

Adaptive control of exhaust gas recirculation at nonroad vehicle diesel engine

Abstract: In the paper proposed solution the EGR valve is a prototype construction of an electrical controlled EGR. The openness of the valve is freely programmable and is controlled by adaptive algorithm saved in the ECU (Electronic Control Unit). As feedback signal to control the openness of EGR valve is used an NO_x sensor placed at engine outlet pipe. The paper describe an control circuit of EGR Valve and include research results of nonroad vehicle diesel emissions (NO_x and PM missions). The proposed adaptive control of EGR Valve shows potential to reduce especially NO_x emissions in aspect to fulfill further emission regulation TIER/Euro.

Key words: Exhaust Gas Recirculation, NO_x emissions reduction, adaptive control, EGR Valve

Adaptacyjne sterowanie recyrkulacją spalin w silniku diesla pojazdu nonroad

Streszczenie: W rozwiązaniu proponowanym w niniejszej publikacji zawór EGR jest konstrukcją prototypową opartą elektronicznym sterowaniu recyrkulacją spalin. Stopień otwarcia zaworu jest w programowalny i sterowanym adaptacyjnym algorytmem zapisanym w ECU (Electronic Control Unit). Jako sprzężenie zwrotne zastosowano sygnał czujnika tlenków azotu umieszczonego w układzie wydechowym. Opracowanie opisuje system sterowania zaworem EGR i zawiera wyniki badań emisji szkodliwych składników spalin silnika pojazdu nonroad (NO_x i PM). Proponowane rozwiązanie posiada potencjał pozwalający na ograniczenie emisji w szczególności NO_x w aspekcie spełnienia przyszłościowych norm emisji spalin TIER/ Euro.

Słowa kluczowe: recyrkulacja spalin EGR, oraniczenie emisji NO_x, sterowanie adaptacyjne, zawór EGR

1. Wprowadzenie

Rosnące wymagania odnośnie poziomu emisji substancji szkodliwych w pojazdach nonroad wymagają poszukiwania metod ich ograniczenia ze szczególnym uwzględnieniem rozwiązań korzystnych pod względem zapewnienia wysokiej niezawodności i pewności działania niezależnie od zmieniających się warunków eksploatacyjnych. Spełnienie wymagających przyszłościowych norm emisji spalin wymaga doskonalenia rozwiązań konstrukcyjnych, ale przede wszystkim poszukiwania optymalizacji algorytmów sterowania i zastosowania nowoczesnych rozwiązań niektórych elementów składowych układu ograniczającego emisję spalin [5, 6, 7, 9, 10]. Zastosowanie pozasilnikowych układów (aftertreatment system) ograniczających emisję zazwyczaj staje się nieodzowne w przypadku najnowszych norm emisji, jest jednak związane ze znacznym wzrostem kosztów, zarówno eksploatacyjnych (potrzeba okresowej wymiany elementów układu, uzupełnienia płynów, zwiększenie zużycia paliwa, kosztów obsługi i serwisowania) jak i produkcji (katalizator, filtr cząstek stałych). W przypadku pojazdów nonroad obecnie

stosuje się głównie silnikowe metody ograniczenia spalin. Jednym z możliwych, a równocześnie bardzo efektywnych systemów redukującym emisję głównie NO_x, jest recyrkulacja spalin w silniku (EGR). W referacie przedstawiono możliwości ograniczenia emisji substancji szkodliwych, głównie tlenków azotu, przez zawansowaną kontrolę systemu recyrkulacji spalin. Takie rozwiązanie jest zgodne z najnowszymi wytycznymi zapisanymi w normach TIER oraz Euro [2, 6, 8], ograniczające dopuszczalną emisję CO, HC, NO_x oraz cząstek stałych PM dla pojazdów nonroad.

