

prof. dr hab. inż. Jerzy Merkisz
dr inż. Ireneusz Pielecha
Politechnika Poznańska

Przepisy toksyczności spalin pojazdów szynowych

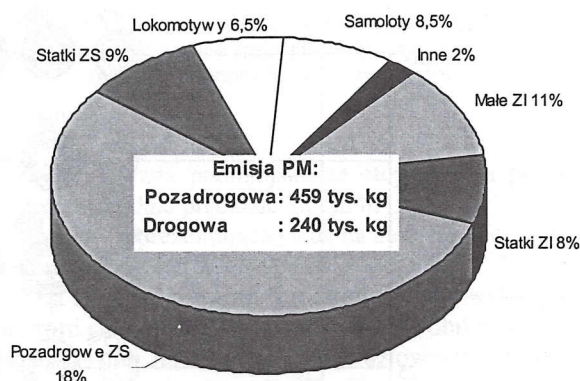
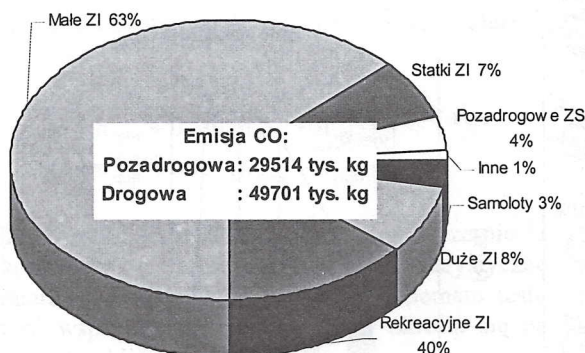
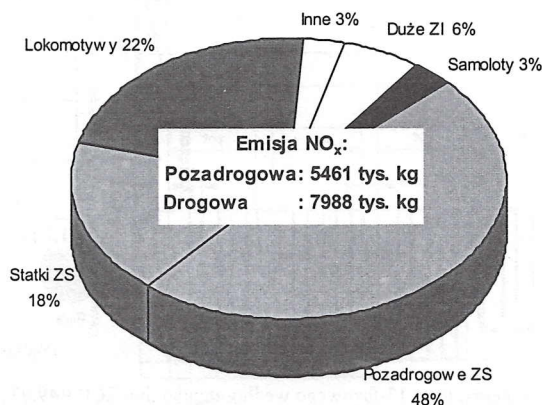
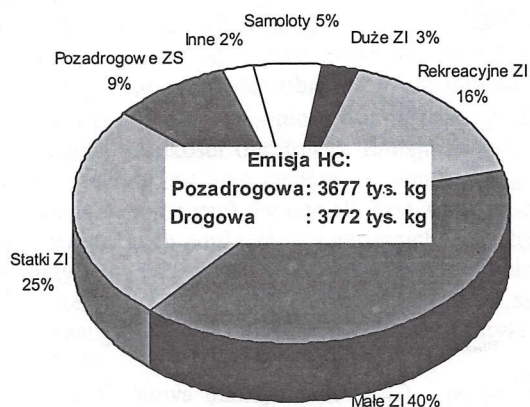
Z uwagi na rosnące skażenie środowiska, wytwórcy pojazdów (również pozadrogowych) poszukują możliwości zmniejszenia emisji substancji toksycznych, będących wynikiem spalania paliwa. Wprowadza się coraz ostrzejsze ograniczenia prawne emisji tlenku węgla, węglowodorów, tlenków azotu i cząstek stałych. W celu globalnego zmniejszenia skali problemu stosuje się coraz bardziej skomplikowane technologii modernizacji silników produkowanych obecnie pojazdów szynowych, jednocześnie wprowadza się nowe normy prawne regulujące emisję substancji toksycznych dotyczące wszystkich rodzajów pojazdów.

1. Wstęp

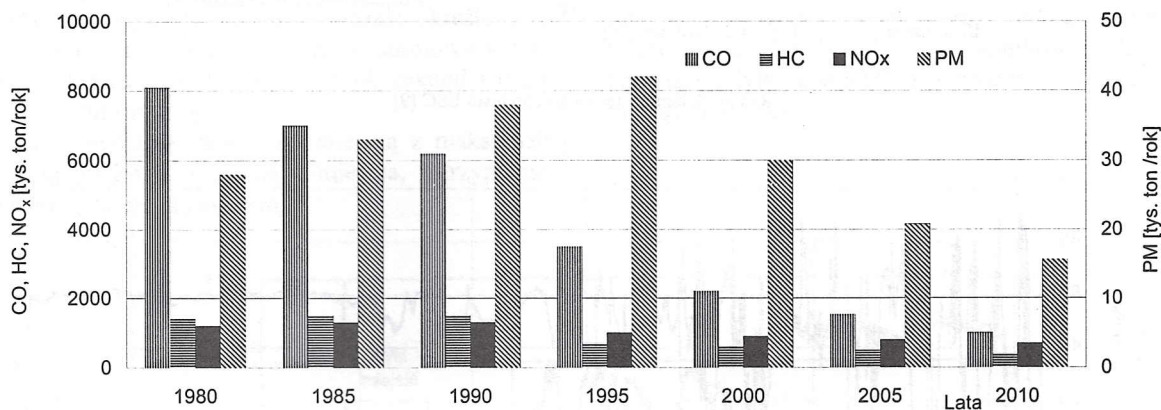
Coraz ostrzejsze wymogi ekologiczne, w połączeniu z ograniczeniami zużycia materiałów eksploatacyjnych, narzucające przepisami administracyjnymi, wywierają ogromny wpływ na trendy ewolucji całych pojazdów, jak i samych silników tłokowych. Uprzemysłowienie i wzrost liczby ludności pogorszyły znacznie jakość powietrza. Rosnące zapotrzebowanie na energię uczyniło ze spalania główne źródło zanieczyszczeń atmosferycznych pochodzenia antropogenicznego, do których należą: węglowodory (HC), tlenki siarki (SO_x), tlenki azotu (NO_x), tlenek węgla (CO), ozon troposferyczny (O_3), cząstki stałe (PM) oraz szkodliwy dwutlenek węgla (CO_2) i pyły. Nad miastami unosi się fotochemiczny smog, powstający w wyniku złożonych reakcji chemicznych pomiędzy różnymi zanieczyszczeniami, które zachodzą z udziałem promieniowania słonecznego.

Środki transportu – jedna z głównych przyczyn zanieczyszczenia atmosfery – są odpowiedzialne odpowiednio za

52, 26 i 22% zawartości tlenków azotu, tlenku węgla i węglowodorów, a w miastach nawet za 70% zawartości tlenków azotu i 90% stężenia ołowiu. Emisja związków toksycznych występuje nie tylko z pojazdów drogowych (w wyniku eksploatacji pojazdów samochodowych), ale w znacznej mierze przyczynia się do tego również emisja ze źródeł pozadrogowych (rys. 1 i 2). Przykładowo w USA w roku 2000 emisja pozadrogowa wynosiła 97, 68, 59 i 191% odpowiednio emisji węglowodorów, tlenków azotu, tlenku węgla i cząstek stałych, w stosunku do emisji tych zanieczyszczeń z pojazdów o zastosowaniach drogowych. W związku z tym należy w znacznej mierze poświęcić uwagę również zanieczyszczeniom i dopuszczalnym przepisom prawnym dla tych silników. Mimo wielkich wysiłków w zakresie usuwania zanieczyszczeń z atmosfery, na całym świecie ich obecny poziom często przekracza maksymalne wartości ustalone przez Światową Organizację Zdrowia [7].



