

## WPŁYW ZASTOSOWANIA WTRYSKU WIELOFAZOWEGO NA PRZEBIEG CIŚNIENIA SPALANIA W CYLINDRZE SILNIKA CIĄGNIKA ROLNICZEGO\*

Damian Kowalski, Mariusz Graba, Andrzej Lechowicz, Andrzej Bieniek  
*Katedra Pojazdów Drogowych i Rolniczych Politechnika Opolska*

**Streszczenie.** Artykuł przedstawia analizę procesu spalania paliwa wewnątrz cylindra silnika o zapłonie samoczynnym ciągnika rolniczego dla różnych parametrów wtrysku paliwa. Prace mają na celu rozpoznanie możliwości zastosowania wtrysku wielofazowego z wykorzystaniem zmodernizowanej rzędowej pompy wtryskowej. Podział dawki paliwa pozwala na obniżenie ciśnienia panującego wewnątrz cylindra silnika, co przekłada się bezpośrednio na trudniejsze warunki do powstawania związków toksycznych w spalinach silnika, zmniejszony hałas oraz równomierną pracę.

**Słowa kluczowe:** wtrysk wielofazowy, pompa wtryskowa, zapłon samoczynny

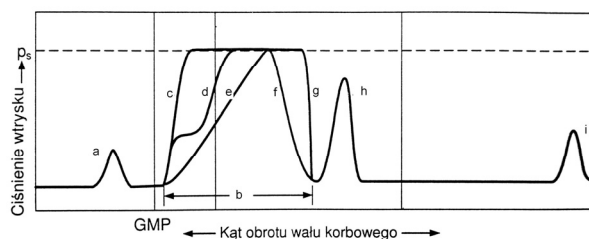
### Wstęp

Rozwój współczesnych układów wtryskowych dedykowanych do silników o zapłonie samoczynnym, jaki nastąpił na przestrzeni ostatnich kilkunastu lat, doprowadził do powstania nowej generacji układów zasilania, sterowanych dzięki algorytmom zawartym w elektronicznej jednostce sterującej silnika (ECU). Układy te określone mianem Common Rail, wprowadzają możliwość korekcji oraz podziału dawki wtryskiwanego paliwa, co wpływa na osiągnięte wskaźniki pracy silnika i ograniczenie emisji substancji szkodliwych. Obecnie stosowane układy wtryskowe muszą sprostać różnym wymaganiom odnośnie wielkości oraz podziału dawki paliwa (rys. 1).

Według opracowania [Idzior 2004] zasadnicze znaczenie w kształtowaniu wtrysku zgodnie z wykresem przedstawionym na rysunku 1 mają poszczególne fazy wtrysku. Wtrysk wstępny (a – rys. 1) powoduje łagodne narastanie ciśnienia spalania przekładając się na mniejsze zużycie paliwa, lepsze spalanie, ograniczoną emisję tlenków azotu i węglowodorów, zmniejszony hałas pracy silnika. Narastający przebieg ciśnienia podczas wtrysku zasadniczego (b – rys. 1) skutkuje zmniejszeniem emisji tlenków azotu. Trwałe wysokie ciśnienie podczas wtrysku zasadniczego (c i d – rys. 1) zmniejsza emisję cząstek stałych przy współpracy z systemem recyrkulacji spalin. Zmienny przebieg ciśnienia podczas wtrysku zasadniczego (d – rys. 1) ogranicza emisję tlenków azotu i cząstek stałych. Dotrysk bezpośrednio po wtrysku zasadniczym (h – rys. 1) przekłada się na dalsze ograniczenie emisji cząstek stałych. Natomiast późny dotrysk paliwa (i – rys. 1) wykorzystywany jest do redukcji tlenków azotu poprzez wspomaganie reaktora katalitycznego.

---

\* Praca wykonana w ramach projektu badawczego Nr N N502447436.

