

Wpływ fazy hamowania na energochłonność ruchu samochodu w cyklu jezdnym

WOJCIECH SIŁKA

Politechnika Opolska, Zakład Samochodów

Hamowanie, jako proces rozpraszania energii kinetycznej samochodu nabytej w fazie przyspieszenia, wywiera znaczący wpływ na wartość stosunku energochłonności ruchu do przebytej drogi, stanowiącego wielkość proporcjonalną do przebiegowego zużycia paliwa. Przedmiotem opracowania jest analiza wpływu parametrów kinematycznych fazy hamowania na energochłonność ruchu samochodu w cyklu jezdym. W tym celu wyprowadzono równania opisujące związki między energochłonnością ruchu samochodu a parametrami profilu prędkości, ze szczególnym uwzględnieniem fazy hamowania. Umożliwiają one dokonywanie symulacji ruchu samochodu dla oszacowania udziału energii rozproszonej w energochłonności ruchu dla dowolnego cyklu jezdny. Na podstawie wyprowadzonych równań dokonano analizy przebiegu badanych funkcji. Wykazano, że parametrem fazy hamowania o znaczącym wpływie na energochłonność jednostkową samochodu jest intensywność procesu, podczas gdy wpływ profilu prędkości tej fazy ruchu jest do pominięcia.

Ważniejsze oznaczenia

- a — ogólnie — przyspieszenie, m/s^2
- a_A — średnie przyspieszenie fazy rozpędzania, m/s^2
- a_C — średnie przyspieszenie pojedynczego modułu, m/s^2
- a_H — średnie opóźnienie fazy hamowania, m/s^2
- a^* — średnie przyspieszenie cyklu złożonego, m/s^2
- E — ogólnie — energochłonność ruchu, kJ
- E_C — energochłonność cyklu jezdny, kJ
- E_K — energia kinetyczna, kJ
- E_{op} — energia wydatkowana na pokonanie oporów ruchu, kJ
- E_P — energia wydatkowana na pokonanie oporu powietrza, kJ
- E_R — energia rozproszona działaniem hamulców, kJ
- E_T — energia wydatkowana na pokonanie oporu toczenia, kJ
- f_i — współczynnik oporu toczenia
- F_H — siła hamująca na kołach, N
- F_N — siła napędowa na kołach, N
- F_{op} — sumaryczna siła oporów ruchu, N
- F_p — siła oporu powietrza, N

F_t	— siła oporu toczenia, N
K	— współczynnik oporu powietrza, kg/m
L	— ogólnie — odcinek drogi przebytej w określonej fazie ruchu, m
L_C	— całkowita droga przebyta w całym cyklu, m
L_W	— droga wybiegu, m
L^*	— udział drogi fazy hamowania w cyklu złożonym,
V^*	— funkcja kwadratu prędkości średniej cyklu, m^2/s^2
m	— masa samochodu, kg
s	— ogólnie — droga, m
t	— ogólnie — czas, s
v	— ogólnie — prędkość samochodu, m/s, km/h
\bar{v}	— wartość średnia kwadratu prędkości, m^2/s^2
λ	— współczynnik rozproszenia energii
Φ	— ogólnie, energochłonność jednostkowa, $J(m \cdot kg)$
Φ_C	— energochłonność jednostkowa cyklu, $J(m \cdot kg)$
Φ_R	— jednostkowa energia rozproszona, $J(m \cdot kg)$

Indeksy przy oznaczeniach wielkości dotyczących faz ruchu

A	— faza przyspieszenia
C	— cykl jezdny
H	— faza hamowania
N	— faza napędzania
p	— początek fazy
k	— koniec fazy
U	— ruch ustalony (stała prędkość)

1. Wprowadzenie

Charakterystyczną cechą ruchu samochodu są okresowe zmiany prędkości. Ich częstość, przebieg, zakres i intensywność zależą od czynników zewnętrznych takich jak własności drogi, warunki ruchu, warunki atmosferyczne oraz od własności dynamicznych samochodu, a także od subiektywnego działania kierowcy.

Realizowany przez samochód profil prędkości, wyrażany przebiegiem prędkości w funkcji czasu bądź drogi, charakteryzują powtarzające się okresowo (w sposób nieregularny) podstawowe fazy ruchu. Przeważnie są one uszeregowane w kolejności: przyspieszanie, stała prędkość, hamowanie, tworząc tzw. moduł lub inaczej cykl pojedynczy. Na odpowiednio długim odcinku trasy występuje większa liczba modułów oddzielonych postojami, tworząc tzw. cykl złożony. Profile prędkości każdego z modułów różnią się czasem trwania poszczególnych faz ruchu a także zakresem i intensywnością zmiany prędkości.

Zależnie od udziału i przebiegu poszczególnych faz ruchu realizowany profil prędkości, decyduje nie tylko o prędkości średniej i o czasie przejazdu danego odcinka trasy, lecz także stanowi czynnik wywierający wpływ na energochłonność ruchu samochodu i sprawność napędu. Stąd energochłonność ruchu i zużycie paliwa

tego samego samochodu przyjmują różną wartość, zależnie od warunków ruchu; szczególnie znaczne różnice obserwuje się przy porównywaniu tych wartości dla ruchu miejskiego i drogowego [4], [7].

Znaczący wpływ na energochłonność ruchu samochodu, zwłaszcza w warunkach miejskich, wywierają fazy przejściowe, tj. przyspieszanie i hamowanie. Analizę porównawczą wpływu obu faz przejściowych na energochłonność ruchu przedstawiono w pracy [5]. Istotne znaczenie ma przy tym intensywność procesu zmiany prędkości, wyrażana czasem jego trwania, drogą przebywaną w fazie przejściowej, bądź wartością średnią przyspieszenia i opóźnienia.

