

Artur JAWORSKI
Hubert KUSZEWSKI
Kazimierz LEJDA
Adam USTRZYCKI
Paweł WOŚ

PTNSS–2015–3487

Effect of selected liquid LPG injection parameters on the concentration of toxic compounds in spark ignition engine

The article presents the results of research dealing with the impact of injection parameters of LPG liquid phase on the exhaust concentration of toxic components, i.e. CO, HC, and NO_x in a SI engine. The study was realized on a modified six-cylinder engine MD-111ET, designed for running 125 kVA power plant generator. In order to achieve the desired power of the engine, a turbocharging device was used. To feed the engine, a liquid phase LPG injection system by the Vialle Company was used. For the engine control, a specially developed injection controller DTE was used, It co-worked with the LPG ECU in a "master-slave" system. During the tests, the injection system parameters including the injection time, pre-injection time, injection timing, and angles of the initial injection were subjected to regulations.

Key words: LPG, fuel injection, exhaust toxicity, spark ignition engine.

Wpływ wybranych parametrów wtrysku LPG w fazie ciekłej na poziom stężenia składników toksycznych spalin silnika o zapłonie iskrowym

W artykule przedstawiono wyniki badań wpływu parametrów wtrysku paliwa LPG w fazie ciekłej na stężenie składników toksycznych tj. CO, HC i NO_x, w spalinach silnika o ZI. Badania przeprowadzono na zmodyfikowanym sześciocylindrowym silniku MD-111ET, przeznaczonym do napędu agregatu prądowłórczego w elektrowni kontenerowej o mocy 125 kVA. W celu osiągnięcia oczekiwanej mocy agregatu silnik został doładowany za pomocą turbosprężarki. Do zasilania silnika wykorzystano układ wtrysku LPG w fazie ciekłej firmy Vialle. Do sterowania silnikiem wykorzystano specjalnie opracowany sterownik wtrysku DTE, który współpracował ze sterownikiem LPG w układzie "master-slave". W trakcie badań prowadzono m.in. pomiary parametrów układu wtryskowego, które podlegały regulacji, takich jak: czas wtrysku i ewentualnie czas wtrysku wstępnego oraz kąty wyprzedzenia wtrysku oraz wtrysku wstępnego.

Słowa kluczowe: LPG, wtrysk paliwa, toksyczność spalin, silnik o zapłonie iskrowym.

1. Wstęp

Od kilkudziesięciu lat prowadzone są prace zmierzające do ograniczenia szkodliwego oddziaływania silników spalinowych na środowisko. Dotyczy to także stosowania alternatywnych w relacji do benzyny i oleju napędowego paliw gazowych, które stwarzają potencjalne możliwości obniżenia emisji toksycznych składników spalin oraz szkodliwego CO₂ [1-9]. Niezależnie jednak od stosowanego paliwa, ważnym czynnikiem są parametry wtrysku, do których zaliczamy: ciśnienie wtrysku, początek wtrysku oraz czas wtrysku. Parametry te wpływają w istotny sposób na proces tworzenia mieszanki paliwowo-powietrznej i jej parametry w chwili zapłonu, a w efekcie końcowym decydują o składzie spalin [1, 2, 5, 6, 9].

Oferowane na rynku systemy wtryskowego zasilania LPG w fazie ciekłej do kolektora dolotowego realizują proces wtrysku analogicznie do zastosowanego procesu wtrysku benzyny. Działają one na zasadzie „MASTER-SLAVE”, tzn. sterownikiem nadrzędnym jest sterownik systemu wtrysku

benzyny, natomiast sterownik LPG jest sterownikiem podrzędnym [11]. Proces wtrysku LPG jest zatem uzależniony od parametrów wtrysku benzyny, tj. głównie od czasu wtrysku i początku wtrysku. Z uwagi na odmienne właściwości fizykochemiczne paliwa LPG w relacji do benzyny, istotne jest poznanie wpływu parametrów wtrysku LPG na parametry użytkowe i ekologiczne silnika.

