

MERKISZ Jerzy, FUĆ Paweł, LIJEWSKI Piotr, BAJERLEIN Maciej,
ZIÓŁKOWSKI Andrzej, RYMANIAK Łukasz

ANALIZA EMISJI CO₂ I ZUŻYCIA PALIWA W TEŚCIE NEDC PRZEPROWADZONYM NA HAMOWNI DYNAMICZNEJ

Streszczenie

W artykule przeprowadzono analizę uzyskanych wartości emisji CO₂ i zużycia paliwa w teście NEDC odwzorowanym na silnikowym stanowisku hamulcowym wyposażonym w hamownię dynamiczną. W celu odwzorowania testu homologacyjnego NEDC wykorzystano oprogramowanie ISAC 400 (Inertia Simulation And Control), które oprócz zdefiniowania profilu prędkości, umożliwia wprowadzenie podstawowych parametrów pojazdu. Do oprogramowania wprowadzono parametry pojazdu, w którym stosowany jest silnik spalinowy 1,3 SDE (Small Diesel Engine) o objętości skokowej 1,3 dm³, taki jaki zainstalowany jest na stanowisku badawczym. Pomiar emisji CO₂ przeprowadzono przy użyciu mobilnego przyrządu SEMTECH DS z grupy PEMS (Portable Emissions Measurement System), a pomiar zużycia paliwa wykonano za pomocą miernicy paliwowej wchodzącej w skład stanowiska.

WSTĘP

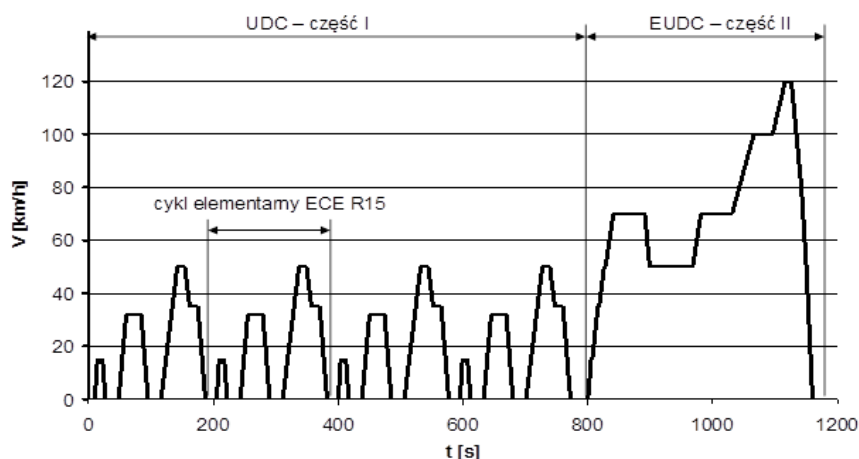
Przeprowadzanie procedury homologacyjnej pojazdów w zakresie emisji szkodliwych substancji gazów wylotowych określonej Regulaminem nr 83 EKG ONZ jest złożonym i skomplikowanym procesem. Ta procedura wymaga m.in. wykonania pomiaru emisji gazów wylotowych z pojazdów w teście jezdnym NEDC realizowanym na specjalnej hamowni podwoziowej. Test NEDC składa się z dwóch zasadniczych części UDC (*Urban Driving Cycle*) i EUDC (*Extra Urban Driving Cycle*). Część UDC składa się z 4 elementarnych bloków ECE R15, w których maksymalna prędkość pojazdu wynosi 50 km/h (rys. 1). W drugiej części testu (tryb jazdy autostradowej) maksymalna prędkość pojazdu wynosi 120 km/h. Czas trwania testu NEDC wynosi 1180 sekund (tab. 1) i w tym czasie pojazd pokonuje łączną drogę 11 km [1, 5].

