

ANALYSIS OF THREE-WAY CATALYTIC CONVERTER MONITORING METHODS USING SELECTED AMPLITUDE DISCRIMINANTS AND CROSS-CORRELATION FUNCTION FOR ON-BOARD DIAGNOSIS NEEDS

Stanisław W. Kruczyński
Dariusz Tomaszewski

The Warsaw University of Technology
Faculty of Automotive and Construction Machinery Engineering
02-584 Warszawa, ul. Narbutta 84, tel.: +48 22 660-87-82, fax.: +48 22 849-03-03
e-mail: skruczyn@simr.pw.edu.pl

Abstract

Three-way catalytic converters are effective devices in decreasing emission of harmful gases. Spark ignited engines should be equipped with catalyst monitoring systems because of homologation requirements. Partial disactivation of TWC should be indicated by means of MIL indicator. There is the need of looking for new effective catalyst monitoring methods.

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 simulated of few activity levels of converter. It was defined monitoring index I_{HEGO} for examine procedure needs. Method using selected discriminants and method using cross-correlation function were suggested. Monitoring in fixed engine work bench conditions and NEDC cycle test were compared using correlation. On the basis of results, suggested monitoring indexes usefulness in view of HC emission was evaluated for OBD needs. Values of monitoring indexes according to activation of MIL indicator (increase HC emission by 0.4 g/km in NEDC driving cycle) was estimated.

Keywords: engines, catalytic converters, emission of harmful gases, diagnosis

ANALIZA METOD MONITOROWANIA PRACY TRÓJFUNKCYJNEGO REAKTORA KATALITYCZNEGO WYKORZYSTUJĄCYCH DYSKRYMINANTY AMPLITUDOWE I FUNKCJĘ INTERKORELACJI DLA POTRZEB DIAGNOSTYKI POKŁADOWEJ

Streszczenie

Trójfunkcyjne reaktory katalityczne są wydajnymi urządzeniami w ograniczaniu emisji składników toksycznych. Silniki o zapłonie iskrowym powinny być wyposażane w systemy monitoringu tych urządzeń, ze względu na wymagania przepisów homologacyjnych. Istnieje potrzeba poszukiwania nowych metod monitorowania reaktorów.

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. Zasymlowano kilka znanych stopni aktywności reaktora. Badania wykonano na hamowni silnikowej w warunkach ustalonej pracy silnika i podczas testu jezdnych NEDC. Dla potrzeb badawczych zdefiniowano wskaźnik monitoringu I_{HEGO} . Zaproponowano dwie metody wyznaczenia wskaźników monitoringu: wykorzystującą obliczenia wybranych dyskryminant amplitudowych i wykorzystującą obliczenia funkcji interkorelacji sygnałów z czujników stężeń tlenu. Porównano możliwości monitoringu w ustalonych warunkach pracy silnika i teście NEDC. Na podstawie uzyskanych wyników porównano przydatność wskaźników monitoringu ze względu na emisję HC dla potrzeb OBD. Określono wartości wskaźników monitoringu odpowiadające aktywacji wskaźnika MIL (wzrost emisji HC o 0,4 g/km w cyklu NEDC).

Słowa kluczowe: silniki spalinowe, reaktory katalityczne, emisja spalin, diagnostyka

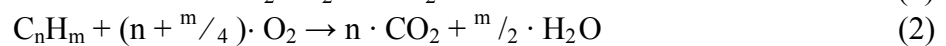
1. Wprowadzenie

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 pokładowej diagnostyki 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: opartej na obliczeniach funkcji interkorelacji oraz opartej na obliczeniach wybranych dyskryminant amplitudowych.

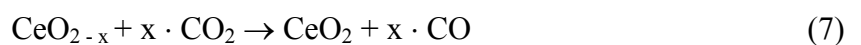
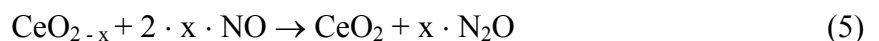
2. Monitorowanie sprawności pracy trójfunkcyjnego reaktora katalitycznego za pomocą czujników stężeń tlenu

2.1. Mechanizmy reakcji procesów oczyszczania spalin

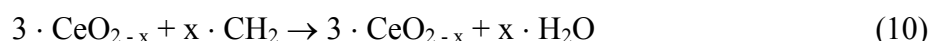
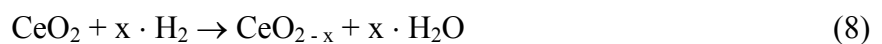
Za procesy oczyszczania spalin w trójfunkcyjnym reaktorze katalitycznym odpowiedzialne są reakcje utleniania/redukcji składników toksycznych przebiegające na powierzchni krystalitów metali szlachetnych [2], które można zapisać ogólnie:



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 wytłumienie oscylacji stężeń tlenu za reaktorem.