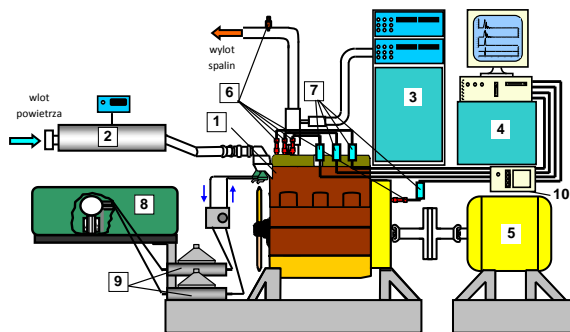
2. Stanowisko badawcze i metodyka badań

Obiektem wykorzystywanym do badań był sześciocylindrowy turbodoładowany silnik z zapłonem iskrowym typu MD-111ET z turbosprężarką ČZ K36. Silnik ten jest zmodyfikowaną konstrukcją silnika wysokoprężnego typu MD-111E.1 produkcji byłej Wytwórni Silników Wysokoprężnych „PZL Mielec” [10]. W silniku zasilanym LPG w relacji do wersji wysokoprężnej MD-111E.1 dokonano szeregu zmian konstrukcyjnych, m.in.: obniżono stopień sprężania z 16,5 do 9 przez zmianę komory spalania w tłoku, zamontowano układ zasilania

LPG firmy Vialle, zabudowano układ zapłonowy (świece zapłonowe zamontowano w miejscu wtryskiwaczy) oraz wprowadzono przepustnicę mieszanki w kolektorze dolotowym.

Konfiguracja stanowiska badawczego była następująca (rys. 1):

- hamulec hydrauliczny Schenck D-630E, pozwalający na płynną zmianę obciążenia silnika w całym zakresie prędkości obrotowej i mocy użytecznej,
- zautomatyzowany system masowego pomiaru zużycia paliwa firmy AVL z dwoma czujnikami pomiarowymi firmy Micro Motion F025M oraz F010M,
- system masowego pomiaru zużycia powietrza firmy AVL, pozwalający na bieżąco śledzić zmiany współczynnika napełniania,
- system analizy spalin firmy PIERBURG typu AMA 2000 do pomiaru stężenia węglowodorów i tlenków azotu w spalinach,
- analizator spalin typu BEA-350 firmy BOSCH do pomiaru stężenia tlenu węgla w spalinach oraz do analizy współczynnika nadmiaru powietrza λ ,
- komputerowy system rejestracji wielkości szybkozmiennych, wykorzystany do pomiaru przebiegu sygnałów sterujących otwarciem wtryskiwaczy, ciśnienia w kolektorze dolotowym, wzniosu zaworów silnika, przebiegu ciśnień w cylindrach 1 i 6 oraz położenia znacznika wału korbowego; system oparty na karcie pomiarowej National Instruments AT-MIO-16E-1 (o częstotliwości próbkowania 1,25 MHz) z separatorem sygnału typu NI SCXI 1125.



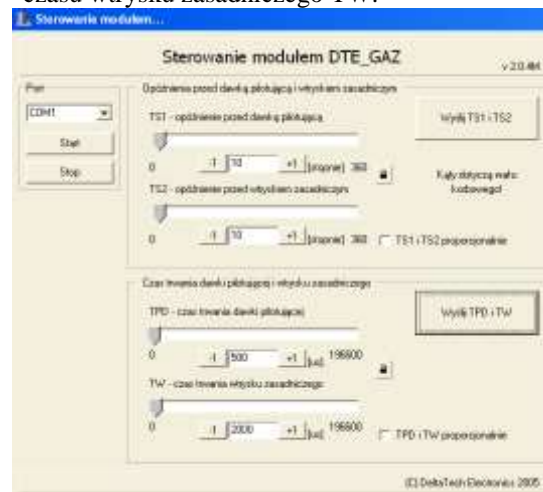
Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego; 1 - silnik, 2 - system pomiaru zużycia powietrza, 3 - analizatory spalin, 4 - komputer sterujący z kartą rejestrującą, 5 - hamulec, 6 - czujniki pomiarowe wielkości szybkozmiennych, 7 - wzmacniacze pomiarowe, 8 - zbiornik LPG, 9 - miernice zużycia paliwa, 10 - separator sygnału

Do sterowania procesem wtrysku paliwa zastosowano moduł sterujący DTE_GAZ opracowany wspólnie z firmą 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.

Moduł sterowany był przy wykorzystaniu programu komputerowego, którego okno zilustrowano na rys. 2.

