

Aleksander UBYSZ

TEORETYCZNE ASPEKTY WYZNACZANIA WSPÓŁCZYNNIKA OPORÓW TOCZENIA METODĄ WYBIEGU ZE STAŁĄ PRĘDKOŚCIĄ

Streszczenie. W opracowaniu przedstawiono metodę określania współczynnika oporów toczenia samochodów osobowych metodą wybiegu ze stałą prędkością z wykorzystaniem jezdni o stałym wzdłużnym pochyleniu. Zaletą metody jest jej uniwersalność oraz ograniczone wymagania względem aparatury pomiarowej, natomiast wadą: konieczność dokładnego określenia kąta pochylenia wzdłużnego dostatecznie długiego odcinka jezdni metodami geodezyjnymi.

THE THEORETICAL ASPECTS OF CALCULATING OF THE ROLLING RESISTANCE COEFFICIENT BY THE COASTING AT CONSTANT SPEED METHOD

Summary. In this paper the method of calculating of the rolling resistance coefficient f_r in the passenger cars by the coasting at constant speed method on the road characterized by constant road grade have been shown. This method is very universal and isn't very demanding with reference to measuring apparatus, which is its main advantage. Unfortunately it is necessary to determine very precisely the road grade by the geodetic methods, which is its the main disadvantage.

1. WSTĘP

Istotnym problemem przy obliczaniu siły oporów ruchu samochodu jest w miarę dokładne rozeznanie wartości współczynnika oporów toczenia kół pojazdu. Na ile jest to problem złożony, świadczy różnorodność formuł opracowanych do jego obliczeń [1, 2, 3] oraz systematycznie powtarzające się próby uaktualniania wiedzy na ten temat, głównie na drodze empirycznej [4, 5]. Rozbieżności w wynikach są rezultatem złożoności zagadnienia, przyjętych założeń i materiału badawczego, a także systematycznego postępu w zakresie budowy opony.

Złożoność zagadnienia jest rezultatem wpływu wielu czynników na wielkość współczynnika oporów toczenia, z których najważniejsze to [6, 7]:

- opona - jej konstrukcja, materiał, wymiary oraz rzeźba bieżnika,
- ciśnienie powietrza w ogumieniu,
- temperatura ogumienia,

- prędkość jazdy samochodu,
- nawierzchnia jezdni - jej stan, kształt i rodzaj.

2. ZAŁOŻENIA TEORETYCZNE

Zależnie od wyżej wymienionych czynników wartość współczynnika oporów toczenia może się dla gładkiej jezdni wahać w dość szerokim zakresie od 0,010 do 0,020, dochodząc w pewnych przypadkach do wartości charakterystycznych tylko dla samochodów ciężarowych - 0,008 [8]. Dlatego też niezwykle ważne jest opracowanie takiej metody pomiarów, która bez specjalnie skomplikowanej aparatury pomiarowej [6], w warunkach rzeczywistych (dla określonej nawierzchni drogi) dla różnych zakresów prędkości pozwoli dla konkretnego pojazdu obliczyć współczynnik oporów toczenia f_t . Takie możliwości daje jezdnia o możliwie długim wzdłużnym pochyleniu, na której - w zależności od jego kąta - pojazd może jechać z możliwie stałą prędkością wybiegu. W metodzie tej obliczony współczynnik nie jest obciążony błędem warunków laboratoryjnych (droga imitowana za pomocą wirującego bębna) [4, 5].

