

APARATURA

BADAWCZA I DYDAKTYCZNA

Propozycja metody badań charakterystyki tłoczkowych wtryskiwaczy fazy lotnej LPG

ANDRZEJ BORAWSKI

POLITECHNIKA BIAŁOSTOCKA, WYDZIAŁ MECHANICZNY, KATEDRA BUDOWY MASZYN I TECHNIKI CIEPLNEJ

Słowa kluczowe: silniki spalinowe, układy zasilania, paliwa alternatywne, wtryskiwacze LPG

STRESZCZENIE:

Od charakterystyki pracy wtryskiwaczy LPG (*liquefied petroleum gas* – płynny gaz ropopochodny) zależy jakość procesu zasilania silnika. W niniejszej pracy zaproponowano prostą i tanią metodykę badań procesu otwierania i zamykania wtryskiwaczy. Polega ona na analizie pojedynczych klatek filmu, na którym zarejestrowano pośredni ruch tłoczka. Odpowiednio szybka kamera pozwala na zebranie wystarczającej liczby punktów pomiarowych do sporządzenia wykresu ruchu tłoczka w czasie. Opracowana metodyka pozwala m.in. na szybką diagnostykę wtryskiwacza, przez co jest szybsza, a co za tym idzie tańsza niż inne powszechnie stosowane metody badań wtryskiwaczy.

Proposed method for testing the piston characteristics of LPG vapor phase injectors

Key words: combustion engines, fuel supply, alternative fuels, LPG injectors

Abstract:

The quality of the engine's power supply depends on the performance of the LPG injectors. In this paper, a simple and cheap methodology for testing the process of opening and closing injectors has been proposed. It involves the analysis of individual frames of the film on which the intermediate spire movement was recorded. Properly fast camera allows to collect enough points to measure the movement of the spire over time. The developed methodology allows, among others for quick diagnostics of the injector, therefore it is also cheaper than other popular research methods.

1. WSTĘP

Instalacje gazowe czwartej generacji (sekwencyjne), głównie dzięki swej uniwersalności, są najpopularniejszymi wśród wszystkich stosowanych rozwiązań (zarówno starszych generacji 1-3, jak też najnowszych, również tych wykorzystujących paliwo w stanie ciekłym). Niestety, oprócz wielu oczywistych zalet, instalacje tego typu mają liczne wady. Jedną z nich jest mało precyzyjna i zmienna wraz z okresem eksploatacji praca wtryskiwaczy [1, 2]. Ich podstawowym zadaniem jest dawkowanie paliwa dostarczanego do przewodów dolotowych silnika. Budowa tłoczkowego wtryskiwacza gazowego jest w niewielkim stopniu zbliżona do budowy wtryskiwacza benzyny. LPG w fazie lotnej ma objętość większą niż benzyna w fazie ciekłej, zatem gabaryty wtryskiwacza gazu muszą być większe [3]. Zwiększenie rozmiarów wiąże się ze zwiększeniem sił bezwładności elementów ruchomych. Zachowanie prawidłowych parametrów pracy wtryskiwacza, tj. odpowiednio krótkiego czasu otwarcia i zamknięcia, wymusiło więc zwiększenie cewki wytwarzającej pole elektromagnetyczne powodujące otwarcie wtryskiwacza. Większa cewka stała się przyczyną wytwarzania większej ilości ciepła, co w skrajnych przypadkach może powodować uszkodzenie wtryskiwacza [4]. Problem ten częściowo rozwiązano, stosując odpowiednią charakterystykę impulsu elektrycznego sterującego położeniem tłoczka wtryskiwacza [5].

Charakter ruchu tłoczka wtryskiwacza zależy od wielu czynników. Pierwszym i podstawowym jest tu oczywiście siła elektromagnetyczna pochodząca od cewki. Oprócz tej siły działają również inne: siła nacisku sprężyny, siła bezwładności, siła pochodząca od różnicy ciśnienia gazów (podczas badań siła ta nie występowała), siła tarcia oraz siła wynikająca z zakłóceń pochodzących z otoczenia. Wypadkowa tych sił powoduje przemieszczanie się tłoczka [6].

