

prof. dr hab. inż. Jerzy Merkisz
Instytut Pojazdów Szynowych „TABOR”
Politechnika Poznańska
dr inż. Piotr Lijewski
mgr inż. Sławomir Walasik
Politechnika Poznańska

Tendencje w zmianach przepisów dotyczących emisji związków toksycznych spalin z silników pojazdów szynowo-drogowych

W artykule przedstawiono aktualne przepisy dotyczące problemu emisji związków toksycznych spalin z silników o zastosowaniach pozadrogowych. Do tej grupy pojazdów należy zaliczyć także pojazdy wykorzystywane do wykonywania prac specjalistycznych i przetokowych na torach kolejowych. Zaprezentowano rozwiązania prawne obowiązujące w Europie i Stanach Zjednoczonych. Ponadto przedstawiono propozycje przyszłych regulacji prawnych. Opisano również główne kierunki zmian w konstrukcji silników pojazdów o zastosowaniach pozadrogowych, jakie będą konieczne do wprowadzenia, aby silniki spełniły wymagania dotyczące ochrony środowiska naturalnego.

ANR	<i>All New Registrations</i> – wszystkie nowe rejestracje
AVL	<i>Anstalt für Verbrennungskraftmaschinen</i> – Instytut Spalania, Graz, Austria
CARB	<i>California Air Resources Board</i> – Kalifornijska Rada ds. Zasobów Powietrza
CO	tlenek węgla
DeNOx	<i>Decrease NO_x</i> – reaktor katalityczny obniżający tlenki azotu
DF	<i>Deterioration Factor</i> – współczynnik pogorszenia emisji
DPF	<i>Diesel Particulate Filter</i> – filtr cząstek stałych do silników o zapłonie samoczynnym
ECE	<i>Economic Commission for Europe</i> – Europejska Komisja Gospodarcza (agenda ONZ)
EDP	<i>Emission Durability Period</i> – okres trwałości emisji
EGR	<i>Exhaust Gas Recirculation</i> – recyrkulacja spalin
ELR	<i>European Load Response Test</i> – europejski test obciążenia dla silników ZS
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i> – Agencja Ochrony Środowiska w Stanach Zjednoczonych
ESC	<i>European Stationary Cycle</i> – europejski test stacjonarny
ETC	<i>European Transient Cycle</i> – europejski test niestacjonarny
HC	węglowodory
HCCI	<i>Homogenous Charge Compression Ignition</i> – spalanie ładunku homogenicznego w silniku ZS
HDV	<i>Heavy Duty Vehicles</i> – ciężki pojazd samochodowy
ISO	<i>International Standard Organization</i> – Międzynarodowa Organizacja Normalizacyjna
NMHC	<i>Non Methane Hydrocarbons</i> – węglowodory bez udziału metanu
NO _x	tlenki azotu
NRSC	<i>Non-Road Stationary Cycle</i> – stacjonarny test dla silników pojazdów o zastosowaniach pozadrogowych
NRTC	<i>Non-Road Transient Cycle</i> – niestacjonarny test dla silników pojazdów o zastosowaniach pozadrogowych
NTA	<i>New Type Approvals</i> – zatwierdzenie nowego typu
OBD	<i>On-Board Diagnostic</i> – system diagnostyki pokładowej
off-road	pozadrogowy
PM	<i>Particulate Matter</i> – cząstki stałe
SCR	<i>Selective Catalytic Reduction</i> – selektywna redukcja katalityczna
ZS	silnik o zapłonie samoczynnym

1. Wprowadzenie

Do najpoważniejszych problemów, z jakimi ludzkość będzie się zmagać w najbliższych dziesięcioleciach, należy zaliczyć problemy energetyczne i ekologiczne. Od wielu lat obserwowany jest wzrost zużycia energii, któremu towarzyszy wzrost emisji związków szkodliwych powstałych podczas spalania paliw. Coraz częściej słyszy się alarmujące informacje o kończących się zasobach ropy naftowej, dlatego poszukiwane są źródła oszczędności tego surowca. Transport jest jednym z najpoważniejszych konsumentów paliw produkowanych z ropy naftowej i, co jest z tym związane, głównych źródeł emisji związków szkodliwych do atmosfery. W związku z tym wprowadzane są coraz bardziej rygorystyczne przepisy ograniczające tą emisję. W efekcie tych działań na głównych światowych rynkach motoryzacyjnych obowiązują ustalenia prawne, dotyczące ograniczania emisji związków toksycznych z silników spalinowych napędzających pojazdy i wykorzystywanych w innych zastosowaniach. Konsekwencją wprowadzania limitów emisji związków szkodliwych jest ciągle unowocześnianie i modernizacja silników spalinowych. Produkowane obecnie jednostki napędowe znacznie odbiegają, pod względem konstrukcji i wykorzystanych technologii, od tych stosowanych jeszcze kilkanaście lat temu. Powszechnie wykorzystywane są pozasilnikowe układy oczyszczania spalin: reaktory katalityczne, filtry cząstek stałych (DPF) i układy selektywnej redukcji katalitycznej (SCR), a ponadto szeroko stosowana jest elektronika umożliwiająca precyzyjne sterowanie pracą silnika oraz takie rozwiązania konstrukcyjne jak układy wtryskowe typu *common rail* (akumulatorowe układy wtryskowe).

