

## TIME DENSITY OF ENGINE OPERATION IN COMBINE-HARVESTER VEHICLES IN THE ASPECT OF THE EMISSION LEGISLATION

### Summary

The paper concerns the problem of toxic emission from non-road vehicles. The paper presents the results of the investigations and analysis related to the engine operating conditions of a combine-harvester. An analysis has been performed based on which a range of the most frequently used loads and engine speeds were determined. The obtained time density characteristics (distribution of speeds and loads in time) of the engines were compared to the measurement points of the toxic emission homologation cycle. On this basis conclusions have been drawn regarding the correlation between the measurement points of the cycle and the most frequently used areas of loads and speeds of combine-harvester. Further suggestions for the investigations and analysis have also been made referring to the issue at hand. Besides, based on the obtained results certain proposals have been formed for further development of the non-road vehicles emission legislation.

## ANALIZA CHARAKTERYSTYK GĘSTOŚCI CZASOWEJ SILNIKÓW KOMBajnÓW ZBOŻOWYCH W ASPEKCIE OBOWIĄZUJĄCYCH PRZEPISÓW DOTYCZĄCYCH EMISJI SPALIN

### Streszczenie

Artykuł dotyczy problemu emisji związków szkodliwych spalin z silników kombajnów zbożowych. W pracy przedstawiono wyniki badań i analiz dotyczących warunków pracy tych silników. Wykonano analizę, na podstawie której określono zakresy najczęściej wykorzystywanych obciążeń i prędkości obrotowych silników. Uzyskane charakterystyki gęstości czasowej (rozkład prędkości i obciążenia w czasie) silników odniesiono do punktów pomiarowych testu homologacyjnego badań emisji związków toksycznych spalin. Na tej podstawie wysunięto wnioski odnośnie korelacji między punktami testu badawczego a najczęściej wykorzystywanymi zakresami pracy silników kombajnów. Zaproponowano również dalsze kierunki badań i analiz dotyczących poruszanego problemu.

### 1. Wstęp

Transport jest jednym z najpoważniejszych źródeł zanieczyszczenia powietrza. Od wielu lat rozwój motoryzacji determinują przepisy dotyczące zminimalizowania ich oddziaływania na środowisko naturalne. Oprócz zachowania jakości powietrza istotnym problemem jest ograniczanie zużycia zasobów naturalnych Ziemi, np. ropy naftowej. Obok rozwoju technologii ukierunkowanych na zmniejszanie emisji związków toksycznych spalin (*Diesel Particulate Filter*, *Selective Catalytic Reduction* itp.) równolegle następuje rozwój przepisów prawnych, metod badań i aparatury. Jednym z najnowszych kierunków badań emisji związków szkodliwych spalin są badania drogowe, w rzeczywistych warunkach eksploatacji, gdyż badania w warunkach laboratoryjnych nie zawsze uwzględniają zakres najczęściej wykorzystywanych prędkości jazdy i przyspieszeń. Coraz częściej podejmowana jest dyskusja o konieczności modernizacji obowiązujących testów badawczych, tak aby w większym stopniu odzwierciedlały rzeczywiste warunki eksploatacji pojazdów. Najnowsza aparatura umożliwia już wykonywanie takich badań.

W przypadku pojazdów *non-road* badania emisji są wykonywane w laboratoriach z wykorzystaniem silnikowych stanowisk hamownianych w testach stacjonarnym i niestacjonarnym. Na podstawie doświadczenia, prowadzonych od wielu lat obserwacji i wstępnych badań można wysunąć przypuszczenie, że stacjonarne testy wykonywane dla silników pojazdów

*non-road* nie w pełni oddają najczęściej wykorzystywane zakresy pracy, tzn. obciążenia prędkości obrotowej silnika. W związku z tym podjęto prace ukierunkowane na zweryfikowanie tej tezy. Wyniki tych prac dotyczące silników kombajnów rolniczych opisano w niniejszym artykule.

