

## ACTIVE METOD OF THREE WAY CATALYST MONITORING BY USE OF WIDEBAND COMBUSTION MIXTURE COMPOSITION SENSOR

Stanisław Kruczyński, Dariusz Tomaszewski, Wojciech Kamela

Technical University of Warsaw, Institute of Vehicles  
Narbutta 84, 02-524 Warszawa, Poland  
tel.+48 22 6608782, fax: +48 22 8490303  
e-mail: skruczyn@simr.pw.edu.pl

### Abstract

*In this paper the active method of three way catalyst monitoring by use of wideband combustion mixture composition sensor was described. This method relays on three way catalyst activity decrease by determination of oxygen capacity decrease monitoring. Determination of catalyst oxygen capacity decrease was done by comparison of signals from wideband and binary combustion mixture composition sensors. These sensors were mounted before and after investigated catalyst. In this paper was described the test bench in which modified catalyst was used. The catalyst was modified to simulate its activity decrease. Paper contains the investigation procedure and also static and dynamic characteristics of wideband combustion mixture composition sensor. A hand of received results the characteristic of binary combustion mixture composition sensor reaction time on combustion mixture change in function of reactor activity was determinate. From received results the index of reactor oxygen capacity decrease was also determinate. Received results showed also that this method can be used for precise controlling of three way catalysts activity for on board diagnostic systems purposes. Additionally this method allows concluding on toxic gases emission in NEDC tests at steady state engine work cycle.*

**Keywords:** *combustion engines, combustion mixture composition sensors, on board diagnostics, catalytic reactors, air pollution*

## AKTYWNA METODA MONITOROWANIA PRACY TRÓJFUNKCYJNEGO REAKTORA KATALITYCZNEGO Z WYKORZYSTANIEM SZEROKOZAKRESOWEGO SENSORA SKŁADU MIESZANKI PALNEJ

### Streszczenie

*W pracy przedstawiona została metoda aktywnego monitorowania trójfunkcyjnego reaktora katalitycznego wykorzystująca sygnały z szerokopasmowego sensora składu mieszanki palnej. Polega ona na określeniu spadku aktywności reaktora na podstawie monitorowania ubytku jego pojemności tlenowej. Wyznaczenie spadku pojemności tlenowej reaktora odbywało się na podstawie porównania sygnałów z szerokozakresowego i binarnego sensora składu mieszanki palnej, montowanych przed i za badanym reaktorem katalitycznym. W pracy przedstawione zostało stanowisko badawcze, w którym wykorzystano trójfunkcyjny reaktor katalityczny z możliwością symulowania utraty jego aktywności. Przedstawiona została procedura badań oraz statyczna i dynamiczna charakterystyka szerokozakresowego sensora składu mieszanki palnej. Na podstawie uzyskanych wyników wyznaczono charakterystykę czasu reakcji sensora wąskozakresowego na zmianę składu mieszanki palnej w funkcji aktywności reaktora katalitycznego oraz określono indeks utraty pojemności magazynowania tlenu reaktora. Uzyskane wyniki pokazały, że wykorzystanie omawianej metody pozwala na precyzyjną kontrolę stanu reaktora katalitycznego i może być wykorzystane w układach diagnostyki pokładowej pojazdów. Dodatkowo przedstawiona metoda pozwala w dość krótkim czasie wynoszącym około 10 sekund wnioskować o emisji substancji szkodliwych w teście NEDC, w ustalonych stanach pracy silnika.*

**Słowa kluczowe:** *silniki spalinowe, sensory składu mieszanki palnej, diagnostyka pokładowa, reaktory katalityczne, zanieczyszczenie środowiska*

## 1. Wstęp

W celu uzyskania wysokiej konwersji CO, HC i NO<sub>x</sub> w trójfunkcyjnym reaktorze katalitycznym składniki biorące udział w reakcjach katalitycznych powinny występować w stosunku stechiometrycznym ( $\lambda = 1$ ). Ponieważ nie można osiągnąć wystarczającej dokładności składu tworzącej się mieszanki poprzez wtrysk odpowiedniej dawki paliwa, dostosowanej do przepływu powietrza do komory spalania, dawkę tę należy korygować w ujemnej pętli jej sterowania [1]. Sterowanie takie nazywa się sterowaniem stałowartościowym. Do tego celu używa się szerokozakresowych lub binarnych, sensorów składu mieszanki palnej, które w rzeczywistości są wysokotemperaturowymi elektrochemicznymi czujnikami mierzącymi równowagowe stężenia tlenu w spalinach, będące miarą składu mieszanki paliwowo-powietrznej. Układy sterowania stałowartościowego są zbudowane tak, że sensory składu mieszanki palnej wykorzystywane są również do monitorowania poprawności pracy trójfunkcyjnych reaktorów katalitycznych na potrzeby diagnostyki pokładowej.

Do chwili obecnej rozwinęło się kilka metod diagnozowania pracy reaktorów katalitycznych z wykorzystaniem sensorów składu mieszanki palnej. Pierwsza z metod, stosowana w starszych rozwiązaniach opiera się na wykorzystaniu sygnałów z dwóch sensorów binarnych. Pierwszy z nich montowany jest przed reaktorami katalitycznymi, drugi natomiast umiejscowiony jest za reaktorem głównym. Monitoring poprawności pracy głównego reaktora katalitycznego odbywa się na podstawie określenia stopnia ubytku pojemności magazynowania tlenu w monitorowanym reaktorze katalitycznym. Stopień ubytku pojemności tlenowej określony może być poprzez porównanie sygnałów generowanych z obu czujników składu mieszanki palnej.

