

STEROWANIE ADAPTACYJNE SYSTEMEM RECYRKULACJI SPALIN W ASPEKCIE OBNIŻENIA EMISJI SUBSTANCJI SZKODLIWYCH DLA KLASYCZNEGO SILNIKA ZS*

Mariusz Graba, Andrzej Bieniek, Jarosław Mamala, Andrzej Lechowicz
Katedra Pojazdów Drogowych i Rolniczych, Politechnika Opolska

Streszczenie: W pracy przedstawiono koncepcję modernizacji układu recyrkulacji spalin silnika ciągnika rolniczego firmy Zetor Forterra 125. Jest to pojazd typu nonroad, stanowiący obecnie aktualną ofertę handlową, a spełniający obowiązującą normę emisji spalin według dyrektywy Unii Europejskiej EU -97/68/EC, bardzo rozpowszechnionego wśród ciągników i maszyn rolniczych użytkowanych w Europie środkowej i wschodniej. Celem modernizacji jest opracowanie nowego systemu recyrkulacji spalin pozwalającego na ograniczenie emisji substancji szkodliwych w spalinach silnika emitowanych do środowiska. Ponadto w artykule przedstawiono wyniki własnych badań stanowiskowych dla silnika wyposażonego w nowy programowalny zawór recyrkulacji spalin.

Słowa kluczowe: recyrkulacja spalin, zawór EGR, emisja substancji szkodliwych, pojazdy rolnicze

Wprowadzenie

Powietrze dostarczane do procesu spalania w silniku spalinowym jest mieszaniną głównie dwóch podstawowych składników: azotu N_2 i tlenu O_2 . Gazy te w normalnych warunkach otoczenia nie reagują ze sobą, ale w przypadku warunków panujących w komorze spalania silnika dochodzi do reakcji chemicznej pomiędzy nimi i powstania szkodliwych dla zdrowia tlenków azotu NO_x . Kolejną niepożądaną substancją znajdującą się w spalinach silnika spalinowego głównie o zapłonie samoczynnym, będącego efektem spalania, są cząstki stałe. Czynnikiem stymulującym powstawanie szkodliwych związków w spalinach są warunki panujące w komorze spalania tj. wysoka temperatura, ciśnienie, nadmiar ilości tlenu oraz niecałkowite i niepełne spalanie dostarczonego paliwa. W wielu ośrodkach badawczych na świecie prowadzone są badania nad ograniczeniem emisji substancji szkodliwych w spalinach. Głównie prace te koncentrują się według metod określonym mianem silnikowych i pozasilnikowych. Jedną z powszechnie stosowanych silnikowych metod ograniczenia emisji głównie tlenków azotu jest recyrkulacja spalin. Recyrkulacja spalin

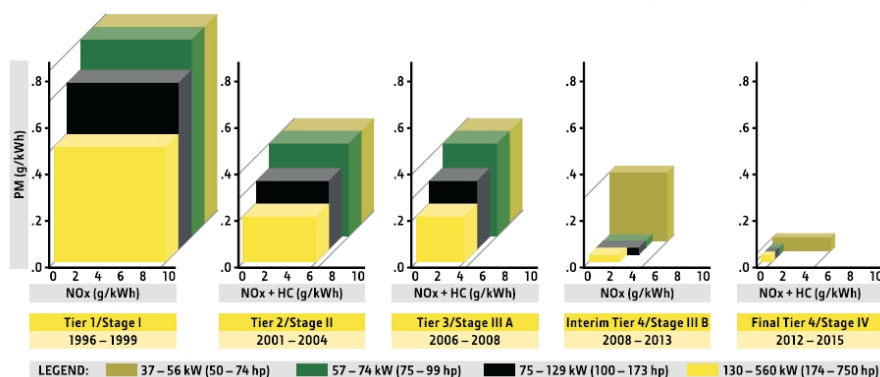
* *Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2009-2011 jako projekt badawczy Nr N N502 447436.*

określana jako zamierzone wypełnienie części objętości komory spalania spalinami pochodzącymi z wcześniejszego cyklu spalania wywiera znaczny wpływ na przebieg procesu spalania. W wyniku tego procesu doprowadzamy do obniżenia emisji tlenków azotu przez obniżenie maksymalnej temperatury spalania i ograniczenie maksymalnej ilości tlenu w ładunku dostarczanym do cylindra. Najprostszą i bardzo efektywną metodą jest wprowadzenie powrotem do cylindra części spalin [Lejda 2000].

