

BADANIA HOMOLOGACYJNE A EKSPLOATACYJNE WARUNKI PRACY SILNIKA WYSOKOPRĘŻNEGO

Ireneusz Hetmańczyk, Andrzej Bieniek
Katedra Pojazdów Drogowych i Rolniczych, Politechnika Opolska

Streszczenie. Każdy nowo skonstruowany pojazd dopuszczony do użytkowania na obszarze UE musi uzyskać certyfikat homologacyjny. Jednym z kryteriów branych pod uwagę w trakcie wykonywania takich testów jest poziom emisji substancji szkodliwych dla środowiska. Rosnące wymagania co do czystości spalin wymuszają na producentach poszukiwanie nowych rozwiązań technicznych. W celu kontroli wielkości emisji UE opracowała szereg testów homologacyjnych w tym również dla pojazdów poruszających się głównie poza drogami publicznymi. W opracowaniu przedstawiono wymagania dotyczące przeprowadzenia pomiarów zgodnych z wymaganiami UE, procedurę opracowania testu NRTC dla konkretnego silnika oraz wyniki badań hamownianych konkretnego silnika o zapłonie samoczynnym. Zwrócono uwagę na rozbieżności pomiędzy założonymi i eksploatacyjnymi punktami pracy silnika.

Słowa kluczowe: silnik wysokoprężny, badania homologacyjne, pojazdy nonroad, normy emisji spalin

Wprowadzenie

Wszystkie pojazdy poruszające się na terytorium UE zostały objęte restrykcjami w zakresie emisji substancji szkodliwych w spalinach. Wśród norm emisji spalin dla pojazdów poruszających się głównie poza drogami utwardzonymi, (pojazdy nonroad), w Europie obowiązują normy Euro, które w znacznej mierze nawiązują do regulacji zawartych w normach Tier (EPA Nonroad Regulation, 40 CFR 89; 40 CFR1039; 40 CFR 1068) obowiązujących m.in. w USA [Bieniek i in. 2011a, Bieniek i in. 2011b]. Oprócz tego inne ograniczenia występują w Indiach (normy Bharat), Japonii (MOE, MOC, MOT) oraz Rosji [Dieselnet, Kopiński, Jacson 2010, Merkisz 1998, VDMA 2008]. Ograniczenie emisji pojazdów nonroad w Europie jest zapisane w odpowiedniej dyrektywie EU-Nonroad Directive 97/68/EC (2004/26/EC), dodatkowo uzupełnionej w przypadku ciągników rolniczych o dyrektywy 2000/25/EC oraz 2005/13/EC. Szczegółowe poziomy dopuszczalnej emisji poszczególnych składników spalin przedstawiono w tabeli 1. Pomiar emisji w po-

szczególnych zakresach mocy maksymalnej silników odbywa się według wytycznych zawartych w dyrektywie a opartych o cykle obciążeniowe dla stanów ustalonych ISO 8178, ECE R49, ESSC (European Steady State Cycle) lub NRSC (Non Road Stationary Cycle) opartym na ECE R49 i dla stanów nieustalonych NRTC (Nonroad Transient Cycle) [Dieselnet, EPA 2001, Merkisz 1998, VDMA 2008].

Tabela 1. Dopuszczalna emisja pojazdów nonroad wg. EU-97/68/EC
Table 1. Limits of emission for non-road vehicles according to EU-97/68/EC

