

COMPARISON OF POLLUTANT EMISSIONS TEST CYCLES FOR IC ENGINES

Andrzej Żółtowski

*Motor Transport Institute
Jagiellońska 80, 03-301 Warsaw
tel.: +48 22 8113231 wew. 518, fax:+48 22 8110906
e-mail: andrzej.zoltowski@its.waw.pl*

Abstract

There are many test cycles used for measurement of pollutant emissions from exhaust systems in internal combustion engines. In the paper are compared results of pollutant emissions testing in three different test cycles simulating transient conditions of engine operating in bus. There were used following test cycles: European Transient Cycle used in European type approval testing, Heavy Duty Diesel Transient Cycle used in USA and Non Road Transient Cycle used in type approval testing for off-road engines. These cycles were compared by using statistic analysis as well as drawing of histogram for engine torque and speed. In discussion about test results are indicated differences between mean parameters specific for each cycle. These differences are the reason why emission test results for each cycle are different. Author of this paper wanted to find answer to following question: is it possible to replace with one another emission transient test cycles and can we look forward similar emission test results for different kind of cycles?

Keywords: *transport, internal combustion engines, emission of pollutants, engine testing*

PORÓWNANIE CYKLI BADAWCZYCH DO POMIARU EMISJI ZANIECZYSZCZEŃ Z SILNIKÓW SPALINOWYCH

Streszczenie

Na świecie opracowano wiele cykli badawczych używanych do wyznaczania emisji toksycznych składników spalin z układów wylotowych silników. W niniejszej pracy porównano wyniki badań emisji zanieczyszczeń z silnika stosowanego do napędu autobusu, zmierzone na stanowisku hamownianym przy zastosowaniu trzech różnych cykli badawczych symulujących nieustalone warunki pracy silnika. Użyte w badaniach cykle pomiarowe to European Transient Cycle stosowany w homologacji europejskiej, Heavy Duty Diesel Transient Cycle stosowany w USA oraz Non Road Transient Cycle, stosowany przy homologacji silników maszyn ruchomych. Cykle te porównano ze sobą dokonując ich analizy statystycznej poprzez określenie funkcji rozkładu częstości występowania momentu i prędkości obrotowej silnika. Przeprowadzono dyskusję nad otrzymanymi wynikami pomiarów emisji, wykazano różnice w średnich parametrach charakteryzujących porównywane cykle badawcze uzasadniając tym uzyskane wyniki pomiarów emisji. Praca stanowi próbę odpowiedzi na pytanie, czy jest możliwe zamienne stosowanie cykli badawczych do wyznaczania wskaźników charakteryzujących właściwości emisyjne silnika i czy w wyniku zamiany cyklu badawczego można spodziewać się otrzymania podobnych wyników?

Słowa kluczowe: *transport, silniki spalinowe, emisja zanieczyszczeń, badania silników*

