ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2000
Seria: TRANSPORT z. 41 Nr kol. 1491

Aleksander UBYSZ

SPRAWNOŚĆ NAPĘDU SAMOCHODÓW OSOBOWYCH Z SILNIKAMI ZI W CYKLACH JEZDNYCH

Streszczenie. W artykule na podstawie obliczeń symulacyjnych przebiegowego zużycia paliwa w podstawowych testach jezdnych dla kilkudziesięciu samochodów osobowych z silnikami ZI zaprezentowano średnie wartości sprawności ogólnej silników i układu przeniesienia napędu w poszczególnych fazach pracy na poszczególnych przełożeniach.

AN EFFICIENCY OF A POWER TRANSMISSION SYSTEM OF PASSENGER CARS PROVIDED WITH SI ENGINE

Summary. In this work calculations engine total efficiency and efficiency of a power transmission system for indyvidual phases in driving cycles on the basis of fuel consumption map and assumed efficiency of transmission and loss of energy connected with clutch lost motion has been carried out.

1. WSTĘP

Jak pokazują obliczenia, przy wyznaczaniu przebiegowego zużycia paliwa decydujący wpływ na dokładność obliczeń ma właściwy dla każdego profilu prędkości dobór sprawności napędu. Jak wykazują doświadczenia, posiadanie nawet najdokładniejszych charakterystyk ogólnych silnika, wyznaczanych przecież w warunkach pracy ustalonej, i określanie na ich podstawie jego sprawności efektywnej, nie pozwala na uniknięcie błędu w obliczeniach sięgających często ±6%, a nawet i więcej [1]. Poza tym coraz więcej samochodów osobowych ma automatyczne skrzynki biegów, o narzuconych charakterystykach przełożeń całkowitych i strat mechanicznych [1, 2, 3].

Dlatego też, z myślą o tej grupie samochodów i uproszczeniu obliczeń przebiegowego zużycia paliwa, w poniższym opracowaniu scharakteryzowano średnie sprawności ogólne silników ZI i układu przeniesienia napędu samochodów osobowych oraz przedstawiono na

podstawie danych literaturowych współczynniki korekcyjne przebiegowego zużycia paliwa wynikające z zastosowania w samochodach wybranych energooszczędnych rozwiązań [2, 3].

2. METODYKA OKREŚLANIA SPRAWNOŚCI DLA POSZCZEGÓLNYCH FAZ CYKLI JEZDNYCH I WYNIKI OBLICZEŃ

2.1. Określenie sprawności ogólnej silnika

Na sprawność napędu składa się iloczyn średniej sprawności ogólnej silnika (w warunkach pracy nieustalonej - tzw. quasi-stacjonarnych) i sprawności układu przeniesienia napędu [4]. Dla faz cykli jezdnych o stałych profilach prędkości sprawność rozgrzanego silnika odpowiada ściśle określonemu punktowi charakterystyki ogólnej i jego określenie nie nastręcza większych trudności.

Z braku danych literaturowych charakterystyk uniwersalnych (przestrzennych - trzeci sto-pień swobody w postaci gradientu warunków nieustalonych) przy rozpędzaniu założono sprawności z charakterystyki ogólnej silnika dla średniej kwadratów prędkości warunków brzegowych. Popełniany przy takim uproszczeniu błąd w stosunku do stosowanej metody iteracji [5] jest niewielki, gdyż dla przedziału prędkości 70-100 km/h nie przekracza 0,55% [6].