Zakres mocy P_{max} , [kW]	NO _x [g·kWh ⁻¹]	HC [g·kWh ⁻¹]	CO [g·kWh ⁻¹]	PM [g·kWh ⁻¹]	Data wprowadzenia
	NO _x +NMHC				
Etap I					
$37 \leq P_{max} < 75$	9,2	1,3	6,5	0,85	1999
$75 \leq P_{max} < 130$	9,2	1,3	5,0	0,70	1999
$130 \leq P_{max} < 560$	9,2	1,3	5,0	0,54	1999
Etap II					
$18 \leq P_{max} < 37$	8,0	1,5	5,5	0,8	2001
$37 \leq P_{max} < 75$	7,0	1,3	5,0	0,4	2004
$75 \leq P_{max} < 130$	6,0	1,0	5,0	0,3	2003
$130 \leq P_{max} < 560$	6,0	1,0	3,5	0,2	2002
Etap IIIa					
$19 \leq P_{max} < 37$	7,5		5,5	0,6	2007
$37 \leq P_{max} < 75$	4,7		5,0	0,4	2008
$75 \leq P_{max} < 130$	4,0		5,0	0,3	2007
$130 \leq P_{max} < 560$	4,0		3,5	0,2	2006
Etap IIIb					
$37 \leq P_{max} < 56$	4,7		5,0	0,025	2013
$56 \leq P_{max} < 75$	3,3	0,19	5,0	0,025	2012
$75 \leq P_{max} < 130$	3,3	0,19	5,0	0,025	2012
$130 \leq P_{max} < 560$	2,0	0,19	3,5	0,025	2011
Etap IV					
$56 \leq P_{max} < 130$	0,4	0,19	5,0	0,025	2014
$130 \leq P_{max} < 560$	0,4	0,19	3,5	0,025	2014

Źródło: wykonano na podstawie VDMA (2008): *Exhaust Emission Legislation Diesel and Gas Engines*

W tabeli 2 przedstawiono przykładowe punkty pomiarowe cyklu stacjonarnego typu B wg ISO 8178 dotyczące wybranej grup pojazdów nonroad dla cyklu NRSC. W badanym cyklu dokonuje się pomiaru emisji składników spalin z odpowiednią wagą przy różnych wartościach obciążenia silnika oraz podczas pracy silnika na biegu jałowym. Określone w cyklu wartości prędkości znamionowej i pośredniej wału korbowego silnika (zawartej w zakresie 60% do 75% prędkości znamionowej) odpowiadającej prędkości obrotowej maksymalnego momentu obrotowego silnika [Walsh 2001].

Przedstawiony cykl NRSC ma zastosowanie głównie w przypadku pomiaru emisji spalin spalinowych pojazdów nonroad i jest stosowny w obowiązującej normie Euro IIIa oraz wcześniejszych jej wersji (Euro I, II).

Tabela 2. Przykładowe fazy cyklu NRSC w teście dla stanów ustalonych ISO 8178
 Table 2. Examples of phases of NRSC cycles in the stationary test ISO 8178

Faza cyklu B-cycle	Prędkość obrotowa	Obciążenie [%]	Cykl/ współczynnik wagowy				
			C1	C2	D1	D2	G1
1	znamionowa $n_{P_{max}}$ dla P_{max}	100	0,15		0,3	0,05	
2		75	0,15		0,5	0,25	
3		50	0,15		0,2	0,30	
4		25		0,06		0,30	
5		10	0,1			0,10	
6	pośrednia, $n_{T_{max}}$ dla T_{max} ($0,6 n_{P_{max}} - 0,75 n_{P_{max}}$)	100	0,1	0,02			0,09
7		75	0,1	0,05			0,20
8		50	0,1	0,32			0,29
9		25		0,30			0,30
10		10		0,10			0,07
11	bieg jałowy	0	0,15	0,15			0,05

Źródło: wykonano na podstawie Walsh M. (2001):
Global trends in diesel emissions regulation. SAE technical paper

Natomiast inny cykl NRTC (Non Road Transient Cycle) stosuje się do pomiaru emisji składników spalin oraz cząstek stałych pojazdów nonroad w stanach przejściowych. Cykl ten jest stosowany w przypadku norm Euro Stage IIIB oraz IV [Dieselnet, EPA 2001, Gromadko i in. 2008, Merkisz 1998, VDMA 2008].

