

The model of pulse injector opening lag time

Abstract: The paper presents an empirical model of a pulse gas injector opening lag; the lag is understood as the time between the occurrence of a control signal and the start of the valve movement. The lag determines the minimal duration of the control signal that can be executed by the injector, and thus the injector's applicability. The analysis covers 6 injector types that differ in design of both the valve element and the coil. The results were used to construct a model of opening lag in the function of supply pressure and supply voltage. The experiments revealed that the design of the injector strongly affects the opening lag.

Keywords: injector, lag time, LPG, CNG

Model zwłoki załączania impulsowego wtryskiwacza gazu

Streszczenie: W artykule przedstawiono model empiryczny zwłoki załączania impulsowego wtryskiwacza gazu rozumianej jako czas od początku impulsu sterującego do początku ruchu elementu zaworowego. Zwłoka ta decyduje o najmniejszym z możliwych czasie impulsu sterującego jaki może zrealizować impulsowy wtryskiwacz gazu, a przez to o zakresie jego stosowalności. Przedstawiono wyniki badań stanowiskowych 6 typów wtryskiwaczy, różniących się konstrukcją zarówno elementu zaworowego jak i cewki elektromagnetycznej. Na podstawie badań opracowano model zwłoki załączania w funkcji ciśnienia zasilania i napięcia zasilania. Wykazano także znaczący wpływ konstrukcji na wartość tej zwłoki.

Słowa kluczowe: wtryskiwacz, zwłoka załączania, LPG, CNG

1. Wprowadzenie

Jednym z głównych kierunków badań silników spalinowych stosowanych w pojazdach jest obniżanie emisji dwutlenku węgla [1, 2]. Możliwe jest to do uzyskania zarówno na drodze zwiększenia sprawności działania silnika jak i przez stosowanie paliw o zmniejszonej zawartości węgla [3]. Zamiast paliw wysokowęglowych (takich jak benzyna i olej napędowy) wprowadzane są paliwa o znacznie mniejszej zawartości węgla. Paliwami tymi są zarówno paliwa ciekłe, takie jak etanol i metanol, jak też paliwa gazowe, takie jak: propan-butan (LPG), metan (CNG) czy wodór.

Obecnie wszystkie układy zasilania paliwem silników spalinowych o zapłonie iskrowym opiera się na systemach wtrysku sekwencyjnego (do kolektora dolotowego lub bezpośrednio do cylindra) wykorzystujących wtryskiwacze impulsowe. Wtryskiwacze te są zaworami dwustanowymi (otwarty, zamknięty) normalnie zamkniętymi [4].

Na rysunku 1.1 przedstawiono przykładową konstrukcję impulsowego wtryskiwacza gazu Valtek typ 30. Jest to wtryskiwacz tłoczkowy, kalibrowany średnicą otworu zgrupowany w szynę paliwową. Paliwo doprowadzane jest kanałem dolotowym do komory znajdującej się nad gniazdem zaworowym. Elementem zaworowym w tym wtryskiwaczu jest tłoczek poruszający się osiowo wewnątrz cewki elektromagnetycznej, zamykający przepływ za pomocą elementu uszczelniającego znajdującego się na jego czole. Wydajność wtryskiwacza (rozumiana jako średni strumień masy

wypływającego paliwa) kalibrowana jest za pomocą wielkości pola przekroju otworu kalibracyjnego.

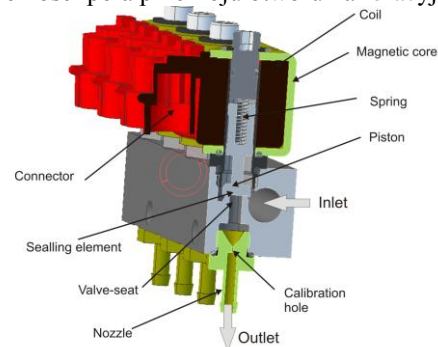


Fig. 1.1 Impulsowy wtryskiwacz gazu Valtek

Położenie elementu zaworowego (w tym przypadku tłoczka) jest zależna od bilansu trzech sił:

- siły docisku elementu zaworowego wynikającej z różnicy ciśnień nad i pod tym elementem; zależy ona od warunków pracy wtryskiwacza (ciśnienia zasilania oraz ciśnienia odbioru) oraz konstrukcji samego wtryskiwacza (pola powierzchni gniazda zaworowego, rozkładu ciśnień podczas przepływu)
- siły docisku elementu zaworowego przez element sprężysty; zależy ona od rodzaju elementu sprężystego oraz jego odkształcenia w wyniku ruchu elementu zaworowego;
- siły elektromagnetycznego przyciągania elementu zaworowego do cewki elektromagnetycznej; zależy ona od konstrukcji obwodu elektromagnetycznego oraz prądu przepływającego przez cewkę.