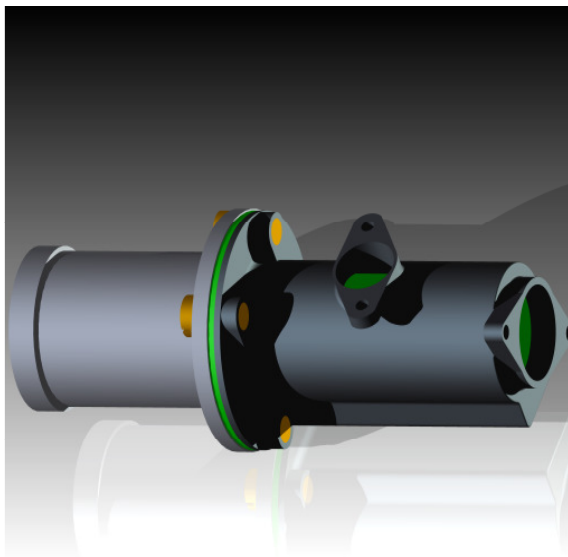
2. Zawansowany system recyrkulacji spalin EGR, wyposażony w proporcjonalny zawór EGR i czujnik NO_x

Zastosowanie recyrkulacji spalin w silniku spalinowym pozwala na obniżenie NO_x. Należy jednak zwrócić uwagę na stosunek podawanych do komory spalania ilości spalin do świeżego ładunku. Zbyt duża ilość spalin, spowoduje spadek mocy jednostki napędowej, jak również gwałtowny wzrost emitowanych do środowiska cząstek stałych PM. Jak

można zauważyć zagadnienie redukcji emisji tlenków azotu i cząstek stałych w silniku tłokowym nie jest proste. Zmieniające się warunki pracy silnika, eksploatacyjne zużycie niektórych jego elementów, stosowanie paliw różnej jakości (szczególnie w przypadku pojazdów nonroad) może prowadzić do wzrostu emisji. Z tego względu nowoczesny układ sterujący powinien uwzględniać wiele niekorzystnych czynników i posiadać możliwości adaptacji do zmieniających się warunków. Celem nadrzędnym powinno być uzyskanie rozsądnego kompromisu pomiędzy ilością emitowanych substancji, a własnościami użytkowymi danego pojazdu. Nie bez znaczenia jest zaproponowanie układu niezawodnego i korzystnego ekonomicznie w produkcji jak i eksploatacji w porównaniu do uzyskiwanych efektów ograniczenia emisji.

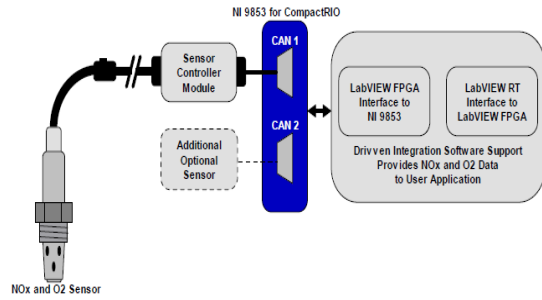
Zażywszy na przedstawione problemy, zaproponowano, by w sterowniku silnika ECU pojazdu typu nonroad zaimplementować, zaawansowany algorytm sterowania adaptacyjnego systemu recyrkulacji spalin.

Nowy system recyrkulacji, oparty jest na podstawowym układzie sterowania ECU silnika o zapłonie samoczynnym, jednak w układzie EGR zastosowano nowy proporcjonalny zawór recyrkulacji spalin (rys. 1),



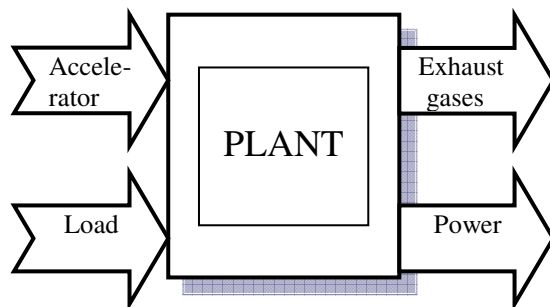
Rys. 1. Prototypowy zawór EGR

współpracujący z dodatkowym czujnikiem NO_x współpracującym z pakietem LabView i systemem sterująco-pomiarowym Compact Rio (rys. 2). Należy jednak pamiętać, aby system był stosunkowo prosty, a algorytm obliczeniowy nie zajmował zbyt wiele czasu procesorowi, który powinien przede wszystkim nadzorować spełnienie podstawowych zadań umożliwiających poprawną pracę silnika.