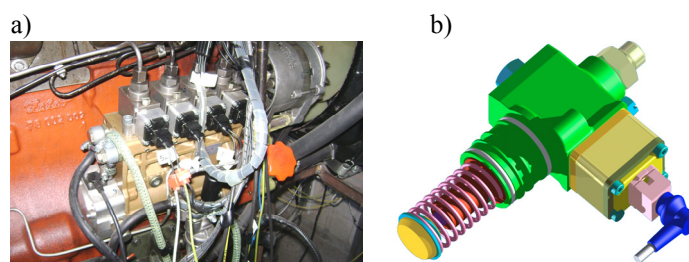


Rys. 1. Przebieg wtrysku paliwa w silniku ZS [Idzior 2007]  
 Fig. 1. The process of fuel injection in self-ignition engine [Idzior 2007]

W przypadku ciągników rolniczych należących do grupy pojazdów off-road ciągle poszukuje się nowych rozwiązań polegających na optymalizacji procesu spalania w aspekcie przyszłościowych norm emisji spalin. Układy te powinny charakteryzować się wysoką niezawodnością i dostosowaniem do zmiennych warunków pracy. Jednym z takich rozwiązań jest możliwość zastosowania zmechanizowanej rzędowej pompy wtryskowej do kontroli procesu spalania w silniku o zapłonie samoczynnym. Jest to połączenie zmodyfikowanej klasycznej, niezawodnej rzędowej pompy wtryskowej z elektroniczną jednostką sterującą ECU silnika, regulującą w czasie rzeczywistym parametry pracy silnika.

## Obiekt badawczy

Zastosowanie mechatronicznej pompy wtryskowej sterowanej z ECU silnika pozwala na precyzyjną kontrolę procesu wtryskiwanego paliwa w oparciu o elektroniczne sekcje tłoczące. Każda sekcja jest wyposażona w elektromagnetyczny zawór sterujący, który precyzyjnie dozjuje określoną porcję paliwa do wtryskiwacza paliwa. Widok mechatronicznej pompy wtryskowej typu EPP4M do silnika czterocylindrowego został przedstawiony na rysunku 2a zaś jedną z sekcji tłoczących pompy wyposażoną w elektrozawór sterujący pokazano na rys 2b.



Źródło: konstrukcja Motorpal, rys. opracowanie własne

Rys. 2. Zmodyfikowana rzędowa pompa wtryskowa EPP4M: a) pompa wtryskowa z zaimplementowanymi elektromagnetycznymi sekcjami tłoczącymi b) sekcja tłocząca pompy  
 Fig. 2. Modified line-up injection pump EPP4M: a) injection pump with implemented electromagnetic pressing section b) pump pressing section

Podstawowe dane techniczne pompy wtryskowej EPP4M zostały przedstawione w tabeli 1.

Tabela 1. Podstawowe parametry zmodyfikowanej rzędowej pompy wtryskowej EPP4M  
Table 1. The basic parameters of modified EPP4M line-up injection pump

Podstawowe parametry i cechy rzędowej pompy wtryskowej EPP4M	
Liczba sekcji tłoczących	3 – 8
Średnica tłoczka	10 mm
Skok tłoczka sekcji	15 mm
Max ciśnienie robocze pompy	180 MPa
Rozstaw sekcji tłoczących	45 mm
Średnica zewnętrzna sekcji tłoczącej	35 mm
Dawka paliwa	180 mm <sup>3</sup> · skok <sup>-1</sup>
Max prędkość pompy	1500 obr · min <sup>-1</sup>