Należy zwrócić uwagę, że wartość tych sił zależy także od położenia elementu zaworowego oraz czasu trwania impulsu sterującego. Szczególnie dotyczy to siły elektromagnetycznej. Jak podaje autor [5] siła ta zależy od prądu przepływającego przez cewkę. Podczas włączania wtryskiwacza prąd ten zależy od czasu trwania impulsu sterującego zgodnie ze wzorem:

$$I = \frac{U}{R} \cdot \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t}\right) \quad (1.1)$$

Gdzie:

U – napięcie zasilania;

R – rezystancja cewki;

L – indukcyjność cewki;

t – czas trwania impulsu sterującego.

Zatem podczas otwierania uzyskanie siły o określonej wartości, pozwalającej na pokonanie sił docisku wymaga upływu pewnego czasu od chwili włączenia impulsu sterującego do początku ruchu elementu zaworowego, stanowiącego zwłokę załączania wtryskiwacza t_l (rysunek 1.2).

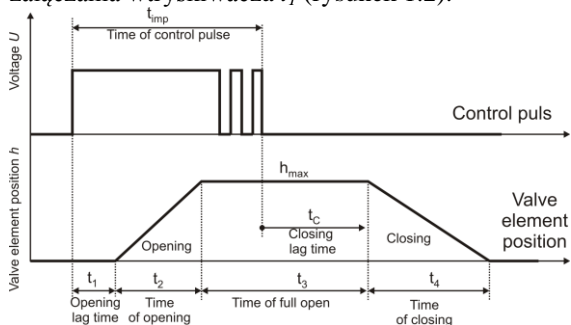


Fig. 1.2 Przebieg czasowy impulsu sterującego oraz położenia elementu zaworowego

Znajomość tej zwłoki jest istotna ze względu na sterowanie dawkowaniem paliwa [6, 7, 8, 9]. Decy-

duje ona o minimalnym realizowanym czasie impulsu sterującego a przez to także o minimalnej dawce paliwa jaką można podać do silnika. Dodatkowo decyduje ona o czasowym rozkładzie dostarczania paliwa do kolektora dolotowego i przez to na rozkładzie mieszanki w cylindrze.

Jak wynika z powyższych rozważań oraz wyników badań [10] opóźnienia te nie są stałe i zależą od warunków pracy wtryskiwacza. Niniejsza praca zawiera analizę zwłoki załączania wtryskiwacza gazowego dla różnych konstrukcji wtryskiwacza oraz różnych warunków jego pracy.

2. Opis badań

Celem pracy jest analiza wpływu napięcia zasilania i ciśnienia zasilania na zwłokę załączania dla różnych konstrukcji impulsowego wtryskiwacza gazu. Analiza ta stanowić będzie podstawę do stworzenia modelu empirycznego zwłoki załączania wtryskiwacza t_l rozumianej jako czasu między początkiem impulsu sterującego a rozpoczęciem ruchu przez element zaworowy (rys. 1.2).

2.1 Obiekty badań

Do badań wybrano typowe dla rynku instalacji gazowych rozwiązania konstrukcyjne impulsowych wtryskiwaczy gazu. Różnią się one zarówno elementem zaworowym (płytką, tłoczek), metodą kalibracji (średnicą otworu lub skokiem) oraz możliwością grupowania (pojedyncze, możliwe do grupowania, szyny paliwowe). Schemat podziały typów badanych wtryskiwaczy przedstawiono na rysunku 2.1 a dane techniczne w tabeli 2.1.

