

Badania eksperymentalne wpływu wypełnienia sygnału sterującego na czas wyłączenia impulsowego wtrysku gazu

Abstract. The paper presents the results of experiments on the relationship between parameters of modulated control signal and gas injectors' closing time. The experiments were conducted in a test-bed supplied with constant pressure. The modulated control signal was of constant duration, variable duty cycle and variable frequency. The authors prove that reduction of duty cycle causes reduction of injector's closing time. However, frequency of the signal has no effect on closing time. (**Experiments on the effect of control signal duty cycle on pulse gas injector closing time**).

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych wpływu parametrów sygnału sterującego (sygnału modulowanego) na czas wyłączenia impulsowych wtryskiwaczy gazu. Badania przeprowadzono na stanowisku sprężarkowym przy stałym ciśnieniu zasilania i czasie trwania impulsu sterującego a zmiennym wypełnieniu i zmiennej częstotliwości sygnału modulowanego. Wykazano, że zmniejszenie wypełnienia sygnału modulowanego powoduje skrócenie czasu wyłączenia. Jednocześnie wykazano, że częstotliwość sygnału modulowanego nie wpływa na czas wyłączenia.

Keywords: experimental studies, PWM, duty cycle, gas injector, closing time, internal combustion engine.

Słowa kluczowe: badania eksperymentalne, sterowanie modulowane, wypełnienie sygnału, wtryskiwacz gazowy, czas wyłączenia, silnik spalinowy.

doi:10.12915/pe.2014.03.45

Wprowadzenie

Silniki spalinowe nadal stanowią podstawę napędu pojazdów samochodowych. Ze względów ekologicznych rozwoju silników spalinowych obecnie jest skierowany na obniżanie emisji dwutlenku węgla [1, 2]. Prace badawcze prowadzone są w dwóch kierunkach. Pierwszy dotyczy zwiększenia sprawności silników a drugi stosowania paliw o zmniejszonej zawartości węgla [3, 4].

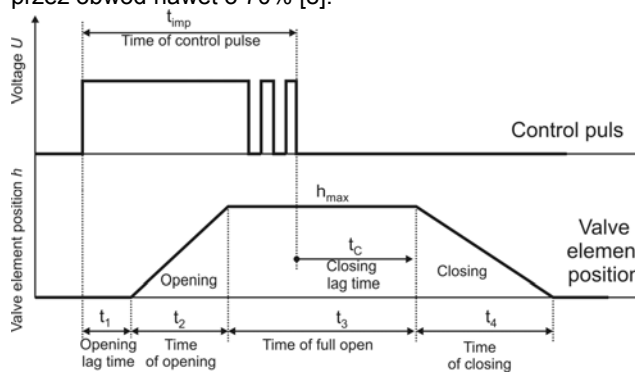
Zamiast paliw wysokowęglowych (takich jak benzyna i olej napędowy) wprowadzane są paliwa o znacznie mniejszej zawartości węgla głównie: propan-butan (LPG), metan (CNG) czy wodór. Podstawową różnicą tych paliw jest także ich stan skupienia. W odróżnieniu od obecnie stosowanych paliw są to paliwa gazowe. Wymaga to zmiany układów zasilania oraz sterowania.

Obecnie układy zasilania paliwami gazowymi są układami z wtryskiem sekwencyjnym. Gaz w postaci lotnej dozowany jest do kolektora dolotowego silnika poprzez elektromagnetyczne wtryskiwacze sterowane impulsowo z elektronicznej jednostki sterującej. Ze względów ekologicznych istotna jest dokładność dozowania (wtryskiwania) paliwa. Niewielkie odchylenie składu mieszanki od wartości zakładanej (w wyniku niedokładności ilości podawanego paliwa) 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, 6, 7]. Istotna jest zatem zarówno konstrukcja elementu wykonawczego (impulsowego wtryskiwacza gazu) jak i jego sterowanie.

Zbudowanie precyzyjnego i trwałego wtryskiwacza gazu lotnego nie jest łatwe. Wiąże się to przede wszystkim z wielkością kanałów przepływowych. Zmiana stanu paliwa z ciekłego na gazowy powoduje wzrost przekroju kanałów o około 300 razy. Oznacza to znaczny wzrost wymiarów i masy elementów zaworu. Wzrost ten prowadzi do zwiększenia bezwładności ruchu elementów. Aby utrzymać odpowiednie czasy działania wtryskiwacza konieczne jest znaczące zwiększenie sił przyciągania elementu zaworowego, a zatem parametrów konstrukcyjnych cewki elektromagnetycznej [8]. Uzyskuje się to poprzez zwiększenie jej wymiarów oraz znaczące obniżenie rezystancji. Wtryskiwacze gazu posiadają najczęściej cewki

o rezystancji około 2 Ω w stosunku do 14 Ω wtryskiwaczy benzyny. Zmiana ta powoduje wzrost siły cewki ale także ilości energii elektrycznej przez nią zużywanej. Ma to negatywny wpływ na ilość wydzielanej energii cieplnej.

