

## ANALIZA METOD MONITOROWANIA PRACY TRÓJFUNKCYJNEGO REAKTORA KATALITYCZNEGO WYKORZYSTUJĄCYCH DYSKRYMINANTY AMPLITUDOWE I FUNKCJĘ INTERKORELACJI

Stanisław W. KRUCZYŃSKI, Dariusz TOMASZEWSKI

Instytut Pojazdów Politechniki Warszawskiej, Zakład Silników Spalinowych  
02-584 Warszawa, ul. Narbutta 84, tel.: (22) 234-87-82, fax.: (22) 849-03-03

### Streszczenie

W pracy oceniono możliwości monitorowania trójfunkcyjnych reaktorów katalitycznych silnika o zapłonie iskrowym za pomocą wąskopasmowych czujników stężeń tlenu. Zaproponowano metodę symulacji procesu dezaktywacji polegającą na wymianie wkładów aktywnych reaktora na wkłady nieaktywne. Dla potrzeb badawczych zdefiniowano wskaźnik monitoringu reaktora katalitycznego. Zaproponowano dwie metody wyznaczenia wskaźników monitoringu: metodę wykorzystującą obliczenia dyskryminant amplitudowych i metodę wykorzystującą obliczenia funkcji interkorelacji sygnałów z czujników stężeń tlenu. Porównano możliwości monitoringu pracy reaktora w ustalonych warunkach pracy silnika spalinowego i pracy reaktora w nowym europejskim teście jezdnym podczas jego symulowanej dezaktywacji. Na podstawie wyników badań porównano przydatność wyznaczonych wskaźników monitoringu pracy reaktora.

Słowa kluczowe: silniki spalinowe, trójfunkcyjny reaktor katalityczny, diagnostyka pokładowa, dyskryminanty amplitudowe, interkorelacja.

### ANALYSIS OF THREE-WAY CATALYTIC CONVERTER MONITORING METHODS USING AMPLITUDE DISCRIMINANTS AND CROSS-CORRELATION FUNCTION

#### Summary

In this paper, the estimation of three – way catalytic converter diagnosis method by means of narrow-band oxygen sensors signals is evaluated. Method of the deactivation process depending on the exchange reactor active bricks of converter on disactive ones was suggested. It was defined monitoring index for examine procedure needs. Method using selected discriminants and method using cross-correlation function were suggested. Monitoring in fixed engine work bench conditions and new European drive cycle test were compared. On the basis of results, suggested monitoring indexes usefulness was compared.

Keywords: combustion engines, three way catalytic converter, on board diagnosis, amplitude discriminants, cross-correlation.

## 1. WPROWADZENIE

Trójfunkcyjne reaktory katalityczne w silnikach o zapłonie iskrowym pełnią kluczową funkcję w ograniczaniu emisji składników toksycznych. Przepisy homologacyjne nakładają na producentów obowiązek wyposażania pojazdów w układy monitorowania pracy elementów mogących mieć wpływ na końcową emisję składników toksycznych spalin. Układy te są elementami systemu diagnostyki pokładowej w pojeździe (*On-Board Diagnostics*). Do integralnych elementów systemu OBD należy układ monitorowania sprawności reaktora katalitycznego TWC (*Three-Way Catalyst*), którego niesprawność wywiera duży wpływ na emisję składników toksycznych silnika spalinowego [1]. Wykrycie jakiegokolwiek niesprawności, w tym i reaktora katalitycznego jest sygnalizowane wskaźnikiem świetlnym MIL

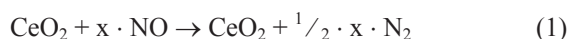
(*Malfunction Indicator Light*) widocznym dla kierowcy. Konieczne jest poszukiwanie metod monitorowania pracy tych systemów. W publikacji przedstawiono porównanie dwóch metod monitorowania: metody opartej na obliczeniach funkcji interkorelacji oraz metody opartej na obliczeniach wybranych dyskryminant amplitudowych.

## 2. MONITOROWANIE SPRAWNOŚCI PRACY TRÓJFUNKCYJNEGO REAKTORA KATALITYCZNEGO ZA POMOCĄ CZUJNIKÓW STĘŻEŃ TLENU

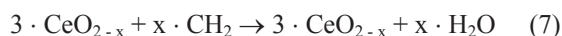
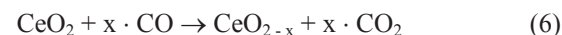
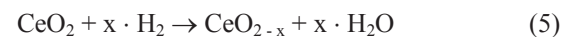
### 2.1. Mechanizmy reakcji procesów oczyszczania spalin

Za procesy oczyszczania spalin w reaktorze katalitycznym odpowiedzialne są reakcje utleniania/redukcji składników toksycznych przebiegające na powierzchni krystalitów metali szlachetnych [2].