Tab. 2.1. Parametry techniczne badanych wtryskiwaczy

	Hana H2000	Horizon IG3	Magic Jet	Valtek typ 30	PlaniJet	WGs14
Rezystancja	1,9 Ω	2,8 Ω	2,0 Ω	3,0 Ω	4,0 Ω	3,0 Ω
Napięcie zasilania	12 V	12 V	12 V	12 V	12 V	12 V
Ciśnienie pracy	50 ÷ 300 kPa	50 ÷ 200 kPa	50 ÷ 300 kPa	50 ÷ 250 kPa	50 ÷ 300 kPa	50 ÷ 350 kPa
Maksymalne ciśnienie	450 kPa	450 kPa	450 kPa	450 kPa	450 kPa	450 kPa
Czas impulsu ciągłego	3,2 ms	2,8 ms	4,0 ms	4,5 ms	4,0 ms	1,7 ms
Wypełnienie sygnału modulowanego	40% ± 10%	50% ± 20%	40% ± 10%	> 30%	40% ± 10%	30%
Częstotliwość sygnału modulowanego	10 kHz	10 kHz	10 kHz	10 kHz	10 kHz	10 kHz
Czas opóźnienia otwarcia ¹	2,9 ms	2,5 ms	2,2 ms	3,3 ms	1,7 ms	1,0 ms
Czas wyłączenia ¹	1,2 ms	2,0 ms	1,0 ms	2,2 ms	2,5 ms	1,2 ms
Kalibrowanie	Kalibracja skokiem	Otworem dyszy średnice od 1,0 do 3,5 mm	Otworem dyszy średnice od 1,0 do 3,0 mm	Otworem dyszy średnice od 1,0 do 4,0 mm	Otworem dyszy średnice od 1,0 do 3,0 mm	Kalibracja skokiem
Zakres temperatury pracy	-40°C ÷ 120°C	-20°C ÷ 120°C	-20°C ÷ 120°C	-20°C ÷ 120°C	-20°C ÷ 120°C	-20°C ÷ 120°C

¹ przy ciśnieniu zasilania 100 kPa i czasie impulsu sterującego 12 ms

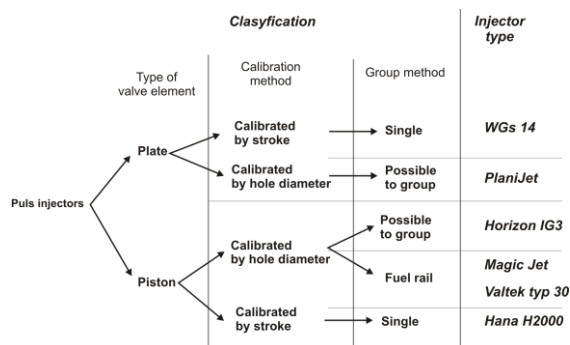


Fig. 2.1 Klasyfikacja obiektów badań

Badania przeprowadzono na 6 konstrukcjach:

1. Hana H2000 firmy Hana Engineering, Korea;
2. Horizon IG3 firmy Rail SpA, Włochy;
3. Magic Jet firmy HL Propan s.r.o., Czechy;
4. Valtek typ 30 firmy Valtek SpA Unipersonale, Włochy;
5. PlaniJet firmy Planiplastic Ireneusz Moćko, Polska;
6. WGs 14 firmy BD Plus Andrzej Pryzowicz, Polska.

2.2 Stanowisko badawcze

Podstawą do analiz były badania stanowiskowe na stanowisku pozasilnikowym, umożliwiającym badanie impulsowych wtryskiwaczy gazu zasilanych powietrzem. Stanowisko składa się z (rys. 2.2):

- a) układu pneumatycznego obejmującego sekcję przygotowania powietrza, stabilizacji jego przepływu, wtryskiwacza gazu, sekcji stabilizacji przepływu i przepływomierza masowego;
- b) systemu sterowania wraz z układem zasilania elektrycznego umożliwiającemu regulację napięcia w pożądanym zakresie – prostownik z filtrem RC zasilany poprzez autotransformator;
- c) systemu pomiarowego NI cDAQ-9178 z kartami pomiarowymi NI-9215 BNC mierzącymi sygnały:

- sygnał sterujący (sygnał przekazywany wewnątrz jednostki sterującej z procesora do klucza prądowego);
- napięcie w obwodzie cewki elektromagnetycznej;
- prąd w obwodzie cewki elektromagnetycznej;
- ciśnienie zasilania wtryskiwacza;
- ciśnienie za wtryskiwaczem mierzone w dwóch odległościach od dyszy;
- przyspieszenia w osi ruchu elementu zaworowego.