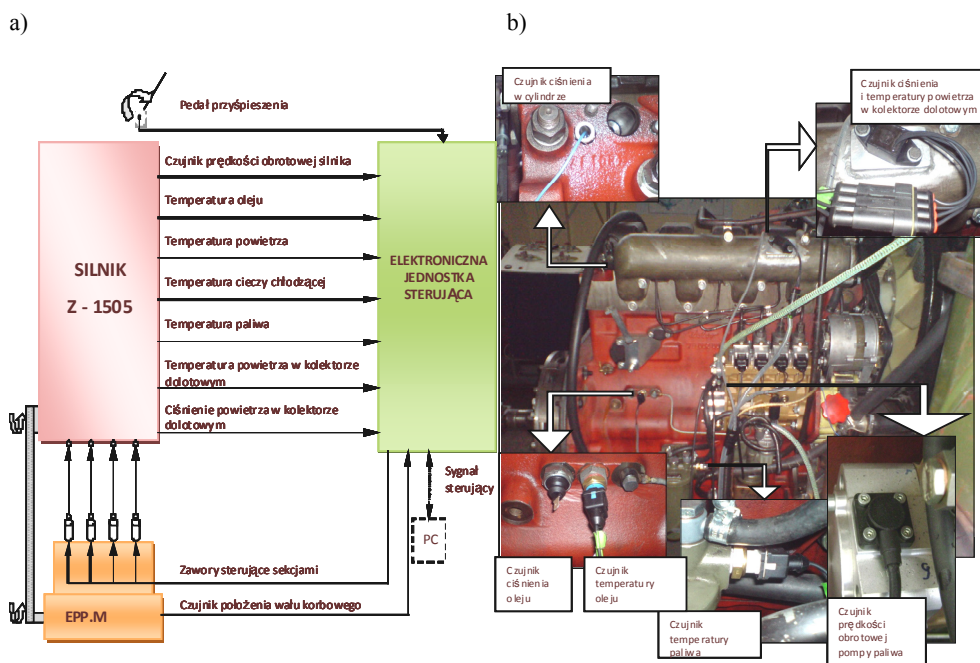
źródło: Motorpal

Istotnym elementem zmodyfikowanej pompy jest inny kształt krzywki napędzającej sekcję tłoczącą, która posiada czynny zakres roboczy do 120° kąta obrotu wałka krzywkowego pompy. Jak wynika z przedstawionych w pracy [Bocheńska, Cezary, Bocheński 2005; Jantos, Mamala, Bieniek, Kowalski, Graba 2009] wyników badań stanowiskowych takiej sekcji tłoczącej istnieje możliwość modyfikacji procesu wtryskiwanego paliwa do prędkości obrotowej silnika 1600 obr·min<sup>-1</sup>. Ograniczenie to spowodowane jest głównie szybkością reakcji elektrozaworów na sygnał sterujący z ECU silnika oraz zjawisk hydraulicznych zachodzących w układzie wysokiego ciśnienia. Dominującą rolę w układzie sterowania odgrywa ECU silnika. W tym zakresie doposażono silnik typu Z1505 w dodatkowe czujniki przedstawione na schemacie (rys. 3a).

Silnik zamontowano na hamowni silnikowej Politechniki Opolskiej w Katedrze Pojazdów Drogowych i Rolniczych. Hamownia silnikowa umożliwia pomiar wielu parametrów silnika podczas jego pracy. Jednym z najistotniejszych rejestrowanych parametrów było ciśnienie w układzie wtryskowym, wewnątrz komory spalania. Dodatkowo dokonano pomiarów z czujników rozmieszczonych w kluczowych miejscach silnika: temperatury, ciśnienia paliwa oraz spalania wewnątrz cylindra, stężenie składników gazowych (NO<sub>x</sub>, HC, CO, CO<sub>2</sub>, PM, O<sub>2</sub>).

W opracowaniu przedstawiono analizę procesu spalania wewnątrz cylindra w oparciu o pomiar ciśnienia czujnikiem AVL GM12D (0-20 MPa) oraz analizę ciśnienia wtryskiwanego paliwa w oparciu o pomiar ciśnienia paliwa w układzie wtryskowym czujnikiem AVL QL61D (0-200 MPa).

Widok silnika zainstalowanego na hamowni silnikowej został przedstawiony na rysunku 3b.



Źródło: opracowanie własne

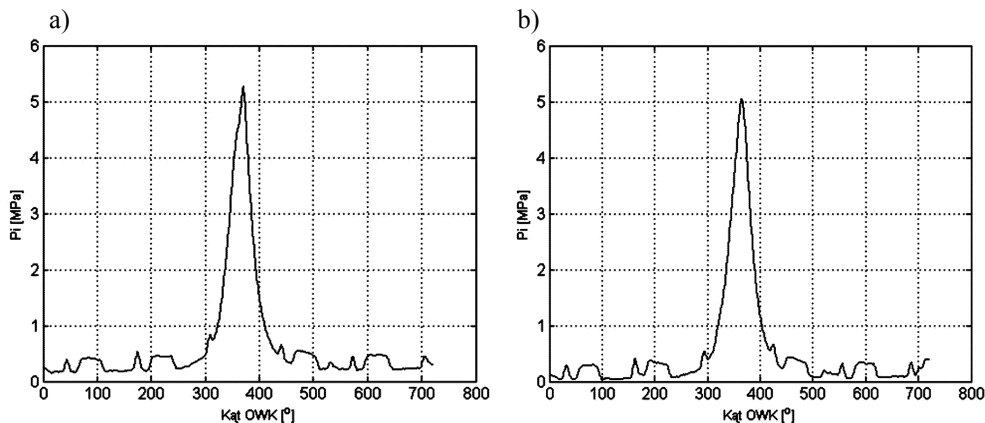
Rys. 3. Silnik Z1505: a) struktura układu sterowania ECU silnika, b) widok silnika na hamowni silnikowej