Jak wspomniano, test NEDC wykonywany jest przez kierującego pojazdem umieszczonym na hamowni podwoziowej. Regulamin ściśle określa przebieg testu – profil prędkości wraz z możliwymi odchyłkami oraz przełożenie skrzyni biegów w danym etapie (w przypadku pojazdów wyposażonych w manualną skrzynię biegów). Ze względu na dużą różnorodność homologowanych pojazdów kierujący wykonujący test musi posiadać duże umiejętności oraz doświadczenie, aby prawidłowo wykonać test NEDC. W tym miejscu należy podkreślić, że badania na hamowni podwoziowej są drogie i czasochłonne. Dlatego dąży się do ograniczenia wpływu czynnika ludzkiego na pojawienie się ewentualnych nieprawidłowości.

Obecne trendy w rozwoju procedur homologacyjnych dotyczących pomiarów emisji gazów wylotowych ukierunkowane są na zautomatyzowanie przeprowadzanych pomiarów –

eliminację wpływu czynnika ludzkiego na pojawianie się błędów. W przypadku testu NEDC wykonywanego na hamowni podwoziowej całkowite wyeliminowanie udziału kierującego pojazdem jest praktycznie niemożliwe. Dlatego zdecydowano, aby transponować test NEDC na silnikowe stanowiska hamulcowe. W tym celu konieczne było skonstruowanie takiego stanowiska badawczego, na którym możliwe będzie odwzorowanie nie tylko profilu prędkości testu, ale również parametrów pojazdów i całego układu napędowego – masy pojazdu, oporów toczenia, przełożenia skrzyni biegów, charakterystyki sprzęgła etc. Zabiegi te powiodły się i na rynku dostępne są stanowiska badawcze umożliwiające odwzorowanie rzeczywistych cykli jezdnych pojazdu będących zapisem ruchu pojazdu jako funkcja $f = V(t)$ wraz z oprogramowaniem symulującym parametry pojazdu i zachowania kierującego.

Na tego typu stanowiskach możliwe będzie odwzorowanie profili ruchu pojazdów zarejestrowanych przy użyciu mobilnych analizatorów gazów wylotowych z grupy PEMS. Umożliwi to prowadzenie prac naukowo-badawczych ograniczających negatywne oddziaływanie motoryzacji na środowisko naturalne poprzez optymalizację parametrów pracy silnika spalinowego w stanach dynamicznych [1, 2, 8, 9].



Rys. 1. Schemat testu NEDC jako funkcja $f = V(t)$ [10]

Źródło: [10]

Tab. 1. Charakterystyka testu NEDC [5]

Parametr	Jednostka	NEDC		
		UDC	EUDC	UDC + EUDC
Czas	s	780	400	1180
Dystans	m	4067	6956	11 023
Prędkość maksymalna	km/h	50	120	120
Prędkość średnia	km/h	18,8	62,6	33,6

Źródło: [5]

1. METODYKA BADAWCZA

1.1. Stanowisko badawcze wykorzystane do badań

Silnikowe stanowisko hamulcowe wyposażone w hamownię dynamiczną przeznaczone do badań silników spalinowych firmy AVL GmbH jest zaawansowanym stanowiskiem badawczym, wykorzystującym najnowocześniejsze osiągnięcia techniki (rys. 2). Stanowisko wyposażone jest w pełną infrastrukturę niezbędną do prowadzenia badań stacjonarnych w warunkach ustalonych, nieustalonych oraz dynamicznych pracy silnika spalinowego. Pozwala na odwzorowanie warunków eksploatacji silnika w pojeździe oraz tworzenie różnego rodzaju programów i testów badawczych. Stanowisko umożliwia rejestrację znacznej liczby parametrów pracy silnika, których sposób definiowany jest przez operatora. Ponadto

hamownia może być uzupełniana o dodatkowe czujniki, regulatory, a także urządzenia pomiarowe np. analizatory spalin, indykatory itp.



Rys. 2. Silnikowe stanowisko hamulcowe wyposażone w hamownię dynamiczną AVL DynoRoad 120 kW

Budowa prezentowanego stanowiska do badań silników spalinowych jest złożona. W jej strukturze występuje wiele elementów, systemów i układów. Hamulec jest najważniejszym elementem całego stanowiska. Główną jego część stanowi trójfazowa, asynchroniczna maszyna elektryczna o konstrukcji klatkowej, która może odebrać moc maksymalną 120 kW. Praca mechaniczna generowana przez silnik spalinowy zamieniana jest w maszynie na energię elektryczną, która po przekształceniu napięciowo-częstotliwościowym trafia do sieci zewnętrznej. Najważniejsze dane techniczne hamulca przedstawiono w tabeli 2.