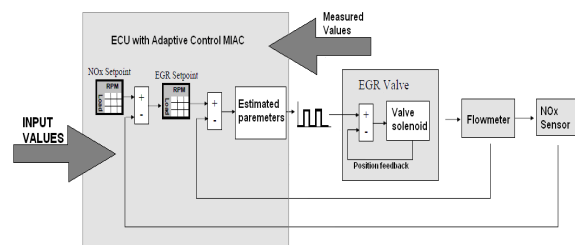
Rys. 2. Schemat działania sondy pomiarowej tlenków azotu Driven NOx Sensor Kit

Jednym z kryteriów sterowania jest uzyskanie jak korzystnych wskaźników pracy silnika przy równoczesnym ograniczeniu emisji substancji szkodliwych. Analizując system recyrkulacji spalin, można go traktować jako obiekt MIMO, gdzie wejściami obiektu są: zadana za pomocą pedału obciążenie silnika natomiast wyjściami są tu: używana moc i emisja substancji szkodliwych (rys.3).



Rys.3 Model obiektu badań

Przy wyborze strategii sterowania należy również pamiętać o warunkach w jakich pojazdy typu nonroad muszą pracować. Na ilość emitowanych substancji szkodliwych do środowiska przez silnik ZS ma wpływ wiele czynników takich jak: jakość paliwa, warunki atmosferyczne, obciążenie oraz stan zużycia jednostki. Analizując obiekt pod tymi względami, wydaje się, że najbardziej efektywny jest algorytm adaptacyjny z identyfikacją obiektu MIAC (rys. 4).

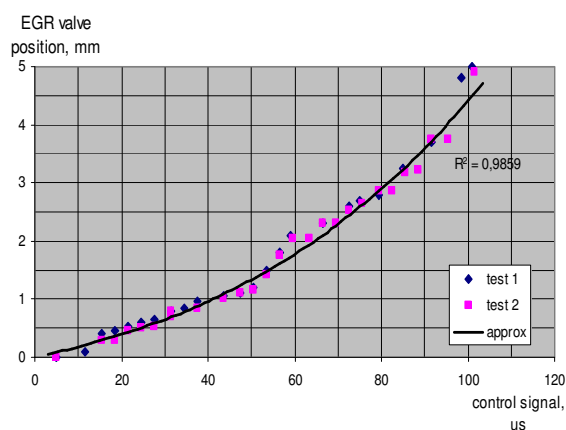


Rys.4. System sterowania adaptacyjnego MIAC

Zaproponowany algorytm adaptacyjny pozwoli na korekcję nastaw elementów wykonawczych (głównie zaworu recyrkulacji spalin EGR) dla każdego punktu pracy silnika. Podstawowymi elemen-

tami systemu recyrkulacji spalin są: proporcjonalny zawór EGR, czujnik tlenków azotu oraz jednostka sterująca z algorytmem adaptacyjnym. Wykorzystany proporcjonalny zawór EGR ma możliwość swobodnego programowania kroków w zakresie otwarcia od 0 do 5mm ze skokiem 0,1mm. Sterowanie zaworem EGR odbywa się dzięki przesłaniu do układu wykonawczego zakodowanego sygnału sterującego, którego druga część charakteryzuje się odpowiednim czasem trwania wyrażonym w μs (rys. 5).

Zastosowanie zaawansowanego sterowania współpracującego w sprzężeniu zwrotnym z indukcyjnym czujnikiem położenia zaworu pozwala na uzyskanie wysokiej powtarzalności kolejnych kroków zaworu. Dzięki temu możliwe staje się znaczne wyeliminowanie wielu czynników mogących wpływać na wychylenie zaworu, a tym samym wstępnie szacować strumień recyrkulowanych do silnika spalin.



Rys. 5. Zależność pomiędzy czasem trwania sygnału sterującego a otwarciem zaworu EGR

Przeprowadzone pomiary położenia zaworu EGR przy braku sił działających na grzybek zaworu (test 1) oraz podczas działania sił próbujących zmienić położenie zaworu wstępnie otwartego przez zadanie kroku wychylenia (test 2) pozwala stwierdzić dużą stabilność i powtarzalność badanego zaworu (rys. 5).