Z tego względu bardzo istotne jest takie sterowanie strumieniem recyrkulowanych spalin, aby uzyskać pożądane efekty w postaci obniżenia emisji tlenków azotu. Z drugiej strony istotne jest zwrócenie uwagi, że zbyt wysoki udział spalin w całym ładunku dostarczanym do cylindra może powodować spadek mocy oraz znaczny wzrost m.in. emisji cząstek stałych, a przez to uzyskanie niekorzystnych wartości innych wskaźników pracy silnika [Jung, Ishida, Yamamoto, Ueki, Sakaguchi 2010; Yokomura, Kohketsu, Mori 2003]

Poziom dopuszczalnej emisji substancji szkodliwych dla pojazdów pozadrogowych (Non-Road) określone zostały w amerykańskiej normie TIER oraz w europejskim STAGE. Jak można zauważyć na rysunku 1 na przestrzeni lat wymagania co do redukcji emisji substancji szkodliwych przez silniki spalinowe ciągników oraz maszyn budowlanych są coraz to bardziej rygorystyczne.

Normy EPA i EU dla silników o mocy 37 kW - 560 kW (50 - 750 KM)

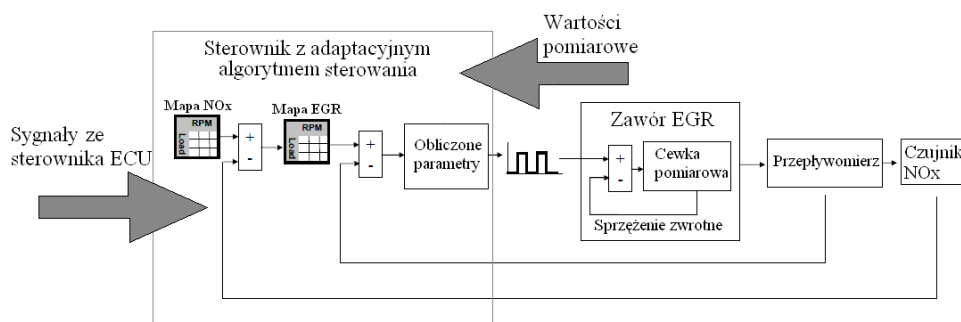


Rys. 1. Normy emisji spalin [Techbud 2011]
 Fig. 1. Exhaust gas emission norms [Techbud 2011]

W tym celu na Politechnice Opolskiej podjęto próbę modernizacji układu recyrkulacji spalin silnika spalinowego ciągnika rolniczego. W badanym silniku proces recyrkulacji spalin przebiega w oparciu o proste proporcjonalne sterowania dwustanowe, które przy określonej prędkości obrotowej silnika powoduje zmianę jego nastawienia. W tym celu układ zasilania silnika został wyposażony w dwa dodatkowe czujniki, znajdujące się w rzędowej pompie wtryskowej tj. czujnik położenia listwy zębatej oraz czujnik prędkości obrotowej. Takie sterowanie zaworem recyrkulacji w trakcie eksploatacji silnika spalinowego, gdzie mamy do czynienia ze zmianą jego parametrów na skutek zmiennych obciążeń, stanów awaryjnych, jakości paliwa, rodzaju paliwa czy zużycia materiałów, jest

w obecnym stanie techniki nie efektywne. Dlatego by uzyskać niezmienny przez cały okres eksploatacji jednostki poziom emitowanych substancji szkodliwych zdecydowano się na zastosowanie algorytmu sterowania, który będzie nadążać za tymi zmianami i stosownie reagować na ich zmiany. Z tego względu zdecydowano się na zaimplementowanie, w systemie sterowania układem recyrkulacji spalin nowego programowalnego zaworu recyrkulacji spalin, którego poziom otwarcie jest kontrolowany według adaptacyjnego algorytmu sterowania zaworem recyrkulacji spalin ze sprzężeniem zwrotnym. Zaletą takiego rozwiązania byłoby nie tylko uwzględnienie procesu zmian parametrów silnika, ale również dopasowanie odpowiednich nastaw do chwilowych jego warunków. W związku z powyższym zdecydowano się na zastosowanie algorytmu sterowania adaptacyjnego z identyfikacją modelu (MIAC). Istotą tej regulacji jest to, że parametry regulatora są wyznaczone za pomocą wyników bieżącej identyfikacji modelu parametrycznego, przeprowadzonej na podstawie bieżących pomiarów wielkości sterującej i wielkości regulowanej obiektu

