

## Opportunity of application of the knock phenomenon and smoke emission for the control of common-rail injection parameters

*The paper describes phenomena related to the combustion process that limit the performances and emission of a diesel engine. Knocking and incomplete combustion were taken into consideration as the most important parameters. The paper describes the way of injection parameters optimization consisting in a proper selection of the injection timing of the pilot and the main diesel oil doses. The results were presented on the basis of load characteristics of specific fuel consumption, nitrogen oxide emissions and smoke level (light absorption coefficient) as well as speed-torque and speed-injection timing curves.*

Key words: knock, smoke level, nitrogen oxide, common-rail, knock intensity index

## Możliwości wykorzystania zjawiska stuku i zadymienia spalin do regulacji parametrów wtrysku układu common-rail

*W artykule opisano zjawiska związane z procesem spalania, które ograniczają osiągi i emisji silnika o ZS. Do głównych zaliczono zjawisko stuku i niecałkowitego spalania. Omówiono sposób optymalizacji parametrów wtrysku, który polegał na doborze kątów początku wtrysku dawki pilotującej i dawki głównej ON. Dobór parametrów wtrysku uwzględnił wyżej wymienione zjawiska. Wyniki zostały przedstawione na bazie charakterystyk obciążeniowych jednostkowego zużycia paliwa, stężenia tlenków azotu i zadymienia spalin (współczynnika pochłaniania światła) oraz na charakterystykach prędkościowych momentu obrotowego i kąta wtrysku ON.*

Słowa kluczowe: stuk, poziom zadymienia, tlenki azotu, common rail, wskaźnik intensywności stuku

### 1. Wstęp

Dynamiczny rozwój układów wtrysku bezpośredniego ON typu common-rail ma na celu zwiększenie sprawności cieplnej oraz obniżenie poziomu emisji: tlenków azotu, zadymienia spalin i hałasu w całym obszarze pracy silnika o ZS. Osiągnięcie ww. wymienionych celów jest możliwe do zrealizowania przez odpowiednie sterowanie procesem spalania. Głównym zjawiskiem oddziałującym na przebieg spalania jest proces wtrysku paliwa.

Do podstawowych parametrów procesu wtrysku zalicza się:

- ciśnieniem wtrysku,
- kątem początku wtrysku,
- czasem trwania wtrysku,

Parametry te powinny podlegać ciągłej regulacji w zależności od obciążenia i prędkości obrotowej silnika. W standardowych układach wtryskowych (układy zasilania z pompami rzędowymi i rotacyjnymi) dwa pierwsze z wymienionych parametrów wtrysku są stałe lub nieznacznie korygowane. Czas trwania wtrysku jest dostosowywany do prędkości obrotowej i obciążenia. Ograniczone możliwości regulacyjne standardowego układu wtryskowego są główną przeszkodą w obniżaniu emisji silnika i zwiększaniu jego sprawności.

Pełną regulację parametrów wtrysku zapewniają nowoczesne wysokociśnieniowe elektroniczne układy typu common-rail [1]. W układach tych możliwe jest sterownie w sposób ciągły:

- ciśnieniem wtrysku (powyżej 160MPa),
- kątem wtrysku,
- czasem trwania wtrysku,
- podziałem całkowitej dawki na kilka części (do siedmiu),
- kątami początku wtrysku poszczególnych dawek wtryskiwanego ON.

Strategie sterowania ww. parametrami wtrysku są zapisane w pamięciach komputerów sterujących układami common rail, jako tzw. mapy. Mapy te tworzone są w laboratoriach badawczych. W związku ze wzrostem wymagań odnośnie do osiągnięć i emisji, mapy sterujące podlegają ciągłym zmianom. Poszukiwane są parametry, które będą mogły mieć wpływ na doskonalenie tych map. Jednymi z głównych parametrów, które powinny być brane pod uwagę przy tworzeniu map sterujących układem wtryskowym są: poziom stuku, poziom zadymienia spalin, emisja tlenków azotu i hałas. Stuk w silniku jest odpowiedzialny za nadmierny hałas silnika i niebezpieczeństwo uszkodzenia elementów silnika oraz za spadek sprawności. Nadmierny poziom zadymienia spalin (emisja cząstek stałych) zanieczyszcza środowisko naturalne oraz powoduje spadek sprawności silnika. Emisja tlenków azotu (głównie tlenku azotu NO) jest odpowiedzialna za niebezpieczeństwo wzrostu zachorowań na choroby nowotworowe.

