

ANALIZA PORÓWNAWCZA PARAMETRÓW PRACY SILNIKA ZI W BADANIACH EKSPERYMENTALNYCH I SYMULACYJNYCH

W artykule przedstawiono podstawowe zagadnienia związane z metodami pomiaru wskaźników pracy silnika o zapłonie ZI oraz omówiono jaką funkcję pełnią syntetyczne cykle jezdne i jakie są ich charakterystyczne cechy. W ramach przeprowadzonych badań za pomocą Symulatora Drogowego Obciążenia Silnika wykonano serię pomiarów symulacyjnych przejazdów cykli jezdnych. Otrzymane wyniki porównano na wykresach z pomiarami przeprowadzonymi metodami eksperymentalnymi. W celu ich wykonania użyto samochodu osobowego realizującego syntetyczne cykle jezdne na jednorolkowej hamowni podwoziowej. Po przeprowadzeniu toku obliczeniowego analizie porównawczej poddano energochłonność przebiegową oraz emisję szkodliwych substancji i zużycie paliwa.

WSTĘP

Badania parametrów pracy silnika można przeprowadzać na wiele sposobów. Obok badań drogowych popularne są badania stanowiskowe oraz symulacyjne. W przypadku analizy w rzeczywistych warunkach ruchu należy zdawać sobie sprawę, że większość czynników występujących podczas jazdy samochodem jest uwarunkowana od zmiennych, które są powiązane z panującymi, chwilowymi warunkami drogowymi oraz z nieprzewidywalnością profilu prędkości. W celu eliminacji dużej ilości zmiennych czynników, badania układów napędowych przeprowadza się w oparciu o rzeczywiste lub syntetyczne profile prędkości ściśle narzucające opory ruchu, przyspieszenia oraz prędkość jazdy pojazdu.

Analiza własności silnika spalinowego często przeprowadzana jest na hamowni silnikowej, gdzie wał badanego silnika (wyposażonego w osprzęt niezbędny do jego pracy) połączony jest bezpośrednio z wałem hamowni, a na osiągane wyniki nie wpływają czynniki spowodowane przeniesieniem napędu. Przy zastosowaniu odpowiedniego oprogramowania sterującego, możliwe jest odwzorowanie pełnego profilu prędkości oraz charakteru jazdy ze skrzynią biegów.

Określanie właściwości całego układu napędowego możliwe jest przy użyciu hamowni podwoziowej, gdzie układ przeniesienia napędu pośredniczy w przekazywaniu momentu obrotowego. Badanie silnika na hamowni podwoziowej obarczone jest błędem strat układu napędowego, które są wyznaczane podczas próby wybiegu i uwzględniane w toku obliczania mocy silnika.

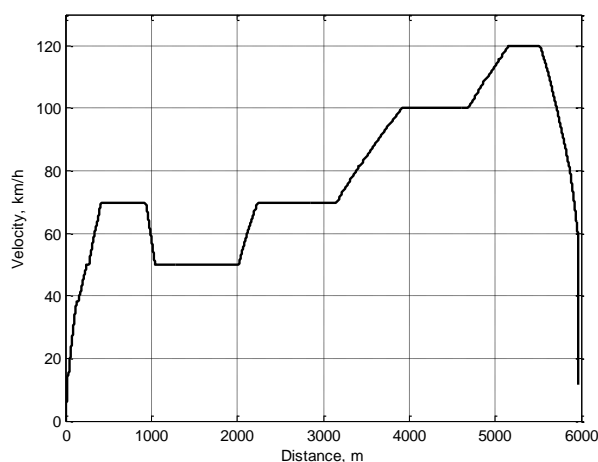
Badania eksperymentalne na obiekcie rzeczywistym wymagają nie tylko dużego nakładu czasu, ale generują także znaczne koszty dlatego w celu prostej analizy parametrów silnika i układu napędowego stworzono metodę symulacji komputerowej. Metoda ta pozwala w sposób mało inwazyjny rozpoznać punkty pracy układu napędowego na tle charakterystyki silnika spalinowego. Ponadto pozwala bez nakładu znacznych kosztów na przeprowadzenie szeregu badań przy użyciu różnych rodzajów układu napędowego. Badania metodą symulacji komputerowej opierają się na ogólnych charakterystykach silnika, które zapisane są w formie równań matematycznych. Dowolny cykl jezdny realizowany jest za pomocą oprogramowania komputerowego przez wirtualny silnik.

