

## The impact of a material used in a gas injector magnetic core on gas injector performance

*Abstract: The paper describes the results of the bench testing on a gas injector whose magnetic core was made from two materials – steel S235JR and 04J the Armco. The analysis has dealt both with the injector mass flow and opening and closing delay times. It has been shown that replacing magnetically soft material (Armco) recommended for magnetic circuit elements with much cheaper ordinary carbon steel strongly change injection mass flow. This is due to reduced opening delay time and increased closing delay time, which is caused by permanently magnetised elements in an injector magnetic circuit. The paper also provides the value of the changes in the delay times for the tested injector design and their impact on injector delivery.*

Key words: injector, steel, magnetic core, opening delay time, closing delay time.

### Wpływ materiału magnetowodu wtryskiwacza gazu na jego pracę

*Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki badań stanowiskowych wtryskiwacza gazu, którego magnetowód wykonany został z dwóch materiałów – stali S235JR oraz 04J Armco. Analizie poddano zarówno wydatek wtryskiwacza jak też czasy opóźnienia otwarcia i zamknięcia. Wykazano, że zmiana materiału z magnetycznie miękkiego (Armco) zalecanego na elementu obwodów magnetycznych, na zwykłą stal węglową, znacznie tańszą, powoduje znaczącą zmianę wydatku wtryskiwacza. Wynika to ze skrócenia czasu opóźnienia otwierania a wydłużenia się czasu opóźnienia zamykania, spowodowanego trwałym magnesowaniem się elementów obwodu magnetycznego wtryskiwacza. Przedstawiono także wartość zmian czasów opóźnienia dla badanej konstrukcji wtryskiwacza oraz wpływ tych zmian na wydatek.*

Słowa kluczowe: wtryskiwacz, stal, magnetowód, czas opóźnienia otwarcia, czas opóźnienia zamknięcia.

## 1. Wprowadzenie

Rozwój układów zasilania silników samochodowych paliwem gazowym (LPG i CNG) stanowi ciągłą walkę pomiędzy jakością a ceną.

Z jednej strony coraz bardziej rygorystyczne normy bezpieczeństwa i ekologiczne, narzucają na układy gazowe, wymuszają ciągłą poprawę jakości tychże systemów [9]. Uzyskanie wymaganej dokładności sterowania jakością mieszanki paliwowo-powietrznej, a zatem ilością podawanego gazu, wymusza zwiększenie precyzji wyznaczania niezbędnej dawki gazu, ale także zwiększenie dokładności jej podania. Powoduje to konieczność stosowania nie tylko coraz bardziej wyrafinowanych algorytmów sterowania, ale także coraz lepszych elementów wykonawczych.

Z drugiej strony zarówno zwiększająca się konkurencja, jak też adresowanie wyrobów do rynków „biednych”, wymusza ciągle obniżanie ceny wyrobów. Wynika to z faktu, że głównym motywem stosowania układów zasilania gazem jest chęć obniżenia kosztów eksploatacji pojazdu, a zatem szukanie oszczędności. Klient ostateczny jest zainteresowany maksymalizacją oszczędności przy minimalizacji kosztów poniesionych na jej uzyskanie, a więc kluczowym kryterium wyboru montowanej instalacji jest jej cena. Stąd poszukiwanie przez producentów wszelkich możliwości obniżenia ceny układów.

Te dwie przeciwstawne siły wymuszają od konstruktorów ciągle ulepszanie konstrukcji [2, 4, 5, 7, 8] w celu obniżenia kosztów przy jednoczesnym utrzymaniu, lub nieznacznej poprawie, jakości poszczególnych komponentów, w tym wtryskiwaczy. Czasami jednak działania oszczędnościowe prowadzić mogą do niespodziewanej utraty jakości wyrobu.

Prowadząc badania eksperymentalnych wtryskiwaczy autor zauważył pojawienie się zjawiska znaczącej zmiany wydatku wtryskiwacza po kilkunastu godzinach jego pracy, przy czym zjawisko to występowało tylko w wybranych egzemplarzach identycznej konstrukcji. Jediną różnicą tychże egzemplarzy był materiał z jakiego wykonano magnetowody cewek.

Niniejszy artykuł zawiera analizę tego przypadku wraz z wskazaniem mechanizmu prowadzącego do tego zjawiska.