Rys. 1. Emisja związków toksycznych ze źródeł motoryzacyjnych – pozadrogowych (USA – 2000) [14]



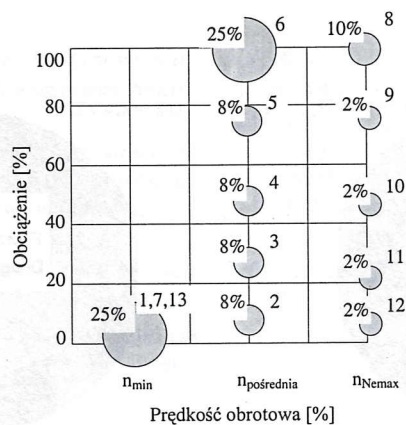
Rys. 2. Zmiany w ilości emitowanych związków toksycznych z pojazdów o zastosowaniach drogowych [12]

3. Przepisy toksyczności spalin

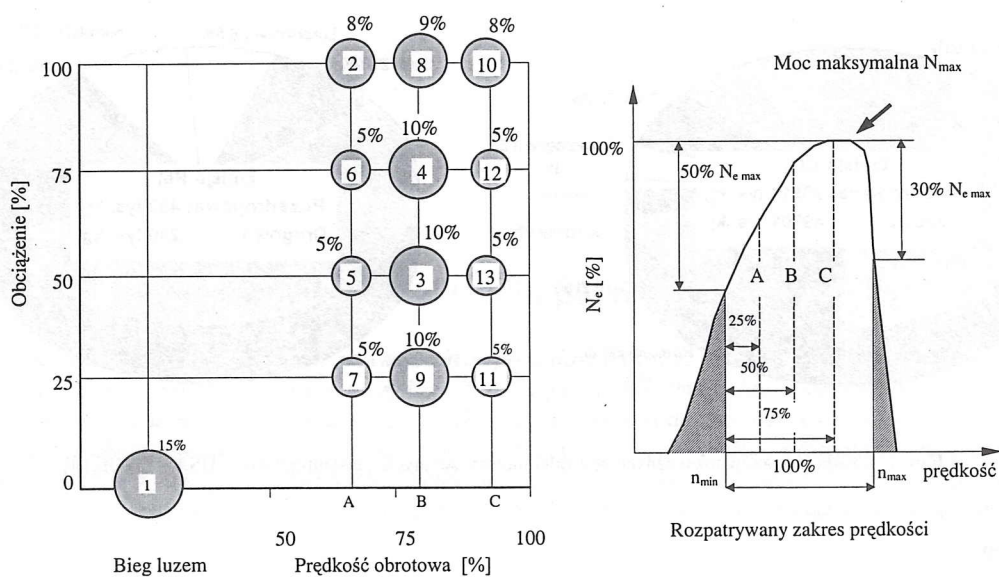
2.1. Przepisy europejskie

Badania silników ZS (do napędu pojazdów o dopuszczalnej masie całkowitej powyżej 3500 kg – przeznaczonych do lokomotyw i innych pojazdów szynowych) pod względem toksyczności spalin wykonuje się na hamowni silnikowej. Są to prawie wyłącznie silniki o wtrysku bezpośrednim (HD-DI-D – *Heavy Duty-Direct Injection-Diesel*). Obecnie obowiązująca Dyrektywa 1999/96/EC (EURO III) została wprowadzona w 2000 roku. Test ECE R49 (obowiązujący jeszcze

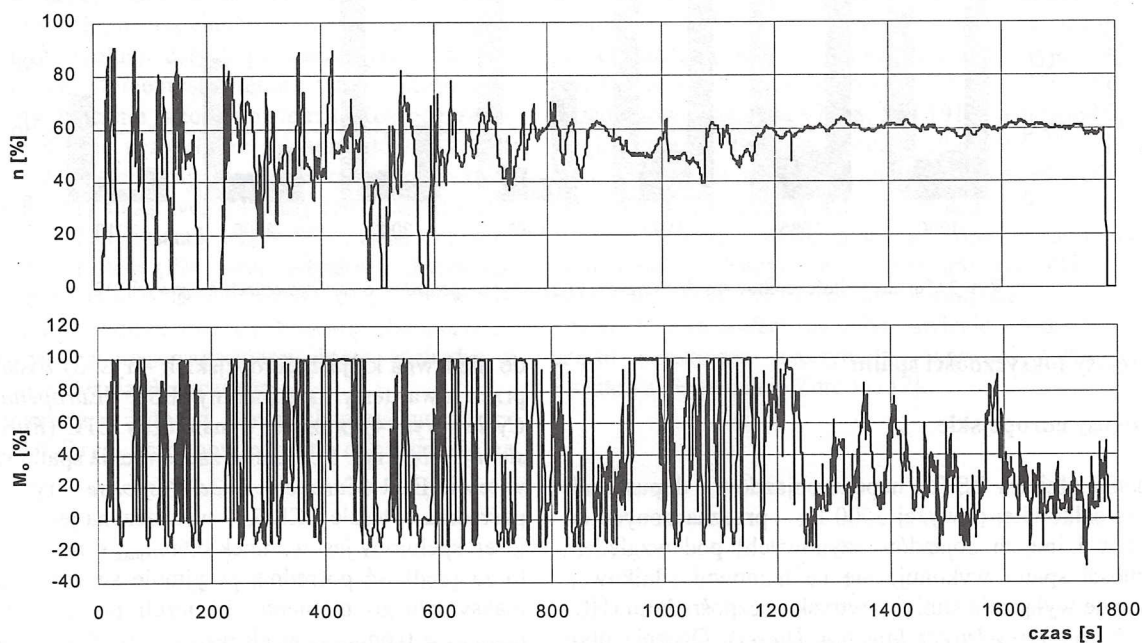
do niedawna krajach europejskich – rys. 3) został zastąpiony przez dwa testy: stacjonarny ESC (*European Stationary Cycle* – rys. 4) oraz test dynamiczny ETC (*European Transient Cycle* – rys. 5). Pomiar zaciemnienia spalin wykonuje się w teście ELR (*European Load Response* – rys. 6). Prędkość pośrednia w teście ECE R49 wyznaczana jest następująco: a) jeżeli spełniony jest warunek $0,6n_{Nemax} < n_{Momax} < 0,75n_{Nemax}$, to za prędkość pośrednią przyjmuje się prędkość obrotową maksymalnego momentu, b) jeżeli $n_{Momax} < 0,6n_{Nemax}$, to $n_{pośrodkie} = 0,6n_{Nemax}$, jeżeli $n_{Momax} > 0,75n_{Nemax}$, to $n_{pośrodkie} = 0,6n_{Nemax}$.



Rys. 3. Schemat testu 13-fazowego według regulaminu ECE R49.03 – pola kół są proporcjonalne do udziałów poszczególnych faz w teście [9]



Rys. 4. Schemat stacjonarnego testu ESC [9]



Rys. 5. Schemat dynamicznego testu ETC (ujemny moment reprezentuje obcy napęd) [9]

Test ESC wykonywany jest na hamowni silnikowej w kolejności faz określonych według rysunku 4. Przygotowanie punktu pracy odbywa się w pierwszych 20 sekundach fazy. Dopuszczalny błąd prędkości obrotowej dla punktu pomiarowego wynosi ± 50 obr/min – momentu obrotowego $\pm 2\%$ $M_{0\max}$ dla badanej prędkości obrotowej. Emisja związków toksycznych mierzona jest jako średnia ważona w teście (z wykorzystaniem współczynników udziału faz). Czas pracy silnika w poszczególnych punktach pomiarowych (fazach) wynosi 2 minuty (wyjątek stanowi pierwsza faza – 4 minuty), a więc cały test trwa 28 minut. Prędkości obrotowe są zdefiniowane następująco, na podstawie charakterystyki pełnej mocy [4, 5, 8]:

1. Prędkość obrotowa maksymalna ($n_{\max}$) – po przekroczeniu mocy maksymalnej, gdy silnik uzyskuje $70\% N_{e\max}$.
2. Prędkość obrotowa minimalna ($n_{\min}$) – silnik uzyskuje $50\% N_{e\max}$.
3. Poszczególne prędkości faz A, B, C oblicza się z zależności:

$$A = n_{\min} + 0,25 \cdot (n_{\max} - n_{\min})$$

$$B = n_{\min} + 0,50 \cdot (n_{\max} - n_{\min})$$

$$C = n_{\min} + 0,75 \cdot (n_{\max} - n_{\min})$$

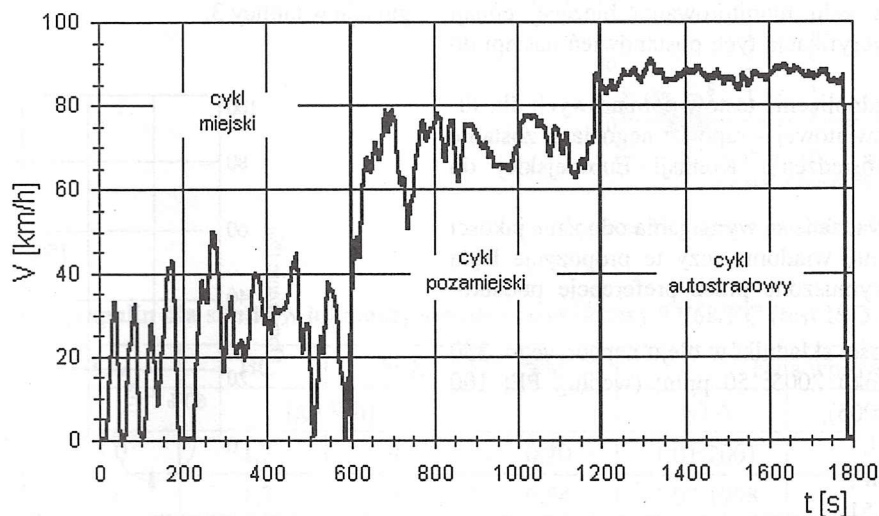
Integralną częścią testu ESC jest pomiar zaczernienia spalin wykonywany w teście ELR, a charakterystyczne punkty pomiarowe określono na podstawie schematu testu ESC. Wartość współczynnika absorpcji (k) określa się na podstawie formuły obliczeniowej [6, 11]:

$$k = 0,43 \cdot k_A + 0,56 \cdot k_B + 0,01 \cdot k_C,$$

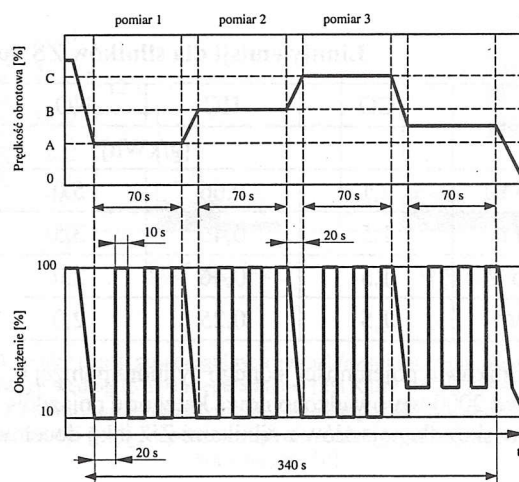
gdzie: k_A , k_B , k_C – wartość współczynnika absorpcji w punktach pomiarowych [m^{-1}] (wg rys. 6).

Test ETC wykonywany jako dynamiczny, określony jest przez prędkość obrotową silnika i moment obrotowy w funkcji czasu. Czas trwania testu wynosi 1800 sekund i można wyodrębnić w nim trzy części:

1. pierwsza – reprezentująca jazdę miejską z maksymalną prędkością 50 km/h (ruszanie z miejsca, zatrzymanie i praca silnika na biegu jałowym),



Rys. 7. Schemat testu ETC wykonywanego na hamowni podwoziowej



Rys. 6. Przebieg Europejskiego Testu Obciążenia (ELR) dotyczącego pomiaru zaczernienia spalin przewidywanego normą EURO III (punkty pomiarowe A, B, C – według rysunku 4) [1]

2. druga – jazda podmiejska ze stopniowym przyspieszaniem – średnia prędkość 72 km/h,
3. trzecia – reprezentująca jazdę na autostradzie – średnia prędkość 88 km/h.

Test ten przygotowany jest zarówno jako wykonywany na hamowni silnikowej (określona prędkość obrotowa – moment obrotowy) lub na hamowni podwoziowej (określona prędkość pojazdu w km/h – rys. 7). Do badań certyfikacyjnych wymagany jest test silnikowy.

Test ESC obowiązuje (jako główny) dla wszystkich nowych silników ZS Heavy Duty (limity emisji – tabl. 1), jednakże silniki wyposażone w filtr cząstek stałych lub katalizator DeNOx (do redukcji tlenków azotu) muszą spełniać limity dla testu ETC (tabl. 2). Dla silników zasilanych gazem obowiązuje tylko test ETC (z pomiarem NMHC i bez pomiaru cząstek stałych).

Tablica 1

Limity emisji dla silników ZS do pojazdów HDV (według testu ESC + ELR) [1]

Norma	CO	HC	NO _x	PM	k	Data wprowadzenia	
	[g/kWh]				[m ⁻¹]	NTA	ANR
Euro III	2,1	0,66	5,0	0,1/0,13 ¹⁾	0,8	* 1.10.2000	1.10.2001
Euro IV	1,5	0,46	3,5	0,02	0,5	1.10.2005	1.10.2006
Euro V	1,5	0,46	2,0	0,02	0,5	1.10.2008	1.10.2009
EEV ²⁾	1,5	0,25	2,0	0,02	0,15	–	–

¹⁾ dla silników o pojemności jednego cylindra poniżej 0,75 dm³ i prędkości obrotowej powyżej 3000 obr/min,

²⁾ od roku 2000 wprowadzono nową kategorię pojazdów EEV (*Enhanced Environmentally Friendly Vehicle* – pojazd przyjazny środowisku) dla pojazdów z silnikami ZS, jako docelową dla silników HDD.

Tablica 2

Limity emisji jednostkowych dla silników ZS do pojazdów HDV (według testu ETC) [1]

Norma	CO	NMHC	CH ₄ ²⁾	NO _x	PM ³⁾	Data wprowadzenia	
	[g/kWh]					NTA	ANR
Euro III	5,45	0,78	1,6	5,0	0,16/0,21 ¹⁾	1.10.2000	1.10.2001
Euro IV	4,0	0,55	1,1	3,5	0,03	1.10.2005	1.10.2006
Euro V	4,0	0,55	1,1	2,0	0,03	1.10.2008	1.10.2009
EEV	3,0	0,40	0,65	2,0	0,02	–	–

¹⁾ dla silników o pojemności jednego cylindra poniżej 0,75 dm³ i prędkości obrotowej powyżej 3000 obr/min,

²⁾ tylko dla silników zasilanych gazem,

³⁾ nie dotyczy silników zasilanych gazem po roku 2000.

Limity emisji dla norm obowiązujących w latach 2005–2008 są znaczenie zredukowane w związku z wprowadzaniem urządzeń oczyszczających spaliny (m.in. katalizatorów utleniających, DeNO_x oraz filtrów cząstek stałych). Limity emisji NO_x dla normy Euro V będą zweryfikowane do 31.12.2002 roku, w zależności od możliwości technologicznych producentów silników [13].

Od 1.10.2005 roku nowo homologowane pojazdy (a od 1.10.2006 wszystkie produkowane ZS) muszą być wyposażone w system diagnostyki pokładowej (OBD – *On Board Diagnostic*) lub w pokładowy system pomiarowy (OBM – *On Board Measuring*) w celu monitorowania bieżącej emisji spalin silnikowych (weryfikacja tych postanowień nastąpi do 30.07.2002 roku).