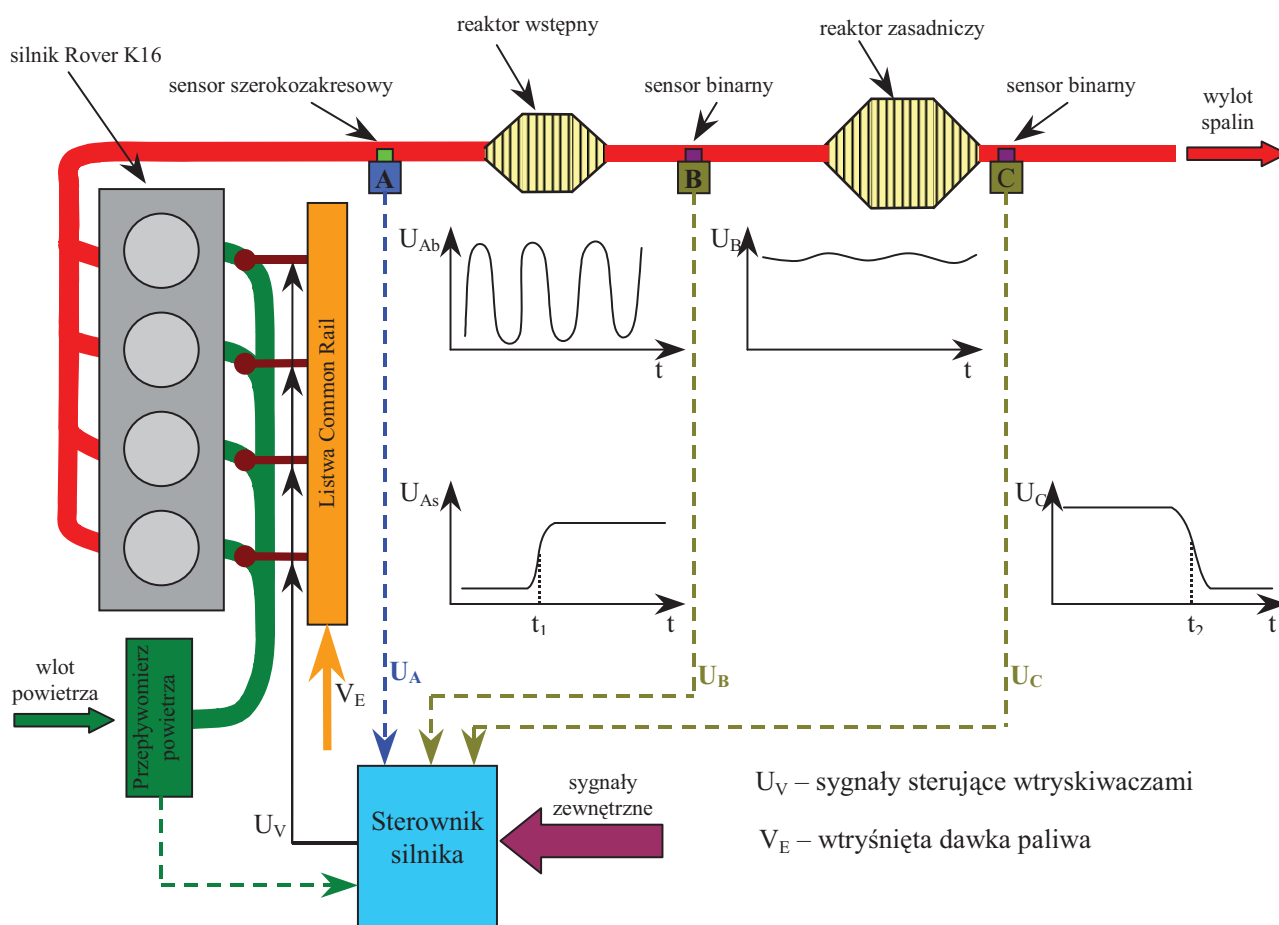
Druga z metod sterowania pracą silnika i monitorowania pracy reaktorów katalitycznych wykorzystuje sygnały z sensora szerokozakresowego i dwóch sensorów binarnych. Metoda ta stosowana jest w nowoczesnych systemach sterowania i monitorowania wykorzystywanych w pojazdach spełniających w Europie wymagania Euro 4 i Euro 5 oraz w USA wymagania SULEV (*Super Ultra Low Emission Vehicle*) [5]. Schemat takiego układu dla silnika czterocyndrowego przedstawiono na rysunku 1. Pierwszy szerokozakresowy sensor (A) umieszczony jest przed reaktorami katalitycznymi, drugi binarny sensor (B) usytuowany jest pomiędzy reaktorem wstępnym i zasadniczym, a trzeci również sensor binarny (C) umieszczony jest za reaktorem zasadniczym. Funkcja binarna sensora szerokozakresowego umieszczonego przed reaktorami wykorzystana jest w ujemnej pętli sterowania do korekcji składu mieszanki na wartość  $\lambda = 1$  oraz dodatkowo, tak jak w poprzednim układzie sterowania korygowana jest ona przez drugi sensor binarny umieszczony pomiędzy reaktorem wstępnym i zasadniczym. W niektórych rozwiązaniach [6] stosuje się również korekcję składu mieszanki (podwójna kaskada) dodatkowo trzecim sensorem (C). Dodatkowo sensor szerokozakresowy umożliwia regulowanie składu mieszanki paliwowo-powietrznej do wartości, innych niż stechiometryczne. Wskutek tego możliwe jest realizowanie:

- wzbogacanie mieszanki ( $\lambda < 1$ ) np. w celach diagnostycznych,
- zubażanie mieszanki ( $\lambda > 1$ ), np. w celu ograniczenia emisji podczas zimnego rozruchu silnika oraz w celach diagnostycznych,

System monitorowania układu reaktorów katalitycznych przedstawiony na rysunku poniżej opiera się na:

- biernym i ciągłym obserwowaniu i porównywaniu sygnałów z pierwszego ( $U_{Ab}$ ) i drugiego sensora ( $U_B$ ) w celu oceny stopnia ubytku pojemności magazynowania tlenu w reaktorze wstępnym i jest to układ analogiczny do wyżej opisanego,
- sumarycznej aktywnej ocenie stopnia ubytku pojemności magazynowania tlenu w reaktorach wstępnym i zasadniczym polegającej na pomiarze magazynowania tlenu bezpośrednio podczas zmiany mieszanki z bogatej na ubogą. Pomiar zachodzi w statycznych warunkach pracy silnika w zakresie częściowego obciążenia. Ocena ta

wymaga interwencji w systemie regulacji składu mieszanki w pętli zamkniętej. W pierwszym etapie procesu monitorowania, podczas gdy silnik pracuje na bogatej mieszance ( $\lambda < 1$ ), tlen zmagazynowany w warstwie pośredniej reaktorów zostaje wykorzystany w reakcjach katalitycznych i następuje redukcja  $CeO_2 \rightarrow Ce_2O_3$ . W następnym etapie, kiedy silnik pracuje na mieszance ubogiej ( $\lambda > 1$ ), masa tlenu pochłanianego do momentu napełnienia reaktorów (utlenianie  $Ce_2O_3 \rightarrow CeO_2$ ) obliczana jest na podstawie masowego natężenia przepływu powietrza i wartości sygnału sensora szerokozakresowego ( $U_{As}$ ). Punkt napełnienia reaktora tlenem wskazuje skok sygnału sensora binarnego ( $U_C$ ) na wartość odpowiadającą mieszance ubogiej. Obliczona całka z masy przepływającego tlenu do momentu reakcji sensora C wskazuje zdolność magazynowania tlenu. Liczba ta musi przekraczać wartość odniesienia, w przeciwnym razie rejestrowana jest usterka.



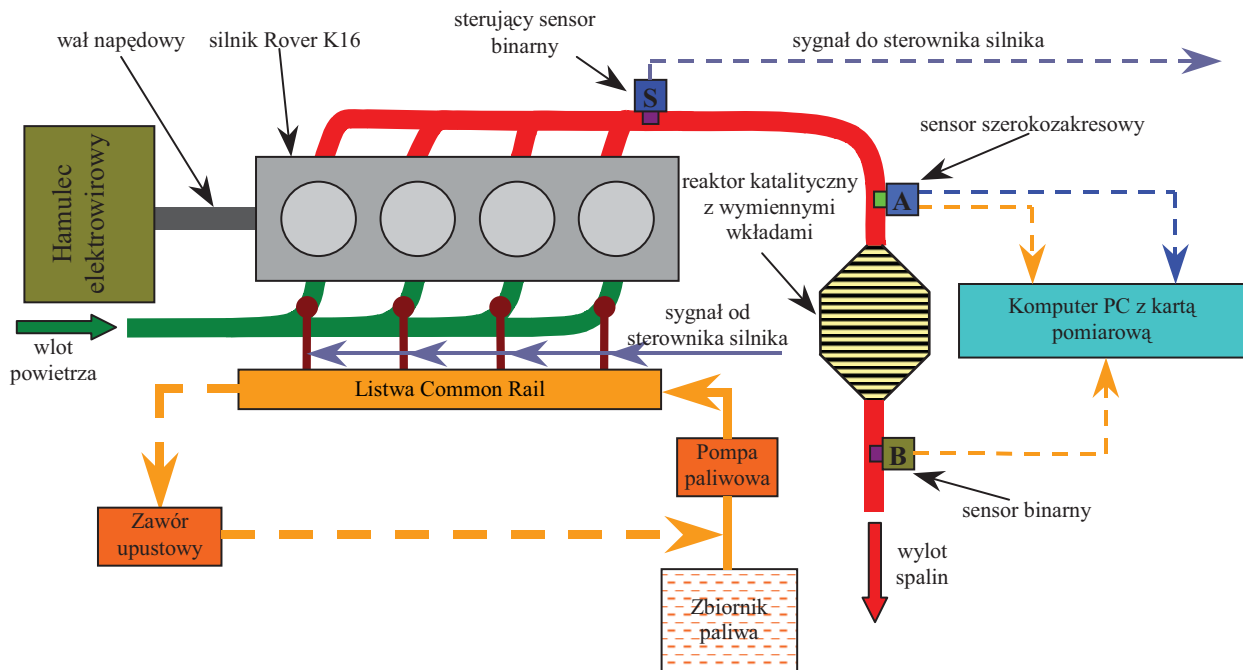
Rys. 1. Schemat sterowania i monitorowania pracy reaktorów katalitycznych wykorzystujący szerokozakresowy i dwa binarne sensory składu mieszanki palnej

