

SPRAWNOŚĆ EFEKTYWNA SILNIKA ZI SAMOCHODU OSOBOWEGO W DYNAMICZNYCH WARUNKACH PRACY

Aleksander UBYSZ

Katedra Budowy Pojazdów Samochodowych, Politechnika Śląska
Wydział Transportu, 40-019 Katowice ul. Krasińskiego 8

Streszczenie

Problem wyznaczenia sprawności efektywnej silnika samochodowego w dynamicznych warunkach pracy jest kluczowym w obliczaniu całkowitej energochłonności ruchu pojazdu i optymalizacji zużycia paliwa. Dlatego wśród niewielu metod praktycznego rozwiązania tego zagadnienia najbardziej atrakcyjną wydaje się jej odniesienie do znanej sprawności efektywnej silnika dla statycznych warunków pracy z charakterystyki uniwersalnej. Autor w obliczeniach tego problemu wykorzystał metodę bilansu energochłonności ruchu w zmiennym pod względem dynamiki przyspieszania cyklu jezdny i porównania wyników obliczeń z rzeczywistym zużyciem paliwa. Założono w obliczeniach prostoliniowy wpływ dynamiki przyspieszania prędkości obrotowej silnika na spadek sprawności efektywnej wyznaczonej dla statycznych warunków pracy.

Słowa kluczowe: jednostkowe zużycie paliwa, charakterystyka uniwersalna.

THE ACTUAL CAR ENGINE EFFICIENCY AT DYNAMIC OPERATING CONDITIONS

Summary

The problem of determining the car engine efficiency in dynamic operating conditions is of great importance while calculating the total consumption of energy when the car is driven. It also enables to define the optimum energy consumption. Up till now only few methods have been used but the one which seems to be quite effective is based on the actual engine efficiency at static operating conditions from universal characteristics. The method of energy consumption balance in a variable driving cycle (the dynamics of acceleration was changeable) was applied and the calculation results were compared to the actual fuel consumption. It has been assumed that there was rectilinear influence of acceleration dynamics of the engine upon the decrease of actual efficiency determined for the static operating conditions.

Keywords: specific fuel consumption, fuel consumption map.

1. WSTĘP

Izolnie jednostkowego zużycia paliwa na charakterystyce ogólnej silnika samochodowego wyznacza się w stacjonarnych warunkach pracy na hamowni silnikowej. W zastosowaniu praktycznym silników w pojazdach takie warunki pracy występują bardzo rzadko, gdyż jak nie obciążenie silnika ulega zmianie to prędkość obrotowa, a najczęściej obydwie te parametry ulegają mniejszemu lub większemu gradientowi zmian w czasie równocześnie.

Mimo to w wielu ośrodkach naukowych przyjmuje się do obliczeń energochłonności ruchu pojazdu w tych zmiennych warunkach pracy sprawność efektywną silnika z charakterystyki ogólnej, zakładając jej przydatność do określonej dynamiki zmian obciążenia i prędkości obrotowej. Często przyjmuje się przy tym założenie, że w niestacjonarnych warunkach pracy sprawność efektywna silnika prawdopodobnie się pogarsza [1, 2]. W ostatnich dekadach w kraju i zagranicą podejmowano liczne próby rozwiązania tego zagadnienia na drodze empirycznej [3, 4, 5, 6].

W niniejszej pracy autor w ramach badań nad przebiegowym zużyciem paliwa przeprowadza w sposób naukowy metodą pośrednią tok obliczeń wpływu dynamiki przyspieszania pojazdu na pierwszych trzech przełożeniach skrzynki biegów na sprawność efektywną silnika w fazach rozpędzania samochodu klasy B/K z silnikiem 1,6 ZI.

2. WARUNKI BADAŃ I ZAŁOŻENIA TEORETYCZNE

Zmienny pod względem dynamiki przyspieszania pojazdu cykl jezdny symulujący ruch pojazdu na obszarze zabudowanym realizowano na odcinku jezdni długości do 500 m o dokładnie wyznaczonym profilu pochylenia jezdni „p”. Do badań wykorzystano samochód osobowy klasy B/K z silnikiem 1,6 ZI o znanej charakterystyce uniwersalnej [8]. W celu określenia wpływu pochylenia jezdni na dynamikę przyspieszania samochodu dla stałego obciążenia silnika realizowano pomiary za pomocą

MotoGrafu [9] dla przejazdów w obu kierunkach: „w dół” i „w górę”.

