

WEWNĄTRZSILNIKOWE OGRANICZENIE EMISJI SUBSTANCJI SZKODLIWYCH W SILNIKU WYPOSAŻONYM W UKŁAD EGR POJAZDU POZADROGOWEGO

Andrzej Bieniek

Katedra Pojazdów Drogowych i Rolniczych, Politechnika Opolska

Streszczenie. W publikacji zawarto informacje dotyczące możliwości ograniczenia emisji szkodliwych składników spalin dzięki zastosowaniu zaawansowanego systemu recyrkulacji spalin w silniku ciągnika rolniczego, wyposażonego w innowacyjny układ zasilania, bazujący na klasycznych rozwiązaniach wysokociśnieniowej pompy wtryskowej. Publikacja zawiera również koncepcję zaawansowanego systemu recyrkulacji spalin. Zastosowanie nowego typu zaworu EGR regulującego ilość zawracanych do silnika spalin, współdziałającego ze zintegrowanym czujnikiem O_2/NO_x umieszczonym w kolektorze wylotowym, pozwala efektywnie wykorzystać konfigurację konkretnego silnika z układem oczyszczania spalin. W publikacji przedstawiono wyniki stanowiskowych badań emisji NO_x oraz PM silnika wyposażonego w opisywany system recyrkulacji spalin EGR, pokazując możliwości redukcji, w szczególności NO_x , w porównaniu do standardowych układów recyrkulacji spalin. Zastosowanie proponowanego rozwiązania pozwala na znaczne ograniczenie emisji tego składnika.

Słowa kluczowe: ograniczenie emisji, recyrkulacja spalin, pojazdy pozadrogowe

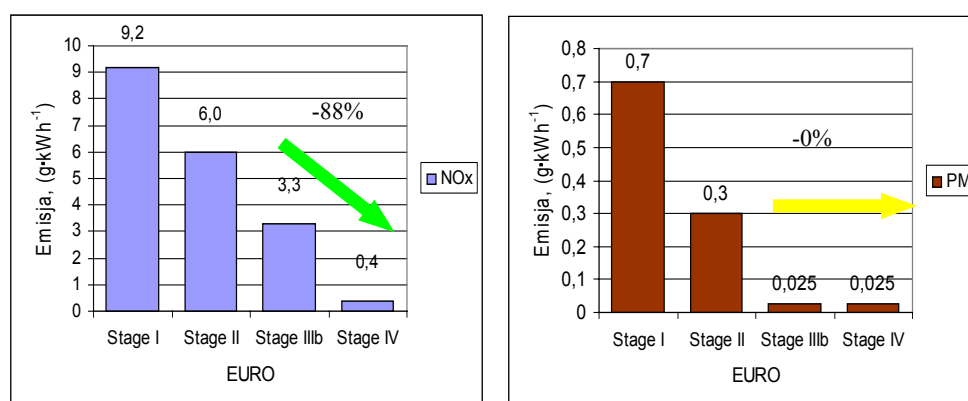
Wprowadzenie

Potrzeba ograniczenia globalnej emisji substancji szkodliwych spowodowała, że wprowadza się coraz bardziej rygorystyczne normy emisji spalin. W ostatnich latach, w przypadku pojazdów poruszających się poza drogami utwardzonymi, nastąpiło znaczne zaostrzenie dopuszczalnych poziomów emisji substancji zawartych w spalinach. Kolejne normy TIER/EURO Stage koncentrują się głównie na ograniczeniu emisji tlenków azotu (NO_x) oraz cząstek stałych (PM). W związku z tym poszukuje się metod i możliwości ograniczenia głównie tych wspomnianych składników spalin. Obecnie wykorzystuje się silnikowe i pozasilnikowe metody ograniczenia emisji. Zastosowanie w tym kontekście metod silnikowych bazuje na optymalizacji procesu spalania pod kątem poprawy własności

ekologicznych. W rezultacie pozwala to na uzyskanie znacznej redukcji szkodliwych związków spalin, a równocześnie jest bardzo korzystne pod względem ekonomicznym (Baumgart i in., 2005; Lejda, 2000; Merkisz, 1997; Tonetti, 2009; Jung i in., 2010), ze względu na możliwość ograniczenia systemów redukcji emisji bazujących na metodach pozasilnikowych.