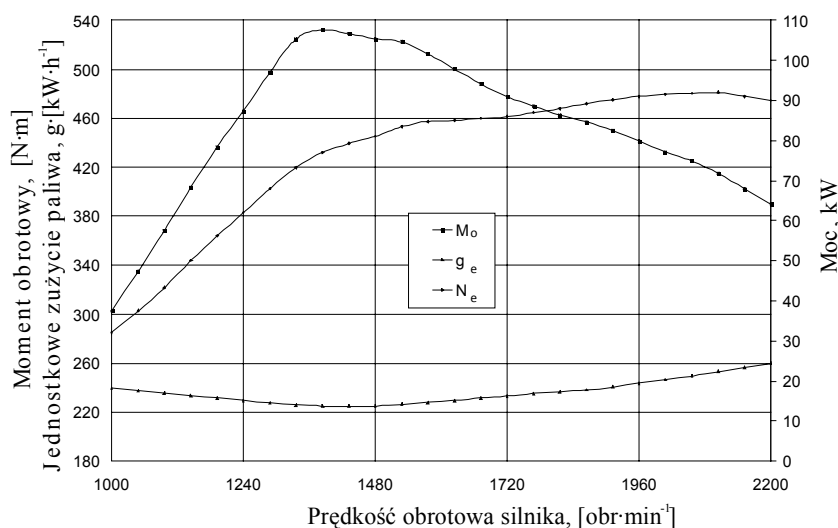
Obiekt badań i aparatura pomiarowa

Jednostkę napędową ciągnika rolniczego stanowi czterocyldrowy silnik typu Z 1505 ciągnika rolniczego Zetor Forterra 125 spełniającego obecnie obowiązującą (2011 r.) normę emisji spalin wg. dyrektywy *EU-97/68/EC* [VDMA 2008]. Jest on zasilany olejem napędowym, wyposażony seryjnie w: system turbodoładowania, chłodnicę powietrza doładowującego typu gaz-gaz, dwustanowy zawór recyrkulacji spalin (*EGR*), chłodnicę spalin typu spaliny-ciecz oraz czterosekcyjną mechaniczną rzędową pompę wtryskową typu Mercedes. Charakterystykę zewnętrzną silnika przedstawiającą przebieg mocy, momentu obrotowego i jednostkowego zużycia paliwa jako funkcję prędkości obrotowej wału korbowego silnika przedstawiono na rys. 1.

Przeprowadzenie cykli pomiarowych zgodnych z normami Euro wymaga zastosowania odpowiedniej aparatury pomiarowej oraz stanowiska badawczego, pozwalającego na przeprowadzenie pomiarów warunków pracy silnika w stanach ustalonych jak i nieustalonych (przejściowych).

Zastosowanie odpowiedniego sterowania obciążeniem silnika powinno pozwolić na odwzorowanie dowolnego cyklu badawczego. Jednocześnie pomiar wymaganych wielkości nie ogranicza się do emisji substancji składników spalin oraz cząstek stałych, ale zawie-

ra także pomiar innych parametrów silnika, dzięki którym możliwa jest szersza analiza jego działania i przeprowadzenia stosownego cyklu badawczego. Z tego względu silnik badawczy powinien być wyposażony w szereg dodatkowych czujników pomiarowych, monitorujących ciśnienie w cylindrze (zestaw AVL), temperaturę w wybranych miejscach układu dolotowego i wylotowego, ciśnienia w układzie recyrkulacji spalin oraz pomiaru emisji wybranych substancji gazowych (zintegrowany czujnik NO_x/O_2) i cząstek stałych.