Ponadto w warstwie pośredniej reaktora zawierającej tlenki ceru zachodzą reakcje [3] magazynowania tlenu:



i jego oddawania:



w zależności od rodzaju składu mieszanki palnej. Zjawiska te zachodzące cyklicznie gwarantują pracę reaktora z wysoką sprawnością w zakresie bliskiej stechiometrycznemu składowi dostarczanej mieszanki, a co za tym idzie zapewniają wysoką skuteczność procesu oczyszczania spalin. Warunkiem koniecznym jest korekcja składu mieszanki palnej przez sterownik silnika w zależności od składu spalin, czego efektem są regularne oscylacje stężenia tlenu przed reaktorem. Wysoka intensywność procesów magazynowania/uwalniania tlenu w sprawnym reaktorze powoduje wytlumienie oscylacji stężeń tlenu za reaktorem.

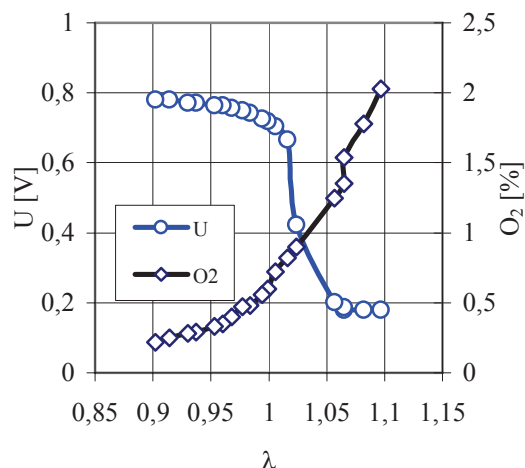
W miarę zużywania się warstw aktywnych (starzenie reaktora) i zmniejszania zdolności tlenków ceru do magazynowania tlenu (spadek OSC - *Oxygen Storage Capacity*) postępuje jego dezaktywacja objawiająca się pojawianiem się coraz intensywniejszych oscylacji stężeń tlenu z jednoczesnym spadkiem jego zdolności do utleniania CO i HC oraz redukcji NO<sub>x</sub>.

### 2.2. Istota monitorowania sprawności pracy reaktora za pomocą czujników tlenu

Do oceny pracy TWC powszechnie stosuje układ dwóch czujników stężeń tlenu, umieszczonych przed i za reaktorem katalitycznym. Czujnik przed reaktorem jest zwykle napięciowym

generacyjnym czujnikiem sterującym składem mieszanki palnej pracującym w pętli sprzężenia zwrotnego w sposób dwustanowy, utrzymującym skład mieszanki w wąskim zakresie, około +/-1%, czego efektem są regularne oscylacje stężenia tlenu przed reaktorem. Miarą obecności niewielkich stężeń tlenu (do wartości około 0,8%) lub jego braku jest wartość generowanego sygnału napięciowego zmieniającego się skokowo w zakresie odpowiednio od około 0,8 V do 0,2 V.

Na rys. 1 przedstawiono charakterystykę generacyjną czujnika tlenu.