Wymogi ograniczenia emisji spalin pojazdów pozadrogowych

W przypadku popularnej grupy pojazdów pozadrogowych, zawierającej między innymi ciągniki rolnicze wyposażone w silniki o mocy z zakresu 75–130 kW, norma EURO Stage IIIb obowiązująca od 2012 roku ustala ograniczenie emisji jednostkowej PM o prawie 92% oraz o ponad 10% emisję NO_x w stosunku do wcześniejszej normy EURO Stage IIIa wprowadzonej w roku 2007. Ograniczenie emisji toksyn w spalinach dla silnika pojazdu pozadrogowego, a w szczególności redukcja emisji NO_x i PM, jest bardzo istotne z punktu widzenia spełnienia przyszłościowych norm emisji spalin EURO Stage (Dieselnet, 2008; Gromadko i in., 2008; Kopiński i in., 1997). Należy odnotować, że kolejny poziom normy EURO Stage IV, który dla omawianej grupy pojazdów zacznie obowiązywać w 2014 r., zakłada dalsze znaczne obniżenie dopuszczalnej emisji NO_x przy pozostawieniu limitów emisji PM na poziomie obecnie obowiązującym (rys. 1).



Rysunek 1. Dopuszczalna emisja jednostkowa NO_x i PM wg normy EURO
Figure 1. Admissible unit emission NO_x and PM according to EURO standard

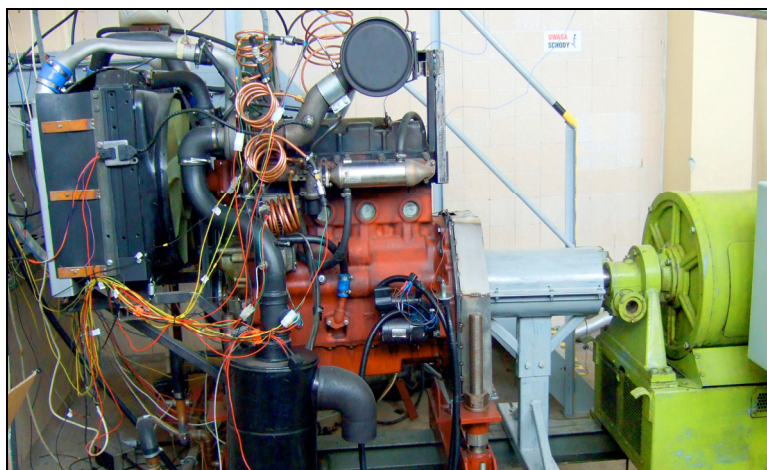
Rozpatrując problem redukcji emisji w tym aspekcie, należałoby zintensyfikować prace nad poprawą własności emisyjnych silników, a w szczególności ograniczenia emisji NO_x . Zakładając, że wprowadzenie obecnie obowiązującej normy wymusiło na producentach zastosowanie bardzo zaawansowanych metod ograniczenia PM i wykorzystanie również metod pozasilnikowych, takich jak np. filtr cząstek stałych, to obecnie należałoby doskonalić wszelkie metody ograniczenia emisji NO_x , nie wyłączając metod silnikowych. Jak pokazują doświadczenia niektórych producentów, można osiągnąć bardzo niskie wartości emisji NO_x , ograniczając się jedynie do metod pierwotnego ograniczenia emisji (metod wewnątrzsilnikowych). W przypadku samochodów ciężarowych doświadczenia