Fig. 1. Scheme of engine steering and monitoring of catalytic converters based on signals from wideband and two binary combustion mixture composition sensors

## 2. Stanowisko badawcze i procedura badań

Celem pracy było określenie możliwości aktywnego monitorowania trójfunkcyjnego reaktora katalitycznego za pomocą szerokozakresowego (A) i binarnego (B) sensora składu mieszanki palnej w układzie podobnym do przedstawionego na rysunku 1. W tym celu zbudowane zostało stanowisko badawcze na hamowni silnikowej, którego schemat blokowy pokazano na rysunku 2. W jego skład wchodził silnik o zapłonie iskrowym Rover K16 o pojemności skokowej wynoszącej

1,4dm<sup>3</sup>, w którego układzie wydechowym umieszczony został trójfunkcyjny reaktor katalityczny z wymiennymi wkładami umożliwiającymi zmianę jego aktywności od 0 do 100% z krokiem co 12,5%. Metoda aktywnego monitorowania reaktora polega na skokowej zmianie składu mieszanki palnej z bogatej na ubogą, w trakcie, której obserwuje się czas odpowiedzi sensora binarnego za reaktorem na tą zmianę. Skok składu mieszanki palnej odbywał się w zakresie od  $\lambda=0,9$  do  $\lambda=1,1$  i był kontrolowany poprzez pomiar poziomu sygnału emitowanego na wyjściu proporcjonalnym sensora szerokozakresowego umieszczonego przed badanym reaktorem. Pomiary czasu reakcji sensorów na skokową zmianę składu mieszanki palnej rejestrowane były za pomocą komputera wyposażonego w kartę pomiarową. W trakcie pomiarów silnik pracował z prędkością obrotową równą 2500 obr/min przy obciążeniu wynoszącym  $M_e=80$  Nm. Obciążenie realizowane było za pomocą hamulca elektrowirowego połączonego wałem napędowym z wałem silnika.



Rys. 2. Schemat stanowiska badawczego  
Fig. 2. Scheme of test bench

Uzyskane wyniki badań czasu reakcji sensora binarnego na skokową zmianę mieszanki palnej zasilającej silnik przy różnych poziomach aktywności reaktora posłużyły do wyznaczenia indeksu utraty pojemności magazynowania tlenu opisanego następującym wzorem:

$$I_{OSC} = \frac{t_{100\%} - t_{x\%}}{t_{100\%}}, \quad (1)$$

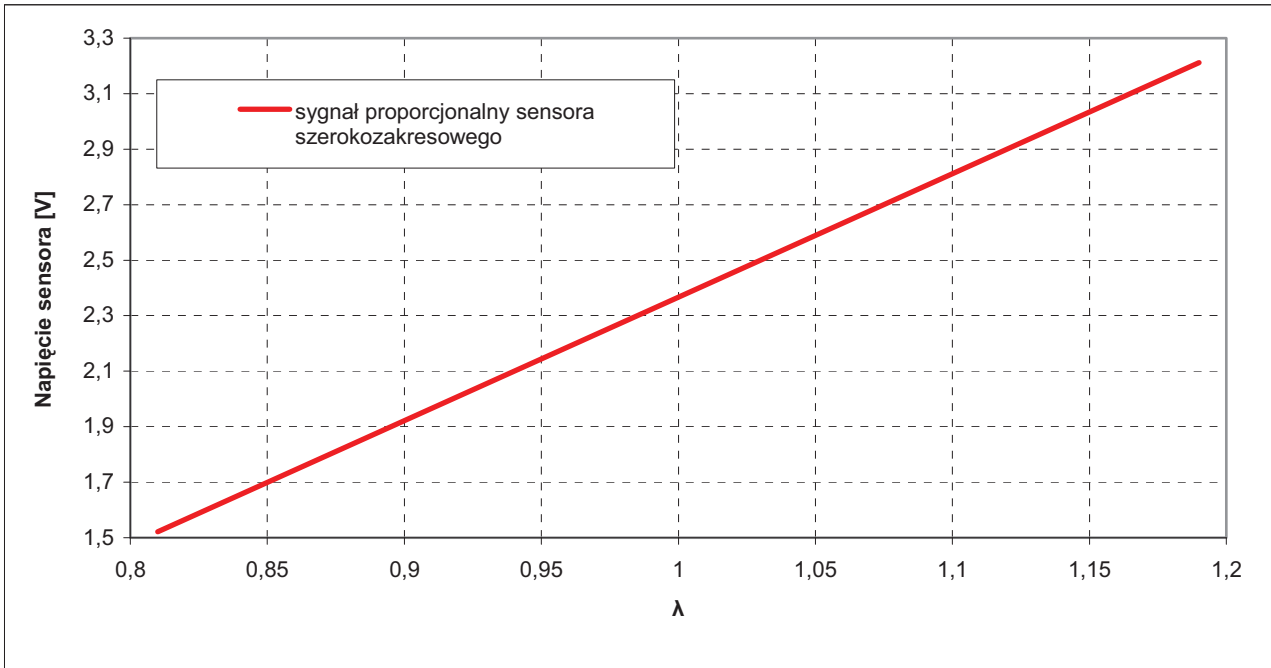
gdzie:

- $t_{100\%}$  - czas odpowiedzi sensora binarnego za reaktorem katalitycznym na skokową zmianę składu mieszanki palnej przy 100% aktywności reaktora,
- $t_{x\%}$  - czas odpowiedzi sensora binarnego za reaktorem katalitycznym na skokową zmianę składu mieszanki palnej przy wybranej aktywności reaktora

W kolejnym etapie badań obliczone dla poszczególnych poziomów aktywności reaktora katalitycznego wartości indeksu utraty pojemności magazynowania tlenu przyrównane zostały do badań poziomów emisji CO, HC i NO<sub>x</sub> w teście NEDC pojazdu wyposażonego w silnik o pojemności skokowej wynoszącej ~1,4dm<sup>3</sup> z zamontowanym w układzie wydechowym reaktorem katalitycznym z wymiennymi wkładami.