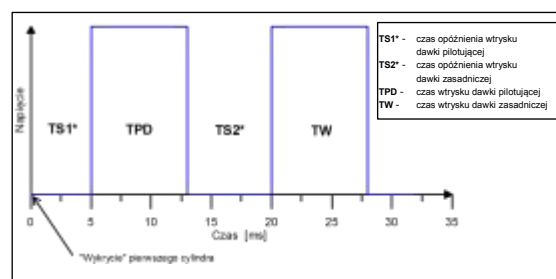
Program umożliwia ustawienia następujących parametrów:

- kąta opóźnienia dawki pilotującej TS1,
- czasu wtrysku pilotującego TPD,
- kąta opóźnienia zasadniczej dawki wtrysku TS2,
- czasu wtrysku zasadniczego TW.



Rys. 2. Widok okna programu obsługi modułu sterującego wtryskiem

Przebieg sygnału generowanego przez moduł ilustruje rys. 3.



Rys. 3. Sygnał sterujący generowany przez moduł sterujący DTE

Czas opóźnienia wtrysku dawki pilotującej wyraża zależność:

$$TS1^* = \frac{TS1 \cdot 1000}{6 \cdot n_{obr}} \quad (1)$$

gdzie:

TS1* - czas opóźnienia wtrysku dawki pilotującej [ms],

TS1 - kąt opóźnienia wtrysku dawki pilotującej [°OWK],

n_{obr} - prędkość obrotowa silnika [obr/min].

Czas opóźnienia wtrysku dawki zasadniczej wyraża zależność:

$$TS2^* = \frac{TS2 \cdot 1000}{6 \cdot n_{obr}} \quad (2)$$

gdzie:

TS2* - czas opóźnienia wtrysku dawki zasadniczej [ms],

TS2 - kąt opóźnienia wtrysku dawki zasadniczej [°OWK],

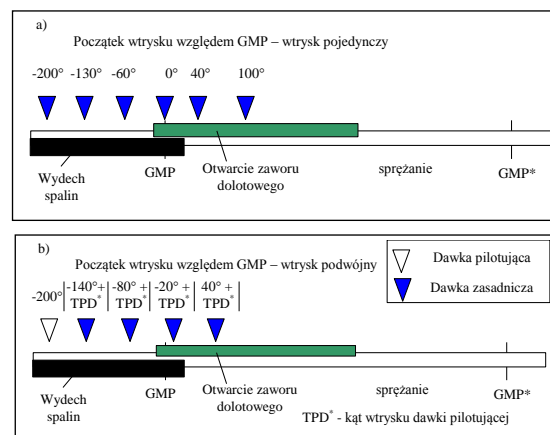
pozostałe wielkości jak we wzorze (1).

Badania doświadczalne rozpoczynano po rozgrzaniu i ustabilizowaniu stanu cieplnego silnika i systemów pomiarowych. Badania realizowano przy ustalonym współczynniku nadmiaru powietrza $\lambda=1$ oraz przy stałej wartości kąta wyprzedzenia zapłonu $\alpha_{wz}=16^\circ$. Do analizy wybrano dwie prędkości obrotowe, odpowiadające w przybliżeniu minimalnemu i eksploatacyjnemu zakresowi prędkości użytecznych silnika wynikającego z zastosowania w elektrowni kontenerowej (900 i 1500 obr/min), oraz trzy wielkości obciążenia: przy wtrysku pojedynczym (40%, 60% i 100% maksymalnego możliwego do osiągnięcia przy wtrysku pojedynczym) i cztery wielkości obciążenia przy wtrysku podwójnym (25%, 50%, 75%, 100%). Badania realizowano dla dwóch ustawień czujnika sygnału położenia tarczy sygnałowej. W pierwszym przypadku, początek wtrysku realizowany był względem GMP w suwie dołotu, w punktach: -200° , -130° , -60° , 0° , 40° , 100° . Wartość kąta 100° była realizowana przy najmniejszym obciążeniu silnika. Wraz ze wzrostem dawki utrzymanie tego kąta nie było możliwe z uwagi na ograniczenia sterownika wtrysku. W przypadku wtrysku podwójnego, dla każdego punktu pomiarowego dokonywano zmian początku wtrysku dawki zasadniczej 4-krotnie, przy stałym początku wtrysku dawki pilotującej 200° przed GMP w suwie dołotu.