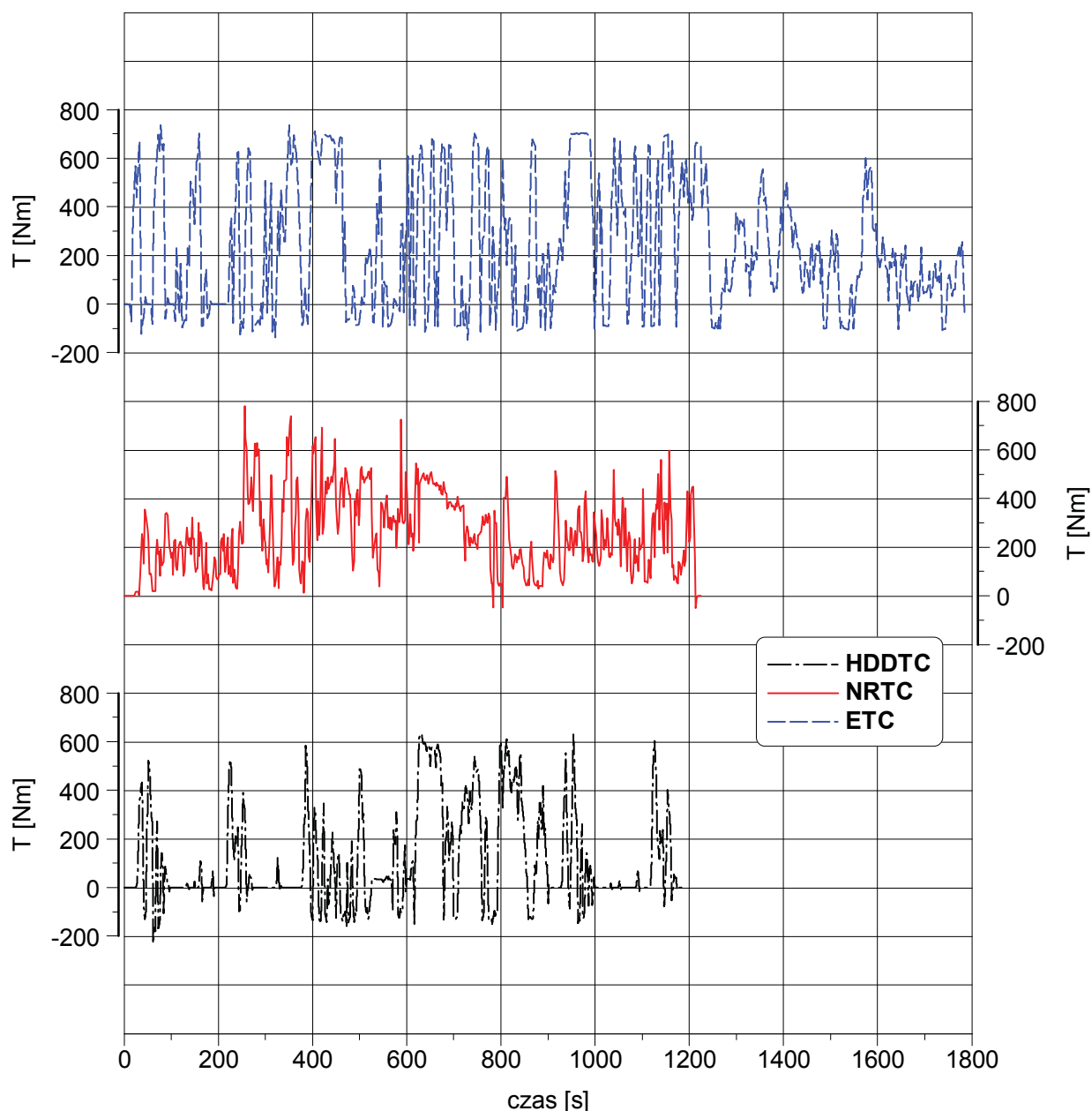
1. Wstęp

Istnieje wiele sposobów określania emisji toksycznych składników spalin z układów wylotowych silników. Ponieważ masa emitowanych przez silnik zanieczyszczeń zależy przede wszystkim od prędkości obrotowej i obciążenia silnika, problem wyznaczenia wskaźników, które charakteryzowałyby właściwości emisyjne silnika sprowadza się do pomiaru jego emisji jednostkowej w określonych warunkach pracy. Problem właściwego wyboru punktów pracy

silnika podczas pomiarów emisji powstał z chwilą wprowadzenia przepisów homologacyjnych ograniczających ilości zanieczyszczeń emitowanych do atmosfery przez pojazdy. Organizacje zajmujące się tworzeniem przepisów homologacyjnych (np. Agencja do Spraw Ochrony Środowiska w USA, Europejska Komisja Gospodarcza ONZ z siedzibą w Genewie, Komisja Europejska, ISO – International Standard Organization, czy organizacje krajowe – np. w Japonii) opracowywały i opracowują dla potrzeb homologacji cykle badawcze, w których mierzy się wartość szkodliwej emisji z silników.