Rozwiązaniem stosowanym w układach sterowania jest wprowadzenie zmiany sterowania ze sterowania ciągłego na sterowanie modulowane [7, 8, 9, 10, 11, 12]. Na początku (zależnie od konstrukcji wtryskiwacza od 1,7 do 5 ms) sygnał jest ciągły – rysunek 1. Po tym czasie następuje przełączenie na sterowanie modulowane. Najczęściej stosowane jest sterowanie o częstotliwości 10 kHz i wypełnieniu 30% choć stosuje się też 40%, 50% i 70%. Pozwala to na obniżenie średniego prądu przepływającego przez obwód nawet o 70% [8].



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

Pojawia się jednak pytanie czy tak znacząca zmiana nie wpływa na charakterystykę czasową wtryskiwacza, a szczególnie na czas wyłączenia – t_c rysunek 1. Niniejsza praca zawiera badania stanowiskowe wpływu parametrów sygnału modulowanego na czas wyłączenia t_c dla różnych konstrukcji wtryskiwaczy gazu.

Badania stanowiskowe

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).

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 [8].

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	Voltran	Planiplastic Ireneusz Moćko	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

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 i 14]. Stanowisko składało się z:

- a) Obwodu pneumatycznego obejmującego:
 - układ przygotowania powietrza (oczyszczenie powietrza, jego osuszenie oraz redukcję, regulację i stabilizację ciśnienia zasilania wtryskiwacza),
 - zbiorników stabilizacji przepływu powietrza zasilającego wtryskiwacz,
 - wtryskiwacza gazu,
 - sekcje stabilizacji przepływu za wtryskiwaczem (zbiorniki i kryzy);
 - układu pomiaru uśrednionego przepływu gazu (przepływomierz masowy oraz rotametr);
- b) Układu sterowania – jednostka sterująca pozwalająca na sterowanie wtryskiwaczem z regulacją częstotliwości impulsów jak i jego parametrów

- c) Układu zasilania elektrycznego umożliwiającego regulację napięcia zasilania wtryskiwacza;
- d) Systemu pomiarowego NI cDAQ-9178 z kartami pomiarowymi NI-9215 BNC mierzącymi sygnały:
 - sygnał sterujący (sygnał wewnątrz jednostki sterującej wysyłany od 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 z odpowiednim wzmacniaczem;
 - ciśnienie zasilania wtryskiwacza – mierzone czujnikiem ciśnienia typu MPX4250A tuż przed wejściem do wtryskiwacza;
 - 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.

Stanowisko wyposażone było w komputer z oprogramowaniem służącym do komunikacji z jednostką sterującą oraz oprogramowanie do obsługi kart pomiarowych, analizy i zapisu danych. Analizy wykonywano w oddzielnym oprogramowaniu po zakończeniu pomiarów.

Zakres badań obejmował przeprowadzenie serii badań każdego typu wtryskiwacza obejmującej zmianę stopnia wypełnienia sygnału modulowanego (do 10 do 100% co 10%) oraz częstotliwości modulowania (2, 5, 7, 10, 13 i 15 kHz) dla czasu impulsu sterującego 6 ms. Przyjęto także następujące stałe parametry pracy wtryskiwacza:

- a) ciśnienie zasilania: 200 kPa,
- b) ciśnienie odbioru: 100 kPa,
- c) czynnik roboczy: powietrze,
- d) temperatura czynnika roboczego: 25±5°C,
- e) czas impulsu sygnału ciągłego: 3ms,
- f) napięcie zasilania: 12V,
- g) badania w warunkach ustalonych.

