

## THE EFFECT OF ANGLE POSITION OF MAIN, PILOT AND PREINJECTION FUEL DOSE ON NO<sub>x</sub> FORMATION IN COMPRESSION IGNITION ENGINE WITH COMMON RAIL SYSTEM

Krzysztof Balawender, Hubert Kuszewski, Kazimierz Lejda, Adam Ustrzycki

Rzeszow University of Technology

Department of Dept of Automotive Vehicles and Internal Combustion Engines

Al. Powstańców Warszawy 8, 35-959 Rzeszów, Poland

tel.: +48 17 8651588, fax: +48 17 8543112

e-mail: kbalawen@prz.edu.pl

### Abstract

*In recent years the compression ignition engines with direct injection equipped with common rail system are subject to intensive development. Mainly, the reason for it the ecological considerations are. Generally the engines of this type are characterized by relatively low specific fuel consumption, lower noisy, and lower emission of toxicity components in relation to DI engines with conventional injection system. Especially the main advantage of common rail system is possibility of easy controlling the injection parameters. Particularly a possibility of splitting the fuel dose into several parts within the one engine cycle permits to influence on combustion process. In the paper the effect of injection characteristic on NO<sub>x</sub> formation in DI engine equipped with common rail injection system is presented. In principle, the course of injection by pilot, preinjection and main fuel dose was shaped. The fuel dose quantities were changing by choosing of injector opening duration. The distances between parts of injection were changed too. The researches were conducted at constant rotational speed of engine. A whole researches by using the test engine equipped with common rail injection system were realized. The following parameters were measured during researches: rotational speed, power, hour fuel consumption, rate of air flow into engine and concentration of NO<sub>x</sub> and HC in exhaust gases. Also high speed parameters were recorded such as pressure in combustion chamber, injector control signals and pressure in inlet manifold.*

**Keywords:** common rail, fuel injection, injection control, injection parameters, pilot injection, diesel engine

## THE EFFECT OF ANGLE POSITION OF MAIN, PILOT AND PREINJECTION FUEL DOSE ON NO<sub>x</sub> FORMATION IN COMPRESSION IGNITION ENGINE WITH COMMON RAIL SYSTEM

### Streszczenie

*W ostatnich latach intensywnemu rozwojowi podlegają silniki wysokoprężne z bezpośrednim wtryskiem paliwa wyposażone w akumulacyjne układy zasilania typu Common Rail. Jest to podyktowane głównie względami ekologicznymi. Ogólnie, silniki tego typu charakteryzują się stosunkowo niskim jednostkowym zużyciem paliwa, mniejszą hałaśliwością i mniejszą emisją toksycznych składników spalin w stosunku do silników typu DI z konwencjonalnym układem wtryskowym. Szczególnie ważną zaletą zasobnikowych układów wtryskowych jest możliwość łatwego sterowania parametrami wtrysku. Zwłaszcza możliwość podziału dawki paliwa na kilka części w obrębie jednego cyklu pracy silnika pozwala na istotne oddziaływanie na przebieg procesu spalania. W artykule przedstawiono wpływ charakterystyki wtrysku na powstawanie NO<sub>x</sub> w silniku typu DI wyposażonym w układ wtryskowy typu Common Rail. Charakterystyka wtrysku zasadniczo ukształtowana była przez dawkę pilotującą, przedwtryskową i zasadniczą. Wielkość tych dawek zmieniana była przez zmianę czasu otwarcia wtryskiwacza. Zmianom podlegały także odległości katowe pomiędzy składowymi dawki paliwa. Badania prowadzone były przy stałej prędkości obrotowej silnika. Całość badań realizowana była na jednocyndrowym silniku badawczym z zaadoptowanym do niego układem wtryskowym typu Common Rail. Podczas badań pomiarom podlegały między innymi następujące parametry: prędkość obrotowa, moc, godzinowe zużycie paliwa, masowe natężenie przepływu powietrza do silnika oraz stężenie tlenków azotu NO<sub>x</sub> i węglowodorów HC w spalinach. Rejestrowano także parametry szybkozmienne takie jak: ciśnienie w komorze spalania, sygnały sterujące pracą wtryskiwaczy, ciśnienie w układzie dolotowym.*

**Słowa kluczowe:** Common Rail, wtrysk paliwa, sterowanie wtryskiem, parametry wtrysku, dawka pilotowa, silnik wysokoprężny

## 1. Wprowadzenie

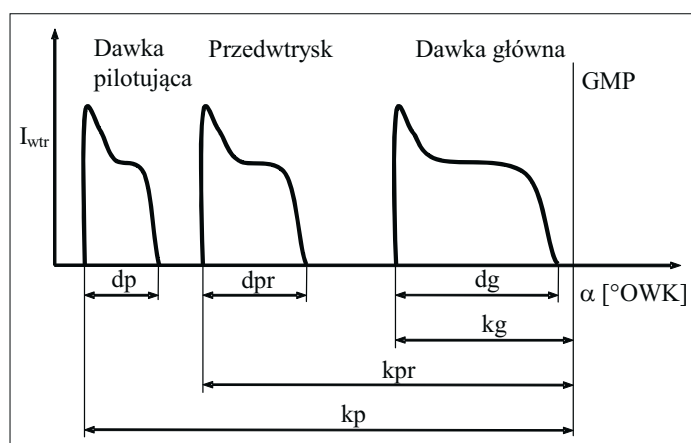
Elektroniczne systemy sterowania aparatury wtryskowej silników wysokoprężnych stosowane współcześnie pozwalają na kształtowanie charakterystyki podawania paliwa z możliwością jej zmiany w zależności od warunków pracy silnika. Dzięki temu można modyfikować przebieg wywiązywania się ciepła, który ma wpływ na tworzenie się składników toksycznych w spalinach [4]. Praktyczna realizacja charakterystyki wtrysku odbywa się poprzez podział dawki paliwa w jednym cyklu roboczym silnika na kilka części.

Należy mieć jednak na uwadze, że każda modyfikacja parametrów procesu spalania w kierunku np. zmniejszenia ( $\text{NO}_x$ ) z reguły prowadzi do wzrostu emisji cząstek stałych (PM) i odwrotnie. Prawidłowości takie są stwierdzane także przy coraz powszechniej stosowanych usprawnieniach procesów mieszania i spalania, w tym przez zastosowanie coraz bardziej zaawansowanych strategii sterowania wtryskiem paliwa.