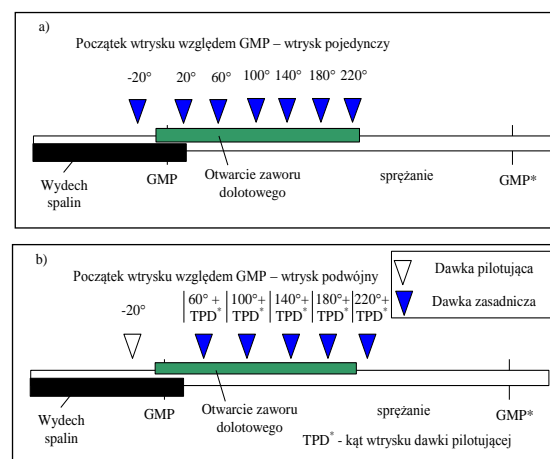
Początek wtrysku dawki zasadniczej względem GMP w suwie napełniania, w przypadku wtrysku podwójnego, wynosił: $-140^\circ + TPD^*$ (kąt obrotu wału korbowego odpowiadający czasowi wtrysku dawki pilotującej), $-80^\circ + TPD^*$, $-20^\circ + TPD^*$, $40^\circ + TPD^*$.

Przypadek pierwszego ustawienia czujnika umożliwił analizę wpływu początku wtrysku, realizowanego przed otwarciem zaworu dolotowego oraz w zakresie jego początkowego otwarcia, na parametry silnika (rys. 4).

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: $60^\circ + TPD^*$, $100^\circ + TPD^*$, $140^\circ + TPD^*$, $180^\circ + TPD^*$, $220^\circ + TPD^*$. 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 (rys. 5).



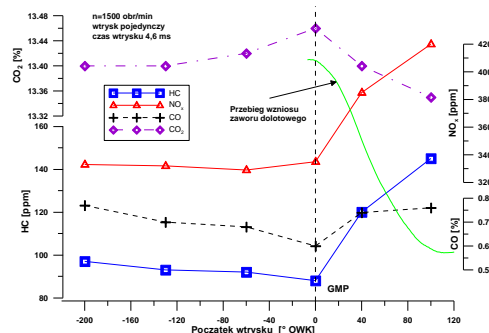
Rys. 4. Testowane początki wtrysku przy pierwszym ustawieniu czujnika położenia tarczy sygnałowej: a) przy wtrysku pojedynczym, b) przy wtrysku podwójnym



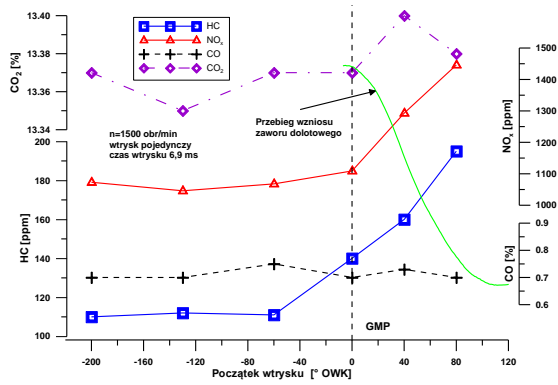
Rys. 5. Testowane początki wtrysku przy drugim ustawieniu czujnika położenia tarczy sygnałowej: a) przy wtrysku pojedynczym, b) przy wtrysku podwójnym

3. Wyniki badań

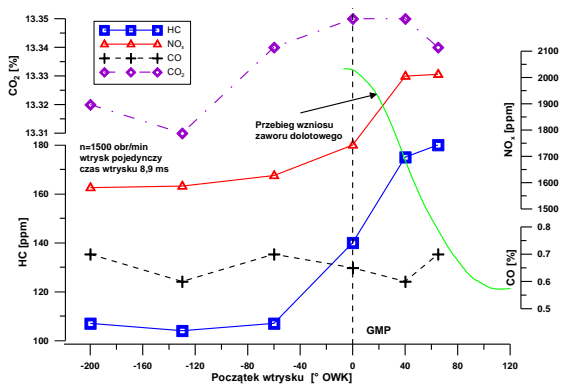
Wyniki pomiarów wpływu wybranych parametrów wtrysku na stężenie składników toksycznych CO, HC i NO_x oraz szkodliwego CO₂ przedstawiono na rys. 6÷19.