Istotna jest również poprawność sterowania pracą wtryskiwaczy gazowych. W celu jej oszacowania wykonano szereg pomiarów, w których analizie poddano przebiegi napięcia na wtryskiwaczach gazowych i benzynowych [7]. Wyniki jednoznacznie pokazały, że przy prędkości obrotowej silnika wynoszącej 4000 obr./min napięcie na przewodach zasilających wtryskiwacze nie spada do zera (częstość impulsów zasilających

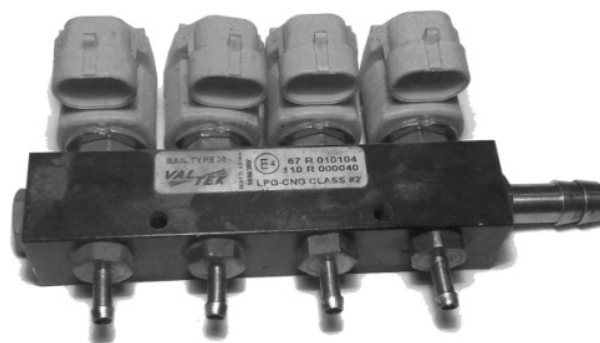
jest zbyt duża). Stwierdzono również, że przy prędkości silnika wynoszącej około 5000 obr./min wtryskiwacze LPG nie zamykają się, a zasilanie zachodzi w sposób ciągły. Dalsze zwiększanie prędkości obrotowej powoduje wyłączenie instalacji zasilania paliwem alternatywnym i uruchomienie fabrycznej instalacji benzynowej [8]. Dlatego też w trakcie badań opisanych w dalszej części pracy wtryskiwacze zasilano impulsami odpowiadającymi prędkości obrotowej silnika wynoszącej 1000 obr./min.

Zbadanie rzeczywistej charakterystyki pracy wtryskiwacza jest rzeczą trudną. Problemem jest m.in. budowa wtryskiwacza, uniemożliwiająca bezpośrednią obserwację elementów ruchomych, oraz krótkie czasy otwierania i zamykania. Istnieje co prawda aparatura pozwalająca na uchwycenie momentu początku oraz końca ruchu tłoczka (wykorzystująca np. drgania obudowy czy też promień lasera mierzący odległość do dolnej części tłoczka), są to jednak bardzo drogie przyrządy badawcze [9, 10]. Podjęto więc próbę opracowania prostej i taniej metody rejestracji ruchu tłoczka wtryskiwacza, a jednocześnie zapewniającej wyniki na tyle dokładne, żeby można było wykonać niezbędne analizy.

Proponowana metodyka badań oparta na analizie klamek video, na których zarejestrowano ruch tłoczka, będzie wykorzystana m.in. do badań weryfikacyjnych opracowanego wcześniej modelu matematycznego [11].

2. OBIEKT I METODYKA BADAŃ

Badania charakterystyki pracy wtryskiwaczy wymagały pozyskania odpowiednich próbek. Stały się nimi listwy wtryskowe tego samego modelu i producenta, Valtec 3 Ω (Rys. 1). Najważniejsze dane techniczne tych wtryskiwaczy zestawiono w Tabeli 1.



Rysunek 1 Zestaw badanych wtryskiwaczy Valtec 3 Ω

Tabela 1 Podstawowe dane techniczne badanego wtryskiwacza

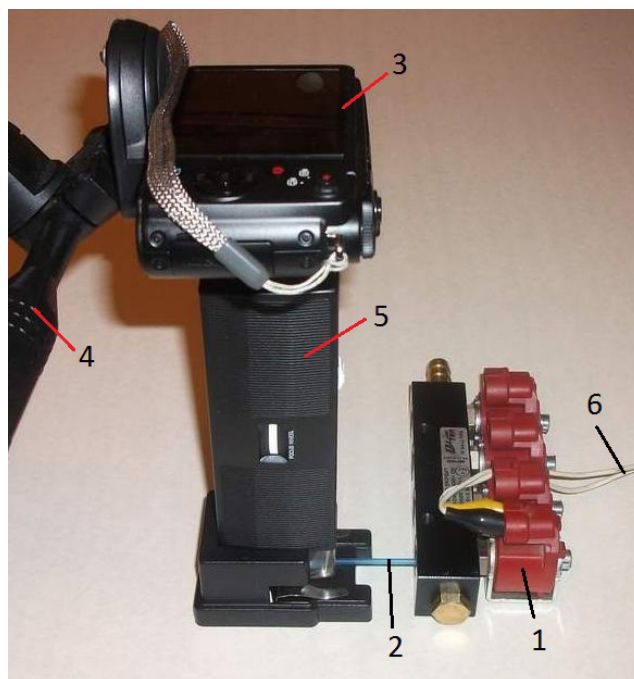
Maksymalne ciśnienie robocze	0,45 MPa
Zakres temperatury pracy	-20°C – +120°C
Średnica króćca wejścia gazu	12 mm
Oporność cewek	3 Ω

