

Aleksander UBYSZ

## CHARAKTERYSTYKA SILNIKÓW WSPÓŁCZESNYCH SAMOCHODÓW OSOBOWYCH POD WZGLĘDEM JEDNOSTKOWEGO ZUŻYCIA PALIWA $g_e$

**Streszczenie.** W opracowaniu przedstawiono charakterystykę silników 10 klas samochodów osobowych pod względem jednostkowego zużycia paliwa przez silnik  $g_e$ . Obliczone na podstawie danych katalogowych wartości tych wskaźników przy stałej prędkości jazdy 90 i 120 km/h dają pojęcie o poziomie wykorzystania potencjału sprawności ogólnej, zawartego w jednostce napędowej samochodu przy jeździe na równej i suchej jezdni zgodnie z wymogami obowiązującego w Europie testu (ECE).

## CHARACTERIZATION OF MOTOR-CAR ENGINES BASED CONSUMPTION MAP

**Summary.** There has been an attempt to verify in this paper the car fuel consumption data taking into account analytic connections between mileage fuel consumption and probable specific fuel consumption  $g_e$  by engine at constant speed.

### 1. WSTĘP

Jednym z ważniejszych wskaźników oceny stopnia wykorzystania efektywnej pracy silnika w samochodzie może być łatwa do wyliczenia różnica pomiędzy wartością eksploatacyjną jednostkowego zużycia paliwa przez silnik, obliczoną przy jeździe samochodu ze stałą prędkością 90 i 120 km/h, a jego minimalną wartością -  $g_{emin}$  [1, 12]. Podstawy teoretyczne tych obliczeń przedstawiono w pracy [9]. Analiza potencjału wzrostu trakcyjnej sprawności silników samochodów osobowych jest celowa na tyle, na ile w samochodach ciężarowych o dużej masie całkowitej już osiągnięto zrównanie się tych dwu wielkości przy ich jeździe z każdą praktycznie prędkością [2], co znacznie poprawiło sprawność energetyczną „ciężkiego” transportu drogowego, doprowadzając jednostkowe zużycie paliwa przez pojazd do najniższej z możliwych w transporcie drogowym wartości - 0,8-1,0  $dm^3/100km/Mg$  [3]. Osiągnięcie takiego rezultatu jest przy dotychczasowym poziomie techniki w samochodach osobowych mało prawdopodobne, ale należy do niego dążyć wszelkimi możliwymi metodami.

### 2. ZAŁOŻENIA TEORETYCZNE

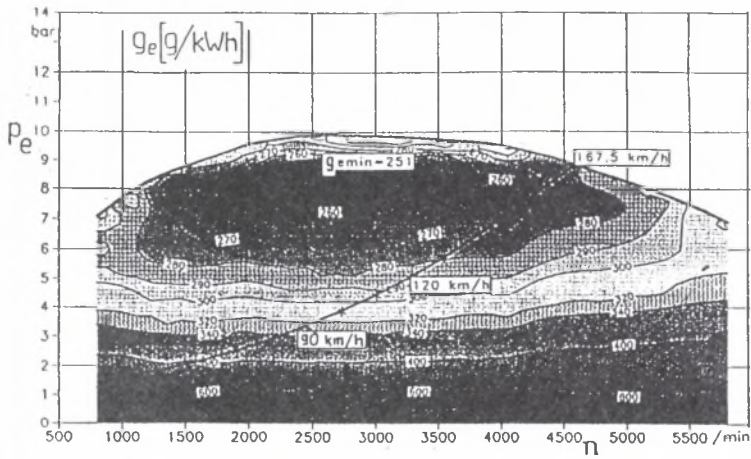
#### 2.1. Charakterystyki trakcyjne pojazdu

W teorii ruchu znane są wykresy trakcyjne samochodów, przedstawiające dla każdego przełożenia skrzynki biegów wymaganą siłę na kołach w funkcji prędkości jazdy  $V$ . Maksy-

malna wartość siły na kołach ograniczona jest dla każdego wykresu charakterystyką przebiegu maksymalnego momentu obrotowego silnika, przeliczonego na siłę napędową na kołach. Na rys.1 przedstawiono wykres trakcyjny VW Golfa CL z silnikiem ZI o 1,6 dm<sup>3</sup> pojemności skokowej przy jeździe na 5 biegu. Na wykresie naniesione są warstwy stałego jednostkowego zużycia paliwa przez silnik  $g_e$ , dzięki którym można śledzić, przy jakiej prędkości na danym biegu silnik pracuje z największą sprawnością ogólną, czyli najniższym  $g_e$  [1, 13]. Na rys.1 widoczne jest, że dla samochodów klas niższych z zespołem napędowym o niewysokiej, wyrażonej czasem rozpędzania pojazdu do 100 km/h [5], dynamice (14s) najniższe  $g_e$  występuje na charakterystyce obciążenia przy prędkości 120-150 km/h. Jak wykazała analiza analogicznych wykresów dla innych samochodów, stała prędkość jazdy, przy której osiągane jest najniższe jednostkowe zużycie paliwa, mieści się w ogromnej większości przypadków w przedziale 100-180 km/h, z tym że dla samochodów o wysokiej dynamice układu napędowego ( np. klasa sportowa - F) najniższe  $g_e$  występuje przeważnie przy wyższych prędkościach. W wyjątkowych przypadkach przy niewłaściwym doborze przełożeń układu przeniesienia napędu prędkość minimalnego jednostkowego zużycia paliwa może wystąpić przy niższej wartości niż 100, a nawet 90 km/h, co sprawia, że przy wyższych prędkościach jazda takim samochodem jest wyjątkowo nieekonomiczna ze względu na rosnące opory aerodynamiczne i spadek sprawności ogólnej silnika napędowego (np. Polonez 1,9D).

W analizowanych przykładach wykresów trakcyjnych charakterystyki obciążenia na najwyższym (ekonomicznym) biegu przechodzą w znacznej odległości od pola  $g_{emin}$ , tj. zakresu, w którym silnik pracuje z najwyższą sprawnością ogólną [12, 13]. Znając  $g_{emin}$ , a tym samym i sprawność ogólną współczesnych silników samochodów osobowych, można obliczyć, jak średnie wartości jednostkowego zużycia paliwa silnika przy jeździe ze stałą prędkością 90 i 120 km/h odbiegają od wartości minimalnych. W ten sposób określono w tych konkretnych warunkach jazdy potencjał ewentualnego zwiększenia eksploatacyjnej sprawności ogólnej silników przez obniżenie  $g_e$ .

