

Jerzy MERKISZ¹
Marek IDZIOR²
Maciej BAJERLEIN³
Paweł DASZKIEWICZ⁴
Paweł STOBNICKI⁵

**WPLYW PODZIAŁU DAWKI PALIWA NA WSKAŹNIKI PRACY SILNIKA
SPALINOWEGO O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM Z WTRYSKIEM
BEZPOŚREDNIM**

W artykule przedstawiono informacje dotyczące wpływu podziału dawki paliwa na wybrane wskaźniki pracy silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym wyposażonego w elektromagnetyczny wtryskiwacz firmy Bosch. Przeanalizowano także problematykę wpływu podziału dawki paliwa na emisję związków toksycznych oraz zadymienia spalin.

**THE INFLUENCE OF FUEL DOSE PARTITION DISTRIBUTION OF
COMBUSTION ENGINE INDICATORS IN DIRECT INJECTION COMPRESSION
ENGINE**

The article presents information on the impact of fuel on the dose distribution of selected indicators of compression engine equipped with a Bosch electromagnetic injector. The impact of the issue of fuel dose distribution on the emission of toxic compounds, and smoke, has also been analyzed.

1. WSTĘP

Aktualnie realizując proces spalania w silnikach spalinowych o ZS trzeba liczyć się z trudnościami wynikającymi z obecnie obowiązujących norm emisji związków toksycznych. Normy te wymuszają konieczność ciągłego kontrolowania procesów zachodzących w komorze spalania badanego silnika spalinowego. Kontrola procesów w komorze spalania opiera się przede wszystkim na wartościach chwilowych parametrów pracy zmierzonych przy pomocy czujników zamontowanych na silniku podczas pracy oraz analizowanych na bieżąco przez sterownik silnika. Z uzyskanych wartości parametrów pracy następuje proces

Politechnika Poznańska, Instytut Silników Spalinowych i Transportu; 60-965 Poznań, ul. Piotrowo 3.

¹ Tel: + 48 61-665-22-08, E-mail: jerzy.merkisz@put.poznan.pl

² Tel: + 48 61-665-23-57, E-mail: marek.idzior@put.poznan.pl

³ Tel: + 48 61-665-27-91, E-mail: maciej.bajerlein@put.poznan.pl

⁴ Tel: + 48 61-647-58-62, E-mail: pawel.daszkiwicz@doctorate.put.poznan.pl

⁵ Tel: + 48 61-665-20-49, E-mail: pawel.stobnicki@doctorate.put.poznan.pl

sterowania, a także regulacji z zastosowaniem działań mających na celu otrzymanie zamierzonych parametrów pracy badanego silnika, które z punktu widzenia ekologii zapewniają najniższy poziom emisji związków toksycznych, a zarazem nie mają przy tym ujemnego wpływu na własności użytkowe silnika.

Jednym z działań stosowanych w silnikach o ZS, które w sposób bezpośredni wpływają na przebieg spalania jest podział dawki wtryskiwanego paliwa. Podział dawki paliwa jest to podział czasu otwarcia wtryskiwacza na dwa (lub kilka) przedziałów czasowych i zrealizowanie ich po sobie w pewnym odstępie czasu, który to wynika z warunków pracy badanego silnika w danej chwili [3]. Współcześnie stosowane rozwiązania konstrukcyjne układów zasilania silników o zapłonie samoczynnym pozwalają na realizację podziału dawki paliwa na dwie lub więcej części, przede wszystkim dzięki wykorzystywaniu możliwości systemu Common Rail [2]. Poprzez zastosowanie tego typu systemu możliwa jest regulacja czasu trwania wtrysku - jest on krótki, głównie dzięki wysokiemu ciśnieniu wtryskiwanego paliwa, natomiast zwłoka otwarcia wtryskiwacza jest niewielka za sprawą zastosowanych elementów o małej bezwładności. Tego typu układ pozwala na pewną dowolność w podziale dawki paliwa na określone części, co przy odpowiednim wysterowaniu może mieć znaczący wpływ na zmiany parametrów pracy rozpatrywanego silnika.