Pierwszym krokiem badań charakterystyki wtryskiwacza było przytwierdzenie do dolnej części tłoczka wskaźnika, który przemieszczając się razem z tłoczkiem, pozwolił na pośrednią obserwację jego ruchu. Posłużyła zań rurka wykonana z tworzywa sztucznego, o średnicy 2 mm i grubości ścianki 0,1 mm, którą przyklejono do zdemonstrowanego wcześniej tłoczka. Masa rurki (około 0,04 g) w stosunku do masy tłoczka (około 4,8 g) jest bardzo mała, założono więc, że nie ma wpływu na przebieg charakterystyki pracy wtryskiwacza. Następnie wtryskiwacz został złożony i zamontowany na prostym stanowisku badawczym. W jego skład wchodziły: kamera Casio Exilim EX-FH 100 (z możliwością nagrywania filmów z prędkością 1000 klatek na sekundę; podstawowe dane techniczne zestawiono w Tabeli 2), statyw do jej zamontowania oraz urządzenie powiększające MG10085 z wbudowaną lampą podświetlającą obraz (Rys. 2). Zasilanie wtryskiwacza realizowano za pomocą zasilacza prądu stałego, generującego impulsy prostokątne o pożądanej długości (wypełnieniu) i częstotliwości. Impuls taki, trwający 6 ms i powtarzany co 120 ms (odpowiadający prędkości obrotowej wynoszącej 1000 obr./min), przedstawiono na Rysunku 3.

Tabela 2 Podstawowe dane techniczne kamery Casio Exilim EX-FH 100

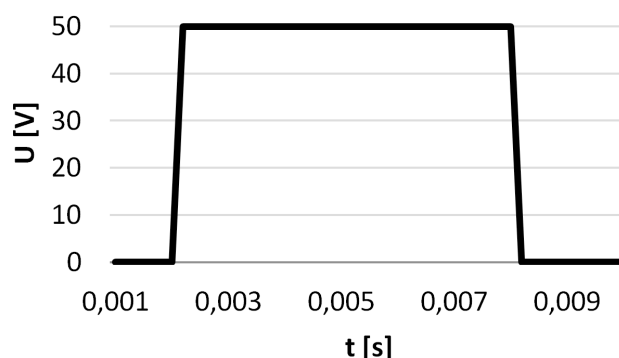
Maksymalna rozdzielczość	3648 × 2736
Liczba pikseli	10 Mpx
Czułość ISO	100–3200
Ogniskowa (odpowiednik 35 mm)	24–240
Minimalny czas naświetlania	1/1000 s
Zoom optyczny	10 x
Światłota	f/3,2–5,7

Zarejestrowane przez kamerę przykładowe przemieszczenie wskaźnika (znacznie zwiększone dzięki zastosowaniu powiększenia) pozwalało w pośredni sposób obserwować ruch tłoczka. Uzyskanie wykresu charakterystyki wymagało rozbicia nagrania na pojedyncze klatki i ich analizy. Opracowano jedynie klatki pokazujące ruch wskaźnika (Rys. 4). Wymagany nakład pracy był więc akceptowalnie mały.

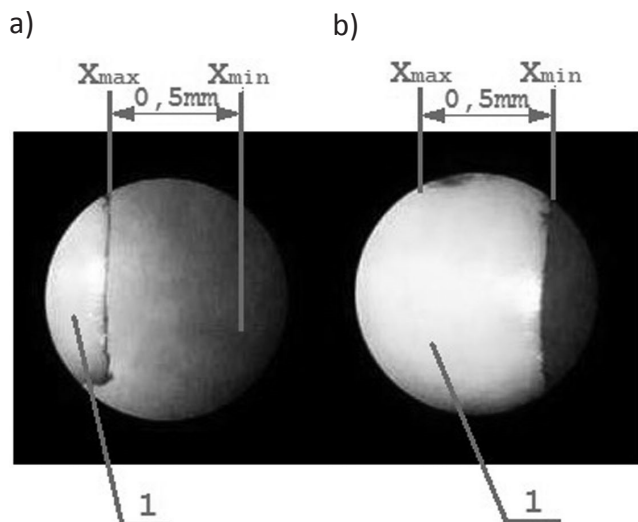


Rysunek 2 Stanowisko pomiarowe wykorzystane do realizacji drugiego etapu badań:

1 – badany wtryskiwacz, 2 – wskaźnik przytwierdzony do tłoczka, 3 – kamera EX-FH 100, 4 – statyw, 5 – urządzenie powiększające MG10085, 6 – przewody zasilające



Rysunek 3 Wykres impulsu zasilającego badany wtryskiwacz, odpowiadającego prędkości obrotowej silnika wynoszącej 1000 obr./min



Rysunek 4 Klatki materiału video zarejestrowanego podczas pracy fabrycznie nowego wtryskiwacza:

- a) wtryskiwacz otwarty, wskaźnik przesunięty w skrajne lewe położenie; b) wtryskiwacz zamknięty, wskaźnik przesunięty w skrajne prawe położenie;

1 – wskaźnik odzwierciedlający ruch tłoczka,

x_{max} – położenie odzwierciedlające otwarcie wtryskiwacza,

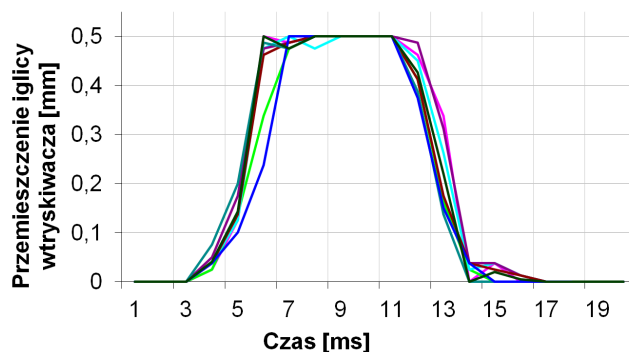
x_{min} – położenie odzwierciedlające zamknięcie wtryskiwacza.

Analiza około pięciu następujących po sobie cykli otwarcia pozwalała na pozyskanie wystarczających informacji do sporządzenia wykresu charakterystyki badanego wtryskiwacza. Z powodu zakłóceń, polegających na rozmyciu obrazu niektórych klatek nagranych filmu, postanowiono rozszerzyć analizę do ośmiu kolejnych cykli.

Badania wykonano bez udziału paliwa przepływającego przez wtryskiwacz, przez co otrzymane charakterystyki różnią się od rzeczywistej pracy wtryskiwacza zamontowanego w pojeździe, nie działa bowiem siła nacisku na tłoczek generowana ciśnieniem gazu.

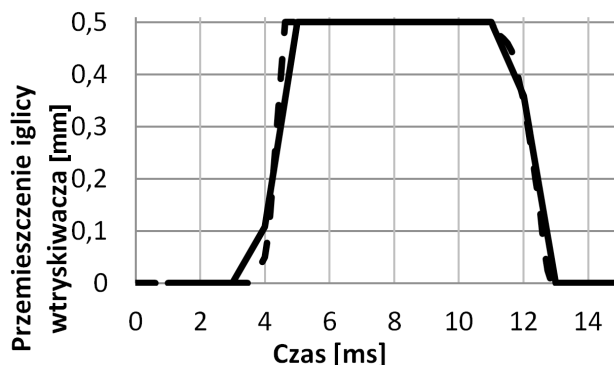
3. WYNIKI BADAŃ

Wynikiem badań, mających na celu określenie charakterystyki wtryskiwacza, jest zbiór danych określających położenie tłoczka w danej chwili. Odpowiednie zasilanie, odzwierciedlające prędkość obrotową silnika wynoszącą 1000 obr./min, oraz analiza zarejestrowanego obrazu ośmiu kolejnych cykli otwarcia, pozwalają na sporządzenie rodziny wykresów przedstawionej na Rysunku 5. Następnie, wykorzystując statystykę, wyznaczono charakterystykę pracy badanego wtryskiwacza. Dzięki takiej procedurze czas próbkowania wynoszący 1 ms okazał się w zupełności wystarczający.



Rysunek 5 Wyniki ośmiu pomiarów przemieszczenia tłoczka wtryskiwacza

Opracowaną metodykę badań poddano weryfikacji. Polegała ona na porównaniu wyników otrzymanych z analizy klatek video z wynikami uzyskanymi metodą opracowaną przez Szpicę [9], polegającą na pomiarze przyśpieszeń obudowy zewnętrznej wtryskiwacza (Rys. 6).