Większość autorów, nielicznych zresztą, prac teoretycznych, których przedmiotem jest analiza teoretyczna ruchu samochodu ze zmienną prędkością, nie rozpatruje szerzej wpływu fazy hamowania. Tymczasem, jak wykazano w pracach [3], [4], [7], właśnie ta faza ruchu wywiera znaczący wpływ na energochłonność przypadającą na jednostkę przebytej drogi a więc również na przebiegowe zużycie paliwa. W przypadku samochodu osobowego średniej wielkości, poruszającego się w ruchu miejskim, co najmniej 30% energii dostarczonej przez silnik do kół w fazach napędzania jest rozpraszane hamowaniem.

Pod względem energetycznym proces hamowania (w przypadku powszechnie stosowanych hamulców ciernych) sprowadza się do rozpraszania znacznej części energii kinetycznej samochodu, zamienianej poprzez tarcie na ciepło odprowadzane do otoczenia. Jednocześnie pozostała część tej energii, z reguły nie współmiernie mała, zużywa się na pokonywanie oporów ruchu na drodze hamowania.

Szczegółową analizę czynników decydujących o energochłonności podstawowych faz ruchu zawiera praca [6]. W niniejszym opracowaniu zawarto kompleksową analizę wpływu fazy hamowania na energochłonność kompletnego cyklu. Wyprowadzono podstawowe zależności opisujące związki między parametrami kinematycznymi fazy hamowania a energochłonnością ruchu samochodu w cyklu pojedynczym i złożonym. Na tej podstawie opracowano dla przykładowego samochodu wykresy pozwalające na oszacowanie wpływu intensywności hamowania na parametry energetyczne ruchu.

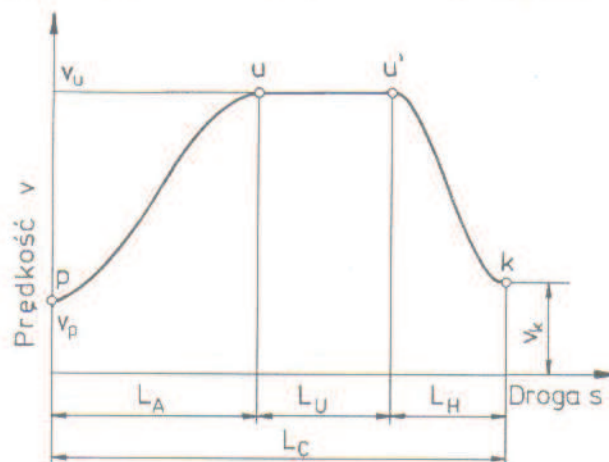
Przyjęto model ruchu, który charakteryzuje:

- droga pozioma o gładkiej równej i suchej nawierzchni,
- brak wiatru,
- stała wartość współczynnika oporu toczenia,
- jednomasowy model samochodu,
- brak strat mechanicznych w układzie napędowym,
- bezpośrednie przejście od stałej prędkości do fazy hamowania z odłączonym napędem kół.

Podczas jazdy z odłączonym napędem kół, część rozporządzałnej energii kinetycznej zużywa się na pokonanie oporów mechanicznych układu przeniesienia napędu. Ponieważ, w tym przypadku, układ napędowy nie przenosi momentu obrotowego, zatem opory mechaniczne są dużo mniejsze niż w fazach napędzania. Pominięcie strat mechanicznych powoduje, że droga wybiegu, obliczona dla przyjętego modelu, jest nieznacznie dłuższa niż w przypadku ich uwzględniania. Z kolei odwrotny skutek przynosi pominięcie w modelu energii zakumulowanej w masach wirujących. Można zatem założyć, że skutki tych dwóch uproszczeń wzajemnie się znoszą.

2. Energochłonność ruchu samochodu w cyklu jezdny

W najogólniejszym przypadku cykl jezdny składa się z wielu modułów o profilu prędkości jak na rys. 1. Na tym wykresie, sporządzonym w układzie prędkość – droga, punkty u oraz u' oznaczają odpowiednio początek i koniec fazy ruchu ze stałą prędkością, przy czym u oznacza zarazem koniec fazy przyspieszenia, zaś u' początek fazy hamowania (z silnikiem odłączonym od układu napędowego). Punkty p oraz k oznaczają odpowiednio początek i koniec danego modułu; mogą one przypadać na różne wartości prędkości. Przeważnie jednak, zwłaszcza w warunkach ruchu miejskiego, poszczególne moduły są oddzielone postojami i wtedy: $v_p = 0$, $v_k = 0$.



Rys. 1. Profil prędkości pojedynczego modułu

Fig. 1. Speed versus distance trajectory of the single module

Energochłonność ruchu, jako wydatek energii dostarczonej do kół samochodu, niezbędny dla realizacji ruchu wg określonego profilu prędkości [4], [6] przedstawia równanie ogólne w funkcji drogi

$$E = m g \int_0^{L_N} f_1 ds + K \int_0^{L_N} v^2 ds + m \delta \int_0^{L_A} a ds. \quad (1)$$

Stanowi ono sumę $E = E_1 + E_p + E_K$, której dwa pierwsze składniki wyrażają iloczyny wartości średniej poszczególnych oporów ruchu oraz drogi przebytej w fazie napędzania

$$E_1 = \bar{F}_1 L_N, \quad (2)$$

$$E_p = \bar{F}_p L_N. \quad (3)$$

Natomiast trzeci składnik równania wyraża energię wydatkowaną na przezwyciężenie siły bezwładności przy przyspieszaniu, czyli na przyrost energii kinetycznej samochodu.

