

*silniki wozów bojowych, testy drogowe,
rzeczywiste warunki ruchu,
zużycie paliwa*

Jerzy MERKISZ¹
Ireneusz PIELECHA¹
Jacek PIELECHA¹
Maciej SZUKALSKI²

OCENA EMISYJNOŚCI WOZÓW BOJOWYCH W RZECZYWISTYCH WARUNKACH JAZDY

W artykule przedstawiono rezultaty z badań silnika spalinowego wozu bojowego – kołowego transportera opancerzonego 8x8 Rosomak w warunkach poligonowych. Analizę emisji cząstek stałych wyznaczono w oparciu o pomiar masy oraz liczby cząstek stałych. Wykonano pomiary CO, HC, NO_x i PM oraz zużycia paliwa w warunkach standardowej jazdy poligonowej oraz w trybie overboost. Na podstawie uzyskanych wyników dokonano analizy warunków pracy silnika i pojazdu, porównano wartości emisji spalin oraz zużycia paliwa. Na podstawie badań poligonowych zaproponowano stacjonarny test emisji spalin uwzględniający warunki pracy silnika, a jednocześnie pozwalający na ocenę emisyjności wozów bojowych.

THE ANALYSIS OF THE EXHAUST EMISSION LEVEL IN COMBAT VEHICLES UNDER REAL OPERATING CONDITIONS

The paper presents the results of tests on a combustion engine of an armored modular vehicle 8x8 Rosomak under combat simulating conditions. The analysis of the PM emission was done based on the measurement of the mass and number of the particles. The measurements of CO, HC, NO_x, PM and fuel consumption were performed under the conditions of combat simulation and in the overboost mode. Based on the obtained results an analysis of the engine and vehicle operation was performed and the on-road and unit exhaust emissions as well as on-road and unit fuel consumption were compared. Based on the emission tests simulating combat conditions a stationary emission test has been proposed (one that considers the engine operating conditions).

¹ Politechnika Poznańska, Instytut Silników Spalinowych i Transportu, 60-965 Poznań, ul. Piotrowo 3.
Tel. +48 61 665-22-07, Fax. +48 61 665-22-04. E-mail: Jerzy.Merkisz@put.poznan.pl

¹ Politechnika Poznańska, Instytut Silników Spalinowych i Transportu, 60-965 Poznań, ul. Piotrowo 3.
Tel. +48 61 665-21-18, Fax. +48 61 665-22-04. E-mail: Ireneusz.Pielecha@put.poznan.pl

¹ Politechnika Poznańska, Instytut Silników Spalinowych i Transportu, 60-965 Poznań, ul. Piotrowo 3.
Tel. +48 61 665-21-18, Fax. +48 61 665-22-04. E-mail: Jacek.Pielecha@put.poznan.pl

² Wyższa Szkoła Oficerska Wojsk Lądowych, 51-150 Wrocław, ul. Czajkowskiego 109.
Tel. +48 71 765-81-06, Fax: +48 71 765-82-91. E-mail: Maciej-Szukalski@wp.pl

1. WSTĘP

Ograniczanie zużycia paliwa przez silniki pojazdów typu heavy-duty obecnie jest zagadnieniem często podejmowanym przez producentów tych silników, jak i całych pojazdów. Pomiary certyfikacyjne przeprowadzane na hamowni silnikowej dotyczą samego silnika, jednak nie przedstawiają żadnej informacji o zużyciu paliwa podczas rzeczywistych warunków ruchu takiego pojazdu [4]. Biorąc pod uwagę specjalne zastosowania pojazdów (w tym przypadku wozów bojowych) brak jest badań w tym zakresie. Przeprowadzone przez Autorów badania pozwalają więc na ocenę zużycia paliwa podczas rzeczywistych warunków ruchu. Warunki te określono jako warunki poligonowe, w których możliwe było wykorzystanie zwiększonej mocy silnika (tzw. *overboost*).