Wadą tego typu sterownia dla obiektów nieliniowych, jest konieczność opracowania odpowiedniego teoretycznego modelu identyfikacji obiektu tzw. obserwatora. W zaproponowanym rozwiązaniu sterowania adaptacyjnego MIAC, sterowanie stopniem recyrkulacji spalin następuje w oparciu o mapy, ale jego nastawy są skorygowane o aktualne parametry obserwatora połączonego sprzężeniem zwrotnym z wolnozmiennego czujnika obecności tlenu azotu i tlenu w spalinach (rys. 2).



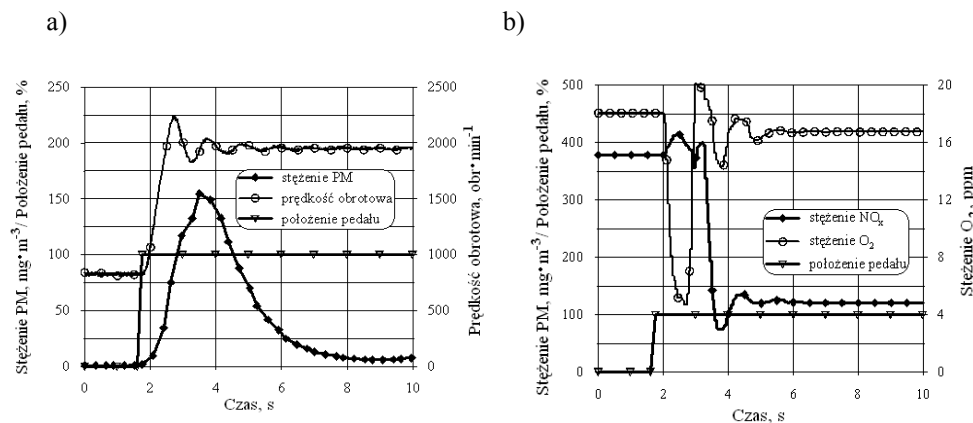
Źródło: opracowanie własne

Rys. 2. Model sterowania zaworem EGR
 Fig. 2. The model of EGR valve control

Badania stanowiskowe układu recyrkulacji spalin

W celu opracowania uproszczonego modelu obiektu, to jest układu wydechowego wraz z układem recyrkulacji spalin, należy przeprowadzić szereg badań wstępnych. Identyfikację takiego układu najłatwiej przeprowadzić badając odpowiedź obiektu na wprowadzone na jego wejście odpowiednie znane wymuszenia. Obserwując wyjście obiektu można określić, z jakiego typu obiektem mamy do czynienia. Sygnałem wymuszenia w pierwszej fazie badań stanowiskowych jest skokowa zmiana położenia pedału mocy (rys. 3) lub skokowa

zmiana obciążenia silnika. Badania przeprowadzono przy standardowym sterowaniu przepływem recykulowanych spalin kierowanych układem obejściowym do kanału dolotowego.



Źródło: opracowanie własne

Rys. 3. Przebiegi: a) emisja cząstek stałych oraz prędkości obrotowej silnika, b) emisja NO_x oraz stężenie O_2 w spalinach - podczas próby dynamicznej przy skokowej zmianie położenia pedału mocy (0-100%)

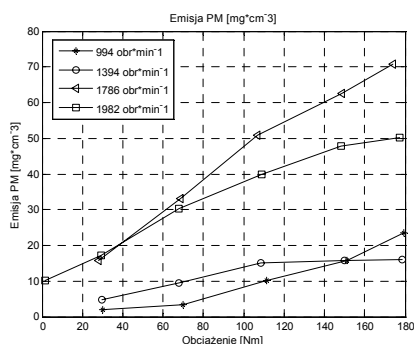
Fig. 3. Runs: a) particulates emission and engine speed, b) NO_x emission and O_2 concentration in exhaust fumes- during dynamic trial with a step change of accelerator pedal (0-100%)