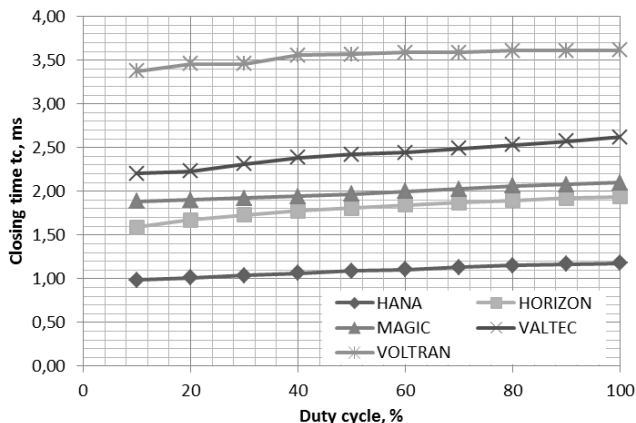
W każdym punkcie badawczym analizie poddano minimum 200 kolejnych cykli pracy. Wykorzystano metodę analizy czasu zamykania opisaną w pracy [13]. Bazuje ona na analizie przyspieszeń występujących w osi ruchu elementu zaworowego w czasie pracy wtryskiwacza. Ze względu na dużą masę elementu zaworowego w stosunku do łącznej masy wtryskiwacza oraz duże prędkości jego ruchu w chwili uzyskania skrajnych położenia (w przypadku otwarcia – powierzchni oporowej cewki do której przyciągany jest element zaworowy, w przypadku zamknięcia – gniazda zaworowego) osiągnięcie punktu skrajnego zakończenia ruchu zawsze powoduje rejestrowane uderzenie. Uderzenie to powoduje drgania o znacznej amplitudzie w osi ruchu elementu zaworowego. Umieszczenie akcelerometru w tej osi pozwala na rejestrację tych drgań i na ich podstawie określenie chwili czasowej odpowiadającej za osiągnięcie skrajnego punktu ruchu elementu zaworowego. Ze względu na małe gabaryty wtryskiwacza oraz dużą prędkość rozchodzenia się fal nie wymagana jest korekcja związana z oddaleniem czujnika od miejsca uderzenia.

W opisanych w niniejszym artykule badaniach w/w metodę zastosowano do określenia chwili czasowej osiągnięcia przez element zaworowy skrajnego położenia zamknięcia (czyli gniazda zaworowego). Jej odległość czasowa od chwili wyłączenia sygnału sterującego jest miarą czasu opóźnienia wyłączenia wtryskiwacza.

Wyniki badań przedstawiają wartości uśrednione.

Analiza wyników badań

Na rysunku 2 przedstawiono wyniki pomiaru czasu wyłączenia uzyskane przy różnym wypełnieniu sygnału modulowanego i stałej częstotliwości (10kHz) dla wszystkich badanych konstrukcji.



Rys.2. Zależność czasu wyłączenia od wypełnienia sygnału modulowanego dla badanych wtryskiwaczy gazu

Widoczne jest, że każda konstrukcja charakteryzuje się inną wartością czasu wyłączenia. Najmniejszą wartość uzyskano dla wtryskiwacza Hana (około 1,0 ms) zaś największą dla wtryskiwacza Voltran (około 3,6 ms). Pozostałe konstrukcje uzyskują czasu w granicach 1,8 do 2,5 ms.

Widoczne jest także, że zmiana wypełnienia sygnału modulowanego powoduje wzrost wartości czasu wyłączenia. Wynika to ze wzrostu ilości zgromadzonej energii w cewce w chwili wyłączenia sygnału sterującego. Wzrost ten wynosi średnio około 0,25 ms przy zmianie wypełnienia od 10 do 100%. Zmiana ta nie jest jednakowa dla poszczególnych konstrukcji, choć jej charakter jest jednakowy (zbliżony do liniowego, statystycznie liniowy).

Aby dokładniej przeanalizować tą zmianę przeprowadzono standaryzację wartości czasu wyłączenia t_C do wartości tej otrzymanej przy najczęściej stosowanym w układach wypełnieniu równym 30%. Wyznaczono współczynnik k_d określający względną wartość czasu wyłączenia zgodnie ze wzorem:

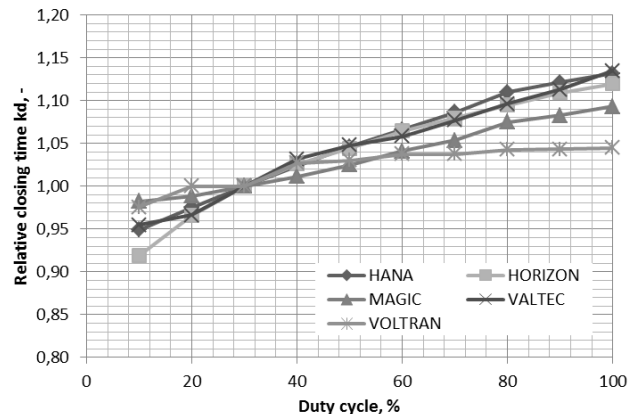
$$(1) \quad k_d = \frac{t_{C(D)}}{t_{C(30\%)}}$$

gdzie: $t_{C(D)}$ – czas wyłączenia przy określonym wypełnieniu impulsu sterującego, $t_{C(30\%)}$ – czas wyłączenia przy wypełnieniu impulsu sterującego równym 30%.