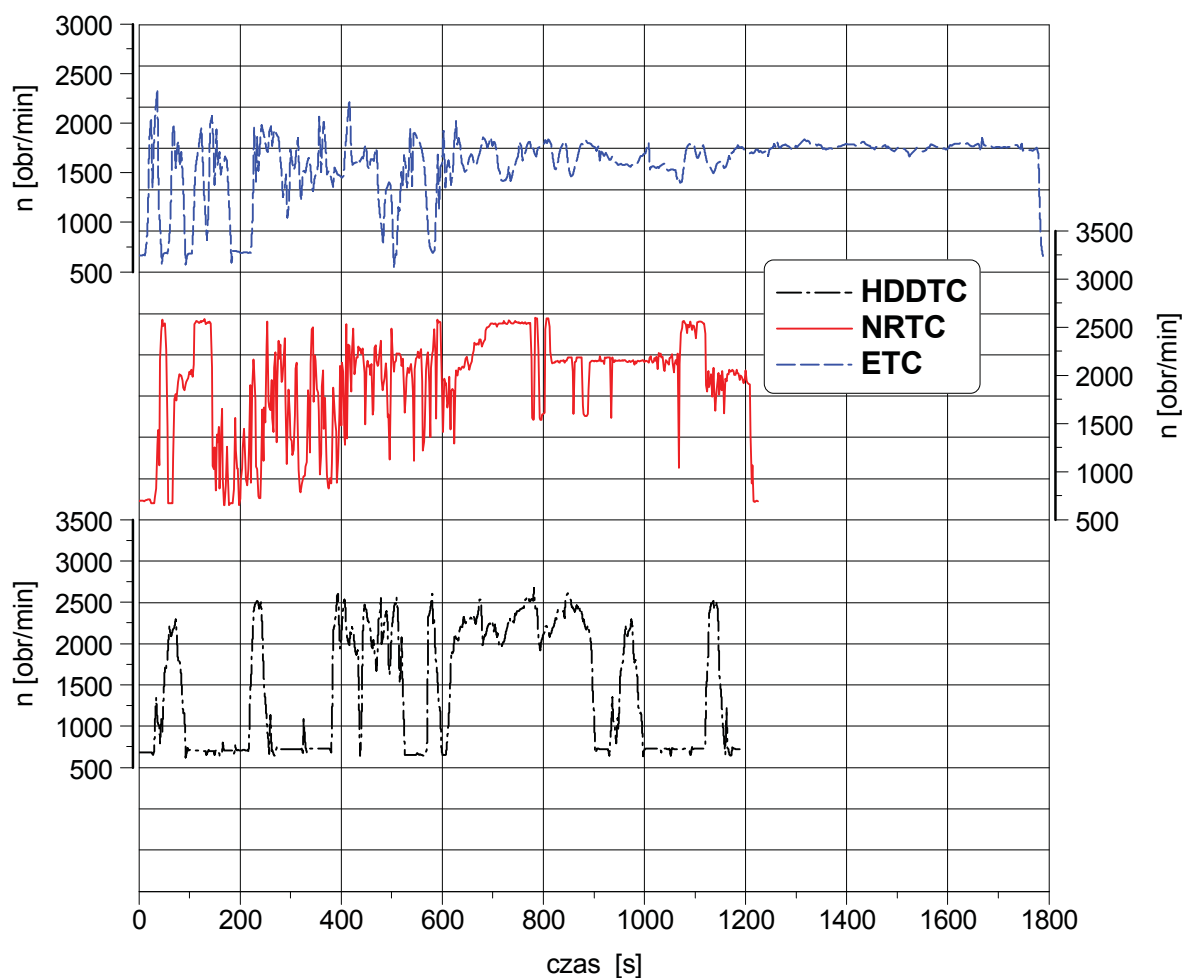
2. Ewolucja cykli pomiarowych emisji

Historia rozwoju cykli badawczych emisji zanieczyszczeń ma już ponad 20 lat. Początkowo były to wyłącznie cykle stacjonarne, w których emisję zanieczyszczeń wyznaczano w warunkach ustalonych.



Rys. 1. Przebieg momentu obrotowego badanego silnika w wybranych cyklach badawczych
Fig. 1. Course of torque in tested engine for different test cycles