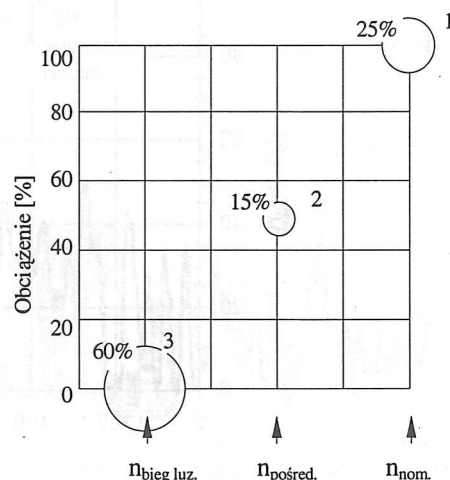
Przewiduje się ujednolicenie testów pomiarowych dla silników HDD w skali światowej – raport z negocjacji zostanie przedstawiony na posiedzeniu Komisji Europejskiej do 31.12.2001 roku [1].

Dodatkowo wprowadzane są wymagania odnośnie jakości paliwa (do tej pory nie wiadomo, czy te propozycje będą obowiązkowe, czy wymuszone przez preferencje podatkowe):

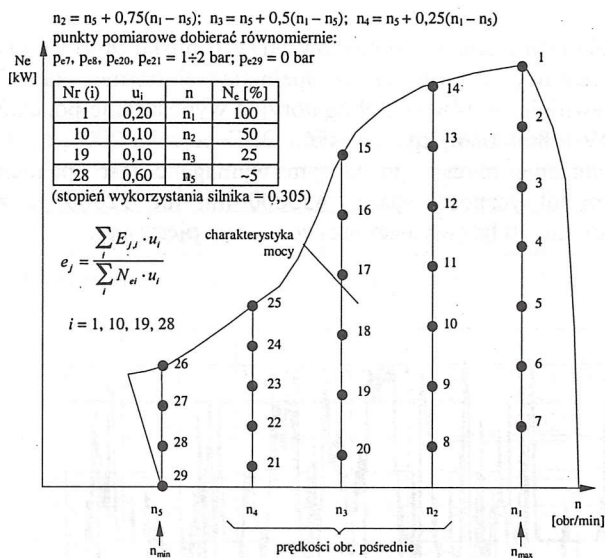
- maksymalne wartości składników oleju napędowego: 350 ppm siarki – po roku 2005: 50 ppm; (według PE: 100 ppm, 50 po roku 2005),
- 11% masowo PAH,
- gęstość < 845 kg/m³,
- liczba cetanowa ≥ 51,
- 95% odparowania przy 360°C.

Europejskie przepisy dotyczące silników trakcji szynowej: lokomotyw (w tym manewrowych) oraz autobusów

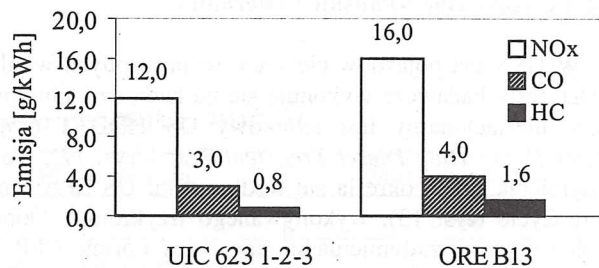
szynowych zostały zawarte w Karcie UIC 623. Dopuszczalne wartości emisji zostały ustalone w 1997 r. i mają zastosowanie do nowo produkowanych silników ZS (ISO 8178-F, rys. 8 i 10). Według francuskiego regulaminu ORE B13 (*Office de Recherches et d'Essais* – Kolejowy Urząd Badań i Prób, który od 1997 r. został przekształcony w ERRI *European Rail Research Institute* – Europejski Instytut Badań Kolejowych) określony został test badawczy, którego przebieg pokazano na rysunku 9 [10]. Do obliczeń należy uwzględnić 4 punkty pomiarowe. Dopuszczalne obowiązujące wartości emisji przedstawiono na rysunku 10, natomiast przyszłe regulacje w tablicy 3.



Rys. 8. Schemat testu ISO 8178-F dla wymagań Karty UIC 623 [9]



Rys. 9. Schemat testu ORE B13 [10]



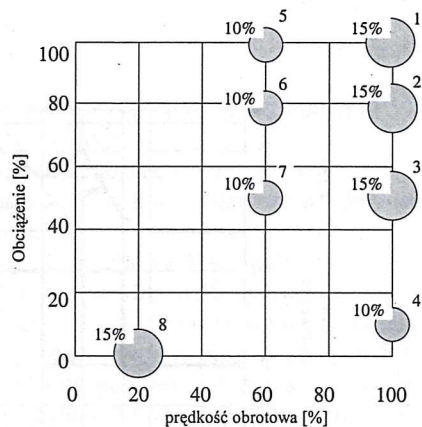
Rys. 10. Limity emisji poszczególnych związków toksycznych dla pojazdów szynowych według różnych regulaminów (dla Karty UIC 623 obowiązuje test ISO 8178-F oraz test zadymienia, dla którego dopuszczalne wartości wynoszą 2,5/1,6 [j.s.B.] – pełne obciążenie/średnia prędkość obrotowa wału korbowego) [10]

Tablica 3

Przyszłe limity emisji spalin dla silników trakcji kolejowej według Karty UIC 623 – test ISO 8178-F [1]

Moc silnika	Prędkość obrotowa	CO	HC	NO _x	PM	Data wprowadzenia
N _e [kW]	n [obr/min]	[g/kWh]				
N _e > 560	n > 1000	3,0	0,8	9,5	0,25	1.01.2003
N _e > 560	n ≤ 1000	3,0	0,8	9,9	0,25	1.01.2003
N _e ≤ 560	–	2,5	0,6	6,0	0,25	1.01.2003
N _e > 560	–	2,0	0,5	6,0	0,2	1.01.2008
N _e ≤ 560	–	2,0	0,5	4,5	0,15	1.01.2008

Silniki stosowane w lokomotywach można zakwalifikować również jako silniki wykorzystywane w pojazdach do zast osowań pozadrogowych. W takim ujęciu obowiązują dla nich normy określone Dyrektywą 97/68/EC. Obowiązującym testem badawczym jest ISO 8178-C1 (rys. 11) – limity emisji obowiązujące (Poziom 1) i przyszłe (Poziom 2) przedstawi ono w tablicy 4.



Rys. 11. Schemat testu ISO 8178-C1 [1]

Tablica 4

Przyszłe limity emisji spalin dla silników lokomotyw według Dyrektywy 97/68/EC (test ISO 8178-C1) [1]

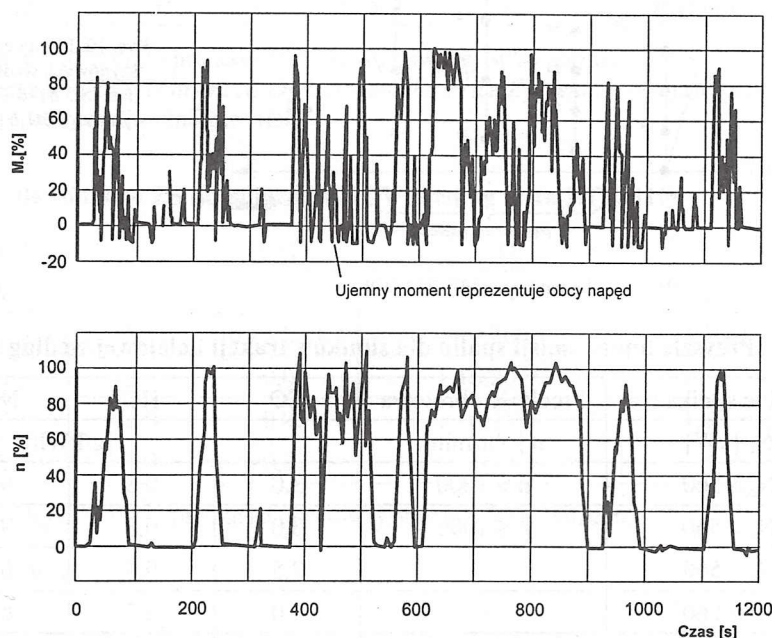
Moc silnika		CO	HC	NO _x	PM	Data wprowadzenia	
N _e [kW]		[g/kWh]				NTA	ANR
Poziom 1	75–130	5,0	1,3	9,2	0,70	1.01.2001	1.07.2001
	130–560	5,0	1,3	9,2	0,54	1.07.1998	1.01.1999
Poziom 2	75–130	5,0	1,0	6,0	0,3	1.01.2002	1.07.2003
	130–560	3,5	1,0	6,0	0,2	1.01.2001	1.07.2002