1. PROFIL PRĘDKOŚCI – CYKLE JEZDNE

Opis ruchu samochodu najczęściej opiera się na podziale na trzy etapy: przyspieszenie, jazda ze stałą prędkością i hamowanie (oddzielone lub nie przez fazę postoju). Określenie intensywności zmian prędkości jazdy oraz sprecyzowanie czasu trwania każdej, poszczególnej fazy daje możliwość zdefiniowania szczegółowego profilu prędkości, za pomocą którego opisany jest poruszający się samochód w funkcji czasu, na danym dłuższym odcinku.

Na terenie Europy do pomiaru toksyczności spalin stosuje się cykle syntetyczne, sporządzone przez Economic Commission for Europe np. ECE, EUDC czy NEDC [4].

W skład cyklu NEDC zalicza się cztery powtarzające się moduły (ECE), w których kolejno występuje rozpędzanie do prędkości 15, 32, 50 km/h, rozdzielone fazami postoju. Dalej jest on rozbudowany o warunki jazdy pozamiejskiej EUDC, gdzie prędkości maksymalne dochodzą do 120 km/h (rys. 1). Równomierne fazy rozpędzania, hamowania czy jazdy ze stałą prędkością występujące w cyklach syntetycznych praktycznie nie występują podczas poruszania się samochodu w rzeczywistych warunkach ruchu. Cykle te ułatwiają jednak nadszanie za profilem prędkości podczas pomiarów, stanowiąc tym dobrą bazę do porównawczych badań stanowiskowych.



Rys. 1. Syntetyczny profil prędkości EUDC

2. ZAKRES BADAŃ

Badania eksperymentalne przez niepowtarzalność wpływających na nie czynników często mogą charakteryzować się rozbieżnością uzyskiwanych wyników a częstym jest, że znacznie odbiegają od wartości uzyskiwanych na drodze symulacji komputerowej. Pomiar parametrów charakteryzujących pracę silnika w stanach ustalonych nie sprawia badaczom wielu trudności i jest możliwy do określenia zarówno w symulacji jak i podczas rzeczywistych badań stanowiskowych. Pomiar wskaźników pracy silnika staje się problematyczny, podczas analizy stanów nieustalonych. Warunki te mają szczególne znaczenie, ponieważ pojazd poruszający się w rzeczywistych cyklach miejskich w znacznej większości czasu pracy porusza się przyspieszając bądź zwalniając z różną intensywnością.

Trudności powstałe w trakcie badań mogą być związane z bardzo dużą zmiennością parametrów takich jak obciążenie, temperatura czy prędkość obrotowa, powodujących częste zmiany stanów pracy silnika. Kłopotliwy może też być wpływ czynników utrudniających pomiar, takich jak np. długość układu wydechowego, powodujące opóźnienie pomiaru toksyczności spalin czy pomiar szybko zmieniającej się temperatury, który jest obciążony pewną bezwładnością.

Aby porównać ze sobą wyniki uzyskiwane różnymi metodami, przeprowadzono szereg badań przy pomocy Symulatora Drogowego Obciążenia Silnika wykorzystującego wirtualny silnik zapisany w pamięci komputera, a następnie powtórzono je na drodze eksperymentalnej. Kompletne charakterystyki obciążeniowe potrzebne do przeprowadzenia symulacji zostały doświadczalnie zdjęte z silnika o zapłonie iskrowym o pojemności 1600cm³ z wtryskiem pośrednim. Dane między innymi takie jak: prędkość obrotowa, moment obrotowy, położenie przepustnicy, strumień zużycia paliwa czy strumień substancji zawartych w spalinach pozwalają stworzyć pełną charakterystykę silnika. Wprowadzenie jej do symulatora umożliwi komputerowi dobór chwilowych parametrów pracy silnika dla każdej fazy dowolnego cyklu jezdne.

Badania eksperymentalne przeprowadzono na samochodzie Renault Megane 1.6. Wykorzystano do tego hamownię podwoziową czterorolkową Maha MSR500 wyposażoną w funkcję „cykle jezdne”.



Rys. 2. Stanowisko do badań eksperymentalnych.