Fig. 3. Z1505 Engine: a) the structure of ECU control system of an engine, b) the view of an engine on the engine dynamometer

## Wyniki badań

Badania przeprowadzono przy stałej prędkości obrotowej silnika nieobciążonego wynoszącej 900, 1000 i 1200 obr·min<sup>-1</sup> przy zmiennych parametrach wtrysku paliwa. Modyfikowano liczby faz wtrysku oraz wyprzedzenie kąta wtrysku. Na rysunku 4 przedstawiono charakterystykę ciśnienia wewnątrz cylindra dla wtrysku jednofazowego oraz wtrysku dwufazowego z regulowanym kątem wyprzedzenia zapłonu dla prędkości silnika wynoszącej 900 obr·min<sup>-1</sup>.

Analiza krzywych ciśnienia wewnątrz cylindra (rys. 4) pozwala stwierdzić, iż realizacja procesu wtrysku paliwa wpływa na ciśnienie spalania panujące w cylindrze silnika. Wtrysk jednofazowy powoduje znaczący, ale gwałtowny wzrost ciśnienia wewnątrz cylindra odznaczający się twardą i hałaśliwą pracą silnika. Wtrysk dwufazowy powoduje iż ciśnienie narasta płynnie bez charakterystycznego piku ciśnienia jak w przypadku wtrysku jednofazowego. W przypadku wtrysku dwufazowego osiągnięto nieznacznie mniejszą wartość maksymalnego ciśnienia indykowania.

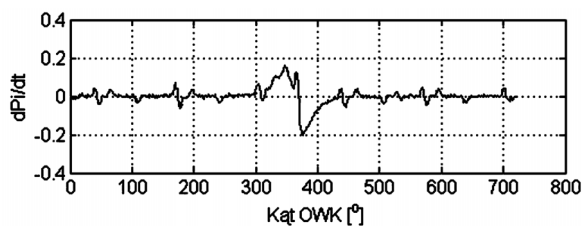


Źródło: badania własne

Rys. 4. Charakterystyka przebiegu ciśnienia wewnątrz cylindra  $P_i$  przy prędkości obrotowej silnika  $900 \text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$  podczas wtrysku: a) jednofazowego, b) dwufazowego (kąąt wyprzedzenia wtrysku  $12^\circ$  OWK)

Fig. 4. The characteristic of pressure course inside the  $P_i$  cylinder at engine speed of  $900 \text{ rpm}$  during injection: a) single-phase, b) double -phase (injection advance angle  $12^\circ$  crankshaft rotations)

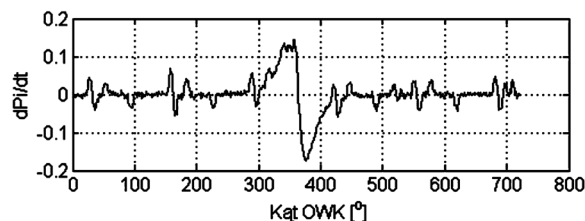
Pochodna ciśnienia wtrysku pozwala określić prędkość narastania ciśnienia wewnątrz cylindra. W celu dokładniejszego zobrazowania warunków panujących w cylindrze badanego silnika, dla przedstawionych wyżej wyników ciśnienia wewnątrz cylindra, obliczono wartość pochodnej przy realizacji wtrysku jednofazowego (rys. 5) oraz wtrysku dwufazowego (rys. 6). Przebieg krzywych na wykresie (rys. 6) pochodnej ciśnienia wtrysku w funkcji kąta obrotu wału korbowego, wykazuje niższą wartość prędkości narastania ciśnienia podczas realizacji wtrysku dwufazowego (rys. 6).



Źródło: badania własne

Rys. 5. Pochodna ciśnienia wtrysku  $dP_i/dt$  przy prędkości obrotowej silnika  $900 \text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$  podczas wtrysku jednofazowego (kąąt wyprzedzenia wtrysku  $12^\circ$  OWK)

Fig. 5. Derivative of  $dP_i/dt$  pressure injection at engine speed of  $900 \text{ rpm}^{-1}$  - during single-phase injection (injection advance angle  $12^\circ$  crankshaft rotations)