producentów pokazują, że jest możliwe osiągnięcie normy EURO 5 bez stosowania pozasilnikowych metod ograniczenia NO_x (Scania). Wymaga to jednak znacznego zaawansowania i optymalizacji konstrukcji układu EGR, ale również zastosowania odpowiednich algorytmów sterowania recyrkulacją spalin oraz zaawansowanego układu zasilania paliwem, z możliwością podziału dawki na fazy (Bieniek i in., 2012a; 2012b; 2011a; 2011b; Graba i in., 2011). Jak się wydaje, spełnienie obecnych i przyszłych dopuszczalnych limitów zawartych w homologacyjnych normach emisji spalin wymaga stosowania przynajmniej jednej z pozasilnikowych metod ograniczenia toksycznych składników spalin (najczęściej nieodzowne staje się zastosowanie filtra cząstek stałych). Doskonalenie układów EGR pozwoli w przyszłości także na ograniczenie kosztów eksploatacyjnych układów selektywnej redukcji emisji SCR, jeżeli ich zastosowanie zostanie wymuszone dalszymi zaostreniami przyszłościowych norm.

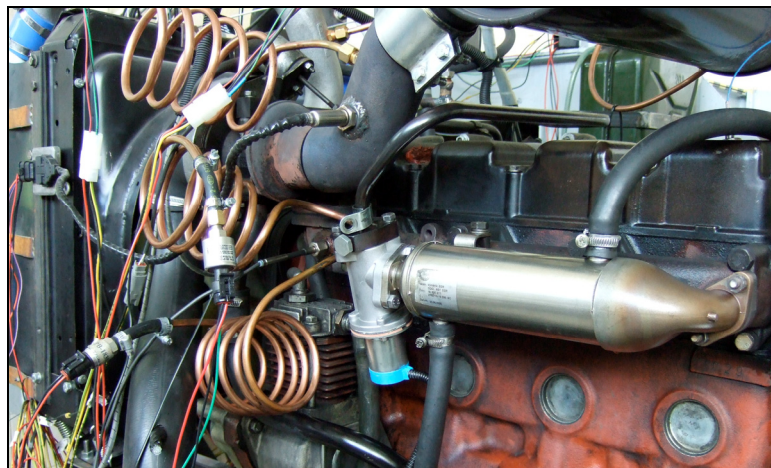
Badania stanowiskowe silnika ciągnika rolniczego

Obiekt badawczy

W celu zbadania możliwości ograniczenia emisji wybranych składników spalin zamontowano na stanowisku badawczym silnik Z1505 stosowany w ciągnikach rolniczych (rys. 2). Badana jednostka napędowa charakteryzuje się mocą maksymalną wynoszącą 92 kW przy 2200 obr·min.⁻¹ Silnik jest zasilany olejem napędowym dzięki prototypowej zmechatronizowanej sekcyjnej pompie wtryskowej (Bieniek i in., 2012b) oraz wyposażony w turbosprężarkę z zaworem upustowym i chłodnicę powietrza dolotowego. Dodatkowo zastosowano zaawansowany układ recyrkulacji spalin, składający się z wymiennika ciepła typu spaliny–ciecz, proporcjonalnego zaworu EGR oraz układu sprzężenia zwrotnego, zawierającego zintegrowany czujnik NO_x/O₂ (Drivven, 2010).



Rysunek 2. Silnik ciągnika rolniczego Z1505 zamontowany na stanowisku badawczym
Figure 2. An engine of the farm tractor installed on the research stand



Rysunek 3. Zaawansowany układ EGR z programowalnym, proporcjonalnym zaworem EGR, chłodzeniem spalin oraz zintegrowanym czujnikiem NO_x/O₂

Figure 3. The advanced EGR system with a programmable proportional EGR valve, fumes cooling and an integrated NO_x/O₂ sensor

Metodyka badawcza

Badania przeprowadzono w warunkach ustalonego obciążenia i prędkości obrotowej silnika. Wyniki badań uzyskano dla szerokiego zakresu zarówno obciążenia (0–190 Nm), jak i prędkości obrotowej (800–2200 obr·min⁻¹). Pomiar emisji spalin odbywał się z zastosowaniem zintegrowanego czujnika NO_x/O₂ umieszczonego w kolektorze wylotowym silnika oraz urządzenia do pomiaru stężenia cząstek stałych w spalinach firmy MAHA-MPM4. Stężenia składników spalin, łącznie z pozostałymi parametrami pracy silnika (temperatury, ciśnienia, przepływu itp.) były rejestrowane z zastosowaniem aplikacji pomiarowo-sterującej wykonanej w programie LabView (rys. 4).

