

OLSZOWSKI Sławomir, OLSZOWSKI Tomasz

## **OPRACOWANIE PODSTAW MATEMATYCZNYCH DO ANALIZY WYNIKÓW BADANIA STANU WTRYSKIWACZY SYSTEMU COMMON RAIL Z WYKORZYSTANIEM ANALIZATORA SYGNAŁU „EDIA PRO”**

### *Streszczenie*

Ogromna popularność silników o zapłonie samoczynnym na rynku wtórnym oraz ich udział w nowych samochodach na całym rynku europejskim sprawiły, że stały się one codziennością serwisową stacji obsługi. Restrykcyjne normy ekologiczne wymusiły na producentach wprowadzanie szeregu innowacji technologicznych, z jednej strony ograniczających emisję szkodliwych składników spalin emitowanych do atmosfery, z drugiej zaś zwiększających sprawność i osiągi jednostek napędowych. Zmiany te nie pozostały obojętne na trwałość poszczególnych komponentów samochodu. Do tych, które na skutek wprowadzonych zmian znalazły się na jednym z pierwszych miejsc ingerencji serwisowej są układy wysokiego ciśnienia bezpośredniego wtrysku oleju napędowego.

Oprócz wprowadzenia dodatkowych elementów w układach sterowania, zwiększono precyzję wykonania elementów składowych oraz wprowadzono bieżący monitoring pracy aktuatorów. Precyzja ta skutkuje zjawiskiem nieprawidłowej pracy systemu, nawet wówczas, gdy wystąpi niewielkie zużycie eksploatacyjne. Ten ogromny wpływ na jakość pracy systemów, często powoduje niezdatność eksploatacyjną środka transportu, ze względu na zabezpieczenia ekologiczne i bezpieczeństwa, ograniczające m. in. moc systemu wprowadzając go w tryb pracy awaryjnej. Do tych, które charakteryzują się najwyższą precyzją wykonania zaliczyć należy rozpylacze układów wtryskowych, które wykonane są często z dokładnością rzędu  $10^{-4}$  mm.

Zastosowane metody wynikowego wtrysku paliwa, systemy sterowania z wielokrotnymi charakterystykami umożliwiającymi podział wtrysku na kilka faz, np. 10 wtrysków na jeden cykl pracy silnika o ZS, różne poziomy sygnałów sterujących oraz prędkości transmisji danych, utrudniają proces weryfikacji stanów zdadności eksploatacyjnej. Powoduje to wystąpienie szeregu problemów diagnostycznych dla serwisów samochodowych oraz wzrastających kosztów naprawy. W dodatku wielu producentów komponentów składowych nie jest zainteresowana naprawą swoich produktów. Dla przykładu firma DENSO nie jest zainteresowana udostępnieniem technologii naprawy wtryskiwaczy nawet swoim autoryzowanym serwisom [2], chcąc w ten sposób sprzedawać gotowe kompletne wyroby. Przeciwnie takim stanowiska jest polityka potentatów światowych w produkcji aparatury do silników diesla firm: BOSCH i DELPHI, które są żywo zainteresowane naprawą swoich wyrobów oraz tworzeniem sieci autoryzowanych serwisów naprawy. Uwzględniając fakt, iż gotowe wyroby często są produkowane w krajach azjatyckich lub mogą być tam produkowane w przyszłości (ze względu na niskie koszty produkcji), polityka wspierania rozwoju lokalnego sektora usług serwisowych wprowadzana przez firmy BOSCH i DELPHI są zdecydowanie bardziej przyjazne i godne uwagi. W dzisiejszej dobie, uwzględniając tendencje przenoszenia produkcji do krajów azjatyckich, zasadnym byłaby polityka UE wywierania nacisku na promowanie lub wręcz bezwzględne wymaganie odtwarzalności wyrobu w danej grupie technicznej, co skutkowałoby tworzeniem nowych miejsc pracy na lokalnych rynkach UE w tym także i w Polsce.