### 2. Ustalenia prawne dotyczące emisji z silników pojazdów non-road

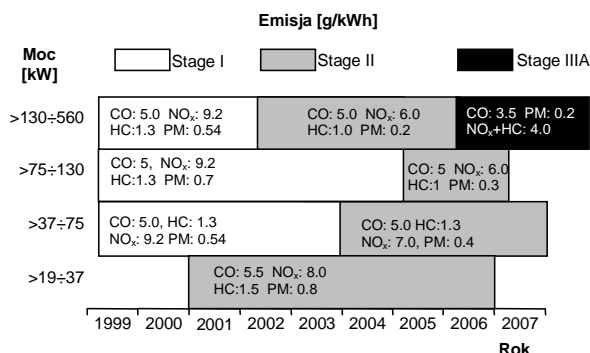
Regulacje prawne dotyczące pojazdów *non-road* przedstawiono w opracowanej w 1997 roku Dyrektywie Unii Europejskiej 97/68/EC. Limity dopuszczalnej emisji związków toksycznych wprowadzono w dwóch etapach, pierwszy (*Stage I*) wprowadzono w roku 1999, drugi (*Stage II*) w latach 2001-2004. Dopuszczalny poziom emisji jest uzależniony od mocy silnika (rys. 1). W roku 2002 Parlament Europejski przyjął kolejny dokument, Dyrektywę 2002/88/EC, która była uzupełnieniem wcześniejszej. Wprowadzono standardy emisji dla małych silników o zapłonie iskrowym o mocy użytecznej mniejszej niż 19 kW. Przepisy zawarte w Dyrektywie 2002/88/EC były w dużym stopniu zbieżne z przepisami obowiązującymi w Stanach Zjednoczonych [1].

Projekt kolejnych ustaleń prawnych przedstawiono w Dyrektywie 2004/26/EC z roku 2004. Na jej podstawie wprowadzenie kolejnych limitów emisji związków toksycznych jest prowadzone w dwóch etapach III i IV (*Stage III* i *Stage IV*) i rozłożone na lata 2006÷2014 (tab. 1). Po-

nadto etap III został podzielony na: IIIA i IIIB. Z chwilą wejścia w życie etapu IIIB będą obowiązywały rygorystyczne limity emisji tlenków azotu i cząstek stałych, których emisja została zmniejszona aż o około 90% w stosunku do etapu II. W roku 2005 opracowano i przyjęto kolejny dokument, Dyrektywę 2005/13/EC, dotyczącą emisji z silników pojazdów stosowanych w rolnictwie i leśnictwie [1].

W Stanach Zjednoczonych *Tier 1* wprowadzono stopniowo w latach 1996÷2000, podobnie jak w Europie, w zależności od mocy użytecznej silnika (tab. 2). W roku 1996 podpisano porozumienie odnośnie do ograniczania emisji z silników pojazdów *non-road*. Sygnatariuszami tego dokumentu byli: amerykańska Agencja Ochrony Środowiska (EPA) i CARB oraz producenci maszyn i silników, m.in.: Caterpillar, Cummins, Deere, Detroit Diesel, Deutz, Isuzu, Komatsu, Kubota, Mitsubishi, Navistar, New Holland, Wis-Con i Yanmar. W roku 1998 EPA wprowadziła limity dla silników o mocy użytecznej mniejszej niż 37 kW oraz zaprezentowała nowe normy *Tier 2*, *Tier 3* i *Tier 4*, wprowadzane w latach 2000÷2008 dla wszystkich silników pojazdów *non-road* (tab. 2, 3). W czasie obowiązywania przepisów objętych normami *Tier 1÷3*, producenci silników mogą dla swoich produktów uzyskać oznaczenie „Blue Sky Series”, co oznacza silnik o wyższych paramet

trach ekologicznych, ale wymaga to spełnienia dodatkowych wymagań [1].