Rys.1. Charakterystyka czujnika tlenu

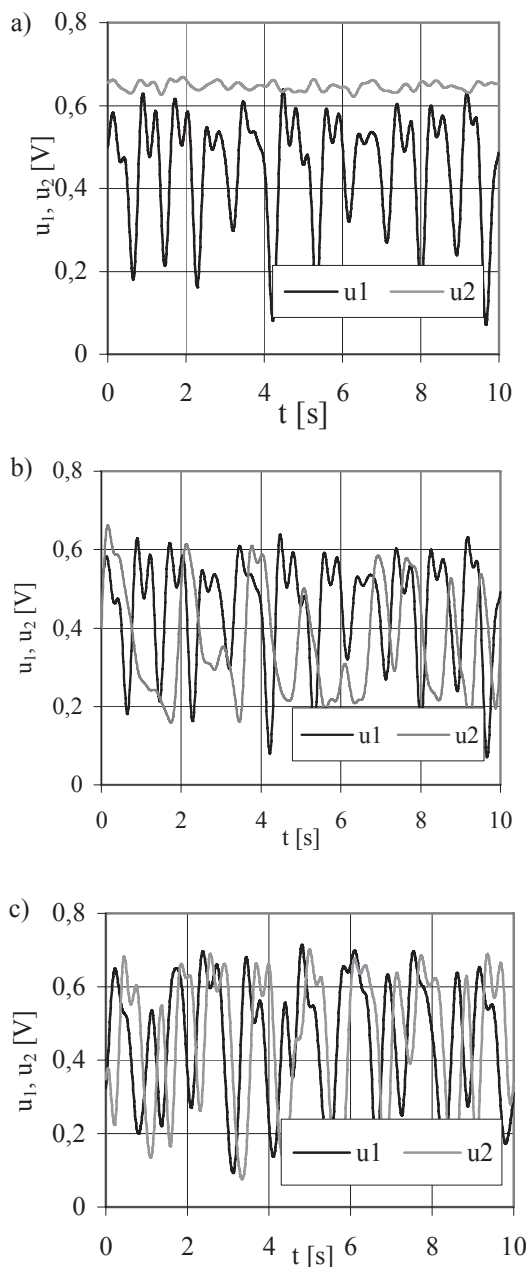
Efektom zjawisk magazynowania/uwalniania tlenu w sprawnym reaktorze jest wytlumienie oscylacji amplitudy sygnału napięciowego czujnika tlenu za reaktorem. W miarę postępowania procesu dezaktywacji pojawia się coraz większy wzrost amplitudy sygnału czujnika za reaktorem i postać sygnału upodabnia się do sygnału z czujnika przed reaktorem.

## 3. METODA SYMULACJI UTRATY SPRAWNOŚCI KONWERSJI

Ze względu na niejednoznaczny proces dezaktywacji reaktora w czasie jego rzeczywistej eksploatacji i znaczne koszty takiego eksperymentu opracowano metodę symulacji utraty aktywności reaktora. W tym celu blok reaktora katalitycznego pocięto na osiem segmentów o jednakowej długości. Symulacji dezaktywacji reaktora katalitycznego dokonywano poprzez wymianę segmentów aktywnych z przedniej części reaktora na segmenty nieaktywne. W ten sposób uzyskano różne poziomy aktywności reaktora A począwszy od aktywności A = 12,5 % aż do aktywności A = 100 % z krokiem równym 12,5 %. Aktywność reaktora katalitycznego określono jako stosunek objętości segmentów aktywnych V<sub>a</sub> do objętości całego katalizatora V<sub>k</sub>. Aktywność A można napisać w postaci:

$$A = \frac{V_a}{V_k} \quad (8)$$

Rys. 2 przedstawia wykresy sygnałów z czujników tlenu w najbardziej charakterystycznych stopniach aktywności reaktora.



Rys. 2. Sygnały z czujników tlenu dla reaktora o poziomach aktywności: a).  $A=100\%$ , b).  $A=50\%$ , c).  $A=0\%$ , gdzie:  $u_1$  – sygnał generowany przez czujnik tlenu znajdujący się przed reaktorem katalitycznym;  $u_2$  – sygnał generowany przez czujnik tlenu znajdujący się za reaktorem katalitycznym

#### 4. UKŁAD BADAWCZY

Eksperyment wykonano z wykorzystaniem silnika typu 1.4 16V (typu K16) firmy Rover wyposażonego we wtryskowy układ zasilania z korekcją składu mieszanki za pomocą jednego czujnika tlenu Bosch LSH 6 umieszczonego przed reaktorem.

W układzie wylotowym silnika zastosowano trójfunkcyjny reaktor katalityczny Pt-Rh/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CeO<sub>2</sub> o objętości monolitu dobranej odpowiednio do pojemności skokowej silnika z możliwością symulacji utraty sprawności konwersji opisanej w rozdziale 3. Badany reaktor katalityczny posiadał blok wykonany w postaci monolitu metalowego pokrytego nośnikiem  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CeO<sub>2</sub> z naniesionymi na nim krystalitami platyny i rodru w proporcji 5:1 i ilości 2.0 g/dm<sup>3</sup> monolitu. Za reaktorem katalitycznym umieszczono drugi identyczny czujnik stężenia tlenu zasilając go z układu elektronicznego zasilania pierwszego czujnika.