Współczynnik oporu toczenia dla współczesnych opon drogowych charakteryzuje się stosunkowo niewielkim przyrostem wartości aż do prędkości rzędu 90, 100 km/h. Do tych wartości prędkości, zdaniem niektórych autorów [7], może być on aproksymowany funkcją liniową. Należy też dodać, że w przypadku jazdy ze zmienną prędkością na jezdni o dobrej nawierzchni, wartość średnia współczynnika oporu toczenia (dla przebytego odcinka drogi) tylko w niewielkim stopniu zależy od profilu prędkości; ponadto udział składnika E_t w bilansie energochłonności ruchu jest najmniejszy. Dlatego w przedstawianych dalej równaniach zakładano $f_t = \text{const}$, zaś przykładach obliczeniowych przyjmowano arbitralnie wartość średnią współczynnika oporu toczenia, dla danego odcinka przebytej drogi. Ponadto w przedstawionych niżej równaniach ogólnych przyjmowano dla uproszczenia $\delta = 1$. Dla przyjętych założeń równanie podstawowe energochłonności ruchu przyjmuje postać

$$E = m g f_t L_N + K \vartheta_N L_N + \frac{m}{2} v_U^2, \quad (4)$$

gdzie

$$\vartheta_N = \overline{v^2}, \quad (5)$$

Iloczyn $K \vartheta_N$ przedstawia wartość średnią oporu powietrza, przy czym funkcja ϑ_N , wyrażająca wartość średnią kwadratu prędkości, zależy od profilu prędkości fazy napędzania obejmującej rozpędzanie i stałą prędkość. Dla rozpędzania ze stanu spoczynku wartość średnia oporu powietrza

$$(\overline{F_p})_N = \frac{K}{L_N} \left[\int_0^{L_A} v^2(s) ds + (v_U)^2 L_U \right]. \quad (6)$$

Wartość średnia oporu powietrza dla fazy przyspieszania jest zawsze mniejsza od wartości przy stałej prędkości. Założono

$$(\overline{F_p})_A = \rho (F_p)_U,$$

wobec czego

$$(\overline{F_p})_A = K (v_U)^2 \frac{\rho L_A + L_U}{L_N}, \quad (7)$$

oraz

$$(\overline{v^2})_N = (v_U)^2 \frac{\rho L_A + L_U}{L_N} = \vartheta_N. \quad (8)$$

Dla profilu prędkości, w którym $v_p > 0$

$$\vartheta_N = \frac{(v_U)^2 (\rho L_A + L_U) + (v_p)^2 L_A (1 - \rho)}{L_N}. \quad (9)$$

Energochłonność ruchu, zgodnie z przyjętą definicją [4], stanowi energia doprowadzoną do kół wyłącznie w fazach napędzania. Natomiast energochłonność jednostkowa [4], [5], [6] wyraża stosunek energochłonności ruchu do iloczynu masy i całkowitej drogi przebytej w złożonym profilu prędkości, obejmującym także fazy ruchu z odłączonym napędem kół.

Przyjęta dalej jako funkcja celu energochłonność jednostkowa może być opisana wzorem

$$\Phi = g f_i \frac{L_N}{L_C} + \frac{K}{m} \frac{\vartheta_N L_N}{L_C} + \frac{v_U^2 - v_P^2}{2L_C}. \quad (10)$$

Trzeci składnik równania (10), jako stosunek energii kinetycznej do iloczynu masy i drogi, ma wymiar przyspieszenia. Przedstawia on zarazem takie stałe przyspieszenie, z którym rozpędzany samochód osiąga prędkość końcową v_U po przebyciu drogi równej całkowitej drodze cyklu. Wielkość ta, nazwana średnim przyspieszeniem, nie zależy od profilu prędkości, zarówno samej fazy rozpędzania, jak i kompletnego modułu gdyż

$$\frac{E_K}{mL_C} = \frac{v_U^2 - v_P^2}{2L_C} = a_C. \quad (11)$$

W licznikach ułamków równań (10) i (11) występuje różnica kwadratów prędkości końcowej i początkowej rozpędzania, co dotyczy najogólniejszego przypadku ruchu, w którym przyspieszanie zaczyna się od pewnej prędkości początkowej v_P .

Opóźnienie hamowania, jako wielkość decydująca o drodze tej fazy ruchu L_H , wpływa pośrednio na wartość energochłonności jednostkowej cyklu, gdyż dla rozpatrywanego kompletnego modułu

$$L_C = L_A + L_U + L_H. \quad (10)$$

Dla cyklu złożonego wielu modułów

$$\Phi_C = \frac{g f_i}{L_C} \sum (L_N) + \frac{K}{m L_C} \sum (\vartheta_N L_N) + \frac{1}{2L_C} \sum (v_U^2 - v_P^2). \quad (11)$$

Dla uproszczenia zapisu wprowadzono podstawienia

$$\frac{\sum (L_N)}{L_C} = L_N^*, \quad (12)$$

$$\frac{\sum (\vartheta_N L_N)}{L_C} = V^*, \quad (13)$$

$$\frac{\sum (v_U^2 - v_P^2)}{2L_C} = a^*. \quad (14)$$

Podstawienia te obejmują związki między parametrami kinematycznymi profilu prędkości cyklu złożonego [4], [6] i oznaczają:

L_N^* — udział drogi fazy napędzania w całym cyklu,

V^* — funkcję kwadratową prędkości średniej,

a^* — średnie przyspieszenie cyklu.