Ze względu na specyfikę użytkowania wozów bojowych podjęto próbę oceny sposobu eksploatacji wozu bojowego i jego wpływu na zużycie paliwa i emisję składników szkodliwych. Znajomość tych wielkości pozwala na ocenę sposobu użytkowania wozów bojowych. Celem opracowania jest odpowiedź na pytanie: w jakim stopniu zmiana warunków eksploatacji wpływa na zużycie paliwa i emisję składników szkodliwych przez silnik spalinowy pojazdu bojowego. Kolejnym zadaniem było określenie możliwości opracowania stacjonarnego testu emisji spalin, który byłby reprezentatywny dla pojazdów podczas jazdy poligonowej. Analiza literatury wskazuje na prowadzone badania drogowe zużycia paliwa i emisji składników toksycznych z pojazdów osobowych [1, 5] i ciężarowych [2, 3]. Dotychczas w Polsce nie prowadzono takich badań na pojazdach bojowych – Politechnika Poznańska wraz Wyższą Szkołą Oficerską Wojsk Lądowych we Wrocławiu są pierwszymi ośrodkami naukowymi w Polsce, które zajęły się tym problemem [6-8].

2. METODYKA BADAWCZA

Badaniom poddano kołowy transporter opancerzony, którego podstawowe dane techniczne przedstawiono w tab. 1. Charakterystyka gęstości czasowej [1] posłużyła do określenia warunków pracy silnika oraz pojazdu. Charakterystyka ta będzie zastępowała cały cykl jazdy w warunkach poligonowych kilkunastoma punktami pomiarowymi na charakterystyce pracy silnika i pojazdu. Do badań emisji spalin wykorzystano:

– mobilny analizator do badań stężenia składników gazowych spalin SEMTECH DS firmy SENSORS; analizator umożliwiał także pomiar masowego natężenia przepływu spalin;

Tab. 1. Parametry techniczne silnika pojazdu bojowego Rosomak

Wielkość	Wartość
Typ silnika	Scania DI1249A03P
Liczba cylindrów/układ	6/rzędowy
Max moc silnika	294 kW/2100 obr/min
Max moment obrotowy	1688 N·m/1500 obr/min
Max moc silnika – <i>oveboost</i>	360 kW/2100 obr/min
Max moment obrotowy – <i>overboost</i>	1974 N·m/1500 obr/min
Masa pojazdu	22 000 kg

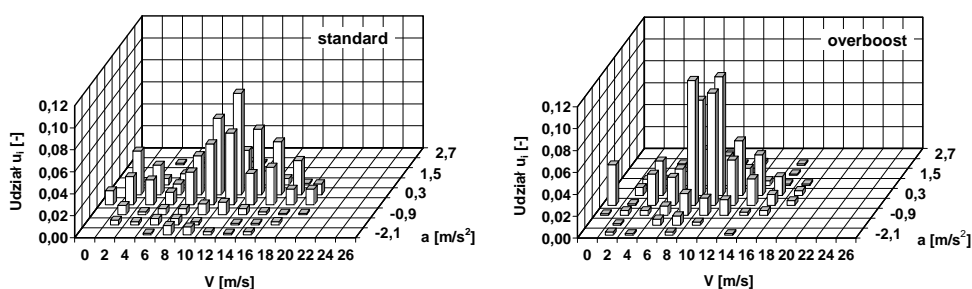
- aparaturę do pomiaru stężenia cząstek stałych łącznie z układem kondycjonowania próbki – układem rozcieńczania spalin (Micro Soot Sensor firmy AVL);
- układ rozcieńczania spalin umożliwiał również wykorzystanie spektrometru masowego do analizy liczby cząstek stałych (Engine Exhaust Particle Sizer 3090 firmy TSI).

Do pomiarów warunków pracy silnika i informacji o zużyciu paliwa skorzystano z danych diagnostycznych z pokładowej sieci pojazdu (standard CAN J1939); uzyskane dane posłużyły do opracowania macierzy pracy silnika (i pojazdu) dla różnych aspektów prowadzonych badań. Emisyjność pojazdu bojowego przedstawiono w postaci porównania (w dwóch trybach pracy: standard i *overboost*) stężenia, emisji drogowej i jednostkowej poszczególnych składników spalin oraz zużycia paliwa.