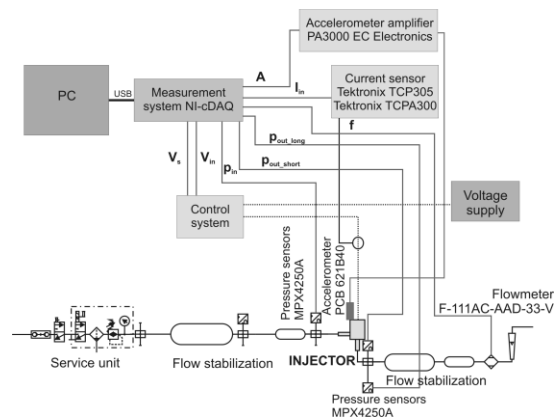


Fig. 2.2 Schemat stanowiska badawczego

2.3 Metoda analizy wyników

W celu określenia zwłoki załączania zastosowano metodę analizy ciśnienia za wtryskiwaczem. Ze względu na dużą różnicę ciśnień między zasilaniem a odbiorem rozpoczęcie przepływu powoduje powstanie fali ciśnieniowej w przewodzie za wtryskiwaczem. Metoda zastosowana w badaniach polega na określeniu chwili czasowej rozpoczęcia tej fali ciśnienia.

Ze względów konstrukcyjnych niemożliwe jest jednak przeprowadzenie pomiaru ciśnienia bezpośrednio pod elementem zaworowym. Oddalenie czujnika od tego elementu powoduje powstanie zwłoki czasowej wynikającej z ograniczonej prędkości rozchodzenia się fali ciśnienia. Dlatego też zastosowano pomiar w dwóch, oddalonych od siebie punktach przewodu wylotowego (rys. 2.3). Pozwoli to na określenie prędkości ruchu fali ciśnieniowej zgodnie ze wzorem:

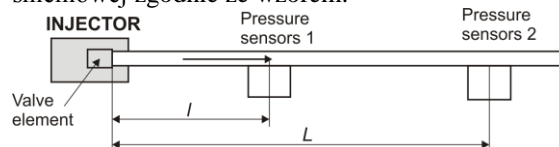


Fig. 2.3 Schemat metody wyznaczania opóźnienia czasowego fali ciśnienia

$$V_p = \frac{L-l}{t_{p12}} \quad (2.1),$$

gdzie:

l – odległość pierwszego punktu pomiaru ciśnienia od wylotu wtryskiwacza,

L – odległość drugiego punktu pomiaru ciśnienia od wylotu wtryskiwacza,

t_{p12} – czas opóźnienia pierwszej fali ciśnienia między oboma punktami pomiarowymi.

Tak wyznaczona prędkość fali ciśnienia pozwala na określenie przesunięcia czasowego sygnału ciśnienia dla wybranego czujnika zgodnie ze wzorami:

$$\delta t_1 = \frac{l}{v_p} \quad (2.2)$$

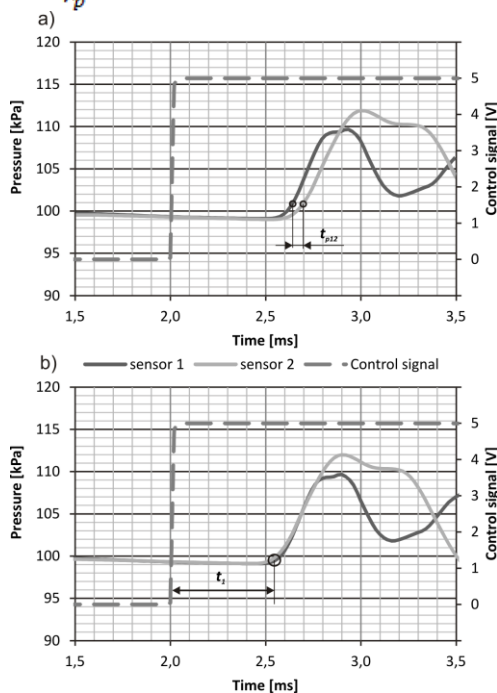


Fig. 2.4 Przebieg czasowy sygnałów z dwóch czujników ciśnienia i sygnału sterującego zmierzonych (a) oraz skorygowanych (b)

Rysunek 2.4 przedstawia przykładową analizę zmierzonych sygnałów oraz przeprowadzenie korekcji zgodnie z powyższymi wzorami. Widoczne jest przesunięcie początku narastania sygnałów ciśnienia o określony czas t_{p12} (rys. 2.4a). Pozwala on na wyznaczenie przesunięcia sygnałów ciśnienia i wyznaczenie zwłoki załączenia t_l (rys. 2.4b).

