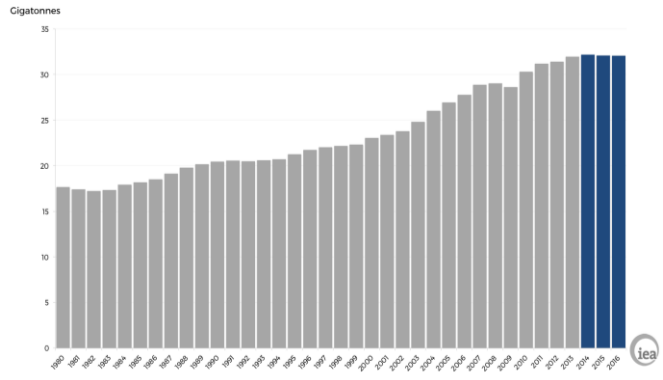
Krystian HENNEK, Szymon KOŁODZIEJ

WPŁYW PROFILU PRĘDKOŚCI ORAZ USTAWIEŃ REGULATORA POŁOŻENIA PRZEPUSTNICY NA ZUŻYCIE PALIWA W CYKLACH JEZDNYCH

W artykule dokonano analizy niektórych wskaźników pracy układu napędowego, które wyznaczone zostały za pomocą Symulatora Obciążenia Drogowego Silnika. W ramach badań przeprowadzono serie wirtualnych przejazdów modelu numerycznego samochodu osobowego w cyklach jezdnych. W doświadczeniach wykorzystano rzeczywiste profile prędkości zmierzone w ruchu miejskim oraz syntetyczny cykl NEDC. Zasymulowano pracę układu przy kilku wariantach ustawień regulatora położenia przepustnicy. Wyniki pomiarów przedstawiono w postaci tabelarycznej i graficznej.

WSTĘP

Rozwój technologiczny w dziedzinie mobilności człowieka przyczynia się do postępującego zanieczyszczenia środowiska. Wysoki poziom techniczny współczesnych samochodów jest skutkiem ery dbałości człowieka o czystość jego otoczenia. Wespół z masową produkcją automobili spowodował wzrost popularności pojazdów spalinowych wśród coraz większej części populacji naszego globu. Wzrost zużycia paliwa w skali światowej przyczynia się do coraz większej emisji substancji szkodliwych, wpływających destrukcyjnie na środowisko.



Rys. 1. *Globalna emisja CO_2 w latach 1980 - 2016 [1]*

W pracy przedstawiono analizę wybranych wskaźników pracy układu napędowego wyznaczonych za pomocą Stanowiskowego Symulatora Obciążenia Drogowego Silnika. Symulator wyposażony został w autorskie oprogramowanie umożliwiające prowadzenie badań cyfrowych oraz stanowiskowych. W symulacji numerycznej, silnik spalinowy jest zapisany w postaci cyfrowej, jako komplet charakterystyk prędkościowych między innymi czasowego zużycia paliwa, momentu obrotowego i strumienia emisji substancji szkodliwych.Za pomocą funkcji „Look and Tabel" charakterystyki te są na bieżąco wczytywane do pamięci komputera w formie binarnej. W oparciu o wirtualny model pojazdu wyznaczane są parametry pracy układu napędowego samochodu osobowego. Zawierają one między innymi przebiegowe zużycie paliwa, energochłonność ruchu czy sprawność całego łańcucha „od zbiornika paliwa do kół pojazdu". Podczas badań analizowano wyniki uzyskane z przejazdów zarówno syntetycznych jak i rzeczywistych cykli jezdnych, przy czym profil prędkości był odwzorowywany przy użyciu automatycznego kierowcy, dla którego wyznaczono średnią prędkość i dynamikę cyklu (tabela 1). Wzrost popularności aplikacji mobilnych służących zamawianiu usług m. in. transportu osobowego (np. Uber) oraz fakt, iż tego typu transport odbywa się w głównej mierze za pośrednictwem samochodów osobowych, zmotywował autorów do wykonania badań symulacyjnych na modelu takiego właśnie pojazdu.