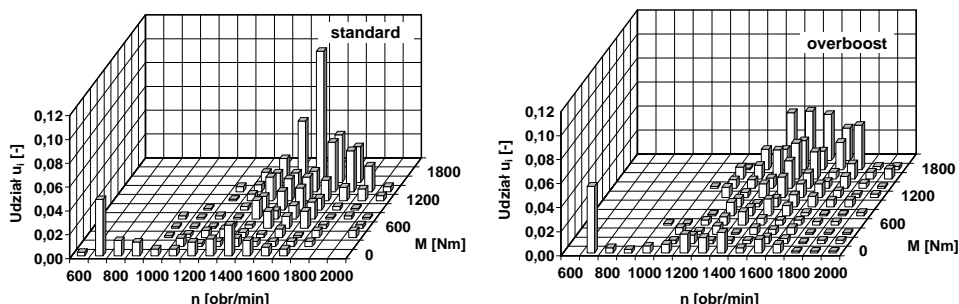
3. WYNIKI BADAŃ EMISJI W WARUNKACH POLIGONOWYCH

Charakterystykę pracy silnika podczas jazdy poligonowej podzielono na dwa etapy: przejazd w warunkach mocy standardowej oraz zwiększonej – *overboost*. Charakterystyka ruchu pojazdu wskazuje na niewielkie ograniczenie prędkości pojazdu z wykorzystaniem trybu *overboost* (rys. 1). Skutkuje to zwiększeniem udziału czasu pracy pojazdu z większymi przyspieszeniami. Pole pracy pojazdu w obu trybach pracy (standard i *overboost*) jest skupione wokół niewielkich przyspieszeń z ustalonymi prędkościami, jednakże w drugim przypadku udziały czasu pracy silnika są zgrupowane wokół węższego przedziału prędkości pojazdu. W warunkach *overboost* wykorzystywane jest większe pole pracy silnika – wykorzystuje się maksymalne wartości prędkości i obciążenia (rys. 2). Brak jest natomiast zauważalnego wpływu trybu pracy na udział czasu pracy silnika na biegu jałowym.

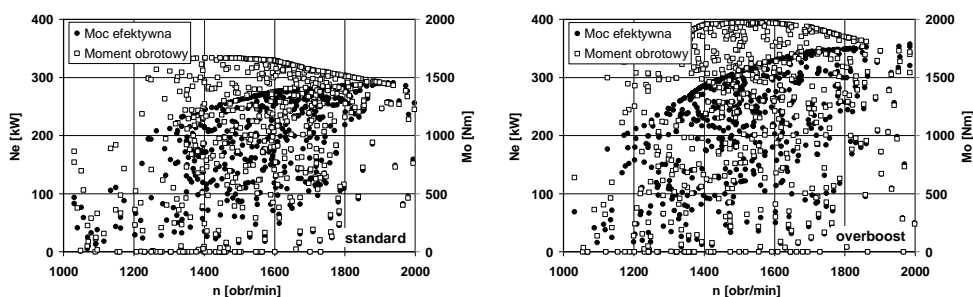
Analiza pola pracy silnika (rys. 3) w trybie standard wskazuje na wykorzystanie głównie zakresu prędkości obrotowych w przedziale 1400-1800 obr/min (dla *overboost* odpowiednio 1400-1700 obr/min) oraz momentu obrotowego w przedziale 500-1700 N·m (dla *overboost* odpowiednio: 1000-2000 N·m). Wskazuje to na niewielkie zawężenie prędkości obrotowych oraz przesunięcie momentu obrotowego o 500 N·m na korzyść trybu *overboost*. Można stwierdzić, że w obu trybach pracy wykorzystuje się maksymalne parametry pracy silnika (wielkość mocy i momentu obrotowego silnika – por. dane z tab. 1)



Rys. 1. Charakterystyka pracy pojazdu podczas jazdy poligonowej: a) w trybie standard, b) w trybie *overboost*



Rys. 2. Charakterystyka pracy silnika podczas jazdy poligonowej: a) w trybie standard, b) w trybie overboost