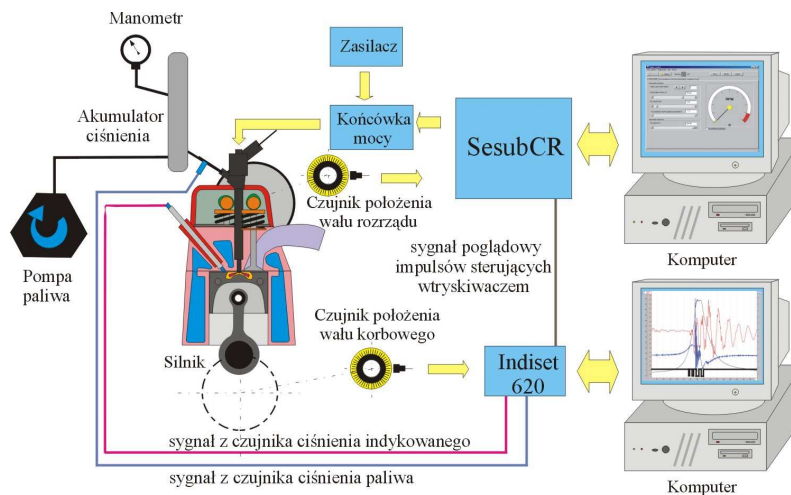
2. STANOWISKO BADAWCZE

Oceny wpływu podziału dawki paliwa na proces spalania dokonano w oparciu o analizę porównawczą wyników badań podstawowych wskaźników pracy. Silnik zasilano za pomocą zewnętrznego układu wtrysku paliwa typu Common Rail III generacji. Badania przeprowadzono na stanowisku hamownianym, wyposażonym w silnik badawczy o zapłonie samoczynnym z bezpośrednim wtryskiem paliwa (tab. 1). Jest to jednocylindrowy silnik AVL 5804, wyposażony w czterozaworową głowicę z dwoma wałkami rozrządu oraz niezależne układy stabilizacji temperatury oleju smarującego i cieczy chłodzącej [4][6].

Tab. 1. Parametry silnika AVL 5804

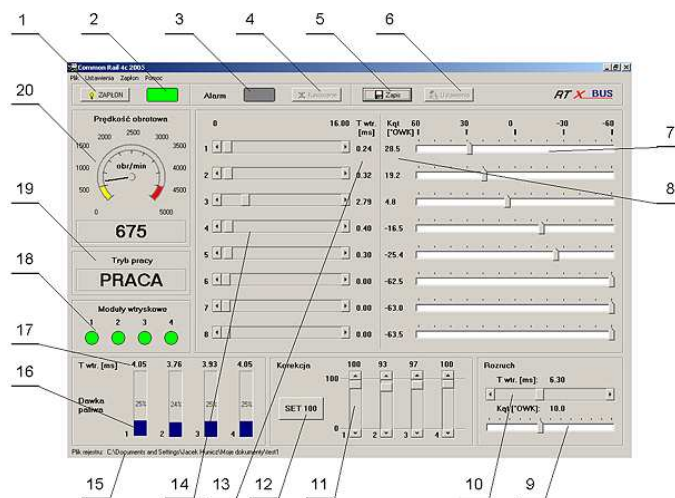
Lp.	Wielkość	Jednostka	AVL 5804
1	i	[-]	1
2	$S \times D$	[mm × mm]	90 × 85
3	V_c	[dm ³]	0,5107
4	n_{max}	[obr/min]	4200
5	ε	[-]	19,9
6	p_e	[bar]	12,2
7	$N_{e\ max}$	[kW]	16 przy 4000 obr/min
8	$M_{o\ max}$	[N·m]	56 przy 2000 obr/min
9	g_e	[g/(kW·h)]	251 przy $M_{o\ max}$

Elektromagnetyczny wtryskiwacz firmy Bosch o symbolu 0 445 110 131 000 umieszczono w głowicy centralnie w osi cylindra. Silnik sprzężono z hamulcem typu prądnicowego. Schemat stanowiska badawczego przedstawiono na (rys. 1).