2.4 Zakres badań

Zakres badań obejmował przeprowadzenie dwóch serii badawczych dla każdego typu impulsowego wtryskiwacza gazu. Założono wykonanie następujących prób:

1. Zmiana ciśnienia zasilania (125 kPa, 150 kPa, 175 kPa, 200 kPa, 225 kPa, 250 kPa, 270 kPa) przy stałym napięciu zasilania (12 V).
2. Zmiana napięcia zasilania (9 V, 10 V, 11 V, 12 V, 13 V, 14 V) przy stałym ciśnieniu zasilania (200 kPa).

Wybór wartości stałych wynikał z tego, że są to wartości typowe dla pracy impulsowego wtryskiwacza gazu w warunkach eksploatacyjnych [4].

Przyjęto także następujące stałe parametry pracy wtryskiwacza:

- a) Ciśnienie odbioru (ciśnienie do którego prowadzony był wtrysk): 100 kPa;
- b) Czynnik roboczy: powietrze;
- c) Temperatura czynnika roboczego: $25 \pm 5^\circ\text{C}$;
- d) Badania w warunkach ustalonych.

W każdym punkcie badawczym analizie poddano minimum 200 kolejnych cykli pracy. Wyniki badań przedstawiają wartości uśrednione.

3. Wyniki badań

W pierwszym cyklu badań przeprowadzono analizę wpływu ciśnienia zasilania na zwłokę załączenia (rys. 3.1).

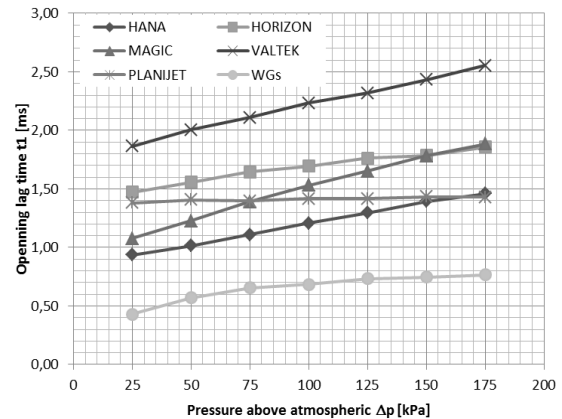


Fig. 3.1 Zależność zwłoki załączenia od nadciśnienia zasilania dla poszczególnych konstrukcji impulsowych wtryskiwaczy gazu.

Jak można zauważyć, zwłoka załączenia t_l jest praktycznie liniowo zależna od nadciśnienia zasilania Δp , przy czym jej nachylenie zależy od konstrukcji wtryskiwacza. Zwiększenie ciśnienia powoduje wzrost zwłoki załączenia t_l . Wynika to ze wzrostu siły wynikającej z różnicy ciśnień działających na obie strony elementu zaworowego, która musi być pokonana przez siłę przyciągania elektromagnetycznego cewki. Siła przyciągania elektromagnetycznego zależy od wartości prądu przepływającego w obwodzie, co z kolei zależy od czasu ładowania cewki (ilości energii w niej zgromadzonej) [4, 5].

Jedynie dla wtryskiwacza PlaniJet wartość nadciśnienia praktycznie nie wpływa na zwłokę załączenia t_l , podczas gdy dla pozostałych wtryskiwaczy przyrost zwłoki może wynosić ponad 70% przy zmianie nadciśnienia zasilania z 25 kPa do 175 kPa (wtryskiwacz Magic).

