

Tendencje w przepisach dotyczących emisji związków toksycznych przez silniki spalinowe pojazdów szynowych

Z uwagi na rosnące skażenie środowiska producenci silników spalinowych do pojazdów trakcyjnych poszukują możliwości zmniejszenia emisji substancji toksycznych, będących wynikiem spalania paliwa. Wprowadza się coraz większe ograniczenia prawne, dotyczące emisji CO, HC, NO_x i PM. Kierunki tych zmian są coraz bardziej zbieżne w przepisach europejskich i amerykańskich zarówno w odniesieniu do testów badawczych jak i dopuszczalnych limitów emisji.

Symbole i oznaczenia

ANR	<i>All New Registrations</i> – wszystkie nowe rejestracje
AVL	<i>Anstalt für Verbrennungskraftmaschinen</i> – Instytut Spalania, Graz, Austria
CH ₄	metan
CNG	<i>Compressed Natural Gas</i> – sprężony gaz ziemny
CO	tlenek węgla
CO ₂	dwutlenek węgla
DeNO _x	<i>Decrease + NO_x</i> – reaktor katalityczny obniżający NO _x
DI	<i>Direct Injection</i> – wtrysk bezpośredni
ECE	<i>Economic Commission for Europe</i> – Europejska Komisja Gospodarcza (agenda ONZ)
EGR	<i>Exhaust Gas Recirculation</i> – układ recyrkulacji spalin
ELR	<i>European Load Response Test</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
ETC	<i>European Transient Cycle</i> – europejski test niestacjonarny
HC	węglowodory
HDD	<i>Heavy Duty Diesel</i> – duże, wysilone silniki o zapłonie samoczynnym
HDV	<i>Heavy Duty Vehicle</i> – ciężki pojazd samochodowy
ISO	<i>International Standards Organisation</i> – Międzynarodowa Organizacja Normalizacyjna
k	współczynnik absorpcji
LPG	<i>Liquefied Petroleum Gas</i> – ciekłe paliwo gazowe
M _o	moment obrotowy
n	prędkość obrotowa wału korbowego
N _e	użyteczna moc silnika
NMHC	<i>Non Methane Hydrocarbons</i> – węglowodory bez udziału metanu
NO _x	tlenki azotu
NRSC	<i>Non-Road Steady Cycle</i> – pozadrogowy test stacjonarny
NRTC	<i>Non-Road Transient Cycle</i> – pozadrogowy test niestacjonarny
NTA	<i>New Type Approvals</i> – zatwierdzenie nowego typu
OBM	<i>On-Board Measuring</i> – pokładowy system pomiarowy
PM	<i>Particulate Matter</i> – cząstki stałe
THCE	<i>Total Hydrocarbons Equivalent</i> – równoważnik całkowitej emisji węglodorów
u _i	współczynnik wagowy
UIC	<i>Union Internationale des Chemins de Fer</i> – Międzynarodowy Związek Kolejowy
WHDC	<i>Worldwide Harmonized Heavy Duty Certification</i> – ujednoczenie w skali światowej testów badawczych dla silników ZS
WHSC	<i>Worldwide Harmonized Stationary Cycle</i> – ujednoczony test stacjonarny
WHTC	<i>Worldwide Harmonized Transient Cycle</i> – ujednoczony test niestacjonarny
ZI	silnik o zapłonie iskrowym
ZS	silnik o zapłonie samoczynnym

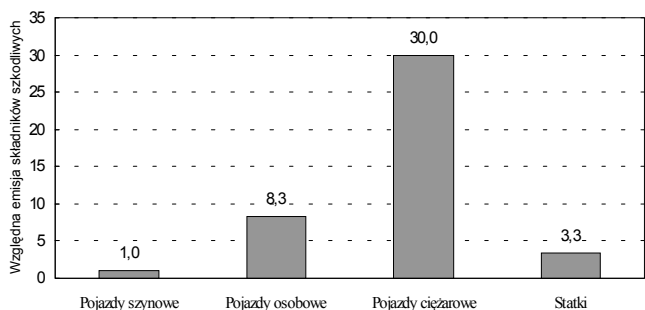
1. Wstęp

Aspektem ochrony środowiska zainteresowano się na początku lat pięćdziesiątych ubiegłego wieku, gdy w amerykańskim stanie Kalifornia zaobserwowano rozwój smogu samochodowego, który coraz częściej zaczął pojawiać się na silnie zatłoczonych drogach tego stanu.

Główną metodą ograniczania emisji spalin jest zmniejszenie zużycia paliwa przez silniki. Obecnie aż 95% emisji CO₂ pochodzi ze źródeł naturalnych (np. wybuchy wulkanów, procesy spalania), 4% pochodzi z przemysłu, a tylko 1% ze źródeł transportowych.

Emisja związków szkodliwych jest uzależniona od rodzaju środków transportu. Jej wielkość dla pojazdów szynowych w porównaniu z innymi jest bardzo korzystna. Na rys. 1 przedstawiono porównanie całkowitej emisji w odniesieniu do pojazdów szynowych.

Poziom zużycia paliwa (i pośrednio emisji CO₂) jest bardzo zróżnicowany w zależności od zastosowań obecnych środków transportu (tab. 1).



Rys. 1. Emisja składników toksycznych przez środki transportowe w odniesieniu do pojazdów szynowych

Emisja dwutlenku węgla z wybranych środków transportu [5]

Tabela 1

Środek transportu	Emisja CO ₂ na 100 km [kg]	Roczna emisja CO ₂ [t]
Motocykl	5	40 mln
Pojazd samochodowy	14	450 mln
Pojazd formuły 1	600	380
Pojazd ciężarowy	165	300 mln
Pociąg spalinowy	3500	175 mln
Pociąg TGV	0	0
Samolot (np. Boeing 747)	770 000	217 mln

2. Przepisy europejskie

2.1. Europejskie normy dotyczące pojazdów z silnikami ZS typu HDV

Pojazdy ciężarowe HDV napędzane są wyłącznie silnikami ZS DI. Norma Euro III przewiduje dla standardowych silników (elektroniczny system wtryskowy, EGR, utleniający reaktor katalityczny), badania emisji w 13-fazowym teście ESC [7] oraz ELR [7]. Jeśli silnik jest wyposażony w dodatkowe urządzenia oczyszczające spaliny (reaktor redukujący NO_x, oraz/lub filtr cząstek stałych) podlega on badaniom również w teście ETC [8].