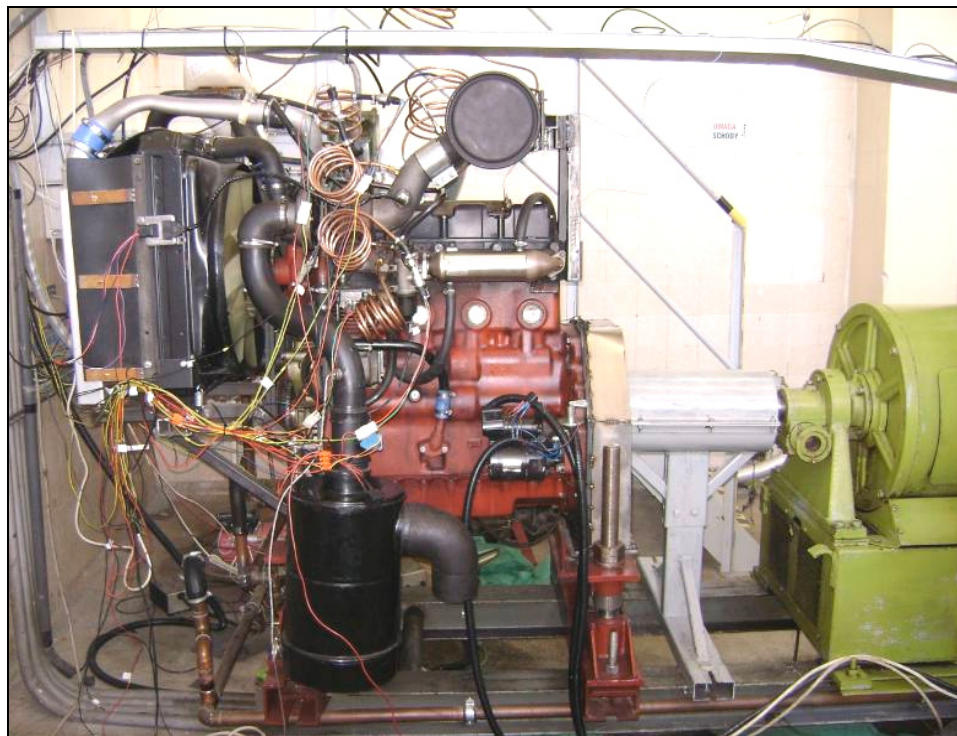


Źródło: wykonano na podstawie materiałów informacyjnych firmy Zetor

Rys. 1. Charakterystyka zewnętrzna silnika Z1505
Fig. 1. The external characteristics of Z1505 engine

W układzie sterującym silnika zamontowano dodatkowe czujniki (ciśnienia, temperatury) oraz aparaturę do pomiaru emisji szkodliwych składników spalin i cząstek stałych.

Jednym z urządzeń wykorzystanych w badaniach jest urządzenie firmy MAHA typu MPM-4. Pozwala ono na precyzyjny pomiar emisji cząstek stałych silnika spalinowego wysokoprężnego. Zastosowany system pomiarowy oparty na wiązce laserowej wykrywa cząstki o minimalnej średnicy ok. 0,002 mm. Pomiar polega na ciągłej rejestracji emisji cząstek stałych w układzie wylotowym, co pozwala na analizę emisji i ocenę warunków pracy silnika również w stanach niestacjonarnych. Skład spalin monitorowano za pomocą analizatora spalin Motorscan. Całość połączono w system pomiarowo-sterujący stanowiska badawczego, dzięki któremu możliwe jest badanie silnika spalinowego według dowolnego ustalonego wcześniej cyklu.



Źródło: opracowanie własne

Rys. 2. Silnik Z 1505 połączony z hamulcem elektrodynamicznym
Fig. 2. Z 1505 engine connected with the electrodynamic brake

Badania

Tworzenie cyklu NRTC dla konkretnego silnika pojazdu pozadrogowego lub maszyny wymaga określenia poziomów odniesienia, zarówno jeżeli chodzi o moment obrotowy jak i prędkość obrotową wału korbowego silnika. Należy więc wyznaczyć minimalne i maksymalne wartości podanych powyżej wskaźników pracy silnika.

Wyznaczenie wartości odniesienia dla prędkości obrotowej wału korbowego silnika należy przeprowadzić zgodnie z zależnością:

$$n_{ref} = n_{sm} + 0,95 \cdot (n_b - n_{sm}) \text{ [obr} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (1)$$

gdzie:

n_{sm} – prędkość obrotowa wału korbowego niska [obr·min⁻¹],

n_b – prędkość obrotowa wału korbowego wysoka [obr·min⁻¹].

przy czym n_{sm} jest najmniejszą prędkością, przy której silnik osiąga 50% mocy znamionowej, zaś n_b jest największą prędkością, przy której silnik wytwarza 70% mocy znamionowej.