Pierwotnie przepisy ograniczające emisję obejmowały pojazdy drogowe (*on-road*) a stosunkowo późno, bo dopiero w latach 90-tych XX wieku wprowadzono przepisy również dla silników pojazdów o zastosowaniach pozadrogowych (*off-road*). Obecnie przepisy dotyczące emisji związków szkodliwych dla tej grupy pojazdów są rozwijane, przy czym zmiany polegają przede wszystkim na obniżaniu dopuszczalnych limitów emisji związków toksycznych spalin i wprowadzaniu nowych testów badawczych.

Emisja związków toksycznych spalin zależy w dużym stopniu od stanu technicznego silnika. W związku z tym ustawodawcy wymuszają na producentach pojazdów samochodowych wprowadzenie procedur umożliwiających wykrywanie zwiększonego poziomu emisji podczas eksploatacji pojazdu. Konsekwencją tego w przypadku pojazdów drogowych są wykonywane okresowo w stacjach diagnostycznych badania kontrolne oraz wprowadzanie systemów diagnostyki pokładowej OBD, których zadaniem jest kontrola sprawności emisyjnej oraz sprawności elementów odpowiedzialnych za bezpieczeństwo pojazdu.

Problem ten nie jest jednak rozwiązany w zadowalającym stopniu dla pojazdów *off-road* i innych maszyn napędzanych silnikami spalinowymi. Obecny stan regulacji prawnych z zakresu badań toksyczności nie nakłada na producentów i użytkowników tych pojazdów obowiązku poddania ich badaniom kontrolnym pod kątem emisji. Powyższa luka prawna obejmuje liczną grupę silników o zapłonie samoczynnym (ZS) służących do napędu pojazdów *off-road*. Do tej grupy należy zaliczyć również niektóre pojazdy szynowo-drogowe (*rail-and-road vehicle*), czyli pojazdy zdolne do poruszania się zarówno po szynach jak i po drogach kołowych (rys. 1). Kategoria ta obejmuje zarówno pojazdy drogowe (samochody osobowe, ciężarowe) jak i *off-road* (ciągniki rolnicze, maszyny do robót ziemnych i budowlanych) przystosowane do jazdy po torach kolejowych. Jedną z tendencji rozwoju torów kolejowych jest ich zintegrowanie z drogami kołowymi. Pojazdy szynowo-drogowe są szeroko wykorzystywane w kolejnictwie oraz zakładach przemysłowych do wykonywania prac specjalistycznych i przetokowych, tym samym zastępują znacznie droższe lokomotywy manewrowe. Najważniejsze zastosowania tych pojazdów są następujące [6]:

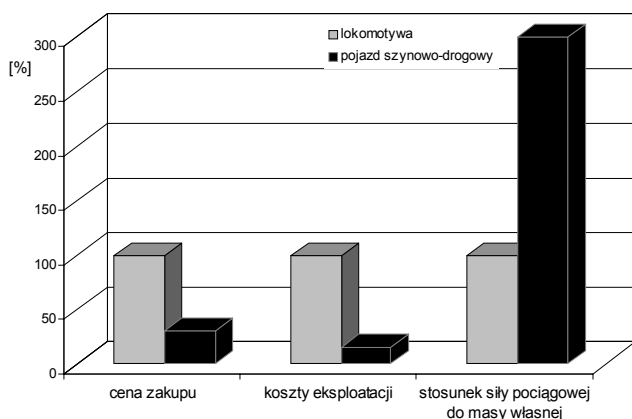
- ratownictwo kolejowe i przemysłowe
- prace manewrowe (przetaczanie wagonów)
- oczyszczanie infrastruktury: kolejowej, tramwajowej i metra
- naprawa, konserwacja i budowa sieci trakcyjnej
- prace ziemne torowe
- pielęgnacja torowiska (kosiarki, opryskiwacze, itp.)
- konserwacja mostów i wiaduktów
- zaopatrywanie w paliwo maszyn torowych.