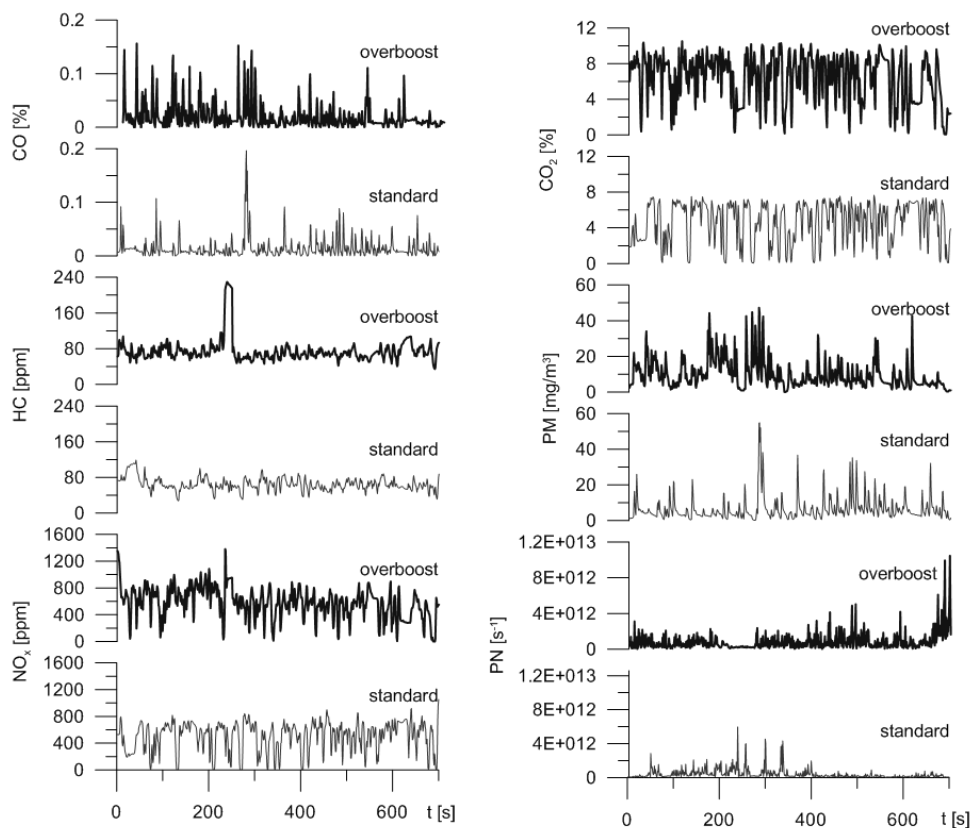


Rys. 3. Warunki eksploatacji silnika na jego charakterystyce ogólnej podczas jazdy poligonowej: a) w trybie standard, b) w trybie overboost

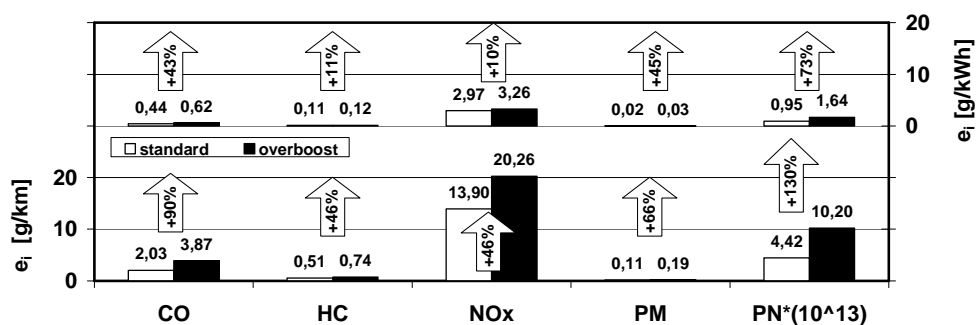
Rozszerzenie zakresu pola pracy silnika (w trybie *overboost*) pozwala wnioskować o wzroście zużycia paliwa i emisji składników szkodliwych w tym trybie pracy – co potwierdzono w badaniach (rys. 4). Stężenia wszystkich składników szkodliwych są znacznie większe niż podczas standardowego trybu jazdy poligonowej.

