

Badania eksperymentalne wpływu napięcia zasilania na czas otwierania wtryskiwacza gazu

Abstract. This paper presents the results of experimental pulsed gas injectors for automotive fuel gas supply system. 6 structurally different injectors were tested. Shown opening times of individual structures. The influence of voltage on the injector opening time. Has been shown to significantly impact the supply voltage for the duration of the opening and sets the sensitivity of the individual structures to change it. (**Experiments on the effect of control signal duty cycle on pulse gas injector closing time**).

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań doświadczalnych impulsowych wtryskiwaczy gazu przeznaczonych do samochodowych instalacji zasilania paliwem gazowym. Przebadano 6 różniących się konstrukcyjnie wtryskiwaczy. Określono czasy otwierania poszczególnych konstrukcji. Analizowano wpływ napięcia zasilania na czas otwierania wtryskiwacza. Wykazano znaczący wpływ wartości napięcia zasilania na czas otwierania oraz określono czułość poszczególnych konstrukcji na jego zmianę.

Keywords: experimental studies, supply voltage, gas injector, opening time, internal combustion engine.

Słowa kluczowe: badania eksperymentalne, napięcie zasilania, wtryskiwacz gazowy, czas otwierania, silnik spalinowy.

doi:10.12915/pe.2014.04.37

Wprowadzenie

Aktualnie najważniejsze w rozwoju silników spalinowych stosowanych w pojazdach jest obniżanie emisji dwutlenku węgla [1, 2]. Prace badawcze prowadzone są w dwóch kierunkach. Pierwszy dotyczy zwiększenia sprawności całkowitej silników a drugi stosowania paliw o zmniejszonej zawartości węgla [3, 4]. W tym drugim kierunku zamiast paliw wysokowęglowych (takich jak benzyna i olej napędowy) wprowadzane są paliwa o znacznie mniejszej zawartości węgla głównie: propan-butan (LPG), metan (CNG) czy wodór. Wymaga to opracowywania układów paliwowych zdolnych do poprawnego zasilania trakcyjnych silników spalinowych. Obecnie najpowszechniej stosowane są układy zasilania wtryskiem sekwencyjnym. Gaz w postaci lotnej dozowany jest do kolektora dolotowego silnika poprzez elektromagnetyczne wtryskiwacze sterowane impulsowo z elektronicznej jednostki sterującej (w układach zależnych naśladującej oryginalny wtrysk benzyny). Poprawność dozowania (wtryskiwania) paliwa ma zasadnicze znaczenie dla poprawności pracy silnika i nawet niewielkie niedoskonałości pracy wtryskiwaczy powodują znaczące pogorszenie pracy silnika a to z kolei znacząco zwiększa emisję nie tylko CO₂ ale również innych związków uznanych za szkodliwe: CO, HC, NOx itp. [5-7].

Zbudowanie precyzyjnego i trwałego wtryskiwacza gazu lotnego nie jest łatwe. W przeciwieństwie do wtryskiwaczy paliw ciekłych, gdzie wydatek zależny jest niemal wyłącznie od pierwiastka różnicy ciśnień przed i za wtryskiwaczem, a wpływ ciśnienia paliwa jest pomijalnie mały [3], wtryskiwacze paliw gazowych odmierzają duże objętościowe dawki paliwa (co wiąże się najczęściej z ze znaczną szczeliną powietrzną elektromagnesu wykonawczego i znacznymi siłami), a przepływający płyn jest ściśliwy. Wyżej wymienione cechy powodują, że charakterystyki wtryskiwaczy gazowych są znacznie bardziej złożone niż wtryskiwaczy paliw ciekłych. [8, 9]. Jednakże, charakterystykę wtryskiwacza można kształtować także przez sposób sterowania [10, 11].