Tab. 1. Dane techniczne hamulca dynamicznego [3]

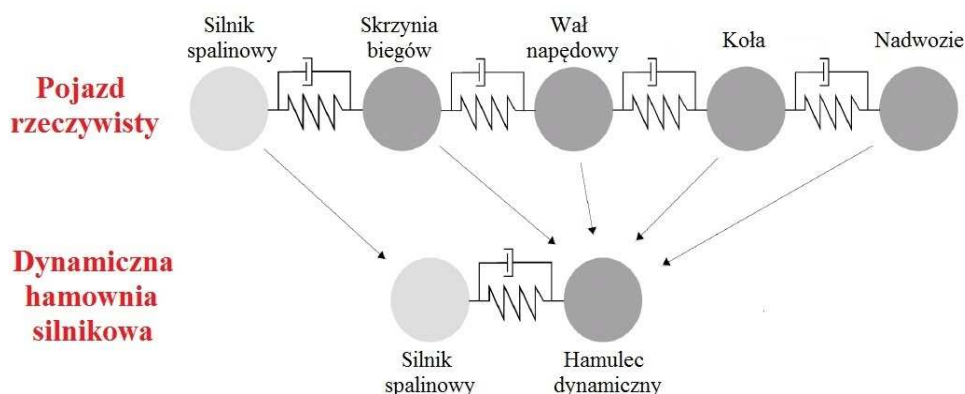
Parametr	Wartość
Napięcie	3 x 500 V
Częstotliwość	267 Hz
Prąd maksymalny	159 A
Moc	120 kW
Liczba biegunów	4
Moment maksymalny	509 N·m
Zakres prędkości obrotowych	0÷8000 obr/min
Pobór mocy	6400 W
Sprawność	94.6 %

Zródło: [3]

Wszystkie komponenty stanowiska zaliczane jako *hardware* i *software* zebrane są w systemie nazwanym PUMA (*Test Bed and Measurement Automatic*). Zaimplementowane oprogramowanie pozwala opracowywać różnego rodzaju testy i symulacje, a także odzwierciedlać warunki eksploatacji jednostki spalinowej w rzeczywistym pojeździe. Ponadto możliwe jest szybkie przetwarzanie otrzymanych wyników badań. Rozbudowane modele matematyczne umożliwiają wprowadzanie parametrów opisujących wszystkie elementy układu napędowego, a także wpływu kształtów, wymiarów i mas pojazdu na pracę silnika spalinowego.

Specjalny interfejs *software* ISAC 400 pozwala tworzyć programy badawcze obejmujące testy typowo silnikowe np. ETC, podwoziowe np. NEDC, a przede wszystkim indywidualne – dostosowane do postawionego problemu badawczego lub odzwierciedlające rzeczywistą eksploatację pojazdu. Użytkownik ma prawo dowolnie dobierać i zadawać wartości szerokiej gamie parametrów, jednak pod warunkiem, że nie spowoduje to zagrożenia uszkodzenia hamulca lub silnika. W tym celu do systemu wprowadzone są wartości graniczne pewnych parametrów, które nie mogą zostać przekroczone np. prędkość obrotowa wału korbowego i obciążenie silnika. Programy służące do rejestracji i obróbki wyników wyposażone są w bardzo wiele użytecznych funkcji pozwalających generować prawie natychmiastowo żądane wykresy, porównania itp.