1. PROFILE PRĘDKOŚCI SYNTETYCZNYCH I RZECZYWISTYCH CYKLI JEZDNYCH

Rzeczywisty ruch pojazdu charakteryzuje się zmianami prędkości jazdy w czasie. Zmiany te są silnie zależne od strefy, w której ruch ten się odbywa. Poruszanie się drogami miejskimi skutkuje częstymi postojami oraz następującymi po nich procesami przyspieszania z różną intensywnością. Ruch autostradowy natomiast odbywa się niemal bez postojów i ze znacznie wyższymi prędkościami. Na prędkość jazdy wpływają głównie: działania kierowcy pojazdu, ukształtowanie topograficzne drogi, manewry innych uczestników ruchu, prędkość i kierunek wiatru oraz infrastruktura drogowa.

Określenie syntetycznego wzorca profilu prędkości odzwierciedlającego w zadowalającym stopniu warunki rzeczywistego ruchu pojazdów stanowi poważny problem badawczy. W praktyce eksperymentalnej i homologacyjnej najczęściej wykorzystywanymi cyklami jezdnymi są cykle NEDC (ang. New European Driving Cycle) oraz cykl US EPA (ang. United States Environmental Protection Agency). NEDC składa się z powtarzanego 4 razy cyklu UDC (ang. Urban Driving Cycle) I pojedynczego cyklu EUDC (ang. Extra-Urban Driving Cycle) (rys. 2 b)).

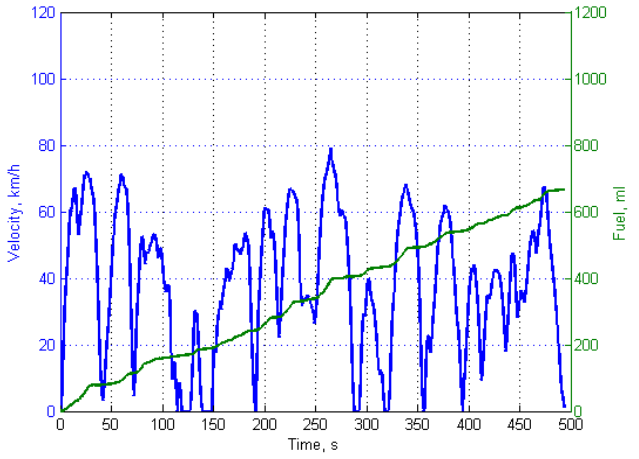
Profil prędkości cyklu jezdnego jest głównym czynnikiem warunkującym udział poszczególnych faz ruchu – przyspieszania, jazdy ze stałą prędkością, hamowania, czy pracy na biegu jałowym (tabela 1). Decyduje on przez to o wielkości średniej sprawności układu napędowego [2].

Cykle jezdne wykorzystywane przez różne ośrodki badawcze mogą różnić się między sobą udziałem oraz intensywnością poszczególnych faz ruchu. Dodatkowo w różnym stopniu odwzorowują rzeczywiste warunki jazdy. Można więc stwierdzić, iż cykl NEDC stanowi kompromis pomiędzy dynamiką w ruchu rzeczywistym a możliwościami badawczego stanowiska dynamometrycznego. Mimo to pozwala on na jednoznaczne określenie zużycia paliwa, emisji substancji szkodliwych oraz innych istotnych parametrów dla wielu pojazdów.

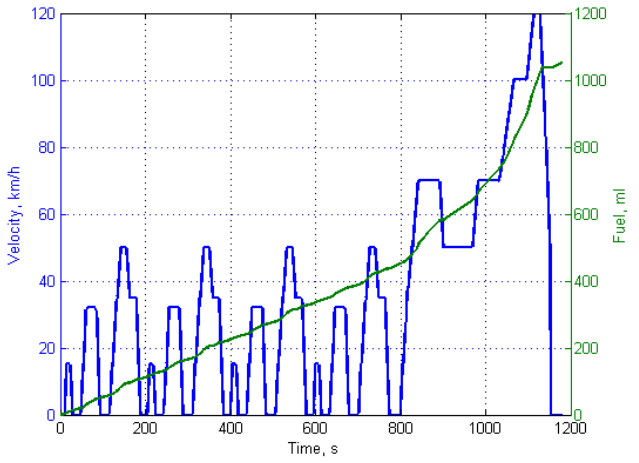
Tab. 1. Udział faz ruchu w wykorzystanych cyklach jezdnych