Zawór EGR (rys. 1) wyposażony jest w własny mikrokontroler i czujnik położenia, który w wewnętrznej pętli sprzężenia zwrotnego stale monitoruje aktualne uchylenie, co pozwala na uzyskanie powtarzalności wysunięcia zaworu EGR, przez kontrolę rozbieżności faktycznego otwarcia zaworu od zadanego. W przypadku ich wystąpienia np. spowodowanego zakłóceniami zewnętrznymi, mikrokontroler zmieniając natężenie prądu płynącego przez elektrozawór doprowadza do zmniejszenia tego uchybu. Dodatkowym elementem zastosowanym w układzie recyrkulacji spalin jest zamontowany czujnik do pomiaru stężenia tlenków azotu NO_x i tlenu O_2 w spalinach. Czujnik ten pracuje w zewnętrznej pętli sprzężenia układu sterowania

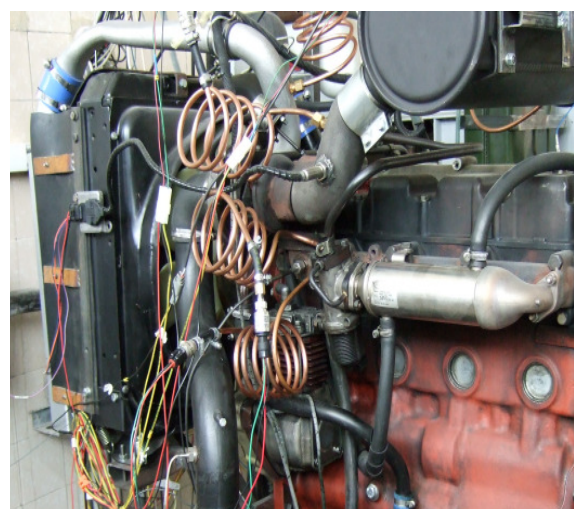
EGR, a dane pomiarowe przesyłane są do sterownika za pomocą magistrali CAN.

W sterowniku silnika (ECU) zaimplementowano dodatkowe algorytmy adaptacyjne zarządzające poprawną pracą systemu recyrkulacji spalin. Podstawą do sterowania zaworem EGR są dwie mapy zapisane w pamięci sterownika. Mapa tlenków azotu jest mapą ograniczającą maksymalną zawartość emitowanych substancji w zależności od prędkości obrotowej i obciążenia. Według podrzędnej mapy kroków otwarcia zaworu EGR sterownik dokonuje korekty otwarcia zaworu. Algorytm adaptacyjny został tak skonfigurowany, że w przypadku gdy, zapisane wartości zbyt różnią się od tych, które faktycznie w danym momencie emituje silnik do środowiska (mierzonych przez czujnik NO_x), zostaje wymuszona identyfikacja obiektu. Na podstawie przeprowadzonej identyfikacji zostają wygenerowane korekty map nastaw zaworu EGR. Jeżeli jednak obliczone nowe pozycje otwarcia zaworu odbiegają od kroków zaprogramowanych w zaworze, sterownik wprowadza zawór w stan programowania i zapisuje w nim nowe kroki otwarcia.

Tak skonfigurowany algorytm pozwala na dopasowanie się systemu recyrkulacji spalin do aktualnych warunków pracy silnika, zależnych od wielu czynników zewnętrznych. Dzięki algorytmowi śledzącemu „on-line” zawartość substancji szkodliwych w spalinach powinna zawierać się w założonych granicach w ciągu całej eksploatacji pojazdu.

3. Obiekt badawczy

Wstępne badania przeprowadzono z wykorzystaniem 4-cylindrowego silnika wysokoprężnego pojazdu nonroad wyposażonego w turbodoładowanie charakteryzującego się mocą maksymalną przekraczającą 75 kW.



Rys. 6 Obiekt badań wyposażony w dodatkowe czujniki

Standardowo silnik wyposażono w układ recyrkulacji spalin z chłodzeniem spalin i dwustanowym zaworem EGR (typu *ON-OFF*) wyposażonym w kanał obejściowy „by-pass”. W układzie tym wprowadzono prototypowy zawór EGR z wewnętrznym sprzężeniem zwrotnym i sterowaniem za pomocą mapy (lookup table) oraz algorytmem adaptacyjnym. Rysunki 6 i 7 przedstawiają obiekt badawczy wyposażony w dodatkowe czujniki m.in. czujnik NO_x oraz standardowy dwustanowy zawór EGR.