W celu odczytu parametrów pracy silnika, poza hamownią użyto także analizatora spalin oraz komputera diagnostycznego zapisującego czas otwarcia wtryskiwaczy oraz prędkość obrotową silnika. Dane te były niezbędne, aby przy użyciu wzoru (1) obliczyć chwilowe zużycie paliwa.

$$G_{eB} = \frac{RPM}{120} \cdot \frac{t_{wb}}{1000} \cdot 4 \cdot G_B \cdot 60 \quad (1)$$

gdzie:

G_{eB} – chwilowe zużycie benzyny

RPM – prędkość obrotowa

t_{wb} – czas wtrysku benzyny

G_B – wydajność wtryskiwacza benzyny – 0,1693 l/min

Planując powyższe badania zdawano sobie sprawę, że porównywanie dwóch innych silników nie doprowadzi do otrzymania wyników mogących świadczyć o pełnej poprawności którejkolwiek z metod. Celem badań było wykazanie, że metoda symulacji komputerowej daje wiarygodny pogląd na procesy zachodzące w rzeczywistym silniku spalinowym.

W celu udowodnienia wyżej postawionego założenia przeprowadzono badania, w których porównano szereg parametrów omówionych w kolejnych rozdziałach pracy.

3. ENERGOCHŁONNOŚĆ RUCHU

Energochłonność ruchu jest zapotrzebowaniem energii na kołach napędzanych, niezbędnej do wykonania złożonego profilu prędkości. Ruch samochodu może być generowany dzięki energii mechanicznej dostarczonej z silnika, energii kinetycznej nabytej podczas wcześniejszego rozpędzania, czy też energii potencjalnej pojazdu w czasie zjazdu z pochyłości. Energia niezbędna do realizacji ruchu musi być większa niż suma oporów, co wynika ze wzoru:

$$E = E_t + E_p + E_w + E_k \quad (2)$$

gdzie:

E – energochłonność ruchu,

E_t – opór toczenia,

E_p – opór powietrza,

E_w – opór wzniesienia,

E_k – energia zużyta na przyrost energii kinetycznej.

Podczas rozpatrywania energii dostarczonej do samochodu, nie można nie wspomnieć o stratach energetycznych silnika:

$$E_{pal} = E + \Delta E_s + \Delta E_p + \Delta E_j \quad (3)$$

gdzie:

E_{pal} – energia chemiczna paliwa,

E_s – straty powstałe w trakcie przetwarzania energii w silniku,

E_p – straty układu napędowego,

E_j – straty biegu jałowego.

Energię paliwa wyznacza się także jako iloczyn jej ilości i wartości opałowej.

$$E_{pal} = G_{LN} \cdot W_d \quad (4)$$

gdzie:

G_{LN} – ilość paliwa zużytego w określonej fazie ruchu,

W_d – wartość opałowa paliwa, kJ/dm³.

Zużycie paliwa stanowi jeden z elementarnych składowych energochłonności ruchu samochodu. Następnym czynnikiem to średnia wartość sprawności napędu podczas fazy napędzania. Wartość tą wyznacza się z zależności:

$$\bar{\eta} = \frac{E}{E_{pal}} \quad (5)$$

Sprawność średnia jest równa iloczynowi sprawności użytecznej silnika i sprawności układu napędowego. Aby wyznaczyć energochłonność należy znać chwilową sprawność oraz zużycie paliwa.

$$E = G_{LN} \cdot \bar{\eta}_N \cdot W_d \quad (6)$$

Ruch samochodu bez udziału napędu silnika odbywa się kosztem utraty energii kinetycznej, która nabywana jest w fazach napędzania. Biorąc pod uwagę energię, która dostarczana jest do pojazdu

du, fazy hamowania silnikiem nie wpływają na jej zapotrzebowanie, gdyż silnik w tych fazach nie zużywa paliwa.

Energochłonność rozpatruje się również w funkcji przebytej odległości. Energochłonnością przebiegową definiuje się stosunek energii doprowadzonej do kół pojazdu do przebytej drogi.

$$\Psi = \frac{E}{L_c} \quad (7)$$

gdzie:

L_c = całkowita droga przebyta w cyklu jezdnym

Ocena wskaźnika energochłonności jednostkowej w swoich założeniach uwzględnia masę pojazdu, pochłoniętą energię i przejechany dystans przez samochód w czasie trwania napędzania pojazdu. Jak wykazano w pracy [3] masa pojazdu nie wpływa znacząco na energochłonność ruchu.