Powszechne dziś stosowanie dawki pilotującej, której celem jest skrócenie okresu opóźnienia samozapłonu, skutkuje zmniejszeniem hałasu, ograniczeniem intensyfikacji przejmowania ciepła przez czynnik roboczy, a także pozwala na ograniczenie powstawania tlenków azotu. Dodatkowo, zastosowanie dawki przedwtryskowej pozwala na ograniczenie ilości paliwa dostarczonej do komory spalania w okresie opóźnienia samozapłonu i w rezultacie prowadzi do pogorszenia się warunków sprzyjających formowaniu się tlenków azotu.

Przy zastosowaniu podziału dawki paliwa na dawkę pilotującą, przedwtryskową i główną należy zwrócić uwagę zarówno na ilość paliwa podawaną w każdej z nich, jak również na odległość pomiędzy dawkami. Określenie wpływu parametrów wtrysku paliwa przy podziale dawki wiąże się więc z koniecznością przeprowadzenia dużej liczby pomiarów. Dlatego w takim przypadku szczególnie uzasadnione jest skorzystanie z odpowiedniego planu badań.

W niniejszym artykule przedstawiono wybrane wyniki badań wpływu podziału dawki paliwa na stężenie  $\text{NO}_x$  w spalinach silnika wysokoprężnego typu DI z wykorzystaniem przygotowanego w tym celu planu badawczego PS/DS-P: $\lambda$  [5].

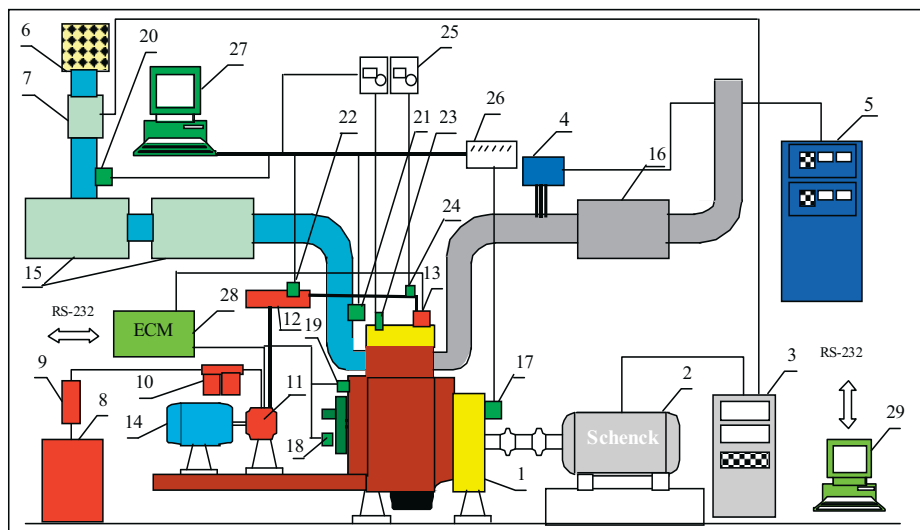


Rys. 1. Podział dawki paliwa w jednym cyklu roboczym silnika na trzy części:  $dp$  – czas trwania sygnału sterującego otwarciem wtryskiwacza dla dawki pilotującej,  $dpr$  – czas trwania sygnału sterującego otwarciem wtryskiwacza dla przedwtrysku,  $dg$  – czas trwania sygnału sterującego otwarciem wtryskiwacza dla dawki głównej,  $kp$  – kąt wyprzedzenia sygnału sterującego otwarciem wtryskiwacza przed GMP silnika dla dawki pilotującej,  $kpr$  – kąt wyprzedzenia sygnału sterującego otwarciem wtryskiwacza przed GMP silnika dla przedwtrysku,  $kg$  – kąt wyprzedzenia sygnału sterującego otwarciem wtryskiwacza przed GMP silnika dla dawki głównej,  $I_{wtr}$  – prąd sterujący wtryskiwaczem

Fig. 1. Split of fuel dose into three part within one engine work cycle:  $dp$ -control signal duration of injector opening for pilot dose,  $dpr$ -control signal duration of injector opening for preinjection,  $dg$ -control signal duration of injector opening for main dose,  $kp$ -advance angle of control signal of injector opening for pilot dose in relation to TDC,  $kpr$ -advance angle of control signal of injector opening for preinjection in relation to TDC,  $kg$ -advance angle of control signal of injector opening for main dose in relation to TDC,  $I_{wtr}$ -control current of injector

## 2. Stanowisko badawcze i metodyka badań

Celem badań doświadczalnych było określenie wpływu położenia kąowego poszczególnych części dawki paliwa wtryskiwanej w czasie jednego cyklu roboczego silnika na emisję tlenków azotu  $\text{NO}_x$ . Dawka paliwa została podzielona na trzy części: dawkę pilotującą, przedwtrysk i dawkę główną. Każda z części dawki została scharakteryzowana poprzez kąt wyprzedzenia początku sygnału sterującego otwarciem wtryskiwacza przed GMP silnika i czas trwania tego sygnału (Rys. 1.). Obiektem wykorzystywanym do badań był jednocylindrowy silnik badawczy z zapłonem samoczynnym typu SB3.1 wyposażony w zasobnikowy układ wtryskowy typu Common Rail, umożliwiający podział dawki paliwa wtryskiwanej w jednym cyklu roboczym silnika przy różnych ciśnieniach wtrysku. Dane techniczne silnika SB3.1 są zawarte w [1, 3]. Dokładny opis zmodyfikowanego układu zasilania przedstawiono w [1].



Rys. 2. Schemat stanowiska pomiarowego: 1 – silnik badawczy SB3.1, 2 – hamulec hydrauliczny, 3 – pulpity sterownicze hamulca hydraulicznego i przepływomierza powietrza, 4 – układ poboru próbek spalin systemu CLD, 5 – pulpity sterownicze systemu pomiaru tlenków azotu, 6 – filtr powietrza, 7 – przepływomierz powietrza, 8 – system pomiaru zużycia paliwa, 9 – pompa zasilająca, 10 – zespół filtrów, 11 – pompa wysokiego ciśnienia CR, 12 – zasobnik ciśnienia CR, 13 – wtryskiwacz CR, 14 – silnik elektryczny napędzający pompę wysokiego ciśnienia, 15 – tłumik pulsacji ciśnienia w układzie dolotowym, 16 – tłumik wydechu, 17 – czujnik indukcyjny pomiaru GMP, 18 – czujnik indukcyjny pomiaru położenia wału rozrządu, 19 – czujnik indukcyjny pomiaru prędkości obrotowej silnika, 20, 21 – czujniki ciśnienia bezwzględne, 22 – czujnik ciśnienia w zasobniku CR, 23 – czujnik ciśnienia w cylindrze, 24 – czujnik ciśnienia w przewodzie paliwowym łączącym zasobnik ciśnienia z wtryskiwaczem, 25 – wzmacniacze ładunku elektrycznego, 26 – wzmacniacz napięciowy, 27 – komputer rejestrujący szybkozmienne sygnały elektryczne, 28 – elektroniczny sterownik układu CR, 29 – komputer sterujący parametrami układu CR