Rys. 1. Widok pojazdów szynowo-drogowych wykorzystywanych do utrzymania trakcji kolejowej [9]

Szacuje się, że koszt zakupu i eksploatacji takiego pojazdu jest o około osiemdziesiąt procent mniejszy od kosztów odpowiadających lokomotywie manewrowej średniej mocy (rys. 2). Oprócz względów ekonomicznych zaletą pojazdów szynowo-drogowych jest ich duża mobilność; w krótkim czasie mogą być przystosowane do pracy na drogach kolejowych jak i

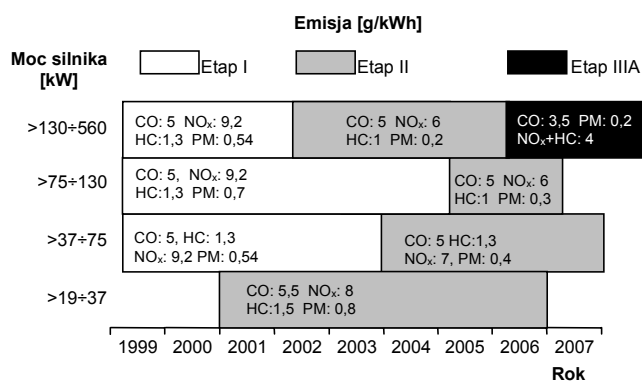
poza nimi. Należy przewidywać, że w kolejnych latach obserwowana obecnie tendencja będzie się utrzymywała i pojazdy szynowo-drogowe będą coraz chętniej wykorzystywane [6].



Rys. 2. Porównanie wybranych wskaźników ekonomicznych lokomotyw i pojazdów szynowo-drogowych [4]

2. Aktualne przepisy dotyczące emisji związków szkodliwych z pojazdów o zastosowaniach pozadrogowych

Pierwsze europejskie regulacje prawne dotyczące pojazdów *off-road* zawarto w opracowanej w grudniu 1997 roku Dyrektywie 97/68/EC Unii Europejskiej. 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. 3). 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].



Rys. 3. Dopuszczalne limity emisji jednostkowej związków toksycznych spalin i daty ich wprowadzenia w Europie dla silników pojazdów *off-road* [1, 8]

Dopuszczalne limity emisji jednostkowej związków toksycznych spalin (*Tier 1, 2 i 3*) i daty ich wprowadzenia w Stanach Zjednoczonych dla silników pojazdów *off-road* [1, 8]

Tabela 1

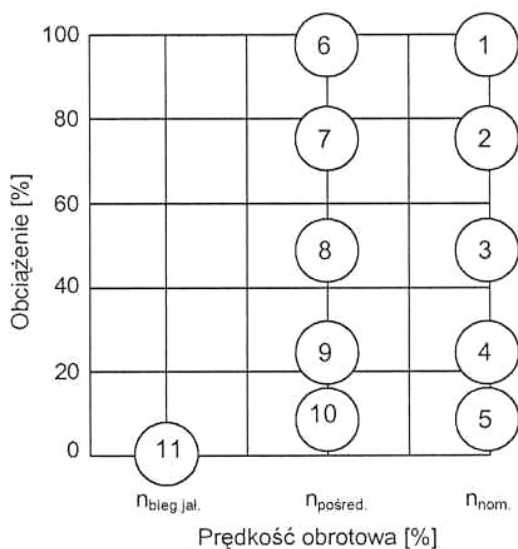
Moc silnika [kW]	Model roku	CO [g/kWh]	HC [g/kWh]	NMHC+ NO _x [g/kWh]	NO _x [g/kWh]	PM [g/kWh]
<i>Tier 1</i>						
≤8	2000	8	–	10,5	–	1
>8÷19	2000	6,6	–	9,5	–	0,8
>19÷37	1999	5,5	–	9,5	–	0,8
>37÷75	1998	–	–	–	9,2	–
>75÷130	1997	–	–	–	9,2	–
>130÷225	1996	11,4	1,3	–	9,2	0,54
>225÷450	1996	11,4	1,3	–	9,2	0,54
>450÷560	1996	11,4	1,3	–	9,2	0,54
>560	2000	11,4	1,3	–	9,2	0,54
<i>Tier 2</i>						
≤8	2005	8	–	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	–	7,5	–	0,4
>75÷130	2003	5	–	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
<i>Tier 3</i>						
>37÷75	2008	5	–	4,7	–	Obowiązuje Tier 2
>75÷130	2007			4		
>130÷225	2006	3,5	–	4	–	
>225÷450	2006					
>450÷560	2006					