Maksymalne stężenie cząstek stałych w spalinach osiągane jest po ok. 2 s od skoku pedału, równocześnie w przeprowadzonej próbie dynamicznej widoczne jest znaczne obniżenie poziomu emisji NO_x (rys. 3b), którego gwałtowny spadek koresponduje z chwilą pojawienia się spadkowego trendu emisji PM (tuż po osiągnięciu maksymalnego poziomu emisji PM). Analizując przebieg stężenia tlenu w spalinach można zauważyć gwałtowny jego spadek już na samym początku przebiegu próby dynamicznej (rys. 3b), co związane jest ze skokowym wzrostem dawki paliwa będącej efektem reakcji układu wtryskowego na skokowe wychylenie elektronicznego pedału mocy. W następnym kroku zbadano zachowanie się badanego silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym w kilku stacjonarnych punktach obciążenia celem wyznaczenia zależności zmian emisji substancji szkodliwych w spalinach do środowiska w różnych warunkach pracy silnika, co zostało przedstawione na rysunku 4.

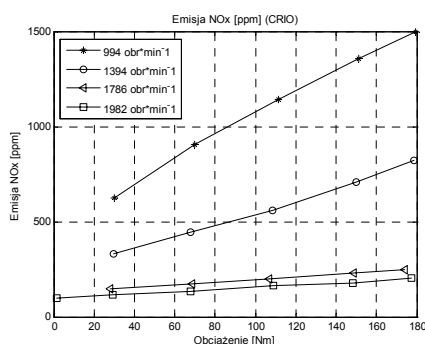
Należy również zauważyć, że dla omawianego przypadku w którym zawór recyrkulacji spalin był sterowany dwustanowo (silnik seryjny), tzn. był zamknięty albo w pełni otwarty. Otwarcie zaworu następuje dla prędkości obrotowych około $1400 \text{ obr} \cdot \text{min}^{-1}$. Jak można zauważyć (rys. 4) emisja tlenków azotu (NO_x) gwałtownie spada dla otwartego zaworu recyrkulacji spalin. W tych samych warunkach, zgodnie z oczekiwaniami, można zauważyć wzrost emisji cząstek stałych (PM). Obserwując podczas próby wskaźniki pracy silnika można wyznaczyć jego charakterystyki mocy i sprawności silnika. Zbyt wysoki stopień

recyrkulacji spalin może doprowadzić do spadku mocy i pogorszenia sprawności silnika, co jest efektem niepożądanym (rys. 5b).

a)



b)

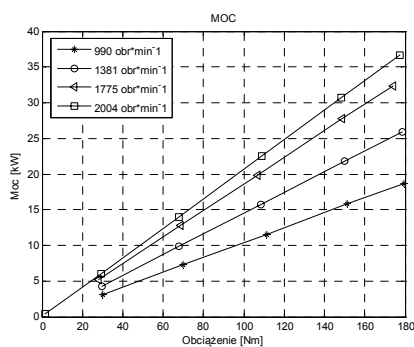


Źródło: opracowanie własne

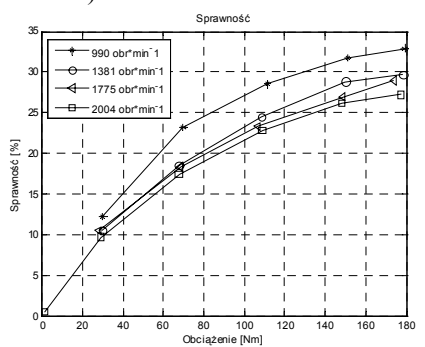
Rys. 4. Emisja substancji szkodliwych w wybranych punktach pracy silnika: a) emisja NOx, b) emisja PM

Fig. 4. Emission of noxious substances in selected points of engine operation: a) NOx emission, b) PM emission

a)



b)