Najogólniej sprawność silnika pracującego w obu cyklach jezdnych normy 93/116/CE opisują wskaźniki, często powoływanego w literaturze [6, 7, 8] punktu pracy charakterystyki ogólnej silnika, odpowiadające parametrom p_e = 2 bary i n = 2000 min^{-1}. Z wielu proponowanych punktów ten najbardziej oddaje wartość średnią obciążenia silnika dla obu cykli jezdnych z tym, że dla cyklu jazdy miejskiej nieznacznie przekracza wartość średnią punktu pracy, a dla cyklu drogowego jest nieco poniżej. Jednak określanie jednostkowego zużycia paliwa (sprawności) silnika dla tego punktu ma wyłącznie znaczenie porównawcze (orientacyjne) co do jego efektywności pracy [7], natomiast do obliczeń należałoby mieć bardziej dokładne wartości. W pracy tej dla 33 przypadkowo wybranych samochodów osobowych z silnikami ZI określono z charakterystyk ogólnych sprawność silników ZI z regulacją ilościową (30) i regulacją jakościową - ZI GDI (3). Dane opracowano w formie charakterystyk sprawności dla poszczególnych faz obu cykli jezdnych w funkcji dynamiki samochodu, wyrażonej czasem jego rozpędzania do 100 km/h.

W tabeli 1 i 2 scharakteryzowano średnie wartości jednostkowego zużycia paliwa 22 silników ZI (skrajne wyniki obliczeń odrzucono), a na rys. 1 przedstawiono jedną z

charakterystyk. Z ich analizy wynika, że cechuje je brak wpływu dynamiki samochodu na g_e, a także znaczny rozrzut punktów pomiarowych od wartości średniej, wyrażony słabym współczynnikiem korelacji. Pomocne przy wyborze odpowiedniego przedziału g_e i sprawności silnika byłoby opisane wcześniej jednostkowe zużycie paliwa dla parametrów n = 2000 min^{-1} i p_e = 2,0 bary (rys. 2).

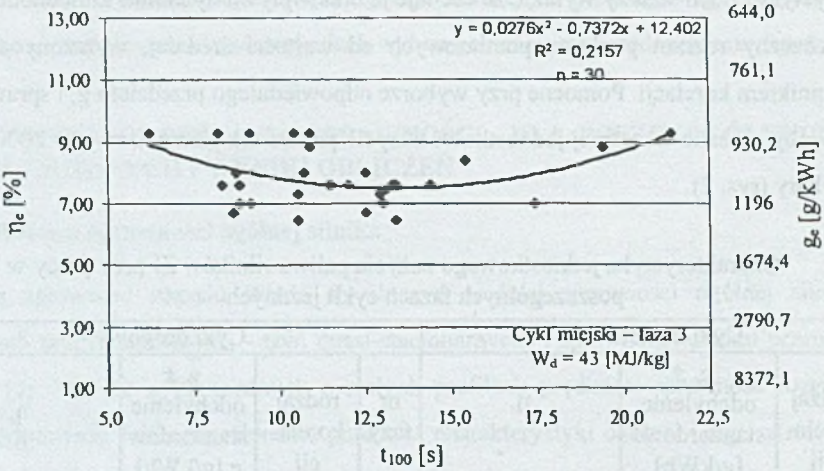
Tabela 1

Charakterystyka jednostkowego zużycia paliwa silników ZI przy pracy w poszczególnych fazach cykli jezdnych