Do obliczeń założono prostoliniowy spadek sprawności efektywnej silnika ze wzrostem przyspieszenia prędkości obrotowej silnika. Zmienną niezależną jest moc jednostkowa dodatkowych oporów ruchu samochodu [7]

$$(a + gp) \cdot v = (a^* \cdot v), \text{ gdzie:}$$

a - przyspieszenie ruchu samochodu i mas wirujących, m/s^2 ;

p - pochylenie drogi równe $\sin \alpha$;

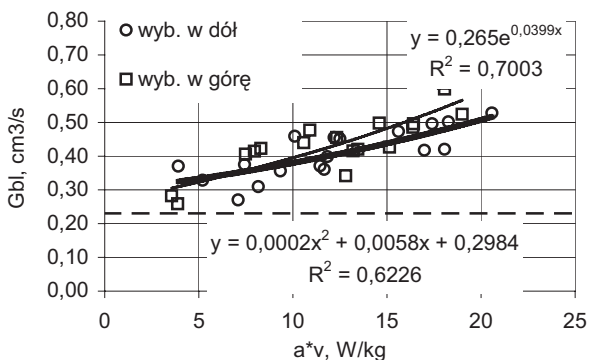
v - chwilowa lub średnia prędkość pojazdu, m/s

m - masa rzeczywista samochodu, kg.

Miarą spadku sprawności efektywnej silnika ze wzrostem dynamiki rozpędzania samochodu będzie wartość przyrostu w fazach biegu luzem czasowego zużycia paliwa G_{bl} na jednostkę mocy jednostkowej dodatkowych oporów ruchu ($a^* \cdot v$) W/kg (rys. 1):

$$\Delta G_{bl,av} = G_{\eta_e} = \frac{\Delta G_{bl}}{\Delta (a^* \cdot v)}, \frac{cm^3 \cdot kg}{s \cdot W} \quad (1)$$

G_{η_e} - czasowe zużycie paliwa wynikające ze spadku sprawności efektywnej silnika na jednostkę ($a^* \cdot v$), $cm^3 \cdot kg/(s \cdot W)$.



Rys. 1. Czasowe zużycia paliwa w fazach ruchu z rozłączonym napędem w zmiennych cyklach jezdnych

Pomiary prowadzono na tym samym odcinku pomiarowym jezdni rozpędzając pojazd do 58 km/h na trzech pierwszych przełożeniach oraz do 45 km/h na dwóch pierwszych przełożeniach skrzynki biegów. W celu minimalizacji błędów stochastycznego sterowania pojazdem dla każdej dynamiki rozpędzania samochodu badania prowadzono kilkakrotnie, zawsze w stanie ustalonym cieplnie.

Monotoniczny wzrost wartości G_{bl} w funkcji wzrostu ($a^* \cdot v$) jest przede wszystkim miarą wrażliwości sprawności efektywnej silnika na niestacjonarne warunki pracy, głównie w zakresie przyrostu prędkości obrotowej silnika. Zależność intensywności przyrostu prędkości obrotowej silnika w czasie (min^{-1}/s lub s^{-2}) w funkcji mocy jednostkowej dodatkowych oporów ruchu

samochodu przedstawiono dla jazdy na trzech przełożeniach na rys. 2. Do obliczeń wprowadzono definicję **współczynnika niestacjonarnych warunków pracy silnika od prędkości obrotowej** v_n , którego miarą na danym przełożeniu jest wzrost prędkości obrotowej w jednostce czasu:

$$v_n = \frac{n_p - n_k}{t_p - t_k}, \frac{min^{-1}}{s} \text{ lub } s^{-2}, \quad (2)$$

gdzie: n_p, n_k [min^{-1}]- prędkość obrotowa silnika na początku i końcu odcinka pomiarowego, $t_p - t_k$ [s]- czas przejazdu odcinka pomiarowego.