2.2. Przepisy amerykańskie (federalne)

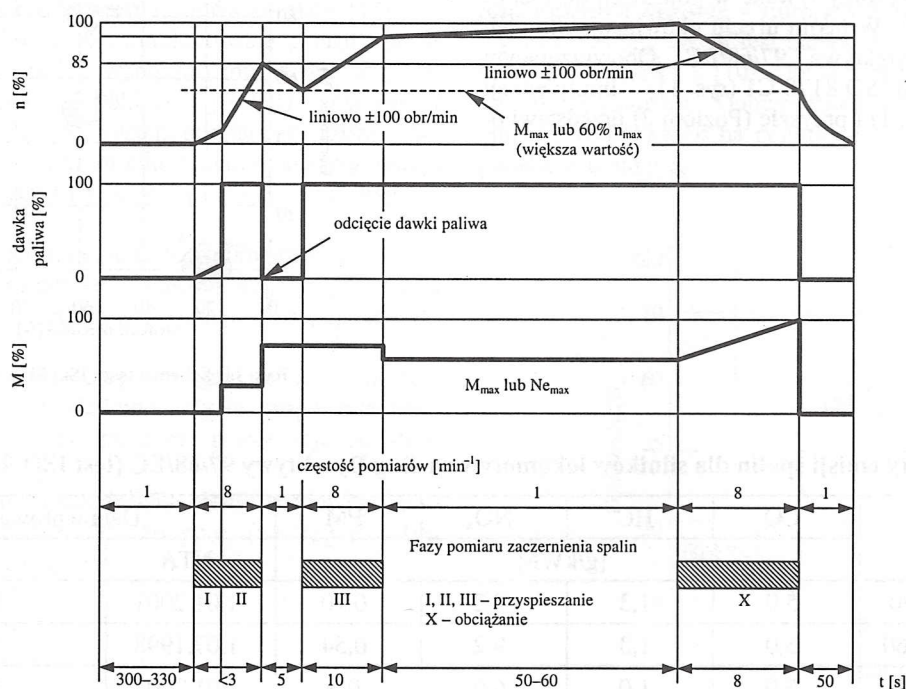
W USA dla pojazdów ciężkich, wyposażonych w silniki HDD, testy badawcze wykonuje się na hamowni silnikowej, m.in. niestacjonarny test silnikowy US HDDTT (*United States Heavy Duty Diesel Transient Test* – rys. 12). Normy zadymienia spalin określa się według testu US EPA Smoke Test Cycle (rys. 13), wykonywanego trzykrotnie. Dopuszczalne wartości zadymienia są zawarte w normie CFR T40 Subpart 1 (tabl. 5). Dla silników ZS dopuszczalne emisje w USA wyrażone są w g/KMh i są określone dla silników zasilanych olejem napędowym i metanolem (tabl. 6) [2, 3].

Urząd Ochrony Środowiska w USA (EPA – *Environmental Protection Agency*) proponuje nowe standardy dla pojazdów HDV. W pierwszej fazie nowe limity emisji będą obowiązywać od roku 2004 dla pojazdów o masie całkowitej powyżej 3860 kg (8500 lbs). Natomiast dla wszystkich pojazdów HDV nowe standardy i testy certyfikacyjne obowiązywać będą od roku 2007 (np. obniżenie limitów łącznej emisji HC + NO_x do poziomu 2,4 g/KMh). Zmiany przepisów spowodują obniżenie emisyjności nowych pojazdów w stosunku do obecnych o ponad 40%. Druga faza zmian obejmuje także zmiany właściwości paliw (w latach 2006–2007) – łączny efekt tych zmian

to obniżenie emisji z pojazdów HDV o blisko 90% (limity i procentowy udział pojazdów spełniających normę – tabl. 7). Przewiduje się również obligatoryjne wyposażanie pojazdów HDV (3860–6360 kg) w system OBD od roku 2005, a także wydłużenie okresu, po którym wymagane jest spełnienie norm toksyczności spalin: 435000 mil lub 22000 godzin pracy lub 10 lat (w zależności co nastąpi pierwsze).



Rys. 12. Schemat testu HDDTT [1]



Rys. 13. Schemat testu zadymienia spalin Smoke Test Cycle [1]

Tablica 5

Maksymalne wartości zaczernienia spalin dla silników HDD [1]

Faza cyklu	Przyspieszanie	Prędkość stała	Max. obciążenie
Zaczernienie	20%	15%	50%

Spełnienie norm po przebiegu 290 000 mil lub po 8 latach, w zależności co nastąpi pierwsze.

Tablica 6

Dopuszczalne wartości emisji dla pojazdów z silnikami ZS (test HDDTT) [1]

	CO	THCE ²⁾	HC	NO _x	PM
	[g/KMh]				
Olej napędowy	15,5	–	1,3	4,0	0,1
Metanol	15,5 ¹⁾	1,3	–	4,0	–

¹⁾ Limit CO na biegu luzem 0,5%;

²⁾ Total Hydrocarbon Equivalent – całkowity ekwiwalent węglowodorowy.

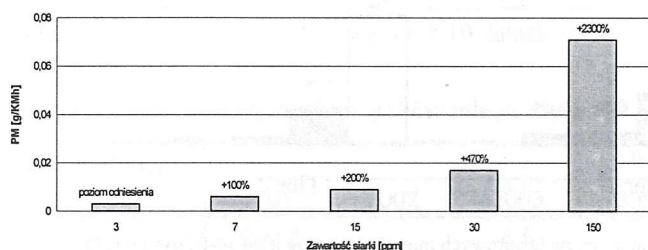
Tablica 7

Dopuszczalne wartości emisji dla pojazdów z silnikami ZS i udział procentowy pojazdów spełniających normę w latach 2007–2010 [1, 13]

Związek	Limit	Procentowy udział pojazdów dla modelu roku			
	[g/KMh]	2007	2008	2009	2010
NO _x	0,20	50%	50%	50%	100%
NMHC	0,14	50%	50%	100%	100%
PM	0,01	100%			

Dyskutowane jest wprowadzenie limitów emisji formaldehydów na poziomie 0,016 g/KMh.

Proponowane jest również obniżenie zawartości siarki w paliwie do poziomu 15 ppm (początek obowiązywania – 1.07.2006). Jak wykazały badania EPA, obniżenie emisji cząstek stałych można uzyskać przez obniżenie dopuszczalnego limitu zawartości związków siarki w paliwie (rys. 14).



Rys. 14. Oszacowane wartości emisji PM dla paliwa o różnej zawartości siarki (porównawczo w suplemencie testu FTP75) [1]

Ze względu na znaczny udział silników ZS w transporcie kolejowym USA przewiduje się redukcję emisji NO_x o około 60%, o 50% redukcję HC i PM oraz o 15% redukcję emisji CO do roku 2010. Z tego względu przewidziana jest etapowa redukcja składników toksycznych spalin.

Etapy wprowadzania standardów emisji:

Tier 0 – zastosowanie do silników produkowanych od 1973 do 31.12.2001 r.

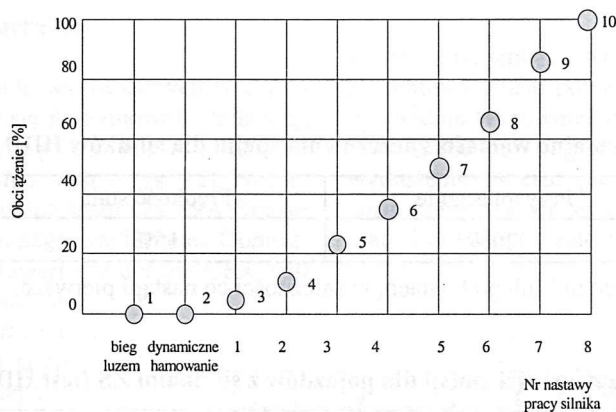
Tier 1 – zastosowanie do silników produkowanych od 1.01.2002 do 1.01.2005 r.