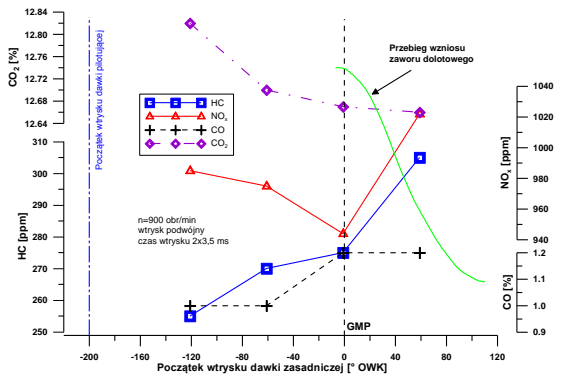
Rys. 6. Wpływ początku wtrysku ciekłego LPG na stężenie CO, CO₂, HC, NO_x w spalinach (wtrysk pojedynczy, n=1500 obr/min, czas wtrysku 4,6 ms)



Rys. 7. Wpływ początku wtrysku ciekłego LPG na stężenie CO, CO₂, HC, NO_x w spalinach (wtrysk pojedynczy, n=1500 obr/min, czas wtrysku 6,9 ms)



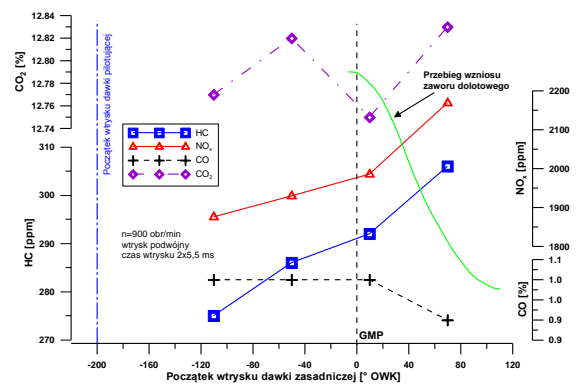
Rys. 8. Wpływ początku wtrysku ciekłego LPG na stężenie CO, CO₂, HC, NO_x w spalinach (wtrysk pojedynczy, n=1500 obr/min, czas wtrysku 8,9 ms)



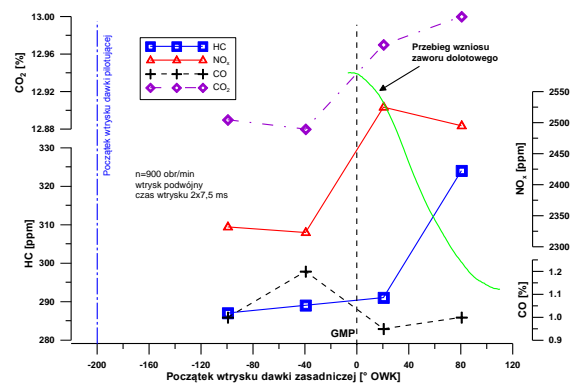
Rys. 9. Wpływ początku wtrysku ciekłego LPG na stężenie CO, CO₂, HC, NO_x w spalinach (wtrysk podwójny, n=900 obr/min, czas wtrysku 2x3,5 ms)

Wyniki badań wykazują wyraźną zależność pomiędzy parametrami wtrysku a zawartością związków toksycznych w spalinach silnika. Zasadniczymi parametrami, które wpływają na zawartość związków toksycznych w spalinach są początek wtrysku oraz czas wtrysku (dawka). Przy wtrysku o początku w zakresie 20°÷100° OWK po GMP w suwie dolotu występuje większa zawartość NO_x oraz HC w spalinach, niż przy wtrysku realizowa-

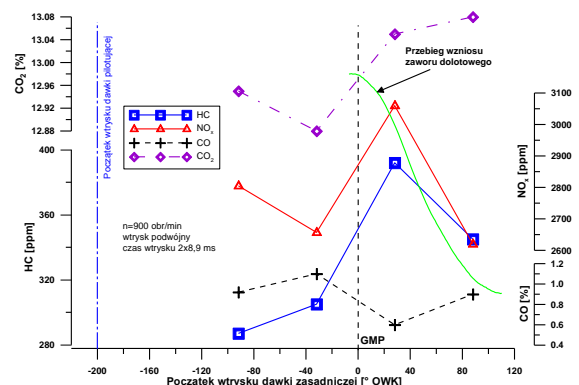
nym asynchronicznie lub wtrysku o początku w zakresie 140°÷220° OWK po GMP.