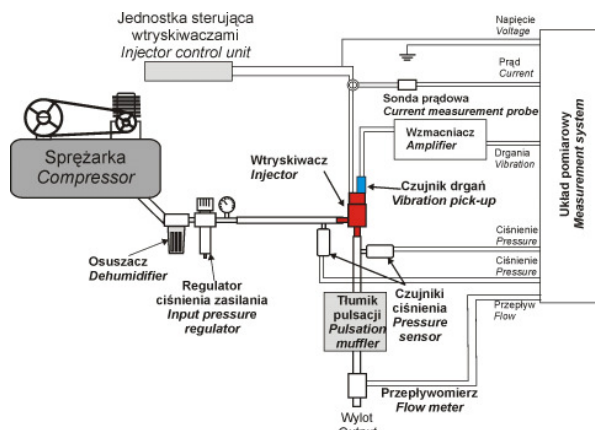
## 2. Opis badań

### 2.1 Stanowisko badawcze

Badania przeprowadzone zostały na stanowisku badawczym zbudowanym na Politechnice Lubelskiej (Rysunek 2.1). Stanowisko to posiada układ przygotowania powietrza, sekcję wtryskiwacza oraz układy pomiarowe. Układ przygotowania powietrza obejmuje sprężarkę tłokową, osu-

szacz powietrza oraz membranowy regulator ciśnienia zasilania. Doprowadza on powietrze do sekcji wtryskiwaczowej, w której zamocowany jest badany wtryskiwacz. Całe stanowisko wyposażone jest w układy pomiarowe.

Praca stanowiska sterowana jest przez badawczą jednostkę sterującą, opracowaną na Politechnice Lubelskiej pozwalającą na sterowanie wtryskiwaczem z dowolną częstotliwością, długością trwania impulsu wtrysku oraz przebiegiem prądu.



Rys. 2.1. Stanowisko badawcze [3]  
Fig. 2.1. Test stand [3]

Na stanowisku zamontowano układ pomiarowy firmy National Instruments NI CompactDAQ cDAQ-9178 z kartami pomiarowymi NI 9215, umożliwiającymi równoczesny pomiar sygnałów napięciowych z częstotliwością do 100kHz. W czasie badań mierzono:

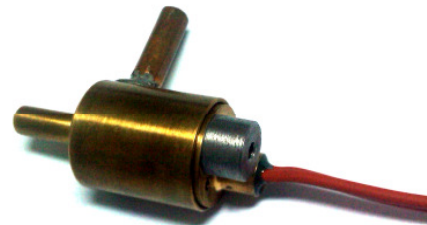
- sygnał sterujący – mierzony bezpośrednio przez kartę pomiarową;
- prąd w obwodzie cewki wtryskiwacza – mierzony za pomocą sondy prądowej Tektronix TCP305 wraz ze wzmacniaczem TCPA300;
- drgania w osi ruchu elementu zaworowego wtryskiwacza – mierzony za pomocą czujnika PCB M353B12 o czułości 5,50mV/g wraz ze wzmacniaczem ECElectronics VibAMP PA-3000.

Jednocześnie dokonywano pomiaru masowego przepływu powietrza za pomocą przepływomierza powietrza firmy FESTO serii SFET-F100-L-WQ6-B-K1. Przepływomierz zabudowano za elementem tłumika pulsacji tak aby uzyskiwać stabilną w czasie badań wartość będącą wartością uśrednionego wydatku wtryskiwacza. Na podstawie zmierzonej wartości wyznaczany był wydatek wtryskiwacza w pojedyńczym wtrysku.

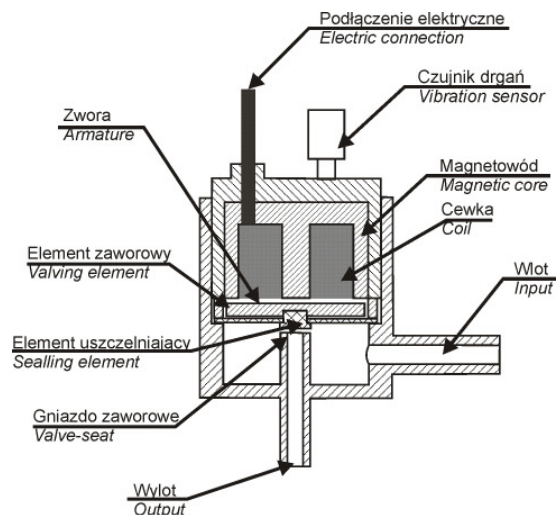
Wszystkie czujniki zasilane były z zasilacza laboratoryjnego utrzymującego stałe napięcie zasilania w czasie pomiarów.

