

RÓŻYCKI Andrzej¹

STUK I ZADYMIENIE SPALIN JAKO KRYTERIA DOBORU PARAMETRÓW WTRYSKU OLEJU NAPĘDOWEGO

W artykule opisano zjawiska związane z parametrami wtrysku oleju napędowego, które ograniczają poprawę osiągnięć i emisji silnika o zapłonie samoczynnym. 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. Wyniki zostały przedstawione na bazie charakterystyk obciążeniowych jednostkowego zużycia paliwa, stężeń tlenków azotu i zadymienia spalin (współczynnika pochłaniania światła).

THE KNOCK AND SMOKE LEVEL AS SELECTION CRITERIA FOR DIESEL OIL INJECTION PARAMETERS

The paper describes the phenomena related to the diesel oil injection parameters that limit the performance and emission improvements of a diesel engine. Knocking and incomplete combustion were taken into consideration as the main parameters. The paper describes The way of injection parameters optimization consisting in a proper selection of the injection start angle of the pilot and the main fuel doses was described. The results were presented on the basis of load characteristics of specific fuel consumption, nitric oxide emission and smoke level (light absorption coefficient).

1. WSTĘP

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

Do głównych parametrów procesu wtrysku zalicza się:

- ciśnienie wtrysku,
- kąt początku wtrysku,
- czas trwania wtrysku.

¹Politechnika Radomska, Wydział Mechaniczny, 26-600 Radom, ul. Chrobrego 45.

Tel: + 48 48 361-76-42, 361-76-62, Fax: + 48 48 361-76-44, E-mail: andrzej.rozycki@pr.radom.pl

Parametry te powinny podlegać ciągłej regulacji w zależności od obciążenia i prędkości obrotowej silnika. W standardowych układach wtryskowych dwa pierwsze z wymienionych parametrów wtrysku są stałe lub nieznacznie korygowane. Czas trwania wtrysku jest dostosowywany do prędkości obrotowej i obciążenia. Ograniczone możliwości regulacyjne 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 sterowanie w sposób ciągły:

- ciśnieniem wtrysku (powyżej 160MPa),
- kątem początku wtrysku,
- czasem trwania wtrysku,
- podziałem całkowitej dawki na kilka części (do siedmiu),
- odległością kątową między dawkami.

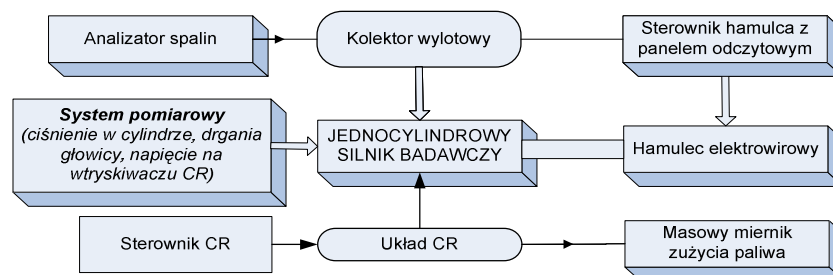
Strategie sterowania ww. parametrami wtrysku są zapisane w pamięciach komputerów sterujących układami common rail, jako tzw. mapy. Mapy te tworzone są w laboratoriach badawczych. W związku ze wzrostem wymagań odnośnie do osiągnięć i emisji mapy sterujące podlegają ciągłym zmianom. Poszukiwane są parametry, 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: stuk i poziom zadymienia spalin. Stuk w silniku jest odpowiedzialny za nadmierny hałas silnika i niebezpieczeństwo uszkodzenia elementów silnika. Nadmierne zadymienie (emisja cząstek stałych) zanieczyszcza środowisko naturalne oraz powoduje spadek sprawności silnika.

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 niespalonej mieszanki, która jest widoczna na wykresie indykatorowym w postaci pulsacji ciśnienia w okolicach GMP [2], [3]. 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. Mimo tego przy dużych obciążeniach słyszalny jest również wysokoczęstotliwościowy dźwięk. Pochodzenie tego dźwięku może być związane z dużą szybkością narastania ciśnienia w pierwszej fazie spalania, która może wzbudzać drgania elementów konstrukcyjnych silnika. W literaturze zjawisko to nazywane jest tzw. młotowaniem silnika [4].

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie wpływu parametrów wtrysku na obciążenie silnika jego sprawność i emisję. Dobór parametrów wtrysku oparty był o kryteria związane ze stukiem i zadymieniem.

