmy AVL, natomiast czujnik QP500ca zamontowano w adapterze wprowadzonym do wykonanego w głowicy otworu technologicznego).



Rys. 4. Testowane początki wtrysku przy pierwszym ustawieniu czujnika położenia tarczy sygnałowej: a) przy wtrysku pojedynczym, b) przy wtrysku podwójnym

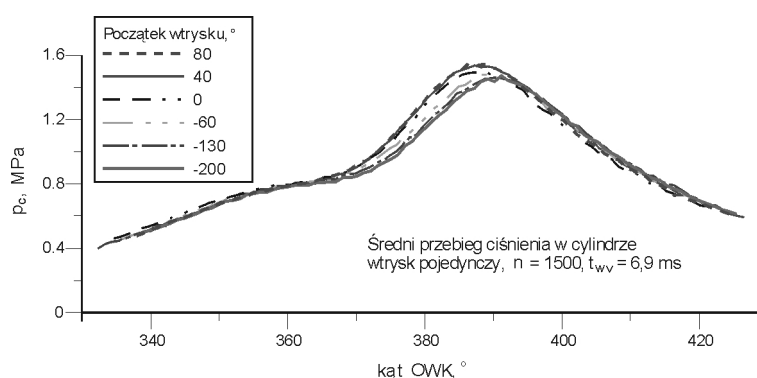


Rys. 5. Testowane początki wtrysku przy drugim ustawieniu czujnika położenia tarczy sygnałowej: a) przy wtrysku pojedynczym, b) przy wtrysku podwójnym

Przebiegi czasowe ciśnienia spalania (wielkości szybkozmiennych) rejestrowano za pomocą komputerowego systemu pomiarowego z kartą pomiarową National Instruments AT-MIO-16E-1 oraz torami pomiarowymi firmy AVL. Parametry rejestracji dobierano w ten sposób, aby zarejestrować 10 pełnych cykli pracy silnika z dokładnością kątową odpowiadającą 1° obrotu wału korbowego silnika (7200 próbek na jeden kanał). Za końcowy wynik pomiaru przebiegów czasowych przyjmowano przebieg jednego pełnego cyklu, będącego średnią z 10 cykli. Uśrednienie przebiegów uzyskano, wykorzystując program komputerowy autorstwa pracowników Zakładu Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych Politechniki Rzeszowskiej [6]. Schemat stanowiska badawczego ilustruje rys. 3. Badania realizowano dla początków wtrysku paliwa, w zakresach przedstawionych na rys. 4. i 5. Wartość kąta 100° była realizowana przy najniższej dawce paliwa. Ze wzrostem dawki utrzymanie tego kąta nie było możliwe z uwagi na ograniczenia sterownika wtrysku [5].

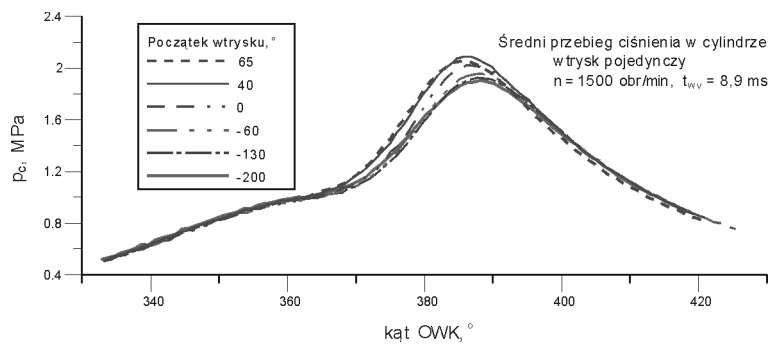
3. Wyniki badań

Na rysunkach 6-13 przedstawiono uśrednione przebiegi ciśnienia w komorze spalania dla wybranych parametrów wtrysku. Dotyczą one wtrysku sekwencyjnego pojedynczego (rys. 6-9) oraz podwójnego (rys. 10-13).

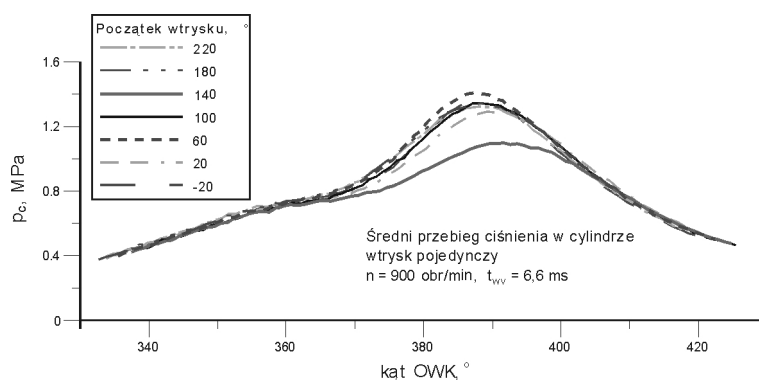


Rys. 6. Uśrednione przebiegi ciśnienia w cylindrze (wtrysk pojedynczy, $n = 1500$ obr./min, czas wtrysku 6,9 ms)