Fig. 2. Scheme of test stand: 1-test engine SB3.1, 2-hydraulic brake, 3-console of hydraulic brake and air flowmeter, 4-system for taking a exhaust gas sample CLD, 5-console of measuring system for nitric oxides, 6-air filter, 7-air flowmeter, 8-measuring system of fuel consumption, 9-filter set, 10-high pressure pump CR, 12-pressure rail CR, 13-injector CR, 14-electric engine powering a high pressure pump, 15-suppressor for pressure fluctuation in intake manifold, 16-exhaust silencer, 17-inductive sensor for TDC measuring, 18-inductive sensor for measuring of camshaft position, 19-inductive sensor for measuring of engine rotational speed, 20, 21-absolute pressure sensors, 22-pressure sensor in rail CR, 23-pressure sensor in engine cylinder, 24-pressure sensor in fuel pipe connecting the rail with the injector, 25-charge amplifiers, 26-voltage amplifier, 27-computer for recording a high speed electric signals, 28-electronic controller of CR system, 29-computer for controlling parameters of CR system

Głównymi zespołami stanowiska badawczego są: silnik wysokoprężny SB3.1 z układem wtryskowym typu Common Rail, silnikowy hamulec hydrauliczny typu D-630E firmy Schenck, system masowego pomiaru zużycia powietrza firmy AVL, system pomiaru masowego zużycia paliwa firmy AVL, system pomiaru emisji  $\text{NO}_x$  CLD PM-2000 firmy Pierburg, system do indykowania silnika firmy AVL, komputerowy system rejestracji wielkości szybkozmiennych

(m.in. napięcia sterującego pracą wtryskiwacza, prądu w obwodzie wtryskiwacza, sygnałów czujników położenia wału rozrządu i prędkości obrotowej silnika, ciśnień bezwzględnych powietrza w układzie dolotowym silnika) oparty na karcie pomiarowej National Instruments NI PCI-6229 o częstotliwości próbkowania 1 MHz. Schemat stanowiska został przedstawiony na Rys. 2

Tab. 1. Wartości wybranych parametrów procesu wtrysku podczas badań  
Tab. 1. Values of selected parameters of injection process obtained during researches

Zmieniany parametr			Parametry stałe						Seria 1	Rys. 3-5
			kp	dp	kpr	dpr	kg	dg		
			°OWK	μs	°OWK	μs	°OWK	μs		
kp	min	63 °OWK	-	310	34	310	10	710	Seria 2	Rys. 6-8
	ma	88 °OWK								
dp	min	310 μs	63	-	34	310	10	710		
	ma	370 μs								
kpr	min	34 °OWK	63	310	-	310	10	710		
	ma	41 °OWK								
dpr	min	310 μs	63	310	34	-	10	710		
	ma	370 μs								
kg	min	10 °OWK	63	310	34	310	-	710		
	ma	19 °OWK								
dg	min	710 μs	63	310	34	310	10	-		
	ma	1570 μs								
kp	min	63 °OWK	-	370	41	370	19	1570		
	ma	88 °OWK								
dp	min	310 μs	88	-	41	370	19	1570		
	ma	370 μs								
kpr	min	34 °OWK	88	370	-	370	19	1570		
	ma	41 °OWK								
dpr	min	310 μs	88	370	41	-	19	1570		
	ma	370 μs								
kg	min	10 °OWK	88	370	41	370	-	1570		
	ma	19 °OWK								
dg	min	710 μs	88	370	41	370	19	-		
	ma	1570 μs								

Tab.2. Wartości kątów wyprzedzenia i czasu wtrysku poszczególnych części dawki paliwa (dotyczy sygnałów elektrycznych sterujących wtryskiwaczem)

Tab. 2. Values of injection advance angles and injection duration for individual parts of fuel dose (it concerns the electric control signals of injector)

Zmieniany parametr			kp	dp	kpr	dpr	kg	Dg
			°OWK	μs	°OWK	μs	°OWK	μs
kp	min	50 °OWK	-	340	37	340	15	1140
	max	100 °OWK						
kpr	min	30 °OWK	75	340	-	340	15	1140
	max	44 °OWK						
kg	min	-5 °OWK	75	340	37	340	-	1140
	max	24 °OWK						

Badania doświadczalne na silniku SB3.1 były prowadzone przy prędkości obrotowej silnika równej 1600 obr/min i ciśnieniu w zasobniku CR równym 120 MPa, po ustabilizowaniu stanu cieplnego silnika i systemów pomiarowych, według opracowanego planu badawczego (Tab. 1-2). Jego dokładna specyfikacja została przedstawiona w pracach [1, 5]. Plan obejmuje dwie serie badań (dla małych wartości obciążeń - seria 1 i dla dużych wartości obciążeń - seria 2).

W każdej z serii sumaryczny czas wtrysku przy zmianach parametrów kątowych

poszczególnych części dawki jest stały. Podejście takie powinno zapewnić stałą dawkę wtryskiwanego paliwa w jednym cyklu roboczym silnika, co umożliwi porównanie wpływu położenia kąтового dawki na emisję NO<sub>x</sub>. Przyczyny odchylenia dawki wtryskiwanego paliwa od wartości ustalonej, w poszczególnych punktach pomiarowych, są dokładnie wyjaśnione w [2]. Pomiarów wszystkich parametrów i przebiegów dokonywano równocześnie.

Przebiegi czasowe wielkości szybkozmiennych (ciśnienie w cylindrze silnika, położenie kątowe wału rozrządu, ciśnienie bezwzględne w układzie dolotowym, sygnały prądowe i napięciowe sterujące wtryskiwaczem, ciśnienie w zasobniku ciśnienia CR i przewodzie doprowadzającym paliwo do wtryskiwacza) rejestrowano przy pomocy komputerowego systemu pomiarowego z kartą pomiarową National Instruments NI PCI-6229. Parametry rejestracji dobierano w ten sposób, aby zarejestrować 5 pełnych cykli pracy silnika z dokładnością kątową odpowiadającą 1°OWK. Za końcowy wynik pomiaru przebiegów czasowych przyjmowano przebieg jednego pełnego cyklu, będącego średnią z 5 cykli. Ponieważ początek sygnału elektrycznego sterującego otwarciem wtryskiwacza nie jest równoznaczny z jego otwarciem [6], określono także średnie opóźnienie otwarcia wtryskiwacza w stosunku do sygnału sterującego. Dla każdego punktu pomiarowego dokonywany był pomiar stężenia NO<sub>x</sub> za pomocą systemu Pierburg CLD PM2000.