Zasada działania hamowni dynamicznej została zaprezentowana na rysunku 3. W pojeździe na pracę jednostki spalinowej wpływają takie czynniki jak: skrzynia biegów, sprzęgło, wał napędowy, most, masy i kształt pojazdu związany z oporami ruchu, średnica kół itd. Jednak największe znaczenie mają warunki zadane przez kierowcę. Dynamiczne stanowisko hamulcowe pozwala na odzwierciedlenie tych wszystkich parametrów z jak największą dokładnością. W procesie modelowania uwzględnia się także bezwładności mas poszczególnych elementów. W ten sposób upraszcza się badania nie tylko samych silników spalinowych, ale także elementów układu napędowego, które mogą być w dowolny sposób modelowane i optymalizowane. Dodatkową korzyścią stosowania hamowni dynamicznej jest zmniejszenie kosztów badań, a także skrócenie czasu realizacji pomiarów.



Rys. 3. Schemat ideowy działania hamowni dynamicznej [3]

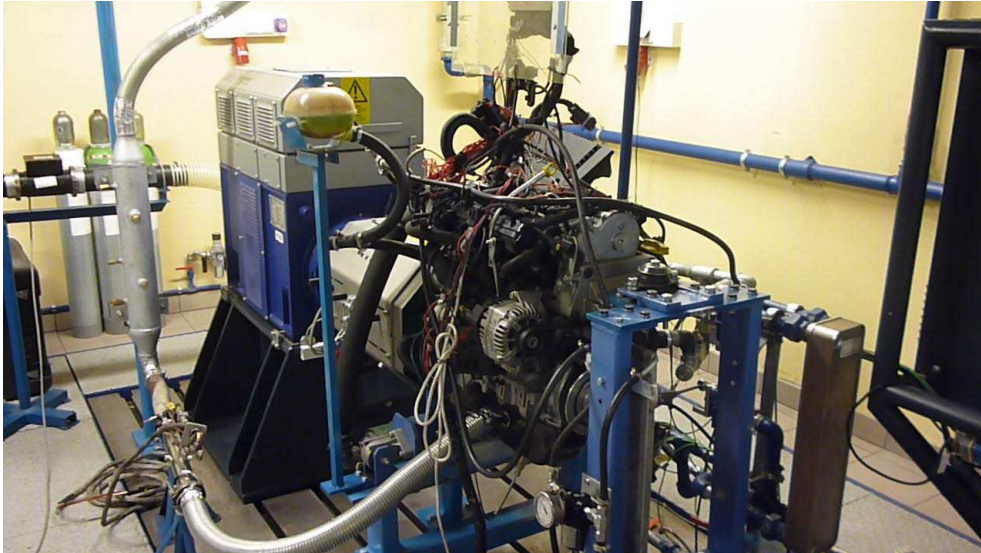
Źródło: [3]

1.2. Charakterystyka silnika spalinowego zainstalowanego na stanowisku badawczym

Na stanowisku badawczym zainstalowano silnik spalinowy 1,3 SDE. Jest to silnik o zapłonie samoczynnym, mocy maksymalnej 66 kW generującej maksymalny moment obrotowy 200 Nm oraz spełniający normę emisji Euro 4 (tabl. 3, rys.).

Tab. 3. Charakterystyka silnika spalinowego 1,3 SDE

Parametr	Wartość
Typ silnika	ZS
Liczba cylindrów / zaworów na cylinder	4 / 4
Rodzaj zasilania	common rail
Objętość skokowa	1 248 cm ³
Moc maksymalna	66 kW (90 KM) przy 4000 obr/min
Maksymalny moment obrotowy	200 Nm przy 1750 obr/min
Norma emisji	Euro 4



Rys. 4. Widok silnika 1,3 SDE zainstalowanego na stanowisku badawczym

1.3. Aparatura wykorzystana do badań

Do pomiaru emisji CO₂ wykorzystano mobilny przyrząd SEMTECH DS z grupy PEMS wykorzystywany do drogowych pomiarów emisji gazów wylotowych (rys. 5). Głównym kryterium decydującym o wyborze tej aparatury badawczej był brak konieczności pomiaru tła w stanowisku badawczym. Było to możliwe dzięki przeprowadzeniu procesu zerowania przyrządu, gdzie odniesieniem było powietrze otoczenia ze stanowiska. Szczegółowy opis przyrządu SEMTECH DS przedstawiono we wcześniejszych publikacjach autorów [4-7].