W Stanach Zjednoczonych pierwsze przepisy federalne dla nowych silników pojazdów *off-road* o mocy użytecznej większej niż 37 kW przyjęto w roku 1994 (*Tier 1*), a więc nieco wcześniej niż w Europie. *Tier 1* wprowadzono stopniowo w latach 1996÷2000, podobnie jak w Europie, w zależności od mocy użytecznej silnika (tab. 1). W roku 1996 podpisano porozumienie odnośnie do ograniczania emisji z silników pojazdów *off-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* i *Tier 3*, wprowadzane w latach 2000÷2008 dla wszystkich silników pojazdów *off-road*. Ponadto 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 parametrach ekologicznych, ale wymaga to spełnienia dodatkowych wymagań (tab. 2) [1].

Dobrowolne limity emisji jednostkowej *Blue Sky Series* dla silników pojazdów *off-road* (*Tier 1÷3*) [1, 8]

Tabela 2

Moc silnika [kW]	NMHC+NO _x [g/kWh]	PM [g/kWh]
≤8	4,6	0,48
>8÷19	4,5	0,48
>19÷37	4,5	0,36
>37÷75	4,7	0,24
>75÷130	4,0	0,18
>130÷560	4,0	0,12
>560	3,8	0,12



Rys. 4. Schemat testu 11-fazowego ISO 8178-4 [1, 8]

Zarówno w państwach Unii Europejskiej jak i w Stanach Zjednoczonych obowiązującym testem homologacyjnym dla niesamochodowych zastosowań silników spalinowych jest opracowany przez ISO test badawczy ISO 8178-4, schematycznie przedstawiony na rysunku 4 [1, 8]. 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 (tab. 3 i 4).

Testy silników o zastosowaniach pozadrogowych [1]

Tabela 3

Test	Zastosowanie
B	test uniwersalny, wyjściowy dla pozostałych testów, stosowany do silników, które nie są objęte w wymienionych dalej kategoriach
C	test silników pojazdów pozadrogowych oraz urządzeń przemysłowych
C1	silniki średnio i bardzo obciążone, np. przemysłowe urządzenia wiertnicze, maszyny budowlane, ładowarki kołowe i gąsienicowe, dźwigi samojezdne, buldożery, ciągniki gąsienicowe
C2	silniki mało obciążone
D	testy silników pracujących ze stałą prędkością obrotową wału korbowego
D1	silniki siłowni oraz pomp irygacyjnych
D2	silniki zespołów prądotwórczych o zmiennym obciążeniu
E	testy silników jednostek trakcji wodnej
E1	silniki jednostek rekreacyjnych oraz handlowych o długości do 24 m
E2	bardzo obciążone silniki okrętowe, holowników, barek (bez względu na ich długość), pracujące ze stałą prędkością obrotową,
E3	bardzo obciążone silniki okrętowe, holowników i pchaczy
E4	silniki jednostek rekreacyjnych i handlowych o zastosowaniu morskim
E5	silniki jednostek o długości powyżej 24 m
F	test silników trakcji szynowej
G	testy silników urządzeń ogrodniczych i gospodarczych o mocy poniżej 20 kW
G1	silniki ZI sterowane regulatorem
G2	silniki ZS, stosowane także do napędu agregatów prądotwórczych, pomp i sprzężarek
G3	silniki ręcznie sterowane do napędu obrabiarek do drewna, pił łańcuchowych

Test	Faza testu										
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
B	0,1	0,02	0,02	0,02	0,02	0,25	0,08	0,08	0,08	0,08	0,25
C1	0,15	0,15	0,15	0	0,1	0,1	0,1	0,1	0	0	0,15
C2	0,07	0	0	0	0,23	0,07	0	0	0,38	0	0,25
D1	0,3	0,5	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0
D2	0,05	0,25	0,3	0,3	0,1	0	0	0	0	0	0
E1	0,08	0,11	0	0	0	0	0,08	0,32	0,25	0	0,3
E2	0,2	0,5	0,15	0,15	0	0	0	0	0	0	0
E3	0,2	0	0	0	0	0	0,5	0,15	0,15	0	0
E4	0,06	0	0	0	0	0	0,14	0,15	0,25	0	0,4
E5	0,08	0	0	0	0	0	0,13	0,17	0,32	0	0,3
F	0,25	0	0	0	0	0	0	0,15	0	0	0,6
G1	0	0	0	0	0	0,09	0,2	0,29	0,3	0,07	0,05
G2	0,09	0,2	0,29	0,3	0,07	0	0	0	0	0	0,05
G3	0,9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1

