



Analiza wielkości emisji spalin z silnika o zapłonie samoczynnym z wykorzystaniem symulacji komputerowej

*Karol Tucki, Remigiusz Mruk, Anna Bączyk,
Katarzyna Botwińska, Klaudia Woźniak
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Warszawa*

1. Wprowadzenie

Ochrona czystości powietrza oraz działania związane z redukcją emisji gazów cieplarnianych z transportu są priorytetowe w polityce klimatyczno-energetycznej organów Unii Europejskiej. Niezależnie od wprowadzanych udoskonaleń w pojazdach i przemyśle motoryzacyjnym, transport ciągle negatywnie wpływa na jakość powietrza. Emisje substancji takich jak dwutlenek węgla, tlenku węgla oraz substancji szkodliwych w postaci cząstek stałych, tlenków azotu, węglowodorów aromatycznych z sektora transportu są obecnie znacznie większe niż w 1990 r. (Działania UE 2017, Motowidlak 2015, TERM 2015). Dlatego też, co pewien czas wprowadzane są coraz bardziej rygorystyczne limity emisji spalin z pojazdów silnikowych (Bielaczyc i in. 2015). Normy ulegają zmianie i podane w nich wartości graniczne są zmniejszane (tabela 1), tak, aby mobilizować koncerny samochodowe do szukania nowych, lepszych rozwiązań technologicznych, które będą stanowić mniejsze obciążenie dla środowiska. Obecnie zaostrzenie przepisów dotyczących zmniejszenia emisji związków toksycznych w spalinach silnikowych, zużycia paliwa oraz emisji gazów cieplarnianych jest głównym czynnikiem sterującym kierunkiem rozwoju konstrukcji pojazdów samochodowych (Bielaczyc i in. 2015).

Table 1. Acceptable values of individual exhaust components in Euro standards (compression ignition, car category: M)

Tabela 1. Dopuszczalne wartości poszczególnych składników spalin określone w normach Euro (dla silników wysokopiętnych, kategoria M)

Norma	CO [g/km]	PM [g/km]	NO _x + THC [g/km]
EURO-1	3,16	0,14	0,70
EURO-2	1,00	0,08	0,56
EURO-3	0,64	0,05	0,30
EURO-4	0,50	0,009	0,23
EURO-5	0,50	0,005	0,70
EURO-6	0,50	0,0045	0,56

Źródło: Rozporządzenie (WE) nr 715/2007 – homologacja typu lekkich pojazdów pasażerskich i użytkowych w odniesieniu do emisji zanieczyszczeń (Euro 5 i Euro 6) oraz w sprawie dostępu do informacji dotyczących naprawy i utrzymania pojazdów

By badać emisje zanieczyszczeń, pochodzących z transportu, już w latach 90 XX w. wprowadzono test New European Driving Cycle (NEDC). Polega on na pomiarach emisji spalin i zużycia paliwa podczas testu samochodu w warunkach laboratoryjnych, ale jednocześnie zbliżonych do warunków naturalnych. Pojazd jest umieszczany na specjalnej hamowni podwoziowej, umożliwiającej pracę pojazdu pod zadaniem obciążeniem. Podczas testu następuje rozpędzanie pojazdu, hamowanie, a także symulowane postoje zgodnie z harmonogramem procedury testowej. Wyniki pozwalają określić średnie zużycie paliwa, średnią emisję dwutlenku węgla oraz substancji szkodliwych.

W celu przeprowadzenia jeszcze skuteczniejszych pomiarów emisji i zwiększenia wiarygodności w tym zakresie powstał test WLTP (World Harmonized Light Vehicle Test Procedure). Podczas badań uwzględniono więcej czynników wpływających na wielkość emisji, takich jak średnia temperatura otoczenia, w jakiej pracuje samochód (13°C), wyposażenie oraz konfiguracji wersji silnikowych i przekładni (Tsokolis i in. 2016, Pielecha i in. 2016, Marotta i in. 2015, Pavlovic i in. 2018b). Cykl WLTC różni się od testu NEDC zarówno czasem trwania, jak i charakterem cyklu jezdno. Czas trwania badania wynosi 30 minut, podczas których auto przemierza ok. 23 km. Przez około 13% czasu trwania testu WLTP samochód jest zatrzymany (Fuć i in. 2015, Ciuffo i Fontaras 2017, Yang i in. 2015).

W 2017 roku weszła w życie regulacja Global Technical Regulation No. 15., która jest bardziej odpowiednim terminem dla rozwoju i planowanych wdrożeń w dziedzinie badań emisji m.in. zanieczyszczeń gazowych i cząstek stałych. Główny cel legislacyjny tego aktu jest związany ze zmniejszeniem dopuszczalnych wartości emisji CO₂ i zużycia paliwa przez pojazdy (UNECE 2014, Bielaczyc i Woodburn 2014).

Określanie rzeczywistej emisji zanieczyszczeń z pojazdów zostało wprowadzone w wyniku starań o zmniejszenie rozbieżności między wynikami badań laboratoryjnych a wynikami badań drogowych (Siedlecki i in. 2017, Degraeuwe i Weiss 2017, Pavlovic i in. 2018a). Urządzenia do pomiarów emisji w warunkach rzeczywistych są już powszechnie dostępne. Jest to wymóg prawny, obowiązujący w całej UE. Wiąże się to z potrzebą dalszych badań dotyczących precyzyjnego określenia zależności między emisją rzeczywistą, pochodzącą z pojazdów w warunkach drogowych, a emisją wyznaczaną w warunkach laboratoryjnych (Bielaczyc i Woodburn 2014, Wójcik i in. 2017, Hooftman i in. 2018).