Tier 2 – zastosowanie do silników produkowanych po 1.01.2005 r.

Tabor spalinowych pojazdów trakcyjnych w USA został podzielona na 3 typy:

- o mocy do 1500 kW – manewrowe,
- o mocy ok. 2200 kW – lokomotywy do pociągów pasażerskich,
- o mocy ponad 3000 kW – lokomotywy towarowe.

W USA wprowadzono 10-fazowy test badawczy (rys. 15) dla spalinowych pojazdów trakcyjnych różniący się współczynnikami wagowymi w poszczególnych fazach. Przygotowanie silnika do pomiaru odbywa się w następujący sposób: nagrzanie silnika do normalnej temperatury pracy, pełna moc utrzymywana przez 5 minut, bieg luzem – minimum 15 minut. Czas pracy na poszczególnych fazach testu: fazy 1–9: 6 minut, faza 10: minimum 15 minut. Udziały poszczególnych faz w zależności od zakwalifikowanego typu pojazdu przedstawiono w tablicy 8. Normą objęte są składniki gazowe (rys. 16 i 17) oraz zaczernienie spalin (tabl. 9) – brak norm emisji dla lokomotyw pasażerskich. Pomiar jest realizowany podczas przyspieszania od prędkości biegu jałowego (faza 1) do prędkości obrotowej mocy maksymalnej (faza 10). Przyszłe limity emisji obowiązywać będą również dla lokomotyw zasilanych paliwami alternatywnymi (w tym gazem ziemnym). Przewiduje się także wprowadzenie dodatkowych limitów emisji aldehydów (tabl. 10).

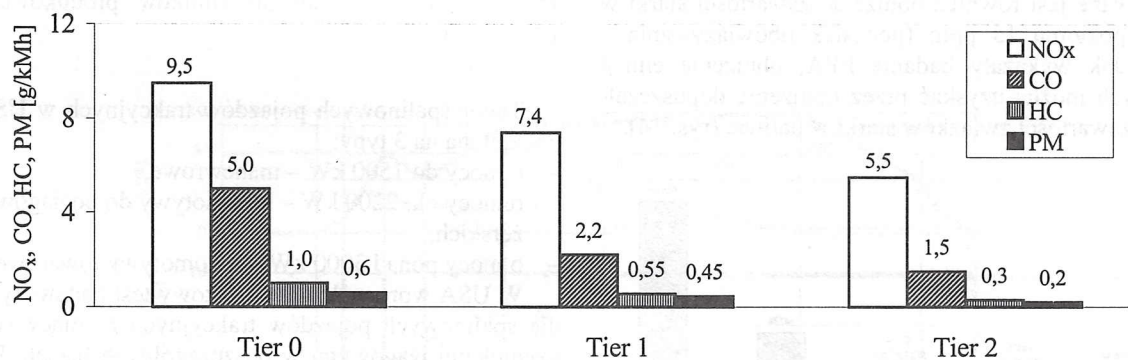


Rys. 15. Przebieg testu 10-fazowego EPA [1]

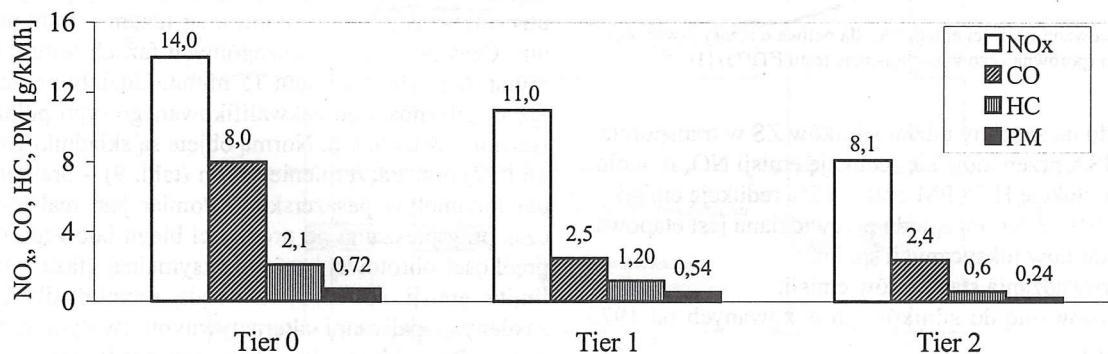
Tablica 8

Współczynniki udziału faz 10-fazowego testu badawczego USA [1, 14]

Nr fazy	Moc [%]	Typ lokomotywy		
		manewrowe	pasażerskie	towarowe
1	luz	0,380	0,474	0,598
2	–	0,125	0,062	0,000
3	4,5	0,065	0,070	0,124
4	11,5	0,065	0,051	0,123
5	23,5	0,052	0,057	0,058
6	35,0	0,044	0,047	0,036
7	48,5	0,038	0,040	0,036
8	64,0	0,039	0,029	0,015
9	85,0	0,030	0,014	0,002
10	100,0	0,162	0,156	0,008



Rys. 16. Dopuszczalne limity emisji związków toksycznych dla silników lokomotyw towarowych mierzone według testu 10-fazowego [14]



Rys. 17. Dopuszczalne limity emisji związków toksycznych dla silników lokomotyw manewrowych mierzone według testu 10-fazowego [14]

Tablica 9

Maksymalne wartości zaczernienia spalin dla silników lokomotyw (niezależnie od zastosowania) [1]

Etap	Przyspieszanie	Prędkość stała	Max. obciążenie
Tier 0	40%	30%	50%
Tier 1	40%	25%	50%
Tier 2	40%	20%	50%

Tablica 10

Limity emisji związków toksycznych [g/KMh] dla lokomotyw zasilanych paliwami alternatywnymi (test 10-fazowy) [1]

Etap ¹⁾	lokomotywy manewrowe			lokomotywy towarowe		
	CO	PM	HCHO	CO	PM	HCHO
Tier 0	10	0,30	–	12	0,36	–
Tier 1	10	0,22	0,035	12	0,27	0,067
Tier 2	10	0,10	0,018	12	0,12	0,036

¹⁾Spełnienie wymagań dla etapów Tier 0, 1 i 2: odpowiednio 750000, 800000, 900000 mil.

Dla silników o zastosowaniach pozadrogowych (stosowanych również w pojazdach szynowych) obowiązuje w USA test badawczy ISO 8178-C1. W normie CFR 40-9.86 i 89 ustalono trzy etapy wprowadzania norm: Tier 1 (przepisy aktualnie obowiązujące – tabl. 11 i 12), Tier 2 (data wprowadzania – 2001–2006), Tier 3 (obowiązująca od 2006–2008); limity emisji – tablica 13. Od roku 2000 wprowadzono kategorię silników desygnowanych nazwą „Blue Sky Series”, dla której obowiązują zmniejszone limity emisji węglowodorów (bez udziału metanu) i cząstek stałych (tabl. 14).

Tablica 11

Limity emisji związków toksycznych [g/kWh] (Tier 1) dla silników o zastosowaniu pozadrogowym w USA (test ISO 8178-C1) [1]

Moc silnika [kW]	Data wprowadzenia	CO	HC	NO _x	PM
131–560	1.01.1996	11,4	1,3	9,2	0,54
> 560	1.01.2000	11,4	1,3	9,2	0,54

Tablica 12

Maksymalne wartości zadymienia spalin (Tier 1) dla silników o zastosowaniu pozadrogowym w USA [1]

Faza cyklu	Przyspieszanie	Prędkość stała	Max. obciążenie
Zaczernienie [%]	20%	15%	50%

Spełnienie wymagań po 8 000 godzin lub 10. latach.