Rys. 10. Wpływ początku wtrysku ciekłego LPG na stężenie CO, CO₂, HC, NO_x w spalinach (wtrysk podwójny, n=900 obr/min, czas wtrysku 2x5,5 ms)



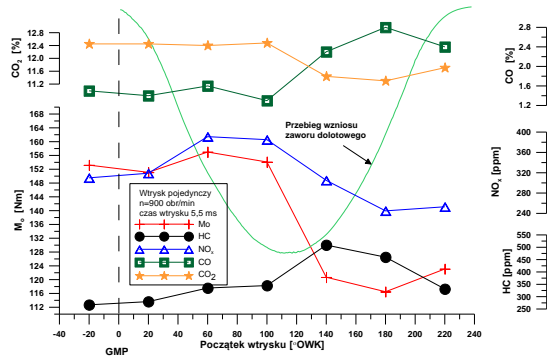
Rys. 11. Wpływ początku wtrysku ciekłego LPG na stężenie CO, CO₂, HC, NO_x w spalinach (wtrysk podwójny, n=900 obr/min, czas wtrysku 2x7,5 ms)



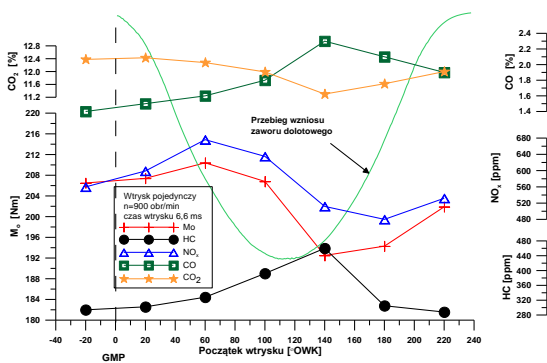
Rys. 12. Wpływ początku wtrysku ciekłego LPG na stężenie CO, CO₂, HC, NO_x w spalinach (wtrysk podwójny, n=900 obr/min, czas wtrysku 2x8,9 ms)

Zmiana zawartości CO w spalinach w funkcji początku wtrysku nie jest jednoznaczna. W niektórych przypadkach stężenie tlenku węgla jest niższe przy wtrysku w początkowej fazie otwarcia zaworu dolotowego (od ok. 20 °OWK do ok. 80 °OWK po GMP tło w suwie dolotu), niż przy wtrysku o

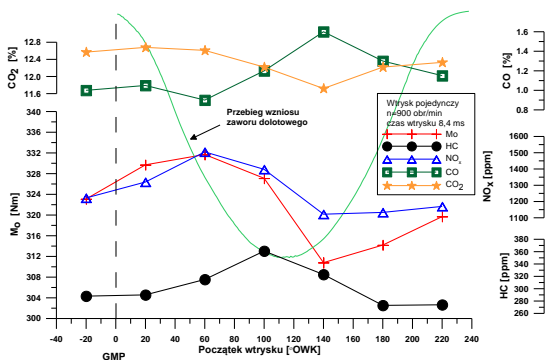
początku przed otwarciem zaworu dolotowego (rys. 10÷12). Przy wtrysku realizowanym na otwarty zawór dolotowy zauważalny jest wzrost stężenia CO przy wtrysku realizowanym w końcowej fazie otwarcia zaworu dolotowego dla początku wtrysku od ok. 100 °OWK do ok. 200 °OWK po GMP tłoka w suwie ssania (rys. 13 ÷16, rys. 19).



Rys. 13. Wpływ początku wtrysku ciekłego LPG na moment obrotowy M_0 , stężenie CO, CO₂, HC, NO_x w spalinach (wtrysk pojedynczy, $n=900$ obr/min, czas wtrysku 5,5 ms)



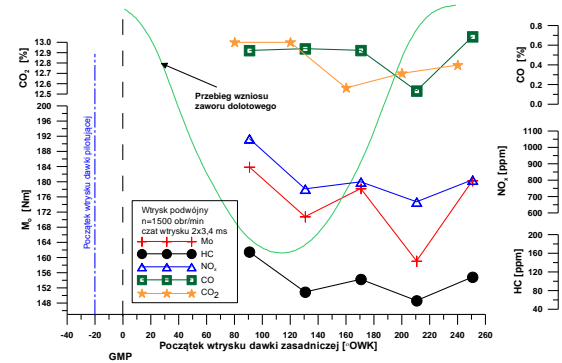
Rys. 14. Wpływ początku wtrysku ciekłego LPG na moment obrotowy M_0 , stężenie CO, CO₂, HC, NO_x w spalinach (wtrysk pojedynczy, $n=900$ obr/min, czas wtrysku 6,6 ms)