Oprócz przedstawionych wyżej przepisów obowiązujących na terenie całej Unii Europejskiej i w Stanach Zjednoczonych, spotykane są indywidualne rozwiązania prawne, mające na celu ochronę środowiska naturalnego przed negatywnymi skutkami emisji z pojazdów *off-road*. Europejskimi przykładami tego typu rozwiązań jest Szwajcaria i Szwecja, natomiast w Stanach Zjednoczonych Kalifornia. W przyjętych tam przepisach szczególną uwagę zwrócono na emisję cząstek stałych (PM). Wprowadzone ustalenia prawne nakładają na użytkowników i producentów pojazdów *off-road* obowiązek modernizacji eksploatowanych silników, głównie poprzez montowanie układów oczyszczania spalin, filtrów cząstek stałych i reaktorów utleniających. Przepis ten dotyczy przede wszystkim maszyn i pojazdów budowlanych. W ustaleniach tych przewidziano również zastosowanie paliwa o zmniejszonej zawartości siarki, tzw. *low sulphur diesel* oraz wymianę eksploatowanych silników na jednostki nowej generacji, zasilane olejem napędowym lub gazem ziemnym.

3. Przyszłe rozwiązania prawne dla pojazdów o zastosowaniach pozadrogowych

Projekt przyszłych europejskich ustaleń prawnych dotyczących emisji z pojazdów *off-road* przedstawiono w Dyrektywie 2004/26/EC z roku 2004. Na jej podstawie wprowadzenie kolejnych limitów emisji związków toksycznych będzie przeprowadzone w dwóch etapach: III i IV (*Stage III* i *Stage IV*) i rozłożone na lata 2006÷2014 (tab. 5). Ponadto 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].

Limity emisji dla silników pojazdów o zastosowaniach pozadrogowych i daty ich wprowadzenia (etap IIIA, IIIB, IV) [1, 8]

Tabela 5

Moc silnika [kW]	Data wprowadzenia		CO [g/kWh]	HC [g/kWh]	NO _x [g/kWh]	HC+NO _x [g/kWh]	PM [g/kWh]
	NTA	ANR					
Etap IIIA							
>130÷560	31.12.2005	31.12.2006	3,5	–	–	4	0,2
>75÷130	31.12.2006	31.12.2007	5	–	–	4	0,3
>37÷75	31.12.2005	31.12.2006	5	–	–	4,7	0,4
>19÷37	30.06.2005	31.12.2005	5,5	–	–	7,5	0,6
Etap IIIB							
>130÷560	31.12.2011	31.12.2012	3,5	0,19	2	–	0,025
>75÷130	31.12.2010	31.12.2011	5	0,19	3,3	–	0,025
>56÷75	31.12.2010	31.12.2011	5	0,19	3,3	–	0,025
>37÷56	31.12.2009	31.12.2010	5	–	–	4,7	0,025
Etap IV							
>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	0,19	0,4	–	0,025

**Dopuszczalne limity emisji jednostkowej związków toksycznych spalin (*Tier 4*)
i daty wprowadzenia w Stanach Zjednoczonych dla silników pojazdów *off-road* [1, 8]**

Tabela 6

Moc silnika [kW]	Model roku	CO [g/kWh]	HC [g/kWh]	NMHC+NO _x [g/kWh]	NO _x [g/kWh]	PM [g/kWh]
<i>Tier 4</i>						
≤8	2008	8	–	7,5	–	0,4 ^a
>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	–	–	–	0,3 ^b
	2013	5	–	–	–	0,03
>56+130	2012+2014 ^c	5	0,19	–	0,4	0,02
>130+560	2011+2014 ^d	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_x, 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_x, HC–50% silników musi spełnić w 2011+2013.

