

WIELOFAZOWY WTRYSK PALIWA DLA SILNIKÓW Z ZAPŁONEM SAMOCZYNNYM WYPOSAŻONYCH W RZĘDOWĄ POMPE WTRYSKOWĄ

Mariusz Graba, Andrzej Lachowicz, Jarosław Mamala, Andrzej Bieniek
Katedra Pojazdów Drogowych i Rolniczych, Politechnika Opolska

Streszczenie. Restrykcyjne przepisy odnośnie dopuszczalnych norm emisji spalin stawiają przed koncernami produkującymi pojazdy rolnicze coraz to ostrzejsze wymagania, co do ilości dopuszczalnych szkodliwych substancji emitowanych przez jednostki napędowe tych pojazdów do atmosfery. W opracowaniu przedstawiono koncepcje modernizacji tradycyjnej rzędowej pompy wtryskowej, umożliwiającej sterowanie obciążeniem silnika nie zależnie od położenia pedału mocy.

Słowa kluczowe: pompa wtryskowa, elektrozawory, pojazdy rolnicze, wtrysk wielofazowy

Wstęp

Aktualne normy emisji spalin dla pojazdów „off-road” w Europie wynoszą od 1,6 do 2,0 g·kWh⁻¹ dla tlenków azotu (NO_x) i od 0,025 do 0,050 g·kWh⁻¹ dla cząstek stałych (PM). Zapowiedziana już nowa norma EURO VI, która ma obowiązywać od roku 2014, wprowadza jeszcze bardziej ogranicza dopuszczalne ilości wydzielanych substancji szkodliwych do środowiska. Jednakże przepisy EURO V i EURO VI nie dotyczą pojazdów rekreacyjnych, ciągników rolniczych, autobusów czy też ciężarówek. Wymagania dla tej grupy pojazdów zostały określone w rozporządzeniu Unii Europejskiej znanej pod nazwą *Regulamin nr 49 Europejskiej Komisji Gospodarczej Organizacji Narodów Zjednoczonych (EKG ONZ)* – pod nazwą „*Jednolite wymagania dotyczące homologacji silników wysokoprężnych, silników na gaz ziemny oraz silników z wymuszonym zapłonem napędzanych gazem płynnym, a także pojazdów wyposażonych w silniki wysokoprężne, silniki na gaz ziemny i silniki z wymuszonym zapłonem napędzane gazem płynnym w odniesieniu do emisji zanieczyszczeń z silnika*” [Regulamin nr 49] - Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej L 375/3 z dnia 27.12.2006.

Spełnienie powyższych ograniczeń wiąże się ze zmianą i optymalizacją parametrów pracy silnika. Modyfikacji podaje się m.in.: układ dolotowy, komorę spalania, układ wtryskowy, układ wtórnego oczyszczania spalin, układ zarządzania pracą silnika. Jednak najważniejszy wpływ na rozwijane parametry silnika ma zastosowany paliwowy układ wtryskowy. Dlatego w ostatnim dwudziestoleciu właśnie w tym układzie wprowadzono rewolucyjne zmiany, do których przyczynił się m.in. gwałtowny rozwój elektroniki i systemów mikroprocesorowych.

Tabela 1. Normy emisji spalin obowiązujące w Unii Europejskiej [Delphi 2010]
 Table 1. Exhaust emission standards applicable in the European Union

Kategoria	Moc silnika [kW]	CO [g·kWh ⁻¹]	HC [g·kWh ⁻¹]	NOx [g·kWh ⁻¹]	PM [g·kWh ⁻¹]	Homologacja
Etap III A						
H	130 ≤ P < 560	3,5	NOx+HC :4,0		0,2	30.06.05
I	75 ≤ P < 130	5,0	NOx+HC :4,0		0,3	31.12.05
J	37 ≤ P < 75	5,0	NOx+HC :4,7		0,4	31.12.06
K	19 ≤ P < 37	5,5	NOx+HC :7,5		0,6	31.12.05
Etap III B						
L	130 ≤ P < 560	3,5	0,19	2,0	0,025	31.12.09
M	75 ≤ P < 130	5,0	0,19	3,3	0,025	31.12.10
N	56 ≤ P < 75	5,0	0,19	3,3	0,025	31.12.10
P	37 ≤ P < 56	5,0	NOx+HC :4,7		0,025	31.12.11
Etap IV						
Q	130 ≤ P < 560	3,5	0,19	0,4	0,025	31.12.12
R	56 ≤ P < 130	5,0	0,19	0,4	0,025	31.11.13