2.2. Istota monitorowania sprawności pracy reaktora za pomocą czujników tlenu

W miarę deaktywowania (spiekanie i zatrucie) warstw aktywnych reaktora odpowiedzialnych za reakcje utleniania/redukcji składników toksycznych zgodnie z reakcjami (1), (2) i (3) występują również procesy spiekania i zatrucia krystalitów tlenków ceru, co powoduje spadek powierzchni magazynowania tlenu (spadek OSC - *Oxygen Storage Capacity*) zgodnie z reakcjami od (4) do (10). Przyjmuje się, że procesy te są skorelowane ze sobą i utrata zdolności do magazynowania tlenu pociąga za sobą utratę zdolności do utleniania i redukcji składników szkodliwych zawartych w gazach spalinowych. Za reaktorem dezaktywowanym pojawiają się coraz intensywniejsze oscylacje stężeń tlenu z jednoczesnym spadkiem jego zdolności do utleniania CO i HC oraz redukcji NO_x.

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.

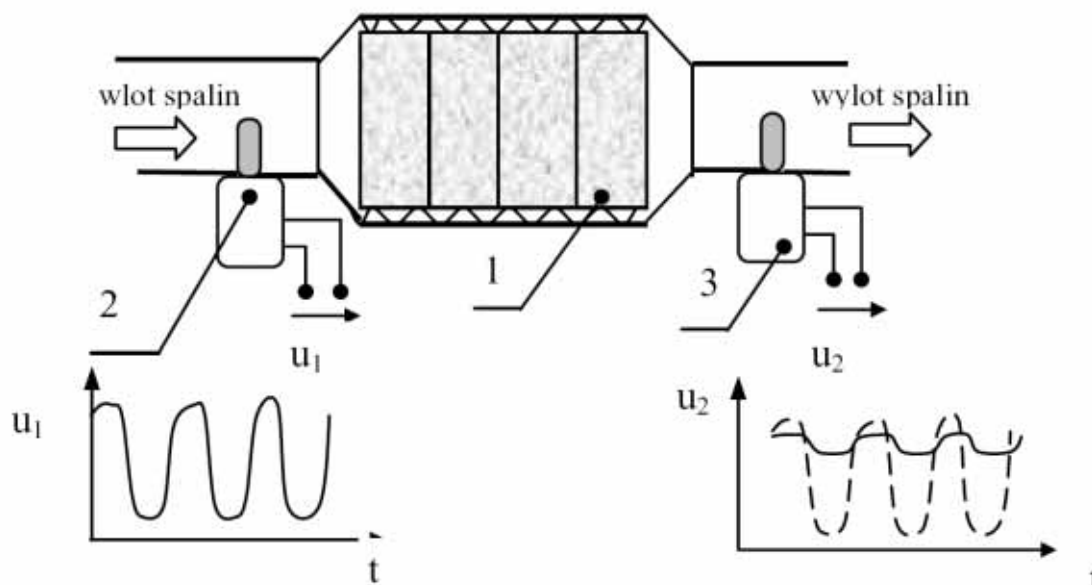
3. Metoda symulacji utraty sprawności konwersji

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_a do objętości całego katalizatora V_k . Aktywność A można napisać w postaci:

$$A = \frac{V_a}{V_k}, \quad (11)$$

4. Układ badawczy

Eksperyment wykonano z wykorzystaniem silnika typu 1.4 16V (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/Al₂O₃-CeO₂ o objętości monolitu dobranej odpowiednio do pojemności skokowej silnika z możliwością symulacji utraty sprawności konwersji. Badany reaktor katalityczny posiadał blok wykonany w postaci monolitu metalowego pokrytego nośnikiem γ -Al₂O₃-CeO₂ z naniesionymi na nim krystalitami platyny i rodu w proporcji 5:1 i ilości 2.0 g/dm³ monolitu. Za reaktorem katalitycznym umieszczono drugi identyczny czujnik stężenia tlenu zasilać go z układu elektronicznego zasilania pierwszego czujnika. Rysunek 1 przedstawia schemat układu badawczego.