Jak wykazały organy kontrolne Unii Europejskiej (Działania UE 2017) transport drogowy nadal pozostaje właściwe bezkonkurencyjny w zakresie przewozu towarów. Zwiększająca się liczba aut osobowych na drogach świadczy z kolei o popularyzacji transportu indywidualnego, zarówno w obszarze prywatnym, jak i komercyjnym. Jednym z założeń unijnych pakietów energetyczno – klimatycznych jest zwiększanie procentowego udziału odnawialnych źródeł energii, w tym biopaliw i biokomponentów w poszczególnych rynkach paliwowych. Poza tym, w kilku krajach europejskich (Bułgaria, Portugalia, Polska)¹ stwierdzono nieosiągnięcie krajowych celów pośrednich dotyczących biopaliw. Zasadne wydają się więc badania pod kątem emisyjności poszczególnych paliw w obszarze transportu.

2. Metodyka

Celem niniejszej pracy było określenie i porównanie wartości wyemitowanych składników spalin takich, jak: dwutlenek węgla, cząstki

¹ „Unijne i krajowe cele dotyczące produkcji i stosowania biopaliw w okresie 2008-2012” (w j. bułgarskim)

„Kontrola dotycząca produkcji i stosowania domieszek biopaliw” (w j. portugalskim)

„Stosowanie biopaliw i biokomponentów w transporcie” (w j. polskim)

stałe, para wodna, całkowita zawartość węglowodorów dla dwóch testów jezdnych NEDC oraz WLTP, uwzględniając dodatkowo system start/stop. Do przeprowadzenia badania wybrano samochód osobowy Fiat Panda z silnikiem 1.3 MultiJet z 2008 r. (tabela 2). Posiada on 4-cylindrowy silnik rzędowy o objętości skokowej 1248 cm³. Moc maksymalna wynosi 70 KM, a maksymalny moment obrotowy układu napędowego wynosi 145 Nm. Zbiornik paliwa mieści 35 litrów. Według producenta zużycie paliwa w cyklu miejskim wynosi 5,2 dm³/100 km a w cyklu pozamiejskim 3,6 dm³/100 km. Silnik jest połączony ze skrzynią manualną, co pozwala na przyspieszenie 0-100 km/h w około 13 sekund. Maksymalna prędkość Fiata Pandy wynosi 165 km/h. Paliwami zasilającymi badany silnik były olej napędowy i FAME (tabela 3).

Tabela 2. Podstawowe dane techniczne silnika Fiat 1.3 Multijet wykorzystanego w symulacji

Table 2. Basic technical data of the Fiat 1.3 Multijet engine used in the simulation

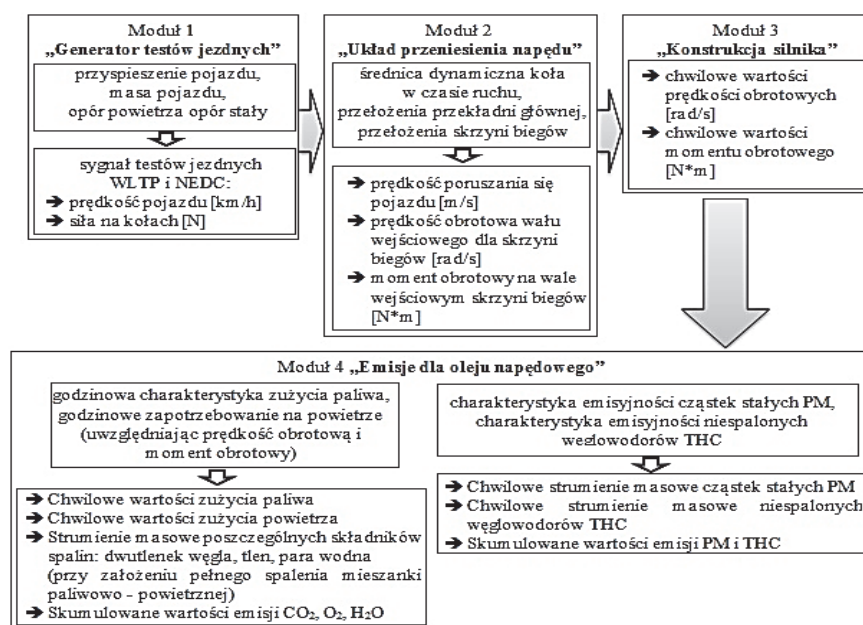
Parametr	Jednostka	Wartość
Układ cylindrów	–	rzędowy
Liczba cylindrów	–	4
Typ wtrysku	–	bezpośredni Common Rail
Kolejność pracy cylindrów	–	1 – 3 – 4 – 2
Stopień sprężania	–	17,6
Średnica cylindra	mm	69,6
Skok tłoka	mm	82
Objętość skokowa silnika	cm ³	1251
Moc maksymalna	kW	66
Prędkość obrotowa silnika przy mocy maksymalnej	obr/min	4000
Maksymalny moment obrotowy silnika	N·m	200
Prędkość obrotowa silnika przy maksymalnym momencie obrotowym	obr/min	1750
Prędkość obrotowa biegu jałowego	obr/min	850±20
Norma emisji spalin	–	EURO-4