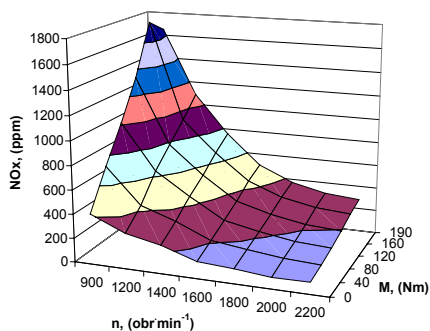
Wyniki i analiza badań emisji NO_x i PM

Wstępne badania stężenia NO_x i PM przeprowadzono na stanowisku badawczym dla silnika, który pracował bez układu EGR, tj. systemu pierwotnego ograniczenia emisji NO_x. Zarejestrowano mapy stężeń NO_x i PM (rys. 5 i 6).

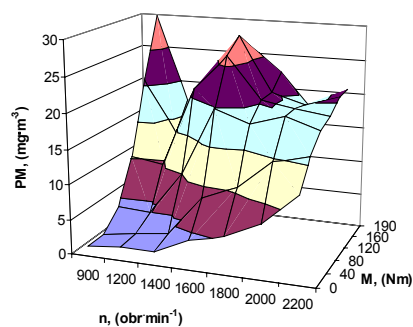
Zarejestrowane maksymalne wartości stężeń wynoszą odpowiednio ok. 1800 ppm dla NO_x oraz ok. 30 mg·m⁻³ dla PM, przy czym należy zwrócić uwagę na charakterystyczny kształt mapy dla NO_x, pokazującej rosnące stężenia wraz ze spadkiem prędkości obrotowej i równoczesnym wzrostem obciążenia silnika (rys. 5).



Rysunek 4. Pulpit sterujący z urządzeniem do pomiaru cząstek stałych firmy MAHA-MPM4
Figure 4. A controlling console with a device for measuring solid particles produced by MAHA-MPM4 company



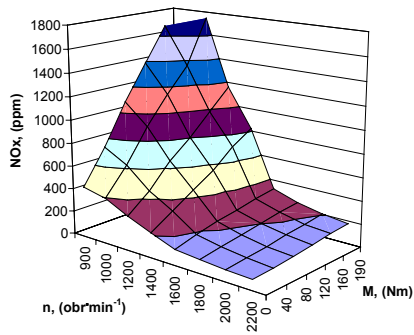
Rysunek 5. Mapa emisji NO_x dla silnika nie posiadającego układu recyrkulacji spalin
Figure 5. A map of NO_x emission for an engine that does not have a fumes recirculation system



Rysunek 6. Mapa emisji PM dla silnika nie posiadającego układu recyrkulacji spalin
Figure 6. A map of PM emission for an engine that does not have a fumes recirculation system

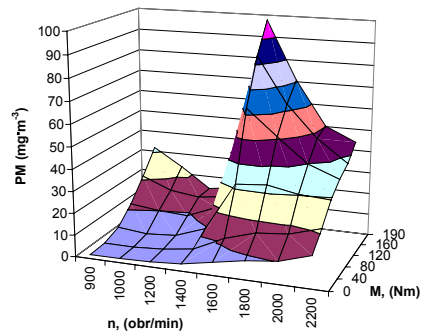
Dalsze badania przeprowadzono na stanowisku badawczym dla silnika z zamontowanym układem EGR, składającym się ze standardowego zaworu EGR typu ON/OFF z obwodem obejściowym typu bypass, sterowanego wg algorytmu umożliwiającego uzyskanie normy EURO IIIa i wyposażonego w układ chłodzenia

zawracanych spalin. Wyniki przeprowadzonych badań przedstawiono w postaci map stężenia w spalinach NO_x oraz PM (rys. 7, 8).



