

Prof. dr hab. inż. Jerzy Merkisz¹
Dr inż. Piotr Lijewski¹
Dr inż. Paweł Fuć¹
Mgr inż. Sylwester Weymann²

¹Institute of Combustion Engine and Transport
Poznan University of Technology
Piotrowo 3 str, 60-965 Poznan, Poland
E-mail: piotr.lijewski@put.poznan.pl

²Industrial Institute of Agricultural Engineering
Starołęcka 31 str, 60-963 Poznan, Poland

Badania emisji związków toksycznych spalin z pojazdów o zastosowaniach pozadrogowych z wykorzystaniem analizatorów PEMS

Słowa kluczowe: *pojazdy o zastosowaniach pozadrogowych, pomiary emisji w rzeczywistych warunkach eksploatacji*

Streszczenie: Artykuł dotyczy problemu badań emisji związków toksycznych spalin z silników pojazdów o zastosowaniach pozadrogowych (non-road). W pierwszej części artykułu krótko scharakteryzowano przepisy amerykańskie nt. procedur badań silników w eksploatacji. Przepisy te są nowatorskim rozwiązaniem i zostały wprowadzone jako jedno z pierwszych tego typu rozwiązań na świecie. W dalszej części artykułu przedstawiono wyniki badań emisji związków toksycznych spalin silnika ciągnika rolniczego, wykonane w rzeczywistych warunkach eksploatacji, podczas wykonywania prac polowych. Do tego celu wykorzystano aparaturę PEMS (Portable Emissions Measurement System). Badania te wykonano dla różnych procedur badawczych, m.in. w teście NTE (Not-To-Exceed). Analizę wyników badań przeprowadzono głównie w aspekcie testu NTE, obowiązującego w Stanach Zjednoczonych. Analiza ta dotyczy przede wszystkim warunków pracy silników oraz emisji związków szkodliwych. Europejskie regulacje prawne w chwili obecnej nie nakładają obowiązku wykonywania takich badań, dlatego w zaprezentowane badania odnoszą się do procedur amerykańskich. Wykonane badania i ich analiza pozwoliły na sformułowanie wniosków dotyczących warunków pracy i emisji z silnika.

1. Wprowadzenie

Od wielu lat prowadzone są prace rozwojowe mające na celu zmniejszenie negatywnego oddziaływania środków transportu na środowisko naturalne. Szczególne zaangażowanie ośrodków badawczych można zaobserwować w zakresie prac koncentrujących się wokół układów napędowych i silników spalinowych pojazdów. W czerwcu 2012 Międzynarodowa Agencja Badań nad Nowotworami IARC (International Agency for Research on Cancer), która jest jednym z departamentów Światowej Organizacji Zdrowia WHO (World Health Organization), ogłosiła w swoim raporcie, że spaliny silników o zapłonie samoczynnym (ZS) powodują choroby nowotworowe [7]. Do tego czasu spaliny silników ZS były klasyfikowane do grupy czynników, które prawdopodobnie wywołują choroby nowotworowe. Jednak w świetle najnowszych badań spaliny silników ZS zakwalifikowano do grupy o najwyższym ryzyku zachorowań nowotworowych [3, 14]. Jest to zatem kolejny czynnik motywujący do zaangażowania w prace badawczo-rozwojowe mające na celu minimalizację szkodliwego oddziaływania silników ZS na otoczenie. Prace te powinny koncentrować się na rozwoju rozwiązań technicznych ograniczających emisję oraz

rozwoju aparatury i metod badań. Tylko połączenie rozwiązań obejmujących te kierunki może przynieść wymierne efekty w postaci poprawy wskaźników ekologicznych silników spalinowych. Pojazdy o zastosowaniach pozadrogowych są napędzane głównie silnikami ZS. Ponadto, należy dodać, że w porównaniu z silnikami pojazdów drogowych są one mniej zaawansowane technicznie, a dopuszczalne limity emisji są bardziej liberalne. Wynika stąd potrzeba ich rozwoju ukierunkowanego na zmniejszenie negatywnego oddziaływania na zdrowie człowieka i środowisko naturalne.