Maksymalne wartości stężenia dwutlenku węgla (CO_2) w warunkach jazdy poligonowej: w trybie standardowym i *overboost* wynoszą odpowiednio około 7% i 10%. Znaczące różnice w wartościach odnotowano w odniesieniu do stężenia tlenków azotu: odpowiednio średnio około 500 oraz 900 ppm. Wynika to ze wzrostu obciążenia silnika w trybie *overboost*. Stężenie cząstek stałych (PM) zwiększa się średnio od 7 do ponad 13 mg/m^3 .

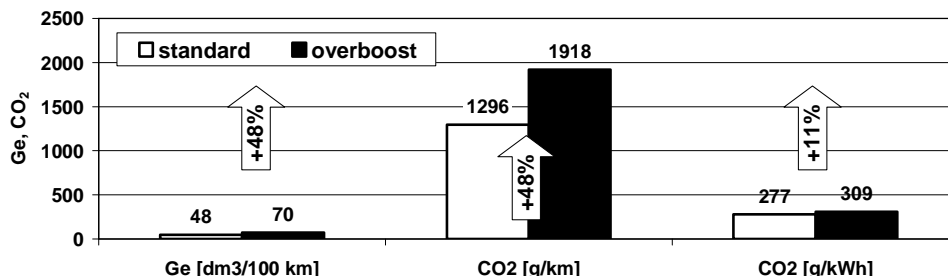
Odnotowano znacznie większe zmiany w emisji drogowej niż jednostkowej między trybem standardowym a *overboost* (rys. 5). Największe zmiany dotyczą: emisji CO (90%), PM (66%) oraz liczby cząstek stałych (PN) – 130%. Zmiany emisji jednostkowej składników toksycznych są o około 50% mniejsze w stosunku do wartości emisji drogowej między warunkami pracy silnika (tryb standard i *overboost*). Warunki pracy silnika mają istotne znaczenie w przypadku zużycia paliwa: odnotowano przyrost o 48% (z 48 do 70 $\text{dm}^3/100 \text{ km}$) podczas pracy silnika w trybie *overboost* (rys. 6). Emisja jednostkowa dwutlenku węgla jest proporcjonalna do przebiegowego zużycia paliwa.



Rys. 4. Stężenie składników spalin i liczba cząstek stałych (PN) w warunkach jazdy poligonowej w dwóch trybach pracy standard i overboost



Rys. 5. Emisja drogowa i jednostkowa składników spalin podczas jazdy poligonowej w trybie standard oraz overboost z silnika pojazdu bojowego Rosomak



Rys. 6. Przebiegowe zużycie paliwa oraz emisja dwutlenku węgla podczas jazdy poligonowej w trybie standard oraz overboost z silnika pojazdu bojowego Rosomak

4. TEST EMISJI SPALIN Z POJAZDÓW BOJOWYCH

Konieczność znajomości emisji pojazdu bojowego wymusza badania drogowe takiego pojazdu w warunkach rzeczywistych. W tym celu przeprowadzono przedstawione powyżej badania. Jednakże znajomość kryteriów oceny emisyjności takiego pojazdu pozwala na porównywanie emisyjności bez konieczności przeprowadzania pracochłonnych badań. Z tego względu podjęto analizę warunków pracy pojazdu bojowego w celu opracowania testu badawczego. Przyjęto następujące założenia:

- test powinien być reprezentatywny dla badań poligonowych; powinien uwzględniać specyfikę eksploatacji takich pojazdów w warunkach poligonowych; wyniki emisji podczas testu stacjonarnego powinny być zbliżone do badań poligonowych;
- test powinien być zbliżony do testu podczas badań silników pojazdów typu heavy-duty; liczba faz testu nie powinna przekraczać 3 oraz ich dobór powinien być zbliżony do cyklu ISO 8178-F (wykorzystanie fazy biegu jałowego, częściowego i maksymalnego obciążenia silnika);
- ocenie podlega tylko tryb pracy *overboost*, gdyż są to warunki zbliżone do warunków bojowych i tylko wtedy wykorzystuje się wartości maksymalne pola pracy.