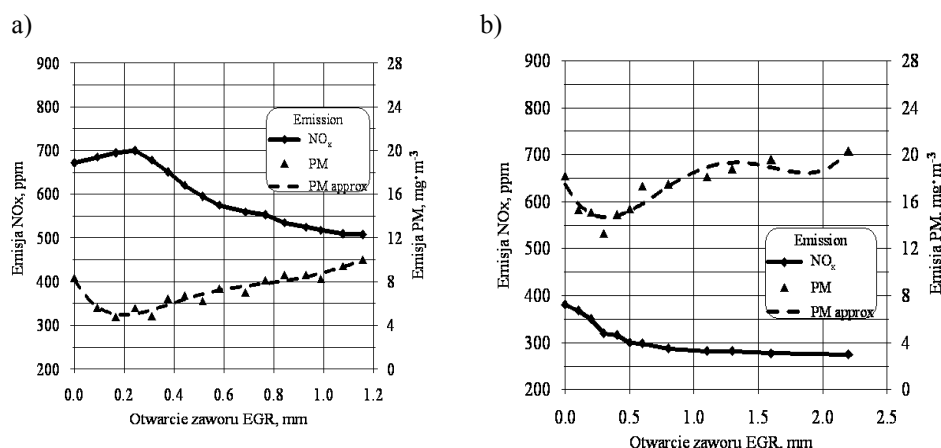
Źródło: opracowanie własne

Rys. 5. Zmiany wskaźników pracy silnika z recyrkulacją spalin sterowaną dwustanową jako funkcja obciążenia: a) moc silnika, b) sprawność

Fig. 5. Changes of the indexes of engine operation with exhaust gases recirculation controlled with bistable as a load function of a) engine power, b) efficiency

W kolejnym etapie badań dokonano zmian w układzie recyrkulacji spalin przez wprowadzenie nowego zaworu EGR [Bieniek, Graba, Lechowicz 2011], który umożliwia w sposób precyzyjny i powtarzalny zmianę położenie stopnia jego otwarcia. Badania przeprowadzone dla wybranych stanów stacjonarnych i różnych stopni otwarcia nowego zaworu EGR, co zostało przedstawione na rysunku 6 przedstawiającym zależność pomiędzy emisją PM oraz NO_x .

Na rysunku 6 można zaobserwować wzrost emisji cząstek stałych przy większym stopniu recyrkulacji spalin, natomiast dla tych właśnie pozycji zaworu można zaobserwować zmniejszenie emisji tlenków azotu. Jak można zauważyć emisja PM i NO_x jest związana pewną zależnością, która powoduje, że redukcja emisji jednego z składnika powoduje przyrost emisji drugiego składnika.



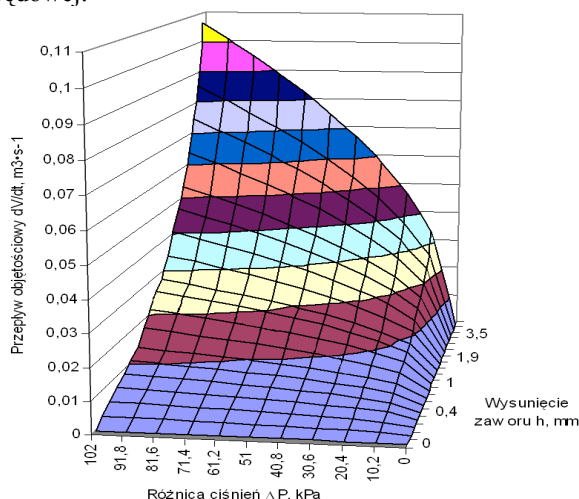
Rys. 6. Wpływ otwarcia zaworu EGR na emisję NO_x and PM: a) 1100 obr·min⁻¹, 100 Nm, b) 1400 obr·min⁻¹, 100 Nm

Fig. 6. The influence of opening EGR valve on the NO_x and PM emission: a) 1100 rpm⁻¹, 100 Nm, b) 1400 rpm⁻¹, 100 Nm

Opracowany algorytm sterowania musi pracować w oparciu o pewien kompromis, by próba ograniczenia jednego składnika nie powodowała przekroczenia dopuszczalnego stężenia drugiego. Innym sposobem rozwiązania tego kompromisu jest stosowanie metod pozasilnikowych oczyszczania spalin tj. filtrów cząstek stałych wówczas w silniku możemy ograniczyć emisję tlenków azotu.

Zatem w celu ograniczenia emisji tlenku azotu należy wyznaczyć dla algorytmu sterowania mapę przepływu spalin przez zawór recyrkulacji w zależności od różnicy ciśnień oraz skoku zaworu dla badanego silnika. Rysunek 7 przedstawia przepływ spalin przez zawór EGR dla jego parametrów przepływowych jak w seryjnym silniku. W takiej konfiguracji, co wynika z przeprowadzonych badań, występuje ograniczenie maksymalnego przepływu do ok. 30 m³·h⁻¹ przy w pełni otwartym zaworze, przy czym otwarcie grzyba zaworu powyżej 1,6 mm nie wpływa praktycznie na zwiększenie przepływającej masy gazu.