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego [1]

Do sterowania procesem wtrysku zastosowano specjalnie zbudowany system elektronicznego sterowania. Układ ten generuje odpowiednio ukształtowane sygnały, które po wzmacnieniu doprowadzone są do elektromagnesu wtryskiwacza (rys. 2).



Rys. 2. Okno programu sterującego 4c: 1-wyłącznik zapłonu, 2-lampka kontrolna zapłonu, 3-lampka kontrolna błędu, 4-przycisk kasowania błędów, 5-przycisk zapisu ustawień w pliku rejestru, 6-przycisk otwierania okna konfiguracji ustawień silnika, 7-suwaki regulacji kąta początku wtrysku kolejnych dawek paliwa (w stosunku do GMP tłoka), 8-pola odczytu kąta początku wtrysku kolejnych dawek paliwa w trybie pracy PRACA (w stosunku do GMP tłoka), 9-suwak regulacji kąta początku wtrysku w trybie pracy ROZRUCH (w stosunku do GMP tłoka), 10-suwak regulacji czasu wtrysku w trybie pracy ROZRUCH, 11-suwaki regulacji współczynnika korekcji czasu wtrysku w poszczególnych cylindrach w trybie pracy PRACA (wartość w % w stosunku do zadanego czasu wtrysku), 12-przycisk wyłączenia korekcji czasu wtrysku w poszczególnych cylindrach w trybie pracy PRACA, 13-

pola odczytu zadanego czasu wtrysku kolejnych dawek paliwa w trybie pracy PRACA, 14-suwak regulacji czasu wtrysku kolejnych dawek paliwa w trybie pracy PRACA, 15-pole wyświetlania nazwy aktualnie otwartego pliku ustawień, 16-wskaźniki obciążenia poszczególnych cylindrów (stosunek sumarycznego czasu wtrysku do maksymalnego, zadeklarowanego czasu wtrysku), 17-pola wyświetlania sumarycznego czasu wtrysku do poszczególnych cylindrów, 18-wskaźniki stanu komunikacji z modułem czasu rzeczywistego, 19-wskaźnik bieżącego trybu pracy systemu sterowania (STOP, ROZRUCH, PRACA, CUT-OFF, USTAWIENIA, BŁĄD), 20-wskaźnik prędkości obrotowej wału korbowego.

3. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

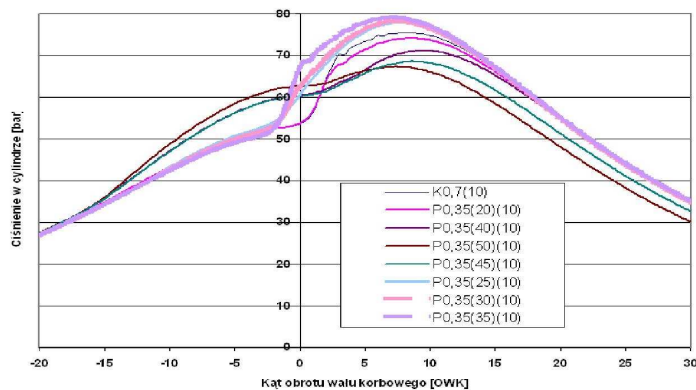
3.1 Analiza wyników badań podstawowych wskaźników pracy

Skutki podziału dawki paliwa na części porównywano z wynikami badań silnika zasilanego w konwencjonalny sposób, przy czym w obu przypadkach badania wykonano w identycznych warunkach (ustalony punkt (n, M) pracy silnika, identyczna wartość ciśnienia w szynie oraz w przybliżeniu taka sama dawka q_0 paliwa, przypadająca na jeden cykl pracy silnika).