Rys. 1. Schemat układu badawczego reaktora katalitycznego:

1 – reaktor katalityczny spalin, 2 – sonda sterująca,

3 – sonda diagnostyczna, gdzie:

u_1 – napięcie generowane przez sondę sterującą,

u_2 – napięcie generowane przez sondę diagnostyczną, t – czas

Fig. 1. Scheme of TWC examination work bench:

1- three-way catalytic converter, 2 - monitor oxygen sensor,

3 - diagnostic oxygen sensor, where:

u_1 – voltage generated by monitor oxygen sensor,

u_2 – voltage generated by diagnostic oxygen sensor, t – time

5. Opis badań

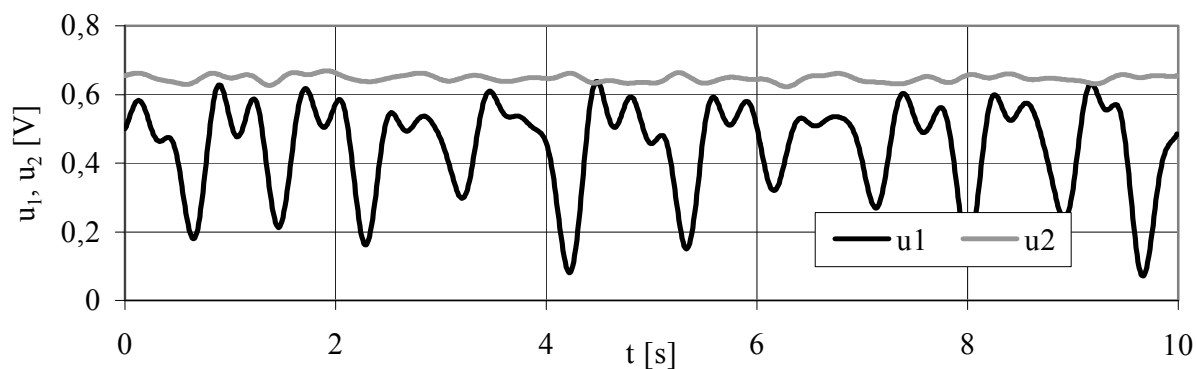
Badania sygnałów z czujników stężeń tlenu oraz pomiary stężeń toksycznych składników spalin przed i za reaktorem katalitycznym przy różnej jego aktywności wykonano:

- na hamowni silnikowej w 9 ustalonych punktach pracy silnika, odpowiadającym najczęściej występującym podczas jego eksploatacji i również występującym 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⁻¹ do 50000 h⁻¹,
- na hamowni podwoziowej, w następujących próbach: UDC, EUDC oraz NEDC (UDC+EUDC) składających się na cykl jezdny ECE R83.

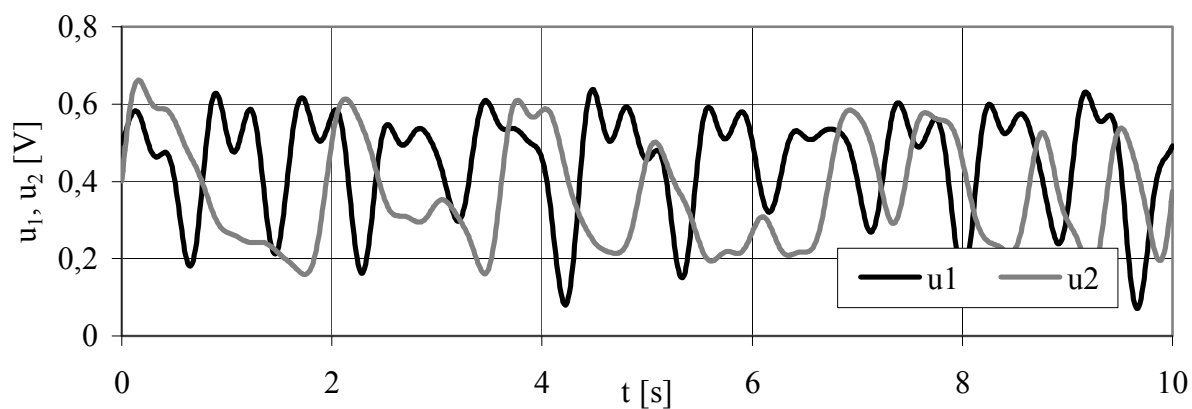
W celu wyznaczenia stopnia konwersji CO, HC i NO_x próbki spalin pobierano z przed i z za reaktora i kierowano do zestawu analizatorów spalin mierzących stężenia tlenku węgla metodą NDIR, węglowodorów metodą FID oraz tlenków azotu metodą CLD. Pomiarów stężeń tlenu dokonywano w sposób pośredni przy pomocy czujników tlenu umieszczonych przed i za reaktorem katalitycznym.