Wiedząc, że na wartość jednostkowego zużycia paliwa decydujący wpływ ma dynamika zespołu napędowego i położenie warstw na charakterystyce ogólnej silnika [12], można będzie wyciągnąć odpowiednie wnioski co do kierunku działań. Przy analizie danych należy pamiętać, że czas rozpędzania pojazdu do 100 km/h ( $t_{100}$ ) oddaje również wpływ doboru przełożeń układu przeniesienia napędu i częściowo oporów aerodynamicznych pojazdu.



Rys.1. Charakterystyka ogólna silnika ZI VW 1,6 z charakterystyką obciążeniową samochodu Golf CL1,6 przy jeździe na 5 biegu

Fig. 1. Consumption map SI engine for the VW Golf

## 2.2. Metodyka otrzymywania wyników i określania błędu obliczeń

Jak powszechnie wiadomo, zużycie paliwa przy jeździe pojazdu ze stałą prędkością po poziomej jezdni można wyliczyć ze wzoru [4]:

$$Q = \frac{g_e (mgf + 0,047 A c_x V^2)}{36000 \gamma \eta_m} [dm^3 / 100km], \quad (1)$$

gdzie:  $Q$  - drogowe zużycie paliwa przez samochód jadący ze stałą prędkością,

np. 90 lub 120 km/h [ $dm^3/100km$ ],

$g_e$  - jednostkowe zużycie paliwa przez silnik [g/kWh],

$m$  - masa badawcza pojazdu (masa własna i połowa dopuszczalnej ładowności) [kg],

$g$  - przyspieszenie ziemskie wynoszące 9,81 [ $m/s^2$ ],

$f$  - współczynnik oporów toczenia,

$A$  - powierzchnia czołowa pojazdu [ $m^2$ ],

$V$  - prędkość pojazdu [km/h],

$\gamma$  - gęstość paliwa [ $kg/dm^3$ ],

$\eta_m$  - sprawność mechaniczna układu napędowego.

Po prostym przekształceniu można wyliczyć:

$$g_e = \frac{Q 36000 \gamma \eta_m}{(mgf + 0,047 A c_x V^2)} [g / kWh] \quad (2)$$

Natomiast sprawność ogólną silników można wyliczyć z prostej zależności:

$\eta_0 = 3600/g_e W_d$ , gdzie  $W_d$  jest wartością opałową paliwa [MJ/kg].

Z powodu braku dokładnych danych przy obliczaniu  $g_e$  dla około 1000 samochodów niektóre współczynniki należy przyjąć jako średnie wartości stałe dla całej grupy samochodów, jak np. sprawność mechaniczną czy współczynnik oporów toczenia ( $f = 0,015$ ) [12], a inne uzależnić od klasy samochodu. Prawdopodobieństwo i wielkość niedokładnego oszacowania współczynników określono za pomocą względnej odchyłki rozpatrywanej wielkości (tabela 2). W niektórych przypadkach, jak dla współczynnika wypełnienia prostokąta czołowego obrysem rzeczywistym samochodu  $h$  czy współczynnika oporów aerodynamicznych  $c_x$ , dane aktualizowano odpowiednio metodą planimetrii lub przeglądu danych literaturowych [8, 9]. Na podstawie otrzymanych informacji przyjęto dla każdej z klas samochodów następujące dane podane w tabeli 1.

Tabela 1

Założone do obliczeń wartości współczynników nie podanych w danych katalogowych

Klasa Współcz	A	B	C	D	E	F	G	H	K	M.
$h$ [-]	0,83	0,83	0,85	0,86	0,86	0,78	0,85	0,80	0,80	0,85
$c_x$ [-]	0,34	0,33	0,31	0,30	0,32	0,27	0,43	0,33	0,33	0,34
$\eta_m$ [-]	0,92	0,92	0,91	0,92	0,92	0,91	0,90	0,91	0,91	0,91

Obliczone tą metodą wielkości jednostkowego zużycia paliwa i sprawności ogólnej silnika są obarczone pewnym błędem wynikającym z błędów, jaki dopuszcza się przy szacowaniu wartości lub dokładności pomiaru kolejnych składowych wchodzących do obu wzorów. Założone do obliczeń metodą Gaussa (najmniejszych kwadratów) kolejne odchyłki błędów poszczególnych współczynników dla każdej z klas oszacowano orientacyjnie (A,  $c_x$ ). Największe trudności sprawiało w miarę dokładne określenie powierzchni czołowej samochodu oraz jego współczynnika oporów aerodynamicznych  $c_x$  i dlatego też dopuszczalny maksymalny błąd pomiaru tych wielkości ustalono dla poszczególnych klas na poziomie 7-10%. Dopuszczalną odchyłkę dokładności oceny poszczególnych wartości wchodzących do wzoru (2) i (3) przedstawia tabela 2.

Tabela 2

Względne wartości odchyłek błędu poszczególnych wielkości

Wskaź	Q	$\gamma$	$\eta_m$	m.	g	f	A	$c_x$	V	$W_d$
błąd %	2	2	2	3	0	2	7-10	7-10	2	3

### 3. CHARAKTERYSTYKA JEDNOSTKOWEGO ZUŻYCIA PALIWA SILNIKÓW POSZCZEGÓLNYCH KLAS SAMOCHODÓW

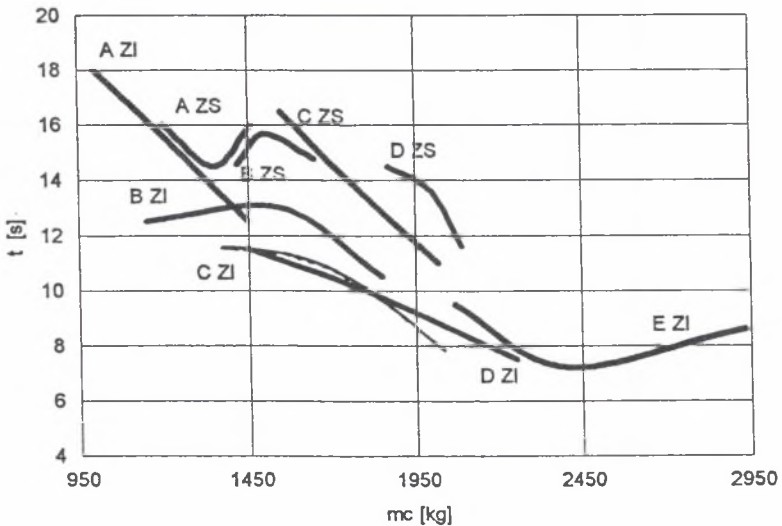
Dynamikę napędu poszczególnych klas samochodów osobowych jako jeden z dwu wcześniej wspomnianych najważniejszych czynników wpływających na eksploatacyjną wartość jednostkowego zużycia paliwa przez silnik przy jeździe ze stałą prędkością najlepiej wyraża czas rozpędzania samochodu do 100 km/h -  $t_{100}$  (rys.2). Parametr ten jest o tyle praktyczniejszy od wcześniej [4] prezentowanego wskaźnika momentu na jednostkę masy całkowitej pojazdu, że ukazuje sumaryczny i końcowy efekt wpływu na dynamikę pojazdu różnych wielkości, uwzględniając poza momentem obrotowym silnika dobór przełożeń układu przeniesienia napędu i w jakimś stopniu opory aerodynamiczne pojazdu. Pomimo to porównanie średnich wartości dynamiki napędu poszczególnych klas samochodów osobowych za pomocą obu wskaźników wykazuje dużą zbieżność wzajemnego położenia charakterystyk [4, 5].