Rys. 1. Dopuszczalne limity emisji jednostkowej związków toksycznych spalin i daty ich wprowadzenia w Europie dla silników pojazdów *non-road* [1, 8]

Fig. 1. Admissible limits of toxic emission per unit and dates of establishment in Europe for engines of non-road vehicles [1, 8]

Tab. 1. Limity emisji dla silników pojazdów *non-road* i daty ich wprowadzenia (etap IIIA, IIIB, IV) [1, 8]

Table 1. Limits of emission for engines of non-road vehicles and dates of establishment (stage IIIA, IIIB, IV) [1, 8]

Moc silnika [kW]	Data wprowadzenia		CO [g/kWh]	HC [g/kWh]	NO <sub>x</sub> [g/kWh]	HC+NO <sub>x</sub> [g/kWh]	PM [g/kWh]
	NTA	ANR					
<b>Etap IIIA</b>							
>130÷560	31.12.2005	31.12.2006	3.5	–	–	4.0	0.2
>75÷130	31.12.2006	31.12.2007	5.0	–	–	4.0	0.3
>37÷75	31.12.2005	31.12.2006	5.0	–	–	4.7	0.4
>19÷37	30.06.2005	31.12.2005	5.5	–	–	7.5	0.6
<b>Etap IIIB</b>							
>130÷560	31.12.2011	31.12.2012	3.5	0.19	2.0	–	0.025
>75÷130	31.12.2010	31.12.2011	5.0	0.19	3.3	–	0.025
>56÷75	31.12.2010	31.12.2011	5.0	0.19	3.3	–	0.025
>37÷56	31.12.2009	31.12.2010	5.0	–	–	4.7	0.025
<b>Etap IV</b>							
>130÷560	30.09.2013	30.09.2014	3.5	0.19	0.4	–	0.025
>75÷130	31.12.2012	31.12.2013	5.0	0.19	0.4	–	0.025

Tab. 2. Dopuszczalne limity emisji jednostkowej związków toksycznych spalin (*Tier 2 i 3*) i daty ich wprowadzenia w Stanach Zjednoczonych dla silników pojazdów *non-road* [1, 6]

Table 2. Admissible limits of toxic emission per unit (*Tier 2 and 3*) and dates of establishment in USA for engines of non-road vehicles [1, 6]

Moc silnika [kW]	Model roku	CO [g/kWh]	HC [g/kWh]	NMHC+NO <sub>x</sub> [g/kWh]	NO <sub>x</sub> [g/kWh]	PM [g/kWh]
<b>Tier 2</b>						
≤8	2005	8.0	–	7.5	–	0.8
>8÷19	2005	6.6	–	7.5	–	0.8
>19÷37	2004	5.5	–	7.5	–	0.6
>37÷75	2004	5.0	–	7.5	–	0.4
>75÷130	2003	5.0	–	6.6	–	0.3
>130÷225	2003	3.5	–	6.6	–	0.2
>225÷450	2001	3.5	–	6.4	–	0.2
>450÷560	2002	3.5	–	6.4	–	0.2
>560	2006	3.5	–	6.4	–	0.2
<b>Tier 3</b>						
>37÷75	2008	5.0	–	4.7	–	Obowiązuje Tier 2
>75÷130	2007					
>130÷225	2006	3.5	–	4	–	
>225÷450	2006					
>450÷560	2006					

Tab. 3. Dopuszczalne limity emisji jednostkowej związków toksycznych spalin i (*Tier 4*) i daty wprowadzenia w Stanach Zjednoczonych dla silników pojazdów *non-road* [1, 6]

Table 3. Admissible limits of toxic emission per unit (*Tier 4*) and dates of establishment in USA for engines of non-road vehicles [1, 6]

Moc silnika [kW]	Model roku	CO [g/kWh]	HC [g/kWh]	NMHC+NO <sub>x</sub> [g/kWh]	NO <sub>x</sub> [g/kWh]	PM [g/kWh]
Tier 4						
≤8	2008	8.0	–	7.5	–	0.4a
>8÷19	2008	6.6	–	7.5	–	0.4
>19÷37	2008	5.5	–	7.5	–	0.3
	2013	5.5	–	4.7	–	0.03
>37÷56	2008	5.0	–	–	–	0.3b
	2013	5.0	–	–	–	0.03
>56÷130	2012–2014c	5.0	0.19	–	0.4	0.02
>130÷560	2011–2014d	3.5	0.19	–	0.4	0.02