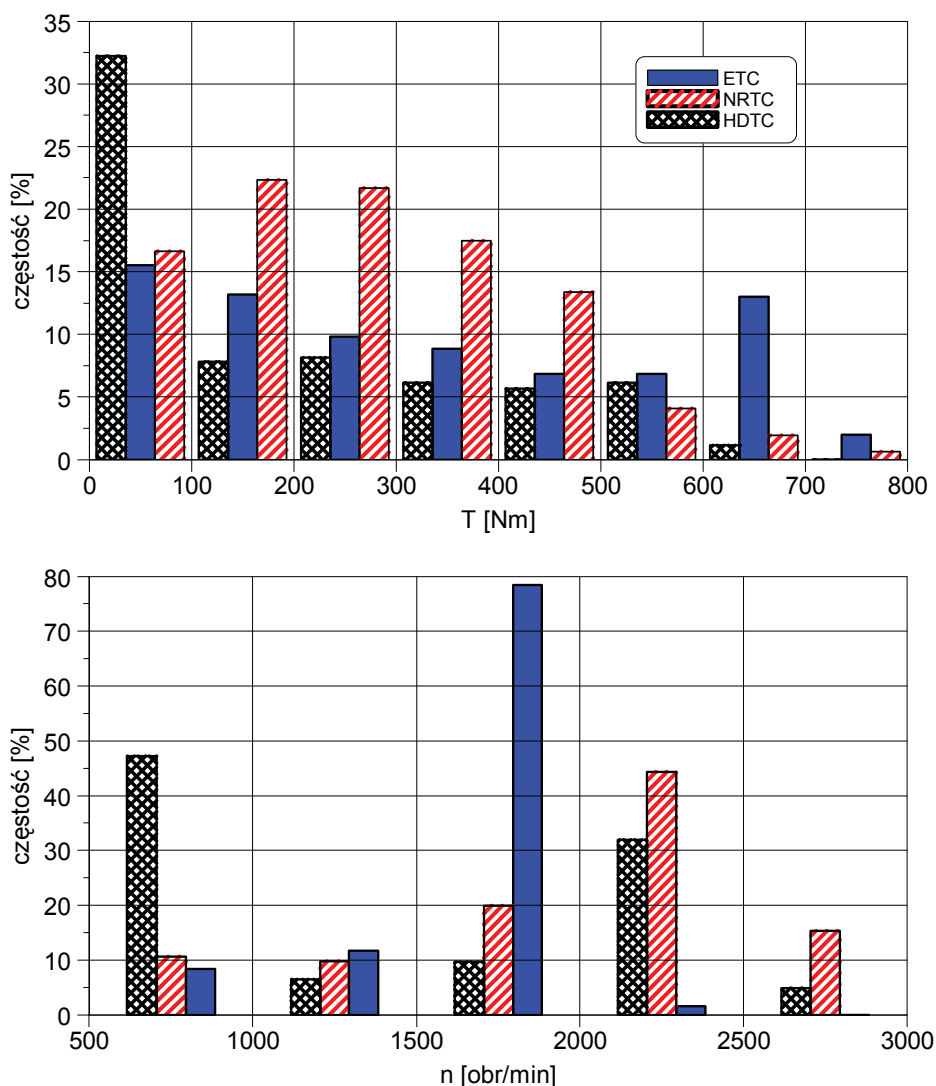
Przykładem może tu być - wzorowany na używanym w Kalifornii - 13-fazowy cykl badawczy stosowany w regulaminie 49 EKG ONZ. Składa się on z trzynastu punktów pomiarowych, z których każdy jest scharakteryzowany prędkością obrotową silnika, jego obciążeniem, czasem pracy w danym punkcie i współczynnikiem wagi. Obecnie cykl ten przekształcił się w cykl ESC (*European Steady Cycle*), w którym silnik pracuje przy czterech różnych prędkościach obrotowych (wliczając w to bieg jałowy). Cykle stacjonarne dla pojazdów typu *Heavy Duty* powstawały na podstawie statystycznej analizy pracy silnika w warunkach rzeczywistych i były próbą zastąpienia rzeczywistych parametrów pracy silnika cyklem badawczym w warunkach ustalonych, w którym byłyby zachowane procentowe udziały rzeczywistych prędkości i obciążeń.