Źródło: opracowanie własne na podstawie katalogu Fiat Panda 2014

Tabela 3. Podstawowe właściwości zastosowanych paliw
Table 3. Main characteristics of the used fuels

Parametr	Olej napędowy	FAME
Zawartość węgla [%]	86,5	78,0
Zawartość wodoru [%]	13,4	12,0
Zawartość tlenu [%]	0,0	10,0
Wartość opałowa [MJ/kg]	44,0	37,0
Zapotrzebowanie na powietrze [g/g]	14,5	12,5

Źródło: opracowanie własne na podstawie (Gwardiak 2011)



Źródło: opracowanie własne

Rys. 1. Schemat modelu symulacyjnego na podstawie którego wyliczono wartości masowe składników spalin

Fig. 1. Diagram of simulation model on the basis of which the mass exhaust values were calculated

Narzędziem do pozyskania wartości poszczególnych składników spalin był program Scilab, w którym została przeprowadzona symulacja

pracy silnika o zapłonie samoczynnym. Jest to darmowy pakiet naukowy, który powstał głównie do przeprowadzania badań matematycznych. Program umożliwia pracę w wielu dziedzinach na przykład takich jak: przetwarzanie sygnałów, statystykę, algebrę liniową, macierze, a także graficzne przedstawianie wyników na wykresach, grafach i animacjach 2D i 3D. Jego istotnym elementem jest edytor Xcos, który służy do budowania modeli i systemów mechanicznych (Scilab Enterprises 2017). Schemat bloku obliczeniowego emisyjności wybranego silnika, wyznaczonej zgodnie z testami jezdnyimi WLTP i NEDC dla wybranych zanieczyszczeń w przypadku zasilania olejem napędowym przedstawia rysunek 1.

Na podstawie chwilowych wartości prędkości obrotowej, momentu obrotowego silnika i charakterystyk emisji cząstek stałych oraz niespalonych węglowodorów (obliczonych wcześniej) przez wybrany silnik zasilany olejem napędowym/FAME, blok symulacyjny wykonuje obliczenia chwilowych wartości natężenia emisji cząstek stałych E_{pm} [g/s] oraz całkowitej zawartości węglowodorów E_{thc} [g/s] na podstawie zależności:

$$E_{pm} = f_{pm}(\omega si, Msi) \left[\frac{g}{s} \right] \quad (1)$$

gdzie:

f_{pm} – funkcja emisji cząstek stałych przez dla oleju napędowego w zależności od prędkości obrotowej i momentu obrotowego [g/s],

ωsi – prędkość kątowna silnika [rad/s],

Msi – moment obrotowy silnika [N·m]).

$$E_{thc} = f_{thc}(\omega s, Ms) \cdot g_{thc} \cdot Q_{spal} / g_{spal} \left[\frac{g}{s} \right] \quad (2)$$

gdzie:

f_{thc} – funkcja emisji przez silnik niespalonych węglowodorów dla oleju napędowego w zależności od prędkości obrotowej i momentu obrotowego [% obj.],

g_{spal} – gęstość spalin w warunkach normalnych [g/dm³],

Q_{spal} – natężenie przepływu spalin [g/s],

g_{thc} – gęstość tlenku węgla w warunkach normalnych [g/dm³].

Następnie, za pomocą modelu, na podstawie wyliczonych wartości chwilowych, wyliczono wartości emisji cząstek stałych oraz węglowodorów:

$$m_{PM} = \int_0^t pm(t) dt \text{ [g]} \quad (3)$$

$$m_{THC} = \int_0^t thc(t) dt \text{ [g]} \quad (4)$$

gdzie:

pm – natężenie emisji cząstek stałych [g/s],

thc – natężenie sumy węglowodorów [g/s],

t – czas symulacji [s].

3. Wyniki badań i dyskusja

Opracowana symulacja emisyjności wybranego silnika ZS dla ruchu pojazdu w testach jezdnych WLTP oraz NEDC pozwoliła na przeprowadzenie eksperymentu symulacyjnego z wykorzystaniem układu start/stop oraz jego braku a także przy zasilaniu silnika olejem napędowym oraz FAME. Przedstawiono wyniki pracy symulacji w postaci przebiegów śledzonych wielkości w czasie oraz zestawienie parametrów przy założonej zmienności parametrów wejściowych symulacji.