Prędkość obrotową wału korbowego silnika denormalizuje się z wykorzystaniem następującej zależności:

$$n_r = \frac{n_{\%}(n_{ref} - n_{idle})}{100} + n_{idle} \quad [\text{obr} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (2)$$

gdzie:

- n_r – realizowana prędkość obrotowa wału korbowego silnika [$\text{obr} \cdot \text{min}^{-1}$],
- n_{ref} – prędkość obrotowa odniesienia wału korbowego [$\text{obr} \cdot \text{min}^{-1}$],
- $n_{\%}$ – procentowa wartość znormalizowanej prędkości [%],
- n_{idle} – prędkość obrotowa wału korbowego silnika biegu jałowego [$\text{obr} \cdot \text{min}^{-1}$].

Drugim wskaźnikiem pracy silnika, który należy poddać denormalizacji jest moment obrotowy

$$M_r = \frac{M_{\%} \cdot M_{max}}{100} \quad [\text{N} \cdot \text{m}] \quad (3)$$

gdzie:

- M_r – realizowany moment obrotowy [$\text{N} \cdot \text{m}$],
- $M_{\%}$ – procentowa wartość znormalizowanego momentu obrotowego dla danej prędkości obrotowej [%],
- M_{max} – Maksymalny moment obrotowy dla danej prędkości obrotowej [$\text{N} \cdot \text{m}$].

Moment obrotowy silnika należy monitorować podczas cyklu uwzględniając bezwładność hamulca. W rezultacie rzeczywisty moment obrotowy silnika jest sumą momentu zmierzonego oraz iloczynu biegunowego masowego momentu bezwładności hamulca dynamometrycznego i jego przyspieszenia kąowego

$$M_r = M_m + I_b \dot{\omega}_b \quad [\text{N} \cdot \text{m}] \quad (4)$$

gdzie:

- M_m – zmierzony moment obrotowy [$\text{N} \cdot \text{m}$],
- I_b – biegunowy masowy moment bezwładności hamulca dynamometrycznego [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$],
- $\dot{\omega}_b$ – przyspieszenie kąowe osi hamulca [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-2}$].

Wyznaczenie charakterystyki zewnętrznej badanego silnika pozwala na przeprowadzenie procedury denormalizacji (tj. zastąpienie względnych wartości obciążenia i prędkości obrotowych silnika wartościami bezwzględnyymi) a w rezultacie wyznaczenie wartości punktów pomiarowych dla cyklu badawczego danego silnika.

Wyznaczenie punktów pomiarowych odpowiadających odpowiedniej fazie w cyklu stacjonarnym NRSC (procedura denormalizacji) wymaga obliczenia rzeczywistych wartości prędkości i momentu obrotowego. Przykładowe wyniki obliczeń dla silnika Z 1505 będącego obiektem analizy w niniejszej pracy przedstawiono w tabeli 3, korzystając z zależności (1–3) oraz uwzględniając charakterystykę zewnętrzną silnika podaną przez producenta.

Tabela 3. Punkty pomiarowe w teście stanów ustalonych ISO 8178 dla silnika Z 1505
 Table 3. Test points in the stationary test ISO 8178 for Z 1505 engine

Faza cyku	Prędkość obrotowa, [obr·min ⁻¹]	Obciążenie [N·m]	Współczynnik wagowy k_i
1	znamionowa, $n_{pmax}=2100$	415	0,15
2		311	0,15
3		208	0,15
4		42	0,10
5	pośrednia, $n_{Tmax}=1400$	530	0,10
6		398	0,10
7		265	0,10
8	bieg jałowy, $n_0=800$	0	0,15

Źródło: materiały własne

Współczynnik wagowy k_i dla poszczególnych faz w teście stacjonarnym określa udział uzyskanych wyników emisji poszczególnych faz testu w całkowitym (końcowym) wyniku emisji poszczególnych składników spalin. Ostatecznie emisja jednostkowa poszczególnych składników można wyrazić następującą zależnością:

$$E_{cj} = \sum_1^i k_i E_{ij} \quad [\text{g}\cdot\text{kWh}^{-1}] \quad (5)$$

gdzie:

- E_{cj} – emisja całkowita danego czynnika j [$\text{g}\cdot\text{kWh}^{-1}$],
- k_i – współczynnik wagowy dla fazy i cyklu testowego,
- i – kolejny numer fazy cyklu ($i = 1 \dots 8$),
- j – kolejny badany składnik spalin ($j = \text{NO}_x, \text{HC}, \text{CO}, \text{PM}$).