Dopuszczalne limity emisji składników toksycznych dla tych silników według norm Euro przedstawiono w tab. 2. Dla silników HDD brak jest procedury pomiarowej emisji gazów ze skrzyni korbowej. Pojazdy wyposażone w standardowe układy zasilania oraz w utleniające reaktory katalityczne wymagają stosowania testów ESC i ELR.

Limity emisji na lata 2005–2008 przewidują montowanie w pojazdach zaawansowanych układów oczyszczających spaliny w postaci filtrów cząstek stałych i reaktorów katalitycznych DeNO_x (dla tych pojazdów wykonuje się test ETC).

Coraz częściej do zasilania silników wysokoprężnych oprócz oleju napędowego wykorzystuje się gaz ziemny. Silniki takie są określane jako dwupaliwowe. Limity emisji dla silników zasilanych olejem napędowym i gazem ziemnym w teście ETC przedstawiono w tab. 3.

Dopuszczalne limity Euro dla silników HDV [1] Tabela 2

Norma, rok wprowadzenia	CO	HC	NO _x	PM	k	Data wprowadzenia	
	[g/kWh]				[m ⁻¹]	NTA	ANR
Euro III – 2000	2,1	0,66	5,0	0,1/0,13 ¹⁾	0,8	1.10.2000	1.10.2001
Euro IV – 2005	1,5	0,46	3,5	0,02	0,5	1.10.2005	1.10.2006
Euro V – 2008	1,5	0,46	2,0	0,02	0,5	1.10.2008	1.10.2009

¹⁾ Dla silników o pojemności cylindra poniżej 0,75 dm³ i prędkości obrotowej powyżej 3000 obr/min przy maksymalnej mocy.

Wymagania norm Euro dla silników pojazdów HDV zasilanych gazem i olejem napędowym w teście ETC [1] Tabela 3

Norma, rok wprowadzenia	CO	NMH C	CH ₄ ²⁾	NO _x	PM ³⁾	Data wprowadzenia	
	[g/kWh]					NTA	ANR
Euro III – 2000	5,45	0,78	1,6	5,0	0,16/0,21 ¹⁾	1.10.2000	1.10.2001
Euro IV – 2005	4,0	0,55	1,1	3,5	0,03	1.10.2005	1.10.2006
Euro V – 2008	4,0	0,55	1,1	2,0	0,03	1.10.2008	1.10.2009

¹⁾ Dla silników o pojemności cylindra poniżej 0,75 dm³ i prędkości obrotowej powyżej 3000 obr/min przy maksymalnej mocy.

²⁾ Dla silników zasilanych gazem naturalnym.

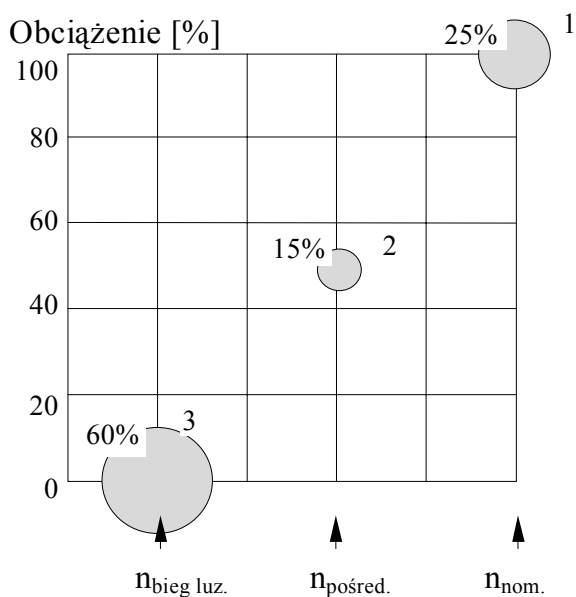
³⁾ Brak przydatności dla silników zasilanych gazem po roku 2000.

2.2. Normy Euro dotyczące spalinowych pojazdów trakcyjnych

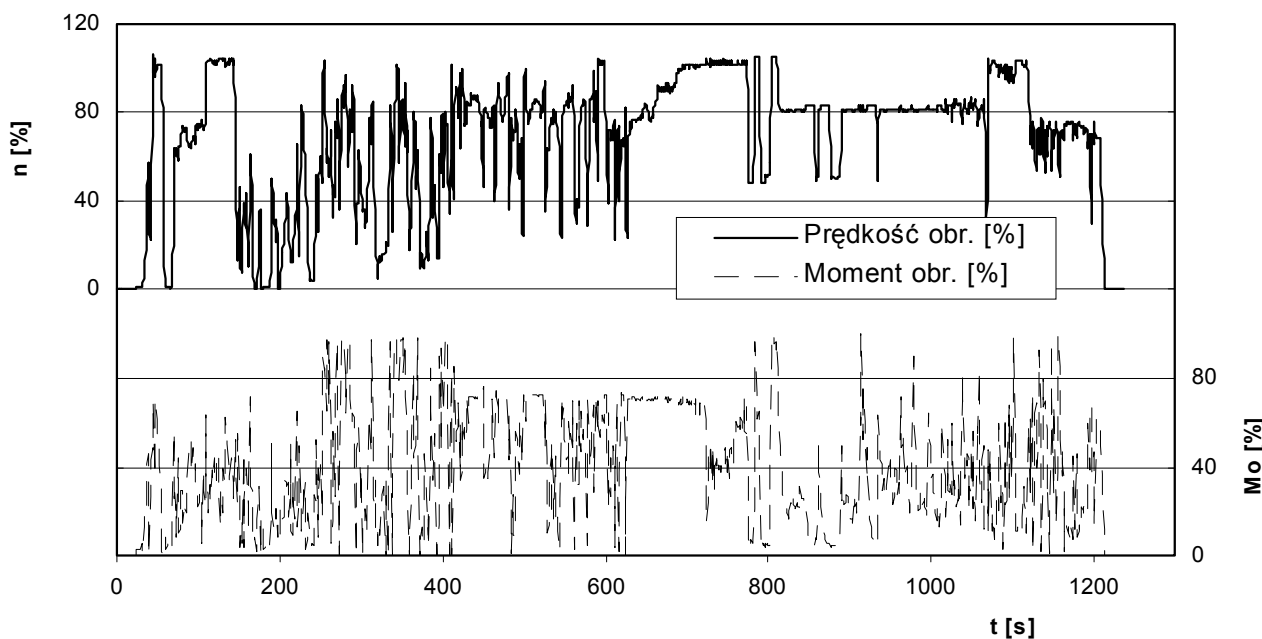
Pierwsze europejskie regulacje dotyczące pojazdów pozadrogowych przedstawiono w dyrektywie 97/68/EC w lutym 1998 roku. Wprowadzono wtedy etap I (w 1999 roku) i etap II wprowadzany stopniowo od 2001 do 2004 roku w zależności od mocy silników. Silniki trakcji szynowej nie były objęte tym podziałem.