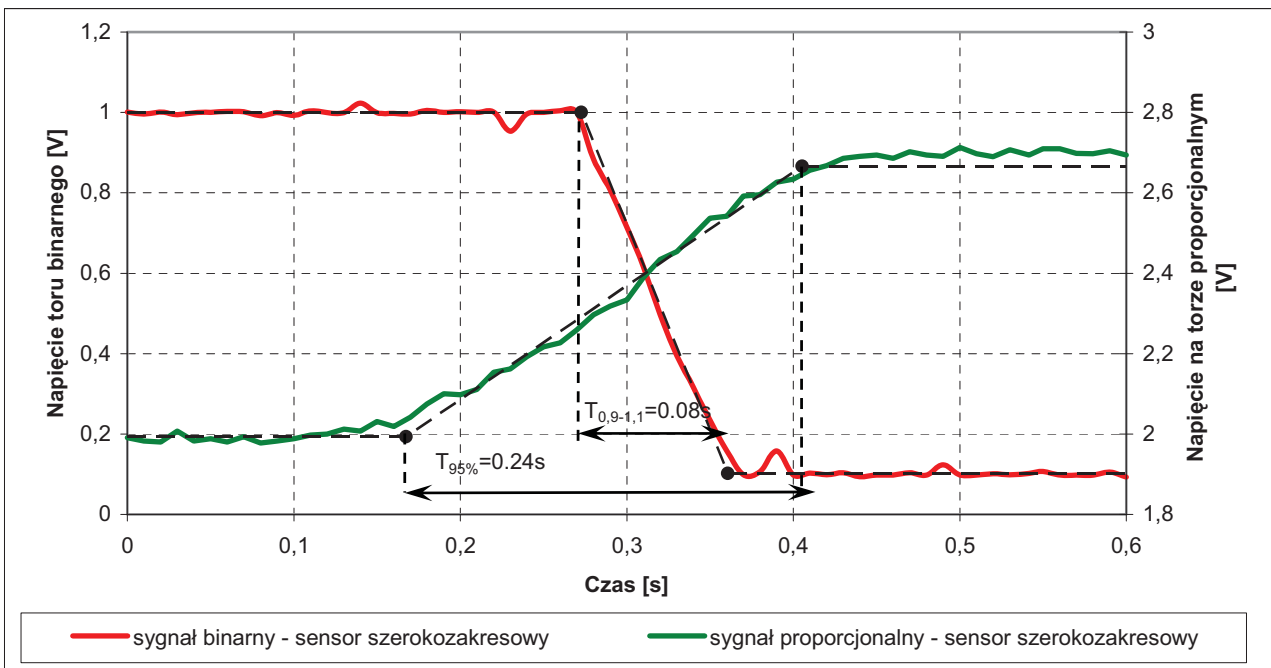
### 3. Wyniki pomiarów

Na rysunkach 3 i 4 przedstawione zostały charakterystyki odpowiednio statyczna i dynamiczna sensora szerokopasmowego. W odniesieniu do charakterystyki dynamicznej wspomnieć należy, że sensor szerokopasmowy generuje zarówno sygnał proporcjonalny jak i binarny. Wyznaczenie charakterystyki dynamicznej miało na celu określenie różnic w szybkości reakcji poszczególnych sygnałów na skokową zmianę mieszanki palnej. Dodać należy, że w przypadku sygnału proporcjonalnego czas odpowiedzi liczony był jako czas uzyskania przez sensor 95% stabilnej wartości sygnału po zmianie składu mieszanki natomiast w przypadku sygnału binarnego brany był pod uwagę czas przełączenia pomiędzy stanem wysokim a niskim.