*W publikacji przedstawiono innowacyjną metodę diagnostyki silników o zapłonie samoczynnym ułatwiającą diagnozę oraz lokalizację miejsca występowania usterki bez konieczności demontażu komponentów składowych, oszczędzając w ten sposób czas i koszty usługi.*

## **WSTĘP**

Przemysł motoryzacyjny ma ogromne znaczenie dla gospodarek narodowych państw w których produkuje się kompletne samochody oraz komponenty składowe, co przekłada się na całą gospodarkę Unii Europejskiej (UE). Szacuje się, że sektor ten generuje w UE około 12 mln bezpośrednich i pośrednich miejsc pracy oraz ma bardzo duży wpływ na bilans handlowy UE (w 2011 r. osiągnął 90 mld EUR) [1]. W przemyśle tym odnotowuje się największe prywatne nakłady na badania i innowacje (28 mld EUR w 2009 r.) co stanowi potężną siłę napędową dla innowacji technologicznych. Ze względu na silne powiązania gospodarcze z wieloma sektorami przemysłu wywołuje on istotny efekt mnożnikowy w zakresie wzrostu gospodarczego [1].

Rosnące wymagania ekologiczne napędzają rywalizację producentów systemów sterowania. Ogromna popularność silników o zapłonie samoczynnym, generuje wzmożone starania inżynierów, które mają na celu z jednej strony spełnienie restrykcyjnych przepisów, z drugiej zaś zaspokojenie rosnących wymagań konsumentów. Wiąże się to ze stosowaniem coraz to nowszych rozwiązań technicznych i technologicznych. Swoboda sterowania wtryskiem (perspektywicznie 10 wtrysków na cykl), wysokie ciśnienie wtrysku, które obecnie realizowane jest w zakresie 220-2200 [bar] wymaga ogromnej precyzji sterowania jak i dokładności wykonania elementów składowych. Każda nieprawidłowość, wynikająca z uszkodzenia lub zużycia eksploatacyjnego komponentów ma negatywny wpływ na funkcjonowanie układu, a w konsekwencji może doprowadzić do uszkodzenia silnika. Problemem jest fakt, iż w codziennej eksploatacji nieprawidłowości często nie są dostrzegane przez użytkowników. Sterowniki mają ogromne możliwości kalibracyjne i adaptacyjne, wprowadzają szereg korekcyjnych mających na celu niwelowanie zewnętrznych objawów np. uszkodzenia czy zużycia wtryskiwaczy. Dlatego nieprawidłowa praca układu zostaje zauważona przez kierowcę dopiero wówczas, kiedy system nie jest w stanie dokonać korekt aż w tak dużym zakresie. Diagnostyka stała się skomplikowana, trudna do jednoznacznej interpretacji. Często pracownicy serwisów decydują się na demontaż aparatury wtryskowej i sprawdzeniu jej na specjalistycznych stanowiskach probierczych np. EPS708 firmy Bosch, DS2/CRU 2 - Magneti Marelli, AVM-2PC Hartridge, metodą eliminacji możliwych przyczyn nieprawidłowej pracy systemu. Wiąże się to jednak, z generowaniem kosztów jak również wydłużonym czasem naprawy pojazdu.

W artykule podjęto próbę wyjaśnienia kwestii możliwości pozyskiwania wyników badań w warunkach normalnej eksploatacji oraz interpretacji tych badań dla wybranych przypadków serwisowych.

## **1. BEZINWAZYJNA METODA DIAGNOZOWANIA SYSTEMÓW CR**

Skupiono się na analizie stanu fizycznego wtryskiwaczy. Okresowe kłopoty i objawy nieprawidłowości są trudne w jednoznacznym zlokalizowaniu. Zaprezentowany sposób interpretacji pozwala określić najbardziej zużyty element, będący często źródłem niekontrolowanych problemów. Podczas porównania poszczególnych wykresów można wywnioskować w jakiej kondycji są elementy aparatury wtryskowej.