Wtryskiwacze gazu są zaworami dwustanowymi normalnie zamkniętymi [8, 12]. Po podaniu napięcia na cewkę wtryskiwacza jego elektrozawór (tu. element zaworowy) zmienia położenie (z zamkniętego na otwarte) i następuje rozszczelnienie wtryskiwacza czyli wtrysk paliwa. Ilość wypływającego paliwa w warunkach ustalonych jest określana wydatkiem wtryskiwacza.

Położenie elementu zaworowego jest zależne od bilansu trzech sił:

- siły docisku elementu zaworowego wynikającej z różnicy ciśnień nad i pod tym elementem,
- siły docisku elementu zaworowego przez element sprężysty,
- siły elektromagnetycznego przyciągania elementu zaworowego do cewki elektromagnetycznej [12].

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 [13], siła ta zależy od prądu przepływającego przez cewkę. Podczas włączania wtryskiwacza prąd ten zależy od czasu trwania impulsu sterującego zgodnie ze wzorem:

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

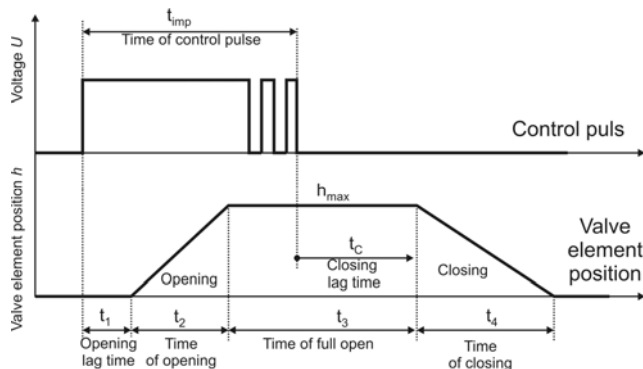
gdzie: I – natężenie prądu, U – napięcie zasilania, R – rezystancja cewki, L – indukcyjność obwodu elektromagnetycznego, t – czas trwania impulsu sterującego.

Zatem uzyskanie siły o określonej wartości podczas otwierania, pozwalającej na pokonanie sił docisku, wymaga upływu pewnego czasu od chwili pojawienia się impulsu sterującego do początku ruchu elementu zaworowego, stanowiącego zwłokę załączania wtryskiwacza t_1 (Rys. 1). Po tym czasie element zaworowy zaczyna zmieniać swoje położenie z pozycji zamkniętej na otwarte. Czas ten określono jako czas otwierania t_2 (ruch elementu zaworowego). Obie te wartości powinny być zatem liniowo zależne od napięcia zasilania wtryskiwacza, które może się zmieniać w wyniku wahań napięcia w instalacji elektrycznej pojazdu od ok. 9V do 14V a w stanach awaryjnych nawet poza tymi granicami.

Znajomość zwłoki otwierania jaki i czasu otwierania oraz zależność tych wielkości od warunków pracy jest istotna ze względu na sterowanie dawkowaniem paliwa [5-7]. Decydują one o minimalnym czasie impulsu sterującego, a tym samym o minimalnej, możliwej do realizacji, dawce paliwa jaką zasila się silnik. Dodatkowo decydują o czasowym rozłokowaniu paliwa w kolektorze (depozycji paliwa) i przez to wpływają na rozkład mieszanki

w cylindrze co dalej skutkuje jakością spalania i składem spalin. [5, 7].

Niniejsza praca zawiera badania stanowiskowe wpływu napięcia zasilania na czas otwierania t_2 dla różnych konstrukcji wtryskiwaczy gazu.



Rys.1. Przebieg czasowy impulsu sterującego oraz położenia elementu zaworowego

Metodyka badań

Badania przeprowadzono na popularnych na rynku jednak różniących się konstrukcyjnie wtryskiwaczach gazu (tab. 1 i 2). Różnią się one zarówno elementem zaworowym (płytką, tłoczek), metodą kalibracji (średnicą otworu lub skokiem) czy możliwością grupowania (pojedyncze, możliwe do grupowania, szyny paliwowe).