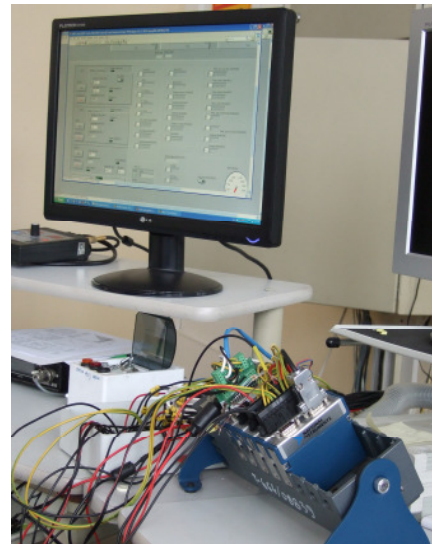
Rys. 7. Dwustanowy zawór EGR z kanałem obejściowym i chłodnicą recyrkulowanych spalin

Programowanie i sterowanie układem wykonawczym zaworu EGR przeprowadzono dzięki własnej aplikacji wykonanej w programie LabView umożliwiającej zmianę podstawowych ustawień wpływających na działanie zaworu w systemie recyrkulacji spalin (rys.8). Opisywana aplikacja pozwala między innymi w dowolny sposób programować jednostkowy krok otwarcia zaworu EGR (w trybie serwisowym), a także sterować otwarciem zaworu w zależności od założonych wskaźników emisji.



Rys. 8 Widok panelu sterowania programowania EGR

Układ sterująco-pomiarowy oparto o platformę Compact RIO z wykorzystaniem pakietu LabView (rys. 9, 10).



Rys. 9 System sterująco-pomiarowy oparty na platformie Compact Rio

Dzięki oknu pomiarowo-sterującemu można monitorować kilkanaście parametrów, dokonywać ich zapisu. Możliwe jest też sterowanie wybranymi elementami układu ograniczenia emisji spalin (rys. 10).



Rys. 10 Okno systemu pomiarowego wykonane w pakiecie LabView

4. Wskaźniki emisji spalin

Zastosowany zintegrowany czujnik NO_x/O₂ pozwala na pomiar ilości resztkowego tlenu w spalinach. Obniżenie koncentracji tlenu sprzyja powstawaniu cząstek stałych PM [5.], dlatego bardzo istotne jest sterownie stopniem recyrkulacji spalin EGR określonym jako

$$X_{EGR} = \frac{\dot{m}_{EGR}}{\dot{m}_{EGR} + \dot{m}_p} \cdot 100\% \quad (1),$$

Ma to na celu zachowanie korzystnego wskaźnika emisji NO_x.

$$E_{NO_x} = \frac{m_{NO_x}}{m_{NO_x, \max}} \quad (2)$$

oraz emisji cząstek stałych PM [4, 7]:

$$E_{PM} = \frac{m_{PM}}{m_{PM, \max}} \quad (3)$$

Przedstawienie emisji zarówno NO_x jak i PM w postaci względnej i ujęcie jej w sposób sumaryczny przedstawiono za pomocą wskaźnika emisji E_r :

$$E_r = E_{NO_x} \cdot E_{PM} \quad (4)$$

Takie względne przedstawienie emisji pozwala na porównanie sposobów sterowania recyrkulacji spalin określonego silnika. Wskaźnik emisji E pokazujący kompromis pomiędzy emisją NO_x i PM bazuje zaś na masowej bezwzględnej emisji poszczególnych składników spalin, który jest określany dla zadanych warunków pracy silnika:

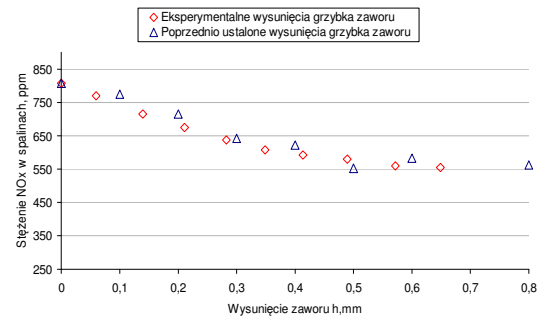
$$E = \frac{m_{NO_x}}{m_{PM}} \quad (5)$$

Poprawa wyżej przedstawionego wskaźnika emisji wymaga stosowania układów zasilania umożliwiających dokładne dawkowanie paliwa, wtrysk paliwa w kilku fazach oraz efektywnego układu recyrkulacji spalin.