Zjawisko stuku w silniku o zapłonie samoczynnym przedstawiane jest, jako słyszalny wysokoczęstotliwościowy dźwięk emitowany przez elementy

konstrukcyjne silnika. W silnikach o zapłonie iskrowym zjawisko to znane pod nazwą spalania stukowego zostało dokładnie opisane, jako fala ciśnienia pochodząca od samozapłonu mieszanki w strefie niespalonej, która jest widoczna na wykresie indykatorowym w postaci pulsacji ciśnienia w okolicach GMP [2], [3], [4]. Pulsacje ciśnienia oddziałują na materiał konstrukcyjny głowicy i kadłuba powodując jego wibracje, które są słyszalne na zewnątrz silnika. W typowym silniku o ZS spalanie stukowe nie występuje ze względu na to, że w strefie niespalonej znajduje się czyste powietrze. Jednakże przy dużych obciążeniach słyszalny jest, podobnie jak w silniku o zapłonie iskrowym, charakterystyczny wysokoczęstotliwościowy dźwięk. Pochodzenie tego dźwięku może być związane z dużą szybkością narastania ciśnienia w pierwszej fazie spalania. Nadmierna szybkość narastania ciśnienia w komorze spalania może wzbudzać słyszalne na zewnątrz silnika drgania elementów konstrukcyjnych silnika. W literaturze zjawisko to nazywane jest tzw. młotowaniem silnika [5].

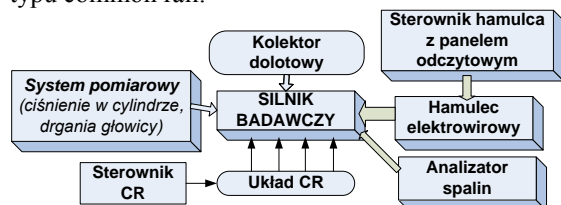
Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie wpływu optymalizacji parametrów wtrysku dawek ON (kąta wtrysku pierwszej dawki ON i kąta wtrysku drugiej dawki ON) uwzględniającej zjawisko stuku i niecałkowite spalanie (określane stopniem zadymienia spalin) na obciążenie silnika jego sprawność i emisję. Wartości graniczne wykorzystane w kryterium stuku określono na podstawie wyników badań silnika zasilanego standardowo (jedna dawka i stały kąt wtrysku oleju napędowego).

Do określenia kryterium zadymienia wykorzystano współczynnik absorpcji światła  $k$ , którego maksymalna wartość dla wolnoobrotowego silnika o zapłonie samoczynnym nie powinna przekraczać 2,51/m [6].

Wybrane efekty doboru parametrów wtrysku, takie jak: jednostkowe zużycie paliwa, emisja NO<sub>x</sub>, zadymienie spalin przedstawiono na charakterystykach obciążeniowych. Zobrazowane zostały również zmiany kątów pierwszej i drugiej dawki ON oraz zmiany obciążenia silnika w funkcji prędkości obrotowej.

## 2. Stanowisko badawcze

Schemat blokowy stanowiska badawczego przedstawiono na rysunku 1. Stanowisko badawcze składało się z jednocyłindrowego silnika o zapłonie samoczynnym wyposażonego w układ wtryskowy typu common rail.



Rys. 1. Schemat blokowy stanowiska badawczego

Silnik połączony był z hamulcem elektrowirowym 3WB15 firmy Vibrometer (pomiar momentu obrotowego z dokładnością 4 Nm, pomiar prędkości obrotowej z dokładnością 2 obr/min). Pomiar zużycia paliwa wykonywany był za pomocą miernika AMX212F firmy Automex (z dokładnością 0.001 kg). Do pomiaru emisji zastosowano analizator AVL DIGAZ 4000 (dokładność pomiarów składników spalin: CO – 0.01%, CO<sub>2</sub> – 0,1%, NO<sub>x</sub> – 1ppm, HC – 1ppm, k – 0.01m<sup>-1</sup>).

Do pomiaru parametrów szybkozmiennych użyto systemu pomiarowego opisanego w [7] wyposażonego w kartę przetwornika analogowo-cyfrowego KPCI 3110 o szybkości próbkowania równej 1,25MHz firmy Keythley oraz w tory pomiarowe: ciśnienia w cylindrze silnika z piezokwarcowym czujnikiem 8Qp500c firmy AVL, dwukanałowego znacznika kąta obrotu wału korbowego (wyzwalanie pojedynczego pomiaru co 0,7 °OWK i cyklu pomiarowego znacznikiem GMP), toru pomiarowego drgań głowicy z czujnikiem DR 190 8092-2F firmy OPEL.

Parametry techniczne silnika badawczego przedstawiono w tablicy 1.