Tabela 1. Badane wtryskiwacze gazu

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

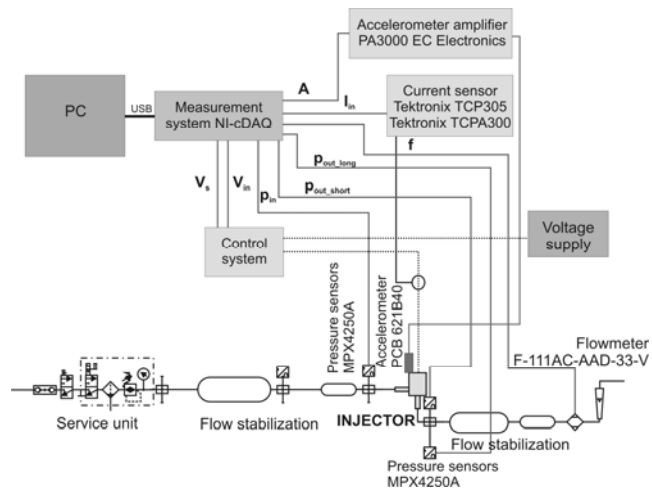
Tabela 2. Parametry techniczne badanych wtryskiwaczy gazu

Lp.	Nazwa	Typ	Rezystancja cewki	Ciśnienie pracy
1	Hana H2000	Tłoczkowy, pojedynczy, kalibrowany skokiem	1,9 Ω	50 – 300 kPa
2	Horizon IG3	Tłoczkowy, możliwy do grupowania, kalibrowany średnicą otworu	2,8 Ω	50 – 200 kPa
3	Magic Jet	Tłoczkowy, możliwy do grupowania, kalibrowany średnicą otworu	2,0 Ω	50 – 300 kPa
4	Valtek typ 30	Tłoczkowy, szyna paliwowa (4 sekcje), kalibrowany średnicą otworu	3,0 Ω	50 -250 kPa
5	PlaniJet	Płytkowy, możliwy do grupowania, kalibrowany średnicą otworu	4,0 Ω	50 – 300 kPa
6	WGs 14	Płytkowy, pojedynczy, kalibrowany skokiem	3,0 Ω	50 – 350 kPa

Badania zostały wykonane na Politechnice Lubelskiej na specjalnie opracowanym i zbudowanym stanowisku testowym STWG-1, umożliwiającym badanie impulsowych wtryskiwaczy gazu zasilanych powietrzem. Dokładny opis stanowiska, zastosowanych metod pomiarowych oraz dane techniczne wtryskiwaczy przedstawiono w pracy [12]. Stanowisko składa się z (rys. 2):

- układu pneumatycznego obejmującego:
 - układ przygotowania powietrza obejmujący oczyszczenie powietrza, jego osuszenie oraz redukcję i stabilizację ciśnienia na zadanym poziomie,
 - układ stabilizacji przepływu dolotowego,
 - wtryskiwacz gazu,
 - sekcje stabilizacji przepływu do pomiaru wydatku;
 - układu pomiaru przepływu w postaci przepływomierza masowego oraz rotametry;
- systemu sterowania – jednostka sterująca pozwalająca na sterowanie wtryskiwaczem z regulacją częstotliwości impulsów jak i jego parametrów (długości impulsu ciągłego, częstotliwości i wypełnienia sygnału modulowanego);
- układu zasilania elektrycznego umożliwiającego regulację napięcia w pożądanym zakresie – prostownik z filtrem RC zasilany poprzez autotransformator;
- 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 – mierzone bezpośrednio w obwodzie;
 - prąd w obwodzie cewki elektromagnetycznej – mierzony z wykorzystaniem sondy prądowej Tektronix TCP305;
 - ciśnienie zasilania wtryskiwacza – mierzone czujnikiem ciśnienia typu MPX4250A;
 - ciśnienie za wtryskiwaczem mierzone w dwóch odległościach od dyszy – mierzone czujnikiem ciśnienia typu MPX4250A;
 - przyspieszenia w osi ruchu elementu zaworowego – mierzone czujnikiem drgań PCB 621B40 wraz ze wzmacniaczem PA3000 EC Electronics.