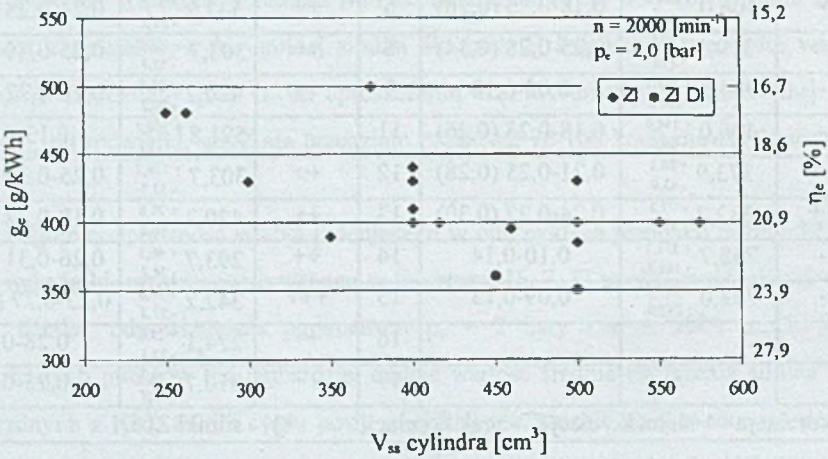
Cykl miejski				Cykl drogowy			
nr fazy	rodzaj korela-cji	$\bar{g}_e \pm$ odchylenie standardowe [g/kWh]	η_e	nr fazy	rodzaj korela-cji	$\bar{g}_e \pm$ odchylenie standardowe [g/kWh]	η_e
2	+	$369{,}8^{+80{,}2}_{-44{,}8}$	0,21-0,25 (0,30)*	2	-	$406{,}0^{+144{,}0}_{-66{,}0}$	0,018-0,23 (0,26)
3	++	$1082{,}5^{+217{,}5}_{-182{,}5}$	0,07-0,09	4	++	$373{,}9^{+86{,}1}_{-43{,}9}$	0,20-0,25 (0,28)
7	-	$406{,}0^{+144{,}0}_{-66{,}0}$	0,18-0,23 (0,26)	6	++	$332{,}2^{+97{,}8}_{-38{,}2}$	0,24-0,28 (0,30)
9	++	$319{,}1^{+40{,}9}_{-34{,}1}$	0,25-0,28 (0,34)	8	++	$303{,}7^{+126{,}7}_{-33{,}7}$	0,25-0,30 (0,31)
10	-	$934{,}3^{+265{,}7}_{-284{,}3}$	0,08-0,10	9	++	$420{,}2^{+79{,}8}_{-90{,}2}$	0,18-0,22 (0,24)
14	-	$406{,}0^{+144{,}0}_{-66{,}0}$	0,18-0,23 (0,26)	11	-	$591{,}8^{+308{,}2}_{-151{,}8}$	0,13-0,18
16	++	$373{,}9^{+86{,}1}_{-43{,}9}$	0,21-0,25 (0,28)	12	++	$303{,}7^{+126{,}7}_{-33{,}7}$	0,25-0,30 (0,31)
18	++	$332{,}2^{+97{,}8}_{-38{,}2}$	0,24-0,27 (0,30)	13	++	$420{,}2^{+79{,}8}_{-90{,}2}$	0,18-0,22 (0,24)
19	-	$738{,}7^{+361{,}3}_{-188{,}7}$	0,10-0,14	14	++	$293{,}7^{+46{,}3}_{-36{,}7}$	0,26-0,31 (0,32)
21	-	$793{,}0^{+307{,}0}_{-243{,}0}$	0,09-0,13	15	+++	$342{,}2^{+87{,}8}_{-57{,}2}$	0,23-0,27 (0,275)
				16	++	$274{,}1^{+25{,}9}_{-27{,}1}$	0,28-0,33
				17	++	$310{,}7^{+44{,}3}_{-40{,}7}$	0,25-0,29
++ silna korelacja + słaba korelacja - brak korelacji ()* - silniki ZI-DI							

Zestawiając otrzymane wyniki sprawności silników ZI przy pracy w cyklach jezdnych przy rozpędzaniu i stałej prędkości jazdy z wynikami sprzed 22 lat [9], zauważymy znaczny postęp w ekonomiczności ich pracy, szczególnie w zakresie wyższych prędkości jazdy, dochodzący do 13-17% (rys.3). Jest to efekt doskonalenia na przestrzeni ostatnich 20 lat konstrukcji poszczególnych zespołów silnika, jak i samochodu jako całości.