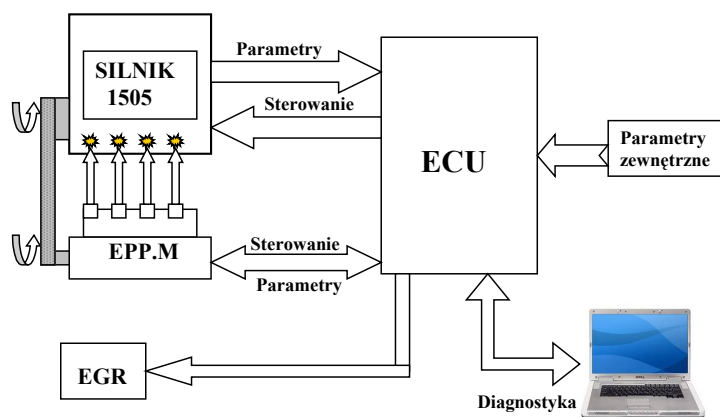
Możliwość wykonania pomiarów i sterowania silnika w czasie rzeczywistym przez elektroniczne układy silnikiem (ECU), pozwoliły powszechnie w samochodach użytkowych, na precyzyjne sterowanie dawką paliwa wtryskiwaną do komory spalania. Przykładem takiego wysokociśnieniowego systemu wtrysku jest układ Common Rail, najczęściej wykorzystywany do zasilania nowoczesnych silników o zapłonie samoczynnym, stosowany głównie do napędu pojazdów użytkowych o małej pojemności skokowej, ze względu na możliwość spełnienia rygorystycznych norm emisji spalin. Założone normy emisji spalin osiągnięto przez modyfikację zarówno przebiegu procesu wtrysku paliwa jak również układu oczyszczającego spaliny. Już pierwsza generacja systemu Common Rail umożliwiła uzyskanie dawki wstępnej i głównej z przerwą czasową wynoszącą około 2 ms przy prędkości 1800 obr/mim. Obecnie układy te realizują strategię wtrysku wielofazowego, umożliwiającą poprawę parametrów silnika (obniżającego emisję tlenków azotu (NO_x) i cząstek stałych (PM)), a przerwa czasowa pomiędzy kolejnymi fazami wtrysku wynosi poniżej 0,5 ms [Bianchi , Falfari, Pelloni, Filicori, Milani, 2002].

W układach wtryskowych ciągników rolniczych określone normy emisji spalin wdrażane są z opóźnieniem, a nowa generacja rzędowych pomp wtryskowych, przeznaczona do silników ciągników rolniczych spełniająca normy TIER IV i jest wyposażona w elektromagnetyczny zawór sekcji tłoczącej sterowany z ECU silnika współpracującego z zaworem EGR [Motorpal 2010]. W niniejszym artykule przedstawiono badania wtrysku wielofazowego dla rzędowej pompy wtryskowej silnika o zapłonie samoczynnym z ciągnika rolniczego Zetor Z 1505, spełniającego obecnie normy emisji spalin TIER III A.

Rzędowa pompa wtryskowa

Wysoka niezawodność układów z rzędową pompą wtryskową sprawia, że firma Zetor nadal stosuje to rozwiązanie. Jednakże, aby spełnić normy TIER IV należy zmodyfikować dotychczasowy układ wtryskowy silnika typu Z12441, przez wprowadzenie m.in. wtrysku