Propozycje limitów emisji dla etapów III i IV dotyczące silników w zastosowaniach pozadrogowych opublikowano przez Komisję Europejską 27 grudnia 2002 roku i przyjęte zostały przez Parlament Europejski w październiku 2003 roku (tab. 4 i 5). Etap III będzie wprowadzony w roku 2006. Etap IV będzie wprowadzany stopniowo między rokiem 2010 a 2014. Etapy III i IV dotyczą silników spalinowych lokomotyw i pojazdów szynowych. Mają zastosowanie

tylko do nowych silników i ich wyposażenia. Obecnie dąży się do ujednoczenia przepisów dotyczących emisji składników szkodliwych. Etapy I i II ujednoczono z amerykańskimi przepisami dotyczącymi silników pojazdów *off-road* (pozadrogowych). Etapy III i IV są zgodne z normami amerykańskimi Tier 3-4. Etap IV wprowadza limity emisji PM o wartości $0,020 \div 0,025$ g/kWh. Oznacza to, że silniki muszą być wyposażone w filtry cząstek stałych (90% zmniejszenie limitu w stosunku do etapu II). Niektóre silniki będą także wymagały stosowania układów redukcji emisji NO_x , w celu spełnienia limitów etapu IV. Pomiary emisji będą przeprowadzane według dwóch testów: testu NRSC znanego jako test stacjonarny ISO 8178-F (rys. 2) oraz nowego testu NRTC, który opracowano wspólnie z organizacją EPA (rys. 3). Według testu NRTC mierzona będzie emisja cząstek stałych w etapach III i IV, a emisja składników gazowych według testu NRSC.



Rys. 2. Rozkład faz testu ISO 8178-F (zaznaczono kolejność faz i współczynniki według fazy w teście) [3]



Rys. 3. Przebieg testu NRTC [12]

Propozycje limitów etapu III dla silników lokomotyw spaliniowych [1]

Tabela 4

Moc silnika	CO	HC	HC + NO _x	NO _x	PM	Data wprowadzenia
	[g/kWh]					
130 kW < N _e < 560 kW	3,5	–	4,0	–	0,2	31.12.2006
N _e > 560 kW	2,0	0,5	–	6,0	0,2	31.12.2007

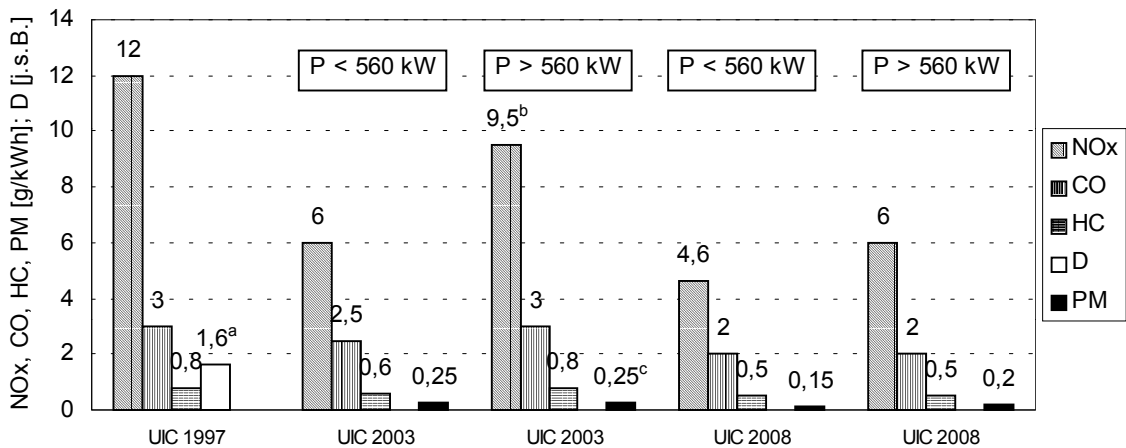
Propozycje limitów etapu IV dla silników lokomotyw spaliniowych [1]

Tabela 5

Moc silnika	CO	HC	HC + NO _x	NO _x	PM	Data wprowadzenia
	[g/kWh]					
130 kW < N _e < 560 kW	3,5	–	1,0	–	0,2	31.12.2010
N _e > 560 kW	2,0	0,5	–	1,0	0,2	31.12.2011

2.3. Przepisy UIC

Europejskie przepisy dotyczące emisji spalin silników trakcji szynowej: lokomotyw (w tym manewrowych) oraz autobusów szynowych zawarto w karcie UIC 624 [4]. Dopuszczalne wartości emisji ustalono w 2001 r. i mają one zastosowanie do nowo produkowanych silników wysokoprężnych trakcji kolejowej. Obowiązującym testem jest ISO 8178-F. Dopuszczalne wartości emisji składników toksycznych podano na rys. 4. Przepisów nie stosuje się do lokomotyw specjalnych (eksploatowanych w rafinerii lub kopalni) i silników trakcyjnych o mocy użytecznej poniżej 100 kW. Limity UIC I obowiązywały dla wszystkich silników do 31.12.2002 roku, natomiast od 1.01.2003 (UIC II) obowiązuje podział na silniki o mocy do 560 kW i powyżej tej wartości. Zmianie uległy mierzone składniki spalin. Zrezygnowano z pomiaru zadymienia spalin, uwzględniając obecnie w UIC II (tak jak w przypadku norm Euro), pomiar emisji cząstek stałych. Na uwagę zasługuje fakt, że limity UIC od roku 2008 będą zbliżone do limitów etapu IV norm Euro.