W ramach badań nad spadkiem sprawności efektywnej silnika zrealizowano 4 serie pomiarów, w każdej po ok. 46 cykli jezdnych „w dół” i „w górę”. Najbardziej stabilne wyniki, na których oparto obliczenia, dały cykle jezdne wykorzystujące jako podstawową technikę sterowania prędkością samochodu jazdę z rozłączonym napędem (wybieg) (tab. 1).

3. WYNIKI OBLICZEŃ

Zróznicowanie zakresu przyspieszania samochodu na poszczególnych przełożeniach (tab. 1) miało na celu sprawdzenie wrażliwości G_{bl} i zużycia paliwa na dynamikę przyspieszania ruchu samochodu. W pierwszym przypadku wrażliwość jest porównywalna (rys. 4), a w drugim okazało się, że pochylenie drogi ma wpływ na przebiegowe zużycie paliwa i diametralnie zmienia wyniki jego optymalizacji [8].

Tabela 1

Zakresy prędkości przyspieszania ruchu pojazdu na poszczególnych biegach w kolejnych seriach zmiennych cykli jezdnych jazdywybiegiem

Serie z wybiegiem	v km/h	Zakres prędkości na biegu km/h		
		I	II	III
1	2	3	4	5
1	0-58	0-25	25-40	40-58
2	0-45	0-20	20-45	-
3	0-58	0-15	15-35	35-58

Dla serii „1” 46. przejazdów z różną dynamiką rozpędzania samochodu „w dół” i „w górę” wyznaczono metodą minimalizacji błędów obliczeń prostoliniową charakterystykę wzrostu jednostkowego zużycia paliwa ze wzrostem ($a^* \cdot v$). Wybrane wyniki obliczeń przedstawia tab. 2.

Na rys. 2 przedstawiono przykładowe charakterystyki dynamiki zmian prędkości obrotowej silnika v_n dla napędu na III biegu w funkcji dynamiki rozpędzania samochodu na odcinku pomiarowym „w dół” i „w górę”. Na podstawie danych obliczanych tak, jak to pokazano na przykładzie jazdy na I biegu w tab. 2, można

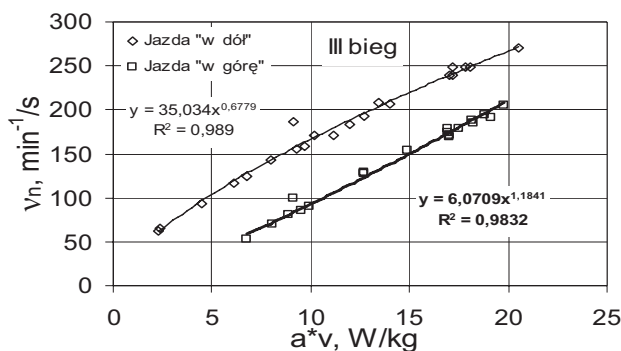
Tabela 2. Wynik obliczeń wpływu założonego spadku $\Delta g_e = f(a^* \cdot v)$ z charakterystyki uniwersalnej na dokładność obliczeń zużycia paliwa