### 3. Wyniki badań

Na podstawie badań uzyskano interesujące wyniki. Opóźnienie wtrysku paliwa do cylindra silnika w stosunku do prądowego sygnału sterującego wyniosło średnio 557 μs, z odchyleniem standardowym 28 μs (ok. 0,25°OWK przy prędkości obrotowej silnika 1600 obr/min). Wyniki badań zamieszczono w Tab. 3. Na Rys. 3-9 przedstawiono opracowane wyniki w formie graficznej.

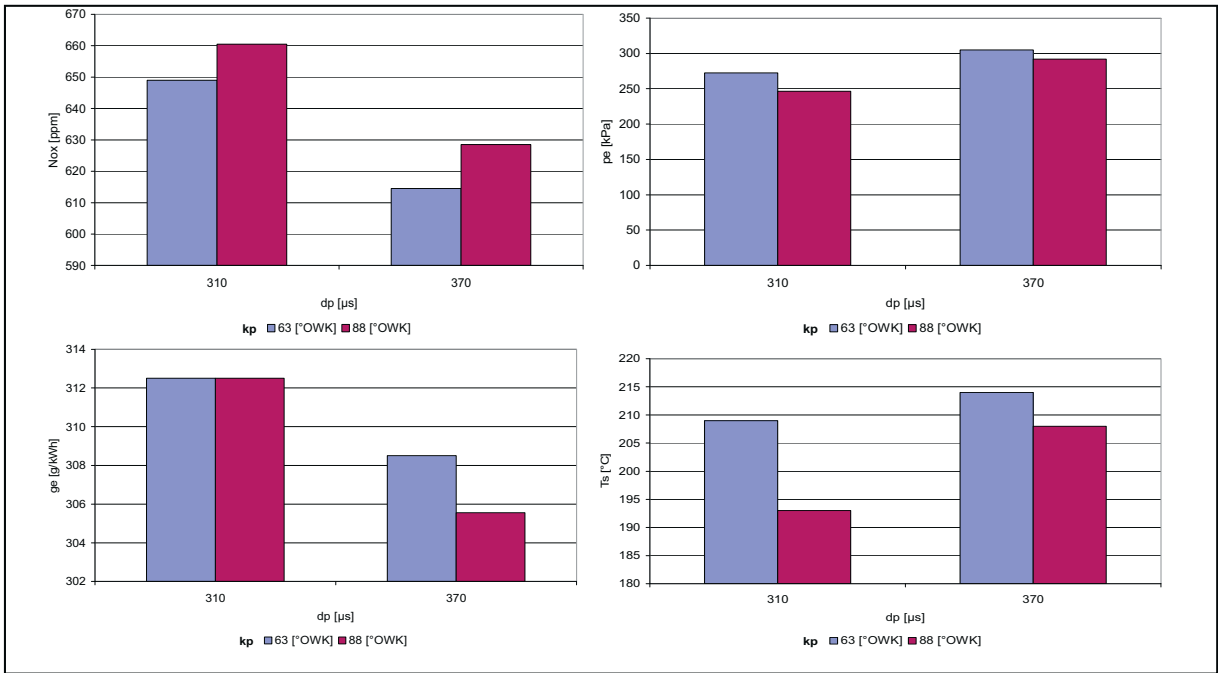
Tab. 3. Wartości wybranych parametrów procesu wtrysku i wyniki pomiarów  
Tab. 3. Values of selected parameters of injection process and test results

°OWK	μs	°OW K	μs	°OWK	μs	g/kWh	Nm	kPa	°C	ppm	ppm	g/kWh
63	310	34	310	10	710	312,5	40,1	272,4	209	207,0	649	2,939987
88	310	34	310	10	710	312,5	36,3	246,5	193	220,0	661	2,37328
63	370	34	310	10	710	308,5	44,9	304,9	214	466,0	615	4,784709
63	310	41	310	10	710	328,6	33,4	227,0	192	191,5	616	1,649207
63	310	34	370	10	710	294,3	45,8	311,4	219	192,0	686	1,236756
63	310	34	310	19	710	337,1	31,5	214,1	190	163,0	1260	1,587429
63	310	34	310	10	1570	248,6	83,1	564,3	368	105,5	608	1,018208
63	370	41	370	19	1570	255,0	95,5	648,6	390	302,0	2154	0,593721
88	370	41	370	19	1570	251,3	94,5	642,2	365	287,0	1866	1,004338
88	310	41	370	19	1570	247,3	88,8	603,2	362	263,0	1966	0,323514
88	370	34	370	19	1570	248,7	90,7	616,2	369	374,5	1870	0,097129
88	370	41	310	19	1570	248,7	89,8	609,7	370	246,5	1961	0,610284
88	370	41	370	10	1570	257,9	90,7	616,2	385	304,0	578	1,672986
88	370	41	370	19	710	297,7	56,3	382,7	248	805,0	1878	5,735558
50	340	37	340	15	1140	250,0	73,5	499,5	292	263	1252	0,466867
100	340	37	340	15	1140	258,1	73,5	499,5	298	360	1274	1,253878
75	340	30	340	15	1140	267,6	67,8	460,5	288	286	1139	1,403196
75	340	44	340	15	1140	274,0	69,7	473,5	284	248	1269	1,221241
75	340	37	340	-5	1140	286,5	62,1	421,6	312	293	230	2,978853
75	340	37	340	24	1140	287,9	63,0	428,1	285	330,5	2991	1,920369

ge – jednostkowe zużycie paliwa [g/kWh], Mo – moment obrotowy silnika [Nm], pe – średnie ciśnienie użyteczne [kPa], Ts – temperatura spalin [°C], HC – stężenie węglowodorów w spalinach [ppm], NO<sub>x</sub> – stężenie tlenków azotu w spalinach [ppm], PM – emisja cząstek stałych [g/kWh]