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

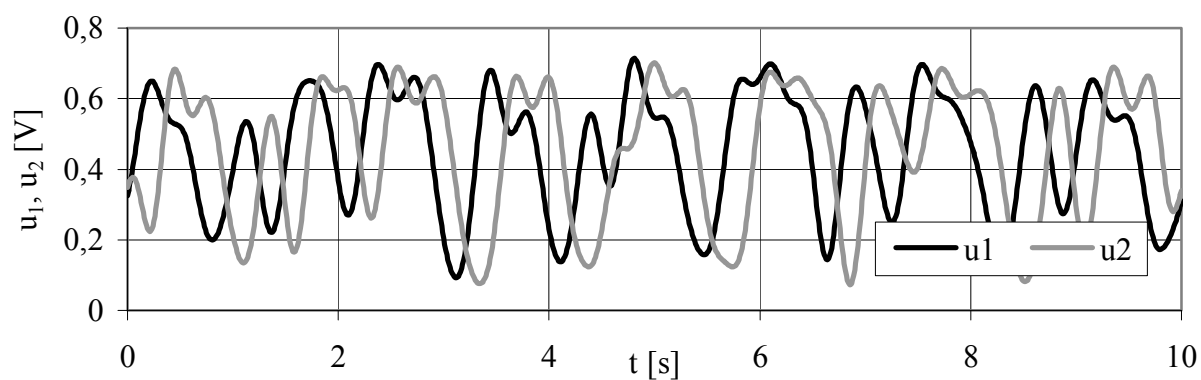
a).



b).

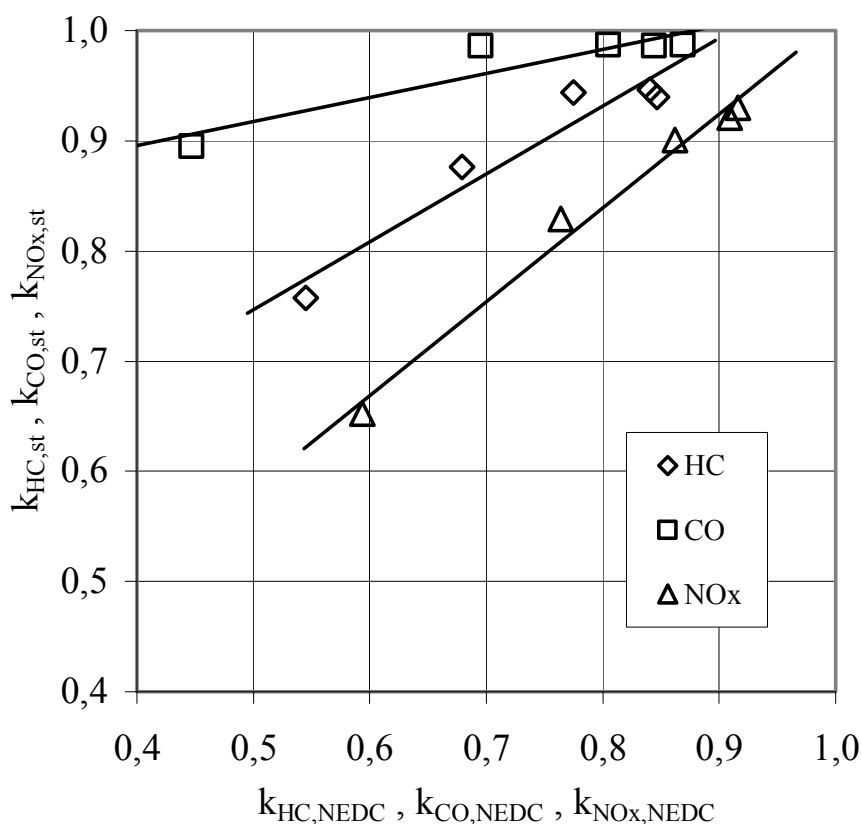


c).



Rys. 2. Sygnały z czujników tlenu dla reaktora o poziomach aktywności :
a). $A = 100\%$, b). $A = 50\%$, c). $A = 0\%$
Fig. 2. Oxygen sensors signals for catalytic converter in different activity levels:
a). $A = 100\%$, b). $A = 50\%$, c). $A = 0\%$

Rysunek 3 przedstawia korelację otrzymanych wyników konwersji składników toksycznych w reaktorze badawczym w ustalonych warunkach pracy silnika oraz w niestabilnych 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

Fig. 3. Correlation of HC, CO, NOx conversion in fixed work bench and NEDC driving cycle conditions

6. Definicja wskaźnika monitorowania reaktora katalitycznego

Dla potrzeb oceny monitorowania pracy trójfunkcyjnego reaktora katalitycznego zastosowano wskaźnik monitorowania I_{HEGO} [3] uzyskany za pomocą obliczenia funkcji interkorelacji i wybranych dyskryminant amplitudowych sygnałów z czujników tlenu.