Uzyskanie wartości emisji jednostkowej wyrażonej w $\text{g}\cdot\text{kWh}^{-1}$ wymaga stosowania dodatkowej aparatury pomiarowej (np. przepływomierzy spalin) bądź metod estymacji opartej np. na przepływie powietrza i paliwa. Równocześnie należy zwrócić uwagę, że wytyczne dotyczące procedury pomiarowej zawarte w uregulowaniach homologacyjnych dopuszczają stosowanie kilku metod pomiarowych bądź estymacji przepływu spalin, z zastrzeżeniem ich minimalnej dokładności wyrażonej $\pm 2\%$ [VDMA 2008].

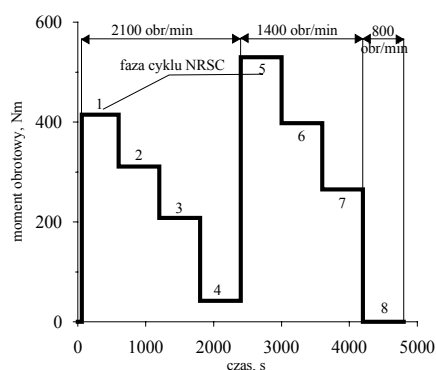
Przebieg testu NRSC z uwzględnieniem czasu trwania poszczególnych faz przedstawiono na rys. 3.

Biorąc pod uwagę charakterystykę zewnętrzną silnika badawczego wyznaczono jego charakterystyczne prędkości obrotowe odniesienia, które przyjmują następujące wartości: $n_{sm}=1140 \text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$, $n_b=2200 \text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$, $n_{idle}=800 \text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$, wówczas prędkość obrotowa wału korbowego odniesienia wynosi:

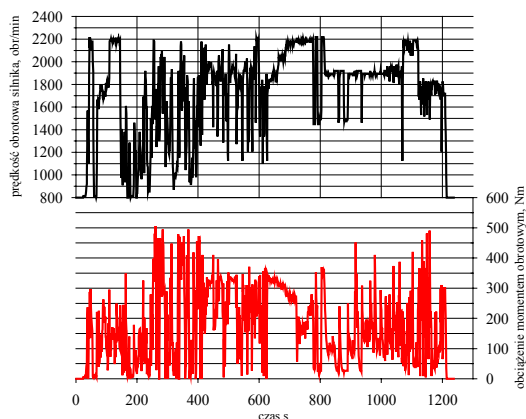
$$n_{ref} = 1140 + 0,95 \cdot (2200 - 1140) \quad (6)$$

$$n_{ref} = 2147 \approx 2150 \text{ [obr}\cdot\text{min}^{-1}] \quad (7)$$

Po przeprowadzeniu procedury denormalizacji dla wszystkich punktów pomiarowych zgodnie z [VDMA 2008] otrzymano cykl NRTC dla badanego silnika (rys. 4).