3.1. Wyniki symulacji dla testu WLTP – układ start/stop wyłączony

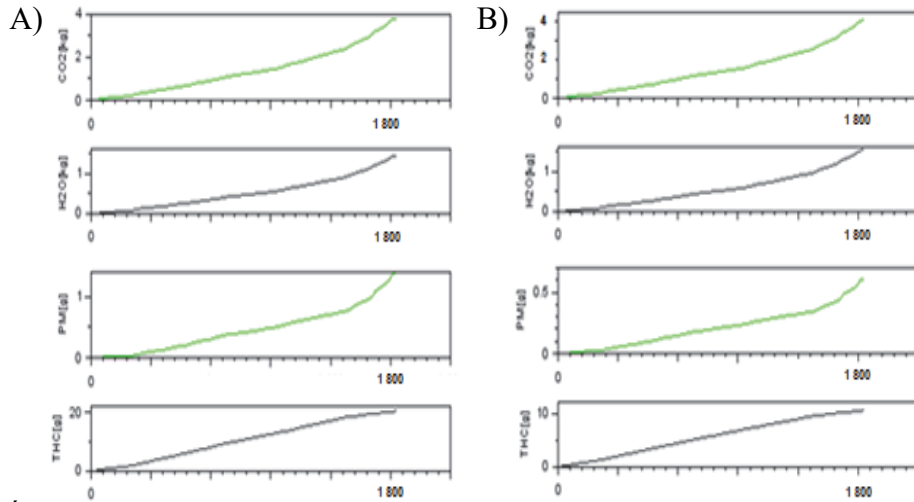
Poniżej (rys. 2) przedstawiono wyniki symulacji wybranego silnika dla testu WLTP przy wyłączonym układzie start/stop oraz zasilanego A) olejem napędowym oraz B) FAME w postaci emisji dwutlenku węgla, pary wodnej, cząstek stałych i węglowodorów.

Przebiegi krzywych badanych paliw są bardzo podobne, jednak podczas głębszej analizy wartości widoczne są różnice – w przypadku spalania FAME, emisje CO_2 , PM i THC są o połowę mniejsze. W przypadku pary wodnej podczas spalania oleju napędowego masa w czasie 2500 sekund osiąga wartość końcową 1,4 kg (0,56 g/s), zaś w przypadku estrów jest to 1,6 kg (0,64 g/s).

3.2. Wyniki symulacji dla testu WLTP (RCG)

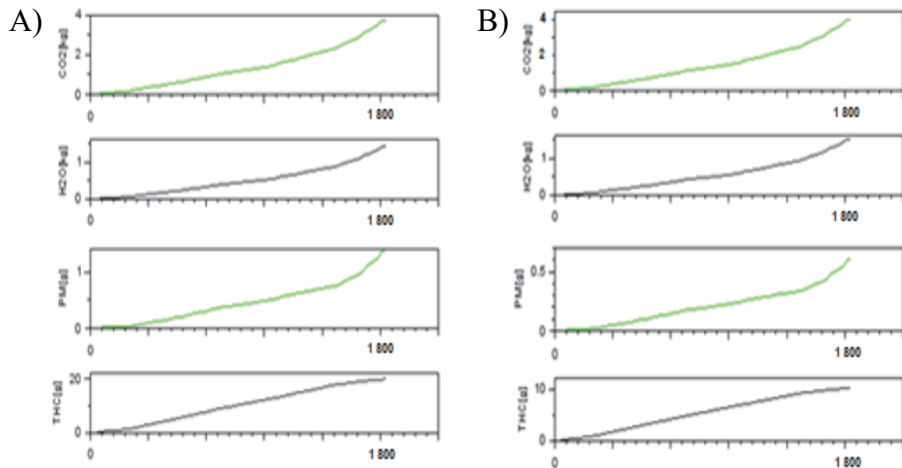
– układ start/stop włączony

Na rysunku 3 przedstawiono wyniki symulacji dla testu WLTP przy włączonym układzie start/stop zasilanego A) olejem napędowym oraz B) FAME w postaci przebiegów chwilowych. W tym przypadku wartości dotyczące całkowitych emisji są zbliżone do wartości testu przy wyłączonym układzie.



Źródło: opracowanie własne

Rys. 2. Wyniki pracy bloku symulacyjnego odpowiadających za symulację silnika – test WLTP; układ start/stop wyłączony (por. oznaczenia w tekście)
Fig. 2. Results of engine simulation block operation – WLTP test; start/stop system off (see text markings)

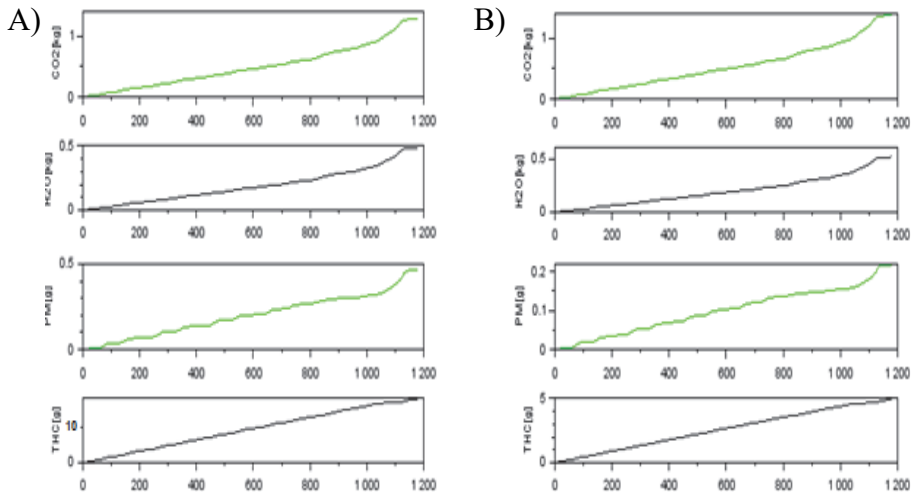


Źródło: opracowanie własne

Rys. 3. Wyniki pracy bloku symulacyjnego odpowiadających za symulację silnika – test WLTP; układ start/stop włączony (por. oznaczenia w tekście)
Fig. 3. Results of engine simulation block operation – WLTP test; start/stop system on (see text markings)