Metoda wykorzystująca obliczenia funkcji interkorelacji

Oznaczając sygnały napięciowe z czujników stężenia tlenu przed reaktorem jako $u_1(t)$ i $u_2(t)$ obliczono funkcję korelacji wzajemnej $R_{u_1u_2}$ sygnałów z czujników tlenu:

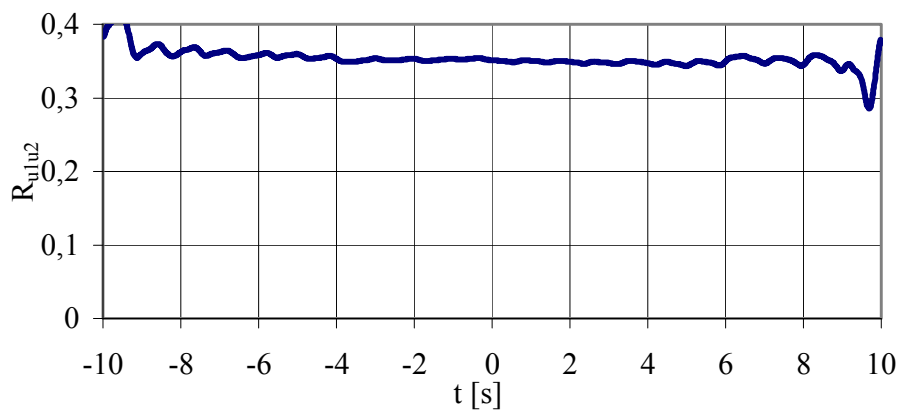
$$R_{u_1u_2}(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T u_1(t) \cdot u_2(t + \tau) dt, \quad (12)$$

gdzie:

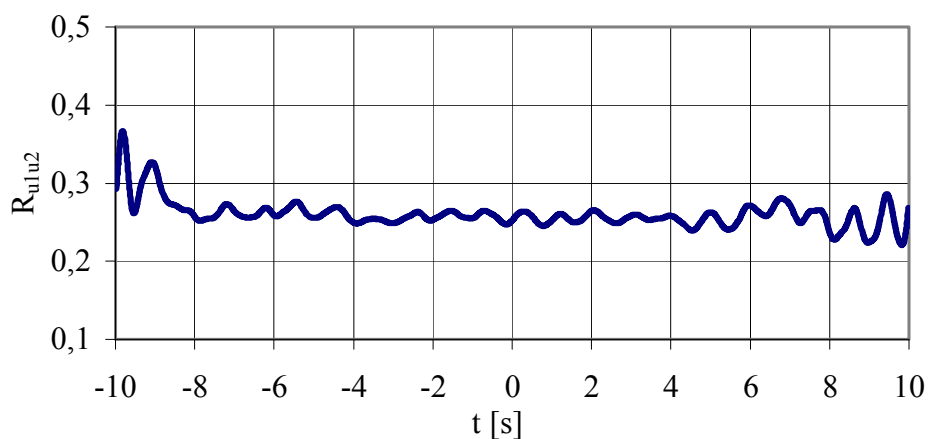
- $u_1(t)$ – sygnał generowany przez czujnik tlenu znajdujący się przed reaktorem katalitycznym,
- $u_2(t)$ – sygnał generowany przez czujnik tlenu znajdujący się za reaktorem katalitycznym,
- T – czas pomiaru sygnałów.

Rysunek 4 a, 4 b i 4 c przedstawia funkcje korelacji wzajemnej sygnałów w trzech charakterystycznych poziomach aktywności reaktora katalizacyjnego przedstawionych uprzednio na rysunku 2 a, 2b i 2c.

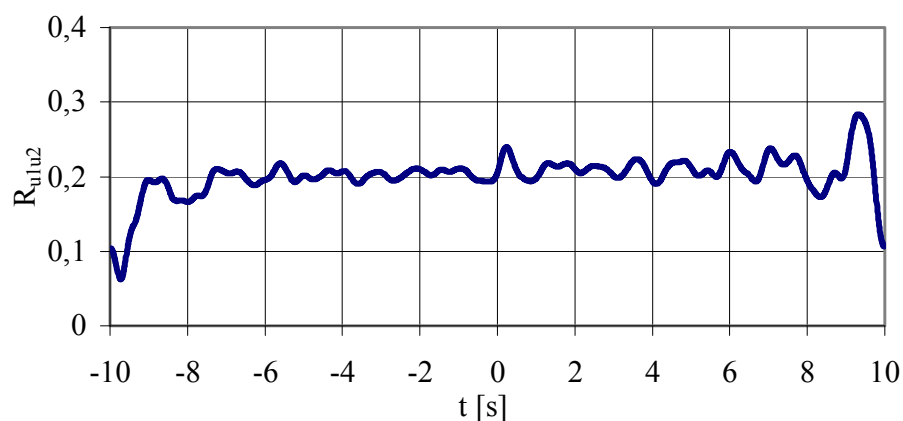
a).



b).



c).