## 2.2 Obiekt badań

Badania przeprowadzono na eksperymentalnym wtryskiwaczu opracowanym między innymi przez autora artykułu (rysunek 2.2). Jest to konstrukcja płytkowa, w której element zaworowy (w postaci płytki) porusza się prostopadle do osi wypływu gazu (rysunek 2.3). Płytką stanowi jednocześnie zwoję obwodu magnetycznego oraz element zaworowy, uszczelniający gniazdo zaworowe.



Rys. 2.2. Obiekt badań [3]  
Fig. 2.2. Research object [3]



Rys. 2.3. Schemat konstrukcji obiektu badań [3]  
Fig. 2.3. Scheme of the research object [3]

Wtryskiwacz wyposażony jest w cewkę elektromagnetyczną o rezystancji 2,4  $\Omega$ .

Badania przeprowadzono na dwóch egzemplarzach wtryskiwacza różniących się materiałem magnetowodu. Są to odpowiednio:

- Wtryskiwacz A – stal konstrukcyjna S235JR wg EN10025
- Wtryskiwacz B – stal niskostopowa magnetycznie miękka 04J wg PN-89/H-84023/02

## 2.3 Zakres badań

Badania przeprowadzono dla stałych warunków pracy wtryskiwacza, obejmujących:

- medium: powietrze;
- ciśnienie zasilania: 220 kPa ( $\pm 10$ kPa);
- temperatura gazu: 25°C ( $\pm 7$ °C);
- napięcie zasilania wtryskiwacza: 12,3V;

- e) czas impulsu sterującego: 5ms;
- f) rodzaj impulsu sterującego: 2 ms sygnał stały oraz 3 ms podtrzymania prądowego o częstotliwości 10kHz i wypełnieniu 30%;
- g) częstotliwość impulsów: 20Hz;

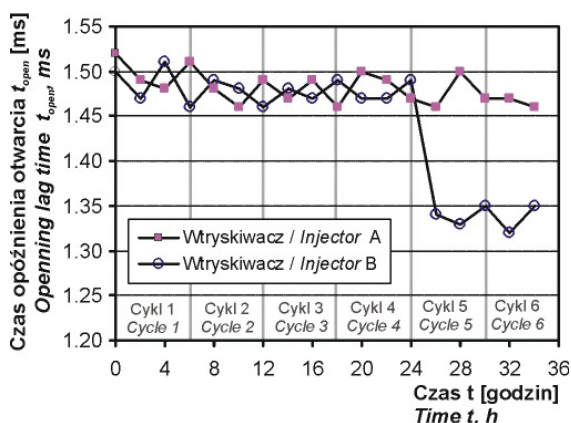
Badania przeprowadzono w 6-cio godzinnych cyklach ciągłej pracy. Po przeprowadzeniu pojedynczego cyklu następowała 18-to godzinna przerwa. Taki dobór czasów pracy i przerwy wynikał z chęci odtworzenia warunków zbliżonych do normalnej eksploatacji.

W czasie badań co dwie godziny dokonywano pomiarów, na podstawie których wyznaczano następujące parametry pracy wtryskiwacza:

- a) wydatek wtryskiwacza  $m$  [mg] – wyznaczany na podstawie pomiarów z przepływomierza;
- b) czas opóźnienia otwarcia wtryskiwacza  $t_{open}$  [ms] – wyznaczany w oparciu o sygnał drgań w osi ruchu elementu zaworowego [3];
- c) czas opóźnienia zamknięcia wtryskiwacza  $t_{close}$  [ms] – wyznaczany w oparciu o sygnał drgań w osi ruchu elementu zaworowego [3].