Jak wynika z wykresów na rys.2, klasy konwencjonalnych samochodów osobowych (A, B, C, D i E) charakteryzują się ze wzrostem masy całkowitej coraz niższym czasem rozpędzania pojazdu, a więc coraz wyższą dynamiką napędu, co szczególnie dobrze widoczne jest dla napędu silnikami ZI. Dynamika napędu klas niekonwencjonalnych jest, jak wynika z wykresów, znacznie zróżnicowana i charakterystyczna dla każdej klasy z osobna (mało dynamiczne w swoim przedziale masy całkowitej samochody terenowe - G i minivany M. oraz najbardziej dynamiczna klasa sportowa - F).

Wszystkie klasy z silnikami ZI, z wyjątkiem minivanów, charakteryzują się ze wzrostem masy całkowitej mniejszym lub większym wzrostem dynamiki zespołu napędowego (spadek  $t_{100}$ ), co nie jest już tak oczywiste przy napędzie silnikami ZS (klasa A, B i M.).

Z dynamiką napędu poszczególnych pojazdów związana jest też ważna prawidłowość, a mianowicie z jej wzrostem rośnie prędkość maksymalna samochodu i prędkość, przy której na wykresie trakcyjnym charakterystyka obciążeniowa na danym (najwyższym) biegu przebiega przez warstwicę o najniższym  $g_e$ . Na przykładowo przedstawionym na rys. 1 wykresie trakcyjnym silnik Forda Escorta 1,3 pracuje na najoszczędniejszej warstwiczy przy prędkości

110 km/h. Najczęściej przy w miarę prawidłowo dobranych przełożeniach układu przeniesienia napędu w tym zakresie prędkości minimalne  $g_e$  osiągają samochody o niskiej dynamice zespołu napędowego (ich katalogowa prędkość maksymalna wynosi około 150km/h), natomiast dla samochodów o wyższej dynamice, pozwalającej osiągać prędkości maksymalne do 200-220 km/h, prędkość ta wzrasta nawet do 180 km/h (ma na to również znaczny wpływ ukształtowanie warstwic na charakterystyce ogólnej silnika).



Rys.2. Charakterystyka dynamiki napędu poszczególnych klas samochodów osobowych za pomocą średniego czasu rozpędzenia pojazdu od 0 do 100 km/h -  $t_{100}$

Fig.2. Characteristics of average dynamics drive in a particular class of automotive vehicles with SI engines expressed by time of acceleration up to 100 km/h

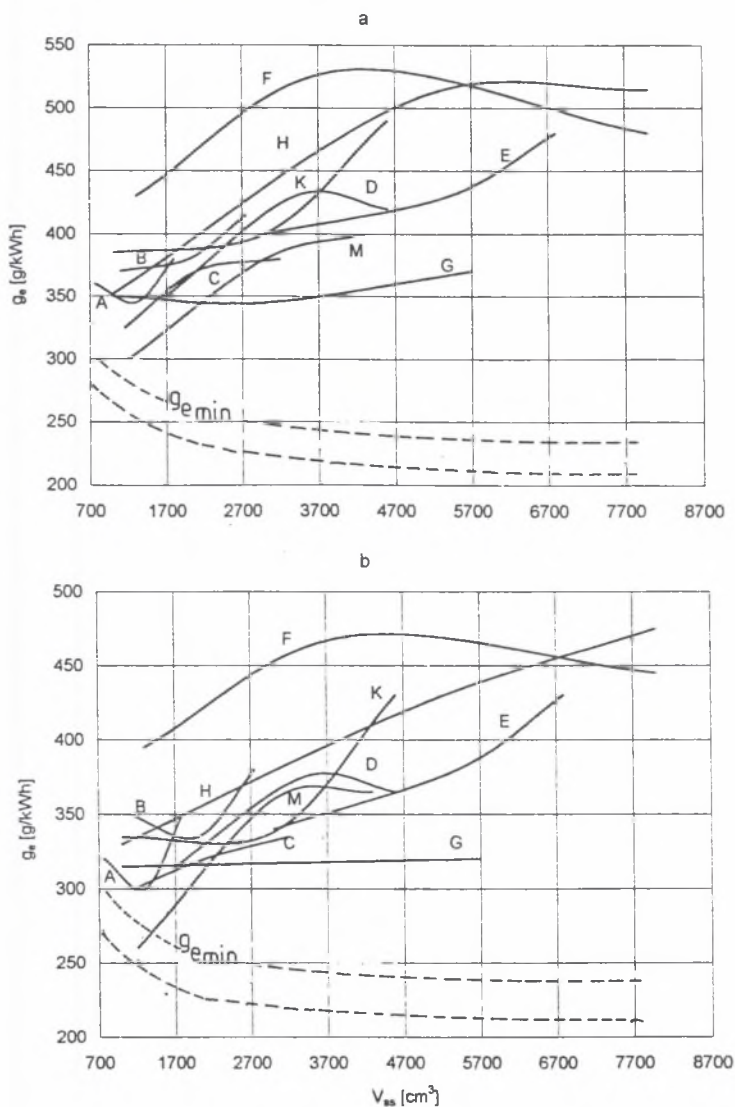
### 3.1. Eksploatacyjne jednostkowe zużycie paliwa silników ZI samochodów osobowych

Na rys.3 przedstawiono dla każdej klasy samochodów osobowych średnie wartości eksploatacyjnego jednostkowego zużycia paliwa silników ZI przy jeździe ze stałą prędkością 90 (a) i 120 (b) km/h. Natomiast tabela 3 prezentuje średnie obie (90 i 120 km/h) wartości  $g_e$  oraz przedział rozrzutu punktów pomiarowych od wartości średniej na wykresach szczegółowych, średnie sprawności ogólne silników oraz korelację charakterystyk z wynikami obliczeń.