Źródło: badania własne



Źródło: badania własne

Rys. 3. Przebieg cyklu NRSC dla silnika Z 1505 (wg ISO 8178)

Fig. 3. The course of NRSC cycle for Z1505 engine (according to ISO 8178)

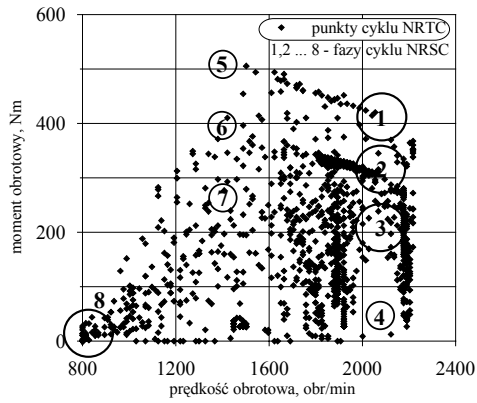
Rys. 4. Cykl NRTC po przeprowadzeniu procedury denormalizacji dla silnika Z 1505

Fig. 4. NRTC cycle after carrying the procedure of the destandardization for the Z 1505 engine

Cykle badawcze a eksploatacyjne warunki pracy silnika

Porównanie położenia punktów pomiarowych cyklu NRSC oraz NRTC w układzie współrzędnych prędkość obrotowa wału korbowego – moment obrotowy silnika pozwala na analizę warunków obu rodzajów testu (rys. 5). Widoczne są obszary pracy silnika, których nie uwzględnia test stacjonarny obejmując tylko kilka punktów charakterystyki silnika.

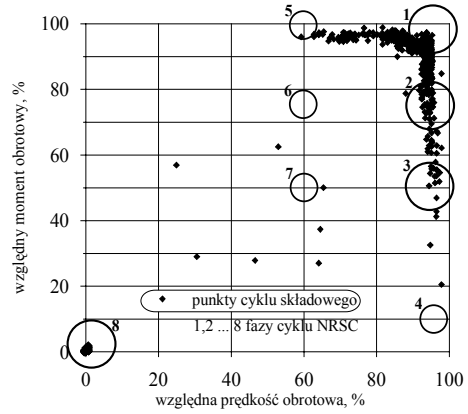
Tworzenie cyklu NRTC oparto na zarejestrowanych wcześniej przebiegach obciążenia i prędkościach obrotowych wału korbowego silnika wybranych rodzajów pojazdów i maszyn poruszających się poza drogami utwardzonymi. Zarejestrowane podczas wykonywania zadania specyficznego dla danego rodzaju pojazdu wybrane wskaźniki pracy silnika były podstawą dla cyklu składowego stanowiącego bazę do stworzenia cyklu uwzględniającego stany nieustalone [VDMA 2008]. Na rys. 6 przedstawiono punkty pracy cyklu składowego ciągnika rolniczego wykonującego orkę oraz naniesiono na nim również fazy cyklu stacjonarnego. Część faz (fazy 4, 5, 6, 7) praktycznie nie znajduje pokrycia w obszarach pracy zarejestrowanych podczas pracy ciągnika. Położenie eksploatacyjnych punktów pracy pokazuje wykorzystanie bardzo ograniczonego pola pracy silnika charakteryzującego się znacząco wartością prędkości obrotowej wału korbowego (w pobliżu znamionowej) oraz wysoką wartością momentu obrotowego silnika wynoszącą powyżej 50% jego wartości maksymalnej.



Źródło: badania własne

Rys. 5. Zbiór punktów pomiarowych cyklu NRTC i NRSC dla silnika Z 1505 (wg ISO 8178)

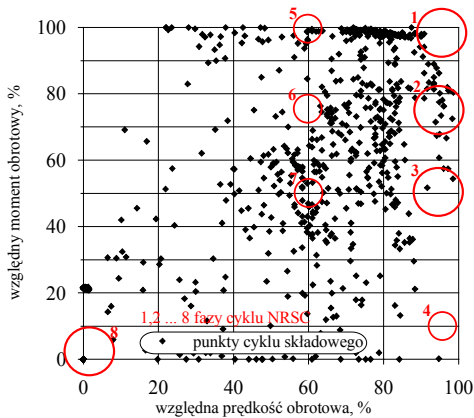
Fig. 5. The collection of test points of NRTC and NRSC cycles for Z 1505 engine (according to ISO 8178)



Źródło: badania własne

Rys. 6. Porównanie rozmieszczenia faz cyklu stanów ustalonych NRSC oraz punktów pomiarowych cyklu składowego ciągnika rolniczego