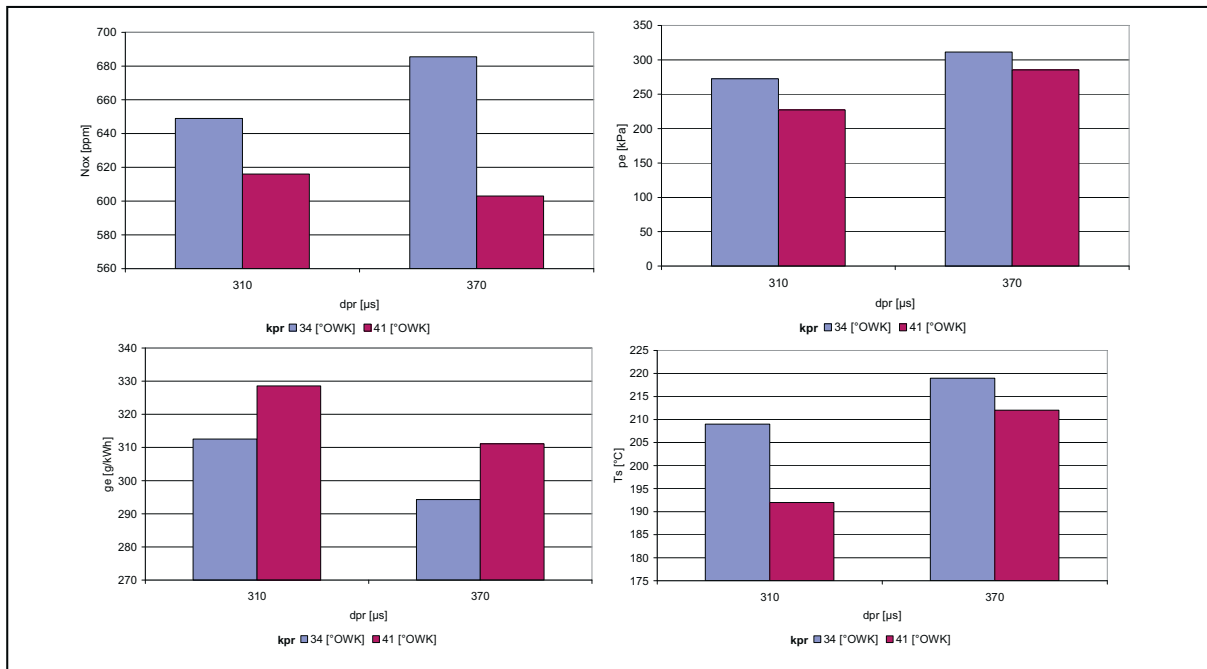
ge-specific fuel consumption [g/kWh], Mo-engine torque [Nm], pe-mean effective pressure [kPa], Ts-exhaust gas temperature [°C], HC-hydrocarbons concentration in an exhaust gases [ppm], Nox-nitric oxides concentration in an exhaust gases [ppm], PM-particulate matter emission [g/kWh]





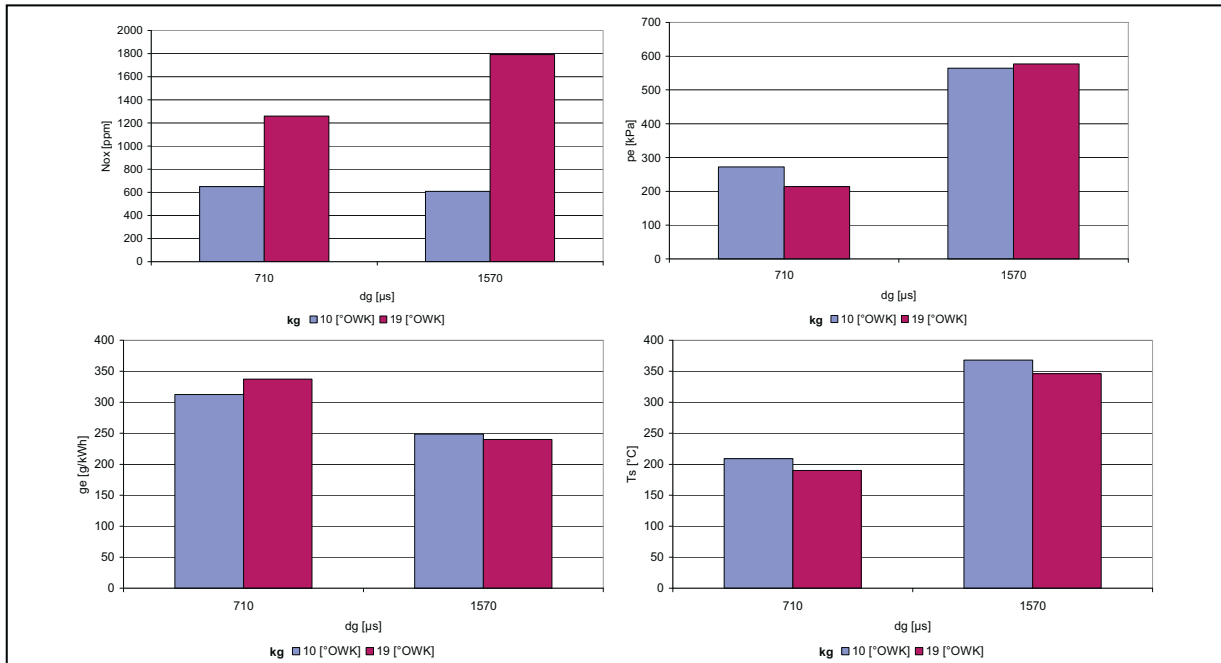
Rys. 3. Wpływ wielkości dawki pilotującej  $dp$  i kąta wyprzedzenia dawki pilotującej  $kp$  na stężenie  $NO_x$ , średnie ciśnienie użyteczne  $pe$ , jednostkowe zużycie paliwa  $ge$  i temperaturę spalin  $T_s$  przy stałych parametrach: kąta wyprzedzenia dawki przedwtrysku  $kpr$   $34^\circ OWK$ , wielkości dawki przedwtrysku  $dpr$   $310 \mu s$ , kąta wyprzedzenia dawki głównej  $kg$   $10^\circ OWK$  i wielkości dawki głównej  $dg$   $710 \mu s$

Fig. 3. The effect of pilot dose  $dp$  and advance angle of pilot dose  $kp$  on nitric oxides concentration  $NO_x$ , mean effective pressure  $pe$ , specific fuel consumption  $ge$  and exhaust gas temperature  $T_s$  for constant following parameters: angle advance of preinjection dose  $kpr$   $34^\circ OWK$ , preinjection dose  $dpr$   $310 \mu s$ , angle advance of main dose  $kg$   $10^\circ OWK$  and main dose  $dg$   $710 \mu s$