2. STANOWISKO BADAWCZE

Schemat blokowy stanowiska badawczego przedstawiono na rys.1. Stanowisko badawcze składało się z jednocylindrowego 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 0.2Nm, pomiar prędkości obrotowej z dokładnością 2obr/min). Pomiar zużycia paliwa wykonywany był za pomocą miernika AMX212F firmy Automex (z dokładnością 0.001kg). Do pomiaru emisji zastosowano analizator AVL DIGAZ 4000 (dokładność pomiarów składników spalin: CO – 0.01%, CO₂ – 0,1%, NO_x – 1ppm, HC – 1ppm, k – 0.01m⁻¹).

Do pomiaru parametrów szybkozmiennych użyto systemu pomiarowego opisanego w [5] 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 0,7⁰OWK 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 jednocylindrowego silnika 1HC102 o ZS

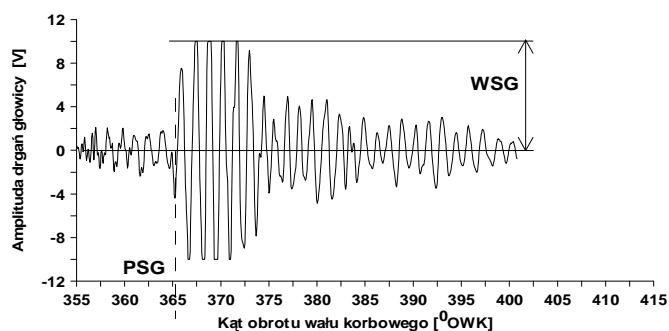
Srednica cylindra	102 mm
Skok tłoka	120 mm
Objętość skokowa	980 cm ³
Stopień sprężania	17
Układ zasilania – olej napędowy	Common rail
Moc nominalna	11 kW/2200 obr/min
Moment maksymalny	55Nm/1600 obr/min

3. KRYTERIA DOBORU PARAMETRÓW WTRYSKU

3.1 Stuk

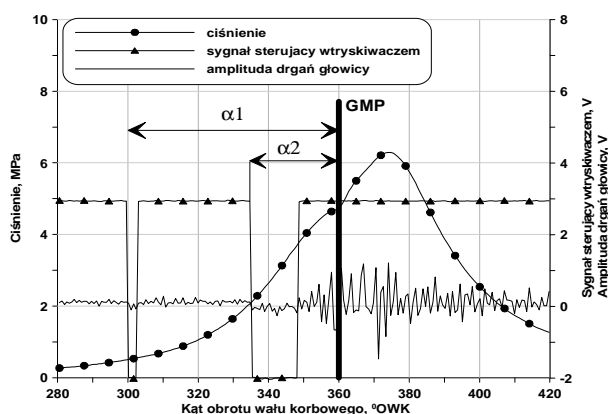
Zjawisko stuku, jak wspomniano powyżej związane jest z drganiami elementów silnika wywołanymi procesem spalania. Drgania te mierzyć za pomocą czujnika przyspieszeń. W opisywanych badaniach użyto czujnika stuku DR 190 8092-2F firmy OPEL. Przykładowy wykres drgań głowicy przedstawiono na rysunku 2 [6]. Charakterystycznymi parametrami zaznaczonymi na wykresie są dodatnia amplituda drgań WS (wskaźnik stuku) i kąt początku wystąpienia gwałtownego wzrostu amplitudy drgań PS (początek stuku). Wcześniejsze badania przedstawione w [6] wykazały, że dla badanego silnika amplituda

drgań poniżej wartości $WS < 3,5V$ może być uznana za wartość dopuszczalną. Wartości $WS > 3,5V$ świadczą, że w procesie spalania wystąpiło zjawisko zbyt gwałtownego wydzielania się energii. Zjawisko to może występować przy dużych kątach wyprzedzenia początku wtrysku (liczonych względem 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.



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

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 o małej wartości energetycznej (mała ilość paliwa) jest wtryskiwana przed GMP (kąt α_1). Ilość paliwa i kąt początku wtrysku jest dobierany tak aby doszło do samozapłonu również przed GMP. Dzięki temu ilość wydzielonego ciepła przed GMP jest mała a więc i szybkość narastania ciśnienia jest na niskim poziomie nie powodując twardej pracy i stuku. Druga część dawki paliwa jest wtryskiwana w okolicach GMP (kąt α_2).



Rys.3. 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 oleju napędowego. 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 $2,5\text{m}^{-1}$.