Rysunek 7. Mapa emisji NO_x dla standardowego układu EGR (zawór typu ON/OFF zamontowany w układzie obejściowym typu bypass oraz z fabrycznym sterowaniem)

Figure 7. A map of NO_x emission for a standard EGR system (an ON/OFF valve mounted in the bypass system and with a fabric control)



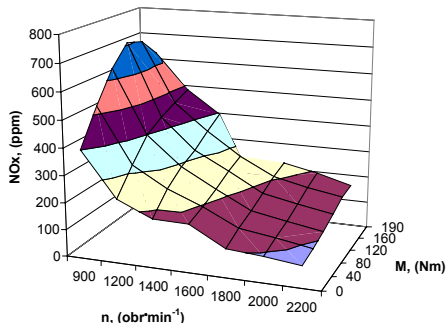
Rysunek 8. Mapa emisji PM dla standardowego układu EGR (zawór typu ON/OFF zamontowany w układzie obejściowym typu bypass oraz z fabrycznym sterowaniem)

Figure 8. A map of NO_x emission for a standard EGR system (an ON/OFF valve mounted in the bypass system and with a fabric control)

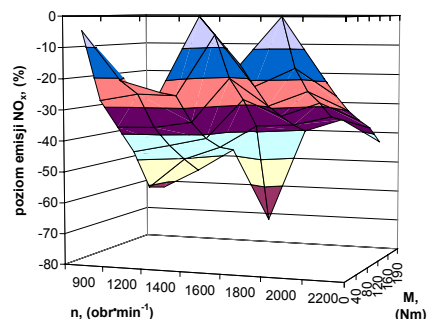
Analizując przedstawione mapy stężenia NO_x oraz PM, można zauważyć ograniczenie stężenia NO_x przy prędkościach obrotowych powyżej $1400 \text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$, przy czym widoczne jest wyraźne zagięcie mapy przy tej prędkości obrotowej (rys. 7). Z drugiej strony, stężenie PM w zakresie wyższych prędkości dochodzi do wartości wynoszących $100 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ (rys. 8).

Następnie przeprowadzono badania silnika wyposażonego w zmodyfikowany układ EGR, wyposażony w proporcjonalny zawór EGR, nie posiadający kanału obejściowego typu bypass i sterowanego zewnętrznym algorytmem z wykorzystaniem pakietu LabView (rys. 9, 10)

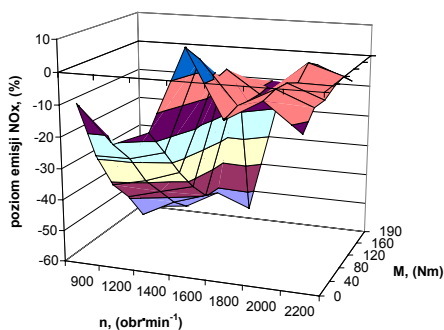
Analizując przedstawioną mapę stężenia NO_x dla zmodyfikowanego układu EGR i porównując do map dla silnika bez układu EGR oraz ze standardowym układem EGR (rys. 5, 7, 9), można zauważyć znaczną redukcję NO_x w spalinach w całym zakresie prędkości obrotowych i obciążenia silnika. Możliwości redukcji NO_x w ujęciu względnym, w porównaniu do silnika pracującego bez EGR oraz dla silnika wyposażonego w standardowy układ EGR, przedstawiono na rys. 10 i 11.