wielofazowego. W tym celu zastosowano nowoczesną pompę wtryskową firmy MOTORPAL typu N 14041, wyposażoną w elektromagnetyczne zawory odcinające sekcji tłoczących, sterowane za pomocą ECU silnika. Taka mechatroniczna pompa wtryskowa współpracuje przez ECU z układem EGR wyposażonym w chłodnicę spalin. W odróżnieniu od tradycyjnego rozwiązania rzędowej pompy wtryskowej, gdzie wytworzenie ciśnienia i przygotowanie dawki wtrysku paliwa są współzależne od położenia krzywki i tłoczka, którego kąt obrotu jest regulowany za pomocą listwy zębatej sterowanej regulatorem obrotów pompy połączonej z pedałem mocy. W tym rozwiązaniu sterownik ECU silnika (rys. 1), w oparciu o sygnały pomiarowe (temperatura chłodziwa i paliwa, położenie pedału mocy, ciśnienie doładowania, prędkość obrotową) generuje impulsy sterujące elektrozaworami sekcji tłoczącej, umożliwiające precyzyjne odmierzanie dawki wtryskiwanego paliwa.



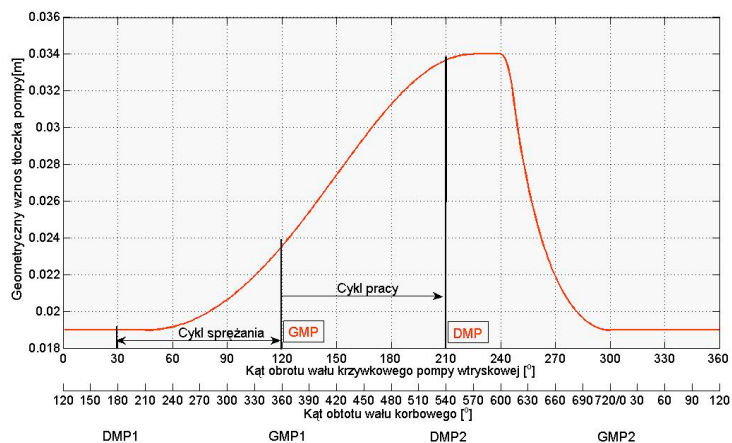
Rys. 1. Schemat ideowy zintegrowanej pompy wtryskowej z układem sterowania
Fig. 1. Schematic diagram of the integrated injection pump with a control system

Położenie pedału mocy w tym rozwiązaniu jest impulsem sterującym dla ECU silnika. W celu polepszenia jakości emitowanych spalin, dodatkowo w układzie wydechowym spalin zastosowano zawór recyrkulacji spalin EGR, którego stopień uchylecia jest zależny od aktualnego punktu pracy silnika [EPP 2010].

Realizacja wtrysku wielofazowego dla rzędowej pompy wtryskowej wymaga uzyskania z sekcji tłoczącej wysokiego ciśnienia tłoczenia paliwa przez znaczną część obrotu wału korbowego silnika. W pompie wtryskowej elementem odpowiedzialnym za kąt tłoczenia oraz wydajność sekcji tłoczącej jest zarys krzywki. Analizując jej kształt możemy wyznaczyć geometryczne przemieszczenie tłoczka sekcji w funkcji kąta obrotu wałka krzywkowego tej pompy (rys. 2).

Dalszej analizie poddano zakres czynny krzywki, wyznaczając czas trwania obrotu wału korbowego o kąt 1° , 5° i 15° w funkcji prędkości obrotowej silnika (tabela nr 2).

Jako zakres czynny krzywki rozumie się ten przedział kątowy wałka krzywkowego, w którym napędzany jest tłoczek sekcji wytwarzający wysokie ciśnienie i jest to przedział od 210° do 570° kąta obrotu wału korbowego silnika. Tłoczenie rozpoczyna się już 150° przed GMP w suwie sprężania i trwa przez cały suw pracy aż do 30° po DMP jeszcze w suwie wydechu.