Sprawność ogólna silników ZI GDI jest dla niskich obciążeń porównywalna z analogiczną sprawnością silników ZS DI [7], co potwierdziły obliczenia przebiegowego zużycia trzech samochodów [1]. Jest to zasługa istotnego zmniejszenia pracy ujemnej pętli wymiany ładunku dzięki zastąpieniu regulacji ilościowej składu mieszanki w funkcji obciążenia,

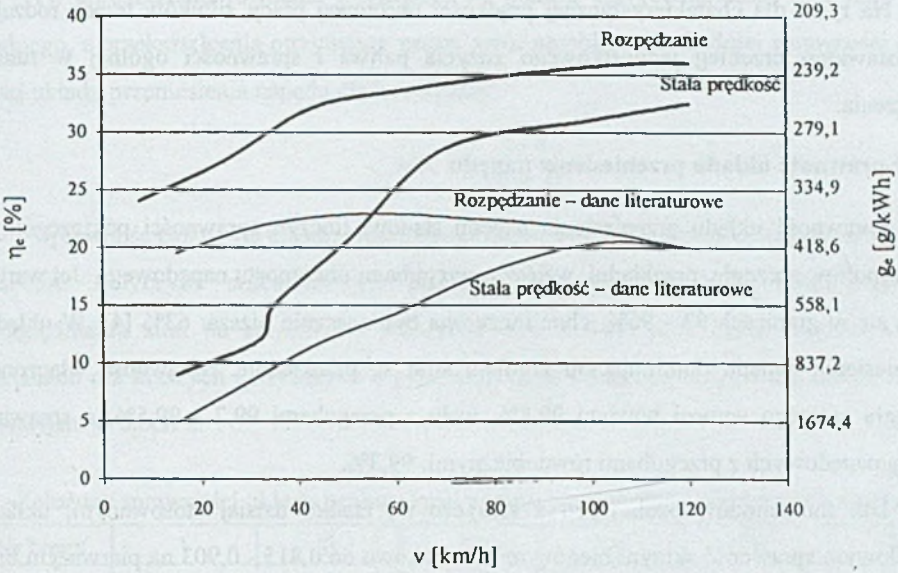


Rys. 1. Zależność g_e i η_e od czasu rozpędzania pojazdu t_{100} dla fazy 3 cyklu miejskiego
Fig. 1. The value of g_e and η_e vs. time acceleration up to 100 km/h for 3rd phase of urban driving cycle



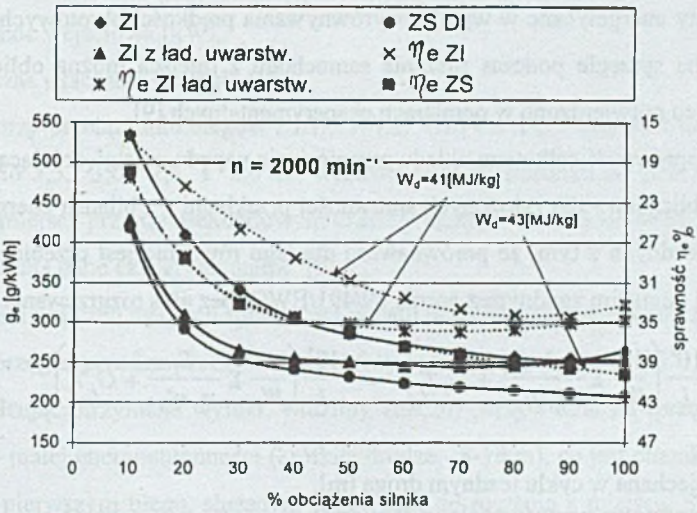
Rys. 2. Charakterystyczne jednostkowe zużycie paliwa g_e i sprawność ogólna η_e silników ZI przy n = 2000 min^{-1} i p_e = 2,0 bara
Fig. 2. The specific fuel consumption and the engine total efficiency of SI engines for n = 2000 min^{-1} and p_e = 2,0 bars

regulacją jakościową, tak jak w silnikach ZS. W ten sposób można zmniejszyć zużycie paliwa w cykłach jezdnych nawet do 30%. Dalsze możliwości podniesienia ekonomiczności silnika w tym zakresie obciążeń tkwią w wysokim doładowaniu silnika ZI małej pojemności skokowej i zastosowaniu zmiennego stopnia sprężania ε w zakresie 14 do 8, przy czym ta wyższa wartość będzie stosowana w zakresie niskich obciążeń [10]. Relacje pomiędzy teoretycznymi