	Przyspieszanie, %	Stała prędkość, %	Zwalnianie, %	Bieg jałowy, %	Średnia prędkość, km/h	Średnie przyśpieszenie, km/h²
C1	53,38	3,87	42,13	0,50	35,28	0,11
C2	55,30	1,71	41,63	0,82	30,40	0,06
C3	57,85	1,68	40,22	0,24	32,15	0,20
NEDC	34,31	41,03	23,55	1,11	32,64	0,01

Podczas badań stanowiskowych z cyklami jezdnymi pojazdem steruje najczęściej człowiek. Utrzymanie wysokiego poziomu powtarzalności jego działań w czasie (między innymi: sterowania przełożeniem i pedałem przyspieszenia) również stanowi pewną trudność. Widoczny więc może być wpływ czynnika ludzkiego na udział faz ruchu w danym cyklu. Istnieje jednak możliwość zastąpienia kierowcy pojazdu wirtualnym kierowcą, w wyniku czego poprawie powinna ulec jakość uzyskanych wyników.



a)

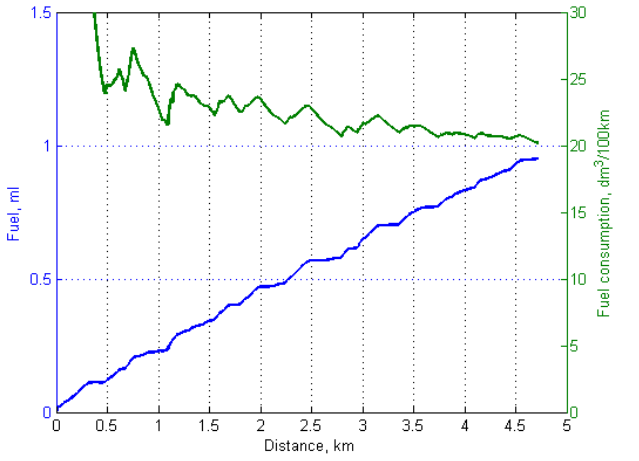


b)

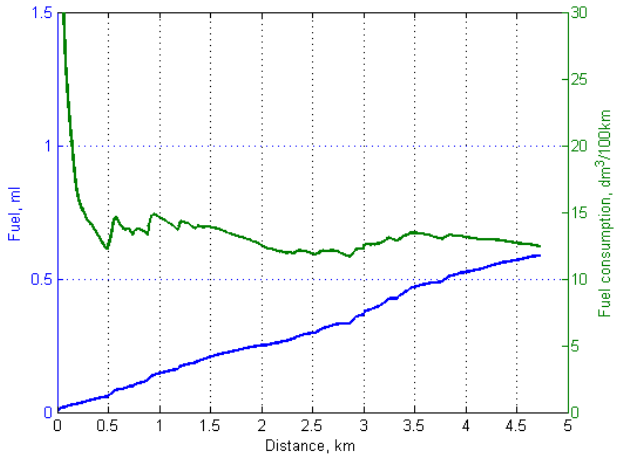
Rys. 2. *Przykładowe cykle jezdne wykorzystane w symulacjach a) – cykl zrealizowany w warunkach rzeczywistego ruchu podmiejskiego w okolicach Opolu, b) – cykl NEDC*

2. WPŁYW PROFILU PRĘDKOŚCI NA ZUŻYCIE PALIWA

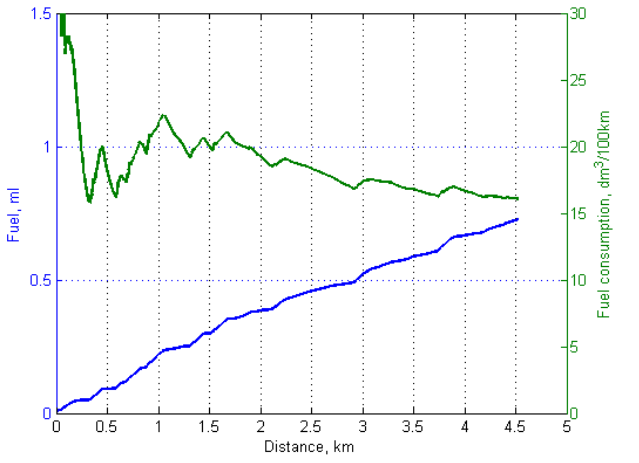
W badaniach symulacyjnych określona została ilość paliwa teoretycznie zużytego na przejazdy wirtualnego samochodu osobowego w cyklach rzeczywistych oraz syntetycznym (rys. 3, linie niebieskie). Profile prędkości cykli rzeczywistych pozyskano w warunkach ruchu podmiejskiego w okolicach Opola, przy czym podczas tych przejazdów sterowano pedałem przyspieszenia w taki sposób, aby profile odzwierciedlały jazdę dynamiczną (cykl C1), ekonomiczną (cykl C2) oraz zrównoważoną (cykl C3).