W drugim cyklu badań przeprowadzono analizę wpływu napięcia zasilania na zwłokę załączenia (rys. 3.2). Wraz ze wzrostem napięcia zasilania zwłoka załączenia t_l maleje, co wynika z większej ilości energii elektrycznej dostarczonej w tym samym czasie do cewki elektromagnetycznej, czyli szybszym uzyskiwaniem siły przyciągania elektromagnetycznego pozwalającej na rozpoczęcie ruchu elementu zaworowego. Zależność ta ma statystycznie charakter liniowy, przy czym dla poszczególnych konstrukcji nachylenie prostej jest różne. Powyższa zależność jest bardzo podobna we wszystkich wtryskiwaczach.

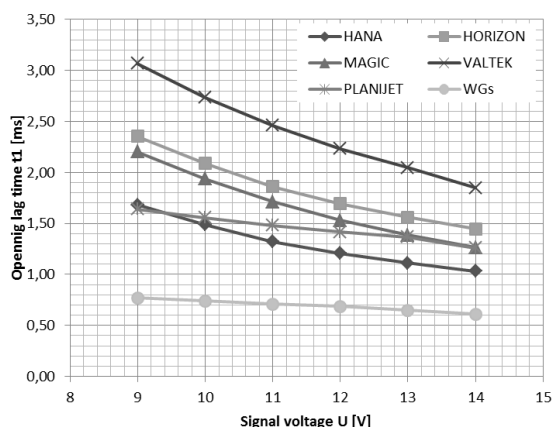


Fig. 3.2 Zależność zwłoki załączania od napięcia zasilania dla poszczególnych konstrukcji impulsowych wtryskiwaczy gazu

Należy podkreślić, że mimo identycznego charakteru zmiany, konstrukcje wtryskiwaczy płytkowych (WGs i PlaniJet) charakteryzują się dużo mniejszą wrażliwością zwłoki załączenia t_1 na zmianę napięcia zasilania. W przypadku tych dwóch konstrukcji zmiana napięcia w zakresie do 9 do 14 V powoduje zmianę zwłoki załączenia t_1 o około 25%. W przypadku wtryskiwaczy tłoczkowych (pozostałe konstrukcje) zmiana ta jest większa i wynosi około 55%. Wynika to głównie z różnicy kształtu obwodu elektromagnetycznego, a przez to wartości siły przyciągającej generowanej w układzie przy danej ilości energii elektrycznej dostarczonej do obwodu.

4. Model zwłoki załączania

Analizując powyższe wyniki badań można przyjąć, że zwłoka załączenia t_1 zależy od dwóch parametrów pracy wtryskiwacza:

- od różnicy ciśnień nad i pod elementem zaworowym $\Delta p = p_1 - p_2$,
- od napięcia w obwodzie zasilania wtryskiwacza U .

Analizując zarówno wyniki badań jak i zależność 1.1 przyjęto, że model zwłoki załączania zostanie zapisany jako zależność bazowej zwłoki załączania od ciśnienia zasilania korygowanej współczynnikiem poprawkowym zależnym od napięcia zasilania. Przeprowadzono analizę statystyczną aproksymacji na podstawie której model zwłoki załączania zapisano jako:

$$t_1 = k_{1U} \cdot t_{1p} \quad (4.1),$$

gdzie:

t_{1p} – bazowa zwłoka załączania [ms]:

$$t_{1p} = a_{1p} \cdot \Delta p + b_{1p} \quad (4.2)$$

k_{1U} – współczynnik poprawkowy [-]:

$$k_{1U} = a_{1U} \cdot U + b_{1U} \quad (4.3)$$

U – napięcie zasilania [V]

Δp – nadciśnienie zasilania [kPa]

$$\Delta p = p_1 - p_2 \quad (4.4)$$

p_1 – ciśnienie zasilania [kPa]

p_2 – ciśnienie zbiornika odbioru gazu [kPa]

W tabeli 4.1 przedstawiono wyniki identyfikacji parametrów modelu cząstkowego zwłoki załączania t_1 dla poszczególnych analizowanych konstrukcji wtryskiwacza.

Błąd aproksymacji jest wynosi on średnio 1,6% i nie przekracza dla żadnego wtryskiwacza 6%. Błąd wykazuje rozkład normalny i nie przejawia zależności od wartości niezależnych, co potwierdza poprawność wyboru stopnia modelu.