Jednym z istotnych aspektów badań emisji związków toksycznych spalin jest metodologia. W ostatnich latach intensywnie rozwijane są metody badań emisji w rzeczywistych warunkach eksploatacji. Tego typu badania są coraz częściej wykonywane, ponieważ dostarczają cennych informacji na temat rzeczywistej emisji, informacje które są niemożliwe do uzyskania w warunkach laboratoryjnych [1, 5, 6, 10]. Dlatego wyniki tych badań są bardzo pożądane. Ponieważ jest to stosunkowo nowy kierunek badań, nie są jeszcze opracowane i powszechnie przyjęte metody badań. Z publikacji na ten temat wynika szereg kwestii, które pozostają nierozwiązane. Jedną z nich jest problem doboru warunków pracy silników podczas wykonywania badań. Pożądane jest aby warunki te były reprezentatywne dla danego pojazdu, a wyniki mogły być porównywane. Inną kwestią pozostaje problem warunków pracy silników w testach badawczych. Na problem odwzorowania rzeczywistych warunków pracy silników w testach badawczych zwrócono uwagę już wcześniej [2, 4, 8, 9, 13, 11, 12, 15]. Z publikowanych na ten temat prac wynikają wnioski mówiące o tym, że warunki pracy silników (obciążenie i prędkość obrotowa) w testach badawczych, zarówno pojazdów drogowych jak i pozadrogowych, odbiegają od warunków występujących w rzeczywistej eksploatacji. Pomimo licznych badań i analiz dotyczących tego problemu nadal nie został on rozwiązany.

Badania prowadzone w rzeczywistej eksploatacji wskazują, że praca silników pojazdów różnej kategorii (HDV – Heavy Duty Vehicles, LDV – Light Duty Vehicles, non-road) charakteryzuje się specyficznymi parametrami eksploatacyjnymi, np. silniki pojazdów trakcyjnych wykorzystują szeroki zakres prędkości obrotowej wału korbowego, natomiast silniki niektórych pojazdów o zastosowaniach pozadrogowych pracują w bardzo ograniczonym zakresie prędkości obrotowej [1, 6, 11, 12, 15]. Należy zatem rozważyć, czy metoda takich badań nie powinna być indywidualnie dobrana do zastosowania silnika i czy obecne procedury badań uwzględniają ten fakt.

2. Przepisy emisji związków toksycznych dla silników pojazdów non-road

Obowiązujące procedury badań emisji związków toksycznych spalin silników pojazdów o zastosowaniach pozadrogowych były opisywane i analizowane we wcześniejszych pracach [11, 12]. W niniejszym artykule skupiono się na procedurach dotyczących badań emisji w rzeczywistych warunkach eksploatacji. Jedne z pierwszych obowiązujących regulacji dotyczących takich pomiarów wprowadziła Amerykańska Agencja Ochrony Środowiska EPA (Environmental Protection Agency) [16]. Zgodnie z tymi przepisami wprowadzono test NTE oraz limity emisji w tym teście, jako dodatkowy narzędzie kontroli emisji związków toksycznych spalin (NTE to także nazwa normy dotyczącej opisywanej procedury badawczej). Badania te są wykonywane w rzeczywistych warunkach eksploatacji silników. Test NTE pierwotnie wprowadzono dla silników pojazdów HDV, natomiast od 2011 obowiązuje także dla niektórych silników pojazdów non-road.

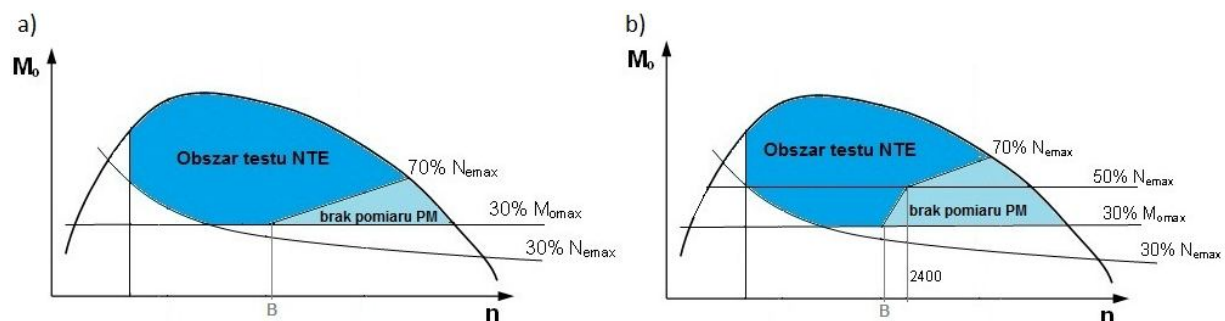
Badania w teście NTE nie wiążą się z określonym cyklem jazdy pojazdu, czy punktami pracy silnika, nie ma określonego przebiegu czy czasu testu. Badania obejmują zakres pracy silnika, który występuje w granicach obszaru kontroli (NTE zone), a pomiary

obejmują warunki statyczne i dynamiczne (rys. 1). Emisje związków toksycznych spalin są uśredniane z cyklu pracy silnika trwającego minimum 30 s. (30 s. Window).