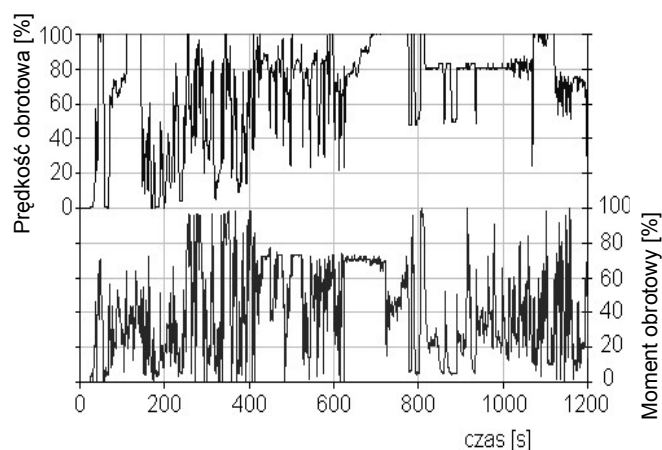
W Stanach Zjednoczonych w latach 2008+2014 będzie wprowadzana norma *Tier 4* (tab. 6). W normie tej przewiduje się znaczne zmniejszenie emisji cząstek stałych i tlenków azotu, aż o około 90%. Dodatkowo zaplanowano wprowadzenie ograniczenia zawartości siarki w oleju napędowym do 50 ppm od 01.06.2007 r. i 15 ppm (*ultra low sulphur diesel*) od 01.06.2010 r. (od 01.06.2012 r. dla paliw stosowanych do napędu lokomotyw spalinowych).

W zakresie kontroli emisji związków toksycznych wg przepisów europejskich z pojazdów eksploatowanych podczas obowiązywania etapów III i IV, producenci silników będą musieli określić tzw. współczynnik pogorszenia emisji (DF). W nomenklaturze funkcjonują dwie definicje tego współczynnika: współczynnik iloczynowy (*multiplication DF*), stosowany do badań silników wyposażonych w układy oczyszczania spalin i współczynnik sumaryczny (*additive DF*), wykorzystywany podczas badań pozostałych silników. Współczynnik sumaryczny jest definiowany jako różnica, natomiast iloczynowy jako iloraz emisji danego związku toksycznego na końcu i na początku tzw. okresu trwałości emisji (EDP). EDP jest to okres, podczas którego silnik pracuje w ustalonych warunkach i wyznaczana jest emisja związków toksycznych (tab. 7). Wprowadzenie tego współczynnika ma na celu wyznaczenie emisji związków toksycznych spalin po upływie pewnego okresu eksploatacji. Również podobne rozwiązanie obowiązuje w Stanach Zjednoczonych (*Tier 3 i 4*), natomiast inne są okresy EDP [1].

**EDP dla silników ZS (dot. etapów III i IV) [1]
Tabela 7**

Moc silnika [kW]	EDP [godz.]
≤37 pracujące ze stałą prędkością obrotową	3000
≤ 37	5000
> 37	8000

Z chwilą wejścia w życie etapu III pomiary emisji będą przeprowadzane według nowego testu dynamicznego NRTC (rys. 5) oraz według testu stacjonarnego NRSC, znanego wcześniej jako ISO 8178 C1. Test NRTC został opracowany wspólnie z EPA. Dla badanego silnika test NRTC będzie wykonywany dwukrotnie, dla silnika gorącego oraz z uwzględnieniem zimnego rozruchu. Wynik końcowy będzie średnią, ze współczynnikiem udziału 0,1 dla testu z zimnym rozruchem. Natomiast w Stanach Zjednoczonych test NRTC będzie obowiązywał w normie *Tier 4*. Podobnie jak w Europie będą wykonywane dwa testy, jeden podczas zimnego rozruchu, ale współczynnik udziału tego testu będzie mniejszy i będzie wynosił 0,05 [1].



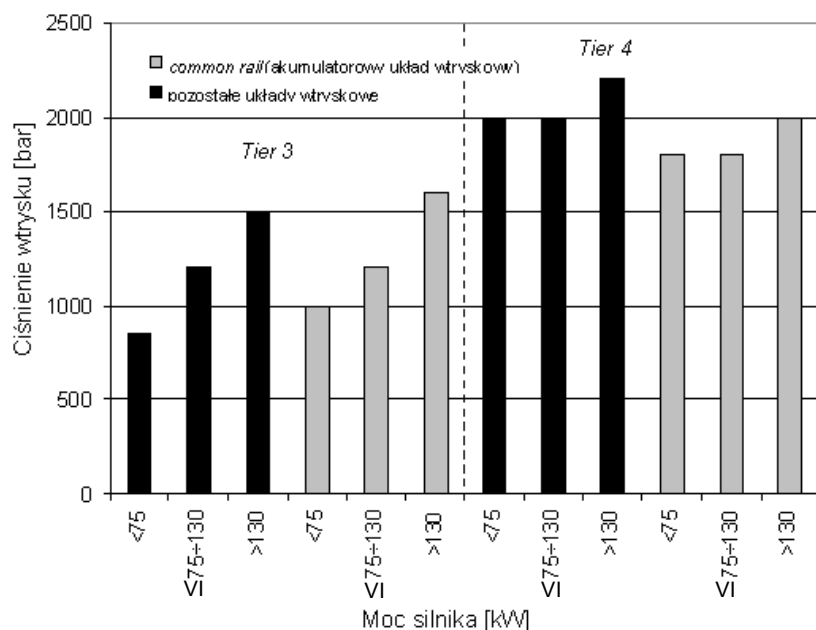
Rys. 5. Przebieg testu NRTC [8, 7]