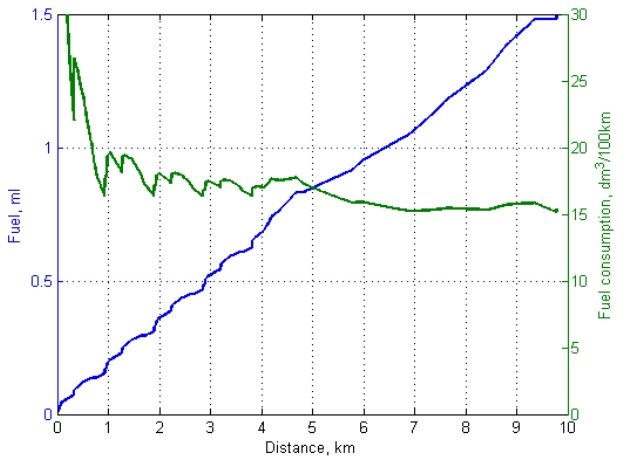
a)



b)



c)



d)

Rys. 3. *Porównanie zużycia paliwa względem cyklu jezdnego; a) – C1, b) – C2, c) – C3, d) – NEDC*

Wyniki symulacji umożliwiają identyfikację różnic w zużyciu paliwa w zależności od sposobu sterowania pedałem przyspieszenia. Najniższe zużycie paliwa uzyskano podczas jazdy ekonomicznej. Niemal dwukrotnie wyższy wynik końcowy osiągnięto w warunkach jazdy dynamicznej. Wirtualny pojazd poruszający się w cyklu zrównoważonym wykorzystał objętość paliwa odpowiadającą w przybliżeniu średniej arytmetycznej z cyklu dynamicznego i ekonomicznego. Natomiast w cyklu NEDC, po pokonaniu odległości porównywalnej z cyklami C1, C2 i C3, charakteryzował się zużyciem paliwa w ilości zbliżonej do cyklu zrównoważonego. Pozwala to stwierdzić, iż odpowiada on jeździe zbalansowanej, o średnim poziomie dynamiki ruchu.

W ujęciu rzeczywistych cykli jezdnych widoczny jest wpływ kształtu profilu prędkości na zużycie paliwa w cyklu. W przejazdach rzeczywistych samochód osobowy narażony był na wspomniane wcześniej czynniki wpływające na prędkość jazdy, a co za tym idzie kształty zmierzonych profili prędkości są niejako samoczynnie skorygowane. Innymi słowy profile prędkości rzeczywistego ruchu zawierają w sobie automatycznie wpisane korekty ze względu na opory toczenia kół, opór aerodynamiczny itp. Kierowca poruszającego się pojazdu nieustannie dobiera właściwy (według niego samego) poziom obciążenia układu napędowego pojazdu. Dokonuje tego za pomocą pedału przyspieszenia i skrzyni przekładniowej. Jazda ze stałą prędkością wymaga uprzedniego jej osiągnięcia w procesie przyspieszania, wybiegu lub hamowania. Parametry oraz ilość etapów zmian prędkości w cyklu jezdnym decydują o energochłonności cyklu. Przebiegi zużycia paliwa potwierdzają fakt, iż jest ono w znacznym stopniu zależne od sposobu sterowania pedałem przyspieszenia przez kierowcę pojazdu, a więc od techniki jazdy.

W tabeli 2 przedstawiono najczęściej wykorzystywane obszary prędkościowej charakterystyki użytkowego momentu obrotowego. Najczęściej wykorzystywanym zakresem prędkości obrotowych silnika, w ujęciu rzeczywistych cykli jezdnych, był zakres około 1650 obr/min. Uwzględniając niską wartość momentu obrotowego (5,5 Nm), jaka najczęściej wykorzystywana była do napędu pojazdu należy stwierdzić, iż ten obszar charakterystyki silnika jest niekorzystny ze względu na niską ogólną sprawność silnika.

