

Grzegorz ŚLASKI¹

BADANIA SZACUNKOWE OPORÓW RUCHU POJAZDU UŻYTKOWEGO W DROGOWEJ PRÓBIE WYBIEGU

Opory ruchu pojazdu w obliczeniach teoretycznych wyznacza się korzystając z ugruntowanej wiedzy o ich charakterze oraz posiadanych informacji o współczynnikach występujących w zależnościach, które sformułowano dla ich obliczenia. Jednak problemem może być posiadanie informacji o rzeczywistych wartościach współczynników przyjmowanych do obliczeń, charakteryzujących konkretne pojazdy lub ich podzespoły a także warunki środowiska w jakich porusza się pojazd. Ostateczną weryfikacją oszacowywanych na podstawie obliczeń wartości oporów ruchu jest ich zgodność z oporami obserwowanymi w warunkach rzeczywistej eksploatacji. W artykule autor przedstawił próbę oszacowania oporów ruchu (toczenia i powietrza) dla przykładowego dwuosiowego pojazdu użytkowego o masie 15 t na podstawie próby wybiegu.

ESTIMATE OF COMMERCIAL VEHICLE MOTION RESISTANCE WITH USE OF COASTDOWN TEST

Vehicle motion resistance can be calculated using good established theories about these resistances and having knowledge about resistance coefficient used in resistance formulas. But it can be a problem to know true values of these coefficients, concerning specific vehicles, their subsystems or environment of vehicle motion. The last verification of estimated resistance forces is its equality to resistance forces observed during vehicle operation.

In his paper author presented an attempt at estimation motion resistance (air and rolling resistance) of exemplary two axle commercial vehicle with total weight 15 tons on the base coastdown test.

1. WSTĘP

Opory ruchu samochodu wpływają na jego energochłonność. Ta w powiązaniu z możliwościami magazynowania energii w pojeździe wpływa na jego potencjalny zasięg bez uzupełniania energii. O ile w pojazdach napędzanych silnikami spalinowymi ze względu na dużą gęstość energii w paliwach płynnych nie jest to w zasadzie problemem, o tyle już przy wykorzystaniu obecnych źródeł energii elektrycznej w pojazdach, których gęstość energii jest kilkakrotnie mniejsza oznacza to, że każde dodatkowe zapotrzebowanie

¹ Politechnika Poznańska, Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych, ul. Piotrowo 3,
60-965 Poznań, 061 6652 880, e-mail: grzegorz@slaski.eu

na energię przekłada się na dodatkową masę, którą trzeba przewozić co ogranicza użyteczną ładowność pojazdu lub podnosi jego masę zwiększając zużycie energii przez pojazd.

Obliczeniowe oszacowanie oporów ruchu jest stosunkowo proste pod warunkiem znajomości charakterystyk technicznych pojazdu i parametrów jego podzespołów wpływających na generowanie określonych oporów ruchu. W tym miejscu pojawia się jednak często problem z uzyskaniem dokładnej wiedzy o tych wszystkich parametrach. Posługiwanie się danymi literaturowymi narażone jest na błędy związane z oderwaniem podawanych wartości od dokładnej informacji o warunkach jej uzyskania – obiekcie, metodyce i warunkach badań.

Trzeba też podkreślić, że rzeczywiste opory ruchu w dużym stopniu zależą od warunków eksploatacji - zmiennych warunków dotyczących różnego nachylenia dróg (zmiennie opory wzniesienia), zmienności kierunku i siły wiatru oraz temperatury powietrza (zmiennie opory powietrza) oraz zmiennego profilu prędkości najbardziej nieprzewidywalnego w warunkach intensywnego ruchu miejskiego (zmiennie opory bezwładności). Stąd każde obliczenia jak i pomiary będą miały zawsze charakter szacunkowy ponieważ rzeczywista szczegółowa wartość sumarycznych oporów ruchu w czasie eksploatacji ma charakter w pewnym stopniu losowy.

2. OBIEKT I METODYKA BADAŃ

Obiektem analizy były opory toczenia i powietrza dwuosioowego samochodu użytkowego o masie 15 t i przybliżonych wymiarach gabarytowych - długości 9 m, szerokość 2,4 m i wysokość 2,9 m w czasie ruchu po nawierzchni asfaltowej na drodze poziomej. Samochód wyposażony był w ogumienie o rozmiarze 265/70 R19,5.