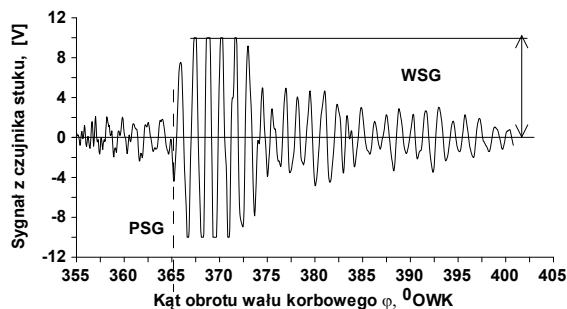
Tabela 1. Dane techniczne czterosurowego jednocyłindrowego silnika 1HC102 o ZS

Średnica cylindra	102 mm
Skok tłoka	120 mm
Objętość skokowa	980 cm <sup>3</sup>
Stopień sprężania	17
Układ zasilania – olej napędowy	Common rail
Moc nominalna	11 kW/2200 obr/min
Moment maksymalny	55Nm/1600 obr/min

## 3. Zjawiska wykorzystane do doboru parametrów wtrysku

### 3.1 Zjawisko stuku

Zjawisko stuku, jak wspomniano powyżej związane jest z drganiami elementów silnika wywołanymi procesem spalania. Drgania te można mierzyć za pomocą czujnika przyspieszeń. W opisywanych badaniach użyto czujnika stuku DR 190 8092-2F firmy OPEL. Przykładowy wykres drgań głowicy przedstawiono na rysunku 2 [8].

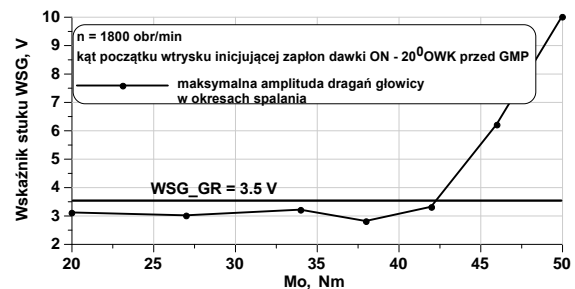


Rys.2. Drgania głowicy w czasie spalania z zaznaczonymi wskaźnikami PSG i WSG

Charakterystycznymi parametrami zaznaczonymi na wykresie są dodatnia amplituda drgań WS (wskaźnik stuków) i kąt początku wystąpienia gwałtownego wzrostu amplitudy drgań PS (początek stuków). Wcześniejsze badania przedstawione w [8] wykazały, że dla badanego silnika amplituda drgań poniżej wartości  $WS < 3,5V$  może być uznana za wartość dopuszczalną, ponieważ w zakresie obciążeń małych i częściowych wartości amplitud drgań utrzymują się na stałym poziomie nie przekraczającym  $3,5V$  (przykładowy wykres zmian wskaźnika stuków przedstawiono na rysunku 3). Wartości  $WS > 3,5V$  świadczą, że w procesie spalania wystąpiło zjawisko zbyt gwałtownego wydzielania się ciepła. Zjawisko to może występować przy dużych wartościach kąta wtrysku (przed GMP) prowadzących do wczesnego samozapłonu dużej ilości odparowanego oleju napędowego. Skutkuje to gwałtownymi szybkościami narastania ciśnienia (powyżej  $0,3 \text{ MPa}/^\circ\text{OWK}$ ), które wymuszają drgania głowicy.

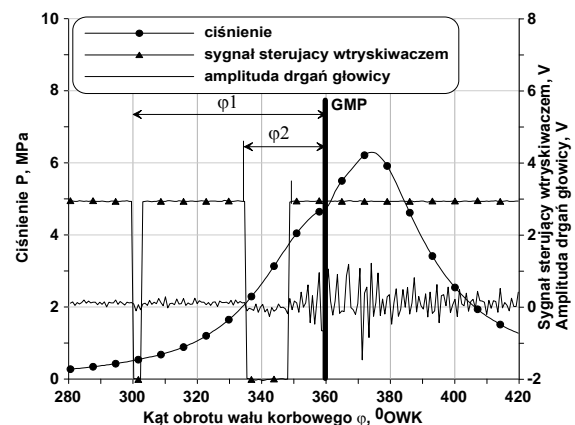
W celu zmniejszenia szybkości narastania ciśnienia należy zminimalizować ilość wydzielonego ciepła przed GMP. Można to zrealizować przez podział całkowitej dawki na dwie lub więcej części (rys.4).

Pierwsza część dawki (przedwtrysk) o małej wartości energetycznej (mała ilość paliwa) jest wtryskiwana przed GMP (kąt  $\phi_1$ ). Ilość paliwa i kąt przedwtrysku jest dobierany tak aby uaktywnić termicznie mocno zubożoną mieszankę ON i powietrza (odparowanie ON, wymieszanie z powietrzem i podgrzanie) przed wtryskiem dawki zasadniczej, która inicjuje zapłon. Dzięki temu ilość wydzielonego ciepła przed GMP jest mała a więc i wartość szybkości narastania ciśnienia nie przekracza wartości, która powodowałaby twardą pracę silnika i stuk (wartości amplitudy drgań głowicy nie przekraczają  $3,5V$ ).