Równanie (14) przedstawia zarazem, odniesioną do iloczynu drogi i masy, sumę energii kinematycznej nabytej przez samochód w każdym z modułów, czyli

$$a^* = \frac{\sum(E_K)}{mL_C}. \quad (15)$$

Po uwzględnieniu powyższych podstawień

$$\Phi_C = g f_t L_N^* + \frac{K}{m} V^* + a^*. \quad (16)$$

Funkcja V^* przedstawia, odniesioną do całkowitej drogi cyklu, sumę iloczynów kwadratu prędkości średniej i drogi fazy napędzania

$$V^* = \frac{1}{L_C} \sum \left[(\bar{v}^2)_N L_N \right], \quad (17)$$

a w postaci szczegółowej dla cyklu złożonego z wielu modułów, różnych pod względem parametrów kinematycznych

$$V^* = \frac{1}{L_C} \sum \left[(v_U)^2 (\rho L_A + L_U) + (v_p)^2 L_A (1 - \rho) \right]. \quad (18)$$

Dla pojedynczego modułu rozpoczynającego się ze stanu spoczynku

$$V^* = (v_U)^2 \frac{\rho L_A + L_U}{L_C}. \quad (19)$$

3. Hamowanie jako proces rozpraszania energii kinetycznej samochodu

Podczas hamowania silnik jest odłączony od układu napędowego, wobec czego nabyta poprzednio energia kinetyczna zostaje w znacznej mierze, rozproszona wskutek działania powszechnie stosowanych hamulców ciernych [1], [2], [3]. Jak wykazano w pracy [5], intensywność hamowania wywiera znacznie większy wpływ na energochłonność jednostkową niż intensywność fazy przyspieszania.

O długości drogi, przebytej w ruchu opóźnionym z odłączonym napędem kół, decyduje siła hamująca i czas jej działania oraz hamujące działanie oporów ruchu. Najdłuższą drogę w ruchu opóźnionym zapewnia wybieg, podczas którego opory ruchu są pokonywane wyłącznie kosztem nabytej poprzednio energii kinetycznej, wobec czego opóźnienie chwilowe

$$\frac{dv}{dt} = \frac{(F_{op})_H}{m},$$

Natomiast w przypadku hamowania z użyciem hamulców opóźnienie to

$$\frac{dv}{dt} = \frac{F_H + (F_{op})_H}{m},$$

gdzie $(F_{op})_H$ — suma oporu toczenia i powietrza w ruchu opóźnionym.

Jak wynika z prawa zachowania energii ruchu opóźnionego samochodu przy odłączonym napędzie kół, może być wyłącznie następstwem zamiany rozporządzalnej energii kinetycznej na inną postać energii. Hamowanie jest zatem procesem rozpraszania energii; przy tym energia rozproszona działaniem hamulców odpowiada pracy wykonanej na drodze hamowania przez sumaryczną siłę hamującą na kołach. Z reguły, nawet przy hamowaniu z małą intensywnością, rozproszeniu ulega większa część energii kinetycznej; jej reszta zużywa się na pokonywanie oporów w ruchu opóźnionym.

Ogólna postać równania bilansu energii w fazie hamowania

$$E_K - E_R - (E_t)_H - (E_p)_H = 0, \quad (20)$$

gdzie dla pojedynczej fazy hamowania do $v_K = 0$

$$(E_t)_H = m g f_t L_H, \quad (21)$$

$$(E_p)_H = K \int_0^{L_H} v^2 ds = (\bar{F}_p)_H L_H = K(\bar{v}^2)_H L_H. \quad (22)$$

Analogicznie jak poprzednio dla fazy przyspieszania przyjęto

$$\frac{(\bar{F}_p)_H}{(F_p)_U} = \rho_H,$$

a stąd

$$(\bar{v}^2)_H = \rho_H v_U^2 = \mathcal{S}_H. \quad (23)$$

Teraz energia rozproszona dla pojedynczej fazy hamowania

$$E_R = \frac{mv_U^2}{2} - (m g f_t + K \rho_H v_U^2) L_H, \quad (24)$$

gdzie pierwszy składnik równania wyraża energię kinetyczną nabytą w fazie przyspieszania. Stosunek energii rozproszonej do iloczynu masy i drogi, czyli jednostkowa energia rozproszona [6], dla pojedynczej fazy hamowania

$$\Phi_R = \frac{E_R}{m L_H},$$

a w postaci szczegółowej

$$\Phi_R = \frac{v_U^2}{2 L_H} - \left(g f_t + \frac{K}{m} \rho_H v_U^2 \right). \quad (25)$$

Pierwszy składnik równania (25) ma wymiar przyspieszenia i przedstawia stosunek energii kinetycznej nabytej w fazie przyspieszania do iloczynu masy i drogi fazy hamowania; jego wartość nie zależy od profilu prędkości. Dla modułu rozpoczynającego się i kończącego przy $v=0$, przyrost energii kinetycznej w fazie przyspieszania jest równy co do wartości sumie energii rozproszonej i energii zużytej na pokonanie oporów ruchu w fazie hamowania. Dlatego składnik ten przedstawia zarazem wartość bezwzględną średniego przyspieszenia ujemnego a więc opóźnienia.

$$a_H = \frac{v_U^2}{2L_H} \quad (26)$$

Jednostkowa energia rozproszona dla kompletnego pojedynczego modułu

$$\Phi_R = \frac{v_U^2}{2L_C} - \left(gf_t + \frac{Kv_U^2}{m} \right) \frac{L_H}{L_C} \quad (27)$$

Pierwszy składnik równania (27) przedstawia stosunek energii kinetycznej do iloczynu masy pojazdu i drogi całego modułu; oznacza on więc średnie przyspieszenie na drodze L_C

$$a_C = \frac{v_U^2}{2L_C} \quad (28)$$

Z równania (27) wynika istotne stwierdzenie, że profil prędkości nie ma wpływu na wartość jednostkową energii rozproszonej w fazie hamowania; wielkość ta zależy bowiem tylko od intensywności hamowania, wyrażonej w tym wzorze drogą L_H .