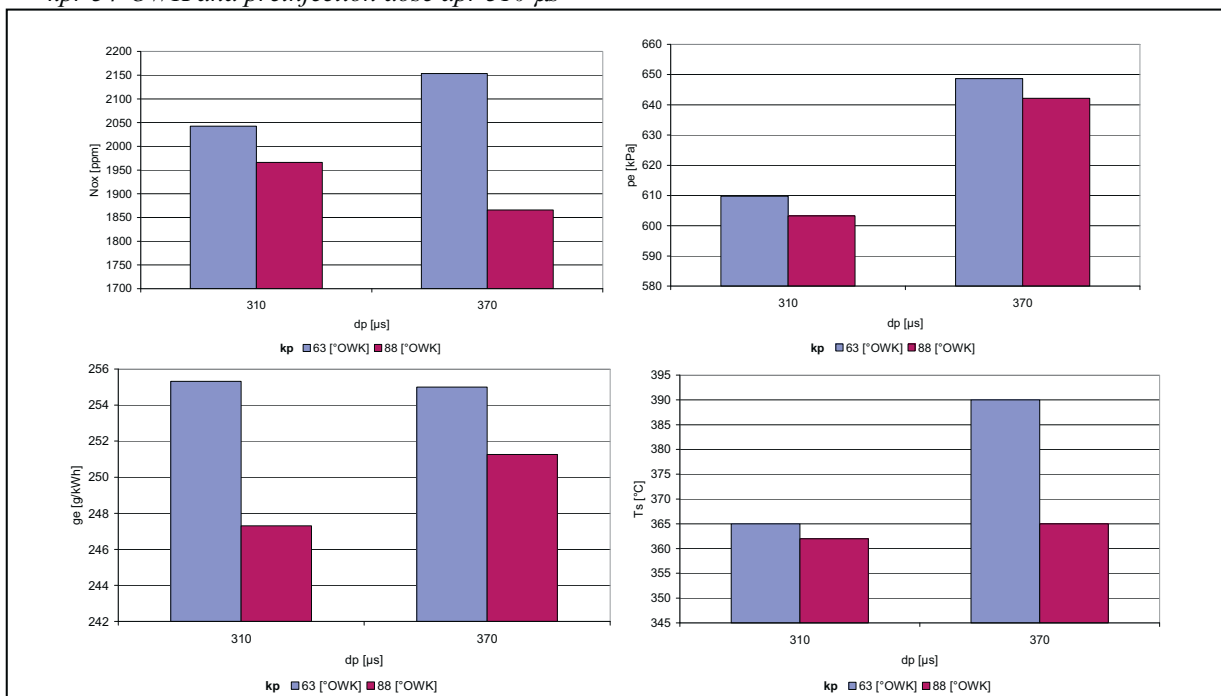
Rys. 4. Wpływ wielkości dawki przedwtrysku  $dpr$  i kąta wyprzedzenia dawki przedwtrysku  $kpr$  na stężenie  $NO_x$ , średnie ciśnienie użyteczne  $pe$ , jednostkowe zużycie paliwa  $ge$  i temperaturę spalin  $T_s$  przy stałych parametrach: kąta wyprzedzenia dawki pilotującej  $kp$   $63^\circ OWK$ , wielkości dawki pilotującej  $dp$   $310 \mu s$ , kąta wyprzedzenia dawki głównej  $kg$   $10^\circ OWK$  i wielkości dawki głównej  $dg$   $710 \mu s$

Fig. 4. The effect of preinjection dose  $dpr$  and advance angle of preinjection dose  $kpr$  on nitric oxides concentration  $NO_x$ , mean effective pressure  $pe$ , specific fuel consumption  $ge$  and exhaust gas temperature  $T_s$  for constant following parameters: angle advance of pilot dose  $kp$   $63^\circ OWK$ , pilot dose  $dp$   $310 \mu s$ , angle advance of main dose  $kg$   $10^\circ OWK$  and main dose  $dg$   $710 \mu s$



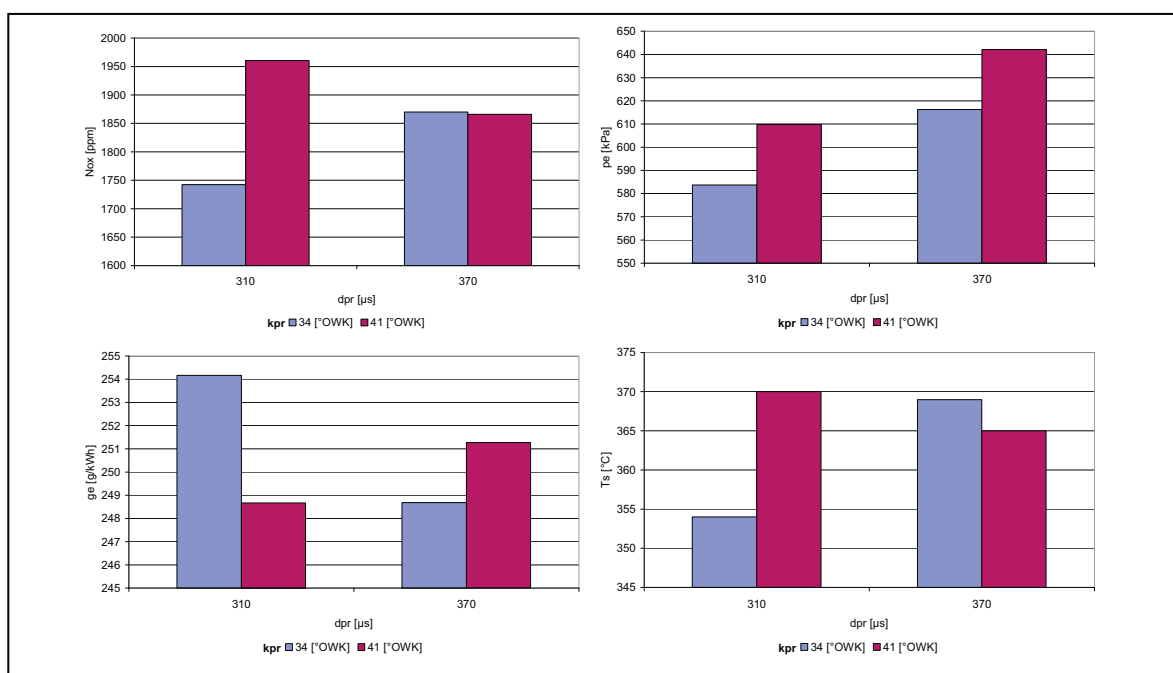
Rys. 5. Wpływ wielkości dawki głównej  $d_g$  i kąta wyprzedzenia dawki głównej  $k_g$  na stężenie  $\text{NO}_x$ , średnie ciśnienie użyteczne  $p_e$ , jednostkowe zużycie paliwa  $g_e$  i temperaturę spalin  $T_s$  przy stałych parametrach: kąta wyprzedzenia dawki pilotującej  $k_p$  63°OWK, wielkości dawki pilotującej  $d_p$  310 μs, kąta wyprzedzenia dawki przedwtrysku  $k_{pr}$  34°OWK i wielkości dawki przedwtrysku  $d_{pr}$  310 μs