Metoda ta ma wiele zalet w stosunku do metody wybiegu na poziomej jezdni [6]. A mianowicie:

- przez odpowiedni dobór odcinków drogi o różnym wzdłużnym pochyleniu można obliczyć rzeczywiste f dla różnych stałych prędkości jazdy; dla $\alpha = 2,5^\circ$ f obliczymy dla $v = 120-140$ km/h, dla $\alpha = 2^\circ$ prędkość stała wybiegu $v = 90-110$ km/h, $\alpha = 1,5^\circ$ - $v = 50 - 70$ km/h, $\alpha = 0,8^\circ$ - $v = 25 - 35$ km/h,
- badania ograniczają się na danym pomiarowym odcinku drogi do wąskiego zakresu prędkości jazdy, w którym funkcje zależności z nieznacznym błędem można aproksymować funkcjami liniowymi, np. oporów aerodynamicznych, przyspieszeń lub opóźnień,
- w terenie wyżynnym (woj. śląskie) wytypowanie odpowiednio długich, ze względu na bezwładność samochodu, odcinków drogi o odpowiednim nachyleniu nie nastęrcza większych trudności,
- pomiary ze względu na stałą prędkość można prowadzić na jezdni w normalnym ruchu, bez konieczności jego tamowania, a w przypadku trudności można je powtórzyć.

Jak wykazały pomiary wstępne, w przypadku trudności w znalezieniu odpowiednio długiego odcinka drogi o stałym nachyleniu, nie popełni się większego błędu prowadząc badania na jezdni o profilu „łamanym”, tzn. składającego się z kilku odcinków o niewielkim zróżnicowaniu kątów ich wzdłużnego pochylenia, a do obliczeń przyjmować kąt α zawarty pomiędzy odcinkiem łączącym graniczne punkty odcinka pomiarowego a poziomem (rys.1). Ewentualne, w pełni możliwe, różnice w prędkości samochodu na początku i końcu odcinka pomiarowego można uwzględnić w członie „bezwładnościowym” równania na sumę sił oporów ruchu:

$$F = mgf \cdot \cos\alpha + K(v_{sr} + w)^2 + am - mg \cdot \sin\alpha \quad (1)$$

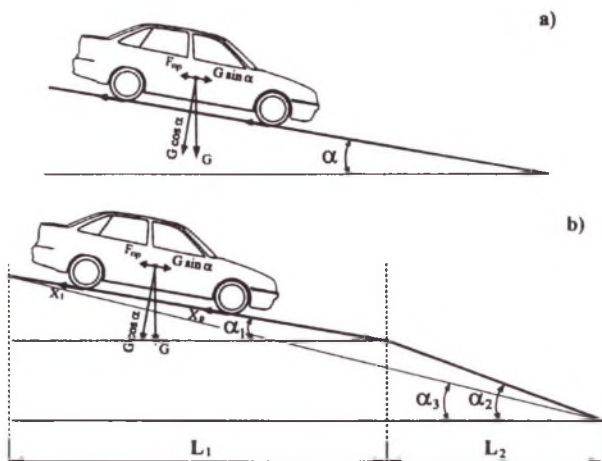
gdzie:

- m- masa rzeczywista samochodu, kg,
- g- przyspieszenie ziemskie, $9,81 \text{ m/s}^2$,
- h- współczynnik oporów toczenia,
- K- współczynnik oporów powietrza, kg/m.,
- v - średnia prędkość samochodu na odcinku pomiarowym, m/s,
- w - składowa wzdłużna prędkości wiatru, m/s,
- a - przyspieszenie (opóźnienie) średnie na odcinku pomiarowym, m/s^2 ,
- α - wzdłużne (średnie) pochylenie odcinka drogi, $[^\circ]$.

Ponieważ w czasie jazdy wybiegiem siła napędowa jest równa zero z równania (1), po przekształceniu otrzymamy wzór obliczeniowy współczynnika oporów toczenia:

$$f = \operatorname{tg} \alpha - \frac{K (v_{sr} \pm w)^2}{m g \cos \alpha} - \frac{a}{g \cos \alpha} \quad (2)$$

gdzie v_{sr} jest średnią arytmetyczną prędkości początkowej i końcowej na odcinku pomiarowym.