## 2.4 Wyniki badań

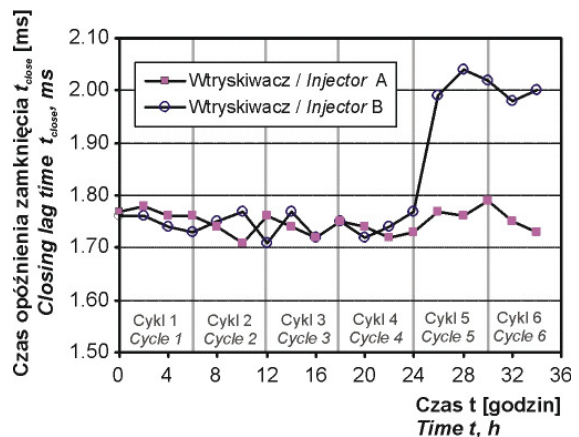
Na rysunku 2.4 przedstawiono wyznaczone w trakcie badań czasy otwarcia  $t_{open}$  obu wtryskiwaczy. Jak można zauważyć w początkowym okresie pomiarów (pierwsze 4 cykle badań) wartości dla obu wtryskiwaczy są jednakowe, jednak między 4 a 5 cyklem (czyli po 24 godzinach badania) nastąpiła gwałtowna zmiana obu wartości dla wtryskiwacza B. Czas opóźnienia otwarcia obniżył się z 1,48 ms na 1,34 ms.



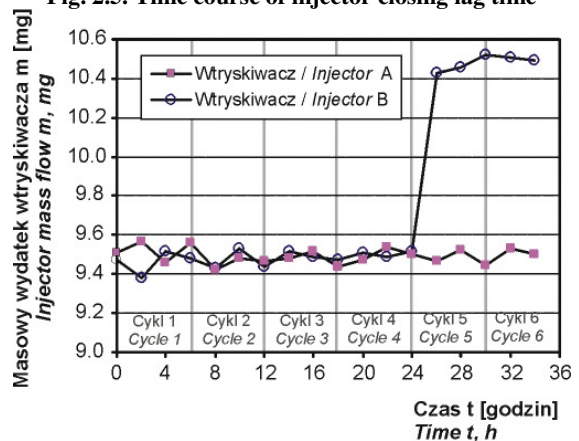
Rys. 2.4. Przebieg czasów otwarcia wtryskiwacza  
Fig. 2.4. Time course of injector opening lag time

Zmiana występuje także w przypadku czasu opóźnienia zamknięcia  $t_{close}$  wtryskiwacza B (rysunek 2.5). Podobnie jak w przypadku czasu opóźnienia otwarcia, tak i w tym przypadku w początkowej fazie pomiarów wartości czasów opóźnienia

zamknięcia obu wtryskiwaczy były jednakowe ale między 4 a 5 cyklem badań (czyli po 24 godzinach czasu) opóźnienia zamknięcia wtryskiwacza B wzrósł z 1,75 ms na 2,00 ms.



Rys. 2.5. Przebieg czasów zamknięcia wtryskiwacza  
Fig. 2.5. Time course of injector closing lag time



Rys. 2.6. Przebieg wydatku wtryskiwacza  
Fig. 2.6. Time course of injector mass flow

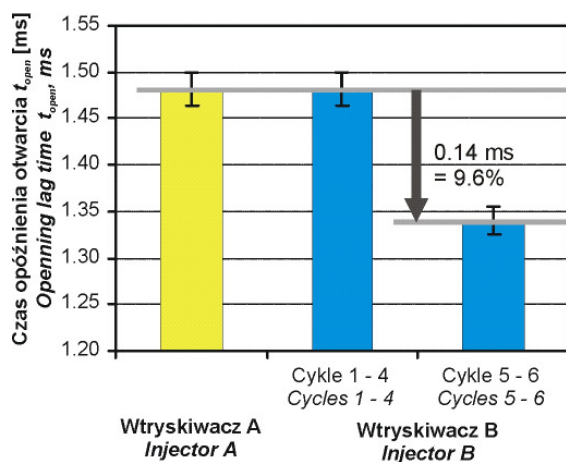
Zmiany obu czasów opóźnienia miały także wpływ na wydatek wtryskiwacza (rysunek 2.6). W przypadku wtryskiwacza B wydatek wzrósł z 9,49 mg do aż 10,48 mg przy impulsie wtryskowym wynoszącym 5 ms.

## 3. Analiza wyników i dyskusja

Analizując uzyskane wyniki, można zauważyć, że przez początkowe ponad 24 godziny pracy (4 pełne cykle badań) oba badane wtryskiwacze pracowały identycznie. Miały te same czasy opóźnienia otwarcia (rysunek 3.1) i zamknięcia (rysunek 3.2) a co za tym idzie także ten sam wydatek masowy (rysunek 3.3). Jednak po 24 godzinie (pomiędzy 4 a 5 cyklem badań) nastąpiła znacząca zmiana pracy wtryskiwacza B.