Rys. 4. Limity emisji poszczególnych związków toksycznych dla pojazdów szynowych według karty UIC 624; a – przy wydatku powietrza powyżej 1,0 kg/s wartość zadymienia D wynosi 2,5 j.s.B.; b – obowiązuje dla prędkości $n > 1000$ obr/min, dla $n < 1000$ obr/min limit wynosi 9,9 g/kWh; c – dla silników o mocy nominalnej powyżej 2200 kW emisja PM jest wyjątkowo dopuszczona do 31.12.2004 r. na poziomie 0,5 g/kWh lecz zaleca się zachowywać wartość graniczną 0,25 g/kWh, od 1.01.2005 r. wartość graniczna 0,25 g/kWh obowiązuje dla wszystkich silników [4]

3. Przepisy amerykańskie

Warunki eksploatacji spalinowej trakcji szynowej w USA są nieco odmienne. Znacznie wyższe są moce eksploatowanych silników spalinowych. Ze względu na znaczny udział silników ZS w transporcie kolejowym USA przewiduje się redukcję emisji NO_x do roku 2010 o około 60%, o 50% redukcję HC i PM oraz o 15% redukcję emisji CO. Z tego względu jest przewidziana etapowa redukcja składników toksycznych spalin.

Sieć spalinowych pojazdów trakcyjnych w USA podzielono na 3 typy: lokomotywy manewrowe (o mocy do 1500 kW), lokomotywy do pociągów pasażerskich (o mocy ok. 2200 kW) oraz lokomotywy towarowe (o mocy ponad 3000 kW).

W USA obowiązują normy Tier, dotyczące emisji składników toksycznych, których etapy wprowadzania są następujące:

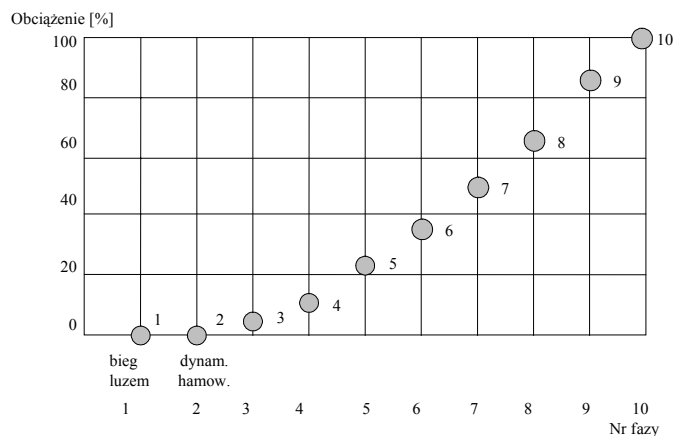
Tier 0 – mają zastosowanie do silników produkowanych od 1973 do 2002 r.,

Tier 1 – mają zastosowanie do silników i lokomotyw produkowanych od 2002 do 2004 r.,

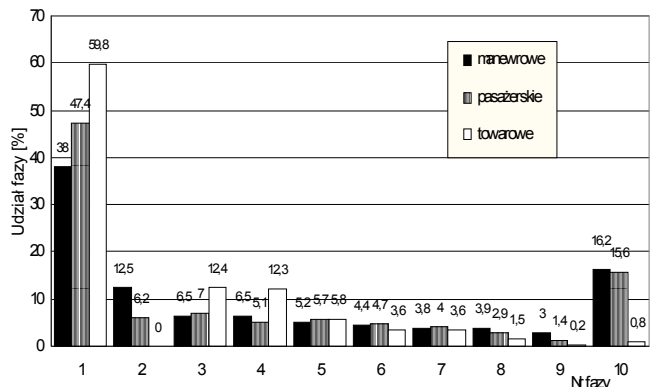
Tier 2 – mają zastosowanie do silników produkowanych po 1.01.2005 r.

Etapy te obowiązują również dla pojazdów, które są w tym czasie modernizowane lub importowane. W USA obowiązuje inny niż w Europie test badawczy. Dla spalinowych pojazdów trakcyjnych przewidziany jest jako 10-fazowy (rys. 5), różniący się współczynnikami wagowymi poszczególnych faz.

Udziały poszczególnych faz zależą od kategorii pojazdu trakcyjnego (rys. 6). Wartości limitów emisji składników toksycznych w zależności od etapu wprowadzenia normy i rodzaju lokomotyw przedstawiono na rys. 7 i 8. Procedura przygotowawcza do badań polega na osiągnięciu wymaganej temperatury cieczy chłodzącej, następnie w czasie 5 min utrzymanie maksymalnego obciążenia i powrót do biegu jałowego (maksymalnie 15 min). Pomiar jest realizowany podczas przyspieszania od prędkości biegu jałowego (faza 1÷7 po 6 min) do prędkości obrotowej mocy maksymalnej (faza 10 – czas trwania 15 minut). Normą objęty jest również pomiar zacinienia spalin (dla wszystkich norm Tier) – tab. 6.