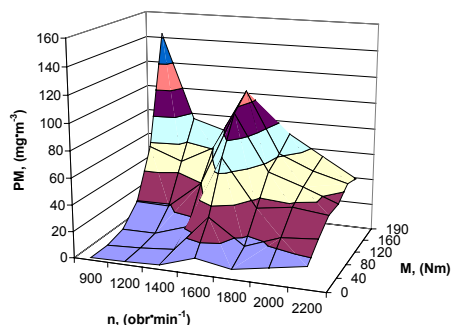
Rysunek 9 Mapa emisji NO_x dla algorytmu nastawionego na maksymalne ograniczenie NO_x w spalinach
 Figure 9. A map of NO_x emission for an algorithm set on the maximum reduction of NO_x in fumes



Rysunek 10. Możliwości ograniczenia emisji NO_x przy zastosowaniu zaawansowanego układu EGR (w porównaniu do silnika bez układu recyrkulacji spalin)
 Figure 10. Possibilities of reduction of NO_x emission at the use of the advanced EGR system (in comparison to the engine without the fumes recirculation system)



Rysunek 11. Możliwości ograniczenia emisji NO_x przy zastosowaniu zaawansowanego układu EGR (w porównaniu do standardowego układu EGR)
 Figure 11. Possibilities of reduction of NO_x emission at the use of the advanced EGR system (in comparison to the engine without the fumes recirculation system)

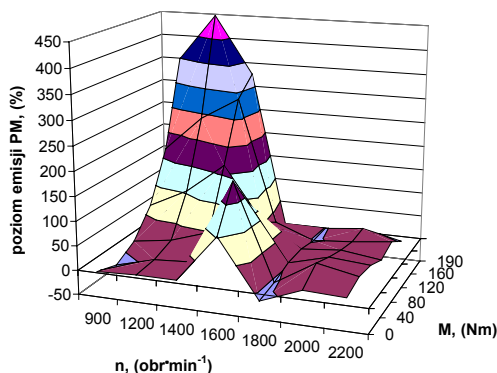


Rysunek 12. Mapa emisji PM dla dla algorytmu nastawionego na maksymalne ograniczenie NO_x w spalinach
 Figure 12. A map of PM emission for an algorithm set on the maximum reduction of NO_x in fumes

Analizując przebiegi pokazujące w sposób względny poziomy stężenie rozumiane jako różnica pomiędzy stężeniem odniesienia (silnik bez EGR lub silnik ze standardowym układem EGR), można stwierdzić jednoznacznie, że proponowane rozwiązanie układu EGR, wspomaganego algorytmem sterowania nakierowanym na maksymalne ograniczenie NO_x , pozwala na znaczną redukcję jego stężenia w spalinach dochodzącą szczytowo do 70% w porównaniu do silnika pracującego bez układu zewnętrznej recyrkulacji spalin i przekraczającą maksymalnie 50% dla układu ze standardowym układem EGR.

Istotną sprawą jest jednakże równoczesna emisja cząstek stałych (PM). Jak pokazują wyniki badań, w przypadku stosowania recyrkulacji spalin i sterowania zaworem EGR nakierowanym na maksymalną redukcję emisji NO_x , rośnie stężenie PM w spalinach do znacznych wartości, dochodząc maksymalnie do ok. $150 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ (rys. 12).

Porównując poziom stężeń dla układu standardowego oraz zmodyfikowanego (rys. 13), można zauważyć znaczny wzrost emisji PM w zakresie niskich prędkości obrotowych i dużych obciążenia silnika. W pozostałych obszarach pracy silnika wzrost emisji PM jest minimalny i w znacznej mierze nie przekracza 5%. Daje się również zauważyć niewielkie obszary kilkuprocentowego spadku emisji PM (kolor jasnoniebieski), które jednak nie mają większego znaczenia przy całościowej ocenie możliwości ograniczenia emisji przy zastosowaniu układu EGR.