Rys. 2. Przemieszczenie tłoczka sekcji w funkcji kąta obrotu wałka krzywkowego pompy i kąta obrotu wału korbowego silnika

Fig. 2. Relocation of the small piston of the section in the function of the angle of rotation of the pump camshaft and the angle of rotation of the engine crankshaft

Parametrem ograniczającym możliwość zastosowania wtrysku wielofazowego jest czas trwania jednej fazy wtrysku, z uwagi na zjawiska przepływu oleju napędowego przez sekcje tłoczące, zjawiska falowe przepływającego paliwa, ale również szybkość elektrozaworów sterujących sekcji. Dla silników o zapłonie samoczynnym czas trwania wtrysku jednofazowego trwa około 36° kąta OWK i rozpoczyna się do 12 stopni przed GMP. Czas trwania wtrysku dla silników czterosurowych ciągników rolniczych przy założeniu maksymalnej prędkości obrotowej wnoszącej $2400 \text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$ wynosi $2,5 \text{ ms}$.

Tabela 2. Parametry pompy dla różnych prędkości obrotowych

Table 2. Pump parameters for different rotational speeds

Obroty silnika [obr·min ⁻¹]	800	1200	1600	2000	2400
Czas obrotu wału korbowego silnika o kąt 1° [ms]	0,208	0,139	0,104	0,083	0,069
Czas obrotu wału korbowego silnika o kąt 5° [ms]	1,042	0,694	0,521	0,417	0,347
Czas obrotu wału korbowego silnika o kąt 15° [ms]	3,125	2,083	1,563	1,250	1,042

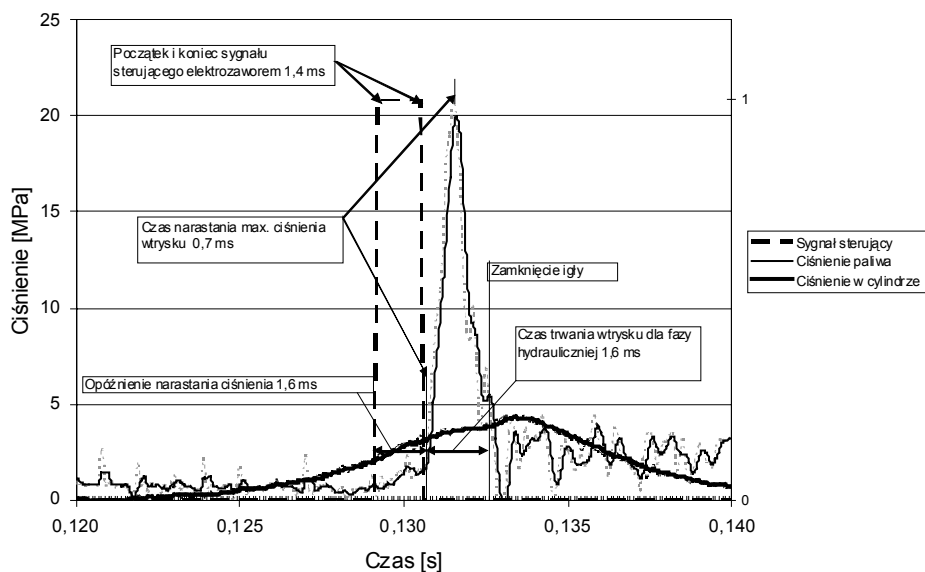
Źródło: obliczenia własne autorów

Realizacja wtrysku paliwa wielofazowego wymaga odmiennego podejścia do czasu wtrysku w funkcji OWK, gdzie jest on podzielony na kilka faz. Pierwszy wtrysk pilotażowy ma miejsce do 32° przed GMP i trwa bardzo krótko około $2-3^\circ$ OWK, drugi wtrysk wstępny również trwa bardzo krótko, ale ma miejsce około 15° przed GMP. Często wtrysk pilotażowy jest realizowany jako jednoczesny, rozpoczyna się 15° przed GMP i trwa