W teście NTE ustalono obszar kontroli ograniczony odpowiednimi wartościami obciążenia i prędkości obrotowej silnika:

- minimalna prędkość obrotowa wału korbowego silnika ustalona jest analogicznie do prędkości ustalanych w teście ESC: $n_{\min} = n_{l0} + 0,15(n_h - n_{l0})$ (prędkość A w teście ESC wynosi $n_A = n_{l0} + 0,25(n_h - n_{l0})$)
- obciążenie silnika równe lub większe od 30% maksymalnego momentu obrotowego silnika
- z obszaru NTE wyłączone są wszystkie prędkości obrotowe i obciążenia, dla których silnik uzyskuje moc użyteczną mniejszą niż 30% mocy maksymalnej.
- producent silnika może wystąpić o wykluczenie z obszaru NTE prędkości obrotowych i obciążeń, dla których zużycie paliwa (BSFC – Break Specific Fuel Consumption) nie jest większe niż 5% minimalnego jednostkowego zużycia w przypadku, gdy spodziewa się, że silnik nie będzie pracował podczas eksploatacji w tych punktach. Nie dotyczy to silników współpracujących z automatycznymi skrzyniami biegów o określonej liczbie przełożeń oraz pojazdów z manualną skrzynią biegów.

Dla silników spełniających regulacje EPA 2004 wyznaczono obszary bez pomiaru emisji cząstek stałych (zależne m.in. od prędkości B w teście ESC). Nie dotyczy to silników EPA 2007, ale w tym przypadku producenci mogą warunkowo wystąpić do EPA o wykluczenie pomiaru emisji cząstek stałych w tych obszarach. Ponadto producent może wystąpić o zmniejszenie obszaru NTE o pewien podobszar, jeżeli czas pracy w tym podobszarze nie przekracza 5% całkowitego czasu pracy silnika podczas eksploatacji. Podobszar ten powinien mieć kształt eliptyczny lub prostokątny, a jego granice w pewnym fragmencie powinny być zbieżne z granicą obszaru NTE.



Rys. 1. Schemat testu NTE dla silników non-road, a) dla silników o maksymalnej prędkości obrotowej 2400 obr/min, b) dla silników o maksymalnej prędkości większej niż 2400 obr/min [16]

Zgodnie z wymaganiami ustalonymi przez EPA, wszystkie silniki pojazdów non-road, spełniające normę Tier 4, muszą także spełniać wymagania normy NTE. Dla silników pojazdów non-road o mocy większej niż 130 kW przepisy te obowiązują od roku 2011, dla silników o mocy 56-130 kW od roku 2012, natomiast dla silników o mocy mniejszej niż 56 kW od roku 2013. Limity emisji jednostkowej związków toksycznych spalin w teście NTE zostały ustalone, jako 1,25 dopuszczalnej emisji jednostkowej danego związku normy Tier 4. Jedynie dla silników, które mają emisję jednostkową tlenków azotu mniejszą niż 2,5 g/kWh i emisję jednostkową cząstek stałych mniejszą niż 0,07 g/kWh, współczynnik ten wynosi 1,5. Przepisy NTE mają zastosowanie dla badań homologacyjnych oraz muszą być spełnione dla całego okresu eksploatacji silnika [16].

Propozycja przyszłych przepisów europejskich dla silników HDV również przewidują badania emisji podczas eksploatacji. Europejski odpowiednik testu NTE to propozycja oceny

zgodności pojazdu w eksploatacji z wymaganiami w zakresie emisji jednostkowej, bazująca na określeniu emisji w całym cyklu jezdny, jako funkcji pracy silnika wyrażonej w kWh.

3. Metodyka i obiekt badań

W ostatnich latach wzrosło zainteresowanie badaniami emisji w warunkach drogowych, gdyż tylko wtedy można uzyskać informacje o rzeczywistej emisji z pojazdu. Dzięki takim badaniom zyskuje się wartościowe i wiarygodne wyniki pomiarów, niemożliwe do uzyskania w warunkach laboratoryjnych na hamowni silnikowej lub podwoziowej. Prezentowane w artykule badania wykonano podczas rzeczywistej eksploatacji ciągnika rolniczego, wykonującego pracę na polu przy wykorzystaniu agregatu uprawowego (rys. 2). Podstawowe dane silnika badanego ciągnika zamieszczono w tabeli 1.