Gdy faza hamowania kończy się przy prędkości większej od zera, wartość średnia kwadratu prędkości tejże fazy

$$\overline{(v^2)}_H = v_k^2 + \rho_H(v_U^2 - v_k^2)_H = \mathfrak{V}_H \quad (29)$$

Dla $v_k > 0$ energia kinetyczna na początku hamowania nie równa się sumie energii rozproszonej i energii oporów ruchu fazy hamowania. W takim przypadku jednostkowa energia rozproszona pojedynczego modułu

$$\Phi_R = \frac{(\Delta v^2)_H}{2L_C} - gf_t \frac{L_H}{L_C} - \frac{K}{m} [v_k^2 + \rho_H(\Delta v^2)_H] \frac{L_H}{L_C}, \quad (30)$$

gdzie

$$(\Delta v^2)_H = (v_U^2 - v_k^2)_H \quad (31)$$

Pierwszy składnik równania (30) oznacza wartość różnicy energii kinetycznej w przedziale prędkości $(v_U \div v_k)_H$, odniesioną do iloczynu masy i drogi całego modułu; jest to więc również średnie opóźnienie modułu oznaczone dla odróżnienia przez $(a_H)_C$

$$(a_H)_C = \frac{(\Delta v^2)_H}{2L_C} \quad (32)$$

Dla cyklu złożonego z modułów oddzielonych postojami

$$\sum (E_K)_H = \sum E_R + \sum (E_{op})_H.$$

Zatem

$$(E_R)_C = \sum (E_K)_H - mgf_i \sum L_H - K \sum (\beta_H L_H). \quad (33)$$

Podobnie jak poprzednio, można również zastosować podstawienia dla wielkości przedstawiających związki między parametrami kinematycznymi cyklu. Związki te dla cyklu złożonego z modułów rozpoczynających się i kończących przy $v_k = 0$

$$L_H^* = \frac{1}{L_C} \sum L_H, \quad (34)$$

$$V_H^* = \frac{1}{L_C} \sum_i [\rho(v_U^2 L_H)], \quad (35)$$

$$a_H^* = \frac{1}{2L_C} \sum v_U^2. \quad (36)$$

Natomiast dla modułów kończących się przy $v_k > 0$

$$V_H^* = \frac{1}{L_C} \sum_i \{ [v_k^2 + \rho_H(\Delta v^2)_H] L_H \}, \quad (37)$$

$$a_H^* = \frac{1}{2L_C} \sum_i (\Delta v^2)_H. \quad (38)$$

Przy tych podstawieniach jednostkowa energia rozproszona cyklu

$$(\Phi_R)_C = a_H^* - (gf_i L_H^* + k_m \varepsilon V_H^*). \quad (39)$$

Dla celów porównawczych wprowadzono współczynnik rozproszenia energii [3], [4], [6], który wyraża stosunek energii rozproszonej do energii kinetycznej odpowiadającej różnicy prędkości w fazie hamowania. Współczynnik ten dla pojedynczej fazy hamowania

$$\lambda = \frac{E_R}{E_K} = 1 - \frac{(E_{op})_H}{E_K}, \quad (40)$$

przy czym

$$\lambda = 0, \quad \text{dla } L_H = L_W,$$

$$\lambda \rightarrow 1, \quad \text{dla } E_{op} \rightarrow 0.$$

Dla pojedynczego modułu oraz $v_k = 0$ równanie współczynnika rozproszenia energii przyjmuje postać szczegółową

$$\lambda = 1 - \frac{1}{a_H} \left(g f_t + \frac{K \rho_H v_{\bar{v}}^2}{m} \right), \quad (41)$$

W równaniu (41) występuje średnie opóźnienie które jest, w tym przypadku, wprost równe średniemu przyspieszeniu fazy rozpędzania.

Dla $v_k > 0$ równanie współczynnika rozproszenia energii przyjmuje postać

$$\lambda = 1 - \frac{1}{a_H} \left\{ g f_t + \frac{K}{m} [v_k^2 + \rho_H (\Delta v^2)_H] \right\}. \quad (42)$$

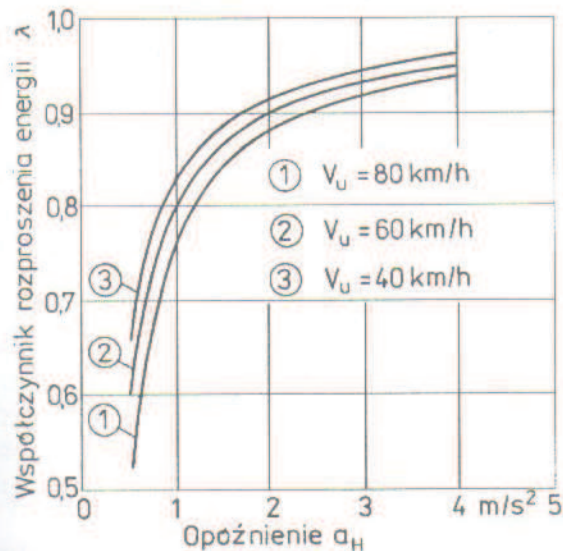
Dla cyklu złożonego współczynnik rozproszenia energii

$$\lambda_c = 1 - \left(\frac{\sum E_{op}}{\sum (E_K)_H} \right),$$

a w postaci szczegółowej

$$\lambda_c = 1 - \frac{2}{\sum_i (\Delta v^2)_H} \left\{ g f_t \sum_i L_H + \frac{K}{m} \sum_i [(v_k^2 + \rho_H (\Delta v^2)_H) L_H] \right\}. \quad (43)$$

Na rys. 2 przedstawiono wykres współczynnika rozproszenia energii sporządzony na podstawie równania (31) dla różnej prędkości początkowej hamowania przy założeniu: $f_t = 0,015$, $K = 0,45$ kg/m, $\rho_H = 0,5$, $m = 1200$ kg. Wzajemne usytuowanie krzywych na wykresie zależy od prędkości początkowej, w tym przypadku v_u . Dla przyjętych danych (w przybliżeniu do $a_H = 1,5$ m/s²) funkcję $\lambda(a_H)$ charakteryzuje bardziej stromy przebieg, niż w zakresie większego opóźnienia.