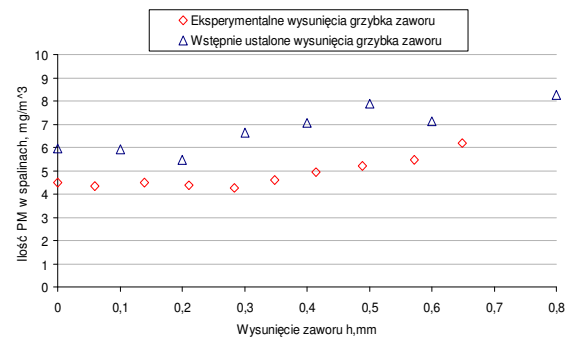
5. Wstępne wyniki badań

Badania przeprowadzono na stanowisku symulującym zadane stany obciążenia silnika.

Zbadano wpływ zwiększenia liczby kroków przypadających na założony zakres wysunięcia zaworu, na stężenie NO_x oraz ilość PM w spalinach. W tym celu dokonano pomiarów stężenia NO_x oraz ilości PM w spalinach dla zaworu przy różnych ustalonych wartościach wysunięć grzybka zaworowego. Zmieniały się one we wstępnie założonych krokach co $\Delta h=0,1\text{mm}$ i co - dobraną na potrzeby eksperymentu - wartość $\Delta h=0,078\text{mm}$ na krok. Badania przeprowadzono przy ustalonym obciążeniu silnika momentem równym 100Nm i dla ustalonych prędkości obrotowych $n=900\text{ obr/min}$, $n=1100\text{ obr/min}$ oraz $n=1400\text{ obr/min}$. Porównano emisję poszczególnych składników spalin (NO_x i PM) przy sterowaniu zaworem EGR z eksperymentalnie i pierwotnie ustalonymi wartościami wysunięć grzybka zaworu przy różnicy ciśnień pomiędzy króćcem dolotowym a wylotowym zaworu EGR $dp=10\text{ kPa}$ oraz prędkości obrotowej silnika $n=900\text{ obr/min}$ (rys. 11, 12).



Rys. 11 Porównanie stężeń NO_x dla zaworu z eksperymentalnie i pierwotnie ustalonymi wartościami wysunięć grzybka zaworu



Rys. 12 Porównanie emisji PM dla zaworu z eksperymentalnie i pierwotnie ustalonymi wartościami wysunięć grzybka zaworu .

Jak należało oczekiwać potwierdzono związek pomiędzy natężeniem NO_x i ilością PM w spalinach, a wysunięciem grzybka zaworu EGR. Wraz z wysunięciem grzybka zaworu, a co za tym idzie wraz ze wzrostem przepływu objętościowego spalin, stężenie NO_x w spalinach spada (rys. 11), a ilość cząstek stałych rośnie (rys. 12).

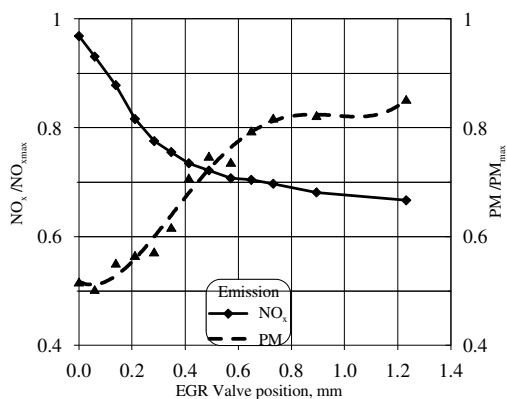
Zastosowane sterowanie zaworem EGR umożliwia praktycznie płynną zmianę wartości otwarcia zaworu EGR. Możliwe jest zatem takie dobranie wysunięcia grzybka zaworu, aby precyzyjnie regulować ilością spalin zawracanych do silnika a w rezultacie wpływać na stężenie NO_x oraz zawartość cząstek stałych w spalinach .

Mając jednak na uwadze, że wzrost objętości recyrkulowanych spalin powoduje wzrost emisji cząstek stałych (rys. 12) można tak sterować zaworem EGR, aby uzyskać pewien kompromis pomiędzy emisją obu rozpatrywanych składników spalin.