### **1.1. Kryteria diagnostyczne**

Odpowiednia interpretacja uzyskanych wyników daje ogromną możliwość analityczną. Uzyskane dane umożliwiają określenie sprawności poszczególnych wtryskiwaczy. W poprzednich publikacjach uzależniono sprawność układu od spadku ciśnienia

w zasobniku podczas załączania wtryskiwaczy, przy ustalonych warunkach pracy silnika. Kolejne badania wykazały pewną zależność, dającą możliwość określenia stanu faktycznego poszczególnych wtryskiwaczy. Wartości kryterialne, można obliczyć z zależności:

$$\Delta p_{ij}^{tz} = p_1^z(t_1) - p_2^z(t_2); p_1 > p_2 \quad (1)$$

$$\Delta t_{ij}^z = t_2^z(i_1) - t_1^z(i_2) \quad (2)$$

$$\Delta p_{ij}^{twk} = p_1^{wk}(t_1) - p_2^{wk}(t_2); p_1 > p_2 \quad (3)$$

$$\Delta t_{ij}^{wk} = t_2^{wk}(i_1) - t_1^{wk}(i_2) \quad (4)$$

Gdzie:

$\Delta p_{ij}^{tz}$  – zmiana ciśnienia w rail, dla wtryskiwacza „i-tego cylindra” w stanie pracy „j” z uwzględnieniem czasu „t” sterowania wtrysku zasadniczego „z”

$\Delta p_{ij}^{twk}$  – zmiana ciśnienia w rail, dla wtryskiwacza „i-tego cylindra” w stanie pracy „j” z uwzględnieniem czasu „t” sterowania „k-tego” wtrysku wstępnego „wk”

$\Delta t_{ij}^z$  – upływ czasu dla wtryskiwacza „i-tego cylindra” w stanie pracy „j” z uwzględnieniem czasu sterowania wtrysku zasadniczego „z”

$\Delta t_{ij}^{twk}$  – upływ czasu dla wtryskiwacza „i-tego cylindra” w stanie pracy „j” z uwzględnieniem czasu sterowania „k-tego” wtrysku wstępnego „wk”

$p_1$  – ustabilizowane ciśnienie w układzie HP

$p_2$  – ciśnienie w układzie po wystereowaniu wtrysku zasadniczego „z” lub „k-tego” wtrysku wstępnego „wk”

Poniżej zaprezentowano wizualizację kryteriów diagnostycznych na podstawie badań samochodu Lancia Lybra 1,9JTD, silnik 937A2.000 z systemem sterowania CR/EDC 15C-7 z wtryskiwaczami firmy Bosch nr 0 445 110 119.



Ryc. 1. Zakres oscylacji ciśnienia w zasobniku paliwa. Wartość oscylacji 1,2MPa



**Ryc. 2.** Badanie wtryskiwacza 1 cylindra. Przebieg ciśnienia w zasobniku paliwa oraz charakterystyka prądowa sterowania wtryskiwacza. Badanie wtrysku wstępnego



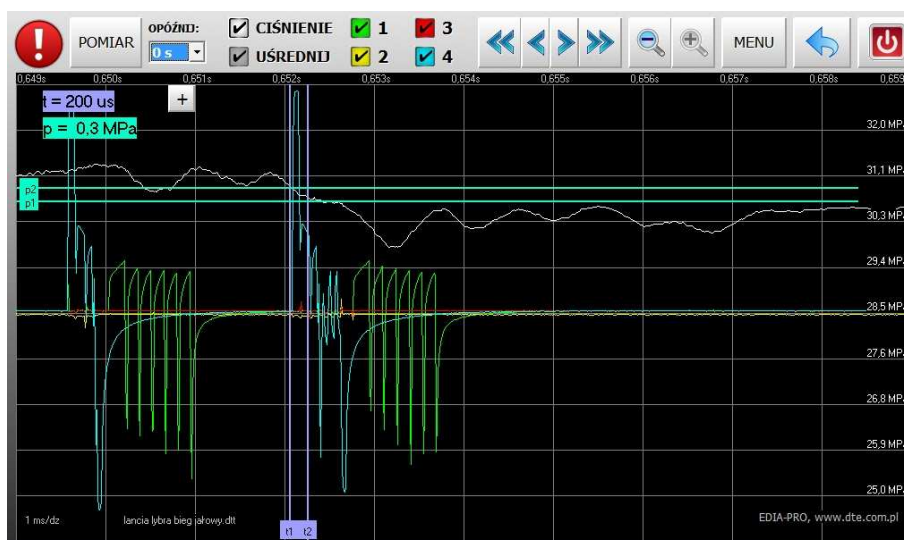
**Ryc. 3.** Wtryskiwacz 2 cylindra. Przebieg ciśnienia w zasobniku paliwa oraz charakterystyka prądowa sterowania wtryskiwacza. Badanie wtrysku wstępnego



**Ryc. 4.** Wtryskiwacz 1 cylindra. Przebieg ciśnienia w zasobniku paliwa oraz charakterystyka prądowa sterowania wtryskiwacza. Badanie wtrysku zasadniczego



Ryc. 5. Wtryskiwacz 2 cylindra. Przebieg ciśnienia w zasobniku paliwa oraz charakterystyka prądowa sterowania wtryskiwacza. Badanie wtrysku zasadniczego



Ryc. 6. Badanie wtryskiwacza 4 cylindra. Przykładowy przebieg z ładowaniem kondensatorów cylindra 1.