Tab. 1. Podstawowe dane silnika badanego ciągnika

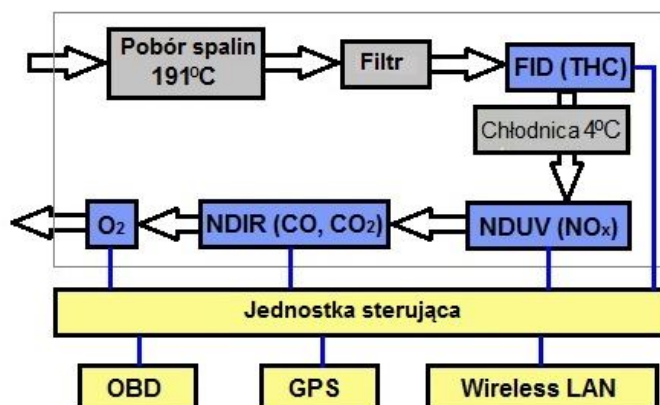
Objętość skokowa/liczba cylindrów	6,4 dm ³ /6
Liczba cylindrów/zaworów	6/12
Moc maksymalna	122 kW / 1900 rpm
Maksymalny moment obrotowy	698 Nm / 1350–1500 rpm
System doładowania	Turbosprężarka VGT
Układ wtryskowy	Common rail, max ciśnienie 160 MPa
Układ oczyszczania spalin	Reaktor utleniający
Norma emisji	Stage IIIB/Tier3



Rys. 2. Widok ciągnika wraz z zamontowaną aparaturą badawczą podczas wykonywania badań

Do badań związków gazowych spalin wykorzystano analizator Semtech DS firmy Sensors Inc. Jest to analizator typu PEMS, umożliwia pomiar masowego natężenia przepływu spalin oraz stężeń związków szkodliwych: dwutlenku węgla, tlenku węgla, węglowodorów i tlenków azotu. Pomiar wymienionych wielkości umożliwia wyznaczenie emisji drogowej i jednostkowej oraz zużycia paliwa. Próbkę spalin pobierana jest przez sondę masowego natężenia spalin i dostarczana do przyrządu tzw. grzaną drogą, która utrzymuje temperaturę 191°C (rys. 3, tab. 2). Spaliny są filtrowane z cząstek stałych (w przypadku silników ZS) i dokonywany jest pomiar stężenia węglowodorów w analizatorze FID (Flame Ionization Detector). Następnie próbka jest schładzana do 4°C i w analizatorze NDUV (Nondispersive Ultra Violet Detector) dokonywany jest pomiar stężenia tlenków azotu, a w analizatorze NDIR (Nondispersive Infrared Detector) mierzone jest stężenie tlenku węgla i dwutlenku

węgla. Pomiar stężenia tlenu dokonywany jest za pomocą elektrochemicznego czujnika. Przyrząd posiada możliwość rejestracji parametrów odczytywanych z systemu diagnostycznego pojazdu i położenia geograficznego wykorzystującego moduł GPS.



Rys. 3. Schemat analizatora Semtech DS

Tab. 2. Charakterystyka mobilnego analizatora spalin SEMTECH DS

Parametr	Metoda pomiaru	Dokładność
Stężenie związków		
CO	NDIR – niedyspersyjna (podczerwień), zakres 0–10%	±3%
HC	FID – płomiennowo-jonizacyjna, zakres 0–10 000 ppm	±2,5%
NO _x = NO + NO ₂	NDUV – niedyspersyjna (ultrafiolet), zakres 0–3000 ppm	±3%
CO ₂	NDIR – niedyspersyjna (podczerwień), zakres 0–20%	±3%
O ₂	elektrochemiczna, zakres 0–20%	±1%
Częstotliwość próbkowania	1–4 Hz	
Natężenie przepływu spalin	masowe natężenie przepływu T _{max} do 700°C	±2,5% ±1% zakresu
Czas nagrzewania	15 min	
Czas odpowiedzi	T ₉₀ < 1 s	
Obsługiwane systemy diagnostyczne	SAE J1850/SAE J1979 (LDV) SAE J1708/SAE J1587 (HDV) CAN SAE J1939/J2284 (HDV)	