Rys. 2. Współczynnik rozproszenia energii
Fig. 2. Coefficient of dissipation of the kinetic energy

Wykres przedstawiony na rysunku 2 dotyczy fazy hamowania pojedynczego modułu, lub także profilu prędkości złożonego z jednakowych modułów. Natomiast nie jest możliwe sporządzenie tego rodzaju wykresu dla cyklu złożonego z różnych modułów, z powodu ich odmienności pod względem parametrów profilu prędkości. W tym przypadku można jednak porównywać różne profile prędkości pod względem wartości tych wielkości, które dotyczą energii rozproszonej. Dla przykładowego samochodu poruszającego się w cyklach jezdnych EPA, zestawiono w tabeli 1 wielkości dotyczące energii rozproszonej, które wyznaczono przyjmując, te same co poprzednio, wartości parametrów decydujących o oporach ruchu.

Tabela ta uwidacznia, jak bardzo warunki jazdy miejskiej powodują zwiększone rozpraszanie energii kinetycznej, w porównaniu z jazdą drogową. Wszystkie wielkości zawarte w tej tabeli przyjmują większą wartość dla cyklu miejskiego. Ze względu na różną długość drogi całkowitej obu cykli, najbardziej wymiernym wskaźnikiem porównawczym jest jednostkowa energia rozproszona. W cyklu miejskim wielkość ta jest 5-krotnie większa niż w cyklu drogowym. Ponieważ w obu cyklach suma przyrostów energii kinetycznej jest wprost równa sumie energii rozproszonej i energochłonności oporów ruchu fazy hamowania, zatem $a_H^* = a^*$.

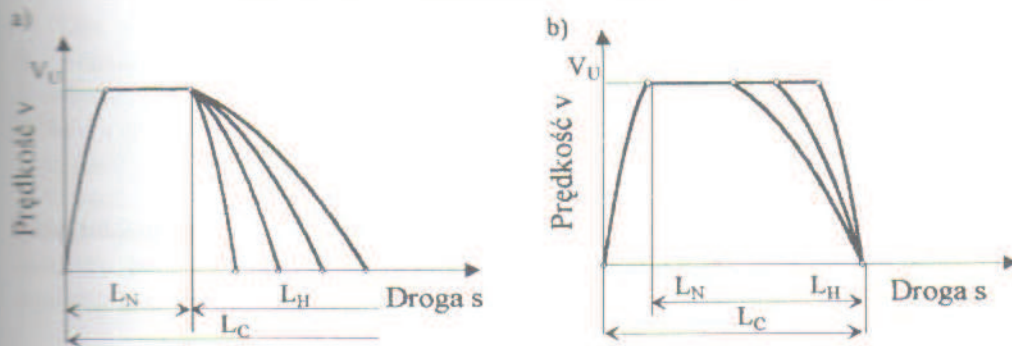
T a b e l a 1. Parametry fazy hamowania w cyklach EPA
T a b l e 1. Parameters of the braking phase for EPA driving schedules

Wielkość	Cykl miejski	Cykl drogowy
Udział drogi fazy hamowania L_H^*	0,21	0,0597
Średnie opóźnienie a_H^* [m/s ²]	0,152	0,0375
Współczynnik rozproszenia energii λ	0,723	0,55
Jednostkowa energia rozproszona Φ_R [J/kg·m]	0,11	0,021

4. Wpływ intensywności hamowania na energochłonność ruchu

Rozpatrując wpływ intensywności hamowania na energochłonność ruchu samochodu w cyklu jezdnym, należy uwzględnić możliwość realizacji tego samego profilu prędkości (w sensie geometrycznym) przy różnych uwarunkowaniach zewnętrznych, decydujących o wartości parametrów kinematycznych poszczególnych faz ruchu. Wyróżnić można przy tym, dwa przypadki ruchu w warunkach rzeczywistych. Pierwszy z nich dotyczy sytuacji, w której warunki zewnętrzne nie zmuszają kierowcy do zahamowania na ściśle określonym odcinku drogi. Przypadek ten dotyczy głównie hamowania w trakcie tzw. jazdy swobodnej [3], [6], głównie w jeździe drogowej. Drugi przypadek dotyczy konieczności zahamowania na ściśle określonym odcinku drogi. Dlatego w przedstawionej niżej analizie rozpatrzono dwa modele ruchu, charakteryzujące się tym, że samochód realizując wielokrotnie każdy z profili prędkości, jak na rys. 3, hamuje za każdym razem z inną intensywnością.

Każdy z przyjętych modeli ruchu dotyczy jazdy według tego samego profilu prędkości, obejmującego: rozpędzanie ze stałym przyspieszeniem, jazdę ze stałą prędkością oraz hamowanie ze stałym opóźnieniem do zatrzymania. Różnica między



Rys. 3. Profile prędkości przyjęte do analizy energochłonności
 Fig. 3. Speed trajectories applied in the analysis of the tractive energy

mini polega na przyjęciu jako zmienne różnych faz ruchu, zależnych od intensywności hamowania. Interpretację graficzną badanych zależności przedstawiono na wykresach, sporządzonych dla przykładowego samochodu przy założeniu: $v_U = 60$ km/h, $f_i = 0,015$, $K = 0,45$ kg/m, $\rho = 0,05$, $m = 1200$ kg.

Dla pierwszego modelu ruchu (rys. 3a) parametry profilu prędkości fazy napędzania są stałe; zmienna jest natomiast długość drogi hamowania, a więc i długość drogi całkowitej cyklu, czyli: $L_A = \text{const}$, $L_U = \text{const}$, $L_H \neq \text{const}$, $L_C \neq \text{const}$. Ponieważ, w tym przypadku, zależnie od intensywności hamowania, samochód przebywa za każdym razem odcinek drogi o innej długości, zatem jako funkcję celu przyjęto energochłonność jednostkową.