Na podstawie prezentowanych wykresów można wyciągnąć następujące wnioski:

1. Ogólnie w każdej z klas jak i w całości obserwuje się tendencję wzrostu średniego  $g_e$ , a więc spadku sprawności ogólnej (rys.3) silników samochodów osobowych dla obu prędkość-



Rys.3. Średnie jednostkowe zużycie paliwa silników ZI poszczególnych klas samochodów osobowych przy stałej prędkości jazdy 90 (a) i 120 (b) km/h

Fig.3. Average unitary fuel consumption in a particular class of automotive vehicles with SI engine

Tabela 3

Charakterystyka średniego jednostkowego zużycia paliwa silników poszczególnych klas samochodów osobowych z zaznaczeniem rozrzutu punktów pomiarowych  $\Delta g_e$  na wykresach przy 90 i 120 km/h

Lp.	KLASA	ZI					ZS				
		n [szt.]	$g_e / g_e^{120}$ [g/kWh]	$\pm \Delta g_e$ [g/kWh]	$\eta_e / \eta_e^{120}$ [%]	$R^{90} / R^{120}$	n [szt.]	$g_e / g_e^{120}$ [g/kWh]	$\pm \Delta g_e$ [g/kWh]	$\eta_e / \eta_e^{120}$ [%]	$R^{90} / R^{120}$
1	A	82	349/304	+60;-60	24,6/28,2	+/+	9	299/272	+20;-20	28,7/31,5	-/-
2	B	128	370/333	+80;-60	23,2/25,7	-/-	18	307/299	+40;-20	27,8/28,6	-/-
3	C	101	371/334	+70;-50	23,1/25,5	+/-	22	309/284	+30;-30	27,7/30,2	+/-
4	D	80	388/340	+80;-50	22,1/25,2	+/+/+	23	317/289	+30;-30	27,0/29,7	+/-
5	E	32	418/365	+50;-30	20,5/23,5	+/+/+	-	-	-	-	-
6	F	81	498/442	+200;-150	17,2/19,4	+/+	-	-	-	-	-
7	G	50	344/311	+100;-100	24,9/27,6	-/-	37	323/307	+80;-80	26,5/27,9	-/-
8	H	64	423/366	+100;-100	20,3/23,4	+/+/+	3	285/273	+2;-2	30,0/31,4	-/-
9	K	127	381/333	+70;-70	22,5/25,7	+/+/+	48	304/288	+60;-60	28,2/29,8	-/-
10	M	49	356/324	+60;-60	24,1/26,5	+/+/+	22	299/284	+50;-50	28,7/30,2	+/+

(++) - silna korelacja

(+) - warunek korelacji spełniony

(-) - warunek korelacji niespełniony

(-) - słaba korelacja



- ci jazdy; średnio przy ww. prędkościach jazdy w silnikach ZI samochodów osobowych 1/5-1/4 ciepła zostaje zamieniona na pracę użyteczną.
2. Przy jeździe z prędkością 120 km/h silniki samochodów osobowych pracują z około 2-4% wyższą sprawnością ogólną niż przy prędkości 90 km/h; wyraża się to spadkiem  $g_e$  w granicach 32-57 g/kWh.
  3. W silnikach ZI samochodów osobowych widoczny jest znaczny potencjał wzrostu sprawności ogólnej, wyrażony możliwością obniżenia  $g_e$  o 50 do 200 g/kWh, w zależności od klasy samochodu i pojemności skokowej silnika; przy pojemnościach najmniejszych, stosowanych w klasach tańszych i pojazdach lżejszych zapas - szczególnie dla 120 km/h - jest niewielki.

Nie można wskazać jednoznacznie klasy, w której silniki ZI można uznać bez podziału na przedziały w funkcji pojemności skokowej za jednoznacznie ekonomiczne lub nieoszczędne w czasie pracy w wybranym zakresie prędkości; do tych pierwszych można zaliczyć silniki klas M., G, A i o małej pojemności skokowej C, a do drugich - klasy sportowej F i kabrioletów H. Także silniki o dużej pojemności skokowej samochodów luksusowych E i kombi K nie należą w tych warunkach pracy do oszczędnych. Można się zastanowić, co zrobić, aby analogicznie do samochodów ciężarowych dużej ładowności zapewnić pracę silnika w zakresie bliższym jego  $g_{emin}$ ?

W samochodach dużej ładowności napędzanych silnikami ZS, poruszających się głównie w ruchu tranzytowym (poza miastem), opłacalne jest stosowanie 8-, 10- i 16-biegowych skrzynek biegów. To ostatnie rozwiązanie pozwala na jazdę w zakresie do nawet 120 km/h w obszarze maksymalnej sprawności silnika, czyli w tym przypadku >42% sprawności ogólnej, co odpowiada  $g_e < 200$  g/kWh [1]. W samochodach osobowych, poruszających się w ruchu miejskim, z uwagi na konieczność ciągłego manipulowania dźwignią zmiany biegów takie rozwiązanie byłoby uciążliwe dla kierowcy, ale już dziś w około 26 modelach samochodów osobowych nierzadko jako rozwiązanie obejmujące cały model (Audi 2,5TDI z mocniejszym silnikiem), niekoniecznie w wersjach o najwyższej dynamice napędu, stosuje się 6-biegowe skrzynki biegów (np. Fiat Punto 55S, w wielu modelach Audi z silnikami ZS i ZI).