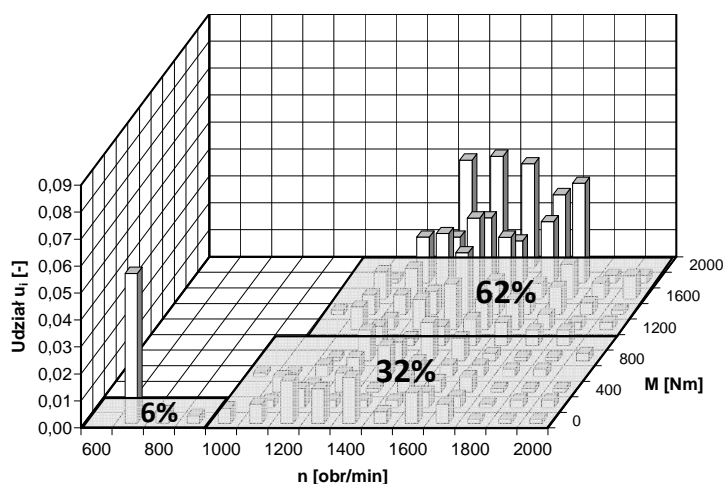
Na podstawie tak przyjętych założeń i charakterystyki gęstości czasowej podzielono pole pracy silnika na trzy obszary (rys. 7): obszar pracy biegu jałowego i minimalnych prędkości obrotowych (obszar 1), obszar wykorzystujący obciążenia częściowe (obszar 2) oraz obszar o maksymalnych obciążeniach (obszar 3). Obszar ten charakteryzuje się nieco mniejszym zakresem prędkości obrotowych silnika.

Zsumowanie udziałów gęstości czasowych określonych stref pozwoliło na stworzenie udziałów danych faz wykorzystywanych w opracowanym teście badawczym i wynoszą odpowiednio:

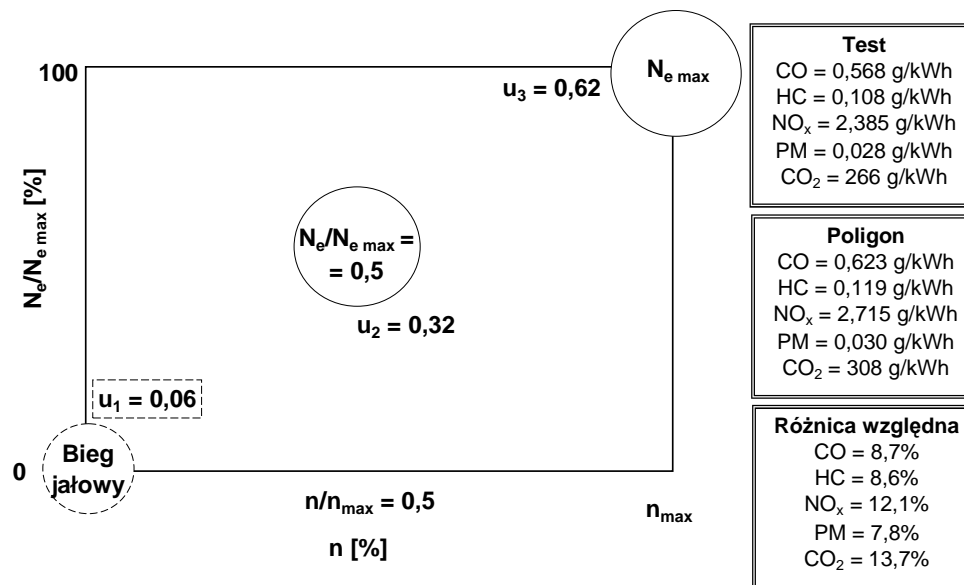
- faza biegu jałowego – 6%;
- faza obciążenia częściowego – 32%;
- faza mocy maksymalnej – 62%.