Zastosowanie czujnika NO_x pozwala zaś na monitorowanie uzyskanych efektów i ewentualne korygowanie ustawień zaworu. W celu oceny uzyskanych efektów określono wskaźniki emisji E (rozd. 4), które przedstawiają własności ekologiczne określonego silnika pracującego w zadanych warunkach obciążenia.

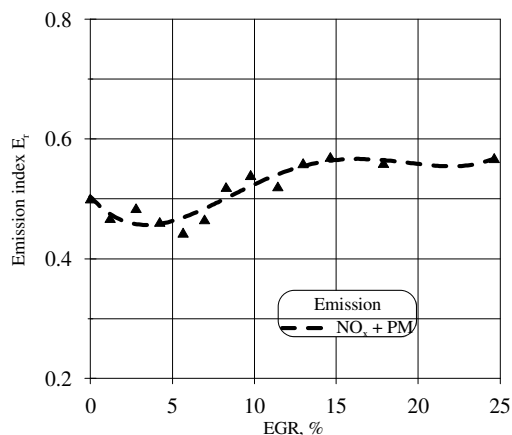
Interesująco przedstawia się sumaryczna emisja NO_x i PM przedstawiona w jednostkach względnych (rys. 13). Przedstawienie emisji substancji szkodliwych w taki sposób pozwala ocenić

kompromis pomiędzy ilością poszczególnych substancji w spalinach. Wartością wyjściową jest 1, co odpowiada wartości emisji traktowanej jako poziom odniesienia. Własności ekologiczne badanego silnika w zależności od stopnia otwarcia zaworu EGR (E_{NO_x} , E_{PM}) przedstawia rys. 13.



Rys. 13 Emisja szkodliwych substancji przy zmianie otwarcia zaworu EGR (1100 obr/min i 100Nm)

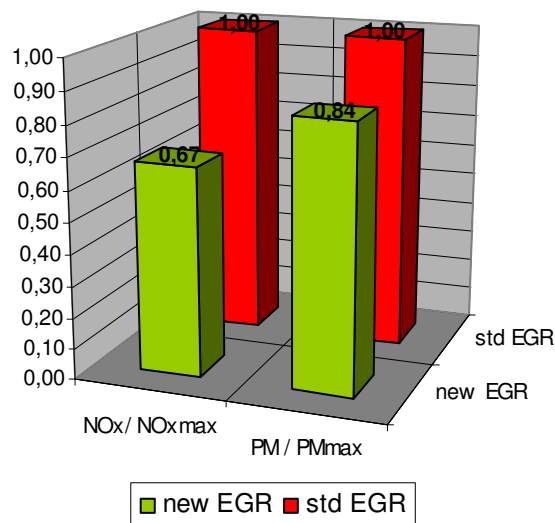
W przypadku zaawansowanego sterowania systemem recyrkulacji spalin, jak obrazuje rys. 14 można sterować układem recyrkulacji spalin przez regulację stopnia recyrkulacji spalin uzyskując zadaną wartość wskaźnika emisji sumarycznej E_r w danym punkcie pracy.



Rys. 14 Sumaryczna emisja NO_x i PM w zależności od stopnia recyrkulacji spalin EGR

Dla lepszego zobrazowania uzyskanej poprawy własności ekologicznych silnika pojazdu nonroad dzięki zastąpieniu standardowego układu recyrkulacji spalin układem wyposażonym w proporcjonalny zawór w układzie sterowania z podwójnym sprzężeniem zwrotnym uzyskane wskaźniki emisji spalin przedstawiono na wykresie słupkowym (rys. 15). Przedstawiono emisję w sposób względny, odnosząc aktualną emisję poszczególnych składników do emisji w tym samym punkcie pracy, ale przy zastosowaniu standardowego układu recyrkulacji spalin. Dzięki zaawansowanemu sterowaniu

otwarcie zaworu EGR uzyskano ok. 33% spadek emisji NO_x przy równoczesnej redukcji PM o ponad 10% (rys. 15)



Rys. 15 Porównanie skumulowanej emisji NO_x i PM przy standardowym i zaawansowanym sterowaniu (1100 obr/min, 100Nm)