Badania silnika wykonano przy stałym ciśnieniu w zasobniku, równym 120 [MPa] i prędkości obrotowej n silnika, równej 1200 [obr/min]. Przykładowe warunki wykonanych badań przedstawiono w (tab. 2). W pierwszym wierszu tablicy przedstawiono wyniki badań dla przypadku odniesienia (bez wstępnej homogenizacji uzyskanej przez wtrysk dawki pilotującej q_1 ($q_1 = 0$)). Kąt $\alpha_{w1} = 0$ początku wtrysku dawki pilotującej. W tym przypadku dawka zasadnicza q_2 równa jest dawce q_0 przypadającej na jeden cykl pracy. Kąt α_{w2} początku wtrysku dawki q_2 wynosił 10 °OWK przed GMP.

Tab. 2. Zestawienie wartości podstawowych wskaźników pracy silnika

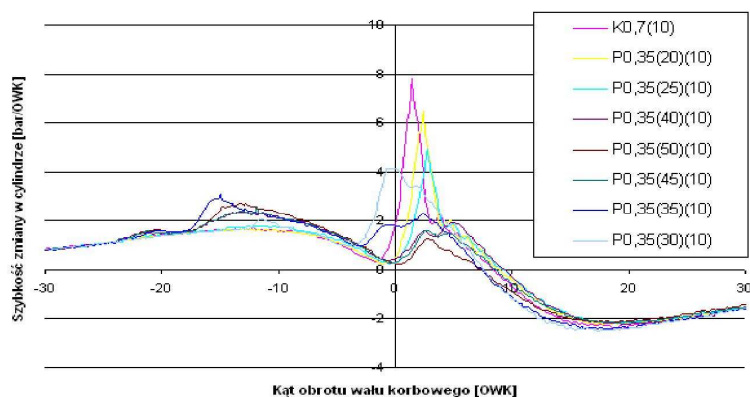
Lp.	Nazwa	t_{wtr0}	α_{w0}	t_{wtr1}	α_{w1}	t_{wtr2}	α_{w2}	P_{cmax}	$(dP/d\alpha)_{max}$	T_{max}
-	-	ms	°OWK	ms	°OWK	ms	°OWK	bar	bar/°OWK	K
1	K0,7(10)	0,7	-10	-	-	-	-	74,34	8,96	1489
2	P0,35(20)(10)	-	-	0,35	-20	0,35	-10	73,44	6,28	1336
3	P0,35(25)(10)	-	-	0,35	-25	0,35	-10	77,58	4,46	1350
4	P0,35(30)(10)	-	-	0,35	-30	0,35	-10	77,92	4,19	1331
5	P0,35(35)(10)	-	-	0,35	-35	0,35	-10	79,23	2,13	1322
6	P0,35(40)(10)	-	-	0,35	-40	0,35	-10	72,27	1,97	1338
7	P0,35(45)(10)	-	-	0,35	-45	0,35	-10	68,18	1,56	1298
8	P0,35(50)(10)	-	-	0,35	-50	0,35	-10	67,16	1,12	1249



Rys. 3. Porównanie przebiegu zmian ciśnienia indykowanego wg. Tab. 2

Kąt wtrysku dawki wstępnej ma istotny wpływ na przebieg zmian ciśnienia indykowanego w cylindrze silnika [5]. Łagodny wzrost ciśnienia przed GMP, wynikający ze sprężania ładunku, przechodził w gwałtowny wzrost po wystąpieniu zapłonu. Wzrost ten był wynikiem spalania dużej ilości paliwa w krótkim czasie (przy jednej dawce paliwa – K0,7(10)). Wysoka wartość ciśnienia maksymalnego powodowała wzrost pola pod krzywą ciśnienia po przekroczeniu GMP. Dla pomiarów z dawką wstępną o dużym kącie $\alpha_{w1} = 40^\circ$ lub większy, dochodziło do inicjacji procesu spalania już w czasie suwu sprężania. Ciśnienie w suwie sprężania rośnie powiększając pole pracy ujemnej. Uzyskiwano mniejsze wartości ciśnienia maksymalnego. Zatem zbyt wczesny zapłon ładunku przyczyniał się do zmniejszania sprawności całego obiegu pracy. Było to zjawisko bardzo niekorzystne, którego należy unikać. W porównaniu z pomiarem K0,7(10) wszystkie obiegi ze wstępną homogenizacją ładunku wykazywały niższe wartości pola pracy ujemnej. Prowadzi to do wniosku, że zastosowanie wstępnej homogenizacji ładunku obniża wartość P_{cmax} (co jest korzystne). Porównanie przebiegu zmian ciśnienia indykowanego zgodnie z (tab. 2) przedstawiono na (rys. 3).