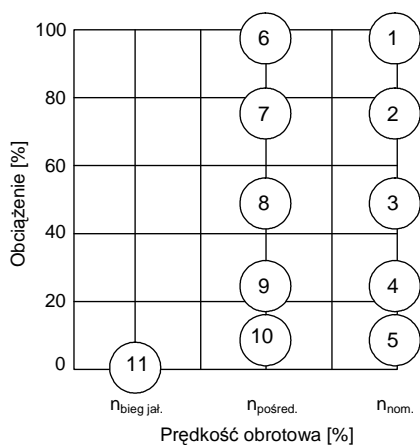
a – do 2010 r. obowiązuje *Tier 2* dla silników DI, z ręcznym rozruchem, chłodzonych powietrzem,

b – 0,4 jeżeli silnik uzyska 0,03 w 2012 r.,

c – dot. NMHC, NO<sub>x</sub>, PM, opcja 1: 50% silników spełnia w 2012÷2013 r.; opcja 2: 25% silników musi spełnić w 2012–2014 r., wszystkie od 31.12.2014 r.,

d – PM, CO od 2011; NO<sub>x</sub>, HC–50% silników musi spełnić w 2011÷2013

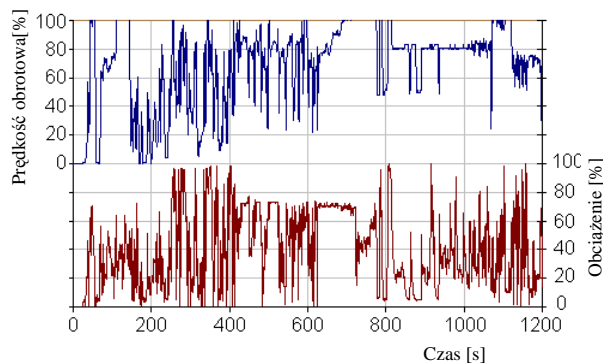
Zarówno w państwach Unii Europejskiej, jak i w Stanach Zjednoczonych obowiązującym testem homologacyjnym dla niesamochodowych zastosowań silników spalinywych jest opracowany przez ISO test badawczy ISO 8178 (NRSC – *non-road stationary cycle*), schematycznie przedstawiony na rys. 2 [1, 6]. Jest to test 11-fazowy wykonywany na hamowni silnikowej. Na jego podstawie wyznacza się średnią emisję jednostkową poszczególnych składników toksycznych spalin. Charakterystyczne współczynniki udziału pracy w każdej fazie testu są dobierane w zależności od zastosowania badanego silnika.



Rys. 2. Schemat testu 11-fazowego ISO 8178 (NRSC) [6]  
Fig.2. Schema of the 11-phase ISO 8178 (NRSC) test [6]

Z chwilą wejścia w życie etapu III pomiary emisji są przeprowadzane także w teście dynamicznym NRTC (rys. 3). Test NRTC został opracowany wspólnie przez instytucje europejskie i amerykańskie. Dla badanego silnika test NRTC jest wykonywany dwukrotnie, dla silnika gorącego (rozgrzanego) oraz z uwzględnieniem zimnego rozruchu. Wynik końcowy