Całość stanowiska obsługiwana była z pojedynczego komputera na którym znajdowało się programowanie służące do komunikacji z jednostką sterującą jak i oprogramowanie do obsługi kart pomiarowych, analizy i zapisu danych. Analizy wykonywano w oddzielnym oprogramowaniu po zakończeniu pomiarów.



Rys.2. Stanowisko badawcze

Mierzono czas otwierania kolejnych wtryskiwaczy zmieniając napięcie zasilania w granicach od 9 V do 14 V co 1 V. Przyjęto także następujące stałe parametry pracy wtryskiwacza:

- ciśnienie zasilania: 200 kPa,
- ciśnienie odbioru: 100 kPa,
- czynnik roboczy: powietrze,
- temperatura czynnika roboczego: $25 \pm 5^\circ\text{C}$,
- badania w warunkach ustalonych.

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

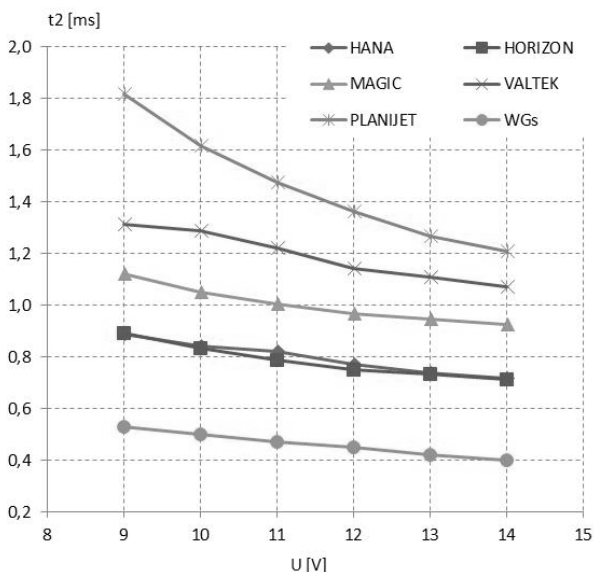
Czas otwierania określono na podstawie wyznaczenia chwili początku i końca ruchu elementu zaworowego. W tym celu zastosowano dwie metody opisane odpowiednio w pracach [12, 14]. Chwilę czasową początku ruchu elementu zaworowego wyznaczono na podstawie analizy ciśnienia w przewodzie wyjściowym za wtryskiwaczem. Oceniając (zgodnie z wytycznymi pracy [14]) chwilę czasową pojawienia się fali ciśnienia za wtryskiwaczem na dwóch czujnikach oddalonych od siebie o znaną odległość wyznaczono szybkość rozchodzenia się fali ciśnienia w tych warunkach a dzięki temu przesunięcie czasowe sygnału. Odnosząc je do chwili czasowej rozpoczęcia sygnału sterującego wyznaczono chwilę początku ruchu elementu zaworowego.

Koniec ruchu elementu zaworowego określono na podstawie analizy drgań w osi ruchu elementu zaworowego [12]. Element ten uderzając w powierzchnię oporową ograniczającą jego ruch wywołuje drgania rejestrowane przez akcelerometr. Chwila czasowa zarejestrowania pierwszego znaczącego przyspieszenia w osi ruchu elementu zaworowego jest chwilą uderzenia elementu zaworowego, a więc chwilą zakończenia otwierania.

Analizowany w niniejszym artykule czas otwierania jest określany jako czas wykonywania ruchu elementu zaworowego od chwili jego rozpoczęcia (wyznaczonego na podstawie analizy ciśnień) do chwili zakończenia (wyznaczonego na podstawie drgań).