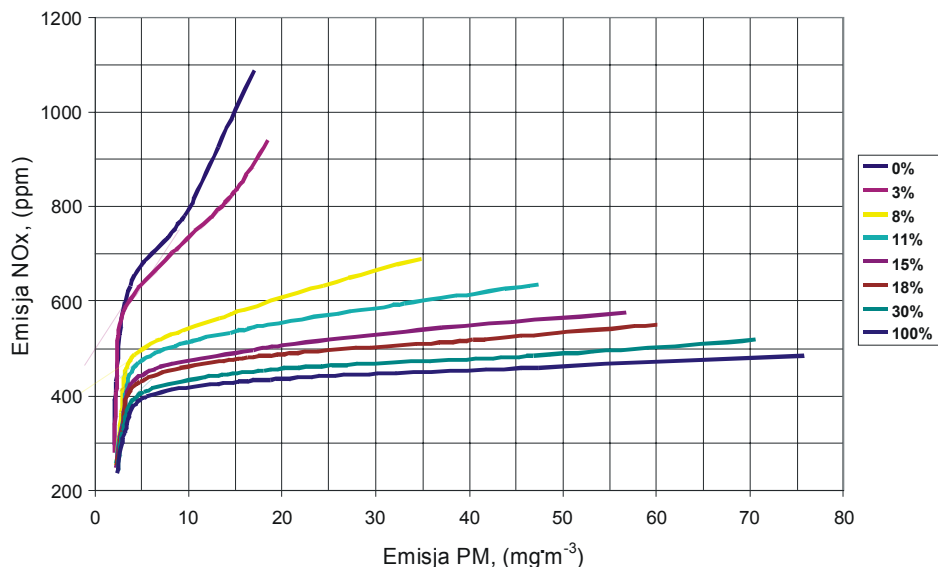


Rysunek 13. Poziom emisji PM w spalinach przy zastosowaniu zaawansowanego układu EGR z zaworem proporcjonalnym (w porównaniu do standardowego układu EGR)

Figure 13. Level of PM emission in fumes at the use of the advanced EGR system with a proportional valve (in comparison to the standard EGR system)

Zastosowanie metod pozasilnikowych, takich jak np. filtr cząstek stałych, który staje się nieodzowny w przypadku najnowszych norm emisji spalin, pozwala na ponad 90% redukcję emisji PM, dlatego też w algorytmach sterowania układem EGR należałoby uwzględnić nie tylko możliwości redukcji NO_x , ale również zależności pomiędzy emisją NO_x i PM.

Przykładowe zależności pomiędzy emisją NO_x a PM dla silnika pracującego z prędkością obrotową $1200 \text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$, przy uwzględnieniu sterowania stopniem otwarcia zaworu EGR z zakresu 0–100% pokazują, że zależą one od tego ustawienia.



Rysunek 14. Zależność pomiędzy stężeniem PM a stężeniem NO_x w spalinach przy prędkości obrotowej 1200 obr·min⁻¹, z uwzględnieniem różnych stopni otwarcia zaworu EGR

Figure 14. Dependence between the PM concentration and NO_x concentration in fumes at the rotational speed 1200 rot·min⁻¹ including various degrees of opening the EGR valve

Podsumowanie

Jak pokazały przeprowadzone badania, stosując zmodyfikowany układ EGR można znacznie ograniczyć emisję NO_x, przy czym maksymalne możliwości redukcji dochodzą do kilkudziesięciu procent. Należy jednak zwrócić uwagę na to, że z redukcją emisji NO_x związany jest wzrost emisji PM. Mimo że wymagania obecnych norm powodują, że praktycznie nieodzwonne staje się stosowanie pozasilnikowych metod ograniczenia emisji cząstek stałych, to uwzględnienie zależności pomiędzy emisją NO_x a PM w algorytmie sterującym układem EGR jest wskazane. Może to wpłynąć na uzyskanie korzystnych wskaźników całkowitej emisji NO_x + PM dzięki elastycznemu sterowaniu stopniem otwarcia zaworu EGR, a tym samym stopniem recyrkulacji spalin. Taki scenariusz jest możliwy do zrealizowania dzięki wykorzystaniu proporcjonalnego zaworu EGR oraz sprzężenia zwrotnego, wykorzystującego sygnał ze zintegrowanego czujnika NO_x/O₂.