Fig. 5. The effect of main dose  $d_g$  and advance angle of main dose  $k_g$  on nitric oxides concentration  $\text{NO}_x$ , mean effective pressure  $p_e$ , specific fuel consumption  $g_e$  and exhaust gas temperature  $T_s$  for constant following parameters: angle advance of pilot dose  $k_p$  63°OWK, pilot dose  $d_p$  310 μs, angle advance of preinjection dose  $k_{pr}$  34°OWK and preinjection dose  $d_{pr}$  310 μs



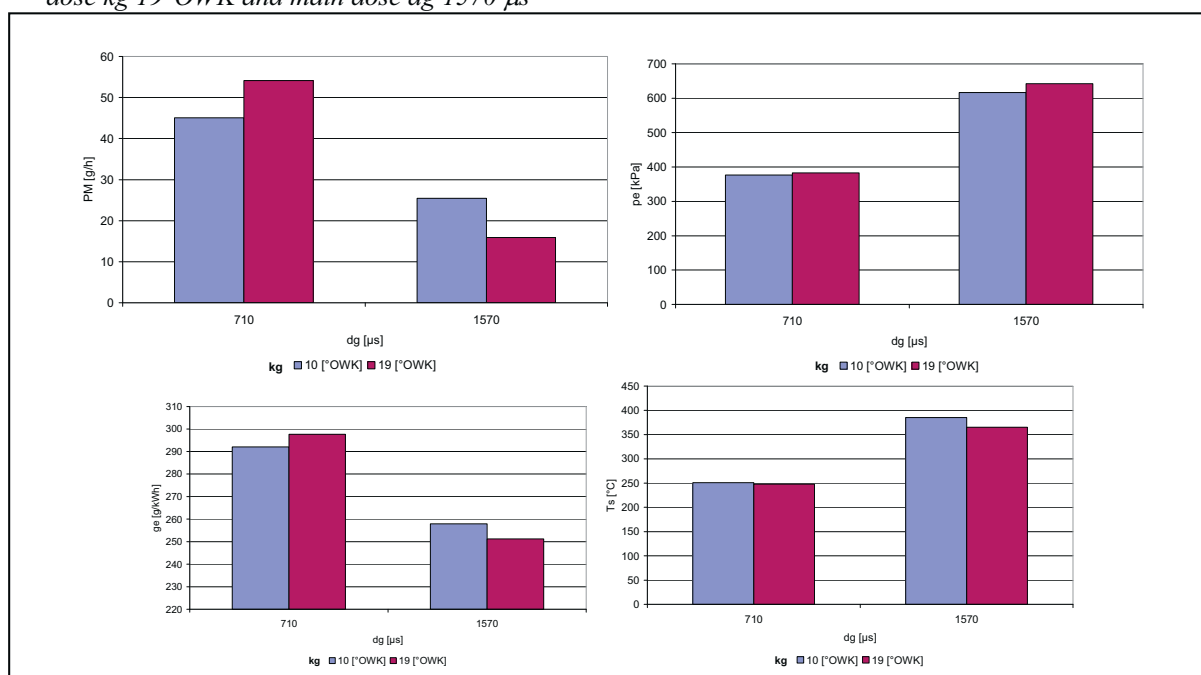
Rys. 6. Wpływ wielkości dawki pilotującej  $d_p$  i kąta wyprzedzenia dawki pilotującej  $k_p$  na stężenie  $\text{NO}_x$ , średnie ciśnienie użyteczne  $p_e$ , jednostkowe zużycie paliwa  $g_e$  i temperaturę spalin  $T_s$  przy stałych parametrach: kąta wyprzedzenia dawki przedwtrysku  $k_{pr}$  41°OWK, wielkości dawki przedwtrysku  $d_{pr}$  370 μs, kąta wyprzedzenia dawki głównej  $k_g$  19°OWK i wielkości dawki głównej  $d_g$  1570 μs

Fig. 6. The effect of pilot dose  $d_p$  and advance angle of pilot dose  $k_p$  on nitric oxides concentration  $\text{NO}_x$ , mean effective pressure  $p_e$ , specific fuel consumption  $g_e$  and exhaust gas temperature  $T_s$  for constant following parameters: angle advance of preinjection dose  $k_{pr}$  41°OWK, preinjection dose  $d_{pr}$  370 μs, angle advance of main dose  $k_g$  19°OWK and main dose  $d_g$  1570 μs



Rys. 7. Wpływ wielkości dawki przedwtrysku  $dpr$  i kąta wyprzedzenia dawki przedwtrysku  $kpr$  na stężenie  $NO_x$ , średnie ciśnienie użyteczne  $pe$ , jednostkowe zużycie paliwa  $ge$  i temperaturę spalin  $T_s$  przy stałych parametrach: kąta wyprzedzenia dawki pilotującej  $k_p$   $88^\circ OWK$ , wielkości dawki pilotującej  $dp$   $370 \mu s$ , kąta wyprzedzenia dawki głównej  $k_g$   $19^\circ OWK$  i wielkości dawki głównej  $dg$   $1570 \mu s$