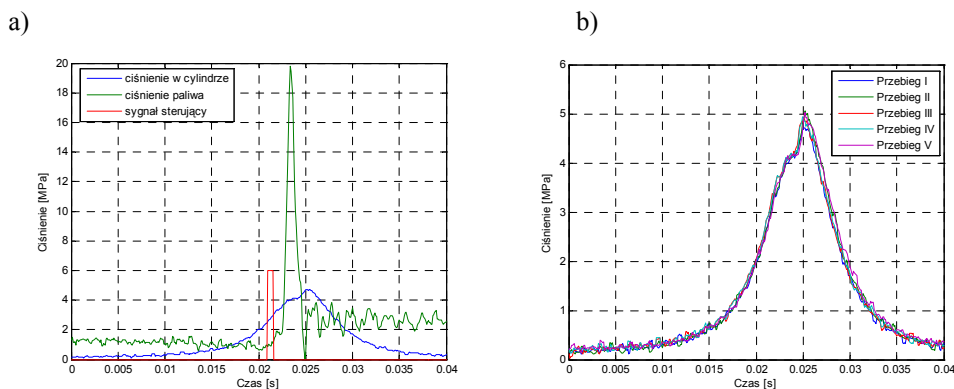


Źródło: badania własne

Rys. 6. Pochodna ciśnienia wtrysku  $dP_i/dt$  przy prędkości obrotowej silnika  $900 \text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$  podczas wtrysku dwufazowego (kąt wyprzedzenia wtrysku  $12^\circ$  OWK)  
 Fig. 6. Derivative of  $dP_i/dt$  pressure injection at engine speed of  $900 \text{ rpm}^{-1}$  - during double-phase injection (injection advance angle  $12^\circ$  crankshaft rotations)

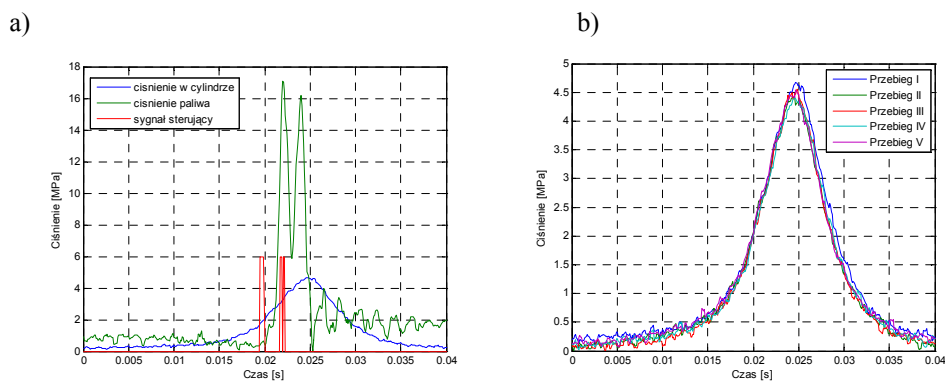
Wartość ciśnienia wewnątrz cylindra w kilku następujących po sobie cyklach pracy silnika pracującego na biegu jałowym przedstawiono na rysunku 7 i 8. Opóźnienie pomiędzy sygnałem sterującym dawką paliwa, a początkiem rozpoczęcia procesu spalania wynosi  $1,6 \text{ ms}$  podczas realizacji wtrysku jednofazowego (rys. 7a), natomiast podczas realizacji wtrysku dwufazowego (rys. 8a) opóźnienie wynosi  $1,6 \text{ ms}$  dla dawki wstępnej i  $1,2 \text{ ms}$  dla dawki głównej [Graba, Lechowicz, Mamala, Bieniek 2010].

Analizując przebiegi ciśnienia wtrysku paliwa oraz ciśnienia indykowania (rys. 7 i 8) można stwierdzić, że zarówno jednofazowy jak i wielofazowy wtrysk paliwa charakteryzuje się dużą powtarzalnością pracy oraz stabilnością parametrów pracy silnika. Zastosowanie wtrysku wielofazowego (rys. 8) wpływa na łagodniejszy przebieg ciśnienia spalania w cylindrze przy równoczesnym obniżeniu jego maksymalnych wartości.