3-5° OWK. Ta faza wtrysku ma dostarczyć małą dawkę paliwa do cylindra 1-4 mm³, a jego efektem jest skrócenie zwłoki wtrysku zasadniczego oraz bardziej płaski wzrost ciśnienia spalania w cylindrze - miękka praca silnika. Wtrysk zasadniczy rozpoczyna się od 5° przed do 5° po GMP i trwa od 4° do 20° OWK, uzyskując przyrost ciśnienia spalania w suwie pracy. Bezpośrednio po wtrysku zasadniczym tj. od 1° do 5° OWK realizowany jest dotrysk paliwa, w celu zmniejszenia emisji i trwa 4° OWK. Dopiero 200° po GMP, już w suwie wydechu, może być realizowany bardzo krótki dotrysk paliwa na dopalenie cząstek stałych i trwa 2-3° OWK. Stąd graniczną wartością dla realizacji wtrysków wielofazowych jest czas zadziałania elektrozaworów sekcji tłoczącej oraz przepływ oleju napędowego przez sekcję tłoczącą. Zmierzony w warunkach laboratoryjnych czas otwarcia i zamknięcia elektrozaworów firmy Auto Power Electronic wyniósł około 0,6ms.

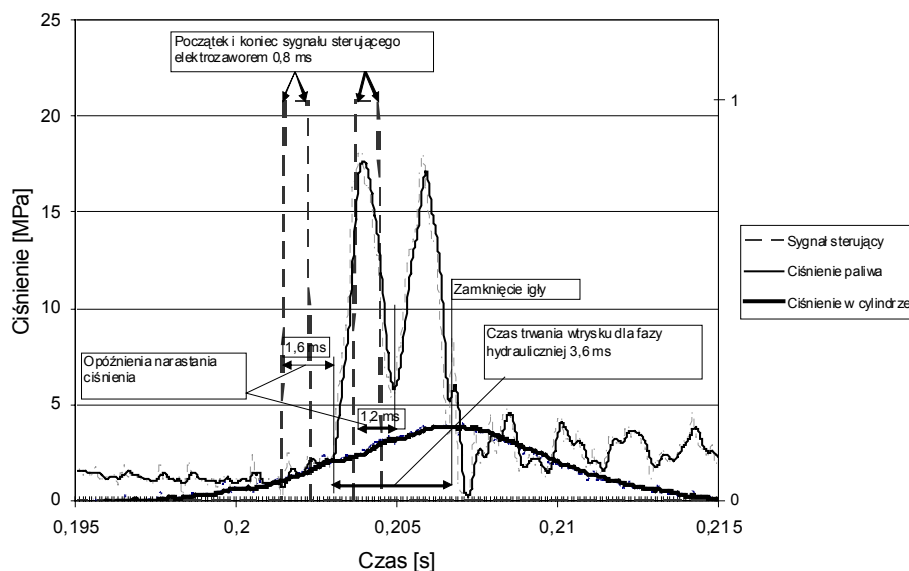
Z przedstawionych powyżej informacji wynika, iż najkrótszy okres odstępu pomiędzy poszczególnymi fazami wtrysku występuje pomiędzy wtryskiem zasadniczym, a dotryskiem i wynosi 1° do 5° OWK. Przyjmując wartość kąta obrotu o 1°, to faza dotrysku nie może być realizowana w ogóle, jednak dla wartości 5° może on być realizowana w zakresie prędkości obrotowej silnika od 800 do 1600 obr·min⁻¹, co wynika z tabeli nr 2.

Na rysunkach 3 i 4, przedstawiono charakterystyki czasowe przebiegu ciśnienia wtrysku oleju napędowego, ciśnienia spalania wewnątrz cylindra oraz przebieg sygnału sterującego elektrozaworem dla silnika Z 12441.



Rys. 3. Charakterystyka czasowa przebiegu procesu wtrysku oraz ciśnienia spalania dla silnika pracującego z prędkością obrotową 900 obr·min⁻¹ z wtryskiem jednofazowym

Fig. 3. Time characteristics of the injection process and combustion pressure for the engine operating at a rotational speed of 900 rpm⁻¹ with one-phase injection



Rys. 4. Charakterystyka czasowa przebiegu procesu wtrysku oraz ciśnienia spalania dla silnika pracującego z prędkością obrotową $900 \text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$ z wtryskiem dwufazowym

Fig. 4. Time characteristics of the injection process course and combustion pressure for the engine operating at a rotational speed of 900 rpm^{-1} with two-phase injection