Wykorzystanie rzeczywistych cykli jezdnych do dokonania pomiarów skutkowało pracą silnika ze średnią sprawnością ogólną około 5%. W przypadku cykli syntetycznych wielkość ta spadła do wielkości około 2%, co stanowi mniej niż połowę sprawności, jaką obliczono z cykli rzeczywistych. Skutkiem tego jest zawyżenie zużycia paliwa zmierzonego w syntetycznych cyklach jezdnych w stosunku do zużycia, jakie możemy zmierzyć w rzeczywistych warunkach ruchu pojazdu. Jednocześnie zmianom ulegną również wyniki pomiarów emisji substancji szkodliwych do atmosfery.

Tab. 2. *Wybrane parametry najczęściej wykorzystywanych punktów pracy silnika w zrealizowanych cyklach jezdnych.*

	Prędkość obrotowa, 1/min	Moment obrotowy, Nm	Udział, %	Zużycie paliwa w cyklu, l	Sprawność, %
C1	1250	5,5	8,14	0,67	4,96
C2	1250	5,5	8,00	0,412	5,45
C3	1250	5,5	12,27	0,51	5,45
NEDC	2250	16,5	12,22	1,05	2,27

3. WPŁYW NASTAW REGULATORA POŁOŻENIA PRZEPUSTNICY NA ZUŻYCIE PALIWA

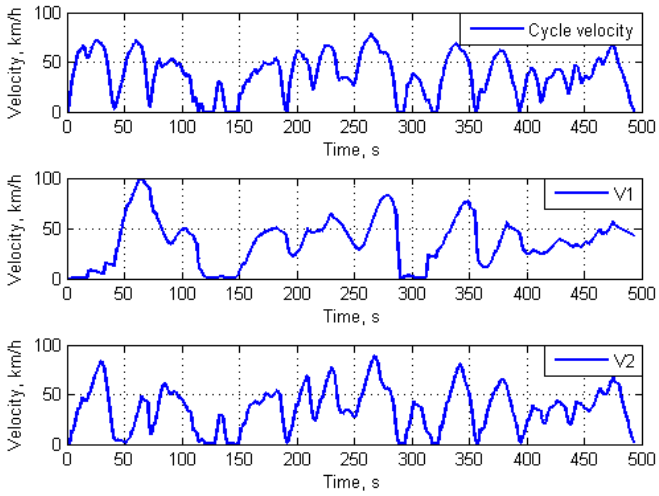
Spalinowe jednostki napędowe współczesnych pojazdów wyposażone są najczęściej w układ ETC (ang. Electronic Throttle Control), gdzie pedał przyspieszenia połączony jest z przepustnicą oraz komputerem sterującym pracą silnika za pomocą przewodów elektrycznych. Sygnał wejściowy pochodzący z pedału przekształcany jest przez sterownik silnika według zapisanego w nim algorytmu i następnie przekazany jest do elektronicznie sterowanej przepustnicy. W trakcie pracy układu, położenie pedału oraz przesłony przepustnicy podlegają nadzorowi, co pozwala na szybkie rozpoznanie ich ewentualnej niesprawności przez sterownik.

Oprogramowanie Symulatora umożliwia wprowadzenie zmian nastaw elektronicznego regulatora położenia przepustnicy. Modyfikacje nastaw regulatora wpływają na szybkość reakcji przesłony przepustnicy na wymuszenie pochodzące od pedału przyspieszenia. Prędkość ta wzrasta zgodnie z kolejnością: V1, V2, V3, V4, V5.

Porównania przebiegowego zużycia paliwa (tab. 3) przedstawiają wielkości wirtualnego zużycia uzyskane w cyklach jezdnych odniesione od dystansu 100km. Najniższe zużycie paliwa w rzeczywistych cyklach uzyskano przy wariancie V1 nastaw regulatora. Jednocześnie w cyklu syntetycznym algorytm sterowania V1 spowodował najwyższe zużycie. W tym samym cyklu najmniejszy wydatek paliwa zmierzono przy V2, który w cyklach rzeczywistych charakteryzował się najwyższą wartością tego parametru. Pozostałe wersje ustawień regulatora położenia przepustnicy generowały wyniki na zbliżonym poziomie. Warto zaznaczyć, iż przy wariancie V1 przesłona przepustnicy uchylana była z bardzo niskimi prędkościami kątowymi, co znacznie pogorszyło zdolność przyspieszania wirtualnego samochodu. Powodem tego jest mała zgodność zrealizowanego profilu prędkości w stosunku do profilu zadanego (rys. 4). Znacznie lepszą zgodnością charakteryzował się profil prędkości wariantu V2.