Nr	$(a^* \cdot v)_{sr}$ W/kg	$V_{p,n}$ cm ³	$\Delta V_{ne}^{1)}$ cm ³	1 „bieg” ²⁾		$\Sigma \Delta V_n$ cm ³	$\frac{(4)-(11)}{(4)}$ %	$(a^* \cdot v)_{1,2,3}$ W/kg
				$\Delta g_{e,3}$ g/kWh	$\Delta \eta_{e,sr}$ %			
1	2	3	4	5	6	11 ²⁾	12	13
2a	17,9	21,8	4,2	130	12,2	4,8	14,0	16/20,4/17
2b	18,6	28,5	4,7	126	12,5	5,5	17,0	18,2/19/18,3
4a	14,8	21,5	3,6	63	9,7	4,0	11,1	10,5/20/14
4b	16,2	28,4	4,0	110	10,6	4,8	20,0	14/17,7/17
6a	9,9	22,2	2,8	84	7,4	2,8	0	9,2/11/9,3
6b	10,0	35,5	3,7	80	7,1	3,4	8,1	9/11/10
10a	18,1	21,9	4,05	144	13,8	4,7	16,0	18/18,2/18
10b	20,8	26,9	4,5	150	14,7	6,4	42,0	21,3/19,5/20
14a	9,5	21,1	2,7	87	7,4	2,7	0	8,5/9,8/10
14b	11,4	32,6	4,1	82	8,5	3,8	4,9	13,4/11/9,5
17a	6,9	22,4	2,7	58	4,7	2,3	14,8	6,4/7,5/6,8
17b	8,7	29,1	3,0	70	6,7	2,3	23,3	8,3/8,7/9,1
18a	7,3	22,3	2,1	60	4,8	2,2	-4,8	6/7,6/8,3
18b	7,0	30,7	2,7	56	4,7	1,8	33,3	6,4/7,3/7,2
19a	5,8	21,2	1,96	56	3,3	1,6	18,2	4,9/6/6,3
19b	7,3	32,6	2,8	60	4,1	3,3	17,9	6,4/7,8/7,8

¹⁾ - „niedoliczona” objętość $V_{p,n}$ paliwa obliczona na podstawie współczynnika wrażliwości $G_{bl,r}$ na wzrost mocy jednostkowej dodatkowych oporów ruchu samochodu ($G_{ne} = 0,016 \text{ cm}^3 \cdot \text{kg/s/W}$), ²⁾ - brak kolumn obliczeń dla 2 i 3 biegu, kol.(12)- wersaliki - błąd ujemny

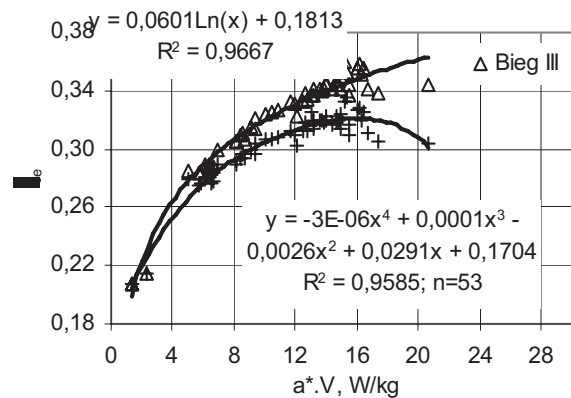
obliczyć spadek sprawności efektywnej silnika dla wykorzystywanych w zmiennym cyklu jezdnym trzech przełożeń skrzynki biegów. Wartość sprawności efektywnej silnika, odczytanej z charakterystyki uniwersalnej i pomniejszonej o $\Delta \eta_{e,sr} = f(a^* \cdot v)$ przedstawiono przykładowo dla III biegu na rys. 3. Na zbiorczym rys. 4 przedstawiono dodatkowo przebiegi spadku sprawności efektywnej silnika w funkcji $(a^* \cdot v)$ dla serii pomiarów „2” z przyspieszaniem samochodu na dwóch biegach - linie ciągłe szare.

Z danych przedstawionych na rys. 4 i z dynamiki pracy zespołu napędowego wynika, że spadek sprawności efektywnej na każdym biegu można zminimalizować przez włączanie wyższego biegu przy mniejszej prędkości samochodu, tak np. jak to przewiduje regulamin w mało dynamicznych europejskich cyklach jezdnych: miejskim i drogowym (93/116/CE).