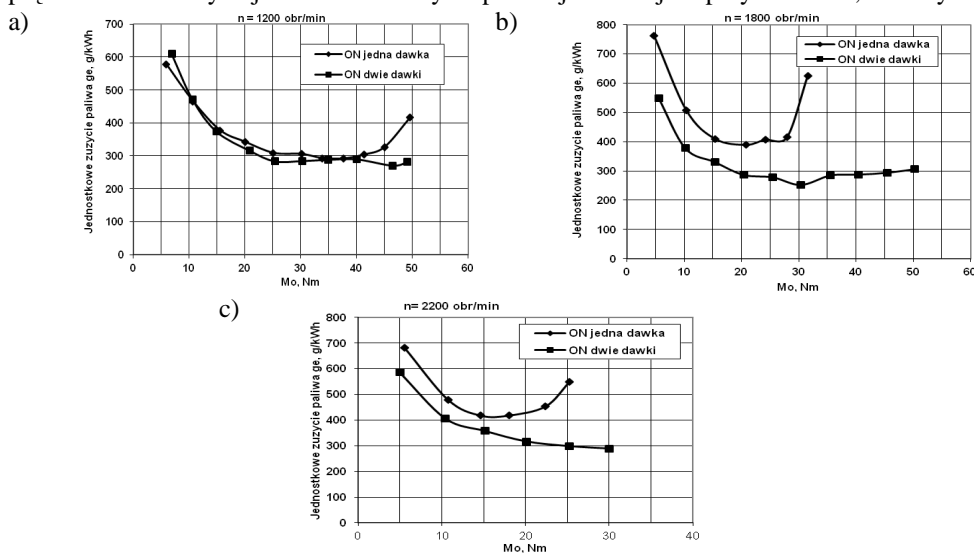
Regulacja silnika według tego kryterium polegała na zmianie kąta początku wtrysku dawki głównej α_2 w taki sposób aby wartość współczynnika pochłaniania światła nie przekroczyła wartości dopuszczalnej. Ciśnienie wtrysku było utrzymywane na stałym poziomie i wynosiło 8,8 MPa.

4. WYNIKI BADAŃ SILNIKA WYPOSAŻONEGO W UKŁAD COMMON RAIL Z OPTYMALIZACJĄ PARAMETRÓW WTRYSKU

Wpływ parametrów wtrysku ustalanych wg 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.

4.1 Sprawność silnika

Porównując jednostkowe zużycia paliwa można stwierdzić, że dla trzech analizowanych prędkości obrotowych jednostkowe zużycie paliwa jest mniejsze przy zasilaniu, w którym



Rys.4. Porównanie jednostkowego zużycia paliwa

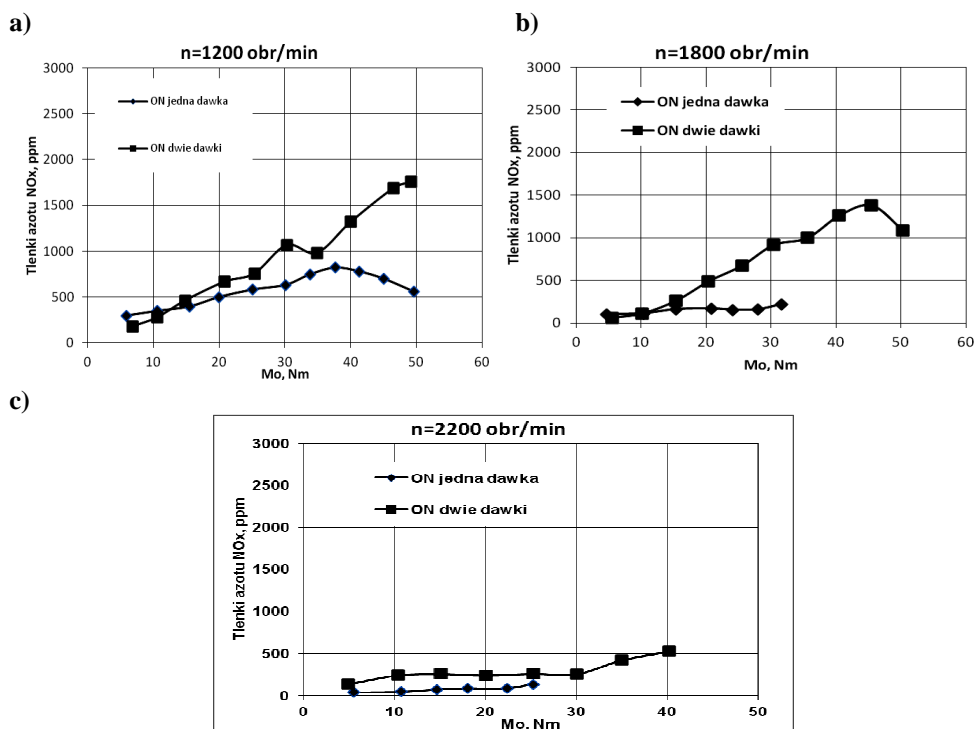
optymalizowano parametry wtrysku. Ponadto dla prędkości obrotowych $n = 1800$ obr/min i $n = 2200$ obr/min uzyskano dużo większe obciążenia (rys.5b, rys.5c). Dzięki optymalizacji parametrów wtrysku (głównie początku wtrysku drugiej dawki α_2) jednostkowe zużycie paliwa utrzymuje się na stałym, niskim poziomie aż do obciążeń maksymalnych.