Dla takiego modelu ruchu energochłonność jednostkowa

$$\Phi_C = \frac{E_C}{m(L_N + L_H)}, \quad (44)$$

z w postaci szczegółowej

$$\Phi_C = \frac{gf_i L_N + \frac{K}{m} g_N L_N}{L_N + L_H}. \quad (45)$$

Zgodnie z równaniem (45) energochłonność jednostkowa dla przyjętej zmiennej niezależnej maleje nie liniowo w miarę wydłużania się drogi hamowania, co obrazuje wykres przedstawiony na rys. 4a.

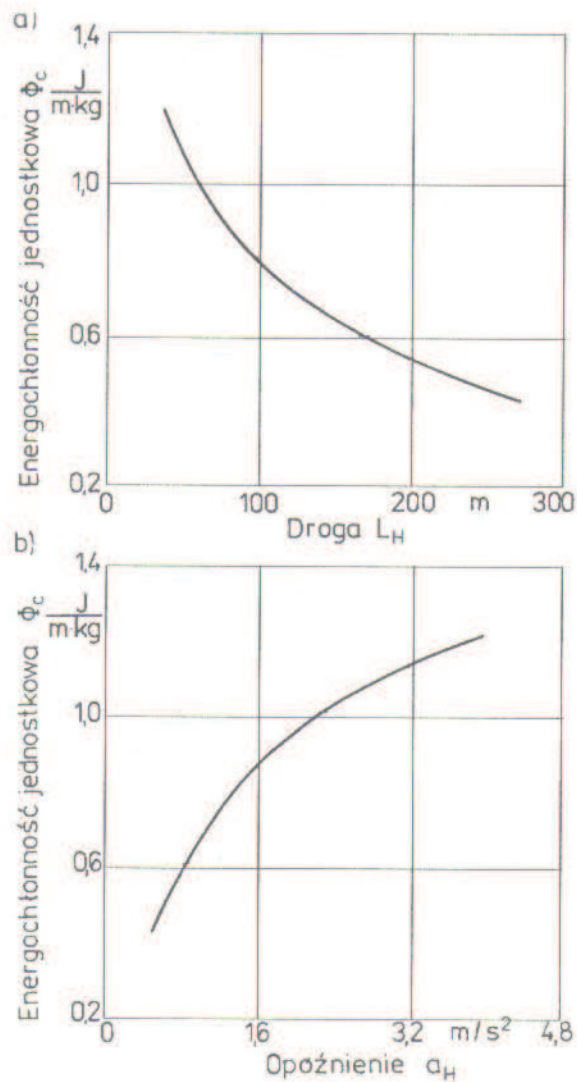
Podstawienie do wzoru (45) w miejsce drogi hamowania wyrażenia

$$L_H = \frac{v_U^2}{2a_H},$$

proceeds to

$$\Phi_c = \frac{gf_1 L_N + \frac{K}{m} g_N L_N}{L_N + \frac{v_U^2}{2a_H}} \quad (46)$$

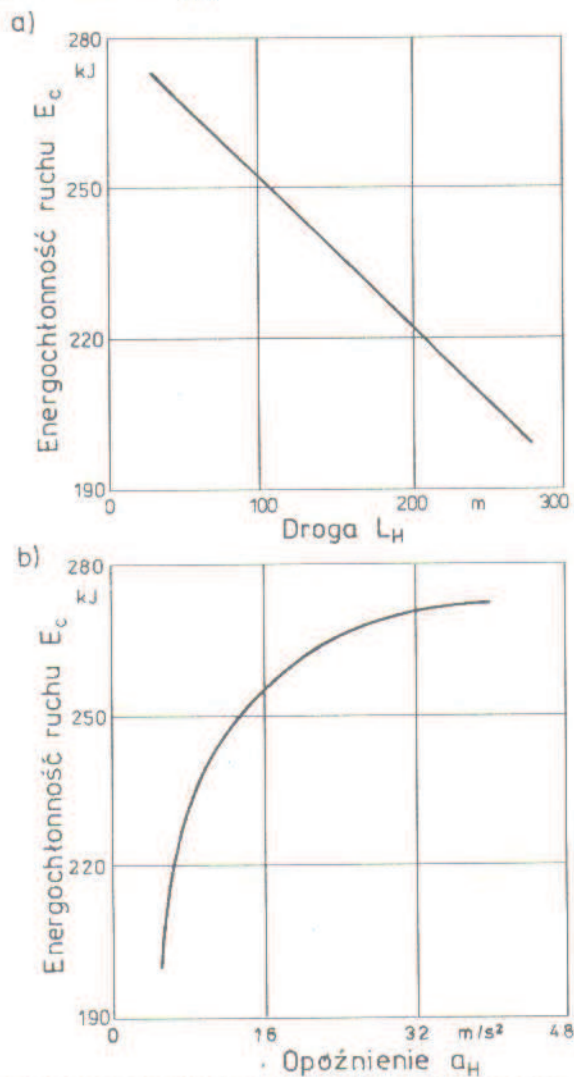
An increase in the intensity of braking causes a non-linear increase in the specific energy of the cycle, as shown in the graph in Fig. 4b.



Rys. 4. Wpływ intensywności hamowania na energochłonność jednostkową cyklu wg rys. 3a w funkcji: a) drogi, b) przyspieszenia

Fig. 4. The influence of braking — intensity on specific energy of cycle according to Fig. 3a in function: a) distance of braking, b) magnitude of deceleration

Dla drugiego modelu ruchu (rys. 3b): $L_C = \text{const}$, $L_A = \text{const}$, $L_H \neq \text{const}$, $L_N \neq \text{const}$. Takiemu przypadkowi ruchu odpowiada w praktyce sytuacja, w której kierowca, po osiągnięciu stałej prędkości, zauważa w pewnej odległości przeszkodę, wymagającą zatrzymania samochodu na odcinku drogi o długości $(L_U + L_H)$. W tym przypadku kierowca może rozpocząć wcześniej hamowanie z małą intensywnością, lub kontynuować dłużej jazdę z poprzednią prędkością, a następnie hamować z odpowiednio dużą intensywnością. Wobec tego, że każdy przejazd odbywa się na odcinku drogi o tej samej długości jako funkcję celu przyjęto energochłonność ruchu, opisaną poprzednio równaniem (4).