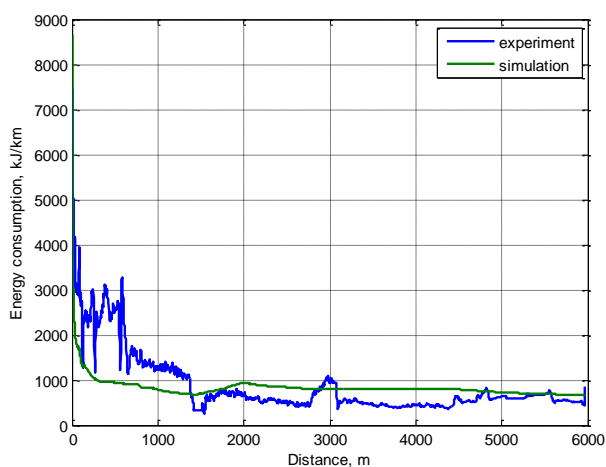
Masa pojazdu będzie znacząca w analizie energochłonności ruchu w tych cyklach jezdnych, w których w znaczącej części występuje faza jazdy ze stałą prędkością.

$$\Phi = \frac{E}{mL} \quad (8)$$

gdzie:

m = masa pojazdu

Uwzględniając omówione zagadnienia związane z energochłonnością ruchu przeprowadzono niezbędne pomiary symulacyjne oraz eksperymentalne. Wykonując tok obliczeń dla każdej z metod możliwe było uzyskanie wyników, które przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 3. Porównanie energochłonności przebiegowej

Wyniki badań zaprezentowane na rysunku 4 przedstawiają energochłonność przebiegową podczas przejazdu w cyklu syntetycznym EUDC. Wyraźnym jest fakt, że pomimo znacznych szumów w przebiegu energochłonności zmierzonej eksperymentalnie, krzywe reprezentujące metody nie odbiegają w znacznym stopniu od siebie. Końcowa faza wykresu charakteryzująca uśrednione zapotrzebowanie na energię potrzebną na przejechanie jednego kilometra drogi, wskazuje na wyrównanie się wyników pomiarów przeprowadzonych za pomocą obu metod.

4. EMISJA SZKODLIWYCH SUBSTNCJI

Ciągle zwiększająca się liczba pojazdów poruszających się po drogach powoduje zwiększanie się ilości szkodliwych substancji do środowiska. Zapobiegając temu, ustawodawcy wprowadzają coraz to bardziej rygorystyczne normy ograniczające produkcję przez

silniki toksycznych produktów spalania. Producenci pojazdów zmuszeni do przestrzegania przepisów prawa projektują różnego rodzaju rozwiązania mające na celu ograniczenie niepożądanego emisji toksyn. W ramach badań symulacyjnych jak i stanowiskowych analizowano ilość produkowanego przez silnik tlenku węgla oraz węglowodorów.

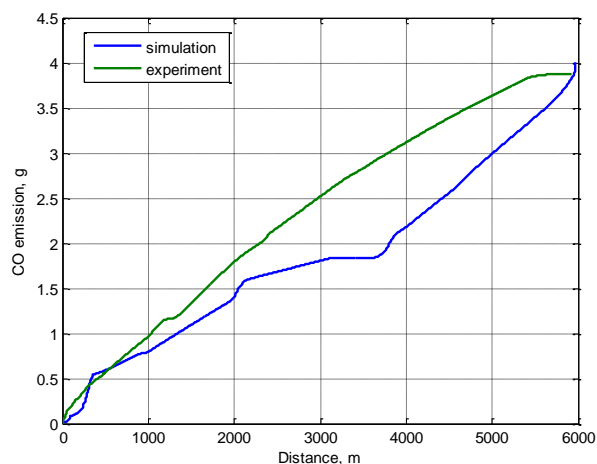
Do przyczyn emisji tlenku węgla należą:

- niskotemperaturowe utlenianie węglowodorów w zimnym i niebieskim płomieniu,
- rozpad aldehydów oraz dysocjacja dwutlenku węgla w wysokiej temperaturze.