Rys. 1. Schemat do obliczeń współczynnika oporów toczenia f przy zjeździe samochodu wybiegiem ze stałą prędkością ze wzniesienia o kącie wzdłużnego pochylenia stałym (a) lub zmiennym (b) - patrz tab. 1

Fig. 1. The diagram used during calculating of the rolling resistance coefficient f_t during downhill drive by coasting at constant speed method of a car from the hill characterized by the constant (a) or variable (b) road grade

W równaniu (2), ze względu na cosinus małych kątów bliski jedności, można tę funkcję trygonometryczną pominąć. Przemienność znaków należy interpretować w zależności od tego, czy przy przejeździe przez zmierzony odcinek drogi prędkość narasta (znak odejmowania - ruch przyspieszony) lub maleje (znak plus - opóźniony). Człon ten ma kluczowe znaczenie korygujące niezbyt trafnie dobranej prędkości początkowej lub zmiany kąta pochylenia jezdni odpowiednio długiego odcinka pomiarowego. Przyrządy niezbędne do pomiarów to stoper z możliwością dwustopniowego pomiaru czasu przejazdu na dwu odcinkach łączonych oraz ręczny wiatromierz do pomiaru wahań prędkości wiatru na kierunku jazdy.

W tab. 1 scharakteryzowano odcinki pomiarowe dla kilku prędkości jazdy, z których dwa - 100-110 i 45-60 km/h jako najdokładniejsze - przyjęto do badań.

Współczynnik oporów aerodynamicznych K obliczono z równania (1), wykorzystując pomiar uzupełniający na odcinku drogi o innym pochyleniu, i podstawiono do rów. (2). Pomiar przyspieszenia i prędkości średniej przejazdu odcinka pomiarowego obliczono na podstawie wskazań tachometru (dokładność odczytu 1 km/h) i czasu przejazdu, co znacznie popularyzuje metodę obliczeń, czyniąc ją dostępną dla każdego. Aby uniknąć wpływu bocznej składowej wiatru, najlepiej pomiary prowadzić przy bezwietrznej pogodzie.

Tabela 1

Charakterystyka wytypowanych do pomiarów współczynnika oporów toczenia f_t odcinków jezdni w aglomeracji katowickiej

Lp.	Jeźdźnia	Ilość odcinków	Oznaczenie początku	Oznaczenie końca	α [°]	$\alpha_{\text{śr}}$ [°]	$\text{tg } \alpha_{\text{śr}}$	L_{pom} [m]	v [km/h]	Kierunek zjazdu	Uwagi
<i>Katowice</i>											
1	Murckowska	1/3	przystanek	znak poziomy	1,86÷2,00	1,91	0,0334	600	100÷110	S-W	
2	Murckowska	2/3	znak poziomy	tabliczka odległości	2,06÷2,40	2,296	0,0401	400	110÷120	S-W	
3	Murckowska	3/3	przystanek	tabliczka odległości	1,86÷2,40	2,066	0,03607	1000	95÷105	S-W	
4	Lotnisko	1	znak poziomy - krzew	tabliczka kierunkowa	1,31÷1,257	1,283	0,0224	310	47÷52	E-N-E	
5	Nowotarska	1	znak poziomy - krzew	znak poziomy	-	1,1304	0,0197	220	48÷55	S-S-E	
6	Damrota	1	1-szy znak P	3-ci znak P	1,077÷1,16	1,12	0,0196	213	45÷52	N	
<i>Chorzów</i>											
7	Brzozowa	1	znak poziomy	znak poziomy	0,843÷0,667	1,843	0,0147	265	25÷30	S	

3. OCENA DOKŁADNOŚCI OBLICZEŃ

Aby właściwie oszacować wielkość błędu obliczeń współczynnika oporów toczenia, należy w pierwszej kolejności ustalić dokładność pomiaru i obliczeń poszczególnych wielkości wchodzących w skład równania (2). Szczegóły oszacowania błędu metodą Gaussa przedstawiono w pracy [9]. Ponieważ w równaniu (2) największy błąd popełniamy przy odczycie na tachometrze samochodu zmiany prędkości na odcinku pomiarowym, wynoszącym w najlepszym przypadku $\Delta v = 1$ km/h, to ze względu na dużą bezwładność samochodu istnieje dla wymaganej dokładności obliczeń minimalna długość odcinka pomiarowego dla każdej z prędkości wybiegu.