#### 5. OPIS BADAŃ

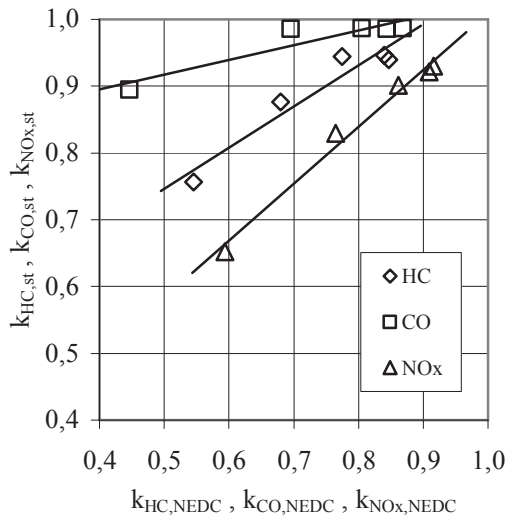
Badania sygnałów z czujników stężeń tlenu oraz pomiary stężeń toksycznych składników spalin przed i za reaktorem katalitycznym przy różnej jego aktywności wykonano:

- na hamowni silnikowej w 9 ustalonych punktach pracy silnika, odpowiadającym najczęściej występujących podczas jego eksploatacji i również występujących w warunkach wykonywania testu diagnostycznego OBD. Prędkość obrotowa silnika zawierała się od  $n = 2000$  obr/min do  $n = 4000$  obr/min, a obciążenie od  $M_e = 30$  Nm do  $M_e = 60$  Nm, co odpowiadało względnemu objętościowemu natężeniu przepływu spalin SV w granicach od 22000 h<sup>-1</sup> do 50000 h<sup>-1</sup>;
- na hamowni podwoziowej, w następujących próbach: UDC, EUDC oraz NEDC UDC+EUDC) składających się na cykl jezdny ECE R83.

W celu wyznaczenia stopnia konwersji CO, HC i NO<sub>x</sub> próbki spalin pobierano z przed i z za reaktora i kierowano do zestawu analizatorów spalin mierzących stężenia tlenku węgla metodą NDIR, węglowodorów metodą FID oraz tlenków azotu metodą CLD. Pomiarów stężeń tlenu dokonywano w sposób pośredni przy pomocy czujników tlenu umieszczonych przed i za reaktorem katalitycznym.

Dokonano analizy korelacyjnej otrzymanych wyników konwersji składników toksycznych.

Rys. 3 przedstawia korelację wyników obliczeń konwersji składników toksycznych w reaktorze badawczym w ustalonych warunkach pracy silnika w stosunku do obliczeń w nieustalonych warunkach przy pracy na hamowni podwoziowej w cyklu NEDC.



Rys. 3. Korelacja konwersji składników toksycznych HC, CO i NOx w warunkach ustalonych pracy silnika oraz teście jezdnym NEDC

## 6. DEFINICJA WSKAŹNIKA MONITOROWANIA REAKTORA KATALITYCZNEGO

Dla potrzeb oceny monitorowania pracy trójfunkcyjnego reaktora katalitycznego stosuje się wskaźniki monitorowania reaktora  $I_{\text{HEGO}}$  [4].

### 6.1. Metoda wykorzystująca obliczenia funkcji interkorelacji

Oznaczając sygnały napięciowe z czujników stężenia tlenu przed reaktorem jako  $x(t)$  i  $y(t)$  obliczono funkcję korelacji wzajemnej  $R_{xy}$  [5] sygnałów z czujników tlenu:

$$R_{u_1 u_2}(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T u_1(t) \cdot u_2(t + \tau) dt \quad (9)$$

gdzie:

- $u_1(t)$  – sygnał generowany przez czujnik tlenu znajdujący się przed reaktorem katalitycznym,
- $u_2(t)$  – sygnał generowany przez czujnik tlenu znajdujący się za reaktorem katalitycznym,
- $T$  – czas pomiaru sygnałów.