Rys. 3. Porównanie η_e i g_e silników ZI samochodów osobowych obecnych i sprzed 17 lat [21] w testach jezdnych

Fig. 3. The comparision values of g_e and η_e of SI engines which are used nowadays to values of g_e and η_e of SI engines which were used 17 years ago



Rys. 4. Orientacyjna zależność g_e i η_e od stopnia obciążenia silnika przy stałym $n = 2000\ min^{-1}$ dla silników samochodów osobowych

Fig. 4. The approximate values of g_e und η_e vs. degree of engine load for $n = 2000\ min^{-1}$

sprawnościami obu grup silników pozwalają oczekiwać, że w zakresie niskich obciążeń silniki ZI będą miały wyższą sprawność od silników ZS DI. Silniki takie są opracowane przez VW i koncern SAAB [11].

Na rys.4 dla charakterystycznej prędkości obrotowej pracy silników trzech rodzajów przedstawiono przebieg jednostkowego zużycia paliwa i sprawności ogólnej w funkcji obciążenia.

2.2. Sprawność układu przeniesienia napędu

Sprawność układu przeniesienia napędu stanowi iloczyn sprawności poszczególnych podzespołów: sprzęgła, przekładni, wałów z przegubami oraz mostu napędowego. Jej wartość waha się w granicach 93 - 96%, choć może ona być znacznie niższa: 63% [4]. W układzie przeniesienia napędu dominującym źródłem strat są przekładnie. Sprawność włączonego sprzęgła ciernego wynosi bowiem 99,8%, wału z przegubami 99,2 - 99,5%, a sprawność półosi napędowych z przegubami równobieżnymi: 99,3%.

Dla samochodów osobowych z klasycznym, rzadko dzisiaj stosowanym, układem napędowym sprawność skrzyni biegów rośnie skokowo od 0,815 - 0,903 na pierwszym biegu do 0,970 - 0,981 na biegu bezpośrednim, z tendencją wzrostu dla wyższych przyspieszeń i niższych prędkości obrotowych silnika [4].

Podczas ruszania samochodu z miejsca oraz podczas zmiany biegów występują dodatkowe straty energetyczne w wyniku wyrównywania prędkości obrotowych na sprzęgle. Wartość strat na sprzęgle podczas ruszania samochodu z miejsca można obliczyć wg M. Mitschke [12], co potwierdzono w pomiarach eksperymentalnych [9].

W pracy sprawność całkowitą układu przeniesienia napędu, uwzględniającą straty tarcia na sprzęgle, obliczono - dla założonych sprawności przekładni - z bilansu energochłonności dla obu cykli jezdnych z tym, że porównawcze dla tego równania jest przebiegowe zużycie paliwa w cyklu miejskim zgodnym z normą 89/491/EWG (bez 40 s rozgrzewania się silnika):

$$\frac{10^5}{L}\left(\frac{1}{W_d}\Sigma\frac{E_i+Q_{is}}{\eta_{ei}\,\eta_{pi}}+G_j T_j\right) = \frac{10^5}{L}\left(\frac{1}{W_d}\Sigma\frac{E_i}{\eta_e\,\eta^c_{pi}}+G_j T_j\right) \qquad (1)$$

gdzie: L - przejechana w cyklu jezdnym droga [m],
W_d - objętościowa wartość opałowa [MJ/dm^3],
E_i - energochłonność i-tej fazy przejechanej drogi z napędem [MJ],
Q_{is} - straty tarcia na sprzęgle dla poszczególnych przełożeń [MJ],
η_{ei} - średnia sprawność ogólna silnika dla i-tej fazy cyklu,
η_{pi} - średnia sprawność układu przeniesienia napędu dla i-tej fazy cyklu,
η^c_{pi} - średnia całkowita sprawność układu przeniesienia napędu w i-tej fazie cyklu,
G_j - godzinowe zużycie paliwa na biegu jałowym [dm^3/h],
T_j - czas pracy silnika na biegu luzem w cyklu jezdnym [h].