Analiza wyników badań

Na rysunku 3 przedstawiono wyniki pomiaru czasu otwierania uzyskane przy różnych napięciach zasilania wtryskiwacza dla wszystkich badanych konstrukcji.



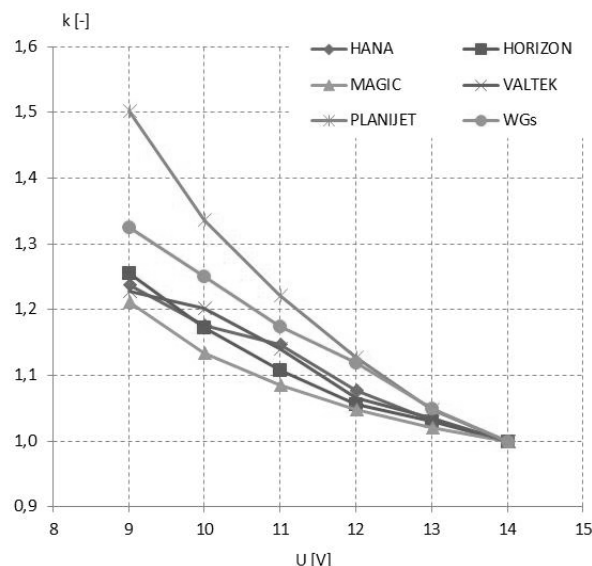
Rys.3. Zależność czasu otwierania od napięcia zasilania dla badanych wtryskiwaczy gazu

Widoczne jest, że zawsze wraz ze zwiększaniem napięcia zasilania czas otwierania t_2 zmniejsza się. Wynika to z większej ilości energii elektrycznej dostarczanej w tym samym okresie czasu do cewki elektromagnetycznej. Większa ilość energii powoduje zwiększenie siły przyciągania elektro-magnetycznego a to z kolei zwiększa prędkość postępową zwory (elementu zaworowego). Zależność ta ma statystycznie charakter liniowy. Widoczne jest, że dla większości wtryskiwaczy linie charakterystyki zależności czasu otwierania od napięcia zasilania są praktycznie równoległe. Jedynie dla wtryskiwacza PlaniJet charakterystyka jest bardziej stroma.

Dla lepszego zobrazowania powyższego zjawiska przeprowadzono standaryzację wartości czasu otwierania t_2 do wartości tej otrzymanej przy nominalnym napięciu zasilania wynoszącym 14 V (napięcie zasilania instalacji pojazdu przy pracującym silniku). Wyznaczono współczynnik k określający względną wartość czasu otwierania zgodnie ze wzorem:

$$(2) \quad k = \frac{t_{2(U)}}{t_{2(14V)}}$$

gdzie: $t_{2(U)}$ – zwłoka załączania przy określonym napięciu zasilania U , $t_{2(14V)}$ – zwłoka załączania przy napięciu zasilania $U = 14V$.



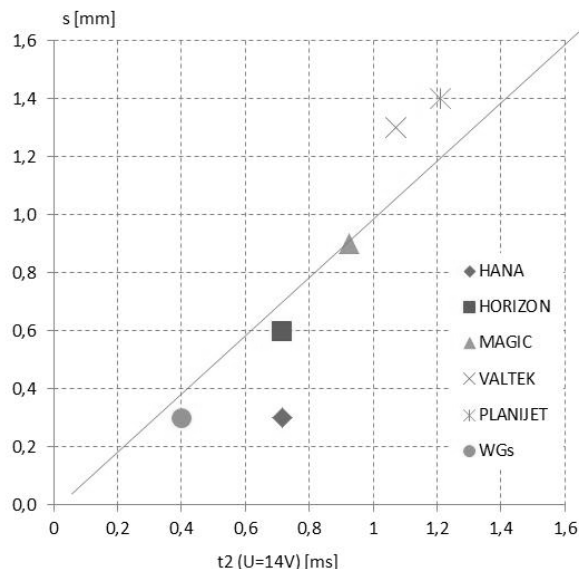
Rys.4. Względna wartość czasu otwierania k od napięcia zasilania dla badanych wtryskiwaczy gazu