Metodyka pomiarów oparta jest o analizę ruchu opóźnionego samochodu podczas tzw. próby wybiegu, z założeniem, że przyczyną powstającego opóźnienia są występujące podczas ruchu opory. Jeśli możliwe jest założenie, że droga na której wykonywana jest próba wybiegu jest drogą poziomą to można przyjąć, że opory wzniesienia są równe zeru. Innym upraszczającym założeniem jest zaniedbanie oporów powietrza dla bardzo małych prędkości – rzędu kilkunastu km/h.

To drugie założenie pozwala oszacować same opory toczenia, bez uwzględnienia oporów powietrza. Dla wyeliminowania niepewności co do wpływu drobnych zmian nachylenia drogi lub kierunku i siły wiatru próby należy przeprowadzić dwóch kierunkach jazdy i uśrednić otrzymane wyniki co powinno pozwolić na wyliniowanie tych wpływów.

2. WYZNACZANIE OPORÓW TOCZENIA

W przypadku próby wybiegu, polegającej na toczeniu się samochodu z odłączonym napędem (skrzynia biegów w pozycji neutralnej) rozpoczynanej od małej prędkości (10 ÷ 15 km/h) można przyjąć, że opory powietrza są pomijalne i wynikiem pomiaru jest tylko wypadkowa siła oporów toczenia F_t , o której dla małych prędkości można powiedzieć, że jest stała, niezależna od prędkości ($F_t = mg \cdot f$). Wychodząc z tego założenia jako wynik próby można przyjąć wartość siły wyznaczonej na podstawie pomiaru średniego opóźnienia z całego przejazdu.

Współczynnik oporów toczenia f_t może być zmienny wraz z prędkością. Jego wartość dla małych prędkości jazdy oznaczyć można wtedy jako f_{t0} . Ze wzrostem prędkości zwiększa się praca odkształceń opony w jednostce czasu, wskutek czego wzrasta moc strat energetycznych spowodowanych histerezą opony [1].

W realizowanych badaniach próby wykonano od prędkości 20 km/h, ale w trakcie analizy oporów powietrza ustalono średnią wartość oporów powietrza w trakcie takiej próby i wprowadzono odpowiednią poprawkę.

Próby wykonano trzykrotnie w dwóch kierunkach – pozwoliło to po obliczeniu średniej, zniwelować wpływ ewentualnego nachylenia drogi oraz ewentualnego wiatru, którego prędkość może się dodawać jak i odejmować w stosunku do prędkości pojazdu względem nawierzchni.

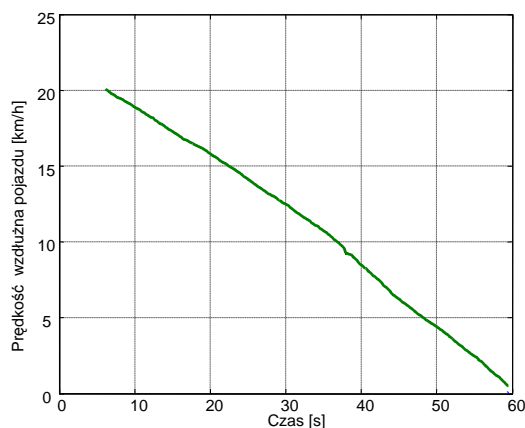
2.1 Metodyka opracowania wyników badań

Dla każdej z prób dokonano analizy przebiegu sygnałów prędkości oraz przyspieszenia (opóźnienia).

Kolejne etapy obróbki danych były następujące:

- dla każdego pliku wybrano przedział danych z quasi-ustalonym opóźnieniem,
- wyznaczono przedział zmiany prędkości Δv i przedział czasu Δt będące przedmiotem analizy,
- na podstawie Δv prędkości i Δt czasu wyznaczono średnie opóźnienie a_{sr} dla obu kierunków jazdy z wcześniej wyliczonych wartości średnich ze wszystkich analizowanych prób w dwóch kierunkach ,
- na podstawie przebiegu prędkości w czasie $v(t)$ wyznaczono średnią drogę wybiegu.