Rys. 2. Przebieg prędkości obrotowej badanego silnika w wybranych cyklach badawczych
 Fig. 2. Course of speed in tested engine for different test cycles

Wraz z postępowaniem technicznym i rozwojem nowoczesnych hamulców silnikowych sterowanych komputerowo, pozwalających między innymi na symulację stanów hamowania silnikiem, pojawiła się możliwość pomiarów emisji zanieczyszczeń w warunkach symulujących rzeczywiste warunki pracy silnika. Organizacje odpowiedzialne za tworzenie przepisów homologacyjnych opracowały odpowiednie cykle badawcze do badań w warunkach nieustalonych, określając przebiegi zmian momentu obrotowego i prędkości obrotowej silnika w odstępach jednosekundowych. Przykładem może tu być amerykański cykl *Heavy Duty Diesel Transient Cycle*, czy europejski cykl *European Transient Cycle*. Każdy z tych cykli ma swą genezę. I tak trwający 30 minut cykl ETC w swym zamyśle ma odzwierciedlać różne rodzaje ruchu drogowego. Możemy w nim wyróżnić trzy obszary, z których każdy trwa po 10 minut, reprezentatywne dla warunków drogowych spotykanych podczas:

- jazdy miejskiej,
- jazdy pozamiejskiej (w terenie niezabudowanym),
- jazdy po autostradzie.



Rys. 3. Częstość występowania momentu obrotowego i prędkości obrotowej w różnych cyklach badawczych
 Fig. 3. Frequency of occurrence torque and speed in different test cycles

Na rys. 1 i 2 przedstawiono przebieg momentu obrotowego i prędkości obrotowej badanego silnika (moc znamionowa 130 kW, prędkość znamionowa 2600 obr/min) w cyklach badawczych ETC (*European Transient Cycle*), HDTC (*Heavy Duty Diesel Transient Cycle*) i NRTC (*Non Road Transient Cycle*). Badania wykonano na stanowisku badawczym w Instytucie Transportu Samochodowego. Cykl NRTC pochodzi ze znowelizowanej dyrektywy 97/68/EC i jest przeznaczony do badań homologacyjnych silników przeznaczonych do maszyn ruchomych wyposażonych w silniki o zapłonie samoczynnym i mocy większej niż 19 kW. Analizując przebiegi przedstawione na rys. 1 i 2, można dostrzec, że składają się one z części reprezentujących różne rodzaje i stany pracy silnika. Zmienność i różnorodność stanów pracy silnika w czasie odtwarzania poszczególnych cykli sprawia, że średnie obciążenie silnika, czy średnia prędkość obrotowa w cyklu różnią się w poszczególnych cyklach.

Na rys. 3 przedstawiono statystyczną analizę częstości występowania obciążenia i prędkości obrotowej silnika w poszczególnych cyklach. W tym celu dziedzinę zakresu użytecznych

prędkości obrotowych badanego silnika podzielono na klasy o szerokości 500 obr/min, zaś dziedzinę momentu obrotowego na klasy o szerokości 100 Nm. W każdej z tak zdefiniowanych klas wyznaczono częstość występowania momentu i prędkości obrotowej.

Można zauważyć, że w cyklu ETC maksimum krzywej rozkładu prędkości obrotowej występuje w pobliżu prędkości maksymalnego momentu obrotowego (n_T), co odzwierciedla normalny sposób pracy silnika napędzającego pojazd w warunkach drogowych. W cyklu NRTC maksimum to znajduje się pomiędzy prędkością maksymalnego momentu obrotowego a prędkością znamionową silnika. W cyklu HDDTC najczęściej występującą prędkością obrotową silnika jest prędkość zbliżona do prędkości biegu jałowego.

Analizując krzywą rozkładu momentu obrotowego można dostrzec, że właściwie we wszystkich trzech cyklach zwiększa się częstość występowania momentu obrotowego silnika wraz ze spadkiem wartości momentu. Szczególnie wyraźnie jest to widoczne w cyklu HDDTC. Prawidłowość tę można dostrzec również w cyklu ETC, z wyjątkiem przedziału 600÷700 Nm, gdzie występuje skokowy wzrost częstości występowania momentu obrotowego, oznaczający, że w przypadku cyklu ETC istnieje relatywnie większa liczba punktów pracy silnika przy pełnym obciążeniu silnika. W przypadku cyklu NRTC zasada wzrostu częstości pojawienia się danej wartości momentu obrotowego wraz z jego spadkiem nie znajduje potwierdzenia jedynie dla najniższych obciążeń, gdzie częstość występowania momentu obrotowego w tym przedziale wyraźnie maleje. Opisany rozkład prędkości i obciążenia silnika w poszczególnych cyklach rzutuje na wartości emisji jednostkowej zanieczyszczeń wyznaczone podczas badań silnika w różnych cyklach badawczych. I tak w przypadku cyklu NRTC na ostateczny wynik pomiaru emisji jednostkowej z silnika będzie miała znaczny wpływ charakterystyka emisji przy średnich obciążeniach silnika, w przypadku cyklu HDTC przy małych obciążeniach i małych prędkościach obrotowych, zaś w przypadku cyklu ETC szczególnie istotna będzie wartość emisji przy prędkościach zbliżonych do prędkości maksymalnego momentu obrotowego. Widać stąd, że można spodziewać się tym większych różnic w pomiarze emisji jednostkowych w poszczególnych cyklach, im bardziej zróżnicowane będą wartości emisji w polu pracy badanego silnika.