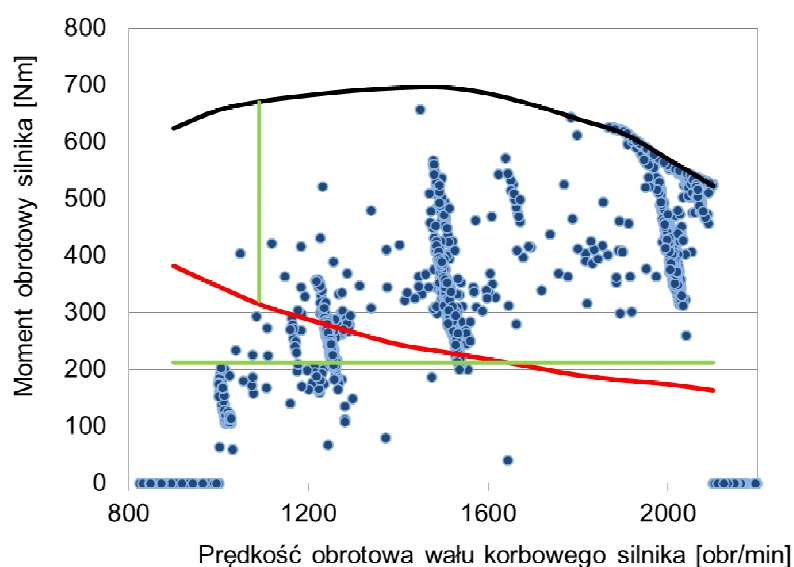
Do pomiaru emisji cząstek stałych użyto analizatora SEMTECH-LAM (Laser Aerosol Monitor). SEMTECH-LAM działa na zasadzie rozpraszania światła laserowego przez cząstki występujące w spalinach. Analizator ma do wyboru dwa zakresy pomiarowe o różnych stopniach rozcieńczenia i jest przeznaczony do wykorzystania z różnymi typami silników i pojazdów, w różnych warunkach badań. Może być użyty w zastosowaniach laboratoryjnych (stanowisko hamowniane) jak i do zastosowań drogowych (pomiarów w rzeczywistych warunkach eksploatacji). Dwuportowy pobór próbki spalin umożliwia testowanie skuteczności filtra cząstek stałych. SEMTECH-LAM korzysta z trzech sterowników przepływu masowego strumienia spalin, które są automatycznie dostosowywane do utrzymania pożądanego stopnia rozcieńczenia. Analizator umożliwia badanie cząstek stałych w zakresie średnic od 100 nm do 10 000 nm. Specyfikację analizatora SEMTECH-LAM zamieszczono w tabeli 3.

Tab. 3. Podstawowe dane analizatora LAM

Zakres pomiarowy stężenia	0 do 40 mg/m ³ i 0 do 700 mg/m ³
Zakres wielkości mierzonych cząstek	100 do 10 000 nm
Rozdzielczość pomiaru stężenia	0,01 mg/m ³
Dryft stężenia	<0,25 mg/m ³ ponad 6 h.
Natężenie przepływu	1,5 dm ³ /min
Częstotliwość próbkowania	5 Hz (system do 100 Hz)
Wyjścia	RS232 analogowe 0 to 5 VDC opcja
Zasilanie	12 do 24 VDC lub 110 do 240 VAC