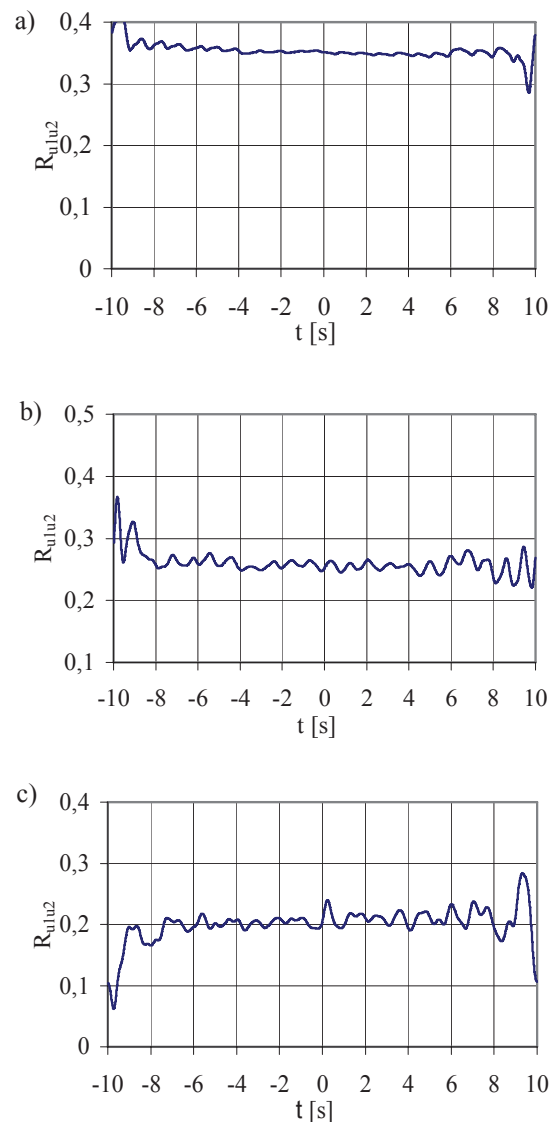
Rys. 4 a-c przedstawia funkcje korelacji wzajemnej (interkorelacji) sygnałów w trzech charakterystycznych poziomach aktywności reaktora katalitycznego przedstawionych uprzednio na rys. 2 a-c.

W celu określenia przydatności diagnostycznej funkcji korelacji wzajemnej (interkorelacji) zdefiniowano wskaźnik monitorowania reaktora  $I_{\text{HEGO}, R_{xy}}$ :

$$I_{\text{HEGO}, R_{u_1 u_2}} = \frac{R_{u_1 u_2, 100\text{sr}} - R_{u_1 u_2, \text{sr}}}{R_{u_1 u_2, \text{sr}}} \quad (10)$$

gdzie:

- $R_{u_1 u_2, 100\text{sr}}$  – wartość średnia funkcji interkorelacji dla reaktora o aktywności  $A=100\%$ ,
- $R_{u_1 u_2, \text{sr}}$  – wartość średnia funkcji interkorelacji dla reaktora o znanym poziomie aktywności  $A$ .



Rys. 4. Funkcja interkorelacji  $R_{u_1 u_2}$  dla reaktora o poziomach aktywności: a)  $A=100\%$ , b)  $A=50\%$ , c)  $A=0\%$

## 6.2. Metoda wykorzystująca obliczenia wybranych dyskryminant amplitudowych

Metody amplitudowe wykazują przydatność do potrzeb monitorowania pracy TWC [6]. Wybrano następujące dyskryminanty amplitudowe:

a). współczynnik impulsowości - I:

$$I = \frac{u_{\max 2}}{u_{\text{sr}2}} \quad (11)$$

b). kurtoza - R:

$$R = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T u_2^4(t) dt}{\left( \frac{1}{T} \int_0^T u_2^2(t) dt \right)^2} \quad (12)$$

gdzie:

$u_{\max 2}$  – wartość skuteczna sygnału z czujnika za reaktorem ,

$u_{\text{sr}2}$  - wartość średnia sygnału z czujnika za reaktorem.

W celu określenia przydatności diagnostycznej dyskryminant amplitudowych zdefiniowano wskaźniki monitorowania reaktora katalitycznego:

$$I_{\text{HEGO,I}} = I - 1 \quad (13)$$

$$I_{\text{HEGO,R}} = R - 1 \quad (14)$$

gdzie:

$I_{\text{HEGO,I}}$  – wskaźnik monitorowania oparty na obliczeniach współczynnika impulsowości sygnału;

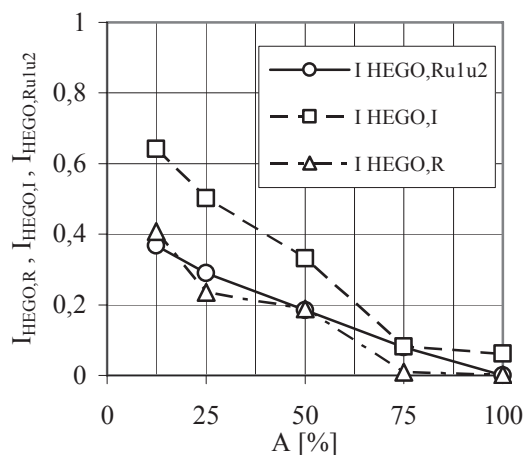
$I_{\text{HEGO,R}}$  – wskaźnik monitorowania oparty na obliczeniach kurtozy.