Zależność współczynnika k_d od wypełnienia sygnału modulowanego przedstawiono na rysunku 3. Widoczne jest bardzo zbliżone zachowanie badanych konstrukcji na zmianę wypełnienia sygnału modulowanego. Wzrost wypełnienia z 30% do 100% powoduje wzrost czasu wyłączenia o około 10%. Jedyne dla wtryskiwacza Voltran wzrost ten jest mniejszy i wynosi około 5%. Zmniejszenie wypełnienia z 30 do 10% powoduje spadek czasu wyłączenia o około 3%. Zależność jest liniowa – z godnie z przeprowadzoną analizą statystyczną badań.

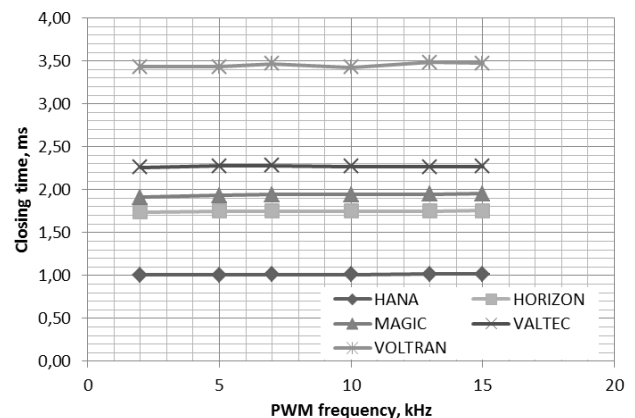
Można zatem przyjąć, że konstrukcja wtryskiwacza nie wpływa znacząco na zależność czasu wyłączenia od wypełnienia sygnału modulowanego. Wynika to głównie z odpowiedniego doboru wielkości (a przez to także pojemności energetycznej) cewki do wielkości, masy i zakresu ruchu elementu zaworowego. Zwiększenie elementu zaworowego prowadzi do zwiększenia sił wymuszających ruch w kierunku gniazda zaworowego (siła sprężyny i siła pochodząca od różnicy ciśnień) ale

jednocześnie prowadzi do zwiększenia wielkości i pojemności energetycznej cewki.



Rys.3. Względna wartość czasu wyłączenia k_d od wypełnienia sygnału modulowanego dla badanych wtryskiwaczy gazu

Na rysunku 4 przedstawiono wyniki pomiaru czasu wyłączenia uzyskane przy zmiennej częstotliwości sygnału modulowanego przy stałym wypełnieniu wynoszącym 30%. We wszystkich badanych konstrukcjach zmiana częstotliwości sygnału praktycznie nie wpływa na czas wyłączenia.



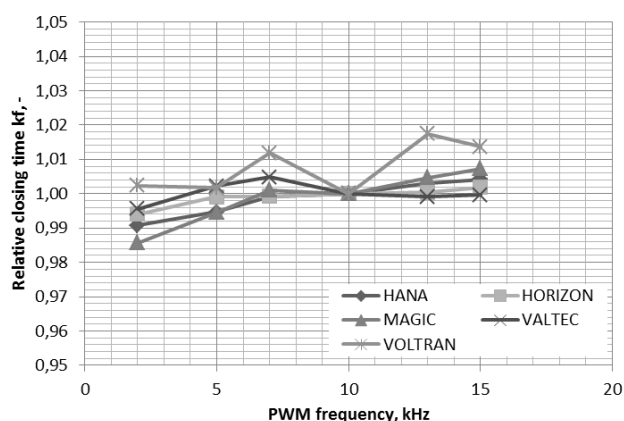
Rys.4. Zależność czasu wyłączenia od częstotliwości sygnału modulowanego dla badanych wtryskiwaczy gazu

Aby dokładnie to zobrazować przeprowadzono standaryzację wartości czasu wyłączenia t_C do wartości tej otrzymanej przy najczęściej stosowanej w układach częstotliwości 10kHz. Wyznaczono współczynnik k_f określający względną wartość czasu wyłączenia zgodnie ze wzorem:

$$(2) \quad k_f = \frac{t_{C(f)}}{t_{C(10kHz)}}$$

gdzie: $t_{C(f)}$ – czas wyłączenia przy określonej częstotliwości sygnału sterującego, $t_{C(10kHz)}$ – czas wyłączenia przy częstotliwości sygnału sterującego równej 10 kHz.