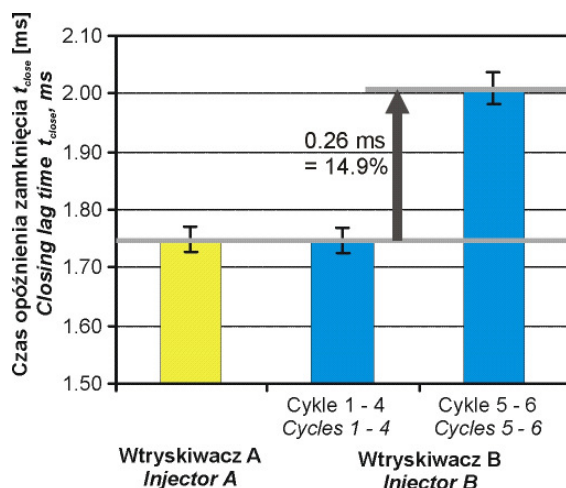
Czas opóźnienia otwarcia (rysunek 3.1) spadł o 0,14 ms co stanowi 9,6% wartości początkowej. Jednocześnie czas opóźnienia zamknięcia wzrósł o 0,26 ms co stanowi aż 14,9% wartości wyjściowej. Jednocześnie odchylenia standardowe obu

wartości nie uległy zmianie (oznaczone jako słupki błędów na rysunkach 3.1 i 3.2). Zmiany te są znaczące statystycznie.



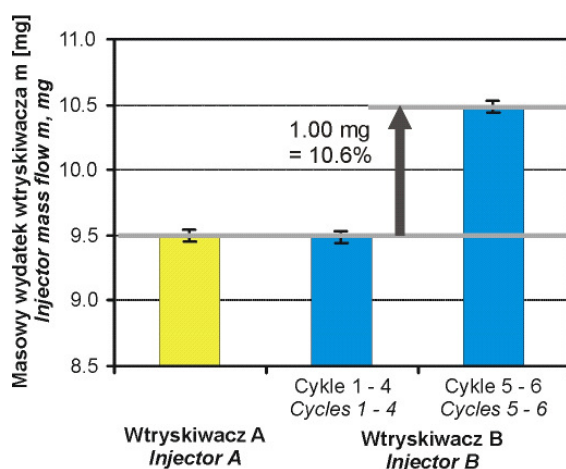
Rys. 3.1. Średnie wartości czasów otwarcia wtryskiwacza

Fig. 3.1. Mean values of injector opening lag time



Rys. 3.2. Średnie wartości czasów zamknięcia wtryskiwacza

Fig. 3.2. Mean values of injection closing lag time



Rys. 3.3. Średnie wartości wydatku wtryskiwacza

Fig. 3.3. Mean value of injector mass flow

Zmianie uległ także wydatek wtryskiwacza (rysunek 3.3). Zmiana ta wynosi 1,00 mg co stanowi 10,6% wartości początkowej. Jest to bezpośrednia konsekwencja zmian czasów opóźnień. Ponieważ spadło opóźnienie otwarcia i jednocześnie wzrosło opóźnienie zamknięcia wzrósł łączny czas otwarcia wtryskiwacza (wypływu gazu), a co za tym idzie zwiększył się także wydatek masowy.

Powstaje zatem pytanie: co mogło spowodować tak znaczące zmiany?

Jak już podano poprzednio jedyną różnicą między oboma wtryskiwaczami był rodzaj materiału zastosowany na magnesowód cewki. Zastosowane stale różnią się składem chemicznym, a główna różnica związana jest z ilością węgla. W przypadku stali S235JR wynosi ona około 0,20% zaś w stali 04J tylko 0,035% - a zatem o prawie 10-cio krotnie mniej.

Jak podaje literatura [1, 6] zawartość węgla jest jednym z podstawowych czynników wpływających na właściwości magnetyczne stali, a dokładnie na podatność na magnesowanie i rozmagnesowywanie. Stale magnetycznie miękkie mają wąską pętlę histerezy (wykres natężenia pola magnetycznego od indukcji magnetycznej) co powoduje, że nie występują duże straty przy cyklicznej pracy magnesowania i rozmagnesowywania działaniem cewki elektromagnetycznej. Materiały takie rekomendowane są do stosowania w transformatorach oraz cewkach [1, 6].