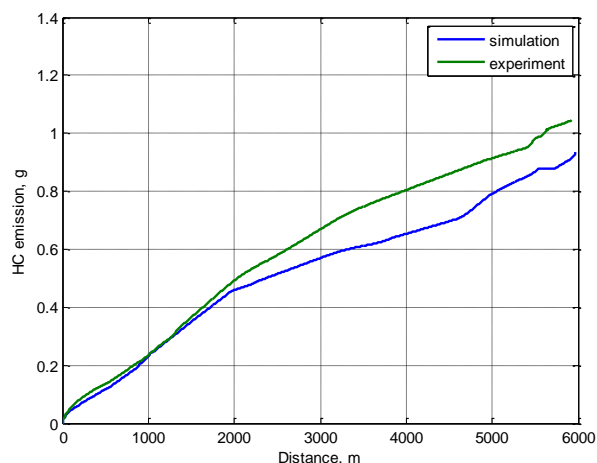
Tlenek węgla charakteryzuje się szczególną toksycznością wobec zdrowia ludzi i zwierząt, ponieważ łączy się z hemoglobina ponad 200 razy szybciej niż tlen, tworząc karboksyhemoglobinę. Może to doprowadzić nawet do zgonu organizmu. Główne objawy zatrucia tlenkiem węgla to: ból czoła, skroni, głowy, zawroty głowy, apatia, drgawki, wreszcie utrata przytomności. Przyczynami emisji związków organicznych są: niecałkowite i niepełne spalanie i par oleju [1].

Emisja szkodliwych substancji przedstawiana w ramach niniejszej pracy jest emisją pierwotną. Silnik na którym opierają się charakterystyki używane podczas symulacji komputerowej, a także układ wydechowy pojazdu badanego eksperymentalnie został pozbawione katalizatora oraz innych urządzeń odpowiedzialnych za zmniejszenie ilości toksycznych substancji.

Wartość emisji tlenku węgla i węglowodorów oraz przebiegowe wartości tych substancji przedstawiono na poniższych wykresach.

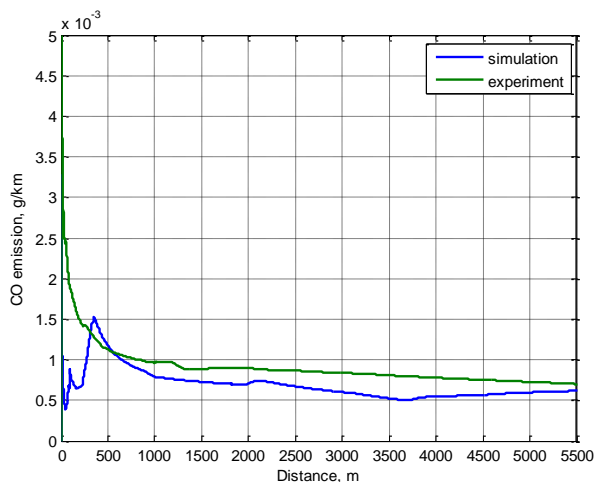


Rys. 4. Porównanie wartości tlenku węgla

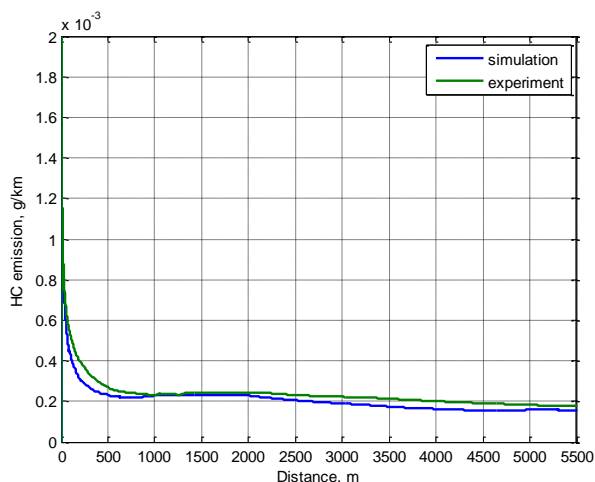


Rys. 5. Porównanie wartości węglowodorów

Przedstawione wyniki potwierdzają zgodność metod, wykazaną także w przypadku analizy energochłonności. Wartości dla różnych metod pomiarowych różnią się w pewnym stopniu od siebie, lecz są to rozbieżności w granicach błędów pomiarowych związanych z metodami pomiaru składu spalin.