Charakterystyka ta jest ważnym elementem prowadzonych badań. Znajomość własności elementu wykonawczego znacznie upraszcza problem sterowania, a w konsekwencji prowadzi do uzyskania lepszych wyników stosunku emisji substancji szkodliwych do sprawności jednostki napędowej.



Źródło: opracowanie własne

Rys. 7. Teoretyczna mapa przepływu spalin dla nowego zaworu EGR
Fig. 7. A theoretical map of exhaust flow for a new EGR valve

Podsumowanie

Problem sterowania systemem recyrkulacji spalin nie jest zadaniem prostym. Analizując powyższe stwierdzenia mamy do czynienia z szeregiem wzajemnie sprzecznych celów. Z jednej strony chcąc ograniczyć emisję tlenków azotu zwiększamy stopień recyrkulowanych spalin, ale tym samym zwiększa się emisja cząstek stałych. Z drugiej strony zbyt wysoki stopień recyrkulacji powoduje zmiany wskaźników pracy. Uwzględniając przedstawione ograniczenia najlepszą strategią sterowania wydaje się być liniowe sterowanie predycyjne z ograniczeniem wejść i wyjść [Woś, Duda 2002].

W artykule zaprezentowano zarys koncepcji adaptacyjnego sterowania zaworem EGR, który wymaga jeszcze dalszych szczegółowych prac. Opracowania również wymagają warunki współpracy sterownika zaworu EGR z sterownikiem układu wtryskowego silnika.

Bibliografia

Jung S., Ishida M., Yamamoto S., Ueki H., Sakaguchi D., 2010. Enhancement of NOx-PM trade off a diesel engine adopting bio-ethanol and EGR. International Journal of Automotive Technology. Vol. 11. No.5. pp. 611.

- Yokomura H., Kohketsu S., Mori K., 2003.** EGR Systems In a Turbocharged and Intercooled Heavy-Duty Diesel Engine – Expansion of EGR Area with Venturi EGR System. Technical Review.
- Lejda K., 2000.** Elimination of NOx Emission In Diesel Engine by EGR Metod. Western Scientific Centra of Ukrainian Transport Academy. Logos 2000.
- Bieniek A., Graba M., Lechowicz A. 2011.** Adaptive Control Of Exhaust Gas Recirculation at Nonroad Vehicle Diesel Engine, Journal of KONES 2011 vol. 18, No. 4. pp. 11
- Woś A., Duda J.T. 2003.** Liniowa regulacja predykcijna układów wielowymiarowych z ograniczeniami wejść i wyjść. Materiały XIV Krajowej Konferencji Automatyki. Zielona Góra 2002. Tom I. s.141-143.
- VDMA 2008.** Exhaust Emission Legislation Diesel And Gas Engines.
- Techbud 2011.** Strona firmy Techbud. [Dostęp 13-09-2011]. Dostępny w Internecie <http://www.silniki.info.pl>

ADAPTIVE CONTROL OF THE SYSTEM OF EXHAUST GAS RECIRCULATION IN TERMS OF REDUCING THE EMISSIONS OF DELETERIOUS SUBSTANCES IN A CLASSIC COMPRESSION IGNITION ENGINE

Abstract. The study presents the concept of modernisation of the exhaust gas recirculation system of Zetor Forterra 125 farm tractor. It is a non-road vehicle, presently available for sale, it complies to the current exhaust gas emission norm, according to the directive of European Union EU - 97/68/EC. The vehicle is one of the most popular tractors and agricultural machinery used in Central and Eastern Europe. The purpose of modernisation is to evaluate a new system of exhaust gas recirculation, which aims at limiting the emission of deleterious substances from exhaust fumes, which are emitted to the environment. Moreover, the article presents the results of author's own stand tests for an engine equipped with an innovative programmable exhaust gas recirculation valve (EGR valve).

Key words: exhaust gas recirculation, emission of deleterious substances, agricultural vehicles

Adres do korespondencji:

Mariusz Graba; e-mail: m.graba@po.opole.pl
Katedra Pojazdów Drogowych i Rolniczych
Politechnika Opolska
ul. Mikołajczyka 5
45-271 Opole