Zależność współczynnika k od napięcia zasilania przedstawiono na rysunku 4. Widoczne jest, że charakterystyki dla 4 konstrukcji (Magic, Hana, Horizon i Valtek) praktycznie się pokrywają. Zmiana napięcia zasilania z 14 V na 9 V powoduje ok. 20÷25% zwiększenie czasu otwierania. Natomiast w przypadku pozostałych wtryskiwaczy (wtryskiwaczy płytkowych WGs 14 oraz PlaniJet) zmiany te są większe i wynoszą odpowiednio około 32% i 50%.

Analizując rysunek 3 można również zauważyć, że każdy z wtryskiwaczy charakteryzuje się innym (indywidualnym) czasem otwierania nawet niezależnie od napięcia zasilania. Najkrótsze czasy otwierania uzyskano dla wtryskiwacza WGs 14 (14 V – 0,4 ms 9 V – 0,53 ms) a najdłuższe dla PlaniJet (14 V – 1,21 ms i 9 V – 1,82 ms). Jest to bardzo istotny parametr pod względem precyzji dawkowania gazu. Im jest on krótszy tym krótszy jest czas stabilizacji początku wypływu [12], a co za tym idzie

zwiększa się liniowość zależności masy podanego gazu od czasu trwania impulsu sterującego.

Czas otwierania zależy w dużej mierze od konstrukcji wtryskiwacza - głównie od skoku s elementu zaworowego. Zależność tą można obserwować na rysunku 5 gdzie pokazano zależność czasu otwierania od skoku s przy zasilaniu prądem o napięciu 14 V. Poza wtryskiwaczem Hana zależność ta jest zbliżona do liniowej. Im większy skok tym dłuższy czas otwierania a tym samym większy niekorzystny wpływ na pracę wtryskiwacza. Jednocześnie można zauważyć, że we wszystkich analizowanych konstrukcjach średnia prędkość ruchu elementu zaworowego jest zbliżona i wynosi około 1 m/s.



Rys. 5. Zależność czasu otwierania uzyskanego przy 14 V zasilania od skoku elementu zaworowego

Z charakterystyk uzyskanych podczas badań można również wnioskować, że zwiększenie napięcia zasilania pozwoli zmniejszyć czas otwierania. Np. zwiększając napięcie zasilania wtryskiwacza Planijet do ok 16÷17 V można się spodziewać czasu otwierania zbliżonego do wtryskiwacza Valtek przy 14V itp. Oznacza to, że na zmniejszenie czasu otwierania nie tylko wpływ mają cechy konstrukcyjne wtryskiwacza ale również warunki jego zasilania elektrycznego.

Podsumowanie

Z przeprowadzonych badań wynika, że wraz ze zwiększaniem napięcia zasilania czas otwierania t_2 zmniejsza się, a zależność ta ma statystycznie charakter liniowy.

Czas otwierania wtryskiwacza zależy nie tylko od jego cech konstrukcyjnych (wielkość zwory, skok czy wielkość cewki) ale również od warunków jego sterowania (zasilania elektrycznego). Wpływ napięcia zasilania na czas otwierania jest znaczący i wynosi w badanych konstrukcjach od ok. 20% do 50%.

Wydaje się również, że odpowiednio duże zwiększanie napięcia zasilania (w rozsądnych granicach) skróci czas otwierania wtryskiwacza co tym samym znacząco poprawi dokładność dozowania paliwa gazowego do silnika. Oznacza to, że niedoskonałości budowy wtryskiwacza można minimalizować na etapie projektowania elektronicznej jednostki sterującej stosując np. wyższe

napięcia zasilania wtryskiwaczy gazowych lub stabilizację napięcia niezależnie od napięcia układu elektrycznego pojazdu.