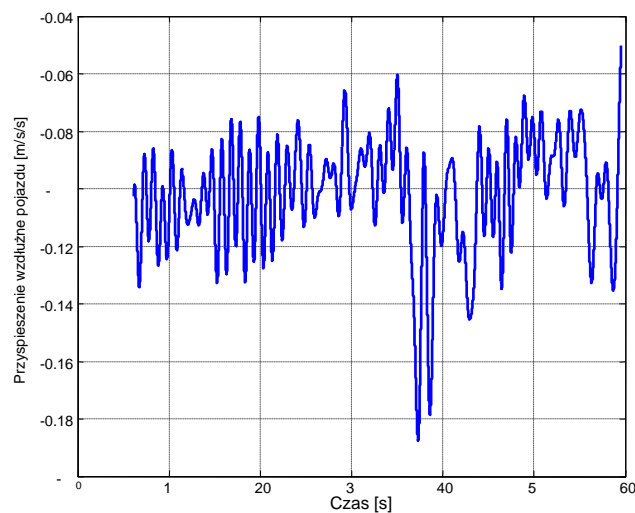
Poniżej przedstawiono przykładowe przebiegi zmian prędkości i przyspieszenia.



Rys. 1. Przykład zmian prędkości pojazdu podczas próby wybiegu

Na podstawie zmierzonego sygnału prędkości obliczono przebieg zmian opóźnienia pojazdu. Przedstawiony przykładowy przebieg zilustrowano na rys. 2. Charakter zmian przyspieszenia tłumaczy charakter określenia „quasi-ustalony” - opóźnienie jest niestety ze

względu na nierówności nawierzchni zmienne i tylko przyjęcie wartości uśrednionej pozwala oszacować w dłuższym odcinku czasu wartość średnią.



Rys. 2. Przykład obliczonych na podstawie pomiaru prędkości zmian przyspieszenia pojazdu podczas próby wybiegu

Na podstawie analizy wszystkich prób wyznaczono średnie opóźnienia dla każdej z nich. Zestawienie tych wyników przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Obliczone zmiany przyspieszenia pojazdu dla 7 prób wybiegu

próba	Wyb1	Wyb2	Wyb3	Wyb4	Wyb5	Wyb6	Wyb7	Śr. z 7 prób
kierunek	1	1	1	1	2	2	2	
Prędkość początkowa [km/h]	20.35	20.49	19.21	19.35	20.19	18.89	19.34	19,70
Δv [km/h] *	19,7	19,6	18,5	18,7	19,6	18,4	18,9	19,06
Δt [s]	52,1	53,4	53,0	54,7	53,4	51,1	53,0	52,95
Średnie opóźnienie [m/s ²]	0,105	0,102	0,097	0,095	0,102	0,100	0,099	0,10
Średnia droga wybiegu [m]	152,1	158,5	146,7	152,0	154,1	137,7	145,8	149,6

*wartość Δv bo pomiar kończył się przed zatrzymaniem pojazdu

2.2 Obliczenia oporów toczenia

Do wyznaczenia oporów toczenia wykorzystano równanie ruchu pojazdu w postaci:

$$\delta m a_{sr} = \Sigma F_{sr}$$

gdzie :

- m – masa pojazdu,
- δ – współczynnik mas wirujących (bez uwzględnienia odłączonych mas wirujących silnika),
- a_{sr} – średnia wartość opóźnienia podczas próby wybiegu
- F_{sr} – średnia wartość sił oporów ruchu podczas próby wybiegu

Siły oporów toczenia przyjęto wg zależności:

$$F_t = mg \cdot f_t - F_p$$

- g – przyspieszenie ziemskie 9,81 m/s²,
- f_t – współczynnik oporów toczenia,
- F_p – średnia siła oporów powietrza podczas próby.