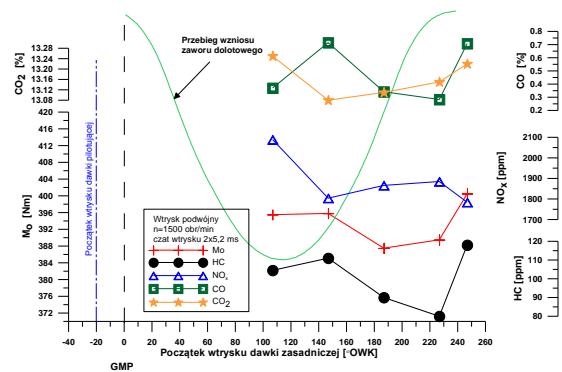
Rys. 15. Wpływ początku wtrysku ciekłego LPG na moment obrotowy M_0 , stężenie CO, CO₂, HC, NO_x w spalinach (wtrysk pojedynczy, $n=900$ obr/min, czas wtrysku 8,4 ms)

Stężenie CO₂ w spalinach w niektórych przypadkach rośnie przy wtrysku o początku realizowanym przy otwartym zaworze dolotowym (rys. 7÷8,

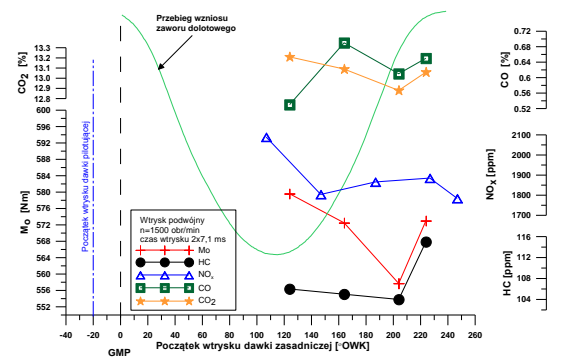
rys. 11÷12), natomiast w innych maleje (rys. 6, rys. 10). Zauważalny jest natomiast spadek stężenia CO₂ przy wtrysku o początku realizowanym od ok. 140 °OWK do ok. 200 °OWK po GMP tłoka w suwie dolotu (rys. 13÷19).



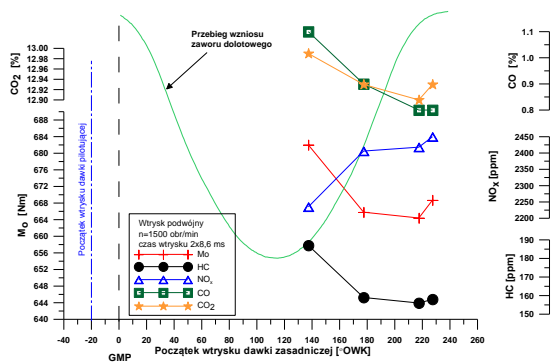
Rys. 16. Wpływ początku wtrysku ciekłego LPG na moment obrotowy M_0 , stężenie CO, CO₂, HC, NO_x w spalinach (wtrysk podwójny, $n=1500$ obr/min, czas wtrysku 2x3,4 ms)



Rys. 17. Wpływ początku wtrysku ciekłego LPG na moment obrotowy M_0 , stężenie CO, CO₂, HC, NO_x w spalinach (wtrysk podwójny, $n=1500$ obr/min, czas wtrysku 2x5,2 ms)



Rys. 18. Wpływ początku wtrysku ciekłego LPG na moment obrotowy M_0 , stężenie CO, CO₂, HC, NO_x w spalinach (wtrysk podwójny, $n=1500$ obr/min, czas wtrysku 2x7,1 ms)



Rys. 19. Wpływ początku wtrysku ciekłego LPG na moment obrotowy M_0 , stężenie CO, CO₂, HC, NO_x w spalinach (wtrysk podwójny, $n=1500$ obr/min, czas wtrysku $2 \times 8,6$ ms)

4. Wnioski

Na podstawie analizy wyników przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski:

- początek wtrysku oraz odległość kątowa wtryskiwanych dawek mają wpływ na zawartość związków toksycznych w spalinach silnika zasilanego ciekłym LPG,