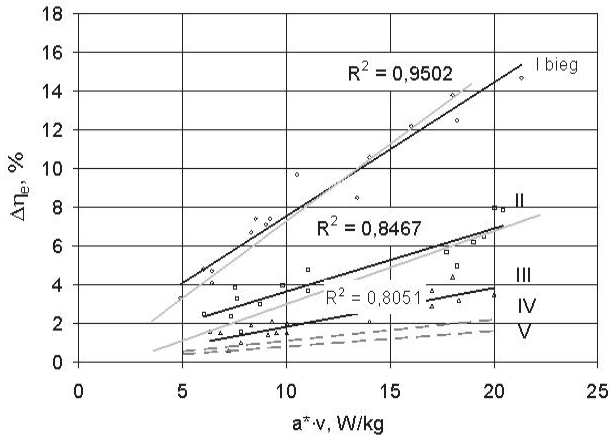


Rys. 2. Przykładowe charakterystyki dynamiki zmian prędkości obrotowej silnika v_n dla faz ruchu

„w dół” i „w górę” na 3. biegu Zakładając proporcjonalny, malejący w postępie geometrycznym spadek sprawności efektywnej silnika ZI 1,6 dla IV i V biegu, można przewidywać jego wartość, co przedstawiono za pomocą linii przerywanych na rys. 4.



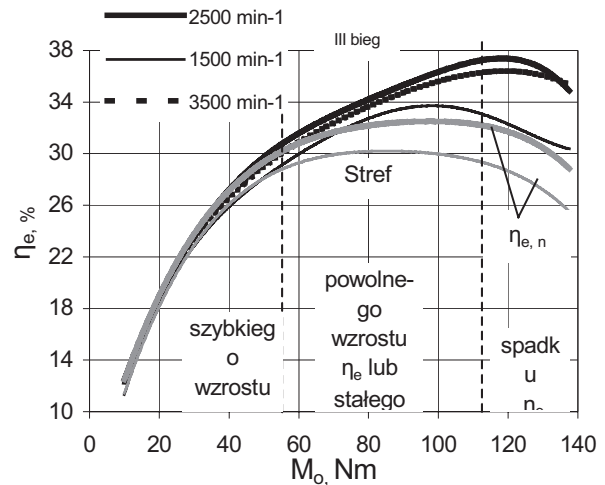
Rys. 3. Charakterystyka spadku sprawności efektywnej silnika w funkcji $(a^* \cdot v)$ na 3. biegu



Rys. 4. Przebieg spadku sprawności efektywnej silnika na poszczególnych biegach w funkcji ($a^* \cdot v$)

Obliczony w pracy w rozpatrywanym zakresie spadek sprawności efektywnej silnika ZI ze wzrostem dynamiki zmian jego prędkości obrotowej jest wynikiem w systemach Motronic adaptacyjnej regulacji wielkości wtryskiwanej dawki paliwa i kąta wyprzedzenia zapłonu. W znacznym stopniu wyjaśnia on, dlaczego oszczędna technika jazdy polega na zdecydowanym ograniczeniu mocy jednostkowej dodatkowych oporów ruchu samochodu [8]. Okazuje się, że w wyniku tego spadku sprawności efektywnej silnika na charakterystyce obciążeniowej dla mniejszej wartości momentu obrotowego na niższym poziomie wystąpi maksimum wartości η_e , co przykładowo dla pracy zespołu napędowego na III biegu pokazano na rys. 5.

Poza tym utrzymanie zalecanego niskiego poziomu mocy jednostkowej dodatkowych oporów ruchu wydłuża czas pracy w zakresie optymalnej sprawności efektywnej silnika, zmniejszając średnią prędkość przejazdu i zużycie paliwa. Otrzymane wyniki sprawności efektywnej silnika w dynamicznych warunkach pracy potwierdzają w sposób pośredni mapy emisji składników węglowych w spalinach [4].



Rys. 5. Charakterystyki obciążeniowe sprawności efektywnej silnika ZI 1,6 dla $n = 1500$ i 2500 min^{-1} w statycznych i dynamicznych ($\eta_{e,n}$) warunkach pracy na III biegu w samochodzie osobowym klasy B/K