Założenie że wszystkie opory ruchu podczas próby wybiegu to opory toczenia i porównanie tych wartości prowadzi do zależności:

$$f_t = \left(\frac{\delta a_{sr}}{g} \right) \cdot \frac{F_t}{F_t + F_p}$$

Do wyznaczenia oporów toczenia na podstawie wskazanych zależności przyjęto następujące wartości momentu bezwładności pojedynczego koła i tym samym wynikającego z niego i masy pojazdu wartość współczynnika:

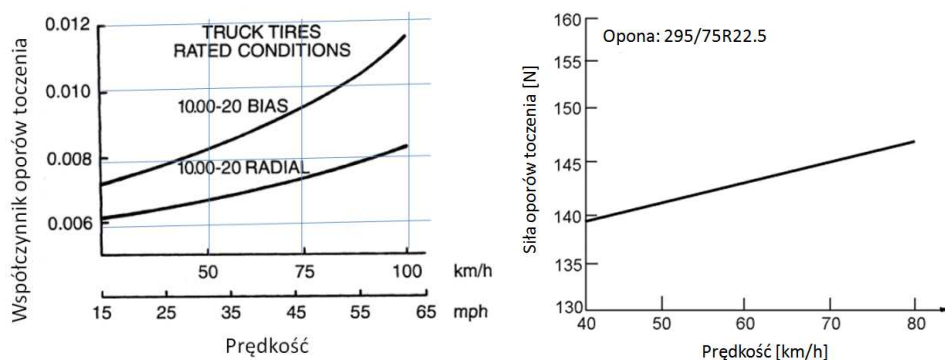
- moment bezwładności pojedynczego koła: $10 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$
- ilość kół: 6
- promień koła (265/70 R19,5): 0.47 m
- masa pojazdu: 14700 kg
- wartość współczynnika mas wirujących: $\delta = 1.018$
- wartość średnich oporów powietrza (na podstawie później przeprowadzonej analizy oporów powietrza) przyjęto na poziomie 43 N ,
- wartość ułamka $\frac{F_t}{F_t + F_p} = 0.97$

Na podstawie powyższych danych dokonano wyliczenia współczynnika oporów toczenia, które przedstawiono w tabeli 2.

Tab. 2. Wyliczenie oporów toczenia

Kierunek próby	Wartości średnie dla kierunków m/s ²	Wartość średnia m/s ²	Wartość średniej siły oporów toczenia N	Wartość średniego współczynnika oporów toczenia -
1	0.0998	0.100042	1426.5	0.00989
2	0.1003			

Wg danych literaturowych współczynnik oporów toczenia w samochodach ciężarowych może się zmieniać wraz z narastaniem prędkości wg zależności przedstawionej na rysunku poniżej.



Rys. 3. Przykłady zależności zmian współczynnika oporu toczenia w zależności od prędkości [1,2] (ang. bias – opona diagonalna, ang. radial – opona radialna)

Matematycznie zależność tą opisuje się wzorem [1]:

$$f_t = f_{t0} + K v^2$$

gdzie:

f_{t0} - współczynnik oporów toczenia dla małej prędkości,

v - prędkość w m/s

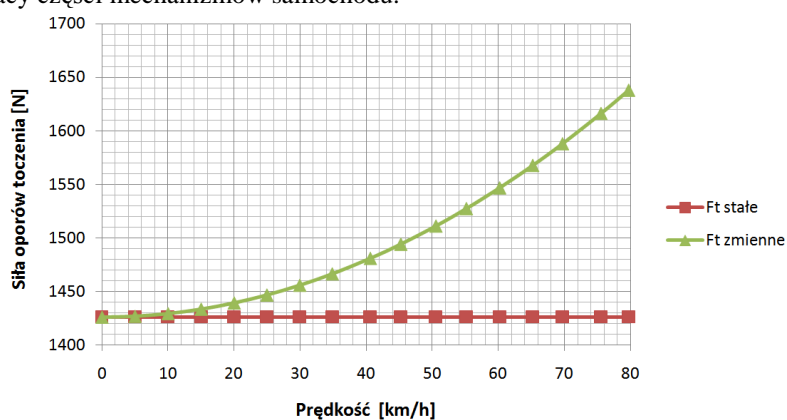
K - współczynnik wzrostu oporów toczenia z prędkością w s²/m²

Na podstawie analizy oporów powietrza i toczenia łącznie oraz analizy danych literaturowych przyjęto szacunkowo wariant wzrostu oporów toczenia przy 80 km/h o ok. 15% w stosunku do oporów toczenia przy małej prędkości. Jest to niestety założenie oparte o dane literaturowe i zweryfikowane tylko częściowo, przez dopasowanie krzywych oporów powietrza i toczenia, powinno więc tak być potraktowane. Oznacza to, że w przypadku zastosowanych w pojeździe opon może on niestety mieć zbliżoną ale jednak trochę inną wartość.