Rys. 4. Funkcja interkorelacji $R_{u_1u_2}$ dla reaktora o poziomach aktywności:

a). $A = 100\%$, b). $A = 50\%$, c). $A = 0\%$.

Fig. 4. Cross-correlation function $R_{u_1u_2}$ for converter about following activities:

a). $A = 100\%$, b). $A = 50\%$, c). $A = 0\%$.

W celu określenia przydatności diagnostycznej funkcji korelacji wzajemnej (interkorelacji) zdefiniowano wskaźnik monitorowania reaktora I_{HEGO,Ru_1u_2} :

$$I_{\text{HEGO},Ru_1u_2} = \frac{R_{u_1u_2,100sr} - R_{u_1u_2,sr}}{R_{u_1u_2,sr}}, \quad (13)$$

gdzie:

- $R_{u_1u_2,100sr}$ – wartość średnia funkcji interkorelacji dla reaktora o aktywności $A=100\%$,
 $R_{u_1u_2,sr}$ – wartość średnia funkcji interkorelacji dla reaktora o znanym poziomie aktywności A .

Metoda wykorzystująca obliczenia wybranych dyskryminant amplitudowych

Metody amplitudowe mogą wykazywać pewną przydatność do potrzeb monitorowania TWC [4] i w dalszej analizie skupiono się na metodach charakteryzujących się największą czułością na zmianę poziomu aktywności. Wybrano następujące dyskryminanty amplitudowe:

a). współczynnik impulsowości - I:

$$I = \frac{u_{\max 2}}{u_{sr 2}}, \quad (14)$$

b). kurtoza - R:

$$R = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T u_2^4(t) dt}{\left(\frac{1}{T} \int_0^T u_2^2(t) dt \right)^2}, \quad (15)$$

gdzie:

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

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

$$I_{\text{HEGO},I} = I - 1, \quad (16)$$

$$I_{\text{HEGO},R} = R - 1, \quad (17)$$

gdzie:

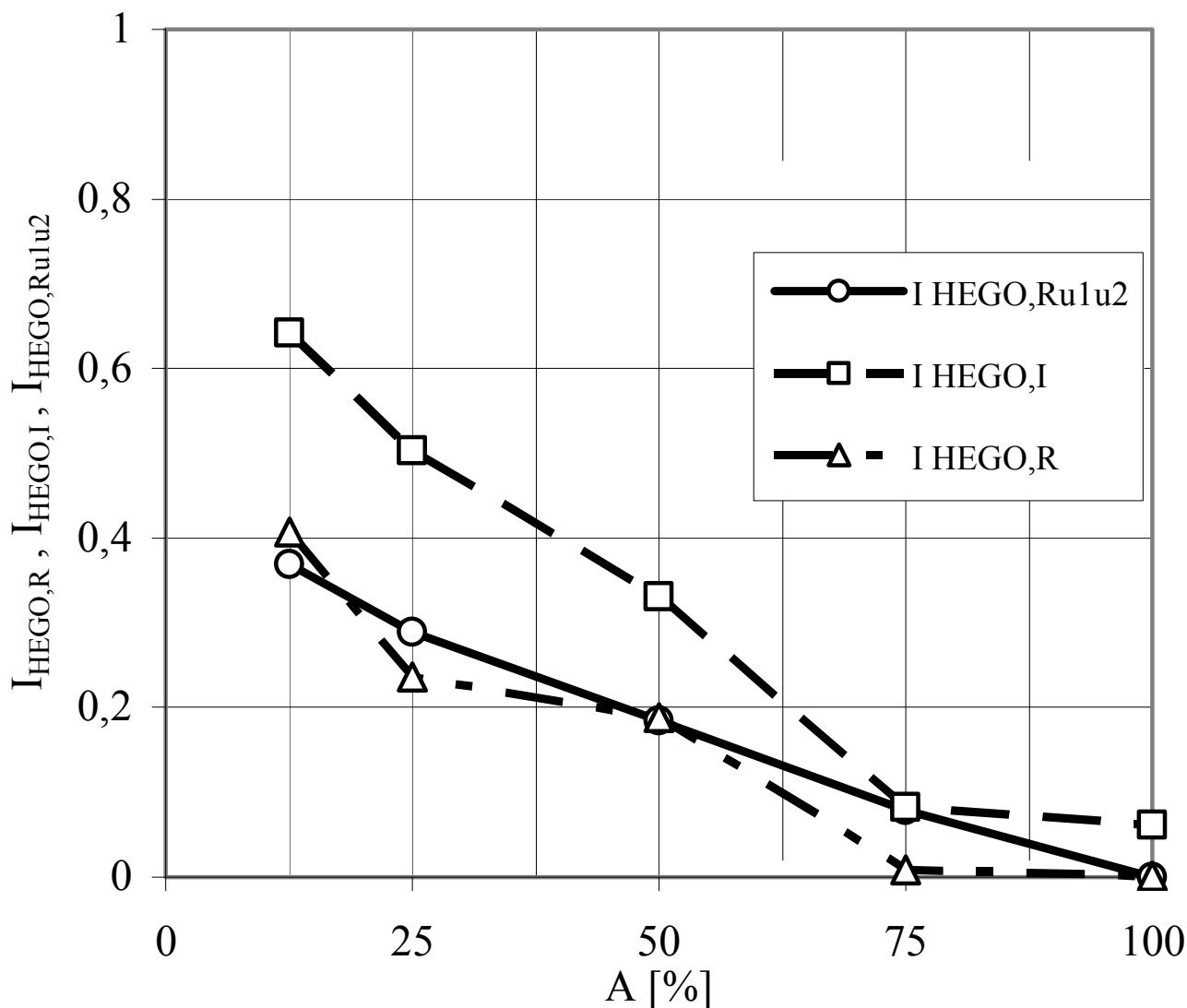
- $I_{\text{HEGO},I}$ – wskaźnik monitorowania oparty na obliczeniach współczynnika impulsowości sygnału,
 $I_{\text{HEGO},R}$ – wskaźnik monitorowania oparty na obliczeniach kurtozy.