Literatura

- Baumgard, K.; Cooke, S. (2005). *Exhaust Aftertreatment and Low Pressure LOP EGR applied to off-highway engine*, John Deere Power Systems Symposium, 1-20.
- Bieniek, A.; Mamala, J.; Graba, M. (2012a). Możliwości wstępnego ograniczenia emisji NO_x i PM silnika wysokoprężnego w aspekcie przyszłościowych norm emisji pojazdów pozadrogowych. *Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów*, 1(87), 75-86.
- Bieniek, A.; Mamala, J.; Augustynowicz, A.; Graba, M.; Brol, S.; Lenc-Brol, A.; Lechowicz, A. (2012b). *Zasilanie silników wysokoprężnych pojazdów pozadrogowych*. Opole, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, ISBN 978-83-62736-60-7.
- Bieniek, A.; Graba, M.; Lechowicz, A. (2011a). Adaptive control of exhaust gas recirculation at nonroad vehicle diesel engine. *Journal of KONES, Powertrain and Transport*, Vol. 18, No. 4, 11-18.
- Bieniek, A.; Mamala, J.; Graba, M.; Lechowicz, A. (2011b). *Control of advanced EGR system at nonroad diesel engine*, 16th Asia Pacific Automotive Engineering Conference - APAC Chennai India, SAE India M2010066, 1-6.
- Graba, M.; Bieniek, A.; Mamala, J.; Lechowicz, A. (2011). Sterowanie adaptacyjne zaworu recyrkulacji spalin w silniku o zapłonie samoczynnym w aspekcie obniżenia emisji substancji szkodliwych. *Inżynieria Rolnicza*, 5(130), 73-80.
- Dieselnet- Emission Test Cycle (2008). Pozyskano z: <http://www.dieselnet/standards/cycles>
- Gromadko, J.; Hong, V.; Miler, P. (2008). Applications of NRTC Cycle to determine a different fuel consumption and harmful emissions caused by changes of engines technical conditions, *Maintenance and Reliability*, 4, 63-65.
- Kopiński, D.; Jackson, C. (1997). *Nonroad Diesel PM Control*, US EPA, Washington. 1-20.
- Lejda, K. (2000). Elimination of NO_x Emission In Diesel Engine by EGR Metod, Western Scientific Centra of Ukrainian Transport Academy, *Logos*, 1-8.
- Merkisz, J. (1997). *Emisja cząstek stałych przez silniki spalinowe o zapłonie samoczynnym*, Poznań, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, ISBN 83-7143-162-7.
- Tonetti, M. (2009). *EGR Control System*, United States Patent Application Publication US 2009/0205617 A1, 1-8
- Jung, S.; Ishida, M.; Yamamoto, S.; Ueki, H.; Sakaguchi, D. (2010). Enhancement of NO_x-PM trade off a diesel engine adopting bio-ethanol and EGR, *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 11, No. 5, 611-616.
- DRIVVEN (2010). Information and Service of NO_x/O₂ sensor kit, 1-14.

INTRAENGINE REDUCTION OF NOXIOUS SUBSTANCES EMISSION IN THE ENGINE OF THE OFF-HIGHWAY VEHICLE EQUIPPED WITH AN EGR SYSTEM

Abstract. The paper includes information concerning the possibility of emission of noxious components of fumes due to the use of the advanced system of fumes recirculation in the farm tractor engine equipped with an innovative supply system basing on classical solutions of a high-pressure injection pump. Moreover, the paper includes the concept of the advanced fumes recirculation system. The use of a new type of EGR valve that regulates the amount of fumes which are returned to an engine, cooperating with an integrated sensor O_2/NO_x placed in the outlet collector allows effective use of a configuration of the particular engine with a fumes cleaning system. The paper presents the results of the stand research of NO_x emission and PM of an engine equipped with the described fumes recirculation system EGR showing the possibilities of reduction, especially of NO_x in comparison to the standard fumes recirculation system. The use of the suggested solution allows considerable reduction of emission of this component.

Key words: reduction of emission, recirculation of fumes, off-highway vehicles

Adres do korespondencji:

Andrzej Bieniek, e-mail: a.bieniek@po.opole.pl
Katedra Pojazdów Drogowych i Rolniczych,
Politechnika Opolska
ul. Mikołajczyka 5
45-271 Opole



Dofinansowanie ze środków Wojewódzkiego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej w Opolu