Zastosowanie do konstrukcji poddanej cyklicznej zmienności pola elektromagnetycznego (tak jak to mam miejsce w cewce wtryskiwacza) materiału o szerszej pętli histerezy powoduje wzrost strat (zwiększenie wydzielania się ciepła) a w skrajnym przypadku trwałe namagnesowanie się elementu [1]. Takie właśnie zjawisko występuje wystąpiło w przypadku wtryskiwacza B.

Przy otwieraniu wtryskiwacza w układzie magnetycznym od samego początku występuje już siła wynikająca ze stałego namagnesowania magnesowodu zgodna z kierunkiem siły magnetycznej indukowanej przez cewkę. Powoduje to, że szybciej powstaje siła niezbędna do pokonania różnicy ciśnień działających na element zaworowy, co skutkuje przyspieszeniem otwierania – skróceniem czasu opóźnienia otwarcia.

W przypadku zamykania wtryskiwacza siła wynikająca ze stałego namagnesowania magnesowodu przeciwdziała oderwaniu się zwory od magnesowodu po wyłączeniu zasilania cewki. Powoduje to przedłużenie okresu zamykania się wtryskiwacza – wydłużenie czasu opóźnienia zamknięcia.

Pojawienie się tego zjawiska dopiero w 24 godzinie badań wynika z czasu niezbędnego na zmianę orientację dipoli magnetycznych wewnątrz całej struktury magnesowodu pod wpływem zmieniającego się cyklicznie pola elektromagnetycznego.

---

## 6. Podsumowanie

Analizując wyniki można stwierdzić, że:

- a) zastosowanie materiału nie będącego materiałem magnetycznie miękkim powoduje możliwość wystąpienia trwałego namagnesowania elementu obwodu magnetycznego;
- b) trwałe namagnesowanie się elementu obwodu magnetycznego powoduje skrócenie czasu opóźnienia otwarcia wtryskiwacza i wydłużenie czasu zamknięcia, powodując zwiększenie wydatku wtryskiwacza;

- c) zjawisko namagnesowania elementu obwodu magnetycznego występuje po pewnym okresie pracy wtryskiwacza, wynoszącym w badanym przypadku 22 godziny. Oznacza to, że nie jest ono do wykrycia na etapie produkcji i montażu a ujawni się dopiero w czasie eksploatacji.

Podsumowując, można stwierdzić, że dobór materiału na poszczególne elementy wtryskiwacza ma znaczący wpływ na jego działanie.

---

## Bibliography/Literatura

- [1] Celiński Z.: *Materiałoznawstwo elektrotechniczne*. Warszawa. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 1998
- [2] Czarnigowski J.: „The impact of supply pressure on gas injector expenditure characteristics” *Combustion Engines Silniki Spalinowe* 2/2010 (141) str. 18 – 26
- [3] Czarnigowski J., Barański G., Wendeker M., Duk M., Zyska T.: “Method to measure injector opening and closing lag times” PTNSS-2011-SC-004 (w druku)
- [4] Jakliński P., Czarnigowski J., Wendeker M.: “The Effect of Injection Start Angle of Vaporized LPG on SI Engine Operation Parameters” SAE 2007-01-2054.
- [5] Jakliński P., Grabowski Ł., Wendeker M., Czarnigowski J., Szczyński 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.
- [6] Kolbiński K., Słowikowski J.: *Materiałoznawstwo elektrotechniczne*. Warszawa. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 1998
- [7] Lee S., Kuswaka J., Daisho Y.: „Mixture Formation and Combustion Characteristics of Directly Injected LPG Spray”, SAE Technical Paper 2003-01-1917.
- [8] Małek A., Wendeker M., Czarnigowski J., Grabowski Ł., Jakliński P., Barański G., Sochaczewski R., Podleśny M.: „Stanowisko do badań prehomologacyjnych dla pojazdów wyposażonych w układ sekwencyjnego wtrysku gazu LPG”, PTNSS CONGRESS-2007 P07-C148, *Silniki Spalinowe* PTNSS-2007-SC2.
- [9] „Regulamin nr 83 Europejskiej Komisji Gospodarczej Organizacji Narodów Zjednoczonych (EKG ONZ) — Jednolite przepisy dotyczące homologacji pojazdów w zakresie emisji zanieczyszczeń w zależności od paliwa zasilającego silnik” *Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej L(legislacja)* nr. 119 z 6.5.2008, str. 1—181.

Mr Jacek Czarnigowski, Ph.D. Eng. – Assistant professor in the Faculty of Mechanical Engineering at Lublin University of Technology.

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