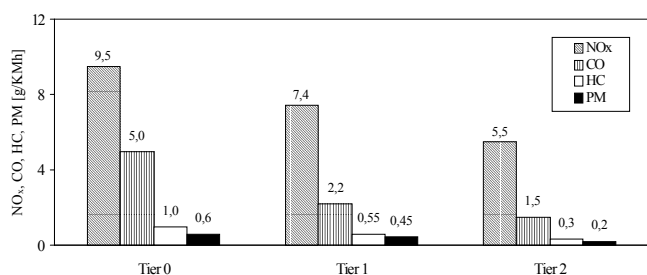
Rys. 5. Przebieg obciążenia poszczególnych faz testu obowiązującego w USA



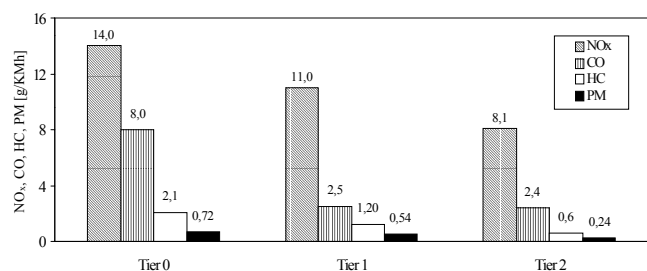
Rys. 6. Udziały faz testu badawczego w USA w zależności od typu pojazdu [1]

Limity zacinienia spalin [%] dla lokomotyw [1] Tabela 6

Norma	Stała prędkość	Wartość maks. podczas 30 s	Wartość maks. podczas 3 s
Tier 0	30	40	50
Tier 1	25	40	50
Tier 2	20	40	50



Rys. 7. Dopuszczalne limity emisji związków toksycznych w USA dla silników lokomotyw pasażerskich [1]



Rys. 8. Dopuszczalne limity emisji związków toksycznych w USA dla silników lokomotyw manewrowych [1]

Norma	Stała prędkość	Wartość maks. podczas 30 s	Wartość maks. podczas 3 s
Tier 0	30	40	50
Tier 1	25	40	50
Tier 2	20	40	50

Emisja węglowodorów dotyczy całkowitej emisji HC dla silników ZS, zasilanych biopaliwami lub kombinacją paliw, dla których olej napędowy jest paliwem podstawowym. Przy zasilaniu silników gazem ziemnym lub mieszaniną paliw z wykorzystaniem gazu ziemnego pomiarowi podlega emisja węglowodorów bez metanu NMHC. Dla paliw alkoholowych pomiarowi podlega tzw. równoważnik paliw węglowodorowych THCE.

Należy zwrócić uwagę na ponad 50% redukcję tlenku węgla w etapach wprowadzania Tier 1 i Tier 2 oraz ponad 50% redukcję emisji cząstek stałych. Limity te są możliwe do osiągnięcia tylko wtedy, gdy zastosuje się układy oczyszczające spaliny (reaktory utleniające, filtry cząstek stałych lub filtry sadzowe).

Dla lokomotyw zasilanych paliwami alternatywnymi badaniom podlega emisja CO i PM (tab. 7). Takie dodatkowe limity stosowane są dla lokomotyw zasilanych paliwami alternatywnymi, głównie sprężonym gazem ziemnym CNG.

Limity emisji składników toksycznych dla lokomotyw zasilanych paliwami alternatywnymi [g/KMh] [1] Tabela 7

Norma	Pasażerskie		Manewrowe	
	CO	PM	CO	PM
Tier 0	10	0,30	12	0,36
Tier 1	10	0,22	12	0,27
Tier 2	10	0,10	12	0,12

4. Przepisy japońskie dotyczące pojazdów HDV

W Japonii dotychczas obowiązywał 6-fazowy test dla silników typu *heavy-duty* (tab. 8). Każda faza testu stacjonarnego trwała 3 min. Dokonywano pomiarów emisji w każdej fazie i obliczano wartość średnią z uwzględnieniem współczynników faz. Wynik końcowy otrzymywano w jednostkach stężenia (ppm). Odmienne wagi obowiązywały dla silników ZS i ZI (z uwzględnieniem zasilania ciekłym paliwem gazowym LPG).

Japoński 6-fazowy test dla silników wysokoprężnych [12] Tabela 8

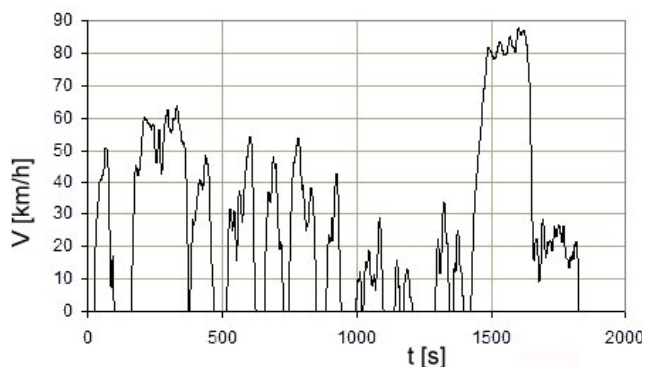
Nr fazy	n [%]	M _o [%]	u _i [-]
1	bieg jałowy	–	0,355
2	40	100	0,071
3	40	25	0,059
4	60	100	0,107
5	60	25	0,122
6	80	75	0,286

Obecnie test ten zastąpiono testem 13-fazowym. Końcowa wartość emisji (po uwzględnieniu współczynników udziału) wyrażona jest w g/kWh. Test uwzględnia niskie prędkości obrotowe wału korbowego silnika, małe obciążenia silnika i niską temperaturę spalin (tab. 9). Również tutaj występują różnice we współczynnikach udziału dla silników ZS oraz ZI/LPG.

Japoński 13-fazowy test dla silników wysokoprężnych [12] Tabela 9

Nr fazy	n [%]	M _o [%]	u _i [-]
1	bieg jałowy	–	0,410/2
2	40	20	0,037
3	40	40	0,027
4	bieg jałowy	–	0,410/2
5	60	20	0,029
6	60	40	0,064
7	80	40	0,041
8	80	60	0,032
9	60	60	0,077
10	60	80	0,055
11	60	95	0,049
12	80	80	0,037
13	60	5	0,142

Japońskie standardy emisji przewidują wprowadzenie od roku 2005 dla pojazdów o dopuszczalnej masie całkowitej powyżej 3500 kg nowego testu dynamicznego. Będzie to test rozpoczynający się od zimnego rozruchu silnika lub z ustabilizowanymi warunkami termicznymi cieczy chłodzącej – zależnie od zastosowania. Czas trwania testu będzie wynosił 1800 s i zdeterminowany będzie prędkością pojazdu (rys. 9). Badania na stanowisku dynamometrycznym wymagają podania prędkości obrotowej wału korbowego i obciążenia. Algorytm zamiany parametrów jezdnych na stacjonarne zostanie podany przez Japońskie Ministerstwo Środowiska.