Po uproszczeniu równania i przejściu do bilansu energochłonności i-tej fazy cyklu jezdnego, z przekształcenia otrzymamy prosty wzór na obliczenie średniej sprawności całkowitej układu przeniesienia napędu dla każdej fazy:

$$\eta^{c}_{pi} = \frac{\eta_{pi} E_i}{E_i + Q_{si}} \tag{2}$$

Sprawność całkowitą układu przeniesienia napędu obliczono przy pewnych założeniach. Pierwsze dotyczyło szacunkowego założenia sprawności układu napędowego bez uwzględniania strat na sprzęgle w przedziale 0,92 - 0,96, przy czym wyższe wartości zakładano dla niższych („szybszych") przełożeń, czyli wyższych biegów, zgodnie z danymi zawartymi w tabeli 2.

Tabela 2

Założone sprawności układu przeniesienia napędu nie uwzględniające strat na sprzęgle

Nr biegu	I	II	III	IV	V	VI
η_p	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,96

Straty na sprzęgle przy ruszaniu z miejsca obliczono z równania [9]:

$$Q_s = 0{,}5\, P_c\, T \ [\mathrm{kJ}] \tag{3}$$

gdzie: P_c - moc wejściowa [kW],

T - czas włączania sprzęgła [s],

natomiast przy przełączaniu biegów z I/II, II/III, III/IV i IV/V wartości strat założono stałe odpowiednio 3,5, 3,0, 2,5 i 2,0 kJ. Wartości te są w stosunku do strat na sprzęgle przy ruszaniu z miejsca przy dwusekundowym czasie włączania (6 - 13 kJ) w rozsądnej proporcji, co potwierdzają dane eksperymentalne [9].

Wyniki obliczeń średnich sprawności układu przeniesienia napędu, uwzględniające straty na sprzęgle, przedstawiono dla każdej fazy cykli jezdnych w tabeli 3.

Analizując otrzymane wyniki, widzimy znaczny wpływ strat na sprzęgle dla faz cykli jezdnych o małej energochłonności (krótkiej drodze - 8-10 m), co jest charakterystyczne przy jeździe na pierwszym biegu, służącym w zasadzie do ruszania z miejsca. Straty na sprzęgle obniżają sprawność układu przeniesienia napędu o 23-30%.Natomiast w fazach cykli jezdnych o znacznie dłuższej przejechanej drodze (np. 217 m dla fazy 8 i 12 cyklu drogowego) wpływ strat na sprzęgle wynoszący 2,5 kJ obniża η_p zaledwie o 1%.

Tabela 3

Średnia sprawność układu przeniesienia napędu uwzględniająca straty na sprzęgle przy przełączaniu biegów dla poszczególnych faz cykli jezdnych

Cykl miejski		Cykl poza miejski	
Nr fazy	η_p	Nr fazy	η_p
2	$0{,}66^{+0{,}054}_{-0{,}051}$	2	$0{,}70^{+0{,}049}_{-0{,}046}$
3	0,93	4	$0{,}92_{-0{,}010}$
7	$0{,}70^{+0{,}049}_{-0{,}046}$	6	$0{,}92^{+0{,}007}$
9	$0{,}91^{+0{,}004}_{-0{,}010}$	8	$0{,}94^{+0{,}005}$
10	0,94	9	$0{,}96_{-0{,}004}$
14	$0{,}70^{+0{,}049}_{-0{,}046}$	11	0,95
16	$0{,}92_{-0{,}010}$	12	0,95
18	$0{,}92^{+0{,}007}$	13	$0{,}96_{-0{,}004}$
19	0,95	14	0,96
21	0,94	15	0,96
		16	0,96
		17	0,96