Podział dawki całkowitej wpłynął także na uzyskiwane wartości maksymalnej szybkości narastania ciśnienia. Badania wykazały, że przesunięcie części masy wtryskiwanego paliwa do dawki wstępnej powoduje obniżenie maksymalnej wartości $dP/d\alpha$. Jest to zjawisko pożądane ponieważ zmniejsza twardość pracy silnika. W przypadku przekroczenia granicznej wielkości dawki wstępnej ulegała ona zapłonowi jeszcze w czasie suwu sprężania. Zmieniał się wtedy przebieg $dP/d\alpha$ w funkcji kąta OWK. Maksimum wartości było osiągane w suwie sprężania i miało zdecydowanie mniejszą wartość od uzyskanej dla obiegu, w którym dawka wstępna nie uległa zapłonowi. Porównanie przebiegu zmian $dP/d\alpha$ zgodnie z (tab. 2) przedstawiono na (rys. 4).



Rys. 4. Porównanie przebiegu zmian szybkości narastania ciśnienia w funkcji kąta OWK wg. Tab. 2

Zbyt wczesny zapłon ładunku wpływał także niekorzystnie na przebieg zmian temperatury. Powodował jej wzrost w czasie suwu sprężania. Natomiast zmniejszenie wielkości dawki zasadniczej powodowało obniżenie maksymalnej wartości temperatury (tab. 2).

3.2 Analiza wyników badań emisji związków toksycznych

W celu oceny wpływu podziału dawki paliwa na poziom emisji związków toksycznych przeanalizowano wyniki badań emisji i zadymienia spalin pozyskane w trakcie pomiarów.

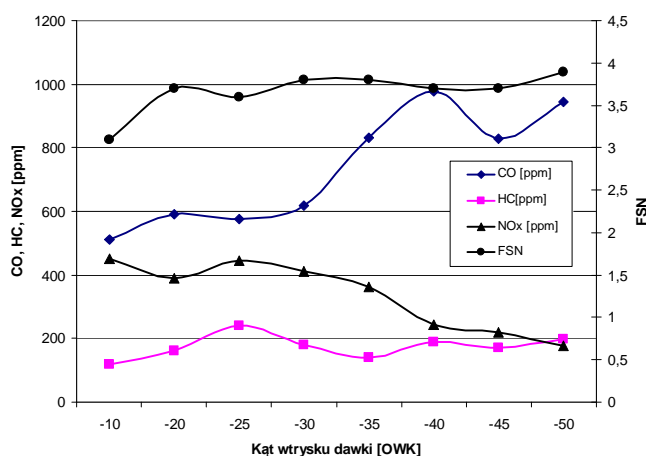
Jako punkt odniesienia przy porównywaniu wyników tych badań przyjęto pomiar K0,7(10) z jedną dawką paliwa, wtryskiwaną 10°OWK przed GMP.

Analizie porównawczej poddano wyniki badań emisji uzyskane przy kącie wyprzedzenia wtrysku drugiej dawki od 20 do 50°OWK przed GMP. Sumaryczna dawka paliwa pozostawała stała i została określona przez stałe ciśnienie wtrysku równe 120 MPa oraz stały czas wtrysku paliwa 0,7 ms.

W porównaniu z zasilaniem silnika jedną dawką, podział dawki powodował wzrost emisji CO i HC. Wzrosło także zadymienie spalin, a emisja NO_x zmalała. Zmiana dawki wstępnej spowodowała wzrost emisji CO i HC. Natomiast emisja NO_x spadła. Zadymienie spalin utrzymywało się na podobnym poziomie. Wpływ dawki wstępnej na emisję związków toksycznych przedstawiono w (tab. 3) oraz na (rys. 5).