Innymi realnymi metodami zwiększenia eksploatacyjnej sprawności ogólnej silników samochodów osobowych są:

- obniżenie dynamiki zespołu napędowego, co w efekcie na wykresie trakcyjnym przybliży charakterystykę obciążenia do  $g_{emin}$  charakterystyki ogólnej (efekt taki sam jak przy zwiększaniu ilości biegów) i obniży prędkość maksymalną jazdy,

Tabela 3

Charakterystyka średniego jednostkowego zużycia paliwa silników poszczególnych klas samochodów osobowych z zaznaczeniem rozrzutu punktów pomiarowych  $\Delta g_e$  na wykresach przy 90 i 120 km/h

Lp.	KLASA	ZI					ZS				
		n [szt.]	$g_e / g_c$ [g/kWh]	$\pm \Delta g_e$ [g/kWh]	$\eta_e / \eta_e$ [%]	$R^{90} / R^{120}$	n [szt.]	$g_e / g_c$ [g/kWh]	$\pm \Delta g_e$ [g/kWh]	$\eta_e / \eta_e$ [%]	$R^{90} / R^{120}$
1	A	82	349/304	+60;-60	24,6/28,2	+/+	9	299/272	+20;-20	28,7/31,5	-/-
2	B	128	370/333	+80;-60	23,2/25,7	-/-	18	307/299	+40;-20	27,8/28,6	-/-
3	C	101	371/334	+70;-50	23,1/25,5	+/-	22	309/284	+30;-30	27,7/30,2	+/-
4	D	80	388/340	+80;-50	22,1/25,2	+/+/+	23	317/289	+30;-30	27,0/29,7	+/-
5	E	32	418/365	+50;-30	20,5/23,5	+/+/+	-	-	-	-	-
6	F	81	498/442	+200;-150	17,2/19,4	+/+	-	-	-	-	-
7	G	50	344/311	+100;-100	24,9/27,6	-/-	37	323/307	+80;-80	26,5/27,9	-/-
8	H	64	423/366	+100;-100	20,3/23,4	+/+/+	3	285/273	+2;-2	30,0/31,4	-/-
9	K	127	381/333	+70;-70	22,5/25,7	+/+/+	48	304/288	+60;-60	28,2/29,8	-/-
10	M	49	356/324	+60;-60	24,1/26,5	+/+/+	22	299/284	+50;-50	28,7/30,2	+/+

(++) - silna korelacja

(+) - warunek korelacji spełniony

(-) - warunek korelacji niespełniony

(-) - słaba korelacja

- ci jazdy; średnio przy ww. prędkościach jazdy w silnikach ZI samochodów osobowych 1/5-1/4 ciepła zostaje zamieniona na pracę użyteczną.
2. Przy jeździe z prędkością 120 km/h silniki samochodów osobowych pracują z około 2-4% wyższą sprawnością ogólną niż przy prędkości 90 km/h; wyraża się to spadkiem  $g_e$  w granicach 32-57 g/kWh.
  3. W silnikach ZI samochodów osobowych widoczny jest znaczny potencjał wzrostu sprawności ogólnej, wyrażony możliwością obniżenia  $g_e$  o 50 do 200 g/kWh, w zależności od klasy samochodu i pojemności skokowej silnika; przy pojemnościach najmniejszych, stosowanych w klasach tańszych i pojazdach lżejszych zapas - szczególnie dla 120 km/h - jest niewielki.

Nie można wskazać jednoznacznie klasy, w której silniki ZI można uznać bez podziału na przedziały w funkcji pojemności skokowej za jednoznacznie ekonomiczne lub nieoszczędne w czasie pracy w wybranym zakresie prędkości; do tych pierwszych można zaliczyć silniki klas M., G, A i o małej pojemności skokowej C, a do drugich - klasy sportowej F i kabrioletów H. Także silniki o dużej pojemności skokowej samochodów luksusowych E i kombi K nie należą w tych warunkach pracy do oszczędnych. Można się zastanowić, co zrobić, aby analogicznie do samochodów ciężarowych dużej ładowności zapewnić pracę silnika w zakresie bliższym jego  $g_{emin}$ ?

W samochodach dużej ładowności napędzanych silnikami ZS, poruszających się głównie w ruchu tranzytowym (poza miastem), opłacalne jest stosowanie 8-, 10- i 16-biegowych skrzynek biegów. To ostatnie rozwiązanie pozwala na jazdę w zakresie do nawet 120 km/h w obszarze maksymalnej sprawności silnika, czyli w tym przypadku >42% sprawności ogólnej, co odpowiada  $g_e < 200$  g/kWh [1]. W samochodach osobowych, poruszających się w ruchu miejskim, z uwagi na konieczność ciągłego manipulowania dźwignią zmiany biegów takie rozwiązanie byłoby uciążliwe dla kierowcy, ale już dziś w około 26 modelach samochodów osobowych nierzadko jako rozwiązanie obejmujące cały model (Audi 2,5TDI z mocniejszym silnikiem), niekoniecznie w wersjach o najwyższej dynamice napędu, stosuje się 6-biegowe skrzynki biegów (np. Fiat Punto 55S, w wielu modelach Audi z silnikami ZS i ZI).

Innymi realnymi metodami zwiększenia eksploatacyjnej sprawności ogólnej silników samochodów osobowych są:

- obniżenie dynamiki zespołu napędowego, co w efekcie na wykresie trakcyjnym przybliży charakterystykę obciążenia do  $g_{emin}$  charakterystyki ogólnej (efekt taki sam jak przy zwiększeniu ilości biegów) i obniży prędkość maksymalną jazdy,

- zwiększenie sprawności ogólnej silnika przez zastosowanie efektywnych procesów roboczych, a w tym między innymi spalanie mieszanek ubogich, stosowanie techniki wielozaworowej, dynamicznego doładowania, zmiennych faz rozrządu itd.

W drugim przypadku w wyniku obniżenia jednostkowego zużycia paliwa przez silnik  $g_{emin}$  następuje z reguły przesunięcie pod charakterystykę obciążenia warstwiczy o niższym jednostkowym zużyciu paliwa i tu nasuwa się rozwiązanie najbardziej skuteczne, ale najtrudniejsze w realizacji. Należy mianowicie tak przekształcić charakterystykę ogólną silnika, aby położenie  $g_{emin}$  można było realizować - jeszcze lepiej w sposób programowany - pod punktem pracy na wykresie trakcyjnym. Wtedy można by ograniczyć ilość biegów do niezbędnego minimum, ale silnik w wyniku złożonej konstrukcji (zmiennie: stopień sprężania, fazy rozrządu, charakterystyka układów dolotowych, skład mieszanki) byłby nieracjonalnie drogi.

Stosunkowo wysoki, obniżający stopień korelacji charakterystyk, rozrzut punktów pomiarowych (tabela 3) spowodowany jest z jednej strony stosowaniem w każdej z klas pojazdów silników o przestarzałej konstrukcji, jak i bardzo nowoczesnych samochodów napędzanych wyjątkowo oszczędnymi, spalającymi ubogie mieszanki silnikami ZI, w czym w ostatnich latach prym wiodą koncerny japońskie (Toyota Carina 1,6XLi  $g_e^{90}/g_e^{120}=310/278$  g/kWh, Mitsubishi Carisma). Oszczędność paliwa w tych samochodach dochodzi do 20-25%, co na tak wyrafinowaną konstrukcję, jaką jest silnik, stanowi znaczne osiągnięcie. Jednak zapewnienie wysokiej dynamiki napędu samochodów osobowych ( $t_{100}=9-12$ s) wymusza najczęściej pracę nowoczesnej jednostki napędowej na mniej ekonomicznych warstwicach  $g_e$  charakterystyki ogólnej, porównywalnej z samochodami o niższej sprawności ogólnej silnika i o czasie rozpędzania w przedziale  $t_{100}=17-20$ s.