a)



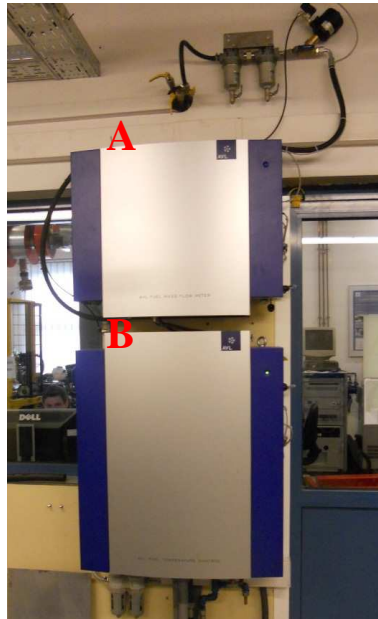
b)



Rys. 5. Aparatura do pomiaru emisji CO₂: a) przyrząd SEMTECH DS – pierwszy z prawej, b) przepływomierz do pomiaru masowego natężenia przepływu gazów wylotowych

Pomiar zużycia paliwa przeprowadzono za pomocą miernicy paliwowej stanowiska badawczego AVL DynoRoad 120 kW (rys. 6a). Miernica wykorzystuje wagowy pomiar zużycia paliwa, w którym określany jest czas ubytku wyznaczonej masy paliwa pobierano z naczynia pomiarowego. W ten sposób pomiar jest niezależny od zmian gęstości cieczy, jak również od temperatury, dzięki czemu istnieje możliwość wyeliminowania jednego z głównych źródeł błędów. Układ pomiaru paliwa wyposażony jest również w system kondycjonowania, który utrzymuje zadaną temperaturę paliwa (rys. 6b). W układzie tym zastosowana jest również pompa dostarczająca paliwo do silnika generująca ciśnienie 6 bar. Dzięki temu nie wymagane jest stosowanie pompy wstępnej wykorzystywanej w konwencjonalnych stanowiskach pomiarowych. Przed pompą wysokiego ciśnienia

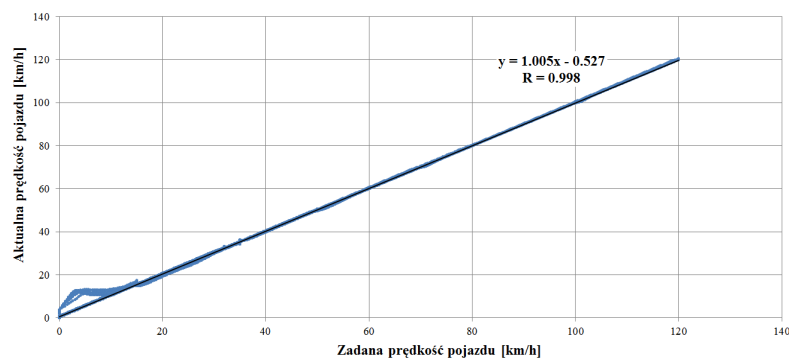
w układzie *common rail* zastosowano reduktor ciśnienia, który obniża ciśnienie paliwa, do 3 bar, wymaganego jest na wejściu do pompy. Układ pomiarowy posiada również instalację odpowiedzialną za odprowadzenie nadmiaru paliwa z zaworu przelewowego układu *common rail*.



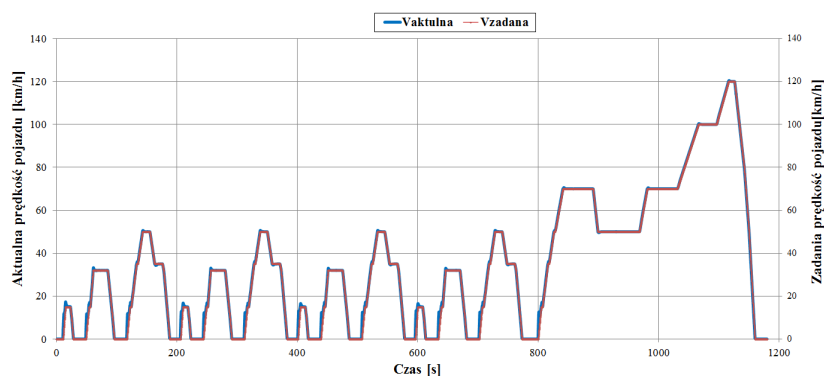
Rys. 6. Widok elementów układu doprowadzenia i pomiaru zużycia paliwa stanowiska badawczego:
a) miernica, b) układ kondycjonowania