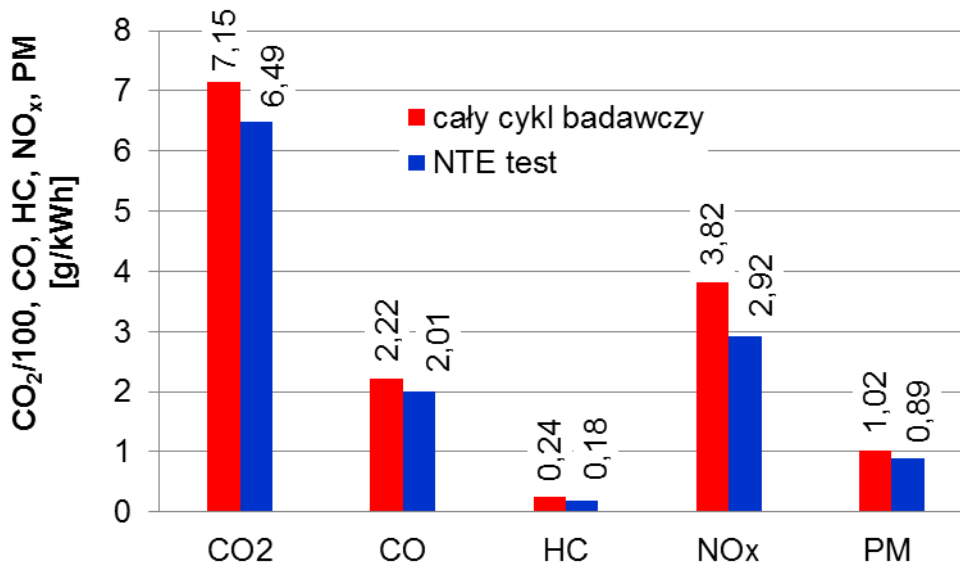
4. Wyniki badań i ich analiza

Przeprowadzone badania umożliwiły wyznaczenie emisji związków toksycznych spalin podczas całego cyklu badawczego (cały zakres prędkości obrotowej i obciążenia silnika), ponadto zastosowana metodyka umożliwiła wyznaczenie emisji w teście NTE. Wykorzystana metodyka umożliwiła także wyodrębnienie punktów pracy silnika zgodnych z testem NTE. Na rysunku 4 przedstawiono punkty pracy oraz wyznaczony dla badanego silnika obszar testu NTE. W czasie pomiarów ciągnik był sprzęgnięty z agregatem uprawowym, zestaw ten wykonywał pracę na polu. Podczas pomiarów ciągnik poruszał się z czterema różnymi prędkościami, co spowodowało zmiany obciążenia silnika wynikające ze zwiększania sił oporu na narzędziu uprawowym, wraz ze zwiększaniem prędkości przejazdu. Jest to widoczne na rysunku 4, punkty pracy silnika ciągnika są skumulowane wokół pewnych prędkości obrotowych. Z uzyskanych podczas pomiarów danych wynika, że tylko 61% całkowitego czasu pracy całego cyklu badawczego silnik pracował w obszarze testu NTE (rys. 4). Cały cykl badawczy trwał 4337 s., z czego 2645 s. silnik ciągnika pracował w obszarze testu NTE, co stanowi 61% całkowitego czasu wykonywania pomiarów, czyli blisko 40% czasu pracy silnika nie jest uwzględnione w teście NTE. Test NTE nie objął obszaru pracy silnika z małymi obciążeniami (do około 280 N·m) i małymi prędkościami obrotowymi wału korbowego (do 1300 obr/min) oraz biegu jałowego silnika. Jest to często wykorzystywany obszar pracy silnika podczas wykonywania lekkich zabiegów agrotechnicznych.

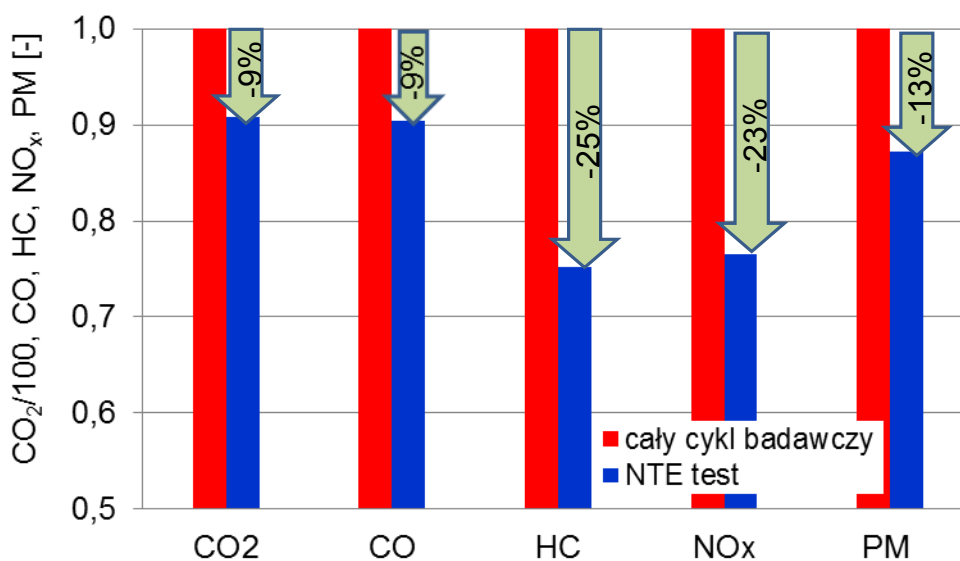


Rys. 4. Charakterystyka maksymalnego momentu obrotowego silnika badanego ciągnika oraz zaznaczone punkty pracy w czasie badań i obszar testu NTE