Iloczyn obu opisanych i obliczonych przy pewnych założeniach sprawności daje sprawność napędu. Przy stałych prędkościach przyjmuje ona niewielkie wartości w granicach 0,08 - 0,14, co znacznie powiększa energochłonność ruchu pojazdu, a tym samym i zużycie paliwa. Jednak największy błąd można popełnić przy założeniu sprawności napędu, a dokładniej silnika przy jego pracy w warunkach nieustalonych (rozpędzania samochodu). Jak wykazały obliczenia przebiegowego zużycia paliwa dla 10 samochodów osobowych z rozpatrywanej w pracy [13] grupy pojazdów, błąd obliczeń jest porównywalny z błędem, jaki popełnić można przy stosowaniu metody charakterystyki ogólnej. Bardziej miarodajne oszacowanie błędu można uzyskać przy zastosowaniu tej metody dla samochodów spoza grupy, na podstawie której określano średnią sprawność napędu.

Przedstawiony w tym opracowaniu materiał ma za zadanie w jakimś stopniu przybliżyć te zagadnienia i pomóc w doborze obu sprawności, składających się na sprawność napędu, ale tylko dla samochodów z silnikami ZI.

3. ROZWIĄZANIA WPŁYWAJĄCE NA OSZCZĘDNOŚĆ W ZUŻYCIU PALIWA

W ostatnich latach trwają intensywne prace nad zmniejszeniem zużycia paliwa przez pojazdy. Największe możliwości daje zmniejszenie masy samochodu, ale zdecydowane dzia-

łanie w tym kierunku związane jest z obniżeniem komfortu jazdy [2] lub - w wyniku stosowania specjalnych materiałów i technologii - znaczny wzrost kosztów samochodu. Bardziej racjonalnym działaniem jest podnoszenie sprawności układu napędowego, a szczególnie silników. Małe silniki mają w tym względzie duży potencjał, dochodzący do 40 - 55%. Szczegółowy opis takich rozwiązań i szacunkowe obliczenia na ile obniżają zużycie paliwa w stosunku do rozwiązań bazowych (konwencjonalnych) można znaleźć w literaturze fachowej [2, 3, 15, 16]. Jest to zagadnienie na tyle obszerne, że celowe jest poświęcić mu oddzielne opracowanie.

Jeśli chodzi o paliwooszczędne rozwiązania samochodów z silnikami ZI, szczególnie efektywne są działania zwiększające sprawność ogólną silników (zwłaszcza w zakresie niskich obciążeń) poprzez ich „oddławienie" dzięki zmiennym fazom rozrządu i spalaniu mieszanek biednych (GDI - regulacja jakościowa mieszanki), zastosowanie mniejszych, wysokodoładowanych jednostek o zmiennym stopniu sprężania, sekwencyjnemu wyłączaniu cylindrów i agregatów (alternator, wspomaganie, układ chłodzenia) i obniżonemu tarciu mechanicznemu i powietrza (duży potencjał w części dolnej pojazdu) i in.