Tab. 3. *Zużycie paliwa w cyklu odniesione do dystansu 100 km*

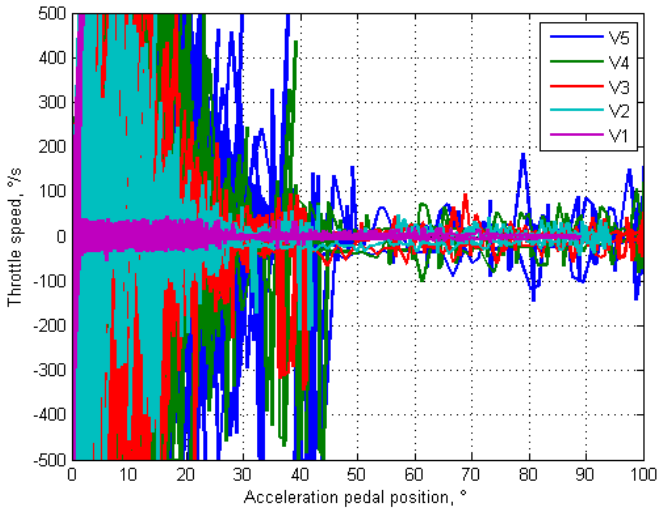
	V1	V2	V3	V4	V5
C1	12,63	14,47	14,15	14,24	14,02
C2	8,33	9,13	8,71	8,71	8,77
NEDC	12,18	10,52	10,75	11,17	10,74



Rys. 4. *Przebiegi prędkości w czasie: u góry – cykl jezdny C1; pośrodku – profil zrealizowany przy wariancie V1 nastaw regulatora położenia przepustnicy; na dole – profil zrealizowany przy wariancie V2 nastaw regulatora położenia przepustnicy*

Na rysunku 5 przedstawiono przykład nałożenia na siebie wykresów przebiegu położenia przepustnicy w funkcji kąta uchylenia pedału przyspieszenia. Dane te pozyskane zostały w cyklu syntetycznym NEDC. Zauważalny jest wzrost prędkości uchylania przesłony przepustnicy wraz z kolejnością wariantów nastaw regulatora. Świadczy to o tym, iż przesłona przepustnicy wychylana była z coraz wyższą dynamiką, a więc układ był w stanie osiągnąć właściwe położenie przesłony w krótszym czasie, o ile nie doszło to prze-

sterowania. Najwyższe prędkości przepustnicy można zauważyć w przedziale od 0° do około 45° uchylenia pedału. Oznacza to, że ten zakres uchyleń był najczęściej wykorzystywany podczas przejazdów w cyklu NEDC. Stanowi to również potwierdzenie faktu o tym, iż NEDC odwzorowuje jazdę pojazdu z niewielką dynamiką.



Rys. 5. *Porównania prędkości ruchu przesłony przepustnicy w cyklu NEDC*

PODSUMOWANIE

Wyniki pomiarów przedstawione w pracy pozwalają na stwierdzenie, iż użycie syntetycznych cykli jezdnych do odzwierciedlenia warunków ruchu miejskiego w badaniach emisji i zużycia paliwa pojazdów spalinowych może spowodować znaczne przekłamania w uzyskanych wynikach. Przebiegi prędkości w cyklach syntetycznych w znaczny sposób odbiegają od tych rzeczywiście realizowanych na drodze. Długie okresy utrzymywania stałej prędkości jazdy w rzeczywistym ruchu miejskim występują bardzo sporadycznie, chociażby ze względu na ukształtowanie terenu, czy opory związane z prędkością i kierunkiem wiatru. Metodą badań charakteryzującą się większą zbieżnością warunków pomiarowych z rzeczywistymi jest metoda RDE (ang. Real Driving Emissions – emisja w ruchu rzeczywistym). Podczas pomiarów tą techniką pojazd znajduje się w rzeczywistym ruchu, a aparatura pomiarowa w sposób ciągły zapisuje badane parametry.