Przedstawiony test badawczy pozwolił na uzyskanie emisji poszczególnych składników szkodliwych, którego wyniki przedstawiono na rys. 8. Uzyskane wartości emisji w teście są od kilku do kilkunastu procent niższe niż w jeździe poligonowej. Jednakże niewielki błąd wyznaczenia emisji każdego składnika (od 8 do 13%) pozwala na stwierdzenie

reprezentatywności testu stacjonarnego na tle badań poligonowych. Najmniejszy błąd uzyskano dla emisji cząstek stałych, natomiast największy dla pomiarów emisji dwutlenku węgla.



Rys. 7. Dobór faz testu na podstawie charakterystyki gęstości czasowej silnika podczas przejazdu poligonowego



Rys. 8. Dobór faz i udziałów faz testu badawczego oraz wyniki: emisji poligonowej oraz w opracowanym teście badawczym

5. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że:

1. Warunki pracy silnika i pojazdu w obu trybach: standardowym i *overboost* różnią się: tryb *overboost* powoduje znaczne zwiększenie pola pracy silnika spalinowego – pozwalając na wykorzystanie maksymalnych wartości prędkości obrotowych i momentu obrotowego.
2. Tryb *overboost* powoduje zwiększenie emisji drogowej wszystkich składników spalin, najbardziej zwiększa się liczba cząstek stałych o 130%, zwiększa się również emisja jednostkowa składników spalin: oprócz zmiany liczby cząstek stałych PN (130%), obserwuje się również ponad 40% zwiększenie masy cząstek stałych.
3. Wzrost zużycia paliwa jest proporcjonalny do emisji drogowej dwutlenku węgla i w trybie *overboost* wynosi około 48% (z 48 do 70 dm³/100 km). Emisja jednostkowa dwutlenku węgla zwiększa się o 11%.
4. Opracowany test badawczy pozwala na pomiary emisyjności wozów bojowych Rosomak w trybie *overboost* bez konieczności prowadzenia badań drogowych; różnice w emisji spalin w teście i badaniach drogowych wynoszą od kilku do kilkunastu procent: większe wartości odnotowano podczas badań poligonowych emisji spalin.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2009-2011 jako projekt badawczy No O N509 086337.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Czerwinski J., Pétermann J.-L., Ulrich A., Mueller G., Wichser A.: *Particle emissions of a TDI-engine with different lubrication oils*, Combustion Engines, 2(121), 2005.
- [2] Czerwinski J., Zimmerli Y., Mayer A.: *Experiences about Retrofitting of City Busses with DPF's*, Combustion Engines, 1(124), 2006.
- [3] Ensfield C., Bachman L.J., Erb A., Bynum C.: *Evaluating Real-World Fuel Economy on Heavy Duty Vehicles using a Portable Emissions Measurement System*, SAE Technical Paper 2006-01-3543.
- [4] Gao Y., Checkel M.D.: *Emission Factors Analysis for Multiple Vehicles Using an On-Board, In-Use Emissions Measurement System*, SAE Technical Paper 2007-01-1327.
- [5] Merkisz J., Pielecha J.: *Analysis of Particle Concentrations and Smoke in Common-Rail Diesel Engine*, SAE Technical Paper 2008-01-1743.
- [6] Merkisz J., Pielecha I., Pielecha J., Szukalski M.: *PM Emission from Combat Vehicle Engines During Start and Warm-Up*. 14th ETH Conference on Combustion Generated Nanoparticles, Zurich 1-4.08.2010.
- [7] Merkisz J., Pielecha I., Pielecha J., Szukalski M.: *Exhaust emission from combat vehicle engines during start and warm-up*. IInd International Scientific Conference: Transport Problems, Katowice-Kraków, 8-11.06.2010.
- [8] Merkisz J., Pielecha I., Pielecha J., Szukalski M.: *Zużycie paliwa przez silniki pojazdów bojowych w rzeczywistych warunkach ruchu*. VII Konferencja Naukowo-Techniczna LOGITRANS „Logistyka, systemy transportowe, bezpieczeństwo w transporcie”, Szczyrk 14-16.04.2010.