Rys. 3. Charakterystyka statyczna sensora szerokozakresowego

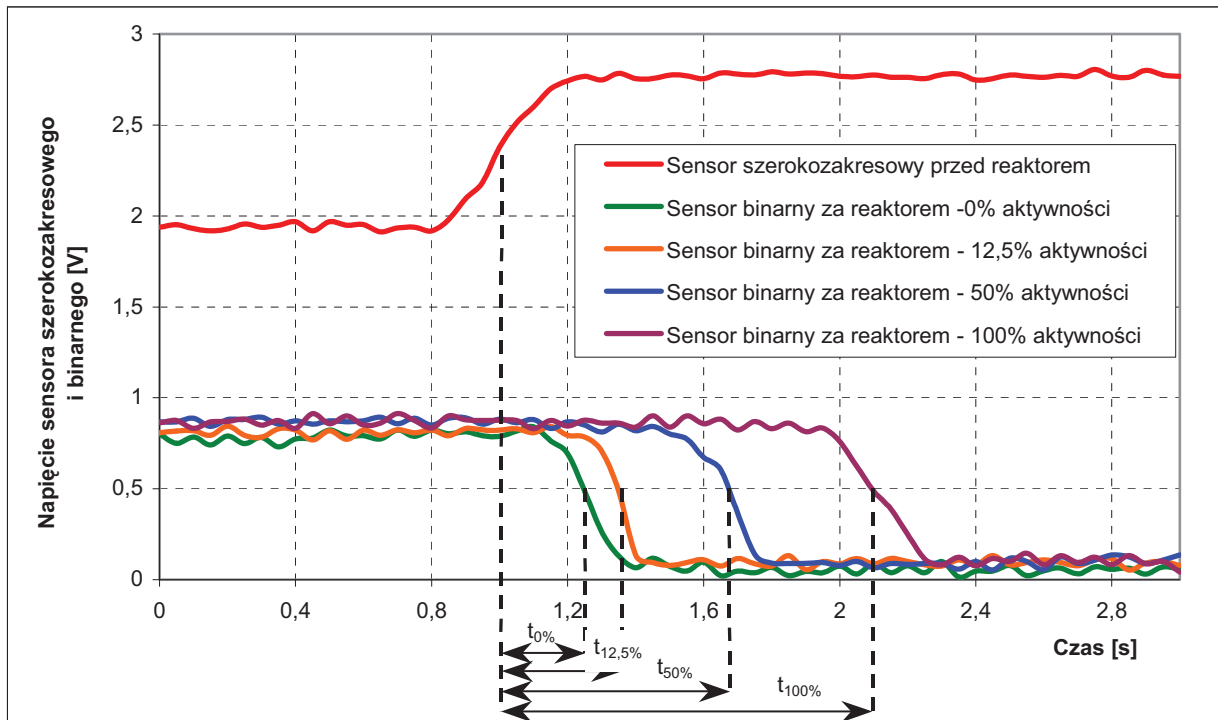
Fig. 3. Static characteristic of wideband sensor



Rys. 4. Porównanie dynamiki sygnału proporcjonalnego i binarnego sensora szerokozakresowego

Fig. 4. Comparison of wideband sensor proportional and binary signals dynamics

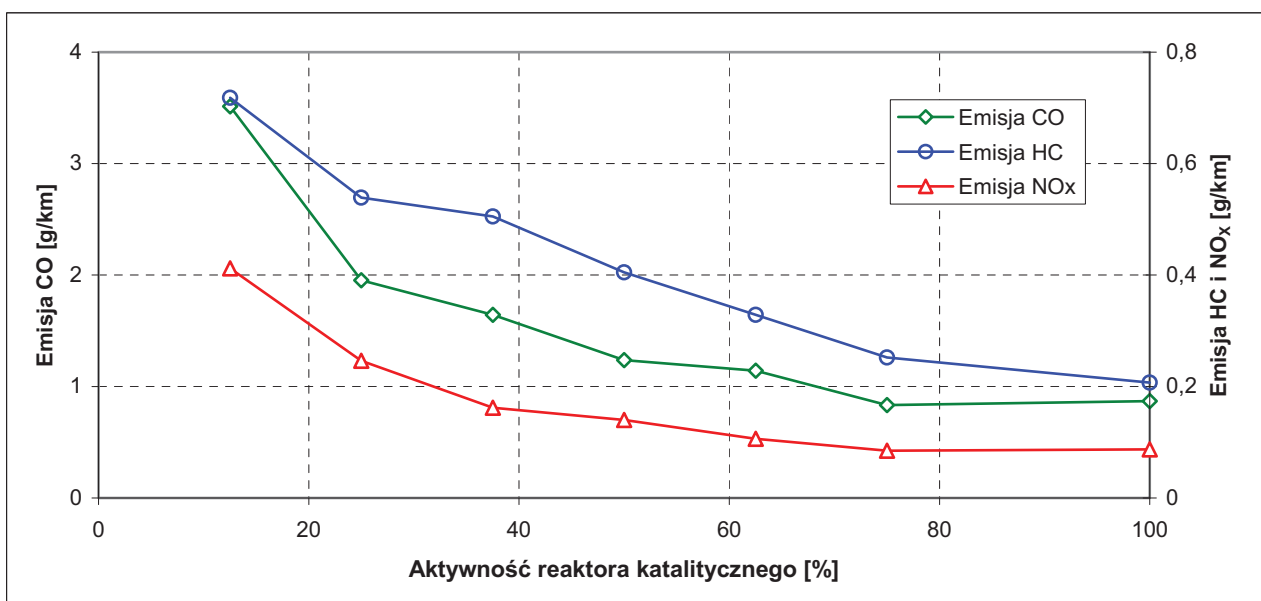
Na rysunku 5 przedstawione zostały zmiany czasu odpowiedzi sensora binarnego umieszczonego za reaktorem katalitycznym na skokową zmianę składu mieszanki palnej z bogatej na ubogą dla kilku wybranych poziomów aktywności reaktora (0, 12,5, 50 oraz 100%).