Prędkość średnią przejazdu oblicza się dokładnie na podstawie długości i czasu przejazdu odcinka pomiarowego.

Tabela 2

Wymagane odcinki pomiarowe, zapewniające dla każdej z prędkości wybiegu wymaganą dokładność obliczeń współczynnika oporów toczenia $\Delta f = 0,0005$ przy dokładności odczytu $\Delta v = 1,0$ km/h

V [km/h]	30	40	50	60	90	110
L [m]	460	611	771	916	1380	1700

Z przedstawionych w tab.2 danych widoczne jest, że w celu zapewnienia wymaganej dokładności obliczeń, ze wzrostem średniej prędkości przejazdu liniowo wzrasta długość odcinka pomiarowego. Porównując te wyniki z danymi z tab.1 widoczne jest, że warunku długości odcinka pomiarowego nie spełnia żaden z odcinków. Najbliższe spełnienia tego wymogu są odcinki pomiarowe na ul. Murckowskiej w całości, Batorego i Lotnisko. Pomimo to wymienione ulice zapewniają dokładność pomiaru współczynnika oporów toczenia z dokładnością do $\Delta f = 0,0008$.

Na dokładność obliczeń współczynnika oporów toczenia samochodu, który jest uśrednioną wartością dla wszystkich kół jezdnych, duży wpływ ma dokładność wyznaczenia kąta oraz określenie składowej wiatru na kierunku jazdy, faktycznie działającej na pojazd.

Kąt wzdłużnego pochylenia jezdni wyznaczono z dużą dokładnością metodą geodezyjną za pomocą teodolitu o dokładności wyznaczania różnicy poziomu terenu 10 cm/1000m. Jest to dokładność pozwalająca na określenie tangensa kąta z dokładnością przekraczającą znacznie nasze wymagania - do 0,0001.

Jak znaczny może mieć wpływ składowa wiatru i jaka jest dokładność pomiarów i obliczeń przedstawiono w tab. 3 dla samochodu Opel Astra 1,4 16V Kombi. Pomiar wykonano na dwu odcinkach pomiarowych, gdy wiał z pn. zmienny wiatr z prędkością 0-10 m/s (silnie rozbudowane cummulonimbusy), z których jeden był prostopadły do kierunku wiatru. Wartość średnia wiatru wynosiła 2,1 m/s (dane Zakładu IMiGW na lotnisku Muchowiec).

Tabela 3

Wyniki pomiarów współczynnika oporów toczenia samochodu Opel Astra 1,4 16 V Kombi na dwu odcinkach pomiarowych w dn.10.05.2001

Odcinek pomiarowy	Kierunek wiatru	Pomiar f		
		1.	2.	3.
Lotnisko	←↔	0,0144	0,0143	-
Murckowska	↘↘	0,0097(w=0)	0,0128(w=2m/s)	0,0153(w=3m/s)

W dniu pomiarów na ul. Murckowskiej istniały dwa rodzaje zakłóceń składowej wiatru na kierunku jazdy. Pierwszy to wspomniana zmienność siły wiatru. Drugi rodzaj wynika z faktu, że wiatr wieje zza góry, a więc można oczekiwać jego zaniku za wzniesieniem, co, jak się okazało, jest fałszem, na co wskazuje zestawienie wyników. Wyniki wskazują na to, że za wzniesieniem na pojazd w czasie przeprowadzonego pomiaru działała średnia składowa wiatru o sile ok. 2,35 m/s. Z przedstawionych wyników dla średniej prędkości wybiegu 100-115 km/h widoczny jest znaczny wpływ składowej wiatru „w” na wynik obliczeń. Stąd można wyciągnąć ważny wniosek, że pomiary należy prowadzić przy bezwietrznej pogodzie, a w przeciwnym razie należy sporządzić wykres wartości składowej wiatru na kierunku jazdy na badanym odcinku w czasie pomiarów, na podstawie którego będzie można określić jej wartość średnią.

Przy tego typu stanie chmur istnieje też trzeci rodzaj zakłóceń, wynikający ze zmienności kierunku wiatru pod chmurami.