- celem ograniczenia emisji tlenków azotu NO_x oraz węglowodorów HC przy zasilaniu w systemie wtrysku sekwencyjnego LPG w fazie ciekłej należy realizować wtrysk przy zamkniętym zaworze dolotowym (rys. 6÷11),
- przy wtrysku pojedynczym widoczny jest zakres zwiększonego stężenia CO dla początku wtrysku $100 \div 180$ °OWK po GMP w suwie dolotu,
- przy wtrysku podwójnym nie zaobserwowano jednoznacznych zależności stężenia tlenku węgla CO oraz dwutlenku węgla CO₂ w relacji do początku wtrysku LPG oraz odległości kątowej dawek pilotującej i zasadniczej,
- przy wtrysku podwójnym wzrost stężenia NO_x występuje dla odległości kątowej pomiędzy dawkami $60 \div 120$ °OWK, przy której początek wtrysku dawki zasadniczej realizowany jest w zakresie kąta OWK odpowiadającego otwieraniu zaworu dolotowego,
- niższe stężenia HC uzyskano przy wtrysku podwójnym dla odległości kątowej pomiędzy dawkami $180 \div 240$ °OWK, przy której początek wtrysku dawki zasadniczej realizowany jest w zakresie kąta OWK odpowiadającego fazie zamykania zaworu dolotowego.

Bibliography/Literatura

- [1] Cha-Lee Myung, Kwanhee Choi, Juwon Kim, Yunsung Lim, Jongtae Lee, Simsoo Park: Comparative study of regulated and unregulated toxic emissions characteristics from a spark ignition direct injection light-duty vehicle fueled with gasoline and liquid phase LPG (liquefied petroleum gas). Elsevier Science. Energy, Volume 44, Issue 1, August 2012.
- [2] Changming Gong, Shufang Yan, Yan Su, Zhiwei Wang: Effects of Fuel Injection Timing on Combustion and Emissions of a Spark-Ignition Methanol and Methanol/Liquefied Petroleum Gas (LPG) Engine during Cold Start. Energy Fuels, 2009, 23 (7).
- [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] Enju Lee, Jinwoo Park, Kang Y. Huh, Jaejoon Choi, Choongsik Bae: Simulation of fuel/air mixture formation for heavy duty liquid phase LPG injection (LPLI) engines. SAE 2003-01-0636.
- [5] Jaworski A., Kuszewski H., Lejda K., Ustrzycki A.: The Effect of Injection Timing on the Environmental Performances of the Engine Fueled by LPG in the Liquid Phase. INTERNAL COMBUSTION ENGINES. Chapter 5. Published by InTech Janeza Trdine 9, 51000 Rijeka, Croatia. p. 111-130.
- [6] Lejda K., Jaworski A., Ustrzycki A.: Wpływ parametrów sekwencyjnego wtrysku ciekłego LPG na wybrane parametry użytkowe silnika spalinowego. Silniki Spalinowe PTNSS-2007-SS3-215, 2007.
- [7] Luft S., Pawlak G., Gola M.: Analiza wpływu wybranych parametrów procesu roboczego na sprawność ogólną silnika o zapłonie iskrowym zasilanego ciekłym butanem wtryskiwanym do kolektora dolotowego. Teza Komisji Naukowo-Problemovej Motoryzacji PAN - Oddział Kraków, z.26-27, Kraków 2003.
- [8] Merkisz J.: Ekologiczne problemy silników spalinowych. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1999.
- [9] Seungmook Oh, Seungyu Kim, Choongsik Bae, Changup Kim, Kernyong Kang: Flame propagation characteristics in a heavy duty LPG engine with liquid phase port injection. SAE 2002-01-1736.
- [10] Dokumentacja silnika MD-111E. Wytwórnia Silników Wysokoprężnych „Diesel-Mielec”, Mielec 2004.
- [11] Materiały szkoleniowe firmy VIALLE, Kielce 2001

Mr Artur Jaworski, PhD – Doctor in the Faculty of Mechanical Engineering and Aeronautics at Rzeszów University of Technology.

Dr inż. Artur Jaworski – adiunkt na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej



Mr Adam Ustrzycki, PhD – Doctor in the Faculty of Mechanical Engineering and Aeronautics at Rzeszów University of Technology.

Dr inż. Adam Ustrzycki – adiunkt na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej.



Mr Hubert Kuszewski, PhD – Doctor in the Faculty of Mechanical Engineering and Aeronautics at Rzeszów University of Technology.

Dr inż. Hubert Kuszewski – adiunkt na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej



Mr Paweł Woś, PhD – Doctor in the Faculty of Mechanical Engineering and Aeronautics at Rzeszów University of Technology.

Dr inż. Paweł Woś – adiunkt na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej



Prof. Kazimierz Lejda, DSc., DEng. – Professor in the Faculty of Mechanical Engineering and Aeronautics at Rzeszów University of Technology.

Prof. dr hab. inż. Kazimierz Lejda – profesor na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej.