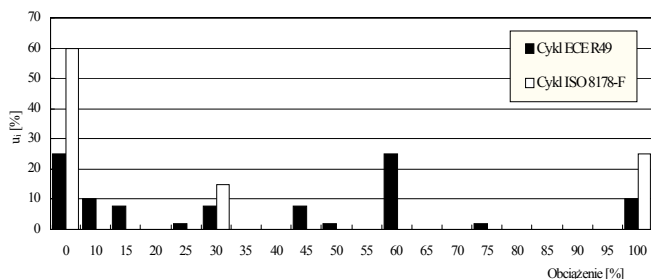


Rys. 9. Japoński test jezdny dla pojazdów o dopuszczalnej masie całkowitej powyżej 3500 kg [12]

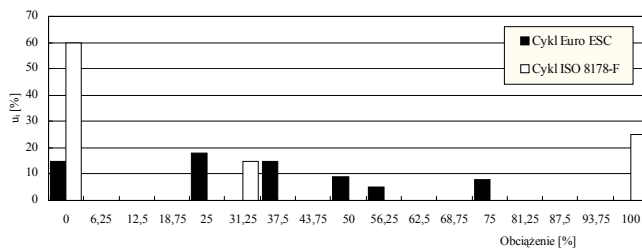
5. Analiza porównawcza przepisów

Europejskie cykle badawcze dotyczące wysoko- i średnioobrotowych silników pojazdów ciężarowych różnią się zasadniczo między sobą. Różnice między normą europejską Euro II dla silników ZS HDD (test 13-fazowy), a cyklem ISO (3-fazowym) dla lokomotyw przedstawiono na rys. 10 w postaci punktów badawczych i ich współczynników fazowych. Istnieje wyraźna odmienność we współczynnikach udziału faz (choć udział fazy biegu jałowego jest znaczący w obu przypadkach). Dla badań silników lokomotyw spalinowych według ISO 8178-F dużego znaczenia nabiera wartość maksymalnego obciążenia (aż 25%).

Wprowadzenie od 2000 roku europejskiej normy Euro III spowodowało zmianę cyklu badawczego dla silników HDD. Obecnie jest to nadal test 13-fazowy, jednakże z innymi współczynnikami udziału poszczególnych faz. Udziały te (po zsumowaniu w niektórych przypadkach) przedstawiono na rys. 11. Obciążenie obliczono jako wartość iloczynu udziału prędkości obrotowej i obciążenia.

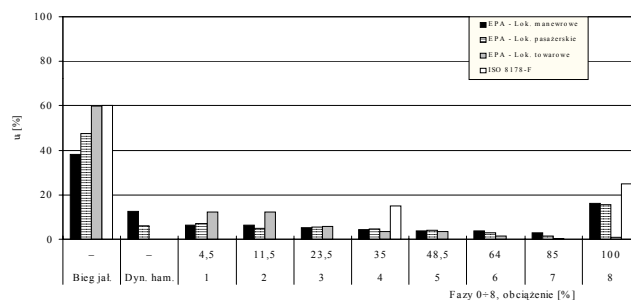


Rys. 10. Porównanie testów badawczych ECE R49 (dla Euro II) i ISO 8178-F



Rys. 11. Porównanie testów badawczych ESC (dla Euro III) i ISO 8178-F

Porównując normy amerykańskie i europejskie dostrzegalna jest różnica w sposobie pomiaru składników toksycznych. Przepisy europejskie preferują pomiary emisji z silnika, natomiast amerykańskie nakładają obowiązek badań na poszczególnych fazach nastawnika z uwzględnieniem dynamicznego hamowania (rys. 12).



Rys. 12. Porównanie europejskich i amerykańskich testów badawczych według ISO i EPA

Rozwój przepisów europejskich zmierza w kierunku ujednolicenia limitów emisji składników toksycznych pojazdów pozadrogowych (w tym lokomotyw spalinowych) z przepisami dotyczącymi pojazdów samochodowych. Przepisy amerykańskie nawiązując do przepisów europejskich w kolejnych wydawanych normach, zbliżają swoje limity do analogicznych europejskich. Tendencję taką można zaobserwować na przykładzie limitów UIC oraz EPA (tab. 10). Ważniejsze różnice w sposobie przeprowadzania badań emisji składników toksycznych dla lokomotyw spalinowych przedstawiono w tab. 11.

Porównanie wartości emisji składników toksycznych norm UIC i EPA

Tabela 10

Norma	Data wprowadzenia	NO _x	HC	CO	PM
UIC II [g/kWh]	1.01.2003	9,5 lub 9,9	0,80	3,0	0,25
EPA I [g/kWh]	1.01.2002	9,9	0,74	3,0	0,60
EPA II [g/kWh]	1.01.2005	7,4	0,40	2,0	0,27

6. Ochrona środowiska w aspekcie transportu kolejowego

W Europie wielu przewoźników trakcji szynowej wprowadza programy zmniejszania zużycia energii przez te pojazdy. Wskaźnik zużycia energii określono jako iloraz energii doprowadzonej i uzyskanej maksymalnej pracy. Wyższe wartości energetyczne osiąga się dla kolei elektrycznych niż wyposażonych w silniki spalinowe.

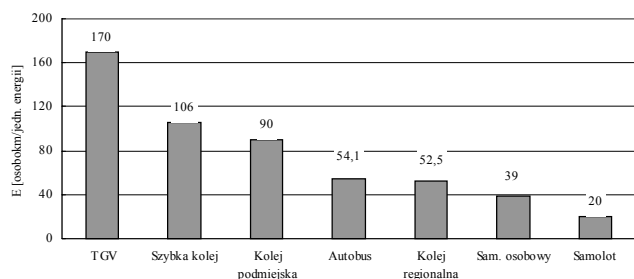
Charakterystyka metod pomiarowych według EPA i ISO
[9, 10] Tabela 11

Warunki	EPA	ISO
Sposób pomiaru emisji składników toksycznych	na lokomotywie	na hamowni silnikowej
Ograniczenie stosowania	tylko do pojazdów spalinowo-elektrycznych	niezależnie od sposobu przeniesienia mocy
Metoda pomiarowa	tylko do pojazdów z pozycjami nastawnika	większa możliwość porównania rezultatów
Rodzaj certyfikacji	certyfikacja lokomotyw a nie silników	certyfikacja silników do różnych zastosowań

Jeżeli założy się, że typowe lokomotywy spalinowe zużywają około 100 dm³ paliwa na 100 km, to wynika z tego, że przy średniej liczbie 144 miejsc, pojazd ten potrafi przejechać 144 osobokilometry (osobokm) na 1 dm³ paliwa.