Ciekawym przykładem wpływu stopnia nowoczesności silnika i doboru przełożeń układu przeniesienia napędu są samochody Opel Vectra z ekonomicznymi silnikami 1,6i ( $t_{100}=15,5$ s), 1,6i 16V (12,5s) i 1,8i 16V (11s) [13]. Pomimo znacznie zróżnicowanej dynamiki napędu we wszystkich trzech przypadkach silniki pracują dla obu prędkości jazdy z wysoką sprawnością 28,7/33,6% (300/255 g/kWh), a jednostkowe zużycie paliwa pojazdów  $g_v$  jest w każdym pojeździe na poziomie najniższym z możliwych - 4,0 dm<sup>3</sup>/Mg100km.

Na przeciwnym biegunie są, przez wiele lat produkowane, modele samochodów napędzanych silnikami o przestarzałej konstrukcji i niskiej sprawności zespołu napędowego. Wśród nich wymienić należy Poloneza 1,6GLi - 438/416 g/kWh, Rover Mini Cooper - 436/374, IZH 4121E - 417/379, Lada Nova 438/410, VW Kafer (Meksyk) - 396/368.

### 3.2. Eksploatacyjne jednostkowe zużycie paliwa silników ZS samochodów osobowych

Nieco odmienna jest sytuacja w samochodach napędzanych silnikami ZS. Jest tu znacznie mniej producentów silników, które są najczęściej nowoczesne, a znaczne różnicowanie wartości  $g_e$  jest wynikiem stosowania dwu rodzajów komór spalania, rozdzielających te silniki pod względem sprawności ogólnej na dwie różne grupy. Silniki o wtrysku bezpośrednim, jako bardziej oszczędne, są szeroko stosowane w samochodach osobowych wielu marek, czego przykładem mogą być silniki Audi 1,9 i 2,5TDI, stosowane w pojazdach grupy VW. W tabeli 4 przedstawiono jako przykład wskaźniki paliwowe silników i samochodów osobowych różnych klas, stosujących oszczędny silnik ZS 1,9TDI. W celu porównania przedstawiono wskaźniki dla pojazdów napędzanych silnikami ZS z komorą wirową o tej samej pojemności skokowej w wersji wolnossącej i doładowanej (moc odpowiednio 50 i 55 kW zamiast 66 kW). Takie rozpatrywanie w pionie (przez różne klasy) samochodów z tym samym silnikiem daje interesujące zilustrowanie faktu, że przy porównywalnych czasach rozpędzania  $t_{100}$  i prawidłowo dobranych przełożeniach układu przeniesienia napędu silnik pracuje przy obu prędkościach z podobną sprawnością. Wszelkie próby zmiany dynamiki odbijają się na sprawności pracy silnika przy obu prędkościach i na zużyciu paliwa przez pojazd.

Na rys. 4 dla poszczególnych klas samochodów osobowych przedstawiono charakterystyki średniego eksploatacyjnego jednostkowego zużycia paliwa silników ZS przy jeździe z prędkością 90 (a) i 120 (b) km/h. W poszczególnych klasach przy znacznie mniejszej ilości samochodów osobowych z silnikami ZS (tabela 3) oraz niższym zróżnicowaniu dynamiki napędu (dla klas konwencjonalnych samochodów  $t_{100}$  waha się w przedziale 12-16 s zamiast 12-18 s - rys.2) nie obserwuje się tak wyraźnej prawidłowości w przebiegu poszczególnych charakterystyk, jak i ich wzajemnego układu. Przebieg charakterystyki  $g_e$  dla silników ZS samochodów klasy B przy prędkości 120 km/h jest ze względu na średnią wartość  $g_e$  równą 300 g/kWh, trudny do wytłumaczenia.

Poza tym w klasach samochodów niekonwencjonalnych dla samochodów terenowych zastanawiający jest znaczny wzrost średniej wartości  $g_e$  wraz z pojemnością skokową silników ZS od 270 do 370 g/kWh przy prędkości 90 km/h i od 225 do 370 g/kWh (120 km/h). Jest to w głównej mierze wynik znacznego spadku  $t_{100}$  dla samochodów z silnikami ZS (spadek o 8 s) niż ZI (o 4 s).

Silniki ZS w poszczególnych klasach samochodów osobowych pracują dla obu stałych prędkości jazdy ze sprawnością ogólną odpowiadającą  $g_e$  odpowiednio 280-330 g/kWh ( $\eta_e =$



26-30%) i 240-310 g/kWh (27-36%), co w stosunku do silników ZI, odpowiednio 340-450 g/kWh (19-25%) i 300-400 (21,5-28%), jest znacznie korzystniejsze. Okupione jest to często

Tabela 4

Wartości  $g_e$  oszczędnego silnika ZS 1,9TDI przy pracy w samochodach różnych klas przy jeździe na 5 biegu z prędkością 90 i 120 km/h (dla porównania zestawiono dane dla silników z komorą wirową)

Lp.	Pojazd	Klasa	$m_e$ [kg]	$g_v$ $\left[ \frac{dm^3}{Mg100km} \right]$	$t_{100}$ [s]	$g_e^{90}$ [g/kWh]	$g_e^{120}$ [g/kWh]	Uwagi
1	Audi A4	C	1790	2.86	13.3	302.0	276.1	
2	Audi A6	D	1930	2.97	13.9	297.3	272.4	
3	VW Golf CL	B	1605	3.62	14.9	318.2	266.3	1.9 TD
4	VW Golf TDI	B	1650	3.00	12.8	289.4	271.4	
5	VW Passat CL	C	1790	2.96	14.1	278.8	252.1	
6	Seat Toledo GL	C	1580	3.05	12.7	318.2	266.3	
7	Seat Toledo GL	C	1580	3.92	14.9	318.1	265.8	1.9TD
8	VW Golf CL	B	1595	3.60	17.6	277.3	271.9	1.9D
9	VW Cabrio	H	1640	3.17	13.3	263.1	258.8	
10	Audi Cabrio	H	1800	3.05	14.7	268.2	250.0	
11	Audi A4 Avant	K	1855	2.90	13.8	257.6	235.0	
12	Audi A6 Avant	K	1980	3.00	14.2	284.0	259.4	
13	VW Golf Va-	K	1695	3.17	13.4	260.3	246.3	
14	VW Passat Va-	K	1820	2.97	14.4	305.0	302.0	
15	VW Sharan	M	2350	2.64	19.3	228.6	224.0	
16	Seat Alhambra	M	2350	2.64	17.0	227.6	223.4	