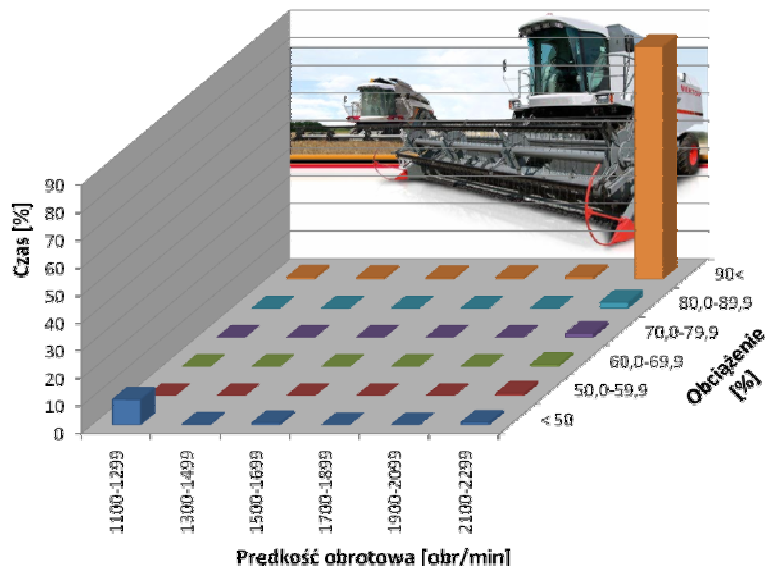
jest średnią, ze współczynnikiem udziału 0,1 dla testu z zimnym rozruchem. Natomiast w Stanach Zjednoczonych test NRTC obowiązuje od chwili wprowadzenia *Tier 4*. Podobnie jak w Europie są wykonywane dwa testy, jeden podczas zimnego rozruchu, ale współczynnik udziału tego testu jest mniejszy, wynosi 0,05 [1].



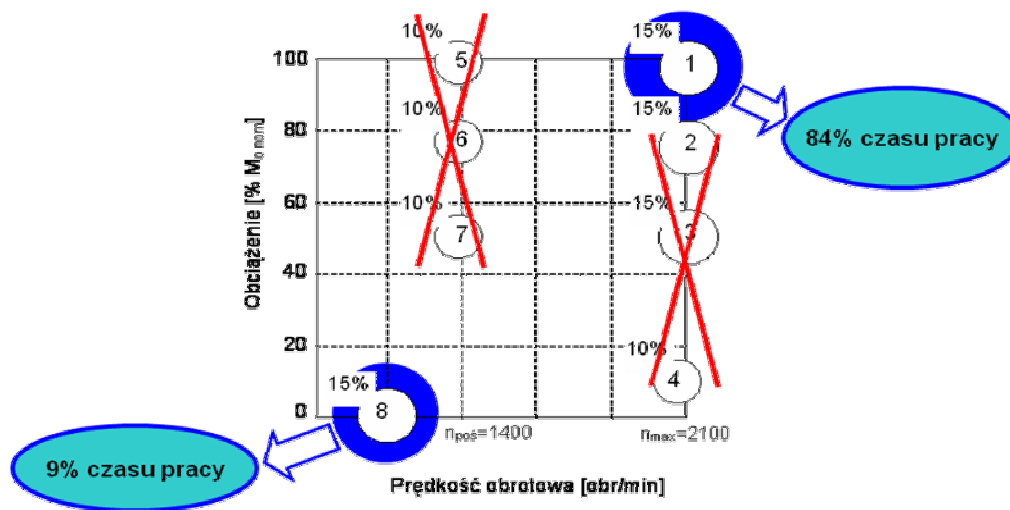
Rys. 3. Przebieg testu NRTC [8, 7]  
Fig. 3. Graph of the NRTC test [8, 7]

### 3. Analiza pracy silników kombajnów zbożowych

Na podstawie danych zebranych ze sterowników silników dokonano analizy warunków pracy silników kombajnów zbożowych. Zebrano dane z 8 maszyn, z których każda przepracowała ponad 300 h wszystkie kombajny były wyposażone w ten sam typ silnika. Dzięki wyposażeniu silników w elektroniczny sterownik możliwe było odczytanie zapisanych histogramów stanów pracy (charakterystyk gęstości czasowej). Na podstawie zebranych histogramów z poszczególnych maszyn sporządzono histogram zbiorczy, obejmujący wszystkie przebadane pojazdy. Analizę warunków pracy silników przeprowadzono w aspekcie obowiązującego testu homologacyjnego ISO-8178 (NRSC).