4. Możliwości spełnienia przyszłych limitów emisji przez silniki pojazdów *off-road*

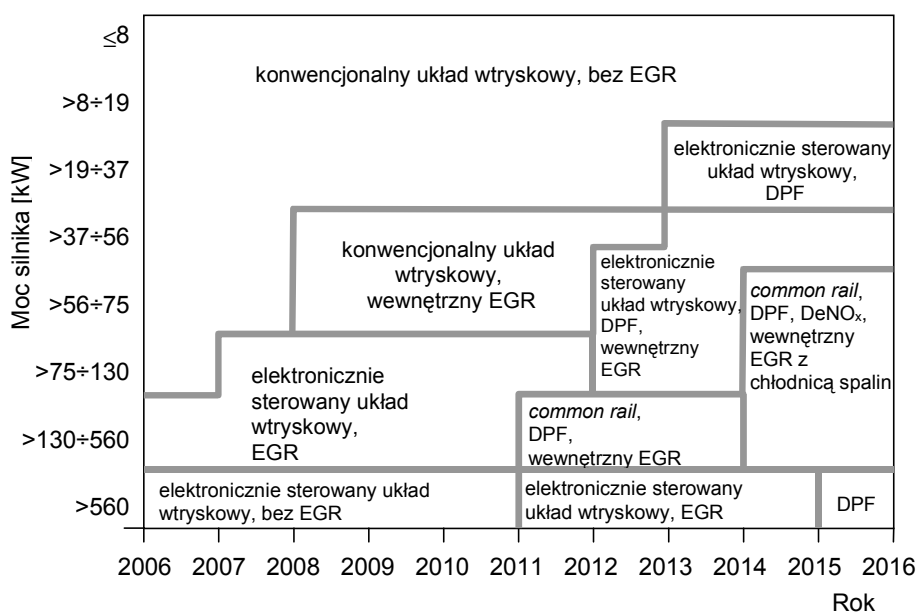
Spełnienie przyszłych limitów emisji będzie wymagało wprowadzenia zmian konstrukcyjnych, modernizacji silników oraz zastosowania nowych technologii; część z nich będzie zapewne zaadoptowana z silników ciężkich pojazdów drogowych (HDV).

	Data wprowadzenia	NO _x [g/kWh]	PM [g/kWh]	
Euro 4	2005	3,5	0,3 (ETC) 0,2 (ESC)	EGR + reak. utleniający lub SCR bez EGR
Euro 5	2008	2,03	0,3 (ETC) 0,2 (ESC)	EGR + reak. utleniający +DPF lub SCR bez EGR
US 2002/04	2002/04	3,35 (NO _x +HC)	0,13	EGR
Tier 3	2006	4,0 (NO_x+HC)	0,2	
US 2007	2007	1,5-1,6	0,013	EGR + reak. utleniający +DPF
Tier 4	2011	2,0	0,02	
US 2010	2010	0,27	0,013	US 2007 + DeNO _x
Tier 4	2014	0,4	0,02	

Rys. 6. Wspólne rozwiązania dla silników pojazdów HDV i *off-road* oraz orientacyjne daty ich wprowadzenia [2]



Rys. 7. Zmiany ciśnienia wtrysku paliwa w silnikach ZS pojazdów *off-road* [2]



Rys. 8. Rozwiązania techniczne dla silników ZS wymagane w celu spełnienia przyszłych limitów emisji związków toksycznych spalin w Stanach Zjednoczonych [2]

Przewiduje się, że nowe rozwiązania trafią do silników pojazdów *off-road* z opóźnieniem około 4 lat w stosunku do silników pojazdów drogowych. Dotyczy to grupy silników o mocy użytecznej większej niż 130 kW; w przypadku silników o mniejszej mocy użytecznej okres ten prawdopodobnie będzie jeszcze dłuższy (rys. 6) [5].