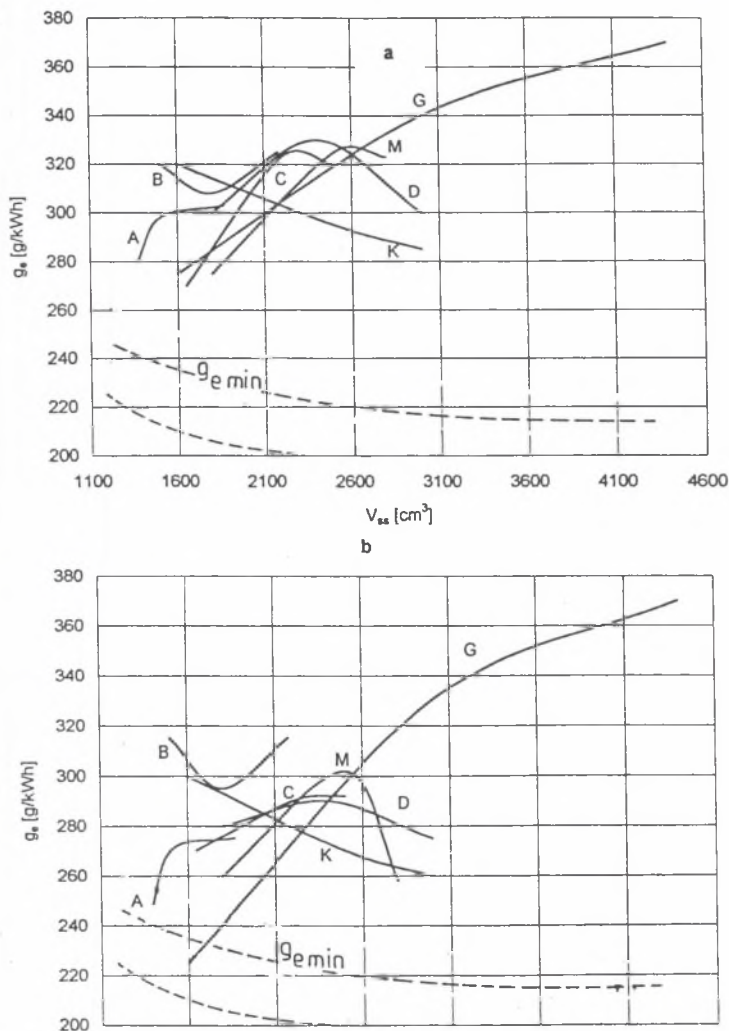
w poszczególnych klasach wzrostem średniej wartości  $t_{100}$  (spadkiem dynamiki), który to parametr co do wartości w ostatnich latach dla obu grup napędu znacznie się zbliżył i jak widać na rys.2, jest dla klasy A porównywalny (15 s).

Interesującym, wcześniej wspomnianym przykładem wyjątkowo niekorzystnego skojarzenia zespołu napędowego z pojazdem jest zamontowanie silnika ZS 1,9D firmy Citroen do Poloneza. Brak odpowiednio dobranej skrzynki biegów spowodował nieekonomiczną pracę silnika, co widoczne jest na przykładzie danych paliwowych samochodu Citroen ZX 1,9D Reflex, o podobnej masie całkowitej co Polonez. O nieprawidłowym doborze przełożeń w skrzynce biegów (przełożenia zbyt „krótkie”) poza mniejszą ekonomią jazdy ( $g_v=4,2$  zamiast  $3,7 dm^3/Mg100km$ ) i dłuższym czasem rozpędzania ( $t_{100}=20s$  zamiast  $18,5s$ ) świadczą wyższe wartości  $g_e$  dla obu prędkości (dla Poloneza  $g_e^{90}/g_e^{120}=344,6/376 g/kWh$  w porównaniu z  $286/284,3 g/kWh$  Citroena) oraz niespotykane przewyższenie wartości  $g_e^{120}$  nad  $g_e^{90}$ . Świad-



czy to o braku dostatecznej modyfikacji układu przeniesienia napędu z wersji samochodu o napędzie silnikiem ZI.

Poza tym na rys. 3 i 5 naniesiono zakres prawdopodobnych minimalnych wartości  $g_{e\min}$  [14] dla poszczególnych grup silników, umożliwiając w ten sposób uchwycenie możliwego do wykorzystania potencjału obniżenia jednostkowego zużycia paliwa dla obu prędkości jazdy.



Rys.4. Charakterystyka średniego jednostkowego zużycia paliwa  $g_e$  silników ZS poszczególnych klas samochodów osobowych przy jeździe ze stałą prędkością 90 (a) i 120 (b) km/h z zaznaczeniem  $g_{e\min}$

Fig.4. Average unitary fuel consumption in a particular class of automotive vehicles with engines

Jak można zauważyć, znacznie wyższy potencjał do wykorzystania jest przy prędkości jazdy 90 km/h i dla obu prędkości zwiększa się ze wzrostem pojemności skokowej od odpowiednio 30-80 g/kWh do 150-300 g/kWh dla silników ZI oraz od 20-60 g/kWh do 60-120 g/kWh dla silników ZS. Tak więc silniki ZI w samochodach osobowych mają do wykorzystania - szczególnie w większych samochodach - dwukrotnie większy potencjał zwiększenia sprawności ogólnej silnika.

#### 4. OCENA WYNIKÓW OBLICZEŃ

Podstawą otrzymania dobrych wyników jest zaczerpięcie do obliczeń jednostkowego zużycia paliwa silnika  $g_e$  danych zużycia paliwa przez pojazdy opartych na takim samym teście pomiarowym. Większość katalogów dane o zużyciu paliwa podaje na podstawie danych producenta pojazdu, który z kolei badania zużycia paliwa powinien przeprowadzić zgodnie z obowiązującą normą europejską (ECE) [11]. W przeciwnym razie producent zobowiązany jest do podania normy, według której przeprowadza badania i dlatego należy na to przy obliczeniach tego typu zwrócić uwagę (np. Renault dla najnowszych modeli podaje zaniżone zużycie obliczane według normy UTAC).