3.3. Wyniki symulacji dla testu NEDC – układ start/stop wyłączony

Poniżej, na rysunku 4, przedstawiono wyniki dla symulacji wykonanej testem NEDC, przy wyłączonym układzie start/stop. Na wykresach można zaobserwować wyniki zbliżone do rezultatów pochodzących z testu WLTP, jednakże wyraźnie zaznacza się różnica emisji cząstek stałych – w przypadku spalania FAME maksymalna wartość osiąga jedynie 0,2 g, gdy przy spalaniu oleju napędowego jest to 0,5 g.



Źródło: opracowanie własne

Rys. 4. Wyniki pracy bloku symulacyjnego odpowiadających za symulację silnika – test NEDC; układ start/stop wyłączony (por. oznaczenia w tekście)

Fig. 4. Results of engine simulation block operation – NEDC test; start/stop system off (see text markings)

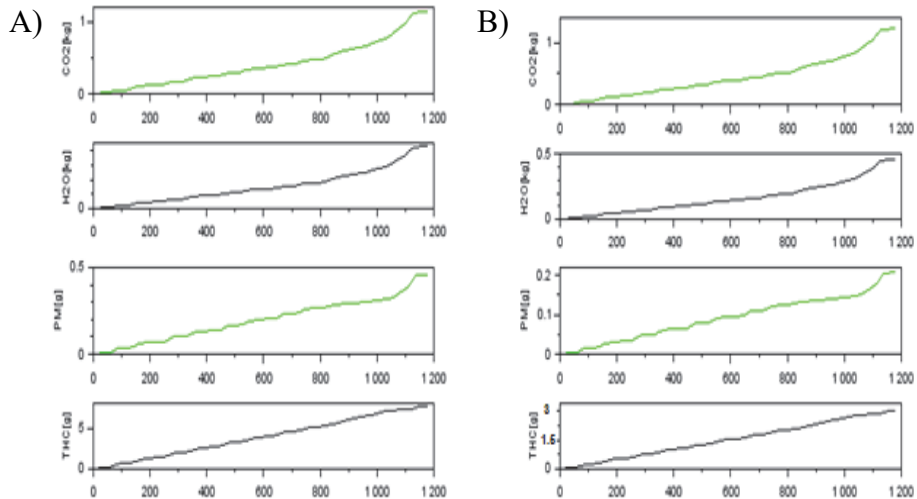
3.4. Wyniki symulacji dla testu NEDC – układ start/stop włączony

W ostatnim przypadku (rys. 5) symulacji wykonanej testem NEDC, przy włączonym układzie start/stop widzimy układ niemal identyczny, jak w poprzednim badaniu. Krzywe układają się w zbliżony sposób, co oznacza, że wartości emisji również osiągają podobne wartości.

3.5. Zestawienie wyników

Symulacja testów jezdnych umożliwiła wprowadzenie modyfikacji warunków pracy z uwzględnieniem włączenia/wyłączenia układu start stop, oraz zastosowania różnych paliw: olej napędowy/FAME. W tabeli 3

przedstawiono końcowe wartości mas poszczególnych składników spalin takich, jak: dwutlenek węgla, cząstki stałe i całkowita zawartość węglowodorów dla przeprowadzanych symulacji z uwzględnieniem wyboru testu jezdnego WLTP albo NEDC, włączonym albo wyłączonym układem start/stop oraz zasilaniem przez paliwa olej napędowy albo FAME.



Źródło: opracowanie własne

Rys. 5. Wyniki pracy bloku symulacyjnego odpowiadających za symulację silnika – test NEDC; układ start/stop włączony (por. oznaczenia w tekście)

Fig. 5. Results of engine simulation block operation – NEDC test; start/stop system on (see text markings)

W zestawieniu wyników badania można zauważyć różnicę między spalaniem oleju napędowego i FAME. Wyniki emisji poszczególnych składników spalin z testu WLTP są dwu-, trzykrotnie większe od tych, uzyskanych według testu NEDC. Należy jednak pamiętać, że podczas testu WLTP, pojazd pokonuje ponad trzy razy dłuższy dystans, w dłuższym czasie, niemal bez postojów, co przyczynia się do jego większej dokładności i większych wartości ogółem (Tsiakmakis i in. 2017a, Fontaras i in. 2017, Tsiakmakis i in. 2017b, Pavlovic i in. 2016). W celu uwierzytelnienia wyników, w dalszej części przeliczono uzyskane wyemitowanego dwutlenku węgla i cząstek stałych w odniesieniu do przebytego dystansu.