6. Podsumowanie

Przeprowadzone badania wstępne w stanach stacjonarnych pokazują możliwość uzyskania kompromisu pomiędzy emisją NO_x i PM, poprzez zastosowanie zaawansowanego systemu recyrkulacji spalin ze sprzężeniem zwrotnym wykorzystującym sygnał czujnika NO_x . Zastosowanie tej silnikowej metody obniżenia emisji substancji szkodliwych na jeszcze jedną ważną zaletę, tj. dostosowania się układu zmieniających się warunków eksploatacyjnych silnika. W skrajnym przypadku system może również informować operatora pojazdu nonroad o niesprawności systemu recyrkulacji spalin. Jak wykazały badania wstępne, istnieje możliwość ograniczenia przede wszystkim tlenków azotu przy braku wzrostu emisji cząstek stałych. Dalsze możliwości ograniczenia emisji substancji szkodliwych w spalinach można osiągnąć głównie przez zastosowanie już metod pozasilnikowych.

Ponadto zastosowanie takiego systemu recyrkulacji pozwoli na wykorzystanie sygnał czujnika NO_x/O_2 do sterownia ECU silnika, co może korzystnie wpłynąć na uzyskane wskaźniki pracy silnika (zużycie paliwa, maksymalne wartości momentu i mocy).

Acknowledgements/ Podziękowania

Praca została wykonana w ramach projektu sfinansowanego z funduszu Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w latach 2009 - 2011 jako projekt badawczy o numerze N N502447436

Nomenclature/Skróty i oznaczenia

EGR Exhaust Gas Recirculation /recyrkulacja spalin
PM Particulate Mater / cząski stałe
NO_x Nitrium Oxide/ tlenki azotu

MIAC Model Identification Adaptive Control/ Identyfikacyjny model sterowania adaptacyjnego
MIMO Multi Input Multi Output/ wiele wejść, wiele wyjść

Bibliography/Literatura

- [1] Baumgard K., Cooke S.: Exhaust Aftertreatment and Low Pressure LOP EGR applied to off-highway engine, Jon Deere Power Systems 2005
- [2] Dieselnet- Emission Test Cycle : www.dieselnet/standards/cycles
- [3] Gromadko J., Hong V., Miler P.: Applications of NRTC Cycle to determine a different fuel consumption and harmful emissions caused by changes of engines technical conditions, Maintenance and Reliability 4/2008, s.63-65
- [4] Kopiński D., Jacskon C.: Nonroad Diesel PM Control, US EPA, Washington 1997. s. 1-20
- [5] Lejda K. Elimination of NO_x Emission In Diesel Engine by EGR Metod, Western Scientific Centra of Ukrainian Transport Academy, Logos 2000
- [6] Merkisz J: Ekologiczne problemy silników spalinowych, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1998
- [7] Tonetti M.: EGR Control System, United States Patent Application Publication US 2009/0205617 A1, 2009, s. 1-8
- [8] VDMA: Exhaust Emission Legislation Diesel and Gas engines, 2008
- [9] Yokomura H., Kohketsu S., K. Mori: EGR System in a Turbocharged and Intercooled Heavy-Duty Diesel Engine – Expansion of EGR Area with Venturi EGR System Technical Rewiev 2003.
- [10] Jung S., Ishida M., Yamamoto S., Ueki H., Sakaguchi D. : Enhancement of NO_x-PM trade off I a diesel engine adopting bio-ethanol and EGR, International Journal of Automotive Technology, Vol. 11, No. 5, pp. 611–616 (2010)

Andrzej Bieniek, PhD, MEng - doctor in the Faculty of Mechanical Engineering at Opole University of Technology.

Dr. inż. Andrzej Bieniek, adiunkt na Wydziale Mechanicznym Politechniki Opolskiej.



Mariusz Graba, MEng -PhD student in the Faculty of Electrical Engineering Automatic Control and Informatics at Opole University of Technology.
Mgr inż. Mariusz Graba – doktorant na Wydziale Elektrotechniki Informatyki i Automatyki Politechniki Opolskiej



Jarosław Mamala, PhD, MEng - doctor in the Faculty of Mechanical Engineering at Opole University of Technology

Dr. inż. Jarosław Mamala – adiunkt na Wydziale Mechanicznym Politechniki Opolskiej.



Agata Lenc-Brol, MEng -PhD student in the Faculty of Mechanical Engineering at Opole University of Technology.
Mgr inż. Agata Lenc-Brol – doktorantka na Wydziale Mechanicznym Politechniki Opolskiej