Zależność współczynnika k_f od częstotliwości sygnału modulowanego przedstawiono na rysunku 5. Analizując statystycznie uzyskane wyniki można stwierdzić, że zmiana czasu wyłączenia nie jest zależna od częstotliwości sygnału modulowanego. Uzyskane wyniki mieszczą się w przedziale $\pm 1\%$, a zatem w zakresie błęd pomiarowego.



Rys.5. Względna wartość czasu wyłączenia k_f od częstotliwości sygnału modulowanego dla badanych wtryskiwaczy gazu

Takie zachowanie wynika głównie z bezwładności energetycznej cewki oraz bezwładności magnetycznej całego obwodu magnetycznego. Zmiana częstotliwości wprowadzania energii do układu (w badanych zakresie) praktycznie jest filtrowana przez w/w bezwładności. Wybór częstotliwości pozostaje zatem w gestii konstruktora jednostki sterującej.

Podsumowanie

Z przeprowadzonych badań wynika, że wraz ze wzrostem wypełnienia sygnału modulowanego czas wyłączenia t_c rośnie, a zależność ta ma statystycznie charakter liniowy. Wzrost wypełnienia ze standardowych 30% do 100% powoduje w większości badanych konstrukcji wzrost czasu wyłączenia o około 10%. Wartość ta ma znaczący wpływ zarówno na charakterystykę czasową wtryskiwacza jak i masową. Wydłużenie czasu wyłączenia to przedłużenie czasu wypływu gazu z wtryskiwacza a co za tym idzie wzrost masy podanego gazu. Zmiana ta jest proporcjonalna nie tylko do stopnia zmiany czasu wyłączenia ale także do czasu łącznego impulsu sterującego. Ma to zatem istotne znaczenie dla precyzji sterowania wtryskiwaczem.

Zmiana częstotliwości sygnału modulowanego nie ma wpływu na wartość czasu wyłączenia. Zaobserwowana zmiana mieści się w zakresie błędów pomiarowych. Nie ma ona zatem znaczenia przy projektowaniu i kalibracji algorytmów sterowania.

Opracowując układ sterowania konieczne jest wzięcie pod uwagę planowanych parametrów sterowania sygnału modulowanego, gdyż będą one wpływać na charakterystykę czasową oraz masową wtryskiwacza gazu. Aby poprawnie sterować masą wtryskiwanego paliwa konieczna jest znajomość charakterystyki wtryskiwacza sterowanego zgodnie z przyjętymi parametrami, gdyż ich zmiana będzie wpływać na poprawność identyfikacji parametrów funkcji sterowania.

REFERENCES

[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., Teoretyczno-empiryczne studium modelowania impulsowego wtryskiwacza gazu, *Monografia Politechnika Lubelska*, Lublin 2012

[9] 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

[10] 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 str. 523 – 533

[11] 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*

[12] 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

[13] Duk M., Czarnigowski J.: Metoda pośredniej identyfikacji czasu opóźnienia otwierania impulsowego wtryskiwacza gazu, *Przegląd elektrotechniczny (Electrical Review)*, 88 (2012), nr 10b, 59-63

[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. Mariusz Duk, dr inż. Tomasz Zyska, *Politechnika Lubelska, Instytut Elektroniki i Technik Informacyjnych, ul. Nadbystrzycka 38a, 20-618 Lublin, E-mail: m.duk@pollub.pl; t.zyska@pollub.pl;*
 dr hab. inż. Jacek Czarnigowski, *Politechnika Lubelska, Katedra Postaw Konstrukcji Maszyn, ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, E-mail: j.czarnigowski@pollub.pl;*
 dr inż. Piotr Jakliński, *Politechnika Lubelska, Katedra Termodynamiki, Mechaniki Płynów i Napędów Lotniczych, ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, E-mail: p.jaklinski@pollub.pl;*
 mgr inż. Aigul Iskakova, *Satpaev, Satpaeva 22, Almaty, Kazakhstan, E-mail: iskakowa1979@mail.ru;*