Tab. 1. Wyniki pomiarów emisji zanieczyszczeń w różnych cyklach badawczych
Tab. 1. Emission results in different test cycles

Rodzaj cyklu	Rodzaj zanieczyszczenia	Emisja jednostkowa [g/kWh]
Non Road Transient Cycle (NRTC)	CO	0,67
	THC	0,30
	NO _x	9,66
	PM	0,20
European Transient Cycle (ETC)	CO	1,744
	THC	0,284
	NO _x	9,52
	PM	0,125
Heavy Duty Diesel Transient Cycle (HDDTC)	CO	2,666
	THC	0,602
	NO _x	10,078
	PM	0,320

3. Badania emisji w warunkach nieustalonych

Obserwując zasób opracowanych cykli badawczych przeznaczonych do stosowania w praktyce, można zadać pytanie na ile wyniki pomiaru emisji otrzymane przy ich użyciu będą

zbieżne ze sobą. W tablicy 1 zestawiono wyniki pomiarów emisji jednostkowych zanieczyszczeń z układu wylotowego badanego silnika, zmierzonych w cyklach badawczych w warunkach nieustalonych.

Analizując dane zawarte w tablicy 1 można zauważyć, że wszystkie mierzone szkodliwe emisje w poszczególnych cyklach pomiarowych – poza NO_x – różnią się znacznie między sobą. W tablicy 2 przedstawiono średnią wartość emisji obliczoną na podstawie pomiarów w cyklach NRTC, ETC i HDDTC. Oprócz wartości średniej tablicę 2 dodatkowo uzupełniono o wartości średniego odchylenia standardowego, wyrażonego zarówno w jednostkach bezwzględnych jak i w procentach. Patrząc na wartości przedstawione w tablicy 2 widzimy, że jedynie w dla NO_x mamy do czynienia w przypadku trzech użytych cykli badawczych z praktycznie tą samą wartością emisji jednostkowej. W przypadku pozostałych składników spalin (CO , THC i PM) średnie odchylenie standardowe rozrzutu wyników pomiarów przyjmuje wartość od 46 do 63 %.

Badany silnik był silnikiem spełniającym normę Euro 2. Średnie odchylenie standardowe rozrzutu pomiędzy pomiarami w poszczególnych cyklach stanowi w wypadku CO jedynie 18 %, dla THC – 23 %, a dla NO_x – 6 % wartości dopuszczalnych limitu Euro 3. Oznacza to, że w badaniach kwalifikacyjnych ze względu na emisję zanieczyszczeń z układu wydechowego silnik praktycznie nie jest zbyt wrażliwy na zmianę rodzaju cyklu badawczego, a wynikię stąd różnice wyników CO , THC i NO_x nie przekraczają 25 % wartości dopuszczalnych Euro 3.