4. WNIOSKI

- Po raz pierwszy, na przykładzie silnika ZI, wykorzystując nieznormalizowany zmienny cykl jezdny, uzyskano metodą pośrednią ilościową ocenę wpływu dynamicznych warunków pracy silnika od prędkości obrotowej na spadek sprawności efektywnej z charakterystyki uniwersalnej.
- Na podstawie otrzymanych wyników obliczeń można wstępnie oszacować wpływ dynamicznych warunków pracy silnika na jego sprawność efektywną; przebieg charakterystyk $G_{bl} = f(a^* \cdot v)$ wskazuje na podobny dla wszystkich serii pomiarów współczynnik wrażliwości czasowego zużycia paliwa na moc jednostkową dodatkowych oporów ruchu samochodu G_{η_e} w przedziale 0,015 - 0,016 $\text{cm}^3 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{W})$.
- W zakresie mocy jednostkowej dodatkowych oporów ruchu ($a^* \cdot v$) od 0 do 20 W/kg szczególnie duża dynamika zmian prędkości obrotowej silnika na pierwszych przełożeniach skutkuje znacznym spadkiem sprawności efektywnej silnika, dochodzącym: na 1. biegu do 14 % a na drugim do 8 %; dlatego powinno się unikać rozpędzania badanego samochodu na tych biegach do prędkości przekraczającej odpowiednio 20 i 35 km/h.
- Obliczony wpływ dynamicznych warunków pracy na spadek sprawności efektywnej silnika w stosunku do warunków statycznych obliczono dla wybranego zakresu zmian prędkości obrotowej jako wartość średnią Δg_e , wynikającą z podobnej wrażliwości G_{bl} na zmianę dynamiki przyspieszania samochodu na pierwszych dwóch i trzech przełożeniach skrzynki biegów.

5. Przy założeniu w systemach Motronic liniowości inercji regulacji optymalnych wielkości dawki paliwa i kąta wyprzedzenia zapłonu, za pomocą charakterystyk współczynnika dynamicznych zmian prędkości obrotowej dla poszczególnych przełożeń skrzynki biegów $v_{n,1,2,3} = f(a^* \cdot v)$ można metodą interpolacji liniowej wyznaczyć wartość spadku sprawności efektywnej silnika w funkcji v_n dla pozostałych przełożeń skrzynki biegów.

LITERATURA

- [1] Chłopek Z.: *Modelowanie procesów emisji spalin w warunkach eksploatacji trakcyjnej silników spalinowych*. Prace naukowe, Mechanika z. 173. Politechnika Warszawska, Warszawa 1999, s. 193.
- [2] Jantos J.: *Zintegrowane sterowanie samochodowym, spalinowym układem napędowym o przełożeniu zmiennym w sposób ciągły*. Studia i Monografie z. 141, Politechnika Opolska, Opole 2003.
- [3] Kropiwnicki J.: *Model układu silnik-pojazd z wykorzystaniem charakterystyk statycznych silnika*. Praca doktorska. Promotor: Cichy M. Gdańsk 2001.
- [4] Romaniszyn K.: *Alternatywne zasilanie samochodów benzyną oraz gazami LPG i CNG*. WNT, W-wa 2007.
- [5] Silva C.M. i inni: *Calculation of Fuel Consumption and Engine-Out Emissions in*

Ecogest. Instituto Superior Tecnico, Lisbon, Portugal 2001.

- [6] Siłka W.: *Energochłonność ruchu samochodu*. WNT, Warszawa 1997.
- [7] Neunzig D., Benmimoun A.: *Potentiale der voraus-schauenden Fahrerassistenz zur Reduktion des Kraft-stoffverbrauchs*. Aachener Kolloquium Fahrzeug und Motorentechnik 2002, s. 1-27.
- [8] Ubysz A.: *Optymalizacja zużycia paliwa w samochodzie osobowym w ruchu na obszarze zabudowanym*. IV Międzynarodowy Kongres Diagnostyki Technicznej, Olsztyn 9-12.09. 2008.
- [9] *MotoGraf - Instrukcja obsługi*. KER, Bytom, 2002.

Dr inż. **Aleksander UBYSZ**, od wielu lat zajmuje się prognozowaniem i optymalizacją zużycia paliwa w samochodach osobowych (1 monografia i 44 publikacje). Wydał również pięć książek z zakresu prowadzonych na Wydziale Transportu przedmiotów: *Silniki spalinowe i Ochrona środowiska w transporcie*. Ostatnie lata pracy poświęcił modelowaniu zużycia paliwa w samochodzie w ruchu rzeczywistym.