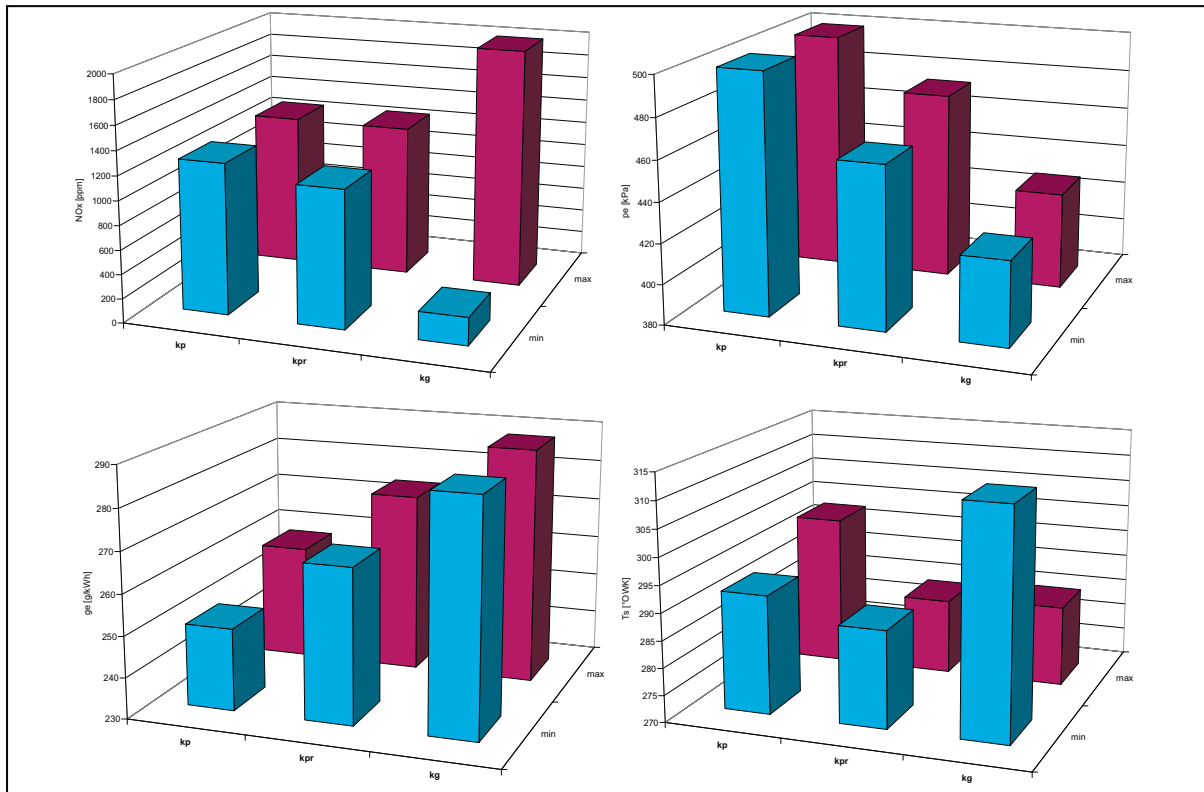
Fig. 7. The effect of preinjection dose  $dpr$  and advance angle of preinjection dose  $kpr$  on nitric oxides concentration  $NO_x$ , mean effective pressure  $pe$ , specific fuel consumption  $ge$  an exhaust gas temperature  $T_s$  for constant following parameters: angle advance of pilot dose  $k_p$   $88^\circ OWK$ , pilot dose  $dp$   $370 \mu s$ , angle advance of main dose  $k_g$   $19^\circ OWK$  and main dose  $dg$   $1570 \mu s$



Rys. 9. Wpływ wielkości dawki głównej  $dg$  i kąta wyprzedzenia dawki głównej  $kg$  na stężenie  $NO_x$ , średnie ciśnienie użyteczne  $pe$ , jednostkowe zużycie paliwa  $ge$  i temperaturę spalin  $T_s$  przy stałych parametrach: kąta wyprzedzenia dawki pilotującej  $k_p$   $88^\circ OWK$ , wielkości dawki pilotującej  $dp$   $370 \mu s$ , kąta wyprzedzenia dawki przedwtrysku  $kpr$   $41^\circ OWK$  i wielkości dawki przedwtrysku  $dpr$   $370 \mu s$

Fig. 8. The effect of main dose  $dg$  and advance angle of main dose  $kg$  on nitric oxides concentration  $NO_x$ , mean effective pressure  $pe$ , specific fuel consumption  $ge$  an exhaust gas temperature  $T_s$  for constant following parameters: angle advance of pilot dose  $k_p$   $88^\circ OWK$ , pilot dose  $dp$   $370 \mu s$ , angle advance of preinjection dose  $kpr$   $41^\circ OWK$  and preinjection dose  $dpr$   $370 \mu s$





Rys. 9. Wpływ wybranych parametrów procesu wtrysku na stężenie  $\text{NO}_x$ , średnie ciśnienie efektywne  $p_e$ , jednostkowe zużycie paliwa  $g_e$  i temperaturę spalin  $T_s$  (wartości parametrów zamieszczono w tabeli 2)

Fig. 9. The effect of selected parameters of injection process on nitric oxides concentration  $\text{NO}_x$ , mean effective pressure  $p_e$ , specific fuel consumption  $g_e$  and exhaust gas temperature  $T_s$  (parameter values are placed in Tab. 2)

#### 4. Wnioski

Badania były przeprowadzone pod kątem doboru parametrów elektronicznego sterownika układu wtryskowego w celu obniżenia zawartości  $\text{NO}_x$  emitowanych przez silnik. W przypadku zastosowania podziału dawki paliwa wtryskiwanej w jednym cyklu roboczym silnika bardzo istotny wpływ na emisję tlenków azotu ma położenie poszczególnych części dawki. Wpływ kątów wyprzedzenia wtrysku poszczególnych części dawki na powstawanie  $\text{NO}_x$  nie jest jednoznaczny. Zależy od ilości paliwa wtryskiwanej w poszczególnych częściach dawki a także od sumarycznej ilości wtrysniętego paliwa (seria 1 - małe dawki i seria 2 - duże dawki), czyli od obciążenia silnika. Przy średnich obciążeniach silnika (Rys. 9) istotny wpływ na wielkość emisji  $\text{NO}_x$  ma kąt wyprzedzenia dawki głównej (zwiększenie kąta powoduje zwiększenie emisji  $\text{NO}_x$ ). Wpływ kątów wyprzedzenia dawki pilotującej i przedwtrysku jest znacznie mniej widoczny. Należy podkreślić, że pomiędzy sygnałem sterującym a rzeczywistym początkiem wtrysku występuje opóźnienie, którego wartość należy uwzględnić w charakterystykach sterownika.

Podsumowując należy stwierdzić, że podział dawki paliwa jest skutecznym sposobem oddziaływania na proces roboczy wysokoprężnego silnika spalinowego i umożliwia kształtowanie jego parametrów operacyjnych i ekologicznych.

#### Literatura

- [1] Balawejder, K., *Wpływ wybranych parametrów regulacyjnych procesu wtrysku na emisję cząstek stałych w silniku wysokoprężnym typu DI*, Rozprawa doktorska, Rzeszów 2007.
- [2] Balawender, K., Kuszewski, H., Lejda, K., Ustrzycki, A., *The influence of mutual angle position of main, pilot and preinjection dose on fuel dosing in Common Rail system*, Journal of POLISH CIMAC, Nr 3, 2008.

- [3] Balawender, K., Woś, P., *Study of Particulate Matter (PM) emission from Single-Cylinder Diesel Engine at Multi-Split Injection*, Combustion Engines, PTNSS-2007-SC3, No. 073, pp. 137-143, Bielsko-Biała, 2007.
- [4] Merkisz, J., *Emisja cząstek stałych przez silniki spalinowe o zapłonie samoczynnym- wybrane zagadnienia*, Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 1997.
- [5] Polański, Z., *Metody optymalizacji w technologii maszyn*, PWN, Warszawa 1977.
- [6] Ustrzycki, A., Kuszewski, H., *Badania początku wtrysku paliwa w układzie wtryskowym typu Common Rail*, Mat. XVII Międz. Konf. Naukowej Sakon'06 nt. Metody obliczeniowe i badawcze w rozwoju pojazdów samochodowych i maszyn roboczych samojezdnych. Zarządzanie i marketing w motoryzacji, Rzeszów 2006.