Dla pojazdu osobowego bilans ten wygląda następująco: średnie zużycie paliwa wynosi około 10 dm³ na 100 km. Wynika z tego, że przy zajętości 4 miejsc w pojeździe liczba osobokm wynosi 40. Jest to ponad 3 razy mniej niż w przypadku lokomotyw spalinowych. Są to wartości maksymalne, jednakże w tych przypadkach należy przyjąć wskaźniki obciążenia, które określają procentową liczbę osób podróżujących środkami komunikacji. W przypadku kolei wskaźnik ten wynosi 40%, dla pojazdów osobowych najczęściej 25%. Ostatecznie otrzymuje się, że na przewozy środkami trakcji szynowej przypada 58 osobokm/1 dm³, natomiast na pojazdy osobowe 10 osobokm/1 dm³. Jeżeli rozpatrzy się pojazdy osobowe o najmniejszym zużyciu paliwa, a do takich można zaliczyć Volkswagena Lupo zużywającego średnio 3 dm³ oleju napędowego na 100 km, to otrzyma się (przy czterech podróżujących osobach) wartość 133 osobokm na 1 dm³. Przy wskaźniku obciążenia 25% wartość ta spada do 33 osobokm/1 dm³.

Na rysunku 13 przedstawiono typowe wartości sprawności przewozów wyrażone w osobokm na 1 dm³ paliwa kolejowymi środkami komunikacji, w porównaniu z pojazdami osobowymi i samolotami. Widoczna jest znaczna konkurencyjność przewozów środkami trakcji szynowej nad pozostałymi możliwościami transportu.



Rys. 13. Sprawność przewozu różnymi środkami komunikacji [15]

Obecnie obserwuje się następujące tendencje w redukcji zużycia energii [2, 12]:

- koleje szwedzkie planują redukcję zużycia energii o 25% w ciągu najbliższych 5 lat;
- koleje niemieckie zaplanowały redukcję nakładów energetycznych na przewozy osobowe i towarowe o 25% w latach 1990÷2005,

- koleje holenderskie redukują o 10% zużycie energii w przewozach osobowych w latach 1990÷2010.

W celu zmniejszenia emisji składników toksycznych spalin stosuje się:

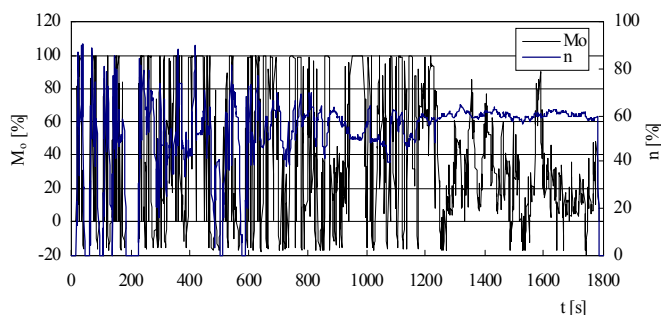
- układy oczyszczania spalin – głównie w lokomotywach eksploatowanych na terenie Niemiec,
- układy ciągłej regeneracji filtrów cząstek stałych CRT we wszystkich pojazdach spalinowych trakcji szynowej w Szwecji,
- koleje holenderskie, szwedzkie i luksemburskie planują całkowite wyeliminowanie spalinowej trakcji szynowej,
- koleje niemieckie deklarują dopuszczanie do użytkowania w przyszłości tylko lokomotyw spełniających normę Euro II,
- zasilanie pojazdów ze źródeł alternatywnych: gazem ziemnym (koleje niemieckie, francuskie, szwedzkie, belgijskie) lub za pomocą ogniw paliwowych (koleje niemieckie, szwedzkie i francuskie). Planuje się zamianę silników tradycyjnych na silniki z wymienionymi źródłami energii.

7. Światowe kierunki rozwoju wymagań w normach i możliwości ich spełnienia przez silniki spalinowe

Planowane jest wprowadzenie od 1.10.2005 roku dla nowych homologacji oraz od 1.10.2006 dla nowych pojazdów systemu diagnostyki pokładowej lub pokładowego systemu pomiarowego.

Przewiduje się wprowadzenie światowego ujednoczenia certyfikacji silników *heavy-duty*. Ma ono dotyczyć testów stacjonarnych WHSC oraz dynamicznych WHTC. Opcjonalne jego wprowadzenie od roku 2005 według normy ISO/DIN 16183 ma dotyczyć metod pomiarowych w Europie i Japonii. Norma ta dotyczy pomiarów składników gazowych z układu wylotowego z użyciem układu rozcieńczającego spaliny o częściowym przepływie spalin, podczas testu jezdny.

Cykl jezdny WHTC (rys. 14) oparto na procentowych wartościach prędkości i momentu obrotowego. Czas trwania testu wynosi 1800 s. Wartości prędkości obrotowych odniesiono do wartości maksymalnej.



Rys. 14. Znormalizowany przebieg testu WHTC [11]

Aktualna prędkość obrotowa obliczana jest na podstawie formuły:

$$n = n_{\text{norm}} \cdot \{0,6 \cdot n_A + 0,2 \cdot n_B + \dots + 0,2 \cdot (n_{\text{ref}} - n_{b,\text{iat}})\} / 0,5363 + n_{b,\text{iat}} \quad (1)$$

gdzie:

- n_{norm} – znormalizowana wartość prędkości w teście,
- n_A – niższa z prędkości obrotowej silnika, przy której występuje 55% maksymalnej mocy silnika,

n_B – wyższa z prędkości obrotowej silnika, przy której występuje 70% maksymalnej mocy silnika,
 n_{ref} – minimalna prędkość obrotowa silnika, przy której występuje moment maksymalny.