Do obliczeń również nie można będzie brać wartości zużycia paliwa mierzonego według obowiązującej od tego roku normy 93/116/CE, nie przewidującej czysto teoretycznych cykli stałych prędkości [14].

Wyniki obliczeń średniego jednostkowego zużycia paliwa  $g_e$  dla poszczególnych klas samochodów osobowych poddano ocenie za pomocą metody najmniejszych kwadratów, a za pomocą współczynnika korelacji R-kwadrat oceniano stopień rozrzutu punktów pomiarowych od wartości średniej (tabela 3).

Średnia odchyłka  $g_e$  dla poszczególnych klas samochodów nie przekracza 8% wartości  $g_e$ . Tak więc otrzymane wyniki i opisane na ich podstawie charakterystyki można uznać za miarodajne do oceny jednostkowego zużycia paliwa silników ZI i ZS poszczególnych klas samochodów osobowych.

Mniej zadowolające są współczynniki korelacji R-kwadrat dla poszczególnych charakterystyk klas samochodów z silnikami ZS. Obliczenia analogicznych charakterystyk różnych grup pojazdów dowodzą, że samochody osobowe dzięki znacznej różnorodności rozwiązań i skojarzeń „pojazd-układ przeniesienia napędu-silnik” wykazują znacznie mniejszy związek pomiędzy wskaźnikami opisującymi je. Poza różnorodnością determinującą rozrzut

punktów pomiarowych w tym przypadku nie bez znaczenia jest zróżnicowany przedział zmiennej niezależnej, tzn. pojemności skokowej i masy całkowitej pojazdu.

O zadowalającej korelacji charakterystyk z punktami pomiarowymi można mówić dla klasy D, E i H z silnikami ZI. Charakterystyki samochodów z silnikami ZS przy tych ilościach punktów pomiarowych wykazują brak korelacji, na co ma niewątpliwy wpływ stosowanie w pojazdach silników o znacznie zróżnicowanej sprawności ogólnej (o wtrysku bezpośrednim i pośrednim). Tak więc w tej pracy współczynnik korelacji należy uznać za podstawową miarę rozrzutu punktów pomiarowych od wartości średniej. Według niej najbardziej zróżnicowane pod względem  $g_e$  są samochody klasy G, B, C i F z silnikami ZI oraz A, B, G i K z silnikami ZS.

## 5. WNIOSKI KOŃCOWE

Na podstawie otrzymanych wyników można wyciągnąć następujące wnioski:

1. We współczesnych samochodach osobowych, jadących ze stałą prędkością 90 i 120 km/h silniki ZI i ZS pracują ze sprawnością ogólną znacznie poniżej ich potencjalnych możliwości.
2. Pomimo wyższego zużycia paliwa z większą sprawnością pracują silniki w czasie, gdy samochody poruszają się z wyższą prędkością - 120 km/h; jest to uwarunkowane przejściem, w wyniku wzrostu z kwadratem prędkości oporów aerodynamicznych, charakterystyki obciążenia na wykresie trakcyjnym na warstwicę o niższej wartości  $g_e$  (wyższa sprawność ogólna).
3. Wzrost sprawności ogólnej silnika można również osiągnąć przez podniesienie charakterystyki obciążenia w stronę niższych wartości  $g_e$  w wyniku zastosowania wyższych przełożeń w skrzynce biegów (nadbiegi) lub stosując silnik o wyższej sprawności ogólnej (np. ZI na ubogie mieszanki lub ZS o wtrysku bezpośrednim).
4. Obniżenie trakcyjnego jednostkowego zużycia paliwa można osiągnąć przez zmniejszenie do pewnej granicy dynamiki zespołu napędowego tak, aby zbytnio nie ograniczyć bezpieczeństwa czynnego pojazdu; duże korzyści daje obniżenie dynamiki napędu w samochodach o krótkim czasie rozpędzania pojazdu do 100km/h tak, aby ekonomiczny zakres  $g_e$  charakterystyki ogólnej silnika przecinał się z charakterystyką trakcyjną pojazdu na najwyższym biegu w rozpatrywanym zakresie prędkości.

## Literatura

1. Wajand J.A., Wajand J.T.: Tłokowe silniki spalinowe. WNT, Warszawa 1993.
2. Ubysz A.: Współczesne silniki samochodowe. Cz.1: Wybrane zagadnienia z konstrukcji i technologii produkcji. Skrypt uczelniany nr 1868, Gliwice 1994.
3. Ubysz A.: Charakterystyka współczesnych samochodów osobowych i ich silników. Skrypt uczelniany nr 1964, Gliwice 1996.
4. Ubysz A.: Ocena ekonomiczności samochodów na podstawie wskaźników zużycia paliwa. Archiwum Motoryzacji nr 1, 1996.
5. Ubysz A.: Charakterystyka współczesnych pojazdów samochodowych za pomocą jednostkowego zużycia paliwa przez pojazd. T.3 mat.konf. KONMOT'96 pt. Perspektywy rozwojowe konstrukcji, technologii i eksploatacji pojazdów samochodowych i silników spalinowych.
6. Arczyński S.: Mechanika ruchu samochodu. WNT, Warszawa 1993.
7. Hansel H.: Podstawy rachunku błędów. PWN, Warszawa 1968.
8. Auto-Technika Motoryzacyjna. Roczniki 1993-1997.
9. Ubysz A.: Weryfikacja danych zużycia paliwa przez pojazd za pomocą obliczeniowej metody  $g$ . Zeszyt Naukowy Pol.Śl. seria transport nr 30, Gliwice 1998.
10. Auto-motor Sport Special. Die besten Autos der Welt. Dodatek do numeru 22/1992.
11. Praca zbiorowa: Bosch- informator motoryzacyjny. WKŁ, Warszawa 1982.
12. Siłka W.: Energochłonność ruchu samochodu. WNT, Warszawa 1997.
13. Breitwieser K., Henschel J., Arnold G.: Der neue Vierventilmotor mit 1,6 l Hubraum von VW. MTZ, nr 9, 1993.
14. Katalog handlowy samochodów Alfa Romeo na 1997r.
15. MTZ. Roczniki niemieckiego miesięcznika 1988-1996.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Stanisław Jarnuszkiewicz

Wpłynęło do Redakcji 28.04.1999 r.

## Abstract

There has been an attempt to verify in this paper the car fuel consumption data taking into account analytic connections between mileage fuel consumption and probable specific fuel consumption  $g_e$  by engine at constant speed.

Applying verification method of mileage fuel consumption at constant speed of 90 : 120 km/h seems to be quite justified since many car producers underrate these values for various reasons and present them according to their own norms.