Analizując uzyskane wyniki badań można zauważyć jak znaczący wpływ na dynamikę poruszania się pojazdu, zużycie paliwa, a także bezpośrednio na bezpieczeństwo jazdy ma sposób sterowania przepustnicą. Wolne sterowanie położeniem przesłony przepustnicy sprzyja zmniejszeniu zużycia paliwa, ale pogarsza właściwości dynamiczne jednostki napędowej. Szybkie zaś poruszanie przepustnicy powoduje znaczne przesterowania zadanego punktu uchylenia. Jak można jednak zauważyć z przeprowadzonych badań trudno jest jednoznacznie wskazać, która z zaproponowanych nastaw regulatora przepustnicy w każdych warunkach drogowych pozwoli na minimalizację zużycia paliwa oraz zapewni odpowiednią dynamikę poruszania się pojazdu. Można stwierdzić, że tradycyjne regulatory zapewnią tylko częściowe założenia minimalizacji zużycia paliwa i dobrych własności dynamicznych jednostki napędowej.

Przy zastosowaniu tej klasy regulatorów konieczne jest wybranie pewnego kompromisu, pomiędzy minimalizacją zużycie paliwa, dobrą dynamiką jednostki napędowej. Duży wpływ na zużycie paliwa ma sam profil prędkości i warunki panujące na drodze, jednakże decydujący wpływ ma zachowanie kierowcy. To właśnie od samego sposobu zadawania położenia pedału przyspieszenia zależy dynamika poruszenia się pojazdu, a tym samym zużycie paliwa. W takim przypadku, aby zachować kryteria niskiego zużycia paliwa i zadawalającej dynamiki poruszania się pojazdu, należy w układzie sterowania przesłoną przepustnicy zastosować regulator adaptacyjny, który będzie korygował swoje nastawy w zależności od zachowania kierowcy. Takie rozwiązanie pozwoli w każdych warunkach i dla każdego kierowcy sterować przesłoną przepustnicy w taki sposób, by dążyć do minimalizacji zużycia paliwa przy zachowaniu zadawalających własności dynamicznych pojazdu. Zastosowanie regulatorów adaptacyjnych w układzie sterowania przepustnicą stanowić będzie dalsze kierunki badań autorów niniejszego artykułu.

Wykorzystanie komputerowego oprogramowania symulacyjnego w postaci Stanowiskowego Symulatora Drogowego Obciążenia Silnika pozwala na otrzymanie wyników bez fizycznego pojazdu, a jedynie z wykorzystaniem jego wirtualnego modelu. Dzięki temu istnieje możliwość zaoszczędzenia między innymi czasu, kosztów eksploatacyjnych pojazdu, a proces pomiarowy może odbywać się już na etapie projektowania.

BIBLIOGRAFIA

1. Intenational Enegry Agency, www.iea.org
2. Siłka W.: Teoria ruchu samochodu, skrypt 192, Dział Wydawnictw Politechniki Opolskiej, Opole, 1996, ISSN 0860 – 9004;
3. Mamala J. Kompensacja niedostatku siły napędowej w procesie rozpędzania samochodu osobowego, zeszyt 290, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole 2011, ISSN 1429 – 6063;
4. Mamala J., Brol S., Graba M. Engine Control Unit Testing by Hardware-in-the-loop Simulation, Solid State Phenomena. Vol. 214, 2014, s. 67 – 74;

The influence of the velocity profile and throttle position regulator settings on fuel consumption in driving cycles

This paper includes an analysis of some chosen drivetrain work parameters, which were designated with the use of The Road Load Engine Simulator. In the simulation there were some real and synthetic driving cycles used. Some changes in the engine throttle position regulator settings were tested. The results of the simulation were shown in a graphic and tabular way.

Autorzy:
mgr inż. **Krystian Hennek** – Politechnika Opolska, Wydział Mechaniczny, Katedra Pojazdów Drogowych i Rolniczych, e-mail: k.hennek@po.opole.pl
mgr inż. **Szymon Kolodziej** – Politechnika Opolska, Wydział Mechaniczny, Katedra Pojazdów Drogowych i Rolniczych, e-mail: s.kolodziej@po.opole.pl