Analizując przebiegi ciśnień oraz sygnałów sterujących wtryskiem (rys. 3, 4) można stwierdzić, że wielofazowy wtrysk paliwa (rys. 4) wpływa na łagodniejszy przebieg ciśnienia spalania w cylindrze przy równoczesnym obniżeniu jego maksymalnych wartości. Taki przebieg sugeruje możliwość obniżenia emisji głównie NO_x ze względu na mniej korzystne warunki powstawania tych tlenków. Podział dawki paliwa na fazy (rys. 4) powoduje również nieznaczne obniżenie szczytowych ciśnień w układzie wtryskowym, co przekłada się odpowiednio na ciśnienie wtryskiwanego paliwa. Zastosowanie zmodyfikowanego zarysu krzywki sekcji tłoczącej i sterowania dawką umożliwia wykorzystanie wtrysku wielofazowego, wysokiej wartości szczytowej ciśnienia wtrysku wynoszącej ok. 18 MPa oraz poprawę równomierności pracy silnika i zmniejszenie hałaśliwości jego pracy.

Podsumowanie

Rzędowa pompa wtryskowa od wielu lat jest stosowana i cechuje się wysoką niezawodnością i dużą tolerancją w odniesieniu do jakości paliwa i rodzaju stosowanego paliwa, zwłaszcza biopaliw. Stąd modyfikacja rzędowej pompy wtryskowej umożliwia realizację wtrysku wielofazowego. Z badań własnych wynika, że zarówno zakres czynny krzywki jak i czas reakcji elektrozaworów sekcji tłoczących umożliwiają realizację wtrysku wielofazowego w rzędowej pompie wtryskowej. Wyniki badań wstępnych nie uwzględniają wpływu

strategii sterowania elektrozaworem sekcji tłoczącej na przebieg fazy wysokociśnieniowej wtrysku, co wymaga kontynuacji prac.

Bibliografia

- Bianchi G.M., Falfari S., Pelloni P., Filicori F., Milani M. 2002.** A numerical and experimental study towards possible, SAE TRANSACTIONS-SAE Journal of Engines. Vol. 111. Sect. 3. 2002-01-0500. s. 1105-1117.
- Jantos J., Mamala J., Bieniek A., Kowalski D., Graba M. 2009.** Pojazdy typu "OFF ROAD" w aspekcie przyszłościowych norm emisji spalin - Journal of KONES. Nr 16. s. 201-207.
- Dyrektywa 2002/88/WE.** Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej 11.2.2003. L 35/28. Dyrektywa 2002/88/WE z dnia 9.12.2002 r Parlamentu Europejskiego. s. 73-126.
- Regulamin nr 49.** Regulamin nr49 z dnia 27.12.2006 Europejskiej Komisji Gospodarczej Organizacji Narodów Zjednoczonych (EKG ONZ) - Dziennik Urzędowy UE L 229/1
- Delphi 2010.** Delphi Diesel Fuel Pump, Power Train. [Dostęp 01-06-2010]. Dostępny w Internecie: <http://www.delphi.com>.
- EPP 2010.** Katalog pompy EPP. [Dostęp 01-06-2010] Dostępny w Internecie <http://www.motorpal.cz>
- Motorpal 2010.** Katalog części Motorpal. [Dostęp 01-06-2010] Dostępny w Internecie <http://www.motorpal.cz>

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2009-2011 jako projekt badawczy Nr N N502 447436

MULTI-PHASE INJECTION OF FUEL FOR COMPRESSION-IGNITION ENGINES EQUIPPED WITH AN IN-LINE INJECTION PUMP

Abstract. Restrictive legal regulations concerning acceptable exhaust emission standards pose increasingly stricter requirements for agricultural vehicle producers with regard to the admissible quantities of harmful substances emitted into the air by driving units of these vehicles. The study presents concepts of modernisation of the traditional in-line injection pump which makes it possible to control the engine load irrespective of the position of the power pedal.

Key words: injection pump, solenoid valves, farm vehicles, multi-phase injection

Adres do korespondencji:

Mariusz Graba; e-mail: m.graba@po.opole.pl
Katedra Pojazdów Drogowych i Rolniczych
Politechnika Opolska
ul. Mikołajczyka 5
45-271 Opole