Rys.3. Zmiany wskaźnika WSG w wybranych punktach charakterystyki obciążeniowej (prędkość obrotowa 1800 obr/min, kąt początku wtrysku  $20^\circ\text{OWK}$  przed GMP)

Jednocześnie przereagowane termicznie paliwo pochodzące z przedwtrysku umożliwia skrócenie okresu spalania dawki zasadniczej wtryskiwanej w okolicach GMP (kąt  $\phi_2$ ).



Rys.4. Kątowy podział dawki ON na tle ciśnienia w cylindrze i drgań głowicy

### 3.2 Zadymienie spalin

Zadymienie spalin, czyli zawartość cząstek stałych (sadzy) w spalinach jest skutkiem niecałkowitego spalania ON. Nadmierna ilość emitowanej sadzy prowadzi do spadku sprawności ogólnej silnika oraz jest źródłem skażenia środowiska. Przyjmuje się, że dla silników wolnossących współczynnik pochłaniania światła (przy metodzie pomiarowej polegającej na pomiarze pochłaniania światła przepuszczanego przez spaliny) nie powinien przekraczać  $2,5 \text{ m}^{-1}$  [6].

Regulacja silnika według tego kryterium polegała na ustawieniu kąta wtrysku dawki głównej  $\alpha_2$  w taki sposób aby wartość współczynnika pochłaniania światła nie przekroczyła wartości dopuszczalnej.

### 4. Wyniki badań

Badania przeprowadzono dla dwóch rodzajów sposobu zasilania:

- zasilanie standardowe – wtrysk jednej dawki ON przy stałym kącie wtrysku wynoszącym 20 °OWK przed GMP,
- zasilanie z podziałem dawki na przedwtrysk niewielkiej dawki ON i wtrysk główny.

W tabeli 1 przedstawiono zakres badań dla obydwu typów regulacji wtrysku.

W drugim sposobie zasilania dobierano wartość energetyczną przedwtrysku, która zapewniała pracę silnika na biegu jałowym. Wartością energetyczną drugiej dawki sterowano obciążeniem silnika. Ciśnienie wtrysku było utrzymywane na stałym poziomie i wynosiło 88 MPa.

Wpływ parametrów wtrysku, ustalanych według omawianych kryteriów, na osiągi i emisję przedstawiono na charakterystykach obciążeniowych sporządzonych dla wybranych (obejmujących cały zakres pracy) prędkości obrotowych silnika wynoszących:  $n = 1200$  obr/min;  $n = 1800$  obr/min i  $n = 2200$  obr/min.

Tabela 1. Zakres badań

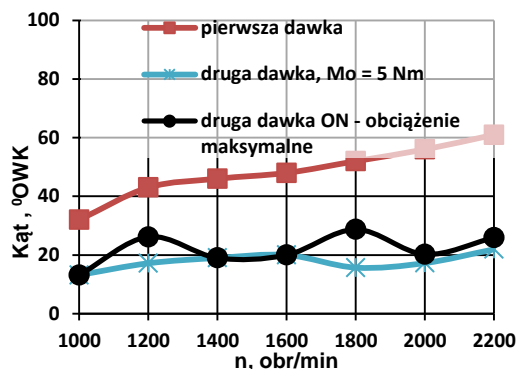
n [obr/min]	Jedna dawka wtrysku ON. Kąt wtrysku 20°OWK przed GMP	Dwie dawki wtrysku ON. Optymalizowane kąty przedwtrysku i wtrysku głównego
1000.. 2200	<b>Pomiar:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• moment obrotowy,</li> <li>• godzinowe zużycie paliwa,</li> <li>• współczynnik absorpcji światła w spalinach,</li> <li>• wskaźnik intensywności stuku.</li> </ul>	<b>Pomiar:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• moment obrotowy,</li> <li>• godzinowe zużycie paliwa,</li> <li>• współczynnik absorpcji światła w spalinach,</li> <li>• wskaźnik intensywności stuku.</li> </ul>

W pierwszej kolejności wykonano badania optymalizując kąty wtrysku w oparciu o pomiary drgań głowicy. Regulacja polegała na poszukiwaniu kątów wtrysku, przy których intensywność występowania zjawiska stuku nie przekraczała wartości uznanej za graniczną (rozdział 2.1).