2. ANALIZA PRĘDKOŚCI UZYSKANYCH NA STANOWISKU

W celu oceny dokładności odwzorowania profilu prędkości testu NEDC na dynamicznych silnikowym stanowisku hamulcowym dokonano korelacji pomiędzy prędkością zadaną w oprogramowaniu ISAC, a prędkością uzyskaną podczas pomiarów (rys. 7). Z analizy przedstawionego zestawienia wynika, że na silnikowym stanowisku hamulcowym uzyskano profil prędkości zgodny z profilem zadanym. Świadczy o tym wysoka wartość współczynnika determinacji modelu opisanego regresją liniową ($R = 0,998$). W celu lepszego zobrazowania powyższych zależności przedstawiono na rysunku 8 profile prędkości testu NEDC zadane i uzyskane w pomiarach. Zaobserwowano dużą zgodność przedstawianych profili – jedynie przy przejściu z fazy przyspieszenia na fazę jazdy ze stałą prędkością zaobserwowano niewielkie różnice, które wynikały z czasu odpowiedzi regulatorów stanowiska.



Rys. 7. Korelacja między prędkością zadaną a prędkością uzyskaną w teście NEDC



Rys. 8. Przebiegi uzyskanej i zadanej prędkości pojazdu uzyskane w teście NEDC

3. WYNIKI BADAŃ EMISJI CO₂ I ZUŻYCIA PALIWA – DYSKUSJA

Zgodnie z procedurą pomiaru emisji gazów wylotowych w teście homologacyjnym NEDC pomiar rozpoczęto od zimnego rozruchu silnika. Próbkę pobierano w sposób ciągły z przepływomierza do pomiaru masowego natężenia przepływu gazów wylotowych, za pomocą przewodu grzanego, zaimplementowanego pomiędzy układem wylotowym silnika, a układem odprowadzenia gazów wylotowych ze stanowiska pomiarowego. Rejestrację zużycia paliwa przeprowadzono za pomocą oprogramowania sterującego pracą stanowiska z częstotliwością 1 Hz, taką samą jak w przypadku pomiaru CO₂.

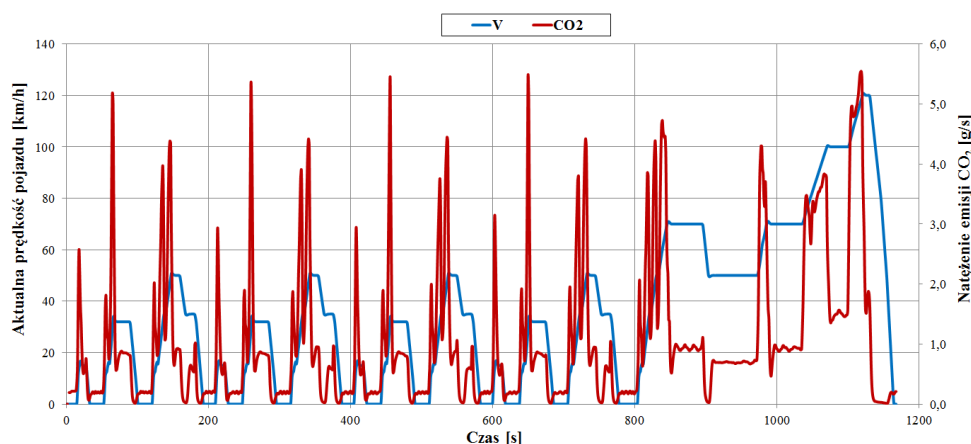
Uzyskane przebiegi natężenia emisji CO₂ i sekundowego zużycia paliwa miały zbliżone przebiegi (rys. 9-10). W obu przypadkach największe chwilowe wartości wystąpiły przy maksymalnym przyspieszeniu i wynosiły odpowiednio: dla natężenia emisji CO₂ 5,3 g/s i zużycia paliwa 2,2 g/s. Miało to związek z generowanym przez silnik obciążeniem – im jest ono większe tym zwiększa się zużycie paliwa a tym samym emisja CO₂. Obciążenie natomiast jest zależne od prędkości jaką osiąga pojazd. Przedstawione powyżej tezy potwierdzają średnie wartości emisji CO₂ i zużycia paliwa w uzyskane teście NEDC, które kształtowały się następująco:

a) faza UDC:

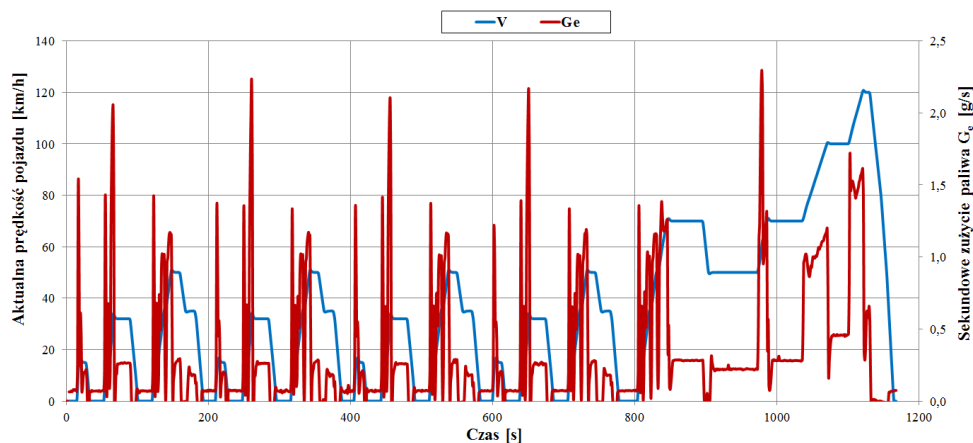
- natężenie emisji CO₂ – 0,82 g/s,
- sekundowe zużycie paliwa G_e – 0,26 g/s,

b) faza EUDC:

- natężenie emisji CO₂ – 1,60 g/s,
- sekundowe zużycie paliwa G_e – 0,49 g/s.



Rys. 9. Przebiegi symulowanej prędkości pojazdu i natężenia emisji CO₂ uzyskane w teście NEDC



Rys. 10. Przebiegi symulowanej prędkości pojazdu i sekundowego zużycia paliwa G_e uzyskane w teście NEDC

PODSUMOWANIE

Na podstawie zmierzonych wartości natężenia emisji CO_2 oraz sekundowego zużycia paliwa G_e wyznaczono emisję drogową CO_2 , i przebiegowe zużycie paliwa, które wyniosły odpowiednio 112 g/km i $4,5 \text{ dm}^3/100 \text{ km}$. Zaobserwowano również, że w fazie EDUC uzyskano dwukrotnie większe wartości emisji CO_2 i zużycia paliwa niż w fazie UDC testu NEDC.

Przeprowadzone w artykule prace badawcze pozwoliły stwierdzić, że silnikowe stanowisko hamulcowe wyposażone w hamownię dynamiczną umożliwia odwzorowywanie profili testów homologacyjnych realizowanych na hamowniach podwoziowych – NEDC, FTP 75 etc – łącznie z odwzorowaniem parametrów pojazdu. Dzięki temu możliwe będzie prowadzenie dalszych badań, w których analizowane będą dynamiczne stany pracy silnika spalinowego. Stany te zdefiniowane będą na podstawie pomiarów przeprowadzonych dla różnej grupy pojazdów w rzeczywistych warunkach eksploatacji.