Rysunek 6 Porównanie wyników pomiarów charakterystyki wtryskiwacza metodą analizy klatek video (—) i metodą pomiaru drgań obudowy listwy (- -) [12]

Zauważyć można wyraźną różnicę w początkowej fazie ruchu tłoczka. Wynika ona głównie z dużo większej częstotliwości próbkowania stosowanej przez innych badaczy. Charakter ruchu tłoczka w czasie zamykania jest bardzo zbliżony dla obu metod. Współczynnik determinacji dla jednego, zbadanego dwoma metodami wtryskiwacza osiągnął wartość $R^2 = 0,955$.

W przypadku konieczności uzyskania dokładniejszych wyników, w metodzie analizy klatek można zastosować kamerę o większej szybkości zapisu. Kamery takie są niestety drogie. Wiązałoby się zatem ze znacznym zwiększeniem kosztów, oraz wydłużeniem czasu badań (z racji konieczności analizy większej liczby klatek zarejestrowanego filmu).

4. PODSUMOWANIE

W niniejszej pracy zaproponowano prostą i tanią metodę pomiaru charakterystyki pracy impulsowych wtryskiwaczy LPG za pomocą analizy klętek filmu, na którym rejestruje się pośrednio ruch tłoczka wtryskiwacza. Na podstawie tej metodyki przebadano dwadzieścia cztery wtryskiwacze (sześć zestawów) tego samego producenta, które zasilały taki sam model silnika (w niniejszym opracowaniu przedstawiono tylko przykładowy wynik dla jednego z wtryskiwaczy). Ustalono, że zaproponowana metoda z powodzeniem może być wykorzystywana do np. badań weryfikacyjnych oraz diagnostycznych (szczególnie w warunkach warsztatowych), jak również w procesie badań

testowych wtryskiwaczy prototypowych. Dzięki niewielkiemu czasowi potrzebnemu do wykonania pomiaru, oraz łatwości obsługi stanowiska, jak też powszechnej dostępności jego części składowych, metoda opisana powyżej sprawdzi się również w procesie dydaktycznym, gdyż możliwy jest szybki pomiar pozwalający określić np. wpływ kształtu impulsu zasilającego lub jego długości na proces otwierania i zamykania wtryskiwacza.

Afiliacja

Finansowanie z Pracy Własnej nr MB/WM/4/2017, w ramach środków przeznaczonych na rozwój młodych naukowców z funduszu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

LITERATURA

- [1] Szpica D., Fuel dosage irregularity of LPG pulse vapor injectors at different stages of wear, *Mechanika*, 2016, 22 (1), 44-50.
- [2] Raslavičius L., Keršys A., Mockus S., Keršiene N., Starevičius M., Liquefied petroleum gas (LPG as a medium-term option in the transition to sustainable fuels and transport, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 2014, 32, 513-525.
- [3] Mohamad T. I., Jermy M., Harrison M., Experimental Investigation of a Gasoline-to-LPG Converted Engine Performance at Various Injection and Cylinder Pressures With Respect to Propane Spray Structures, *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 315, 20-24.
- [4] Erkus B., Sürmen A., Karamangil I. M., A comparative study of carburation and injection fuel supply methods in an LPG-fuelled SI engine, *Fuel*, 2013, 107, 511-517.
- [5] Majerczyk A., Taubert S., Układy zasilania gazem propan-butan, Warszawa, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, 2006.
- [6] Czarnigowski J., Teoretyczno-empiryczne studium modelowania impulsowego wtryskiwacza gazu, Lublin, Monografie – Politechnika Lubelska, 2012.
- [7] Borawski A., Wituszyński K., Problemy sterowania pracą wtryskiwaczy LPG, *Silniki Gazowe*, Częstochowa, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, 2010.
- [8] Borawski A., Modification of a fourth generation LPG installation improving the power supply to a spark ignition engine, *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, 2015, 17(1), 1-6.
- [9] Szpica D., The influence of selected adjustment parameters on the operation of LPG vapor phase pulse injectors, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, 34, 1127-1136.
- [10] Czarnigowski J., Barański G., Wendeker M., Duk M., Zyska T., Method to measure injector opening and closing lag times, *Combustion Engines*, 2011, 1(144), 20-28.
- [11] Borawski A., Simulation studies of LPG injector used in 4th generation installations, *Combustion Engines*, 2015, 1(160), 49-55.
- [12] Szpica D., Modeling of Current Limitation through the PWM Signal in LPG Injectors, *Proceedings of 20th International Scientific Conference. Transport Means*, 2016: 536-539.