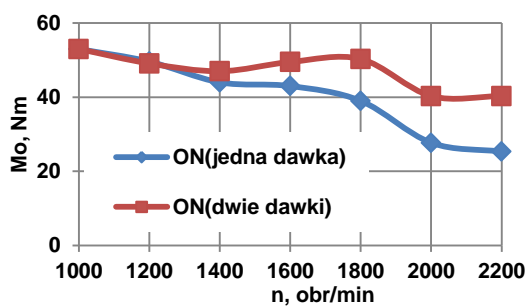
Stosując opisane wyżej kryterium stuku wyznaczono kąty przedwtrysku i wtrysku zasadniczego. Wartości tych parametrów, dla obciążenia minimalnego i pełnego w całym zakresie prędkości obrotowych przedstawiono na rysunku 5a. Na rysunku 5b przedstawiono charakterystykę prędkościową silnika przy pierwszym i drugim sposobie zasilania. Stosując podział dawki i optymalizując kąty wtrysku obu dawek uzyskano w

zakresie wyższych prędkości obrotowych większe obciążenia (w stosunku do pierwszego sposobu zasilania).

a)



b)



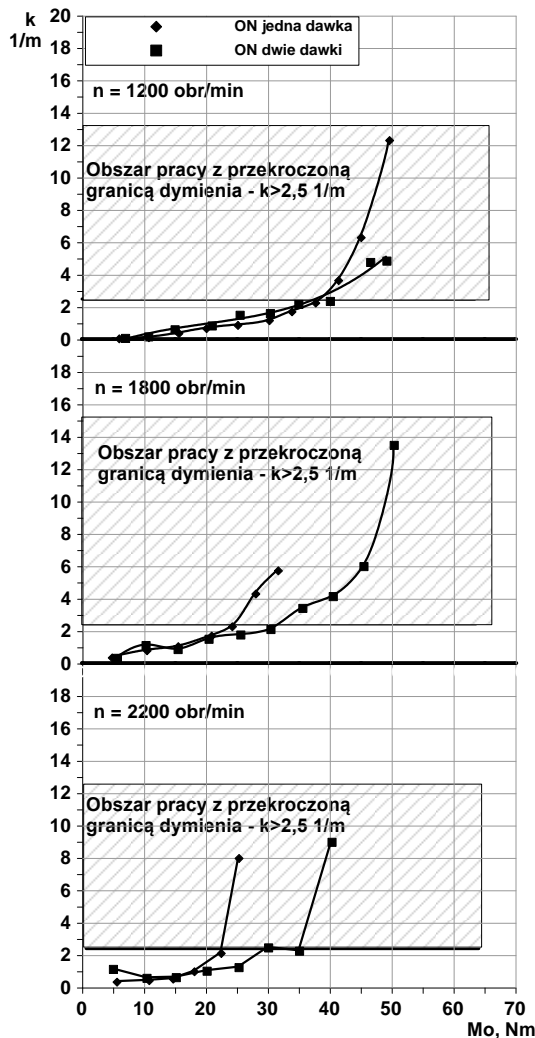
Rys.5. Charakterystyki prędkościowe: a) kątów początku wtrysku pierwszej i drugiej dawki ON, b) momentu obrotowego przy zasilaniu standardowym (jedna dawka ON) i z podziałem dawki ON uwzględniającym zjawisko stuku

#### 4.1 Zadymienie spalin

Przy zwiększaniu obciążenia silnika daje się zauważyć, że poziom zadymienia wzrasta. Dla silnika zasilanego standardowo wzrost zadymienia przy prędkości 1200 obr/min (rys.6a) jest praktycznie taki sam, jak przy zasilaniu z optymalizacją procesu wtrysku. Dopiero w obszarze obciążeń maksymalnych zaznacza się gwałtowny wzrost zadymienia dla zasilania standardowego. Przyjmując graniczny poziom zadymienia wynoszący 2,5 l/m można stwierdzić, że optymalizacja procesu wtrysku nie przyniosła poprawy osiągnięć. W obydwu przypadkach silnik na granicy dymienia osiągał obciążenie około  $Mo \approx 42$  Nm

Wyraźną różnicę można zaobserwować dla prędkości obrotowych 1800 obr/min (rys.6b) i 2200 obr/min (rys.6c). Przy prędkości obrotowej 1800 obr/min uzyskano na granicy dymienia obciążenie wyższe o 10 Nm

w stosunku do zasilania standardowego a dla prędkości obrotowej 2200 obr/min o około 13 Nm.