Rys. 4. Charakterystyki gęstości czasowej silników kombajnów zbożowych  
 Fig. 4. Time density characteristics of the combine-harvester engines



Rys. 5. Analiza warunków pracy silników kombajnów zbożowych w aspekcie testu NRSC  
 Fig. 5. Analysis of the engine operating conditions of combine-harvesters in the aspect of the NRSC test

Z przedstawionych histogramów wynika, że znaczący jest czas pracy silników na biegu jałowym, wynosi on 10%. Z zebranych danych wynika, że silniki kombajnów zbożowych pracują głównie przy maksymalnej prędkości obrotowej wału korbowego i obciążeniu przekraczającym 90% maksymalnego momentu obrotowego. Udział pracy w tym zakresie wynosi aż 84% całkowitego czasu pracy maszyny. Rozpatrując uzyskane dane aspekcie obowiązującego testu ISO-8178 (NRSC) wynika, że powinien on być zmodyfikowany. Proponuje się modernizację testu homologacyjnego polegającą na pominięciu faz dla prędkości wału korbowego  $n_{po\text{śred.}}$  i pozostawieniu tylko faz dla prędkości  $n_{nom}$ . Nastęstwem tego musi być zmiana wartości udziału faz testu (rys. 5). Charakter pracy silników kombajnów wskazuje, że test badawczy mógłby w swojej najprostszej postaci składać się z dwóch faz, tj. biegu jałowego i punktu pracy dla maksymalnej prędkości obrotowej wału korbowego i maksymalnego obciążenia. Te dwa główne punkty pracy (bieg jałowy i maksymalna moc silnika) stanowią 93% całkowitego czasu pracy silnika.

#### 4. Podsumowanie

Z analizy aktualnych przepisów wynika, że brak jest zadowalających rozwiązań prawnych dotyczących kontroli emisji związków toksycznych spalin z eksploatowanych pojazdów rolniczych oraz innych o zastosowaniach pozadrogowych. Analiza rzeczywistych warunków pracy silników (obciążenia i prędkości obrotowej wału korbowego) kombajnów zbożowych wybranych pojazdów dowodzi, że niektóre punkty testu homologacyjnego leżą poza głównym zakresem pracy. Można zatem wysunąć wniosek o konieczności weryfikacji obowiązujących procedur badawczych – testu homologacyjnego ISO 8178. Również projekty przyszłych regulacji prawnych nie przewidują odpowiednich rozwiązań. Zaprezentowane prace mogą być wstępem do opracowania procedur mających na celu kontrolę i ograniczanie emisji związków toksycznych spalin z silników eksploatowanych pojazdów o zastosowaniach pozadrogowych. Wprowadzenie odpowiednich procedur wymaga podjęcia dalszych prac w tym zakresie. Konieczne

wydaje się wprowadzenie odpowiednich regulacji prawnych obligujących do kontroli emisji z silników eksploatowanych pojazdów i co jest z tym związane opracowanie szczegółowych ustaleń dotyczących np., kiedy mają być wykonywane badania kontrolne, ustalenie dopuszczalnych limitów itp.

## 5. Literatura

- [1] AVL Regulations&Standards, Current and Future Exhaust Emission Legislation AVL. Graz 05. 2006.
- [2] Dreisbach R. Emission reduction technology – synergies between on-road and non-road engine. 3rd AVL International Commercial Powertrain Conference, Graz 2005.
- [3] Leverton T. A strategic response to the market and legislation challenges in the construction equipment industry over the next decade. 3rd AVL International Commercial Powertrain Conference, Graz 2005.
- [4] Moser F. Three different industries sharing the same powertrain technology – an opportunity for synergies? 3rd AVL International Commercial Powertrain Conference, Graz 2005.
- [5] Poli G. Global trends in commercial vehicle markets: Automotive, agricultural and industrial powertrains. 3rd AVL International Commercial Powertrain Conference, Graz 2005.
- [6] [www.dieselnets.com](http://www.dieselnets.com)