Przyjmując ten model zmiany współczynnika oporów toczenia jako alternatywny dla jego stałej wartości otrzymano: $f_{t0} = 0.00989$, $K = 0.000003 \text{ s}^2/\text{m}^2$

W efekcie dla obu przyjętych modeli można przedstawić wykres sił oporów toczenia wraz ze zmieniającą się prędkością (*uwaga na ograniczony zakres osi Y – przyrost sił oporów toczenia jest na poziomie 13%*) – przedstawiono go na rys. 4.

Wyznaczone opory toczenia $f_t = 0.00989$ są wyższe niż podawane w literaturze dla opon samochodów ciężarowych, gdzie przyjmuje się wartości w przedziale 0.005 - 0.007 [1,3]. Generalnie współczynniki oporów toczenia dla opon pojazdów użytkowych są mniejsze od współczynników dla opon samochodów osobowych. Uzyskany wynik – wyższy – w dużej mierze wynika z rodzaju nawierzchni –wieloletnia nawierzchnia asfaltowa o dużej ilości spękań - oraz samego sposobu pomiaru, w którym badany jest nie tylko opór toczenia opony na stanowisku badawczym, ale w zasadzie łączne opory toczenia opony i pracy części mechanizmu samochodu.



Rys. 4. Suma sił oporów toczenia wg dwóch alternatywnych założeń

Inaczej można to określić mówiąc o oporze toczenia odniesionym do pojazdu i oporze odniesionym do pojedynczego koła. W podobnych badaniach, wykonanych w odniesieniu do pojazdu, wykonywanych na gładkiej betonowej nawierzchni uzyskano współczynnik oporów toczenia na poziomie $f_t = 0.0078$.

3. OPORY POWIETRZA

Dla wyznaczenia średnich oporów powietrza wykonano próby wybiegu w 12 punktach prędkości (25,30,35,40,45,50,55,60,65,70,75 i 80 km/h). Dla każdego punktu prędkości wykonano po dwie próby w kierunku wschodnim i zachodnim lotniska.

Celem stosowania dwóch kierunków wybiegu było zminimalizowanie efektu wiatru i nachylenia drogi poprzez stosowanie wartości średniej z dwóch kierunków.

3.1. Metodyka opracowania wyników badań

Dla każdej z prób dokonano analizy przebiegu sygnałów prędkości oraz przyspieszenia (opóźnienia).

Kolejne etapy obróbki danych były następujące:

- dla każdego pliku wybrano przedział danych z quasiustalonym opóźnieniem w zakresie ± 5 km/h od założonego punktu pomiarowego,
- wyznaczono przedziały zmiany prędkości Δv i przedziały czasu Δt będące przedmiotem analizy,
- na podstawie Δv prędkości i Δt czasu wyznaczono średnie opóźnienie,
- na podstawie przebiegu prędkości w czasie $v(t)$ wyznaczono średnią drogę wybiegu,
- wyznaczono średnie opóźnienie a_{sr} dla obu kierunków dla danego punktu prędkości z wcześniej wyliczonych wartości średnich ze wszystkich analizowanych prób w danych kierunkach i dla danego punktów prędkości.

Na podstawie opisanej procedury danych ustalono wartości opóźnień dla poszczególnych punktów pomiarowych prędkości przedstawione w tabeli 3.

Tab. 3. Średnie opóźnienia dla próby wybiegu

Nr punktu prędkości	Zakres prędkości próby wybiegu	Średnia prędkość próby wybiegu	Średnia prędkość próby wybiegu	Średnie opóźnienie
-	km/h	km/h	m/s	m/s ²
1	30-20	24.95	6.9	0.102
2	35-25	29.92	8.3	0.111
3	40-30	34.83	9.7	0.117
4	45-35	40.60	11.3	0.120
5	50-40	45.21	12.6	0.129
6	55-45	50.52	14.0	0.139
7	60-50	55.13	15.3	0.140
8	65-55	60.16	16.7	0.155
9	70-60	65.17	18.1	0.164
10	75-65	69.67	19.4	0.177
11	80-70	75.50	21.0	0.182
12	85-75	79.68	22.1	0.198

3.2 Obliczenia oporów powietrza

Wzdłużne opory powietrza samochodu definiowane są zależnością [1]:

$$F_p = \frac{1}{2} \rho c_x A v^2$$

gdzie:

- ρ – gęstość powietrza,
- c_x – współczynnik oporu powietrza w kierunku wzdłużnym,
- A – pole powierzchni czołowej pojazdu,
- v – prędkość względna pojazdu i powietrza.