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 re-garding more environmentally friendly vehicle technology, *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 48 (2012), 1557-1567
- [3] Hunicz J., Kordos. P., An experimental study of fuel injection strategies in CAI gasoline engine, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 35 (2011), 243-252
- [4] Kenihan S., Reducing the emissions from your council fleet. Cities for Climate Protection Australia: An ICLEI program in collaboration with the AGO, (1999) <http://www.iclei.org>
- [5] Jakliński P., Badania wpływu parametrów sekwencyjnego wtrysku gazu propan-butan na pracę silnika o zapłonie iskrowym, *Rozprawa doktorska. Politechnika Lubelska*, Lublin 2005
- [6] Grabowski Ł., Badania procesu tworzenia mieszanki w silniku o zapłonie iskrowym zasilanym wtryskiem gazu propan-butan *Rozprawa doktorska. Politechnika Lubelska*, Lublina 2009
- [7] Jakliński P., Czarnigowski J., Wendeker M., The Effect of Injection Start Angle of Vaporized LPG on SI Engine Operation Parameters, *SAE 2007-01-2054*, (2007)
- [8] Czarnigowski J., Jakliński P., Wendeker M., Pietrykowski K., Grabowski Ł., The Analyses of the Phenomena Inside a CNG Flap-valve Injector During Gas Flow, *PTNSS-2009-SS1-101 Combustion Engines, Silniki Spalinowe 1* (2009), 10-18
- [9] Wendeker M., Grabowski Ł., Jakliński P., Czarnigowski J., Duk M., Badania symulacyjne wpływu odległości dyszy wtryskowej gazu od komory spalania na proces homogenizacji mieszaniny paliwowo-powietrznej, *Monografia „Silniki gazowe. Wybrane zagadnienia” pod redakcją Adama Dużyńskiego*, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej (2010), Częstochowa, 523-533
- [10] Wendeker M., Jakliński P., Czarnigowski J., Boulet P., Breaban F., Operational Parameters of LPG Fueled SI Engine – Comparison of Simultaneous and Sequential Port Injection, *SAE 2007-01-2051*
- [11] Zyska T., Czarnigowski J., Jakliński P., Koncepcja elektronicznej jednostki sterującej pracą gwiazdowego tłokowego silnika lotniczego, *Przegląd elektrotechniczny (Electrical Review)*, 86 (2010), nr 7, 235-237
- [12] Czarnigowski J., Teoretyczno-empiryczne studium modelowania impulsowego wtryskiwacza gazu, *Monografie Politechnika Lubelska*, Lublin 2012
- [13] Elbaum J., Obwody magnetyczne, *Państwowe Wydawnictwa Techniczne*, Warszawa 1959
- [14] Czarnigowski J., The model of pulse injection opening lag time, *PTNSS-2013-SC-041, Combustion Engine*, 1 (2013), 154(3), 393-398

Autorzy:

dr inż. Piotr Jakliński, Politechnika Lubelska, Katedra Termodynamiki, Mechaniki Płynów i Napędów Lotniczych, ul. Nadbaltycka 36, 20-618 Lublin, E-mail: p.jaklinski@pollub.pl;
dr hab. inż. Jacek Czarnigowski, Politechnika Lubelska, Katedra Postaw Konstrukcji Maszyn, ul. Nadbaltycka 36, 20-618 Lublin, E-mail: j.czarnigowski@pollub.pl;
dr inż. Tomasz Zyska, dr inż. Mariusz Duk, Politechnika Lubelska, Instytut Elektroniki i Technik Informacyjnych, ul. Nadbaltycka 38a, 20-618 Lublin, E-mail: t.zyska@pollub.pl; m.duk@pollub.pl.