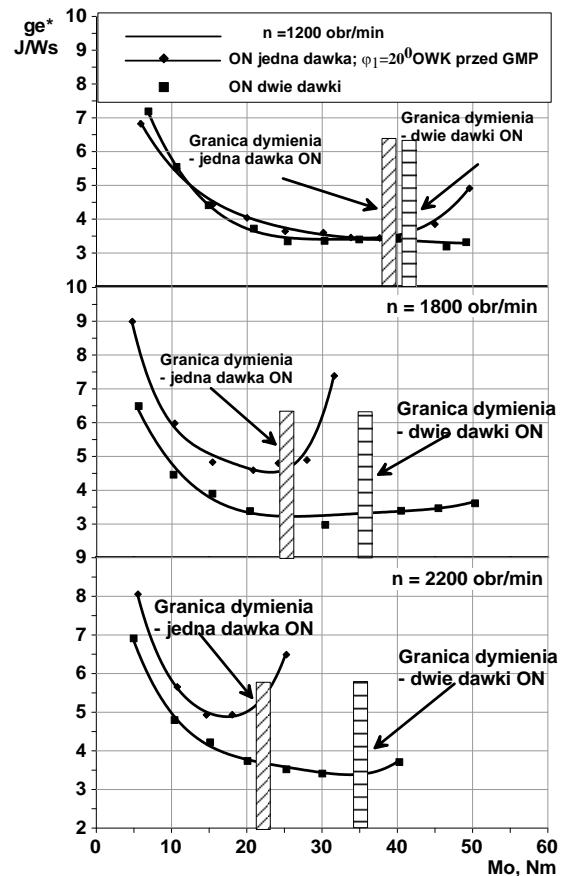


Rys.6. Charakterystyki obciążeniowe współczynnika zadymienia  $k$  z zaznaczonymi obszarami pracy z nadmiernym dymieniem. Prędkość obrotowa silnika  $n = 1200, 1800, 2200$  obr/min. Kąt początku wtrysku przy zasilaniu jednopaliwowym bez podziału dawki ON  $\varphi = 20^\circ$  OWK przed GMP. Kąty początku wtrysku dawek ON  $\varphi_1, \varphi_2$  przy zasilaniu jednopaliwowym zgodne z charakterystykami na rys.5a

#### 4.2 Jednostkowe zużycie energii

Porównując jednostkowe zużycia energii można stwierdzić, że dla trzech analizowanych prędkości obrotowych jednostkowe zużycie energii jest mniejsze przy zasilaniu, w którym optymalizowano parametry wtrysku. Ponadto dla prędkości obrotowych  $n = 1800$  obr/min i  $n = 2200$  obr/min uzyskano dużo większe wartości obciążeń (rys.7b, rys.7c). Dzięki optymalizacji parametrów wtrysku (głównie początku wtrysku drugiej dawki  $\varphi_2$ ) jednostkowe zużycie energii utrzymuje się na stałym, niskim

poziomie aż do obciążeń maksymalnych. Ponadto dla prędkości obrotowych  $n = 1800$  obr/min i  $n = 2200$  obr/min uzyskano dużo większe wartości obciążeń (rys.7b, rys.7c). Jednakże poziomy zadymienia dla obciążeń maksymalnych zostały przekroczone. Zostało to uwidocznione za pomocą pionowych linii (rys.7)



Rys.7. Charakterystyki obciążeniowe jednostkowego zużycia energii  $g_e^* = f(M_o)$  z zaznaczonymi granicami dymienia. Prędkość obrotowa silnika  $n = 1200, 1800, 2200$  obr/min. Kąty początku wtrysku dawek ON  $\varphi_1, \varphi_2$  przy zasilaniu jednopaliwowym takie same jak na rys.5a

#### 4.3 Stężenia tlenków azotu

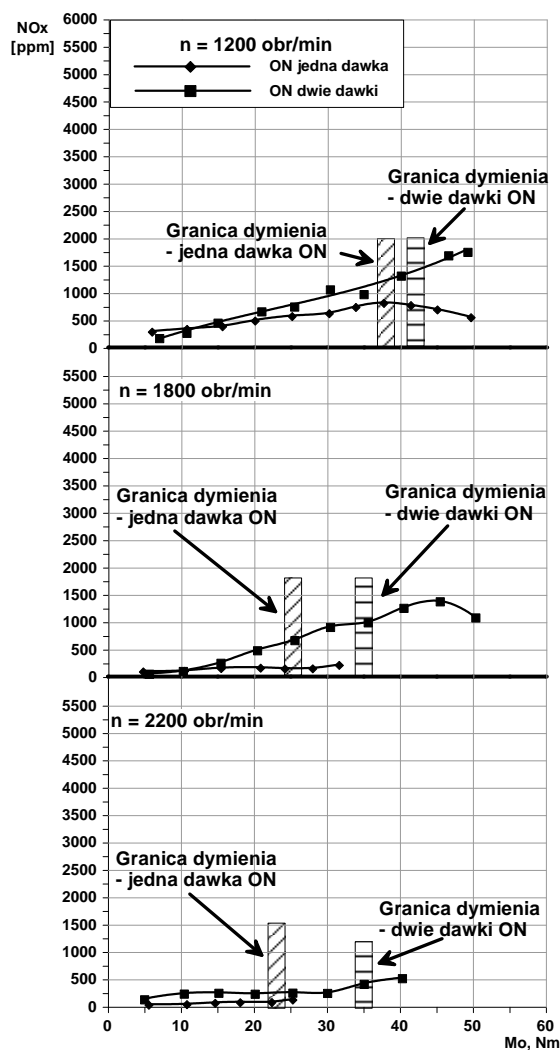
Stężenia tlenków azotu w całym zakresie analizowanych prędkości obrotowych jest wyższe dla układu zasilania z optymalizowanymi parametrami wtrysku. Przyczyną dużego poziomu emisji tlenków azotu są wysokie temperatury procesu spalania (powyżej  $1600^\circ\text{C}$ ).