## 7. ANALIZA PORÓWNAWCZA ZAPROPONOWANYCH METOD

Rys. 5 przedstawia porównanie obliczonych wskaźników  $I_{\text{HEGO,I}}$ ,  $I_{\text{HEGO,R}}$ ,  $I_{\text{HEGO,Ru}_1\text{u}_2}$  reaktora katalitycznego.

Metoda monitorowania oparta na obliczeniach funkcji interkorelacji charakteryzuje się dużą liniowością umożliwiając ocenę stanu reaktora w całym zakresie utraty jego aktywności.

Metody oparte na dyskryminantach amplitudowych praktycznie uniemożliwiają ocenę stanu reaktorów w zakresie utraty jego aktywności od 100 do 75% to jest w początkowym okresie jego eksploatacji.



Rys. 5. Zależność wskaźników monitorowania  $I_{\text{HEGO,I}}$ ,  $I_{\text{HEGO,R}}$ ,  $I_{\text{HEGO,Ru}_1\text{u}_2}$  w funkcji aktywności reaktora A

## 8. WNIOSKI

1. Ze względu na widoczną korelację pomiędzy konwersją składników toksycznych, a wskaźnikami monitorowania reaktora, możliwe jest monitorowanie jego pracy w europejskim cyklu jezdnym NEDC na podstawie obliczeń wartości  $I_{\text{HEGO}}$  w ustalonych warunkach pracy silnika.
2. Obydwie zaproponowane metody obliczeniowe wykazują przydatność dla potrzeb monitorowania reaktora.
3. Metody wykorzystujące obliczenia wybranych dyskryminant amplitudowych cechują się podobnym –  $I_{\text{HEGO,R}}$ , albo większym –  $I_{\text{HEGO,I}}$ , zakresem zmian wskaźnika monitorowania w zależności od zmiany aktywności niż metoda oparta na obliczeniach funkcji interkorelacji, lecz obydwie metody wykorzystujące dyskryminanty są nieczułe w zakresie od 100 do 75% aktywności reaktora.
4. Metoda oparta na obliczeniu funkcji korelacji wzajemnej (interkorelacji) cechuje się dużą liniowością i umożliwia monitorowanie reaktora w pełnym zakresie zmian jego aktywności. Zakres zmian wartości wskaźnika monitorowania  $I_{\text{HEGO,Ru}_1\text{u}_2}$  jest mniejszy niż zakres zmian wskaźnika  $I_{\text{HEGO,I}}$ .



## LITERATURA

- [1]. Merkisz J., Mazurek St.: *Pokładowe systemy diagnostyczne pojazdów samochodowych*. WKiŁ, 2002.
- [2]. Kruczyński S. W.: *Trójfunkcyjne reaktory katalityczne*. Instytut Technologii Eksploatacji, Radom, 2004.
- [3]. Ambrozik A., Kruczyński S. W.: *Diagnostyka i monitoring trójfunkcyjnych reaktorów katalitycznych spalin*. XXVII Ogólnopolskie Sympozjum DIAGNOSTYKA MASZYN, Węgierska Górka, luty 2000.
- [4]. Rieck J. S., Collins N. R., Moore J. S.: *OBD II Performance of Three-Way Catalyst*. Society of Automotive Engineers, Technical Paper No. 980665.
- [5]. Kurihara N., Kiura H., Ishii T., Tataka Y.: *On Bard Diagnosis Method for Three-Way Catalyst Deterioration*. Society of Automotive Engineers, Technical Paper No. 972854.
- [6]. Kruczyński S. W., Tomaszewski D.: *Zastosowanie dyskryminant amplitudowych w diagnostyce trójfunkcyjnego reaktora katalitycznego spalin*. Konferencja KONES, Polanica Zdrój, wrzesień 2006.



Prof. nzw. dr hab.  
inż. **Stanisław W.**  
**KRUCZYŃSKI**, kierownik  
Zakładu Silników  
Spalinowych na Wydziale  
Samochodów i Maszyn  
Roboczych Politechniki  
Warszawskiej.



Mgr inż. **Dariusz**  
**TOMASZEWSKI**, doktorant  
w Zakładzie Silników  
Spalinowych na Wydziale  
Samochodów i Maszyn  
Roboczych Politechniki  
Warszawskiej.