4.2 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°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 przyspieszaniu kąta początku wtrysku drugiej dawki α_2 aż do pojawienia się stuku.

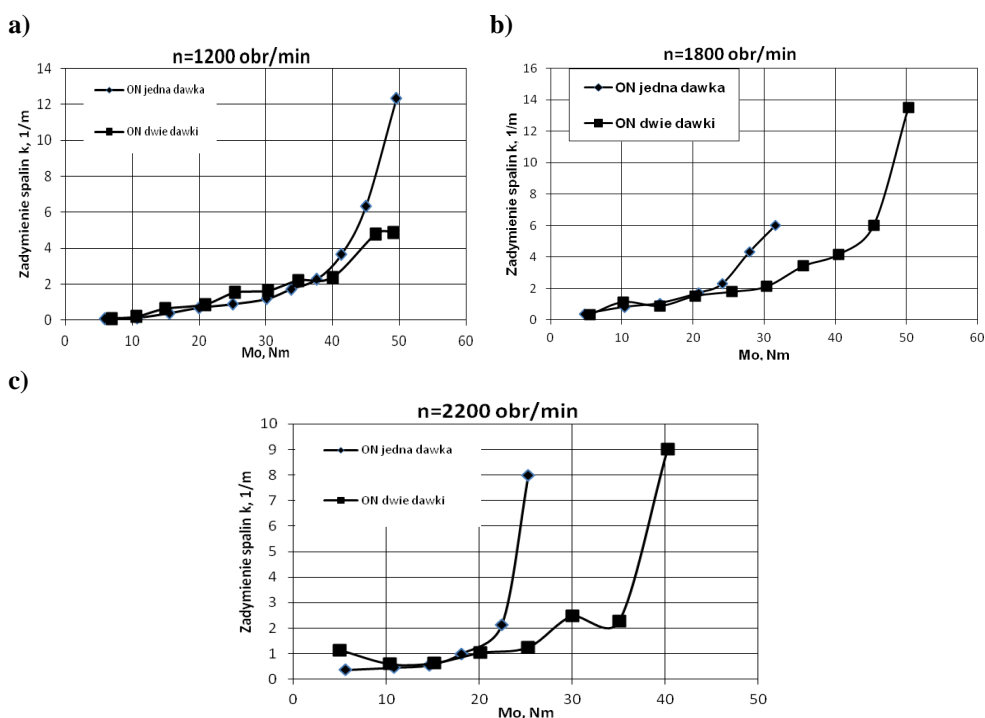


Rys.5. Porównanie stężeń tlenków azotu

4.3 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.6c) jest praktycznie taki sam, jak przy zasilaniu z optymalizacją procesu wtrysku. Dopiero przy maksymalnych obciążeniach zaznacza się gwałtowny wzrost zadymienia dla zasilania standardowego. Przyjmując kryterium poziomu zadymienia 2,5 l/m można stwierdzić, że optymalizacja procesu wtrysku nie przyniosła poprawy osiągnięć. W obydwu przypadkach silnik na granicy zadymienia osiągał obciążenie w okolicy 42 Nm

Wyraźną różnicę można zaobserwować dla pozostałych prędkości obrotowych. Dla 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.6b i rys.6c).



Rys.6. Porównanie zadymienia spalin

5. WNIOSKI

Z przeprowadzonych analiz wynika, że proces wtrysku paliwa realizowany za pomocą optymalizowanych parametrów wtrysku jest bardziej efektywny od standardowego procesu wtrysku polegającego na podawaniu jednej dawki paliwa wtryskiwanego przy stałym kącie początku wtrysku niezależnie od obciążenia i prędkości obrotowej. Optymalizacja

parametrów wtrysku wg zastosowanych kryteriów powoduje, że silnik pracuje przy większej sprawności i osiąga większe obciążenia. Jedynie poziom stężeń tlenków azotu jest w całym zakresie badań wyższy. Obniżenie poziomu emisji 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 czasu spalania i opóźnienie początku spalania względem GMP,
- skrócenie czasu spalania można zrealizować przez zwiększenie ciśnienia wtrysku.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Praca zbiorowa. *Zasobnikowe układy wtryskowe*. wydanie: 2, rozszerzone / 2009 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] Wajand J., A.: *Silniki o zapłonie samoczynnym*, WNT, Warszawa 1980.
- [5] Różycki A.: „*Microkomputer system for measurement of high speed parameters for IC engines*”, Bratislava 2001 8th EAEC Congress, Bratislava 2001, paper n° SAITS 01196.
- [6] Różycki A.: *Wskaźnik intensywności spalania stukowego w dwupaliwowym silniku spalinowym o zapłonie samoczynnym, Silniki Spalinowe 2009-S.C2*