Diagnostyka obejmuje cykl pracy silnika samochodu Lancia Lybra 1.9 JTD. Podczas analizy wyżej zaprezentowanych oscylogramów szczególnej uwagi wymagają:

- czas reakcji wtryskiwacza na skutek sygnału sterującego ze sterownika EDC\_C\_,
- czas stabilizacji ciśnienia paliwa w szynie rail ( $\Delta t_{ij}^P$ ) wynikający z wahań się jego ciśnienia w zasobniku paliwa.

## 1.2. Analiza wyników

Czas wtrysku wstępnego wtryskiwacza 1 cylindra wynosił  $300\mu s$  powodując spadek ciśnienia o  $0,8\text{ MPa}$ . Dla wtrysku zasadniczego wartości te kształtowały się odpowiednio:  $560\mu s$  powodując spadek ciśnienia również o  $0,8\text{ MPa}$ . Świadczy to o fakcie, iż pomimo znacznej różnicy czasu wtrysku pompa wysokiego ciśnienia była w stanie zapewnić odpowiedni wydatek paliwa, utrzymując wartość ciśnienia na takim samym poziomie. Ujmując to w inny sposób, pompa jest w stanie zrekompensować ubytek paliwa spowodowany pracą wtryskiwacza.

Czas wtrysku wstępnego wtryskiwacza 2 cylindra wynosił  $300\mu s$  powodując spadek ciśnienia o  $0,6\text{ MPa}$ . Dla wtrysku zasadniczego wartości te kształtowały się odpowiednio

640µs powodując spadek ciśnienia o 0,8 MPa. Porównując wartości na poszczególnych cylindrach (1) 300µs/0,8MPa; (2) 300µs/0,6MPa oraz (1) 560µs/0,8MPa; (2) 640µs/0,8MPa może to świadczyć o fakcie zakoksovania rozpylacza cylindra 2 lub erozyjne wypłukanie otworów rozpylacza pierwszego cylindra bądź jego gniazda zaworu sterującego.

Analizując zachowanie ciśnienia po zakończeniu sterowania poszczególnych wtryskiwaczy, uwzględniając czas i sposób jego stabilizacji, można określić jakość elementów odpowiedzialnych za właściwą pracę iglicy rozpylacza.

W zaprezentowanym wyżej przypadku badania elementów pracy wtryskiwaczy systemu CR z bezpośrednim wtryskiem paliwa, można byłoby zapobiegawczo wykonać czyszczenie aparatury wtryskowej za pomocą specjalistycznej chemii serwisowej np. LM5155 lub też Diesel Spülung i obserwować kryterium  $\Delta t_{ij}$ .

### 1.3. Uogólnione kryteria diagnostyczne

Uwzględniając równania 1 i 2 oraz zaprezentowane wyżej przykładowe badania, można określić dopuszczalne wartości kryterialne. Punkty pomiaru można dobierać dowolnie, np. czas trwania wtrysku zasadniczego przy ustabilizowanej pracy silnika na biegu jałowym, czy też czas stabilizacji ciśnienia od chwili wtrysku zasadniczego do momentu, w którym ciśnienie uzyskuje wartość pierwotną, czas reakcji wtryskiwacza itd. Wszystkie te warunki można sprowadzić do postaci ogólnych (5) i (6).

Aby system mógł pracować prawidłowo musi być spełniony warunek konieczny (systemowy):

$$p_1(t_1) \geq p_{\min}^{C, k, f1, f2} \quad (5)$$

gdzie:

C - zastosowany system sterowania układu np. EDC15C7-2.13

k – typ badanego komponentu np. Bosch nr 0 445 110 119

$f_1$  – PWM regulacji zaworu wysokiego ciśnienia HPV podczas pracy na biegu jałowym (np. Bosch CP1S3)

$f_2$  – PWM regulacji zaworu dozującego ZME lub IMV – (Inlet Metering Valve), podczas pracy na biegu jałowym.