Tabela 3. Zestawienie wyników uzyskanych z przeprowadzanych symulacji
Table 3. Summary of the results from the simulations

Droga w teście [km]	11,03					34,68				
	NEDC	NEDC	NEDC	NEDC	NEDC	WLTP	WLTP	WLTP	WLTP	WLTP
Zastosowany test jezdny										
Układ start/stop	OFF	OFF	ON	ON	ON	OFF	OFF	ON	ON	ON
Zastosowane paliwo	ON	FAME	FAME	ON	FAME	ON	FAME	ON	ON	FAME
Emisja dwutlenku węgla CO ₂ [kg]	1,29	1,38	1,14	1,22	1,22	3,81	4,08	3,76	4,03	4,03
Emisja pary wodnej H ₂ O [kg]	0,49	0,52	0,43	0,46	0,46	1,44	1,53	1,42	1,51	1,51
Emisja cząstek stałych PM [g]	0,46	0,22	0,46	0,21	0,21	1,39	0,60	1,39	0,60	0,60
Emisja całkowitej ilości węglowodorów THC [g]	8,98	4,95	7,76	4,02	4,02	20,7	10,6	20,3	10,3	10,3

Źródło: opracowanie własne

Wyniki badań są dość niespodziewane, ponieważ okazuje się, że spalanie biodiesla (FAME) niekoniecznie oznacza mniejszą zawartość poszczególnych substancji (tab. 3), jak można wnioskować na podstawie dostępnej literatury (Knefel i in. 2015, Kruczyński i in. 2016). Podczas spalania estrów, zawartość masowa dwutlenku węgla i pary wodnej była większa niż podczas spalania oleju napędowego, zarówno w przypadku testu NEDC, jak i WLTP (wzrost o 7% w przypadku CO₂ i 6% w przypadku H₂O). Sytuacja odwrotna ma miejsce w przypadku cząstek stałych oraz całkowitej zawartości węglowodorów. Podczas spalania biodiesla emisje PM i THC były prawie dwukrotnie niższe, bez względu na zastosowany test.

Efekt zastosowania układu start/stop na wszystkie badane substancje jest większy w teście NEDC, głównie z powodu dłuższego okresu pracy na biegu jałowym, w porównaniu do testu WLTP (Dimaratos i in. 2016). Na podstawie pomiarów wyznaczono efektywność zastosowanego systemu. Skutkowało on obniżeniem zawartości poszczególnych składników w spalinach:

- CO₂ o 15% w przypadku testu NEDC i o 5% w przypadku testu WLTP (bez względu na zastosowane paliwo),
- H₂O o 6% w przypadku testu NEDC i o 2% w przypadku testu WLTP (bez względu na zastosowane paliwo),
- THC o 122% w przypadku testu NEDC przy spalaniu oleju napędowego i 93% w przypadku FAME i 40% w przypadku testu WLTP przy spalaniu oleju napędowego i 30% w wypadku estrów metylowych.

Porównując otrzymane wyniki z obecnie obowiązującą normą EURO-6, dla której wartością graniczną dla PM jest 0,0045 g/km (Regulation no 715/2007), można zauważyć że emisja cząstek stałych w każdym badanym przypadku przekracza normę (tab. 4). Norma graniczna emisji CO₂ dla nowych samochodów osobowych w badanej przez nas kategorii (M1) obecnie wynosi 130 g CO₂/km. Ten poziom zostanie zmniejszony do 95 g CO₂/km od 2020 r. Na podstawie uzyskanych wyników widać, iż wartość emisji dwutlenku węgla nie przekroczyła normy w żadnym przypadku. Po 2020 roku, kiedy limit zawartości tej substancji w spalinach zostanie zmniejszony, wartość ta zostanie przekroczona. Wyniki te uwzględniają pokonany dystans i wartości emisji CO₂ i PM w obu testach są do siebie zbliżone.

Table 4. CO₂ and PM emissions
Tabela 4. Emisja CO₂ oraz cząstek stałych PM

Zastosowany test jezdny	NEDC				WLTP				
	OFF	OFF	ON	ON	OFF	OFF	ON	ON	
Układ start/stop									
Zastosowane paliwo	ON	FAME	ON	FAME	ON	FAME	ON	FAME	
Emisja cząstek stałych PM [g/km]	0,042	0,020	0,042	0,019	0,040	0,017	0,040	0,017	
Emisja dwutlenku węgla CO ₂ [g/km]	116,9	125,1	103,4	110,6	109,9	117,7	108,4	116,2	
Przekroczenie względem wartości prognozowanej w 2020 roku [%]	23,1	31,7	8,8	16,4	15,7	23,9	14,1	22,3	

Źródło: opracowanie własne

4. Podsumowanie

W związku z coraz bardziej restrykcyjnymi normami emisji toksycznych składników spalin, rośnie potrzeba badań nad konstrukcjami i regulacjami silników, a także nad aparaturą pomiarową. Badania te są ważne z punktu widzenia nauki i przemysłu. Analizy te wpływają na rozwój regulacji prawnych i rozwój motoryzacji.