Ponieważ cykl pomiarowy obejmował pracę silnika poza obszarem testu NTE znalazło to odzwierciedlenie w emisji związków toksycznych spalin. Na rysunku 5 zamieszczono wyniki badań emisji związków toksycznych spalin dla całego cyklu badawczego oraz dla testu NTE. Charakterystyczne jest to, że w teście NTE emisja wszystkich związków szkodliwych jest mniejsza. Największe różnice dotyczą emisji węglowodorów i tlenków azotu, emisja tych związków jest mniejsza w teście NTE odpowiednio o 25 i 23% (rys. 6). Znaczna różnica jest także w przypadku emisji cząstek stałych, w teście NTE jest ona mniejsza o 13% w porównaniu z emisją całego cyklu pomiarowego. Najmniejszą różnicę odnotowano dla tlenku węgla, wynosi ona 9%. Na podstawie uzyskanych wyników badań można wnioskować także, że obszar pracy silnika w teście NTE był korzystniejszy pod względem zużycia paliwa niż cały cykl badawczy, ponieważ emisja jednostkowa dwutlenku węgla w teście NTE jest o 9% mniejsza.

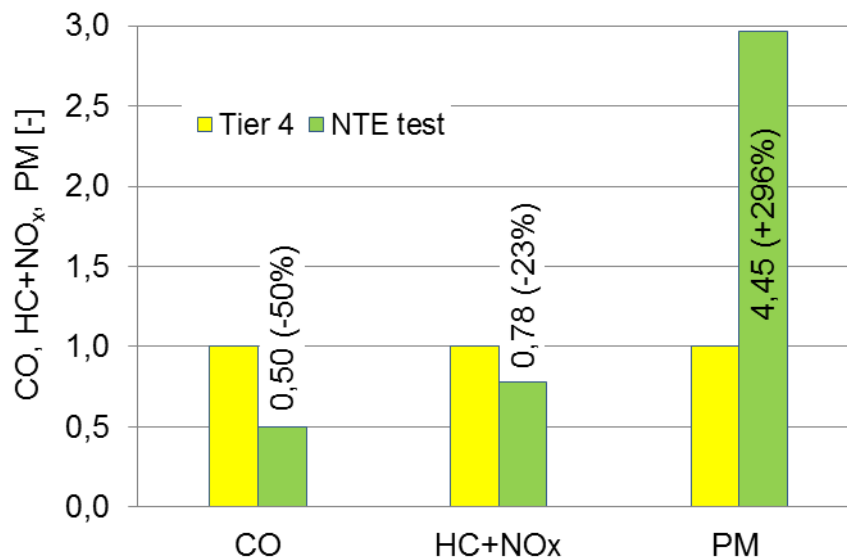


Rys. 5. Emisja jednostkowa związków toksycznych spalin z silnika badanego ciągnika w rzeczywistych warunkach eksploatacji



Rys. 6. Emisja względna związków toksycznych spalin z silnika badanego ciągnika w rzeczywistych warunkach eksploatacji

Na rysunku 7 zamieszczono emisję względną związków toksycznych spalin z ciągnika rolniczego podczas pomiarów w rzeczywistych warunkach eksploatacji w stosunku do limitów normy Tier 3. Emisja tlenku węgla oraz suma emisji węglowodorów i tlenków azotu jest mniejsza od limitów Tier 3, natomiast emisja PM znacznie przekracza ten limit, jest prawie trzykrotnie większa.



Rys. 7. Emisja względna związków toksycznych spalin z silnika badanego ciągnika w rzeczywistych warunkach eksploatacji

5. Podsumowanie

Prowadzenie badań emisji związków toksycznych spalin z eksploatowanych pojazdów o zastosowaniach pozadrogowych jest działaniem pożądanym, nadal duża grupa tych pojazdów nie podlega żadnej kontroli w tym aspekcie. Test NTE zawarty w przepisach amerykańskich jest jedną z pierwszych tego typu propozycji, jednak należy rozważyć, czy propozycja ta w pełni odpowiada wymaganiom i warunkom eksploatacji pojazdów o zastosowaniach pozadrogowych. Przedstawione w niniejszej pracy wyniki badań i ich analiza dowodzą, że w przypadku ciągników rolniczych obszar testu NTE nie w pełni odpowiada rzeczywistym warunkom pracy silnika. W przypadku badań opisanych w artykule niemal, 40% czasu pracy silnika było poza zakresem objętym w teście NTE, należy zatem rozważyć, czy procedura tego testu nie powinna być zmieniona. Wydaje się, że należy szukać takich rozwiązań metod badań, które w większym stopniu będą odzwierciedlały rzeczywiste warunki pracy silników. Propozycja europejska przewiduje wyznaczanie emisji podczas eksploatacji pojazdu bazując na wyznaczeniu pracy wykonanej przez silnik podczas pomiarów. Należy podkreślić, że metodologia badań emisji związków toksycznych spalin silnikowych w rzeczywistych warunkach eksploatacji jest obecnie w początkowej fazie rozwoju i zapewne będzie ulegać zmianom wraz ze zdobywaniem doświadczeń i dodatkowych informacji. Kolejnym problemem są limity emisji dla badań wykonywanych w rzeczywistych warunkach eksploatacji. Regulacje dotyczące testu NTE przewidują, że wartości te nie powinny być większe niż 1,25 limitów ujętych w normie homologacyjnej (Tier 4). Na podstawie przedstawionych w artykule wyników badań oraz doświadczeń autorów można stwierdzić, że spełnienie tych wymagań może być bardzo trudne, szczególnie w przypadku PM. Przedstawione w pracy badania są jednymi z pierwszych tego rodzaju, a ich wyniki i wnioski motywują do dalszych prac nad tym zagadnieniem. Ostateczne określenie wymagań dotyczących metodyki pomiarów w rzeczywistych warunkach eksploatacji pojazdów non-