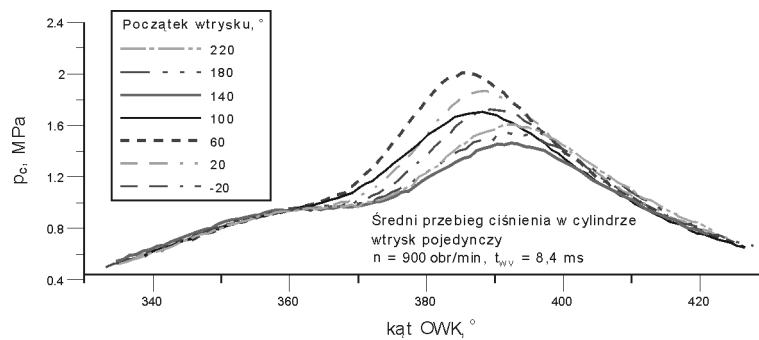
Uśrednione przebiegi ciśnienia w cylindrze wskazują, że zmiana początku wtrysku wpływa na szybkość spalania mieszanki. Przy wtrysku synchronicznym, realizowanym z początkiem wtrysku w zakresie od ok. 20° OWK do ok. 100° OWK, występuje większa szybkość spalania niż przy wtrysku asyn-



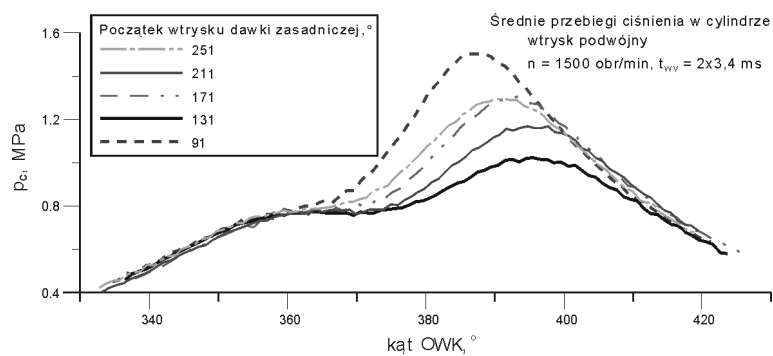
Rys. 7. Uśrednione przebiegi ciśnienia w cylindrze (wtrysk pojedynczy, $n = 1500$ obr./min, czas wtrysku 8,9 ms)



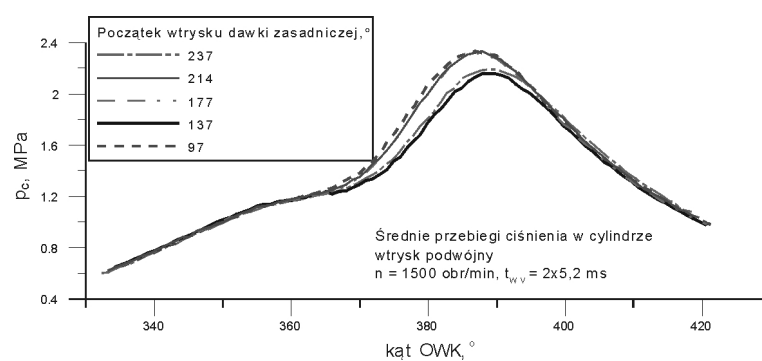
Rys. 8. Uśrednione przebiegi ciśnienia w cylindrze (wtrysk pojedynczy, $n = 900$ obr./min, czas wtrysku 6,6 ms)



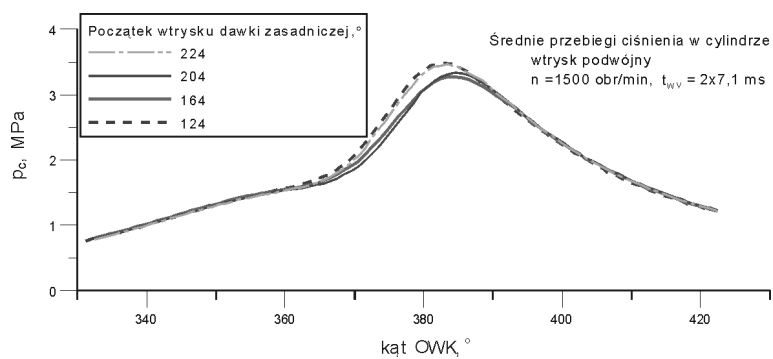
Rys. 9. Uśrednione przebiegi ciśnienia w cylindrze (wtrysk pojedynczy, $n = 900$ obr./min, czas wtrysku 8,4 ms)