Postać ogólna kryteriów uzupełniających, które muszą być spełnione do poprawnej pracy komponentu po uwzględnieniu (1) i (2) przyjmą postać:

$$\Delta p_{ij}^t = p_1^z(t_1) - p_2^z(t_2) \leq \Delta p_{\text{dop}}^{C, k, f1, f2} \quad (6)$$

oraz

$$\Delta t_{ij} = t_2^z(i_1) - t_1^z(i_2) \leq \Delta t_{\text{dop}}^{C, k, f1, f2} \quad (7)$$

**Tab. 1.** Analiza stanu zdatości eksploatacyjnej wtryskiwacza

Lp.	Kryterium	Komponent	Wartość [MPa]			Stan	
			Rzecz	Min	max		
		0 445 110 119				D/N	
1	$p_1(t_1) \geq p_{\min}^{C, k, f1, f2}$	System	[MPa]	30	22	32	Dobry
	$\Delta p$	System	[MPa]	1,2	0,8	1,6	Dobry
2	$\Delta p_{ij}^t = p_1^z(t_1) - p_2^z(t_2) \leq \Delta p_{\text{dop}}^{C, k, f1, f2}$	Wtryskiwacz 1	[MPa]	0,8	0,8	1,6	Dobry
		Wtryskiwacz 2	[MPa]	0,8	0,8	1,6	Dobry
3	$\Delta t_{ij} = t_2^z(i_1) - t_1^z(i_2) \leq \Delta t_{\text{dop}}^{C, k, f1, f2}$	Wtryskiwacz 1	[µs]	560	500	600	D
		Wtryskiwacz 2	[µs]	640	500	600	N*

N\* – zbyt długi czas wtrysku zasadniczego dla tego typu wtryskiwacza na biegu jałowym

## WNIOSKI

- Jak wykazano, jest możliwy opis matematyczny pozwalający na analizę wyników badania stanu wtryskiwaczy systemu CR z wykorzystaniem analizatora sygnału „EDIA PRO”
- Parametrami kryterialnymi mogą być:
  - wartość ciśnienia w zasobniku paliwa w stosunku do wartości odniesienia dla tego typu komponentu w badanym systemie  $p_1(t_1)$
  - pulsacja ciśnienia w zasobniku paliwa wtryskiwacza „i-tego cylindra” w stanie pracy „j” z uwzględnieniem czasu „t” sterowania wtrysku zasadniczego „z” -  $\Delta p_{ij}^{tz}$
  - czasu wtrysku zasadniczego dla wtryskiwacza „i-tego cylindra” w stanie pracy „j” w odniesieniu do wartości granicznych  $\Delta t_{ij}$
- Poszczególne kryteria są kryteriami koniecznymi sprawności wtryskiwacza.
- Przejście wtryskiwacza przez wszystkie kryteria może stanowić kryterium wystarczające stanu jego zdatności.
- Jeżeli badany komponent nie spełnia chociaż jednego kryterium należy uznać stan wtryskiwacza jako niezdatny do właściwej pracy.
- Prezentowana metoda diagnozy jest źródłem nieograniczonych możliwości analitycznych. Właściwa interpretacja wyników może znacznie przyspieszyć proces diagnozy.
- Różnorodność systemów, indywidualne właściwości aktuatorów poszczególnych producentów, stanowią wyzwanie do perspektywicznych kierunkowych badań.
- Przeprowadzone badania za pomocą analizatora sygnału EDIA, wymuszają wykonanie specjalistycznych badań odniesienia stanu rzeczywistego badanego komponentu do stanu określonego wartościami parametrów kontrolnych. Stan rzeczywisty może być zweryfikowany poprzez inwazyjne badania komponentów na stołach probierczych np. EPS200A, EPS708 oraz badań mikroskopowych.
- Efektem pośrednim prowadzonych badań, będzie utworzenie bazy odniesienia stanu zdatności eksploatacyjnej do wartości sygnałów diagnostycznych.
- Proponowanym tematem kolejnego etapu badań w obszarze diagnostyki układów paliwowych wysokiego ciśnienia może być: Mobilna metoda diagnozowania stanu zdatności eksploatacyjnej komponentów układu paliwowego.