Tab. 2. Analiza statystyczna wyników pomiarów emisji zanieczyszczeń w trzech cyklach badawczych (NRTC, ETC i HDDTC)

Tab. 2. Statistic of emission results in three transient cycles (NRTC, ETC i HDDTC)

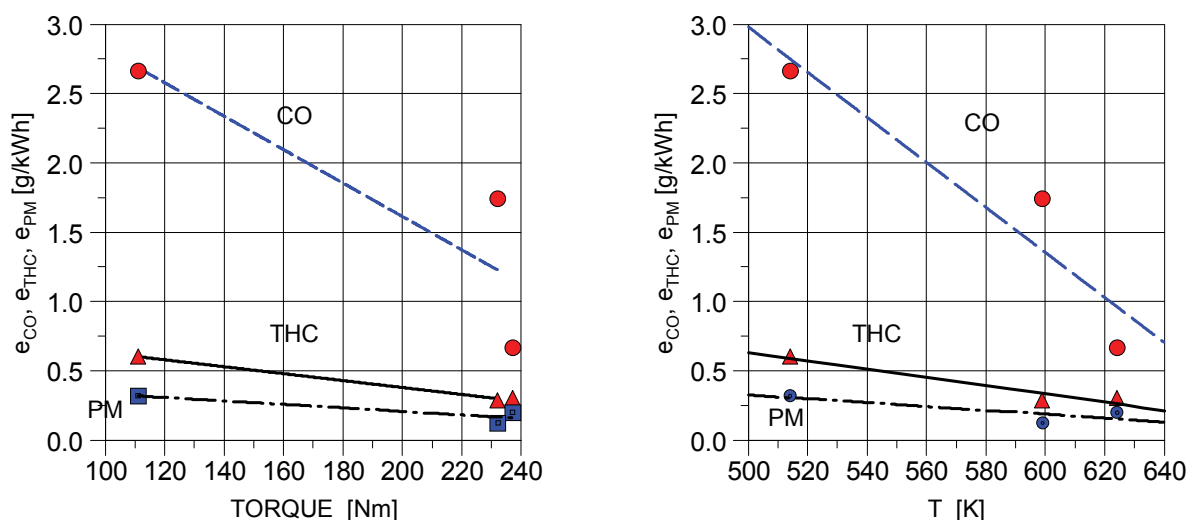
Rodzaj zanieczyszczenia	Średnia emisja jednostkowa [g/kWh]	Średnie odchylenie standardowe	
		[g/kWh]	%
CO	1,59	1,00	63
THC	0,39	0,18	46
NO_x	9,86	0,30	3
PM	0,22	0,10	46

Odmierna sytuacja występuje w przypadku cząstek stałych, gdzie zmiana cyklu badawczego powoduje rozrzut odchylenia standardowego wyników rzędu 61 % limitu Euro 3. Widać to dobrze na przykładzie wyników pomiaru emisji PM (tablica 1) w cyklach ETC i HDTC, gdzie emisja PM w cyklu ETC stanowi 39 % emisji PM w cyklu HDTC. Ponieważ emisja PM w cyklu ETC była niewiele mniejsza od wartości dopuszczalnej Euro 3 (0,13 g/kWh), tak znaczny wzrost emisji PM w cyklu HDTC powoduje, że w badanym przypadku nie można mówić o możliwości zamiennego stosowania cykli badawczych w pomiarach emisji cząstek stałych.

Tab. 3. Wartości średnie wybranych parametrów pracy silnia w cyklach badawczych

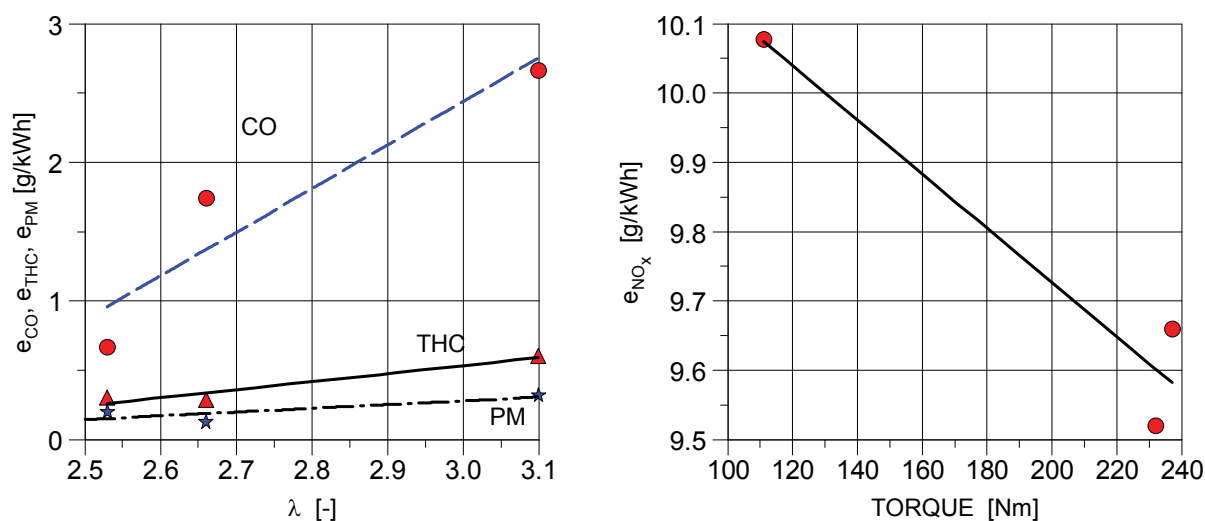
Tab.3. Mean values of chosen engine parameters in transient test cycles