Tab. 4.1. Współczynniki modelu cząstkowego zwłoki załączania t_1

	Hana	Horizon	Magic	Valtek	PlaniJet	WGs
a_{1p} [10^{-3} ms/kPa]	3,581	2,489	5,421	4,483	0,306	2,061
b_{1pc} [ms]	0,844	1,433	0,964	1,768	1,380	0,449
a_{1U} [1/V]	-0,106	-0,106	-0,122	-0,107	-0,051	-0,046
b_{1U} [-]	2,299	2,301	2,494	2,307	1,612	1,539

5. Podsumowanie

Analizując wykonane badania można sformułować następujące wnioski:

- Zastosowanie metody pomiaru szybkości rozchodzenia się fali ciśnienia w przewodzie za impulsowym wtryskiwaczem gazu pozwala na określenie zwłoki załączania.
- Zwłoka załączania liniowo zależy od nadciśnienia zasilania. Wzrost nadciśnienia powoduje wzrost zwłoki załączania. Zależ-

ność ta jest praktycznie identyczna we wszystkich analizowanych typach konstrukcji impulsowych wtryskiwaczy gazu.

- Zwłoka załączania liniowo zależy od napięcia zasilania. Wzrost napięcia powoduje spadek wartości zwłoki załączania. Zależność jest różna dla konstrukcji płytkowych i tłoczkowych. Większą podatność na zmianę napięcia wykazują wtryskiwacze tłoczkowe.

Nomenclature/Skróty i oznaczenia

CNG Compressed Natural Gas/*sprężony gaz ziemny*

LPG Liquefied Petroleum Gas/*gaz skroplony*

Bibliography/Literatura

- [1] Bleischwitz R., Bader N.: „Policies for the transportation toward a hydrogen economy: The EU case” *Energy Policy* 38 (2010) 5388-5398
- [2] Litschke A., Knitschky G.: „Future development in road freight transport regarding more environmentally friendly vehicle technology” *Procedia – Social and Behavioral Sciences* 48 (2012) 1557 – 1567
- [3] Kenihan S.: Reducing the emissions from your council fleet. Cities for Climate Protection Australia: An ICLEI program in collaboration with the AGO, <http://www.iclei.org>, 1999
- [4] Czarnigowski J.: „Teoretyczno-empiryczne studium modelowania impulsowego wtryskiwacza gazu” *Monografie Politechnika Lubelska, Lublin* 2012
- [5] Elbaum J.: „Obwody magnetyczne” Państwowe Wydawnictwa Techniczne Warszawa 1959
- [6] Grabowski Ł., Wendeker M., Czarnigowski J., Szczęsny P., Barański G. i Sochaczewski R.: „Analiza wpływu umieszczenia wtryskiwacza LPG na parametry pracy silnika o zapłonie iskrowym” *PTNSS-2007-SS4-222 Silniki Spalinowe*, nr 4/2007 str. 33-41., 2007
- [7] Grabowski Ł.: „Badania procesu tworzenia mieszanki w silniku o zapłonie iskrowym zasilanym wtryskiem gazu propan-butan” *Rozprawa doktorska. Politechnika Lubelska, Lublina* 2009
- [8] Jakliński P., Czarnigowski J., Wendeker M.: „The Effect of Injection Start Angle of Vaporized LPG on SI Engine Operation Parameters” *SAE* 2007-01-2054
- [9] Jakliński P., Grabowski Ł., Wendeker M., Czarnigowski J., Szczęsny P., Barański G., Sochaczewski R.: „Analiza wpływu umieszczenia wtryskiwacza LPG na parametry pracy silnika o zapłonie iskrowym” *PTNSS-2007-SS4-222 Silniki Spalinowe*, nr 4/2007 str. 33-41
- [10] Czarnigowski J., Jakliński P., Wendeker M., Barański G., Pietrykowski K., Duk M.: „The influence of Input Pressure on Gas Injector Opening and Closing Lag Time” *PTNSS-2009-SC-054 Combustion Engines Silniki Spalinowe Special Series* 2009-SC1 str. 103-108

Mr Jacek Czarnigowski, MSc., DEng. – Assistant Professor in the Faculty of Mechanical Engineering at Lublin University of Technology.

Dr inż. Jacek Czarnigowski – adiunkt na Wydziale Mechanicznym Politechniki Lubelskiej.