Tablica 13

Przyszłościowe limity emisji związków toksycznych dla silników o zastosowaniu pozadrogowym (test ISO 7187-C1) [1]

Moc silnika [kW]	NMHC + NO _x / CO / PM [g/kWh]							
	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
130–225	Tier 2 6,6 3,5 0,2					4,0	Tier 3	
						3,5		
						**		
225–450	6,4 3,5 0,2					4,0		
						3,5		
						**		
450–560	6,4 3,5 0,2					4,0		
						3,5		
						**		
> 560						6,4		
						3,5		
						0,2		

** limity cząstek stałych będą ustalone do końca 2001 roku.

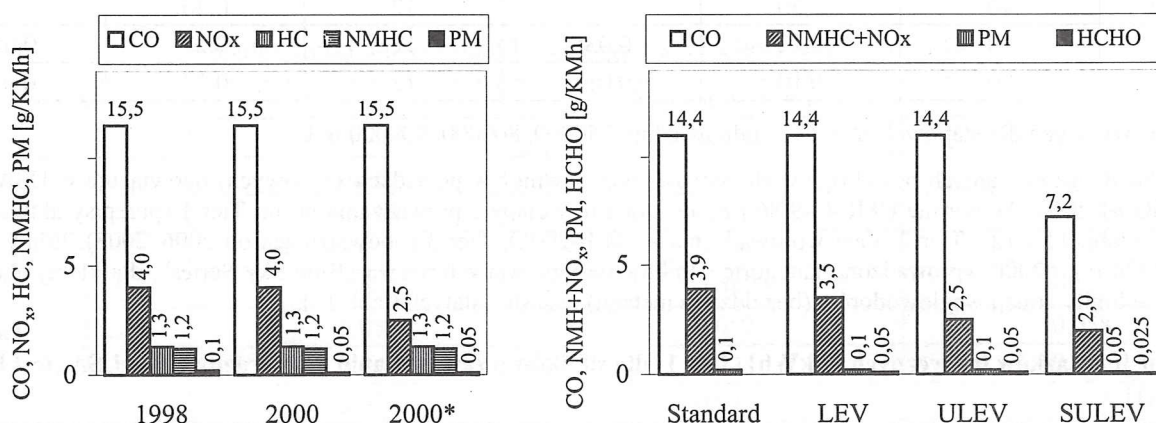
Tablica 14

Maksymalne wartości emisji [g/kWh] i okresy badawcze dla silników typu „Blue Sky Series” (test ISO 7187-C1) [1]

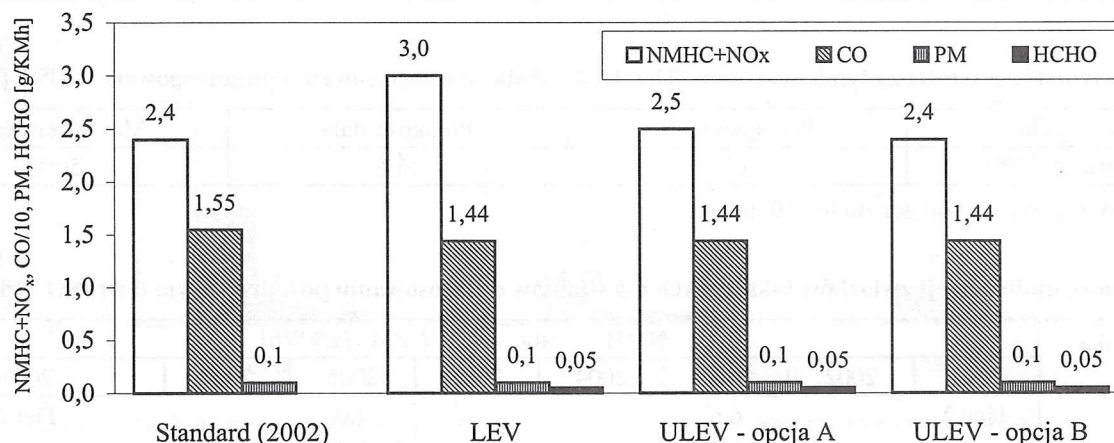
Moc silnika [kW]	NMHC + NO _x	PM	Badanie po okresie	Gwarancja
130–560	4,0	0,12	10 lat / 8 000 godzin	7 lat / 6 000 godzin
> 560	3,8	0,12	10 lat / 8 000 godzin	7 lat / 6 000 godzin

2.3. Przepisy kalifornijskie

Kalifornijskie przepisy toksyczności spalin dzielą silniki na kategorie emisyjne (LEV = *Low Emission Vehicles* – pojazdy o niskiej emisji, ULEV = *Ultra Low Emission Vehicles* – pojazdy o bardzo niskiej emisji, SULEV = *Super Ultra Low Emission Vehicles* – pojazdy o super niskiej emisji). Obecne przepisy dla pojazdów HDV obowiązują od roku 1998 (rys. 18), kolejne zaostrzenia norm przewidziane są od roku 2002 (rys. 19) [1, 13, 14].



Rys. 18. Limity emisji związków toksycznych dla pojazdów HDV Kalifornii: * – silniki zasilane paliwem alternatywnym, NMHC – tylko dla silników zasilanych metanolem, CO na biegu luzem 0,5%, spełnienie wymagań emisji NO_x po 10 latach, test HDDTT [1]



Rys. 19. Przyszłe limity emisji związków toksycznych dla pojazdów HDV Kalifornii, test HDDTT [1]

Dla silników o zastosowaniach pozadrogowych (stosowanych również w pojazdach szynowych) obowiązuje w Kalifornii test badawczy ISO 8178-C1 (obowiązujący także w przepisach federalnych). W normie CCR 13-3.9 ustalono etapy wprowadzania norm: Tier 1, Tier 2 i Tier 3. Limity emisji dla Tier 1 przedstawiono w tablicy 15 i 16, natomiast normy Tier 2 i 3 są zgodne z federalnymi.

Tablica 15

Limity emisji (Tier 1) dla silników o zastosowaniu pozadrogowym w Kalifornii (test ISO 8178-C1) [1]

Moc silnika [kW]	Data wprowadzenia	CO	HC	NO _x	PM	Zaczernienie spalin ¹⁾		
		[g/KMh]				[%]		
175–750	2001	8,5	1,0	5,8	0,16	20	15	35
> 750	2000	8,5	1,0	6,9	0,4	20	15	50

¹⁾ Mierzone w fazach: przyspieszanie, prędkość stała, maksymalne obciążenie.

Tablica 16

Maksymalne wartości zadymienia spalin (Tier 1) dla silników o zastosowaniu pozadrogowym w Kalifornii [1]

Faza cyklu	Przyspieszanie	Prędkość stała	Max. obciążenie
Zaczernienie [%]	20%	15%	50%

3. Prognozy rozwoju przepisów w Europie i USA

Niezaprzeczalnym jest, że rozwój silników ZS zależy od tego, jak szybko będą wprowadzane kolejne dyrektywy odnośnie dopuszczalnych emisji składników spalin. Presje środowisk ekologicznych jest tak silna, że należy spodziewać się kolejnych barier w stosunkowo krótkim czasie.