## BIBLIOGRAFIA

1. Łukaszewska J.: Studium wykonalności „Centrum Badawczo-Rozwojowe sposobem na wzrost konkurencyjności firmy” w ramach współpracy pomiędzy Auto Park Łukaszewski Olsztyn, a Uniwersytetem Technologiczno-Humanistycznym im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu. WTiE 2013.
2. Sienkiewicz M. Diesel System. Informacja serwisowa. Warszawa. 2013.
3. Olszowski S., Olszowski T.: Innowacyjna metoda diagnozowania stanu wtryskiwaczy Common Rail za pomocą analizy sygnałów rzeczywistych. Czasopismo LOGISTYKA Nr 6 '2011
4. Olszowski S.: Nowa metoda diagnozowania stanu wtryskiwaczy Common Rail za pomocą analizatora sygnału EDIA-5. Strefa Eksperta. Kwartalnik dystrybutora części samochodowych Auto-Land Nr 4/2011.
5. Sławomir Olszowski, Jozef Buday, Jozef Kuchta, Jan Michalik: Analyses of the causes of common rail piezoelectric and electromagnetic injectors' premature destruction in self-ignition engines. 2013

# THE MATHEMATICS BASIS FOR THE ANALYSES OF THE EXAMINATION RESULTS OF COMMON RAIL INJECTORS CONDITION WITH THE USE OF SIGNAL ANALYZER “EDIA-PRO”

## *Summary*

*Huge popularity of diesel engines with the self-injection, their presence in cars of European market, enormous popularity in second hand cars caused that diesel engines have become daily routine in car services. Due to the fact that the environmental issues are important while designing vehicles, designers are obliged to look for more advanced solutions leading to the reduction of toxic components of fumes but at the same time making cars faster and more efficient. These changes have a strong influence on the durability of car's components. Among those, which have become the most common ones after the changes, there are high pressure systems of the diesel direct injection. Apart from the use of additional components in the steering system the precision of preparing them developed and became more accurate. What is more, a current monitoring system of the actuator work has been introduced. The mentioned precision results in the incorrect system work even if the low exploitative usage takes place. This huge influence on the quality of systems work causes very often unfitness of the vehicle to be operated/used due to ecological and safety issues. Such a situation reduces the power of the engine putting it in an emergency work course. Among precisely done components there is the injector tip that is prepared with the tolerance about  $10^{-4}$  mm.*

*The process of exploitative state worthiness verification is made more difficult because of the used methods connected with the result injector fuel system, the steering system with the multiple characteristics making it possible to divide the injection into some phases eg. 10 injections per engine work cycle, different levels of the steering signals as well as the speed of the data transmission. These all above mentioned things result in a great variety of the diagnostic problems in the car services and the growing expenses of the car repair. Besides, many manufacturers of the components are not interested in the repair of their items. For instance DENSO is not interested in making the injector repair technology available even to their own authorized car services [2] aiming at selling ready completely prepared goods. In contrary to the above mentioned situation is the policy run by the world wide known manufacturers of the diesel engine equipment like BOSCH and DELPHI that are interested in repairing their items as well as creating an authorized repair services. Due to the fact that ready-made items very often come from Asia or they can be produced there in the future (because of the low expenses) the policy supported the development of the local services introduced by BOSCH and DELPHI is more accurate and welcome. Nowadays, when the production is mainly placed in Asia, the UE policy, demanding the promotion or even goods reproducibility in a given technical group, seems justified as it can result in creating new work places on the local UE market so in Poland as well.*

*The article describes the innovative diagnostic method of the diesel engines which makes it easier to make diagnoses as well as find the problem without pulling the parts of the engine apart which saves time and lowers the service expenses.*

## **Autorzy:**

**dr inż. Sławomir Olszowski** – Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny w Radomiu, Wydział Transportu i Elektrotechniki. Zakład Eksploatacji i Diagnostyki Środków Transportu  
**Mgr inż. Tomasz Olszowski** – Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny w Radomiu, Wydział Transportu i Elektrotechniki. Zakład Eksploatacji i Diagnostyki Środków Transportu