Przedstawiony sposób standaryzacji prędkości obrotowej jest odmienny od obecnie stosowanego w testach ETC i FTP75. Wybór jednej prędkości referencyjnej powoduje, że test będzie bardziej reprezentatywny dla silników HDD. Moment obrotowy jest określany na podstawie:

$$M_o = (\%M_{o,norm} \cdot M_{o,max})/100, \quad (2)$$

gdzie:

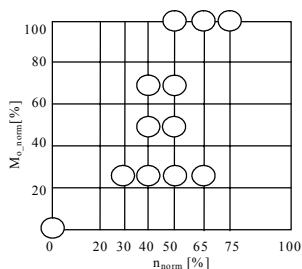
M_o – aktualna wartość momentu obrotowego,
 $M_{o,norm}$ – znormalizowana wartość momentu obrotowego (odniesiona do wartości maksymalnej),
 $M_{o,max}$ – maksymalna wartość momentu obrotowego silnika.

Standaryzacja momentu obrotowego jest przeniesiona w niezmięnionej postaci z istniejących regulacji (ETC, FTP). Prędkości obrotowe n_A i n_B reprezentują zakresy prędkości obrotowych silnika, podobnie jak w testach ESC i ETC, podczas gdy n_B jest identyczna z normą Euro III, n_A jest definiowana jako 55% mocy silnika (zamiast 50%).

Stacjonarny test WHSC (rys. 15) składa się z 12 faz (kombinacji prędkości obrotowych oraz obciążeń). Fazy oparte są na częstości występowania znormalizowanych prędkości i obciążeń podczas testu dynamicznego. W teście tym również bazuje się na trzech prędkościach obrotowych. Powoduje to dostosowanie przebiegu testu do indywidualnej charakterystyki silnika.

Po ustaleniu wspólnych zasad technicznych, badania według WHDC mają być stosowane w Stanach Zjednoczonych od 2007 roku, w Europie od 2008 i w Japonii w roku 2009 (lub 2010).

Propozycje limitów dotyczących silników HDD w roku 2020 przedstawiono w tab. 12.



n_{norm} [%]	Obciążenie znormalizowane [%]	Obciążenie znormalizowane [%]				
		0	25	50	75	100
0	0,24	współczynniki udziału				
30	0,14					
40		0,07				
50		0,10	0,03	0,04		
65		0,125	0,10	0,04	0,025	
75		0,04				0,025

Rys. 15. Znormalizowany przebieg testu WHSC [11]

Tendencje rozwojowe w zakresie przepisów emisji składników toksycznych w pojazdach szynowych są następujące [2, 14]:

Propozycje limitów emisji spalin dla silników HDD w roku 2020 [13]

Tabela 12

Test WHSC [g/kWh]					[m ⁻¹]
Data wprowadzenia	CO	HC	NO _x	PM	k
2020	0,5	0,1	0,2	0,01±0,002	0,1
Test WHTC [g/kWh]					
Data wprowadzenia	CO	NMHC	CH ₄	NO _x	PM
2020	1,0	0,14	0,8	0,2	0,01±0,003

- ujednoczenie aktualnych dopuszczalnych limitów według UIC 624 z normą Euro III i Euro IV dla silników o mocy poniżej 560 kW,
- zmniejszenie poziomu emisji NO_x poniżej 2 g/kWh w wyniku wprowadzenia po roku 2008 normy Euro VI,
- redukcja emisji cząstek stałych przez limitowanie bardzo małych rozmiarów cząstek,
- wprowadzenie testu WHSC, który zastąpiłby testy ETC, ESC i ELR,
- wzrost wymagań trwałości systemów kontroli emisji spalin,
- niższe limity emisji dla silników o zastosowaniu specjalnym,
- możliwość wykorzystania w silnikach ZS paliw o niskiej zawartości siarki, a opcjonalnie zastosowanie także paliw roślinnych.

Obecna sytuacja dotycząca stanu ekologicznego polskiego spalinowego transportu szynowego została przedstawiona w [6].

Literatura

- [1] AVL Regulations & Standards, Current and future exhaust emission legislation AVL, Graz 04.2004.
- [2] Borken J., Höpfner U.: How to improve environmental performance? Lessons from the UIC „Market research on Innovative Traction”, UIC Market Research, IFEU-Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, 2000.
- [3] ISO: Reciprocating internal combustion engines – exhaust emission measurement – Part 1: Test-bed measurement of gaseous and particulate exhaust emissions. Draft International Standard ISO/DIS 8178–1.2, 1995.
- [4] Karta UIC 624 – Badania emisji gazów wydechowych silników spalinowych trakcyjnych, 1 wydanie, kwiecień 2001.
- [5] Le Monde de l'auto. L'Automobile Magazine N° 694, Marzec 2004.
- [6] Marciniak Z., Pielecha I.: Możliwości poprawy parametrów ekologicznych silników dla naprawianych i modernizowanych lokomotyw spalinowych. Pojazdy Szynowe nr 2/2004.
- [7] Merksiz J., Pielecha I.: Przepisy toksyczności spalin pojazdów szynowych. Pojazdy Szynowe, nr 3, 2001.
- [8] Merksiz J., Pielecha J.: Nowoczesne systemy pomiarowe cząstek stałych emitowanych przez silniki spalinowe. Pojazdy Szynowe, Nr 3, 2003.
- [9] Paukert H.: Approval tests of diesel engines according to UIC Leaflet 623, European Rail Research Institute, Utrecht 2003.
- [10] Paukert H.: Emission certification of diesel engines according to UIC Leaflet 624, European Rail Research Institute, Utrecht 2003.
- [11] Worldwide Harmonized Heavy Duty, Emissions Certification Procedure, United Nations, 46th GRPE session, 19-23 May 2003, Agenda item 1.2), Final Summary, 15th WHDC, Geneva, 21.05.2003.
- [12] www.dieselnet.com, Diesel Emission Online, 2004.
- [13] www.earpa.org, R&D Technology Roadmap. Furore – Future Road Vehicle Research. EARPA – European Automotive Research Partners Association. Brussels 2003.
- [14] www.eri.nl, UIC – PROSPER – procedures for rolling stock procurement with environmental requirements, Paris 2-3.04.2003.
- [15] www.railway-energy.org, UIC – International Union of Railways, Energy Efficiency Technologies for Railways, 2003.