Tendencje w badaniach i kontroli emisji spalin z silników trakcyjnych odznaczają się zdecydowanym zaostrzeniem kryteriów oceny silników. W procedurach badawczych dąży się do:

- ujednolicenie we wszystkich krajach przepisów dotyczących norm i badań do wymogów USA (przede wszystkim norm EU z USA),
- zwiększenie stopnia złożoności i pracochłonności badań homologacyjnych poprzez wprowadzenie różnych i coraz bardziej reprezentatywnych kombinacji testów (*Compliance Test*) w badaniach rozwojowych, z wykorzystaniem tzw. analizy modalnej, czyli określenia chwilowej emisji związków toksycznych w nieustalonych warunkach pracy silnika,
- wprowadzenie norm limitujących oprócz sumy węglowodorów, poszczególne ich związki o największej toksyczności, zwłaszcza z grupy wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych PAH (np. benzo(a)piren, fluoranten) lub inne związki toksyczne (np. benzen, aldehyd mrówkowy HCHO),
- wprowadzenie limitów emisji CO₂, a więc programu obniżenia zużycia paliwa,
- rozszerzenie norm emisji na wszystkie typy stosowanych silników i ich zastosowania (ISO), z uwzględnieniem specyfiki silników na paliwa alternatywne,
- rozwój metod kontroli spełnienia limitów emisji w pojazdach będących w eksploatacji, przez wprowadzenie okresowej kontroli na mniej skomplikowanych niż w badaniach homologacyjnych stanowiskach hamownianych w uproszczonych testach,
- uwzględniania w badaniach najbardziej niekorzystnej dla środowiska fazy rozruchu silnika nienagrzanego,
- badania emisji podczas rozruchu silnika w niskich temperaturach,
- kontroli spełnienia wymagań norm po zwiększonym przebiegu pojazdu,

- stosowania do badań silników o zapłonie samoczynnym oprócz testów statycznych również testów dynamicznych, bardziej reprezentatywnych dla rzeczywistej eksploatacji,
- wprowadzania coraz ostrzejszych limitów emisji.

W planowanych nowelizacjach przepisów dotyczących paliw silnikowych proponuje się ograniczanie limitów zawartości składników sprzyjających zwiększeniu emisji substancji toksycznych. Dotyczy to m.in. ograniczenia zawartości związków siarki oraz węglowodorów aromatycznych i pierścieniowych.

Wymagania dotyczące monitorowania układów pojazdów, wyposażonych w silniki ZS, przez układy OBD lub OBM:

- sygnalizowanie obniżenia skuteczności działania reaktora katalizacyjnego, jeśli jest zamontowany,
- kontrolowanie poprawności działania filtra cząstek stałych (jeśli jest zamontowany),
- sprawdzanie ciągłości obwodów i prawidłowości działania elementów elektronicznych systemu wtrysku paliwa,
- kontrolowanie poprawności pracy systemów lub elementów kontroli emisji (systemów i elementów układu napędowego), oddziaływujące na emisję spalin, współpracujące z komputerem centralnym, których uszkodzenie może powodować przekroczenie wartości dopuszczalnych emisji; przykładem są systemy i elementy służące do sprawdzania i monitorowania masowego lub objętościowego przepływu powietrza, temperatury, ciśnienia doładowania,
- diagnozowanie rozpoczynające się wraz z każdym rozruchem silnika i kończące się po stwierdzeniu poprawności wyników testu.

Oznaczenia i skróty

ANR	<i>All New Registrations</i> – wszystkie nowe rejestracje
CO	tlenek węgla
EEV	<i>Enhanced Environmentally Friendly Vehicle</i> – pojazd przyjazny środowisku
ELR	<i>European Load Response</i> – europejski test obciążenia dla silników ZS
EPA	<i>Environment Protection Agency</i> – Urząd Ochrony Środowiska w USA

ERRI	<i>European Rail Research Institute</i> – Europejski Instytut Badań Kolejowych
ESC	<i>European Stationary Cycle</i> – europejski test stacjonarny dla silników ZS
ETC	<i>European Transient Cycle</i> – europejski test dynamiczny dla silników ZS
EU	<i>European Union</i> – Unia Europejska
FTP	<i>Federal Test Procedure</i> – federalny test jezdny USA
HCHO	<i>formaldehyde</i> – aldehyd mrówkowy (formaldehyd)
HDD	<i>Heavy Duty Diesel</i> – silnik ZS do ciężkich pojazdów
HD-DI-D	<i>Heavy Duty-Direct Injection-Diesel</i> – silnik ZS do ciężkich pojazdów o wtrysku bezpośrednim
HDDTT	<i>Heavy Duty Diesel Transient Test</i> – niestacjonarny amerykański test dla silników HDD
HDV	<i>Heavy Duty Vehicle</i> – ciężki pojazd samochodowy
ISO	<i>International Standards Organization</i> – Międzynarodowa Organizacja Normalizacyjna
k	współczynnika absorpcji
lbs	pounds (1 lb = 454 g) – funty
LEV	<i>Low Emission Vehicles</i> – pojazdy o niskiej emisji,
NMHC	<i>Non Methane Hydrocarbons</i> – węglowodory bez udziału metanu
NO _x	tlenki azotu
NTA	<i>New Type Approvals</i> – zatwierdzenie nowego typu
O ₃	ozon troposferyczny
OBD	<i>On Board Diagnostic</i> – pokładowy system diagnozowania
OBM	<i>On Board Measuring</i> – pokładowy system pomiarowy
ORE	<i>Office de Recherches et d'Essais</i> – Kolejowy Urząd Badań i Prób
PAH	<i>Polycyclic Aromatic Hydrocarbons</i> – wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne
Pb	ołów
PM	<i>Particulate Matter</i> – cząstki stałe
RVP	<i>Reid Vapour Pressure</i> – prężność par według Reida
SO ₂	dwutlenek siarki
SULEV	<i>Super Ultra Low Emission Vehicles</i> – pojazdy o super niskiej emisji
THCE	<i>Total Hydrocarbon Equivalent</i> – całkowity ekwiwalent węglowodorowy
ULEV	<i>Ultra Low Emission Vehicles</i> – pojazdy o bardzo niskiej emisji
ZS	silnik o zapłonie samoczynnym

Literatura

- [1] AVL Consulting & Information: *Current and Future Exhaust Emission Legislation*. AVL List GmbH. Graz 04.2001.
- [2] Bruneel H.: *Heavy Duty Testing Cycles Development: A New Metodology*. SAE Technical Paper Series 2000-01-1860.
- [3] *Code of Federal Regulations, Protection of Environment, Title 40, Parts 86. Revised as of July 1, 1995*. U.S. Government Printing Office Washington 1995.
- [4] ISO 8178-1: *Reciprocating Internal Combustion Engines – Exhaust Emission Measurement – Part 1: Test Bed Measurement of Gaseous and Particulate Emissions*. 1996.
- [5] ISO 8178-2: *Reciprocating Internal Combustion Engines – Exhaust Emission Measurement – Part 2: At-Site Measurement of Gaseous and Particulate Exhaust Emissions*. 1996.
- [6] ISO 8178-3: *Reciprocating Internal Combustion Engines – Exhaust Emission Measurement – Part 3: Definitions and Methods of Measurement of Exhaust Gas Smoke Under Steady-State Conditions*. 1994.
- [7] Merksiz J., Pielecha J.: *Wybrane zagadnienia emisji cząstek stałych w świetle nowych przepisów toksyczności spalin. III Międzynarodowa Konferencja objęta patronatem przez Naftę Polską S.A. oraz Polski Koncern Naftowy S.A. pt. „Rozwój technologii paliw w świetle Dyrektyw Europejskich i Narodowych Uregulowań Normatywnych”*. Warszawa 2000.
- [8] PN-EN ISO 8178-1: *Silniki spalinowe tłokowe – Pomiar emisji spalin – Część 1: Pomiar emisji składników gazowych i cząstek stałych na stanowisku badawczym*. 1999.
- [9] PN-EN ISO 8178-4: *Silniki spalinowe tłokowe – Pomiar emisji spalin – Część 4: Cykle badawcze silników o różnym zastosowaniu*. 1999.
- [10] Raport ORE B13.
- [11] *Reciprocating Internal Combustion Engines – Exhaust Emission Measurement. Draft International Standard ISO/DIS 8178-1.2*, 1995.
- [12] Wallentowitz H., Nuenzig D.: *Reduzierung der Schadstoffbelastungen*. ATZ Automobil-technische Zeitschrift 103, Nr 1. 2001.
- [13] Walsh M.: *Global Trends in Diesel Emissions Regulation – A 2001 Update*. SAE Paper Series 2001-01-0183.
- [14] www.epa.gov