Wysokie temperatury występują przy pracy silnika z dużą sprawnością cieplną, która jest wynikiem zupełnego i całkowitego spalania (małe straty wylotowe) oraz małymi stratami ciepła do układu chłodzenia.

Regulacja parametrów wtrysku, przy której silnik osiągał dużą sprawność polegała na przyspie-

szaniu kąta początku wtrysku drugiej dawki  $\phi_2$  aż do pojawienia się stuku.

Z uwidocznionych na rysunku 8 granic dymienia (poziome prostokąty) wynika, że regulując kąt początku wtrysku drugiej dawki tak aby nie była przekroczona granica dymienia należy się liczyć ze zmniejszeniem obciążenia silnika. Przy tego typu regulacji stężenia tlenków azotu nie przekraczały wartości 1500 ppm.



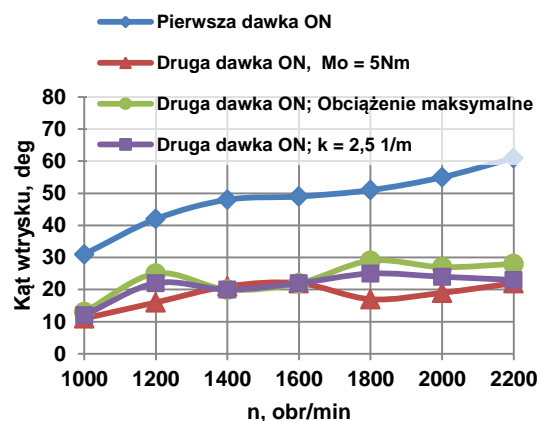
Rys.8. Charakterystyki obciążeniowe stężeń tlenków azotu NOx z zaznaczonymi granicami dymienia. Prędkość obrotowa silnika  $n = 1200, 1800, 2200$  obr/min. Kąt początku wtrysku przy zasilaniu jednopaliwowym bez podziału dawki ON  $\phi = 20^\circ$  OWK przed GMP. Kąty początku wtrysku dawek ON  $\phi_1, \phi_2$  przy zasilaniu jednopaliwowym zgodne z charakterystykami na rys.6.6.

## 5. Wnioski

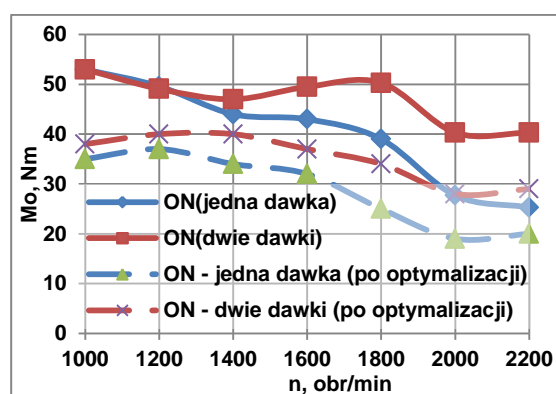
Analiza poziomu zadymienia wykazała, że ustalone kąty wtrysku dawki zasadniczej przy stosowaniu tylko kryterium stuku nie gwarantują

zgodnego z przyjętymi normami zadymienia. Na rysunku 9 przedstawiono zakresy regulacji kąta przedwtrysku i kąta wtrysku dawki zasadniczej po uwzględnieniu wartości dopuszczalnej zadymienia spalin.

Kontrola zadymienia spalin skutkuje opóźnieniem kąta wtrysku dawki zasadniczej w stosunku do kąta wtrysku gwarantującego odpowiedni poziom intensywności stuku. Wyraźnie jest to widoczne przy prędkościach obrotowych wynoszących 1200, 1800 i 2000 obr/min. Regulacja ta skutkuje spadkiem momentu obrotowego (rys.10). Jednak poziom obciążeń w całym zakresie pracy silnika pozostaje i tak na wyższym poziomie niż przy zasilaniu za pomocą jednej dawki. Oczywiście przy zachowaniu dla tego sposobu zasilania takiego samego poziomu zadymienia jak dla dawki pojedynczej.