BIBLIOGRAFIA

1. Altenstrasser, H., Kato, Y., Keuth, N., and Winsel, T., *MiL-Based Calibration and Validation of Diesel-ECU Models Using Emission and Fuel Consumption Prediction during Dynamic Warm-Up Tests (NEDC)* SAE Technical Paper 2012-01-0432, 2012.
2. Gao Y., Checkel M.D., *Emission Factors Analysis for Multiple Vehicles Using an On-Board, In-Use Emissions Measurement System*. SAE Technical Paper Series 2007-01-1327, 2007.
3. Fuc P., Merkisz J., Lijewski P., Bajerlein M., Ziolkowski A., Rymaniak L., Dobrzynski M., *Exhaust emission in NEDC test simulated at a dynamic engine test bed*. Combustion Engines. 2013, 154(3),
4. Merkisz J., Fuc P., *The Exhaust Emission from Light Duty Vehicles in Road Test in Urban Traffic*. International Powertrains, Fuels & Lubricants Meeting, May 2010, Rio De Janeiro, Brazil, 2010. SAE Paper 2010-01-1558.
5. Merkisz, J., Fuc, P., Lijewski, P., Bielaczyc, P., *The Comparison of the Emissions from Light Duty Vehicle in On-road and NEDC Tests*. SAE Technical Paper 2010-01-1298, 2011.
6. Merkisz J., Bajerlein M., Michalak D., Rymaniak L., Ziolkowski A., *The impact of vehicle heating systems on the energy consumption determined based on the vehicle exhaust emission tests under actual operating conditions*. FISITA 2012 World Automotive Congress, Beijing China, 27-30 November 2012.

7. Merkisz J. Rymaniak L. Ziolkowski A.: *The analysis of the emission from SUV vehicle fitted with CI engine and start-stop system*. Journal of KONBIN no 2 (22), 2012.
8. Rubino, L., Bonnel, P., Hummel, R., Krasenbrink, A. et al., *PEMS Light Duty Vehicles Application: Experiences in downtown Milan*. SAE Technical Paper 2007-24-0113, 2007
9. Walsh M. P., *Global trends in motor vehicle pollution control; a 2011 update. Part 3*. Combustion Engines 2011, 147(4).
10. www.dieselnet.com

THE ANALYSIS OF THE EMISSION OF CO₂ AND FUEL CONSUMPTION IN THE NEDC TEST REPRODUCED ON AN ENGINE DYNAMIC TEST BED

Abstract

The paper presents an analysis of the values of CO₂ emission and fuel consumption obtained in the NEDC test reproduced on an engine dynamic test bed. In order to reproduce the NEDC homologation test the ISAC 400 software (Inertia Simulation And Control) was used that not only defined the speed profile but also allowed the introduction of the basic vehicle parameters. The authors entered into the software database the parameters of a vehicle in which 1.3 SDE (Small Diesel Engine) engine of the capacity of 1.3 dm³ was fitted (identical to that installed on the test bed). The measurement of the CO₂ emissions was realized using a PEMS (Portable Emissions Measurement System) analyzer SEMTECH DS and the measurement of the fuel consumption was carried out with a fuel meter available on the test stand.

Autorzy:

prof. dr hab. inż. **Jerzy Merkisz** – Politechnika Poznańska, Instytut Silników Spalinowych i Transportu, jerzy.merkisz@put.poznan.pl

dr hab. inż. **Paweł Fuć** – Politechnika Poznańska, Instytut Silników Spalinowych i Transportu, pawel.fuc@put.poznan.pl

dr inż. **Piotr Lijewski** – Politechnika Poznańska, Instytut Silników Spalinowych i Transportu, piotr.lijewski@put.poznan.pl

dr inż. **Maciej Bajerlein** – Politechnika Poznańska, Instytut Silników Spalinowych i Transportu, maciej.bajerlein@put.poznan.pl

mgr inż. **Andrzej Ziółkowski** – Politechnika Poznańska, Instytut Silników Spalinowych i Transportu, andrzej.wo.ziolkowski@doctorate.put.poznan.pl

mgr inż. **Łukasz Rymaniak** – Politechnika Poznańska, Instytut Silników Spalinowych i Transportu, lukasz.m.rymaniak@doctorate.put.poznan.pl