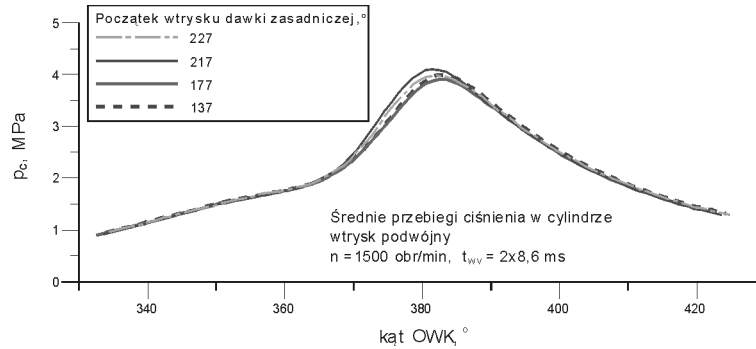
Rys. 10. Uśrednione przebiegi ciśnienia w cylindrze (wtrysk podwójny, $n = 1500 \text{ obr./min}$, czas wtrysku $2 \times 3,4 \text{ ms}$)



Rys. 11. Uśrednione przebiegi ciśnienia w cylindrze (wtrysk podwójny, $n = 1500 \text{ obr./min}$, czas wtrysku $2 \times 5,2 \text{ ms}$)



Rys. 12. Uśrednione przebiegi ciśnienia w cylindrze (wtrysk podwójny, $n = 1500 \text{ obr./min}$, czas wtrysku $2 \times 7,1 \text{ ms}$)



Rys. 13. Uśrednione przebiegi ciśnienia w cylindrze (wtrysk podwójny, $n = 1500$ obr./min, czas wtrysku $2 \times 8,6$ ms)

chronicznym. Najniższe szybkości spalania uzyskano przy wtrysku pojedynczym, realizowanym z początkiem wtrysku ok. 140° OWK po GMP w suwie napełniania.

4. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski:

- wtrysk realizowany przy otwartym zaworze, podczas jednoczesnego przepływu powietrza poprawia proces tworzenia mieszanki, która jest w tym przypadku bardziej homogeniczna,
- homogeniczność mieszanki paliwowo-powietrznej poprawia jej zdolność do zapłonu oraz zwiększa szybkość spalania (rysunki 6–13 przedstawiające zarejestrowane przebiegi średniego ciśnienia w cylindrach wykazują tendencję do wzrostu szybkości spalania przy wtrysku na otwarty zawór dolotowy, co powoduje większe przyrosty ciśnień spalania oraz maksymalnych temperatur obiegu),
- wpływ początku wtrysku na proces spalania i parametry użytkowe silnika (moc użyteczną, moment obrotowy) maleje ze wzrostem obciążenia,
- aby uzyskać wyższe wartości parametrów użytkowych przy wtrysku podwójnym, należy przyjmować taki początek wtrysku dawki pilotującej, aby wtrysk tej dawki był realizowany przed otwarciem zaworu dolotowego, oraz taką odległość kątową dawki zasadniczej od dawki pilotującej, aby początek wtrysku dawki zasadniczej był realizowany w zakresie otwierania zaworu dolotowego,
- początek wtrysku w zakresie od ok. 20° do ok. 80° po GMP w suwie ssania pozwala na uzyskanie wyższych wartości ciśnień spalania (mo-

mentu obrotowego, mocy użytecznej oraz sprawności ogólnej silnika) w porównaniu z wtryskiem realizowanym asynchronicznie oraz wtryskiem synchronicznym w zakresie powyżej 100° OWK po GMP.

Literatura

1. Wendeker M.: Sterowanie wtryskiem benzyny w silniku samochodowym. Lubelskie Towarzystwo Naukowe, Lublin 1999.
2. Kowalewicz A.: Tworzenie mieszanki i spalanie w silnikach o zapłonie iskrowym. WKiŁ, Warszawa 1984.
3. Dutczak J., Golec K., Papuga T.: Wtryskowe zasilanie silnika spalinowego ciekłym propanem-butanem. Mat. VI Międzynarodowej Konf. Naukowej „Silniki gazowe” 2003, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2003.
4. Materiały szkoleniowe firmy VIALLE, Kielce 2001.
5. Jaworski A.: Wpływ parametrów wtrysku sekwencyjnego układu zasilania ciekłym LPG na wybrane parametry użytkowe silnika spalinowego. Rozprawa doktorska, Politechnika Rzeszowska, Rzeszów 2005.
6. Lejda K., Ustrzycki A.: Skomputeryzowane stanowisko badawcze do analizy przebiegu wtrysku w aparaturze wtryskowej silników wysokoprężnych. Mat. III Sympozjum Naukowego „Automatyzacja pracy silników spalinowych – Automa-Sil'96”, Politechnika Poznańska, Poznań 1996.

INFLUENCE OF THE INJECTION START OF LIQUID LPG ON THE COMBUSTION PROCESS OF SI ENGINE

S u m m a r y

The article presents selected research results of the influence of liquid LPG sequential injection parameters on the average pressure in the cylinder, during the combustion process. For the parameters of fuel injection systems, that have a very significant effect on mixture formation, mixture distribution in the cylinder and the combustion process is the injection start angle. Research were realized for a single and double sequential injection. Presented results show that the role of start injection angle increase for the lower engine load.

Złożono w redakcji we wrześniu 2010 r.