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że:

1. Opracowany model umożliwi wykonanie symulacji pracy pojazdu zgodnie z procedurą testową NEDC oraz WLTP i uzyskanie wartości emisji poszczególnych substancji.
2. Wyniki symulacji wskazują, że obecność systemu start/stop wpływa na zmniejszenie końcowej masy wybranych składników spalin.
3. Wyniki emisji badanych substancji odzwierciedlają fakt, iż zawartość poszczególnych substancji wyemitowanych podczas procedur testowych była około 3 razy wyższa dla testu WLTP.
4. Emisje dwutlenku węgla według obecnie obowiązujących norm (EURO-6) nie są przekraczane, jednak w kontekście zaostrzenia poziomu do 95 g CO₂/km w 2020 r. mogą wystąpić znaczne utrudnienia w jej przestrzeganiu, a wyniki osiągnięte na badanym poziomie wykrócą poza dopuszczalny limit.
5. Emisje cząstek stałych PM w badanych przypadkach przekraczały normę EURO-6 w zakresie 8-31%. Są to znaczne przekroczenia dopuszczalnych wartości, a przepisy legislacyjne będą w przyszłości coraz bardziej restrykcyjne.
6. Badania emisyjności spalin obecnie i w przyszłości będą bazować głównie na metodach kontroli rzeczywistej emisji składników szkodliwych w rzeczywistych warunkach eksploatacji.

Literatura

- Ambrozik, A., Kurczyński, D., Łagowski, P., Warianek, M. (2016). The toxicity of combustion gas from the Fiat 1.3 Multijet engine operating following the load characteristics and fed with rape oil esters. *Proceedings of the Institute of Vehicles, 1(105)*, 23-36.
- Bielaczyc. P., Woodburn, J. (2014). *Trends in automotive emissions. Fuels, lubricants, legislation and test methods – present and future* [in:] The 4th International Exhaust Emissions Symposium. 22-23 May 2014. BOSMAL. Bielsko-Biała (Poland).

- Bielaczyc, P., Szczotka, A., Pajdowski, P., Woodburn, J. (2015). The potential of current European light duty LPG-fuelled vehicles to meet Euro 6 requirement. *Combustion Engines*, 162(3), 874-880.
- Ciuffo, B., Fontaras, G. (2017). Models and scientific tools for regulatory purposes: the case of CO₂ emissions from light duty vehicles in Europe. *Energy Policy*, 109, 76-91.
- Chłopek, Z., Biedrzycki, J., Lasocki, J., Wójcik, P. (2015). Badania korelacyjne emisji zanieczyszczeń i zużycia paliwa w testach homologacyjnych. *TTS Technika Transportu Szynowego*, 22(12), 268-271.
- Degraeuwe, B., Weiss, M. (2017). Does the New European Driving Cycle (NEDC) really fail to capture the NO_x emissions of diesel cars in Europe? *Environmental Pollution*, 222, 234-241.
- Dimaratos, A., Tsokolis, D., Fontaras, G., Tsiakmakis, S., Ciuffo, B., Samaras, Z. (2016). Comparative evaluation of the effect of various technologies on light-duty vehicle CO₂ emissions over NEDC and WLTP. *Transportation Research Procedia*, 14, 3169-3178.
- Działania UE w dziedzinie energii i zmiany klimatu. Przegląd horyzontalny. Europejski Trybunał Obrachunkowy. Luksemburg: Urząd Publikacji Unii Europejskiej, 2017.
- Fontaras, G., Ciuffo, B., Zacharof, N., Tsiakmakis, S., Marotta, A., Pavlovic, J., Anagnostopoulos, K. (2017). The difference between reported and real-world CO₂ emissions: how much improvement can we expect by WLTP introduction? *Transportation Research Procedia*, 25, 3933-3943. World Conference on Transport Research – WCTR 2016 Shanghai 2016.
- Fuć, P., Lijewski, P., Ziółkowski, A., Siedlecki, M. (2015). Trends in the type-approval regulations in terms of exhaust gas emissions for vehicles of category PC and LDV. *Combustion Engines*, 163(3), 417-424.
- Global Technical Regulation No. 15 (Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure) accessed online: https://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29gen/wp29glob_registry.html.
- Gwardiak, H., Różycki, K., Ruskarska, M., Tylus, J., Walisiewicz-Niedbalska, W. (2011). Ocena estrów metylowych kwasów tłuszczowych (FAME) uzyskanych z wybranych surowców. *Rośliny Oleiste – Oilseed Crops*, 32(1), 137-147.
- Hooftman, N., Messagie, M., Van Mierlo, J., Coosemans, T. (2018). A review of the European passenger car regulations – Real driving emissions vs local air quality. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 86, 1-21.
- Knefel, T., Nowakowski, J., Suchecki, A., Brzozowski, K. (2015). The impact of FAME in diesel fuel on the emission harmful exhaust components of compression ignition engine. *Combustion Engines*, 162(3), 827-833.