Fig. 6. The Comparison of phases distribution of the stationary NRSC cycle and test points of the constituent cycle of a tractor unit



Źródło: badania własne

Rys. 7. Porównanie rozmieszczenia faz cyklu stanów ustalonych NRSC oraz punktów pomiarowych cyklu składowego ciągnika gąsienicowego

Fig. 7. Comparison of distribution phases of the stationary NRSC cycle and test points of the constituent cycle of a tractor unit

Podsumowanie

Zestawienie i analiza rozmieszczenia punktów pracy silników innych pojazdów nonroad, przedstawione na powyższych rysunkach, potwierdzają niewielkie pokrycie punktów cyklu NRSC z położeniem faz testu stacjonarnego na charakterystyce silnika. W przypadku rys.6 ok. 30% punktów cyklu składowego pokrywa się z cyklem stanów ustalonych, zaś rys.7 pokazuje pokrycie wynoszące zaledwie ok. 10% punktów cyklu składowego z cyklem NRSC. Z tego względu w przypadku następnych wersji norm Euro zaleca się stosowanie cyklu NRTC (do pomiaru emisji składników spalin), jako bardziej adekwatnego jeżeli chodzi o odwzorowanie eksploatacyjnych warunków pracy silnika w poszczególnych rodzajach maszyn, a dodatkowo uwzględniającego nieustalone stany pracy silnika.

Bibliografia

- Bieniek A., Graba M., Lechowicz A.** (2011): Control of agricultural engine injection system in aspect of ecological property improvement, *Combustion Engines* nr 3/2011, PTNSS-2011-SC-192, s. 1-8, Bieniek A., Mamala J., Graba M. (2011a): Analysis of combustion process at multi-phase injection at nonroad diesel engine, *Combustion Engines* nr 3/2011, PTNSS-2011-SC-190, 1-8.
- Hromadko J., Hong V., Miler P.** (2008): Applications of NRTC Cycle to determine a different fuel consumption and harmful emissions caused by changes of engines technical conditions, *Maintenance and Reliability* 4, 63-65.
- Kopiński D., Jacson C.** (1997): Nonroad Diesel PM Control, US EPA, Washington, 1-20.
- Merkisz J.** (1998): *Ekologiczne problemy silników spalinowych*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, ISBN 83-7143-070-1.
- Walsh M.** (2001): Global trends in diesel emissions regulation - a 2001 update. SAE technical paper 2001-01-0183, doi:10.4271/2001-01-0183.
- EPA (2001): Nonroad diesel emission standards – Staff technical paper, United States Environmental Protection Agency, 1-40.
- VDMA (2008): Exhaust Emission Legislation Diesel and Gas Engines
Dieselnet - Emission Test Cycle, <http://www.dieselnet/standards/cycles>
Materiały informacyjne firmy Zetor, <http://www.zetor.com> (15.05.2010)

CERTIFICATION RESEARCH AND OPERATING CONDITIONS OF THE DIESEL ENGINE WORK

Abstract. Every newly constructed vehicle passed for using in the area of EU must get the certification. One of the criteria taken into consideration under making such tests is a level of emission of harmful substances to the environment. The increasing requirements as for the cleanness of the exhaust force the producers to search for new technical solutions. For the purpose of controlling the emission size EU has prepared series of the certification tests also for vehicles moving mainly outside highway roads. This study presents the requirements concerning the measurements pursuant to EU requirements, the procedure of the NRTC test for the particular engine and research of the engine tests bench of the particular self-ignition engine. Attention has been paid to divergences between the established and real items of the work of the engine.

Key words: the high-pressure engine, certification tests, non-road vehicles, exhaust emission standards

Adres do korespondencji:

Ireneusz Hetmańczyk; e-mail: i.hetmanczyk@po.opole.pl
Katedra Pojazdów Drogowych i Rolniczych
Politechnika Opolska,
ul. Mikołajczyka 5
45-271 Opole



*Dofinansowanie ze środków Wojewódzkiego Funduszu Ochrony Środowiska
i Gospodarki Wodnej w Opolu*