Rys.9. Charakterystyki prędkościowe kątów wtrysku pierwszej i drugiej dawki ON po optymalizacji uwzględniającej wskaźnik intensywności stuku i granicę dymienia



Rys.10. Charakterystyki prędkościowe momentu obrotowego przed i po uwzględnieniu granicy dymienia

Z przeprowadzonych analiz wynika, że proces wtrysku paliwa realizowany za pomocą optymalizowanych parametrów wtrysku jest bardziej efektywny od standardowego procesu wtrysku polega-



jącego na podawaniu jednej dawki paliwa wtryskiwanego przy stałym kącie wtrysku niezależnie od obciążenia i prędkości obrotowej. Optymalizacja parametrów wtrysku wg zastosowanych kryteriów powoduje, że silnik jest bardziej sprawny i osiąga większe obciążenia.

Jedynie poziom stężeń tlenków azotu jest w całym zakresie badań wyższy. Obniżenie poziomu stężeń tlenków azotu można osiągnąć poprzez skrócenie okresu spalania i takie opóźnienie początku spalania aby nie dopuścić do niecałkowitego spalania.

Skrócenie procesu spalania jest możliwe poprzez skrócenie czasu odparowania wtryskiwanego paliwa, które jest ściśle związane z średnicą wtryskiwanych kropeł paliwa. Średnica kropeł w strudze wtryskiwanego paliwa zależy natomiast od ciśnienia paliwa w układzie wtryskowym. Wynika z tego, że należy również sterować ciśnieniem wtryskiwanego paliwa.

Wnioski jakie można sformułować na podstawie zaprezentowanych wyników badań są następujące:

- optymalizacja parametrów wtrysku oparta na kryteriach związanych ze zjawiskiem stuku

i zadymieniem spalin prowadzi do mniejszego zużycia paliwa (większej sprawności ogólnej) w porównaniu do zasilania standardowego (stały kąt początku wtrysku jednej dawki paliwa w całym obszarze pracy silnika),

- odpowiedni dobór parametrów wtrysku powoduje, że silnik osiąga większe obciążenia bez nadmiernego wzrostu niecałkowitego spalania (współczynnik pochłaniania światła w okolicach 2,5 1/m),
- przy opisywanym sposobie regulacji nie udało się zmniejszyć poziomu stężeń tlenków azotu poniżej wartości uzyskiwanych przy zasilaniu standardowym,
- zmniejszenie tlenków azotu jest możliwe poprzez skrócenie kąta spalania i opóźnienie kąta początku spalania względem GMP,
- skrócenie kąta spalania można zrealizować przez zwiększenie ciśnienia wtrysku.

### Nomenclature/Skróty i oznaczenia

PSG	początek stuku	$\phi 1$	kąt wtrysku pierwszej dawki ON (przedwtrysk)
WSG	amplituda stuku	$\phi 2$	kąt wtrysku drugiej dawki ON
WS	wskaźnik stuku	k	współczynnik pochłaniania światła
WS_GR	graniczna wartość wskaźnika stuku		
$\phi$	kąt obrotu wału korbowego		

### Bibliography/Literatura

- [1] Praca zbiorowa. Zasobnikowe układy wtryskowe Common Rail. Informator Techniczny. Bosh. 2009r. ISBN: 978-83-206-1745-0.
- [2] Nobuyuki Kawahara, Eiji Tomita: Visualization of auto-ignition and pressure wave during knocking in a hydrogen spark-ignition engine. International Journal of Hydrogen Energy 34 (2009) 3156 – 3163.
- [3] Różycki A.: "Drgania głowicy silnika wysokoprężnego zasilanego dwupaliwowo", Archiwum Motoryzacji, Wydawnictwo Naukowe PTNM 2005-2
- [4] Szwaja S.: Studium pulsacji ciśnienia spalania w tłokowym silniku spalinowym zasilanym wodorem. Seria monografie nr 182. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej. Częstochowa 2010.
- [5] Wajand J., A.: Silniki o zapłonie samoczynnym, WNT, Warszawa 1980.
- [6] Rozporządzeniem Ministra Infrastruktury z dnia 30 kwietnia 2004 r. o zmianie rozporządzenia w sprawie warunków technicznych pojazdów oraz zakresu ich niezbędnego wyposażenia (Dz. U. z 402 r., Nr 103, poz. 1085)
- [7] Różycki A.: "Microkomputer system for measurement of high speed parameters for IC engines", Bratislava 2001 8<sup>th</sup> EAEC Congress, Bratislava 2001, paper n° SAITS 01196.
- [8] Różycki A.: Wskaźnik intensywności spalania stukowego w dwupaliwowym silniku spalinywym o zapłonie samoczynnym, Silniki Spalinowe 2009-S.C2

Mr Różycki Andrzej, DEng. – Associate Professor in the Faculty of Mechanical Engineering at UTH in Radom.

Dr hab. inż. Andrzej Różycki – profesor nadzw. na Wydziale Mechanicznym UTH w Radomiu.