- Kruczyński, S., Orliński, S., Gis, M. (2016). Wpływ zastosowania dodatku etanolu do mieszaniny oleju napędowego z estrem FAME na ekonomiczne i ekologiczne wskaźniki pracy silnika PERKINS-1104C-44. *Transport Samochodowy*, 2, 95-110.
- Marotta, A., Pavlovic, J., Ciuffo, B., Serra, S., Fontaras, G. (2015). Gaseous Emissions from Light-Duty Vehicles: Moving from NEDC to the New WLTP Test Procedure. *Environmental Science & Technology*, 49(14), 8315-8322.
- Mazanek, A. (2014). Przegląd metod badań silnikowych i eksploatacyjnych z uwzględnieniem aktualnie obowiązujących i przyszłych wymagań jakościowych stawianych paliwom silnikowym. *Nafta-Gaz*, 70(8), 534-540.
- Motowidlak, U. (2015). Rola transport miejskiego w realizacji celów gospodarki niskoemisyjnej. *Studia Ekonomiczne. Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego w Katowicach*, 249, 172-184.
- Pavlovic, J., Marotta, A., Ciuffo, B. (2016). CO₂ emissions and energy demands of vehicles tested under the NEDC and the new WLTP type approval test procedures. *Applied Energy*, 177, 661-670.
- Pavlovic, J., Anagnostopoulos, K., Clairetee, M., Arcidiacono, V., Fontaras, G., Rujas, I.P., Morales, V.V., Ciuffo, B. (2018a). Dealing with the Gap between Type-Approval and In-Use Light Duty Vehicles Fuel Consumption and CO₂ Emissions: Present Situation and Future Perspective. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1-10.
- Pavlovic, J., Ciuffo, B., Fontaras, G., Valverde, V., Marotta, A. (2018b). How much difference in type-approval CO₂ emissions from passenger cars in Europe can be expected from changing to the new test procedure (NEDC vs. WLTP)? *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 111, 136-147.
- Pielecha, J., Merkisz, J., Markowski, J., Jasiński R., Magdziak, A. (2016). Wybrane zagadnienia dotyczące drogowych testów emisyjnych. *Autobusy*, 12/2016, 1297-1303.
- Regulation (Ec) No 715/2007 of The European Parliament and of the Council of 20 June 2007 on type approval of motor vehicles with respect to emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 5 and Euro 6) and on access to vehicle repair and maintenance information.
- Scilab Enterprises. 2017. online: <https://scilab.io/> [date of access: 23.03.2018].
- Setlak, R., Fice, M. (2011). Wpływ układu start&stop w napędzie mild hybrid na zmniejszenie zużycia paliwa w testach NEDC. *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne*, 90, 151-156.
- TERM 2015: Transport indicators tracking progress towards environmental targets in Europe. EEA Report 7/2015.

- Tsiakmakis, S., Fontaras, G., Anagnostopoulos, K., Ciuffo, B., Pavlovic, J., Marotta, A. (2017a). A simulation based approach for quantifying CO₂ emissions of light duty vehicle fleets. A case study on WLTP introduction. *Transportation Research Procedia* 25, 3898-3908. World Conference on Transport Research – WCTR 2016 Shanghai 2016.
- Tsiakmakis, S., Fontaras, G., Ciuffo, B., Samaras, Z. (2017). A simulation-based methodology for quantifying European passenger car fleet CO₂ emissions. *Applied Energy*, 199, 447-465.
- Tsokolis, D., Tsiakmakis, S., Dimaratos, A., Fontaras, G., Pisitikopoulos, P., Ciuffo, B., Samaras, Z. (2016). Fuel consumption and CO₂ emissions of passenger cars over the New Worldwide Harmonized Test Protocol. *Applied Energy*, 179, 1152-1165.
- Wójcik, W., Adikanova, S., Malgazhdarov, Y.A., Nabenovich, M.M., Myrzagalieva, A.B., Temirbekov, N.M., Junisbekov, M., Pawłowski, L. (2017). Probabilistyczne i statystyczne modelowanie rozprzestrzeniania się w atmosferze szkodliwych zanieczyszczeń z pojazdów silnikowych. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 19, 795-808.
- Yang, L., Franco, V., Mock, P., Kolke, R., Zhang, S., Wu, Y., German, J. (2015). Experimental assessment of NO_x emissions from 73 euro 6 diesel passenger cars. *Environmental Science and Technology*, 49(24), 14409-14415.

Analysis of the Exhaust Gas Emission Level from a Diesel Engine with Using Computer Simulation

Abstract

The emissivity simulations of solid and unburned particles on the example of 1.3 Multijet compression-ignition engine in the Fiat Panda passenger car were presented in the study. The results of the obtained mass contents were analysed in relation to tests, fuels and the activity of the start/stop system in the vehicle. The tests were carried out for two types of supply: diesel oil and fatty acid methyl esters. Using the Scilab programme, a simulation model was developed for the performance of the final tests: WLTP and NEDC. They were performed for each fuel with the enabled and disabled start-stop system. The results of the simulations were presented in the form of diagrams generated by the Xcos programme.

Streszczenie

W pracy przedstawiono symulacje emisyjności cząstek stałych i całkowitej zawartości węglowodorów na przykładzie silnika o zapłonie samoczynnym 1.3 Multijet w samochodzie osobowym Fiat Panda. Analizie poddano wyniki pozyskanych zawartości masowych w odniesieniu do testów, paliw oraz aktywności układu start/stop w pojeździe. Próby zostały wykonane dla dwóch typów zasilania: olejem napędowym oraz estrami metylowymi kwasów tłuszczowych. Wykorzystując środowisko Scilab opracowano model symulacyjny, pozwalający na wykonanie ostatecznych testów: WLTP oraz NEDC. Zostały one przeprowadzone dla każdego z paliw z włączonym i włączonym układem start-stop. Efekty symulacji zostały przedstawione w formie wykresów wygenerowanych z programu Xcos.

Słowa kluczowe:

emisyjność, NEDC, WLTP

Keywords:

emission, NEDC, WLTP