6. Analiza porównawcza zaproponowanych metod

Na rysunku 5 przedstawiono porównanie wskaźników monitorowania reaktora katalitycznego. Wskaźnik monitorowania opracowany na podstawie funkcji interkorelacji I_{HEGO,Ru_1u_2} charakteryzuje się dużą liniowością umożliwiając ocenę stanu reaktora w całym zakresie jego zużycia. Metody oparte na dyskryminantach amplitudowych uniemożliwiają ocenę stanu w zakresie do 25 % zużycia reaktora, ale niektóre z nich charakteryzują się większą czułością ($I_{\text{HEGO},I}$) przy zużyciu reaktora powyżej 25 %.

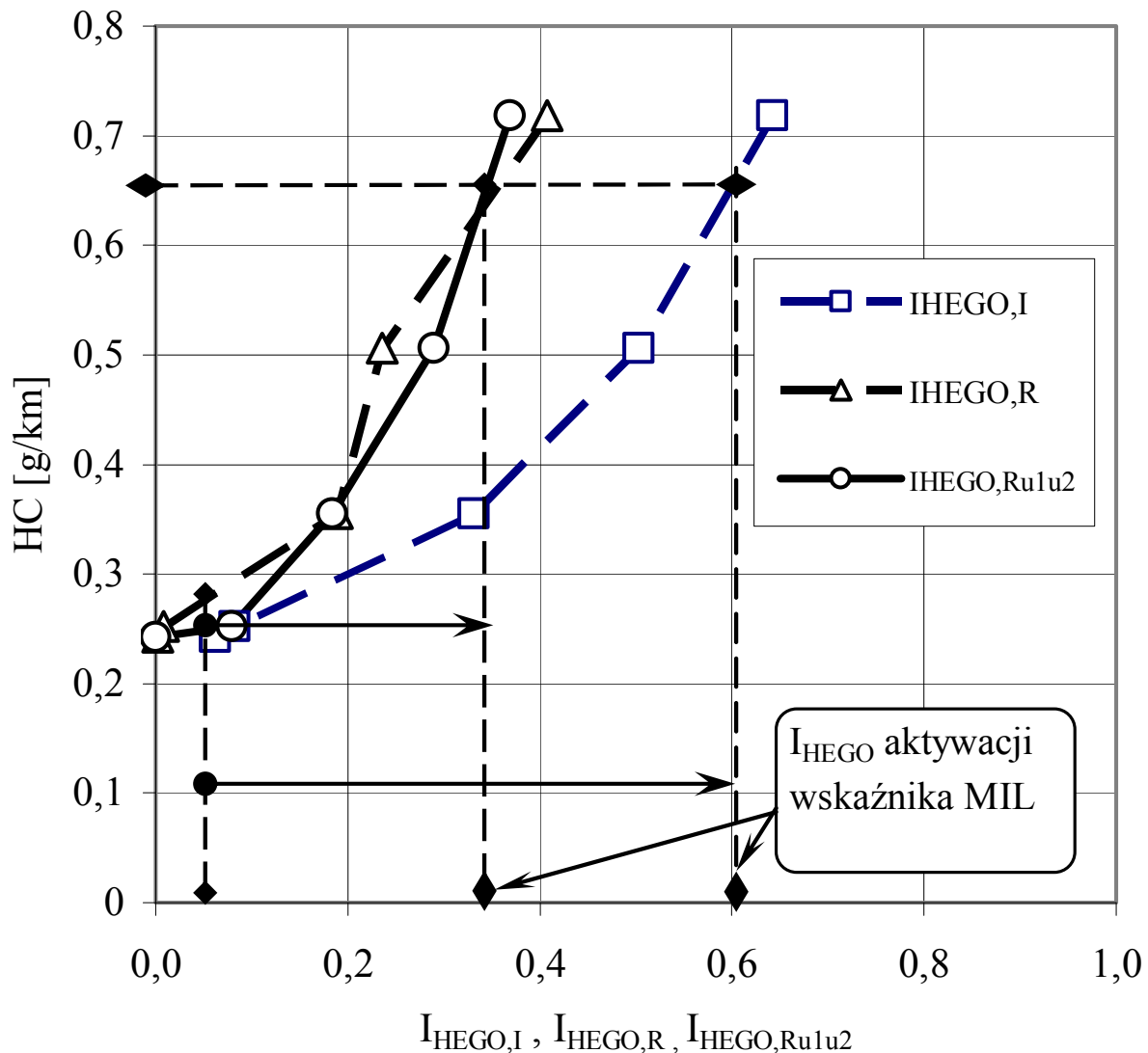
Przepisy diagnostyki pokładowej wymagają zastosowania układu monitorowania pracy reaktora katalitycznego i sygnalizacji wzrostu emisji HC o 0.4 g/km (w warunkach testu NEDC) na wskaźniku świetlnym MIL.