Rodzaj cyklu	Moment obrotowy [Nm]	Temperatura spalin [$^{\circ}\text{C}$]	Jednostkowe zużycie paliwa [g/kWh]	Współczynnik nadmiaru powietrza
HDDTC	111	241	290	3,1
NRTC	237	351	258	2,5
ETC	232	326	237	2,7



Rys. 4. Zależność emisji jednostkowej od średniego obciążenia silnika i średniej temperatury spalin
 Fig. 4. Specific emission versus mean torque and exhaust temperature

W tabelicy 3 przedstawiono średnie parametry pracy silnika wyznaczone dla poszczególnych cykli badawczych. Z umieszczonych w niej danych wynika, że średnie obciążenia silnika w cyklach NRTC i ETC różnią się o ok. 2%, czemu towarzyszy podobna temperatura spalin oraz zbliżony współczynnik nadmiaru powietrza. Na tym tle wyraźnie różni się cykl Heavy Duty Diesel Transient Cycle, gdzie średnie obciążenia silnika są mniejsze o ponad połowę od dwu pozostałych, co znajduje odzwierciedlenie w niższej temperaturze spalin i większej wartości średniego współczynnika nadmiaru powietrza.



Rys. 5. Zależność emisji jednostkowej od średniego współczynnika nadmiaru powietrza i średniego obciążenia silnika
 Fig. 5. Specific emission equivalent A/F ratio (λ) and mean torque

Oceniając zmierzone średnie jednostkowe zużycie paliwa w cyklach można zauważyć, że w cyklach NRTC i ETC różnice pomiędzy średnimi wartościami momentu obrotowego są dużo mniejsze niż różnice średnich wartości jednostkowego zużycia paliwa. Oznacza to, że w cyklu ETC silnik pracuje z mniej stabilnym obciążeniem, charakteryzującym się większymi oscylacjami momentu obrotowego w stosunku do wartości średniej.

Na rys. 3 i 4 przedstawiono zależność emisji jednostkowych w cyklach NRTC, ETC HDDTC w funkcji wartości wybranych parametrów uśrednionych w cyklu, a przedstawionych w tabelicy 3. Wyznaczone linie regresji dowodzą, że spadek średniej wartości obciążenia silnika w cyklu badawczym prowadzi do wzrostu emisji jednostkowych wszystkich mierzonych zanieczyszczeń.

4. Wnioski

- Przeprowadzone badania wykazały, że wartość emisji jednostkowej zanieczyszczeń (CO, THC, PM) jest uzależniona od rodzaju użytego cyklu badawczego. Relatywnie najmniej wrażliwa na rodzaj użytego cyklu badawczego jest emisja NO_x.
- Analizowane cykle badawcze nie mogą być stosowane zamiennie do wyznaczania emisji.
- Różnice w zmierzonych wartościach emisji są efektem różnic warunków pracy silnika w poszczególnych cyklach, wyrażonych takimi parametrami jak średni moment obrotowy w cyklu, średni współczynnik nadmiaru powietrza, czy średnia temperatura spalin.
- Różnice w wartościach emisji zmierzonych w poszczególnych cyklach (ETC, HDDTC, NRTC) są tym większe im większa jest wrażliwość silnika na zmiany jego emisji jednostkowej wraz ze zmianą parametrów pracy silnika.