Rys. 5. Zmiany czasu odpowiedzi sensora binarnego za reaktorem katalitycznym na skokową zmianę składu mieszanki palnej z bogatej na ubogą przy różnych poziomach aktywności reaktora

Fig. 5. Differences in answer time of binary sensor mounted after catalyst for sudden change of combustion mixture change from rich to lean for different catalyst activity

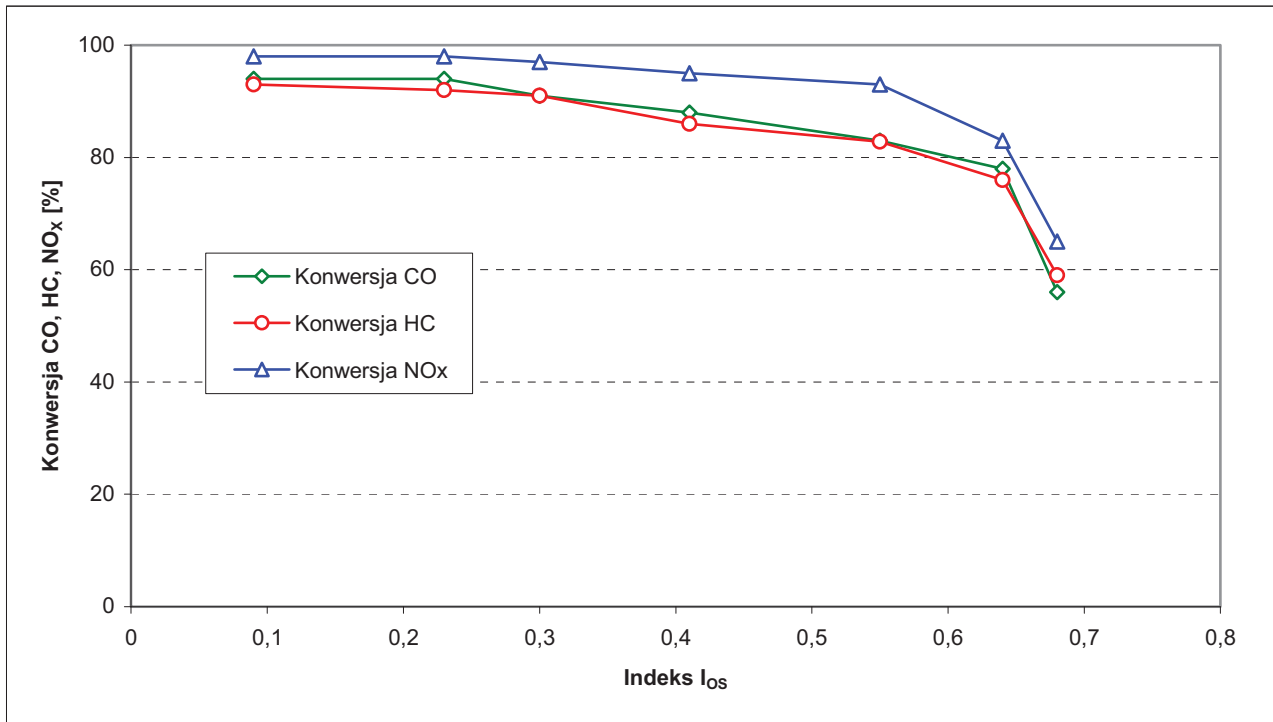
W kolejnym etapie badano zmodyfikowany reaktor katalityczny z możliwością zmiany jego poziomu aktywności w teście NEDC. Prowadzono rejestrację emisji CO, HC i NO<sub>x</sub> przy kolejnych poziomach aktywności reaktora. Zarejestrowane poziomy stężenie związków szkodliwych przedstawione zostały na rysunku 6.



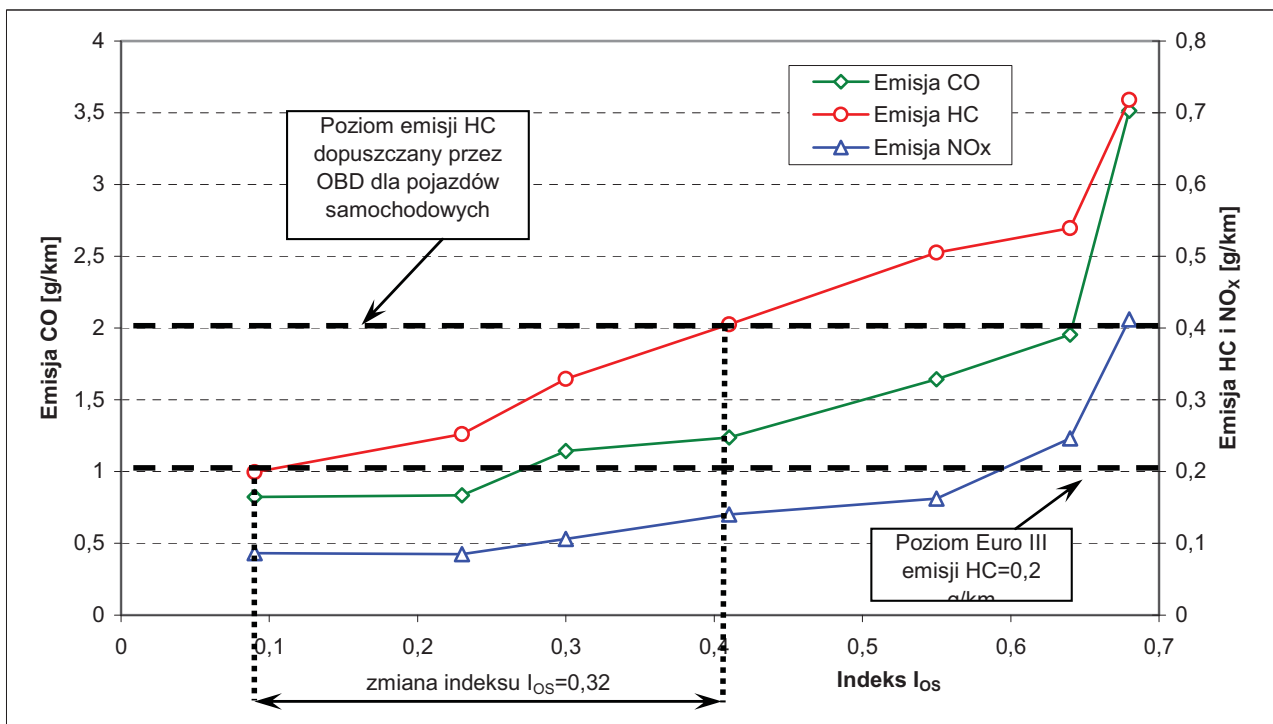
Rys. 6. Zmiana emisji CO, HC i NO<sub>x</sub> w teście NEDC dla różnych poziomów aktywności reaktora katalitycznego