Rysunek 6 przedstawia zależność emisji HC w cyklu NEDC wraz z wyznaczonymi wartościami aktywacji lampki MIL od wskaźników monitorowania: $I_{HEGO,I}$, $I_{HEGO,R}$, $I_{HEGO,Ru1u2}$ wyznaczonych w ustalonych warunkach pracy silnika spalinowego. Wskaźnik $I_{HEGO,I}$ osiąga największą wartość dla wymaganego progu sygnalizacji wzrostu emisji HC, a zatem jest bardziej czuły niż wskaźniki $I_{HEGO,R}$ i $I_{HEGO,Ru1u2}$.



Rys. 5. Zależność wskaźników monitorowania $I_{HEGO,I}$, $I_{HEGO,R}$, $I_{HEGO,Ru1u2}$ w funkcji aktywności reaktora A

Fig. 5. Monitoring indexes $I_{HEGO,I}$, $I_{HEGO,R}$, $I_{HEGO,Ru1u2}$ versus converter activity A



Rys. 6. Emisja HC w funkcji wskaźników monitorowania: $I_{HEGO,I}$, $I_{HEGO,R}$ i $I_{HEGO,Ru1u2}$ w teście jeżdżym NEDC.

Fig. 6. Emission of HC versus monitoring index $I_{HEGO,I}$, $I_{HEGO,R}$ and $I_{HEGO,Ru1u2}$ in NEDC driving cycle.

8. Wnioski

- Możliwe jest monitorowanie konwersji substancji szkodliwych w reaktorze katalitycznym w europejskim cyklu jeżdżym NEDC na podstawie obliczeń wartości I_{HEGO} w ustalonych warunkach pracy silnika.
- Metoda wykorzystująca obliczenia korelacji wzajemnej sygnałów z czujników oraz metody wykorzystujące obliczenia wybranych dyskryminant amplitudowych wykazują przydatność w monitorowaniu TWC.
- Metody wykorzystujące obliczenia wybranych dyskryminant amplitudowych cechują się większym zakresem zmian współczynnika monitorowania I_{HEGO} w zależności od zmiany aktywności, ale są nieczułe w zakresie od 100 do 75% aktywności.
- 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 współczynnika monitorowania $I_{\text{HEGO},\text{Ru}_1\text{u}_2}$ w tej metodzie jest mniejszy niż zakres zmian współczynnika $I_{\text{HEGO},\text{I}}$.

- Wynikające z przepisów OBD, osiągnięcie progu sygnalizacji lampką MIL (przyrost emisji HC w teście NEDC o 0,4 g/km) odpowiada zmianie wartości $I_{\text{HEGO},\text{R}}$ i $I_{\text{HEGO},\text{Ru}_1\text{u}_2}$ z 0,0 do wartości 0,35, a w metodzie opartej na obliczeniach współczynnika impulsowości - zmianie wartości $I_{\text{HEGO},\text{I}}$ z 0,07 do 0,58.

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 2000.
- [4] Kruczyński, S.W., Tomaszewski, D.: *Zastosowanie dyskryminant amplitudowych w diagnostyce trójfunkcyjnego reaktora katalitycznego spalin*, Konferencja KONES, Polanica Zdrój, wrzesień 2006.