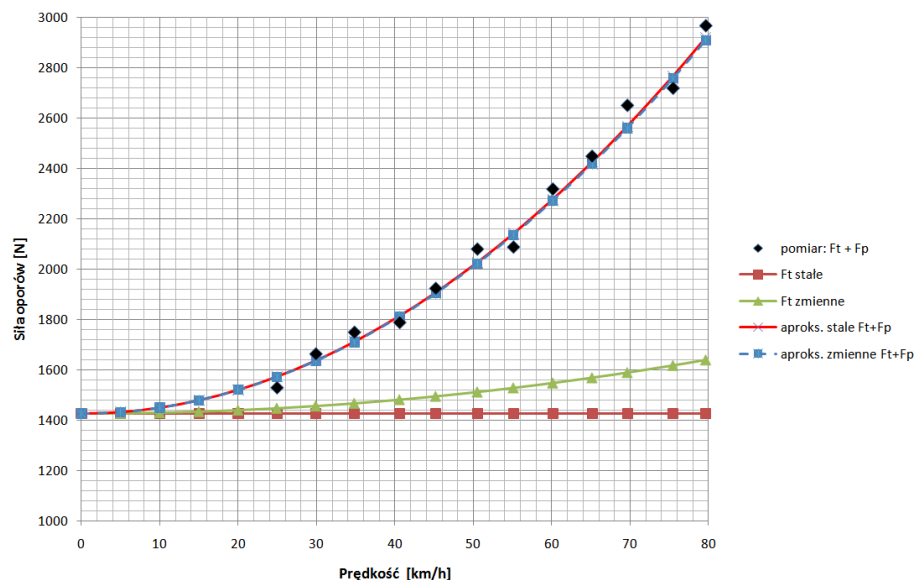
Do realizowanych obliczeń przyjęto powierzchnię czołową wg danych producenta równą $A = 6.07 \text{ m}^2$ oraz gęstość powietrza dla warunków (-8°C i ciśnienia 1017 hPa) równą $\rho = 1.337 \text{ kg/m}^3$

Podczas wyznaczania oporów powietrza na podstawie wyników prób wybiegu wyznaczono siły całkowitych oporów ruchu na które założono, że składają się siły oporów toczenia i oporów powietrza. Dlatego należało wyznaczyć całkowite siły oporów i odjąć od nich siły oporów toczenia. Siły oporów całkowite wyznaczono wg zależności $\delta m a_{\dot{s}r} = \Sigma F_{\dot{s}r}$ i przedstawiono w tabeli 4. Na podstawie uzyskanych oporów całkowitych przeprowadzono obliczenia dla dwóch opisanych wcześniej modeli sił oporów toczenia – stałych, niezależnych od prędkości oraz zmiennych wraz z prędkością.

Na podstawie uzyskanych oporów całkowitych przeprowadzono obliczenia dla dwóch opisanych wcześniej modeli sił oporów toczenia – stałych, niezależnych od prędkości oraz zmiennych wraz z prędkością. W zależności od przyjętego wariantu wyznaczono inny współczynnik proporcjonalności pomiędzy nadwyżką nad oporami toczenia w założeniu będącą oporami powietrza. Uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 4 i na rys. 5, gdzie dodatkowo dokonano porównania oszacowania z wynikami badań.

Tab. 4. Średnie opory ruchu dla próby wybiegu wyznaczone na podstawie średnich opóźnień