4. WNIOSKI KOŃCOWE

Przedstawiony w opracowaniu materiał pozwala na wyciągnięcie następujących wniosków:

1. W przybliżony sposób sprawność ogólną silnika dla obu cykli jezdnych można wyrazić za pomocą sprawności odpowiadającej punktowi pracy jego charakterystyki ogólnej $n = 2000\ min^{-1}$ i $p_e = 2{,}0$ bara, której wartość dla współczesnych silników ZI mieści się w szerokim przedziale 16,5 - 24 % (350 - 500 g/kWh).
2. Sprawność efektywna współczesnych silników ZI w obu testach jezdnych podlega w zależności od rodzaju fazy cyklu i regulacji silnika silnym zmianom, w przedziale 7 do 37% co odpowiada jednostkowemu zużyciu paliwa przez silnik od 1100 do 226 g/kWh.
3. Uwzględnienie przy określonych założeniach upraszających strat na sprzęgle (przy przełączeniu biegów i ruszaniu z miejsca) znacznie obniża sprawność układu przeniesienia napędu dla faz cykli przy jeździe na biegu pierwszym (23 - 32%), natomiast nieznacznie na biegach wyższych (1- 3%).

Literatura

1. Ubysz A.: Ocena przebiegowego zużycia paliwa samochodów osobowych wyznaczanego metodą analityczną. PAN Oddział w Krakowie, Teka Komisji Naukowo-Problemowej Motoryzacji, Konstrukcja, badania eksploatacja, technologia pojazdów i silników spalinowych, z. 20, Kraków 2000, s. 203-210.
2. Fraidl G. i in.: Fahrzeugklassen- spezifische Ottomotorkonzepte. MTZ nr 10'1999, s.692-698.
3. Quarg J., Warnecke W.: Das verbrauchsminimierte Automobil - Potential und Probleme. ATZ nr 10'1996, s. 500 - 506.
4. Siłka W.: Energochłonność ruchu samochodu.WNT, Warszawa 1997.
5. Spessert B.: Gerauschreduktion von Viertakt - Diesel - und Ottomotoren - Ruckblick und Stand der Technik. MTZ nr 9'1999, s. 612 - 625.
6. Wolfle M. i in.: Die neue Motorenbaureihe von Ford fur den Einsatz in Schwellenlander. MTZ nr 12'1999, s. 854 - 865.
7. Kluting M. i in.: Drosselfreie Laststeuerung mit vollvarieblen Ventiltriben. MTZ nr 7 i 8'1999, s. 476 - 484.
8. Kemmann H.: Der neue Motor mit 1,8 l Hubraum fur den Opel Astra. MTZ nr 4'1998, s. 224 - 235.
9. Rudolph M.: Uberlegungen zur Methodik des energetischen Vergleichs von Strasenfahrzeugen. ATZ nr 11'1978, s. 531 - 535.
10. Materiały FEV Motorentechnik. Seminarium naukowe na temat współczesnych silników samochodowych. Kraków, 8 maj 1999.
11. Łęgiewicz J., Szelichowski S.: Nowości na 70. Salonie Genewskim. AUTO Technika Motoryzacyjna. Nr 4 2000, s. 2 - 5.
12. Mitschke M.: Dynamika samochodu. Napęd i hamowanie. WKŁ, Warszawa 1987.
13. Ubysz A.: Ocena przebiegowego zużycia paliwa samochodów osobowych z silnikami ZI wyznaczanego metodą analityczną. Zeszyty Naukowe Pol. Śl. ser. Transport, z. 39 (w druku).
14. Pilawski K.: Ocena analitycznej metody obliczeń zużycia paliwa samochodów osobowych z silnikami ZI. Praca dyplomowa Pol. Śl. Instytut Transportu, Katowice 2000.
15. Rovera G., Folonari C. : Technologies for the vehicle of the future. Sympozjum naukowe PTPE, Warszawa, grudzień 1999.
16. Merkisz J.: Ekologiczne problemy silników spalinowych. T.1 i 2. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1999.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Wojciech Siłka

Abstract

In this work calculations engine total efficiency and efficiency of a power transmission system for indyvidual phases in driving cycles on the basis of fuel consumption map and assumed efficiency of transmission and loss of energy connected with clutch lost motion has been carried out. Received data make possible to calculate a route fuel consuption in cars provided with automatic gearbox or when values of transmission ratios are unknown.