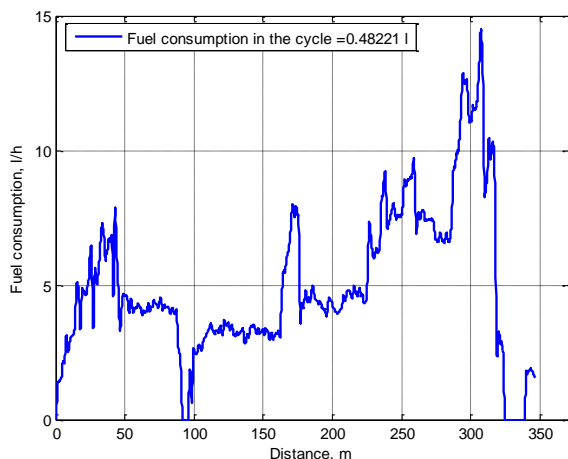


Rys. 6. Porównanie emisji przebiegowej tlenków węgla

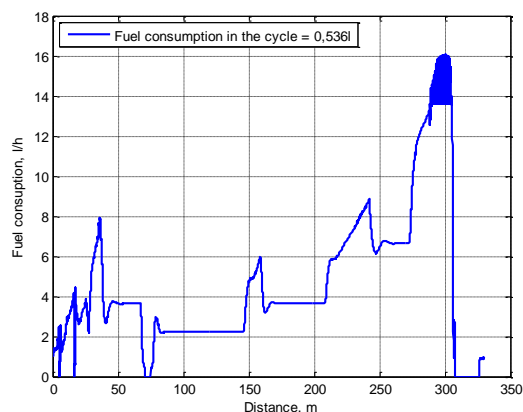


Rys. 7. Porównanie emisji przebiegowej węglowodorów

Ważnym parametrem dla użytkownika pojazdu obok osiągnięć jest także zużycie paliwa, które wiąże się bezpośrednio z kosztami eksploatacji samochodu. W toku badań rejestrowano chwilowe zużycie paliwa, które przedstawiono na wykresach 8 i 9.



Rys. 8. Zużycie paliwa mierzone podczas eksperymentu.



Rys. 9. Zużycie paliwa mierzone podczas symulacji.

Obserwując przebiegi chwilowego zużycia paliwa na rysunkach 8 i 9 zauważamy minimalne różnice w przebiegu krzywych na wykresach. Nie zakłócają one jednak głównego przebiegu wartości. Porównując ilość paliwa zużytego podczas realizacji pełnego cyklu jezdnych zauważamy, że różnice nie są znaczące.

PODSUMOWANIE

Seria przeprowadzonych badań symulacyjnych oraz eksperymentalnych pomimo zastosowania różnych silników w zadowalającym badacza stopniu potwierdziła słuszność stosowania metody symulacji komputerowych dla rozpoznania wskaźników pracy układu napędowego na tle charakterystyki silnika spalinowego. Symulacja komputerowa jest dobrym rozwiązaniem, aby zawęzić obszar badawczy eksperymentu, który jest droższy i bardziej czasochłonny. W wielu przypadkach symulowanie działania układu eliminuje konieczność budowania kosztownych prototypów.

BIBLIOGRAFIA

1. CHŁOPEK Z., Ekologiczne aspekty motoryzacji i bezpieczeństwo ruchu drogowego, Warszawa 2012
2. KOŁODZIEJ S., GRABA M., BIENIEK A., Ocena efektywności zasilania paliwem gazowym silników spalinowych, Technika Transportu Szynowego, 2015, nr 12
3. KOŁODZIEJ S., HENNEK K., PRAŻNOWSKI K., MAMALA J., Analiza energochłonności ruchu samochodu osobowego w cyklach jezdnych-Zeszyty naukowe Politechniki Warszawskiej 2017.
4. KROPIWNICKI J.: Koncepcja nowego testu energetycznego dla pojazdów samochodowych. Archiwum Motoryzacji 2007, nr 2, s. 169-183.

Comparative analysis of si engine operating parameters in simulation and experimental research

The article presents the basic problematic related to measurement methods of IC gasoline engine operation indicators. The concept of synthetic drive cycles was described along with their characteristic traits. For presented research, series of simulated drive cycles were performed with the use of Engine Road Load Simulator. Obtained results were graphically compared with experimental data. For acquisitions of experimental data, a passenger car realizing synthetic drive cycles on a chassis dynamometer was used. After needed computations basing on obtained results were performed, energy consumption, fuel consumption and harmful substance emissions were compared.

Autor:

mgr inż. **Szymon Kołodziej** – Politechnika Opolska, Wydział mechaniczny, s.kolodziej@po.opole.pl