Nr punktu prędkości	Średnia prędkość próby wybiegu	Średnie opóźnienie	Średnie całkowite opory ruchu	Siła stałych oporów toczenia	Siła zmiennych oporów toczenia	Siła oporów powietrza (dla F_t stałych)	Siła oporów Powietrza (dla F_t zmiennych)
-	km/h	m/s^2	N	N	N	N	N
1	24.95	0.1022	1529	1427	1447	102.5	82
2	29.92	0.1111	1663	1427	1456	236.5	207
3	34.83	0.1169	1749	1427	1467	322.5	282
4	40.6	0.1195	1788	1427	1481	361.5	307
5	45.21	0.1285	1923	1427	1494	496.5	429
6	50.52	0.1389	2079	1427	1511	652.5	568
7	55.13	0.1395	2087	1427	1528	660.5	559
8	60.16	0.1549	2317	1427	1547	890.5	770
9	65.17	0.1635	2447	1427	1568	1020.5	879
10	69.67	0.1770	2649	1427	1588	1222.5	1061
11	75.5	0.1816	2717	1427	1616	1290.5	1101
12	79.68	0.1982	2965	1427	1638	1538.5	1327
Współczynnik proporcjonalności pomiędzy F_p a v^2						0,235	0,200
Współczynnik c_x dla przyjętych $A=6.07 \text{ m}^2$ i $\rho=1.337 \text{ kg/m}^3$						0,75	0,64



Rys. 5. Suma sił oporów toczenia wg dwóch alternatywnych założeń

Odnosząc się do uzyskanych wartości należy stwierdzić, że wyznaczony współczynnik oporów powietrza mieści się w przedziale 0.64...0.75, ze wskazaniem na niższą wartość. Ale w zależności od przyjmowanego w obliczeniach/symulacji modelu oporów toczenia należy posłużyć się właściwą wartością. Jak widać na podstawie porównania oporów zmierzonych i aproksymowanych konsekwencją w wyborze wartości c_x dla odpowiedniego modelu sił oporów toczenia daje w zasadzie identyczne oszacowanie mierzonych oporów powietrza i toczenia. Uzyskana wartość współczynnika c_x mieści się w wartościach podawanych literaturze dla tego typu pojazdów w przedziale 0.5...0.8 [1].

7. WNIOSKI

W wyniku przeprowadzonych badań szacunkowych oporów toczenia i powietrza wyznaczono szacunkową wartość współczynnika oporów toczenia dla jazdy z małą prędkością oraz przy założeniu dwóch alternatywnych modeli oporów toczenia oszacowano wielkość współczynnika oporów powietrza. W obu przypadkach wartości szacunkowe mieszczą się w przedziałach podawanych w literaturze, a przede wszystkim ich przyjęcie odzwierciedla uzyskane w badaniach drogowych opory ruchu powodujące w próbie wybiegu określone poziomy opóźnień pojazdu.

Warto podkreślić, że tak uzyskane oszacowania nie odpowiadają dokładnie parametrom wyznaczanym w warunkach laboratoryjnych zarówno w odniesieniu do współczynnika oporów powietrza wyznaczonego w tunelach aerodynamicznych jak i współczynnika oporów toczenia wyznaczonego jedną z wielu metod laboratoryjnych [4] na odpowiednich stanowiskach badawczych. Jednak przy próbie opisu oporów ruchu samochodu przy pomocy tych danych wyznaczonych w warunkach laboratoryjnych, napotkamy na rozbieżności ze względu na odstępstwo warunków rzeczywistej eksploatacji od warunków

laboratoryjnych i konieczność uwzględnienia innych oporów nie uwzględnionych w badaniach laboratoryjnych (np. oporów łożyskowania kół, mechanizmów układu przeniesienia napędu, oporów aerodynamicznych kół, itd.) [5].

W przypadku konieczności modelowania całkowitych oporów ruchu zaproponowana metoda może być wystarczająco dokładna, a na pewno dokładniejsza od posłużenia się tylko danymi literaturowymi.

8. BIBLIOGRAFIA

- [1] J. Y. Wong, "Theory of Ground Vehicles, 3rd Edition", Wiley-Interscience, 2001
- [2] Ford, T.L. and Charles, F.S., Heavy Duty Truck Tire Engineering, SAE Paper no. 880001, 1988
- [3] Popov A. i inni:: Laboratory Measurement of Rolling Resistance in Truck Tyres under Dynamic Vertical Load, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, Sage Publications, Volume 217, Number 12 / 2003,
- [4] European Tyre School, <https://www.tut.fi/plastics/tyreschool/index.html>, dostęp 02.2011
- [5] Hammarström U., Karlsson R., Sörensen H.: Road surface effects on rolling resistance – coastdown measurements with uncertainty analysis in focus, Road Technology, a Swedish Network of Excellence for Road Technology, 2009, dostęp <http://www.roadtechnology.se/ecrpd.eu>