Do najważniejszych kierunków rozwoju silników *off-road* należy zaliczyć [2, 3]:

- zwiększenie maksymalnego ciśnienia spalania do około 250 bar
- zastosowanie nowych układów wtrysku o maksymalnym ciśnieniu wtryskiwanego paliwa ponad 2000 bar (rys. 7)
- zwiększona recyrkulacja spalin (EGR) powyżej 25%
- doładowanie zakresowe
- zastosowanie DPF i DeNO_x i/lub SCR
- nowe systemy spalania, spalanie ładunku homogenicznego (HCCI)
- szerokie wykorzystanie elektroniki w procesie sterowania i kontroli pracy silnika.

Z uwagi na zróżnicowanie limitów emisji przedstawione wyżej propozycje trafią tylko do niektórych grup silników, zależnie od mocy użytecznej silnika. Głównym kryterium rozwoju silników o mniejszej mocy użytecznej jest koszt ich produkcji. Ponieważ silniki z tej grupy mają stosunkowo małą sprzedaż, dopuszczalne limity emisji są mniej rygorystyczne, co pozwala na stosowanie mniej zaawansowanych technicznie rozwiązań, a więc również obniżenie kosztów ich produkcji. Podstawowe wymagania

techniczne dla poszczególnych grup silników konieczne do wprowadzenia celem spełnienia limitów emisji w Stanach Zjednoczonych przedstawiono na rysunku 8 [2].

5. Podsumowanie

Zmiany w przepisach dotyczących emisji związków toksycznych spalin z silników pojazdów *off-road* są ukierunkowane na zmniejszanie dopuszczalnych limitów i zapewne ta tendencja będzie utrzymywała się przez kolejne lata. Pozytywnie należy ocenić fakt wprowadzenia pewnych wspólnych rozwiązań w Europie i Stanach Zjednoczonych, np. pomiary emisji są wykonywane w jednym teście, również przyszłościowy test NRTC jest wspólnym opracowaniem europejsko-amerykańskim. Należy dążyć do ujednoczenia przepisów i procedur badawczych, jeżeli nie na skalę światową, to przynajmniej w Europie, Stanach Zjednoczonych i Japonii oraz na bardzo dynamicznie rozwijających się rynkach, np. Chin. Pozwoliłoby to na zmniejszenie kosztów, jakie ponoszą producenci w związku z wprowadzaniem swoich produktów na rynek. Postulat ten można odnieść nie tylko do grupy pojazdów *off-road*, ale także do pozostałych grup pojazdów. Niepokojącym spostrzeżeniem, wynikającym z przeprowadzonej analizy przepisów prawnych, jest brak dostatecznych rozwiązań dotyczących pojazdów już eksploatowanych. Przedstawione rozwiązania wydają się niewystarczające, nie zapewniają całkowitej kontroli emisji. Emisja związków toksycznych z eksploatowanych silników tych pojazdów jest w dużym stopniu niekontrolowana. Również zaprezentowane przyszłe ustalenia prawne nie rozwiązują tego problemu. W tym kontekście pozytywnie należy ocenić indywidualne działania wdrożone w Szwecji, Szwajcarii i Kalifornii. Wydaje się uzasadnione dążenie do wprowadzenia podobnych rozwiązań na szerszą skalę.

Konsekwencją wprowadzania bardziej rygorystycznych przepisów dotyczących emisji jest modernizacja silników i stosowanie nowych rozwiązań technicznych. Zapewne większość z nich będzie zaadoptowana z silników pojazdów drogowych, co powinno znacząco wpłynąć na zmniejszenie kosztów badań i wdrożenia.

Literatura

- [1] *AVL Regulations&Standards, Current and Future Exhaust Emission Legislation AVL. Graz 2006.*
- [2] *Dreisbach R.: Emission reduction technology – synergies between non-road engines. 3rd AVL International Commercial Powertrain Conference, Graz 2005.*
- [3] *Leverson 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] *MULTITRUK, transport szynowo-drogowy. Opracowanie Instytutu Pojazdów Szynowych „TABOR” w Poznaniu.*
- [5] *Majewski W. A.: Future emission legislation for heavy-duty diesel legislation. 3rd AVL International Commercial Powertrain Conference, Graz 2005.*
- [6] *Marciniak Z., Medwid M.: Pojazdy szynowo-drogowe. Wydawnictwo Ośrodka Badawczo-Rozwojowego Pojazdów Szynowych w Poznaniu, 1999.*
- [7] *Pielecha I., Pielecha J.: Tendencje w przepisach dotyczących emisji związków toksycznych przez silniki spalinowe pojazdów szynowych. Pojazdy Szynowe nr 1/2005.*
- [8] www.dieselnet.com
- [9] www.flickr.com