Fig. 6. Changes in CO, HC and NO<sub>x</sub> emission at the NEDC test for different catalyst activity

Na podstawie wyników pomiarów emisji związków toksycznych zaprezentowanych na rysunku 6 dokonano obliczeń poziomów konwersji CO, HC oraz NO<sub>x</sub> w teście NEDC dla poszczególnych poziomów aktywności reaktora. W następnym kroku kolejnym poziomom aktywności reaktora przyporządkowano obliczone wcześniej ze wzoru 1 wartości indeksu utraty pojemności magazynowania tlenu. Otrzymane wyniki zarówno konwersji, jak i poziomów emisji związków toksycznych w teście NEDC, w funkcji zaproponowanego indeksu zaprezentowane zostały odpowiednio na rysunku 7 i 8.



Rys. 7. Zmiana konwersji CO, HC i NO<sub>x</sub> w teście NEDC w funkcji indeksu utraty pojemności magazynowania tlenu  
Fig. 7. CO, HC and NO<sub>x</sub> conversion changes at NEDC test in function of reactor oxygen capacity decrease index



Rys. 8. Zależności emisji CO, HC i NO<sub>x</sub> w teście NEDC od indeksu utraty pojemności magazynowania tlenu  
Fig. 8. CO, HC, and NO<sub>x</sub> emission at NEDC test in function of reactor oxygen capacity decrease index

#### 4. Wnioski

Badania na stanowisku hamownianym wyposażonym w szerokokresowy sensor składu mieszanki palnej pozwoliły wyciągnąć następujące wnioski:

- wykazano, że za pomocą sensora szerokokresowego można bardzo precyzyjnie określić skład mieszanki palnej zasilającej silnik,
- wyznaczone charakterystyki dynamiczne sygnałów proporcjonalnego i binarnego sensora szerokokresowego wykazały, że tor binarny sensora charakteryzuje się znacznie większą dynamiką przełączania między stanami odpowiadającymi mieszankom bogata/uboga,
- wyznaczony indeks utraty pojemności magazynowania tlenu w reaktorze zmienia się w dość dużym zakresie, jednak zależność poziomu konwersji związków toksycznych w funkcji zaproponowanego indeksu jest zależnością nieliniową szczególnie jest to widoczne dla niskich poziomów aktywności reaktora katalitycznego,
- możliwe jest monitorowanie konwersji substancji szkodliwych w reaktorze katalitycznym w europejskim cyklu jezdnym NEDC na podstawie obliczeń wartości indeksu utraty pojemności magazynowania tlenu w ustalonych warunkach pracy silnika,
- wynikające z przepisów OBD, dla samochodów spełniających wymagania Euro III osiągnięcie progu sygnalizacji lampką MIL (wartość emisji drogowej HC w teście NEDC równa 0,4 g/km) odpowiada zmianie wartości  $I_{OSC}$  z wartości 0,09 do wartości 0,41,
- wzrost emisji drogowej HC do poziomu 0,4 g/km powoduje jednoczesny wzrost emisji drogowych CO i NO<sub>x</sub> odpowiednio do poziomu 1,23 g/km i 0,14 g/km, to jest do wartości nie przekraczających wymagań Euro III.

#### Literatura

- [1] Kruczyński, S., *Trójfunkcyjne reaktory katalityczne*. Wydawnictwo ITE-PIB, Warszawa, Radom, 2005.
- [2] Ambrozik, A., Kruczyński, S., Łączyński, J., Tomaszewski D., *Pomiary stężeń tlenu w diagnozowaniu pokładowym trójfunkcyjnego reaktora katalitycznego spali*, Diagnostyka, Vol. 27, Olsztyn, 2002.
- [3] Kruczyński, S., Tomaszewski, D., Ślęzak, M., *Application of Amplitude Discriminants in Diagnosis of Three-Way Catalytic Converter*, Journal of KONES, Vol. 12, 3-4, 2005.
- [4] Kruczyński, S., Tomaszewski, D., *Analiza metod monitorowania pracy trójfunkcyjnego reaktora katalitycznego wykorzystujących dyskryminanty amplitudowe i funkcję interkorelacji*, Diagnostyka Nr 4(40)/2006.
- [5] Zhao, F., *Technologies for Near-Zero-Emission Gasoline-Powered Vehicles*. SAE International, Warrendale, Pa. 2006.
- [6] *Gasoline Engine Management*, Robert Bosch GmbH. John Wiley Ltd. England 2006.