Dlatego też w celu wyeliminowania wpływu składowej wiatru w pomiarach drogowych wskazane jest nawet przy bezwietrznej pogodzie używać ręcznego wiatromierza, aby zaobserwować ewentualne zakłócenia strugi wiatru spowodowane np. w dużym ruchu sąsiednimi pojazdami.

Przydatny w tego typu pomiarach jest dostępny na naszym rynku elektroniczny **wiatromierz turbinkowy WSC 888 H** o zakresie prędkości od 0 do 170 km/h (0 do 47 m/s) z wyświetlaczem aktualnej, średniej i maksymalnej prędkości i minimalnej rozdzielczości pomiarowej 0,1 m/s. Dodatkowo przyrząd zaopatrzony jest w miernik 4 typów temperatury otoczenia. Pomiar składowej wiatru na kierunku jazdy zapewni obudowa turbinki kierunkowym tunelem aerodynamicznym, którego zadaniem jest niedopuszczenie do turbinki składowej prostopadłej do kierunku wiatru.

4. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń wstępnych w założonej metodzie pomiaru współczynnika oporów toczenia metodą wybiegu ze stałą prędkością można wyciągnąć następujące wnioski:

1. W przedstawionej metodzie można, przy odpowiednio wysokiej dokładności danych o pojeździe i odpowiednio długim odcinku pomiarowym, z dostatecznie dużą dokładnością obliczyć średni dla wszystkich kół jezdnych współczynnik oporów toczenia.
2. O ile nie można pomiarów prowadzić przy bezwietrznej pogodzie, to konieczne jest zminimalizowanie wpływu składowej wiatru poprzez jej dokładny pomiar jedną z metod wskazanych w opracowaniu [9].
3. Zaletą przedstawionej metody jest pomiar współczynnika oporów toczenia w warunkach rzeczywistych, tj. na jezdni o określonej makro- i mikrochropowatości, oraz pojazdu rzeczywistego, o określonym obciążeniu poszczególnych kół, po niej jadącego.

Literatura

1. Arczyński S.: Teoria ruchu samochodu. Wyd. Pol. Warszawskiej, Warszawa 1976.
2. Staska G.: Bestimmung der Fahrwiderstande im Fahrversuch. ATZ nr 4, 1984.
3. Dębicki M.: Teoria samochodu. WNT, Warszawa 1969.
4. Mitschke M.: Dynamika samochodu. Napęd i hamowanie. WKŁ, Warszawa 1987.

5. Taryma S., Mioduszewski P.: Budowa opony a jej opór toczenia. Teka Komisji Naukowo-Problemowej Motoryzacji nt.: Konstrukcja, badania, eksploatacja, technologia pojazdów samochodowych i silników, z. 20, Kraków 2000.
6. Siłka W., Hetmańczyk I.: Estymacja parametrów modelu energetycznego samochodu na podstawie próby wybiegu. Teka jw. z.21, Kraków 2000.
7. Ubysz A., Dykier M.: Ocena przebiegowego zużycia paliwa samochodów osobowych. Zeszyty Naukowe Pol. Śląskiej seria Transport, z. 38, Gliwice 1999.
8. Guzella L., Martin R.: Das SAVE - motor concept. MTZ nr 10, 1998, s. 644-653.
9. Ubysz A.: Energochłonność całkowita i zużycie paliwa samochodów osobowych w różnych testach jezdnych. Materiały niepublikowane (zwarte).

Recenzent: Dr hab. inż. Wojciech Siłka, Prof. Pol. Opolskiej

Abstract

In this paper the method of calculating of the rolling resistance coefficient f_r in the passenger cars by the coasting at constant speed method on the road characterized by constant road grade have been shown. This method is very universal and isn't very demanding with reference to measuring apparatus, which is its main advantage. Unfortunately it is necessary to determine very precisely the road grade by the geodetic methods, which is its the main disadvantage. Also the measuring and calculating errors of the rolling resistance coefficient f_r with taking into account the component of the wind and when the wind doesn't blow have been determined.