Źródło: badania własne

Rys. 7. Charakterystyka czasowa przebiegu wtrysku jednofazowego: a) przebieg wtrysku paliwa i ciśnienia indykowania, b) porównanie kilku kolejnych cykli pracy silnika  
 Fig. 7. Duration characteristics of the process of single-phase injection: a) process of fuel injection and pressure indication, b) comparison of next few engine cycles



Źródło: badania własne

Rys. 8. Charakterystyka czasowa przebiegu wtrysku wielofazowego: a) przebieg wtrysku paliwa i ciśnienia indykowania, b) porównanie kilku kolejnych cykli pracy silnika  
 Fig. 8. Duration characteristics of the process of multi-phase injection: a) process of fuel injection and pressure indication, b) comparison of the next few engine cycles

Zarejestrowane przebiegi ciśnień charakteryzują się dużą powtarzalnością oraz stabilnością pracy silnika 8b i 9b, tzn. kolejne przebiegi ciśnień mają bardzo zbliżony przebieg. Wtrysk jednofazowy jest realizowany przy ciśnieniu 20 MPa, zaś wtrysk wielofazowy pozwala na osiągnięcie ciśnienia dochodzącego do 17 MPa. Należy jednak zauważyć, że osiągnięte ciśnienia są wynikiem pracy sekcji tłoczącej, sterowania elektrozaworem dozującym, ale również regulacji ciśnienia otwarcia wtryskiwaczy.

## Podsumowanie

Elektroniczne sterowanie procesem wtrysku paliwa dla rzędowej pompy wtryskowej daje nowe możliwości w zakresie kształtowania charakterystyki wtrysku paliwa, jak również ciśnienia spalania wewnątrz cylindra. Zmechanizowanie rzędowej pompy wtryskowej jest kolejnym narzędziem pozwalającym na prowadzenie badań w zakresie opracowania silnikowych metod redukcji emisji substancji szkodliwych. Wyniki wstępnych prac wskazują na możliwość ograniczenia szczytowych ciśnień w układzie paliwowym oraz zmniejszenia hałaśliwości jego pracy w wyniku zastosowania wtrysku wielofazowego. Takie rozwiązanie może wprowadzić dla rzędowej pompy wtryskowej nowe możliwości jej zastosowania głównie do pojazdów off-road oraz silników stacjonarnych, jednak wymaga to kontynuacji prac.

## Bibliografia

- Jantos J., Mamala J., Bieniek A., Kowalski D., Graba M.** 2009. Kones Pojazdy typu "OFF ROAD" w aspekcie przyszłościowych norm emisji spalin - KONES 2009; ISSN 1231 4005; s. 201-207.
- Graba M., Lechowicz A., Mamala J., Bieniek A.** 2010. Wielofazowy wtrysk paliwa dla silników z zapłonem samoczynnym wyposażonych w rzędową pompę wtryskową, – Inżynieria Rolnicza Nr 5(123)/2010 Kraków. s. 29-35.
- Bocheńska A., Cezary I. Bocheński** 2005. Badanie wpływu zmiany kąta wyprzedzenia wtrysku i stopnia recyrkulacji spalin na toksyczność spalin i zużycie paliwa silnika z zapłonem samoczynnym - MOTROL - Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa 7/2005. s. 15-23.
- Idzior M.** 2007. Współczesne aspekty doboru ciśnienia wtrysku paliwa w silnikach o zapłonie samoczynnym - Combustion Engines, 5/2007, PTNSS Bielsko-Biała 2007-SC2-152. s. 4-10.
- Idzior M.** 2004. Studium optymalizacji doboru parametrów rozpylaczy wtryskiwaczy o zapłonie samoczynnym w aspekcie właściwości użytkowych silnika. Rozprawy Nr 384 Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań. ISBN 83-7143-296-8. s. 30
- Motorpal 2010:** Katalog części Motorpal, [dostęp 01-06-2010] Dostępny w Internecie <http://ww.motorpal.cz>

## THE INFLUENCE OF THE APPLICATION OF MULTIPHASE INJECTION ON FIRING PRESSURE FLOW IN THE ENGINE CYLINDER OF A FARM TRACTOR

**Abstract.** The article presents the analysis of the process of fuel combustion inside the cylinder of self-ignition engine of a farm tractor for different fuel injection parameters. The purpose of the studies is to identify the possibility of applying the multiple injection using a modernised in-line injection pump. Fuel dosing allows for decreasing the pressure inside the engine cylinder, thus creating conditions in which toxic compounds formation in engine exhaust gases is more handicapped as well as for reduced noise and regular operation

**Key words:** multiphase injection, injection pump, self-ignition

### Adres do korespondencji:

Damian Kowalski; e-mail: [d.kowalski@doktorant.po.edu.pl](mailto:d.kowalski@doktorant.po.edu.pl)  
Katedra Pojazdów Drogowych i Rolniczych  
Politechnika Opolska  
ul. Mikołajczyka 5  
45-271 Opole