Rys. 5. Wpływ intensywności hamowania na energochłonność ruchu cyklu — rys. 3b w funkcji:
 a) drogi, b) przyspieszenia
 Fig. 5. The influence of braking — intensity on tractive energy of cycle according to Fig. 3b in function:
 a) distance of braking, b) magnitude of deceleration

$$E_C = mgf_1 L_N + K\vartheta_N L_N + 0,5mv_U^2.$$

Dla przyjętego modelu ruchu w równaniu tym zmienną niezależną jest długość drogi fazy napędzania, o której decyduje intensywność hamowania, gdyż $L_N = L_C - L_H$. Ponieważ, przy tej samej drodze cyklu, ze wzrostem drogi hamowania następuje skrócenie fazy napędzania, zatem maleje również energochłonność ruchu cyklu według funkcji liniowej (rys. 5a). Natomiast między długością fazy napędzania a opóźnieniem obowiązuje zależność

$$L_N = L_C - \frac{v_U^2}{2a_H},$$

z której wynika nie liniowy przyrost funkcji $E_C(a_H)$, jak na rysunku 5b. Warto zauważyć, że przyrost ten zdecydowanie maleje w miarę wzrostu wartości opóźnienia.

5. Podsumowanie

Wyprowadzone równania, przedstawiające związki między energochłonnością jednostkową a parametrami fazy hamowania umożliwiają dokonywanie symulacji ruchu samochodu w cyklu jezdny. Wyniki przeprowadzonej, na podstawie tych równań, analizy wpływu intensywności hamowania na energochłonność jednostkową i na współczynnik rozproszenia energii mogą być uogólnione również na cały złożony cykl jezdny przy założeniu, że składa się on z jednakowych profili (modułów) elementarnych. Z analizy tej wynika znaczący wpływ intensywności hamowania na energochłonność jednostkową, która jest wielkością proporcjonalną do przebiegowego zużycia paliwa. Wpływ ten jest nie do pominięcia, zwłaszcza w warunkach jazdy miejskiej, co powinno być bodźcem do podjęcia, szerzej niż dotąd zakrojonych, badań zmierzających do opracowania konstrukcji i wdrożenia w samochodach układów zapewniających zmniejszenie współczynnika rozproszenia energii.

Literatura

- [1] GILMORE D.B.: *Fuel economy goals for vehicles with regenerative braking energy storage systems*. International J. of Vehicle Design, vol. 13, nr 2, 1992.
- [2] KORKMAZ F.: *Voraussetzungen für einen erfolgversprechenden Einsatz von Fahrzeugantrieben mit Bremsenergie Rückgewinnung*. Automobiltechnische Zeitschrift, nr 4, 1980.
- [3] SIŁKA W.: *Hamowanie jako proces rozpraszania energii kinetycznej samochodu*. Folia Societatis Scientiarum Lublinensis. Technika, vol. 2, nr 1–2, 1993.
- [4] SIŁKA W.: *Analiza energochłonności ruchu samochodu ze zmienną prędkością*. Zeszyty Naukowe WSI Opole, seria Studia i Monografie, z. 80, Opole, 1995.
- [5] SIŁKA W.: *Intensywność zmiany prędkości a energochłonność ruchu samochodu*. Archiwum Motoryzacji nr 2, 1996, PWN, Warszawa.
- [6] SIŁKA W.: *Energochłonność ruchu samochodu*. WNT, Warszawa 1997.
- [7] SOVRAN G., BOHN M.: *Formulae for the Tractive-Energy Requirements of Vehicles Driving the EPA Schedules*. SAE Paper, nr 810184, 1981.

**The influence of braking segments on tractive energy-required by vehicles
in driving schedule**

S u m m a r y

Any arbitrary driving schedule of a car contains respective basic phases of motion, i.e. acceleration, constant speed and deceleration. The complete of the three phases is composed of a single cycle (driving module). A driving schedule is a specified temporal variation of vehicle speed. In on-road operations schedules, significantly different in character, exist.

A primary input to any study of automobile fuel economy is the tractive energy required by vehicle to negotiate any particular driving schedule. This energy requirement, understood as the magnitude of input-energy which must be supplied to driven wheels, depends on the particular characteristic of the vehicles and the detailed nature of the schedule expressed by his kinematic parameters. However, this energy is supplied during the powered operation (i.e. acceleration plus cruise) only, of very important meaning are also the parameters of unpowered segments of a schedule. The magnitude of deceleration depends on distance travelled during the unpowered operation. For that reason the parameter of interest to fuel economy studies is the tractive energy per unit distance travelled on schedule.

There is special interest in the vehicle kinetic energy lost by braking since it represents maximum potential of regenerative-braking schemes for reducing the energy requirements of automobiles on the driving schedules. In braking segment of module an applied braking force must retard vehicle motion in order for a vehicle to negotiate the prescribed speed versus time trajectory. Braking is not the only means by which energy is dissipated during unpowered operation. There is also direct dissipation through the action of the rolling and aerodynamic resistances. However, these dissipations also occur during the powered segments, since they exist whenever a vehicle is in motion.

The paper contains a comprehensive analysis of energy dissipated by braking action and analyse of the relationships between the kinetic parameters of braking phase and tractive energy requirement of a car in driving schedule. Also the influence of the magnitude of deceleration on the coefficient energy dissipation by braking is analysed. The results are compact formulae in which specific tractive energy, i.e. the energy per unit mass per unit distance travelled, is correlated with intensity of deceleration. These formulae permit the simulation of motion of a car for any prescribed schedule in order to evaluate the range of energy dissipated by braking.