road wymaga wykonania szerszych badań, obejmujących większą liczbę obiektów oraz rodzaju wykonywanych prac.

Literatura

1. Abolhasani S., Frey H.C., Kim K., Rasdorf W. Lewis P., Pang S. H. Real-World In-Use Activity, Fuel Use, and Emissions for Nonroad Construction Vehicles: A Case Study for Excavators. *Journal of the Air & Waste Management Association* 2010; 58: 1033–1046.
2. Andraea M., Salemme G., Kumar M., Sun Z., Emissions Certification Vehicle Cycles Based on Heavy Duty Engine Test Cycles. *SAE Technical Paper* 2012; 2012-01-0878.
3. Attfield M., D., Schleiff P. L., Lubin J. H. et al. The Diesel Exhaust in Miners Study: A Cohort Mortality Study With Emphasis on Lung Cancer. *Journal of the National Cancer Institute* 2012; 104(11): 869-883.
4. Bass E., Johnson J., Wildemann P. A Comparison of HEV Engine Operation and HD Engine Emissions Test Cycles. *SAE Technical Paper* 2000; 2000-01-3469.
5. Block M., Abolhasani S., Toscano F., Eric Persson E. PEMS Testing – Applications and Lessons Learned. 2012 PEMS Conference and Workshop, Riverside, California March 29th, 2012; (CD).
6. Giannelli R. A. et. al. In-Use Emissions from Non-road Equipment for EPA Emissions Inventory Modeling (MOVES). *SAE Technical Paper* 2010; 2010-01-1952.
7. IARC: Diesel Engine Exhaust Carcinogenic. Press Release, 12 June, 2012; 213.
8. Jackson C., Sze C., Schenk C., Olson B., Laroo C. Comparison of Exhaust Emissions from Application of the Ramped Modal Cycle and Steady-State Nonroad Test. *SAE Technical Paper* 2005; 2005-01-1615.
9. Kulkarni N. C. Gopalakrishna K. Co-relation Between Engine Test Bed Data and Vehicle Level Data to Generate Duty Cycle for Commercial Vehicles. *SAE Technical Paper* 2008; 2008-01-0696.
10. Lijewski P., Merkisz J., Fuc P., Pielecha J. Exhaust Emission Tests from Agricultural Machinery under Real Operating Conditions. *SAE Technical Paper* 2010; 2010-01-1949.
11. Merkisz J., Lijewski P. Time Density of Engine Operation in Non-road Vehicles in the Aspect of the Homologation Toxic Emission Test. *SAE Paper* 2010; 2010-01-1282.
12. Merkisz J., Lijewski P., Walasik S. The Analysis of Non-road Vehicle Engine Operating Conditions in Terms of Emission Regulations. *Maintenance and Reliability* 2010; 1(45): 42-48.
13. Noren O., Pettersson O. Development of Relevant Work-Cycles and Emission Factors for Off-Road Machines. *SAE Technical Paper* 2011; 2001-01-3637.
14. Silverman D. T., Samanic C. M. Lubin J. H. et. al. The Diesel Exhaust in Miners Study: A Nested Case-Control Study of Lung Cancer and Diesel Exhaust. *Journal of the National Cancer Institute* 2012; 104(11): 855-868.
15. Ullman T. L., Webb C. C., Jackson C. C., Doorlag M. H. Nonroad Engine Activity Analysis and Transient Cycle Generation. *SAE Technical Paper* 1999; 1999-01-2800.
16. www.dieselnat.com