Tab. 3. Wpływ zmiany kąta wtrysku dawki wstępnej na emisję związków toksycznych

Lp.	Nazwa	CO	HC	NO _x	Dym
-	-	ppm	ppm	ppm	FSN
1	K0,7(10)	511	120	451	3,1
2	P0,35(20)(10)	591	160	389	3,7
3	P0,35(25)(10)	576	240	445	3,6
4	P0,35(30)(10)	619	180	410	3,8
5	P0,35(35)(10)	831	140	363	3,8
6	P0,35(40)(10)	978	190	245	3,7
7	P0,35(45)(10)	829	170	218	3,7
8	P0,35(50)(10)	943	198	178	3,9



Rys. 5. Wpływ kąta wyprzedzenia dawki wstępnej na emisję związków toksycznych

4. WNIOSKI

Podział dawki na wstępną i zasadniczą powodował obniżenie maksymalnej wartości ciśnienia indykowanego. Zmniejszył on także maksymalną wartość szybkości narastania ciśnienia w funkcji kąta OWK, obniżał maksymalną wartość temperatury. Przebieg procesu spalania był bardziej łagodny. Podział dawki całkowitej miał też istotny wpływ na emisję związków toksycznych.

Analiza wyników przeprowadzonych badań skłania do wyciągnięcia następujących wniosków:

- 1) Zwiększenie wielkości dawki wstępnej powodowało obniżenie maksymalnej wartości szybkości narastania ciśnienia w cylindrze. Zmniejszało także wartość ciśnienia maksymalnego. Było to skutkiem zmniejszenia wielkości dawki zasadniczej.
- 2) Przekroczenie granicy zapalności dawki wstępnej w suwie sprężania powodowało zmniejszenie pracy uzyskiwanej z obiegu. Było to zjawisko niekorzystne, obniżające sprawność ogólną obiegu.
- 3) Przesunięcie wtrysku dawki wstępnej w kierunku GMP powodowało podniesienie wartości maksymalnych podstawowych wskaźników pracy. Wynikało to ze spalania większej ilości paliwa w okolicy GMP.
- 4) Wzrost wielkości dawki wstępnej przyczyniał się do wzrostu emisji CO i HC. Zadymienie spalin również wzrastało. Natomiast emisja NO_x malała. Był to wynik obniżenia temperatury maksymalnej występującej w procesie spalania.
- 5) Zmniejszenie kąta wyprzedzenia wtrysku dawki wstępnej powodowało obniżenie emisji CO i C_nH_m. Emisja NO_x wzrastała. Poziom zadymienia spalin także malał. Był to skutek wzrostu wartości temperatury maksymalnej w cylindrze.

Możliwość zastosowanego układu wtryskowego typu Common Rail pozwalają na dalsze badania z zastosowaniem podziału dawki całkowitej na większą liczbę części. Należałoby także przeprowadzić badania dla większego kąta wyprzedzenia wtrysku dawki wstępnej. W dalszej kolejności należy przeprowadzić podobne badania dla silnika z doładowaniem.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Bajerlein M.: *Analiza wybranych wielkości termodynamicznych procesu spalania w silniku o zapłonie samoczynnym przy zasilaniu olejem napędowym z rozpuszczonymi spalinami*, Praca doktorska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej, Poznań 2007.
- [2] Günther H.: *Diagnozowanie silników wysokoprężnych*, Warszawa WKiŁ 2006.
- [3] Kozak W.: *Fizykochemiczne podstawy regulacji i sterowania silników spalinowych*, Poznań, WPP 2011.
- [4] Serdecki W.: *Badania Silników Spalinowych*, Poznań, WPP 1998.
- [5] Wajand A.: *Silniki o zapłonie samoczynnym*, Warszawa WNT 1988.
- [6] Zbierski K.: *Układy wtryskowe Common Rail*, Oficyna Wydawnicza Miw s.c. J. Kosakowski i Zb. Wrona, Łódź 2001.