

# Układ kompensacji wpływu wzniesienia oraz przyspieszenia w przyczepie do badania oporu toczenia

Grzegorz Ronowski

W artykule przedstawiono metodę pomiaru współczynnika oporu toczenia przy wykorzystaniu przyczepy opracowanej w Zakładzie Pojazdów na Politechnice Gdańskiej. Następnie omówiono opatentowany układ bezwładnościowy do korekcji wpływu wzniesienia oraz metodę korekcji wpływu przyspieszenia wzdłużnego. W dalszej części przedstawiono przykładowe wyniki obrazujące pomiar współczynnika  $C_{RR}$  na wzniesieniu przy zmiennej prędkości.

**Słowa kluczowe:** opór toczenia, opony, nawierzchnie drogowe

## Wstęp

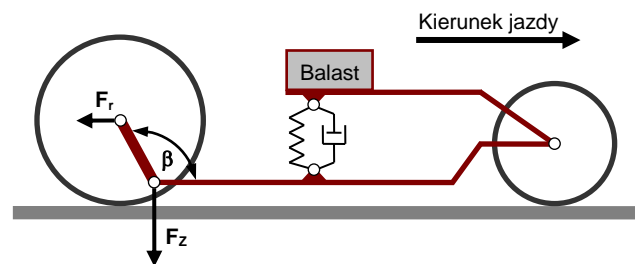
Naukowcy zajmujący się badaniami i optymalizacją nawierzchni drogowych oraz opon samochodowych muszą brać pod uwagę wiele parametrów oraz czynników związanych z oponą toczącą się po nawierzchni. Jednym z takich parametrów jest siła oporu toczenia, która przeciwstawia się ruchowi pojazdu. Należy dążyć do tego, aby ta siła była jak najmniejsza ponieważ ma ona bezpośredni wpływ na wielkość zużycia paliwa. Aby móc optymalizować opony jak i nawierzchnie między innymi pod kątem jak najmniejszej siły oporu toczenia, niezbędne jest odpowiednie narzędzie umożliwiające pomiar takiej siły. Na przełomie lat 2012 i 2013 na Politechnice Gdańskiej w Zakładzie Pojazdów powstała nowa wersja specjalistycznej przyczepy do pomiaru siły oporu toczenia opon i nawierzchni drogowych oznaczonej jako R<sup>2</sup> Mk.2 i przedstawionej na rys. 1.



Rys. 1. Przyczepa R<sup>2</sup> Mk.2 do pomiaru współczynnika oporu toczenia opon i nawierzchni [5]

Przyczepa R<sup>2</sup> Mk.2 jest przyczepą dwuosiową trójkołową. Tylnie pojedyncze koło jest jednocześnie kołem badanym. Badane koło jest zawieszona na uchylnym pionowym wahaczu. Schemat przyczepy do badania siły oporu toczenia przedstawiono na rys. 2. Podczas jazdy siła oporu toczenia

oddziaływająca na koło badane wychyla wahacz pionowy z położenia równowagi o kąt  $\beta$ . Wielkość tego kąta jest miarą siły oporu toczenia występującej w śladzie styku opona/nawierzchnia [5].



Rys. 2. Metoda pomiaru współczynnika  $C_{RR}$  przy wykorzystaniu odchylnego wahacza pomiarowego

## 1. Ustrój pomiarowy przyczepy R<sup>2</sup> Mk.2

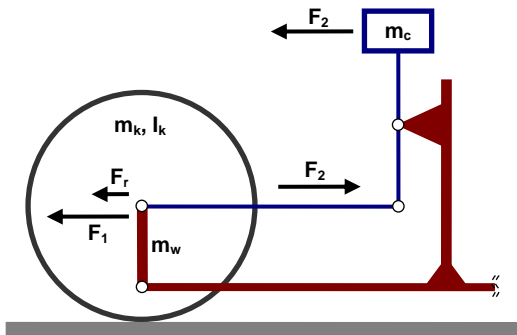
Podczas prowadzenia badań na drogach na uchylny wahacz pomiarowy przyczepy R<sup>2</sup> Mk.2 działa nie tylko siła oporu toczenia ale również działają siły związane z bezwładnością wahacza oraz koła badanego (gdy prędkość jazdy nie jest stała) jak i siły wynikające z jazdy po wzniesieniu.



Rys. 3. Ustrój pomiarowy przyczepy R<sup>2</sup> Mk.2

Aby niezależnie się od sił zakłócających pomiar należałoby prowadzić badania tylko przy jeździe ze stałą prędkością i tylko na poziomych nawierzchniach. W praktyce oznaczałoby to znaczne ograniczenie możliwości badawczych tylko do

specjalnie przygotowanych odcinków testowych. Aby przeciwdziałać siłom, które mogłyby zakłócić pomiar siły oporu toczenia podczas jazdy po wzniesieniu jak i przy jeździe ze zmienną prędkością, opracowano i opatentowano specjalny układ mechaniczny do kompensacji wpływu wzniesienia jak i przyspieszenia. Ustrój pomiarowy przyczepy R<sup>2</sup> Mk.2 wraz z układem kompensacji przedstawiono na rys. 3 oraz jego schemat funkcjonalny przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Schemat ustroju pomiarowego przyczepy R<sup>2</sup> Mk.2

W układzie kompensacji siła oddziaływania masy  $m_c$  na koło badane ( $F_2$ ) musi przy przyspieszaniu i przy jeździe po wzniesieniu kompensować siły masowe występujące na kole badanym i wahaczu pionowym ( $F_1$ ). Dla uzyskania tego efektu dźwigniowy układ o odpowiednio dobranych wymiarach łączy masę  $m_c$  z osią koła badanego (rys. 4). Podczas jazdy po wzniesieniu lub ze zmienną prędkością, oprócz siły oporu toczenia  $F_r$  działającej na pionowy wahacz pomiarowy, pojawia się również dodatkowa siła  $F_1$  wynikająca z masy koła oraz wahacza jak również z momentu bezwładności koła badanego. Siła  $F_2$  uzależniona jest od wymiarów układu dźwigniowego oraz od wielkości masy  $m_c$ . Siłę  $F_1$  można przedstawić według wzoru:

$$F_1 = F_{1b} + F_{1w} \quad (1)$$

gdzie:

$F_{1b}$  – składowa siły  $F_1$  wynikająca z bezwładności wahacza pomiarowego i koła badanego w ruchu postępowym jak i obrotowym;

$F_{1w}$  – składowa siły  $F_1$  wynikająca z mas wahacza pomiarowego jak i koła badanego podczas jazdy po wzniesieniu.

Każdą z tych sił składowych można wyrazić wzorami:

$$F_{1b} = \left( m_k + m_w + \frac{I_k}{r_k^2} \right) \cdot a \quad (2)$$

$$F_{1w} = (m_k + m_w) \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (3)$$

gdzie:

$m_k$  – masa koła badanego;

$m_w$  – masa wahacza pomiarowego;

$I_k$  – moment bezwładności koła badanego;

$r_k$  – promień koła badanego;

$a$  – przyspieszenie liniowe przyczepy;

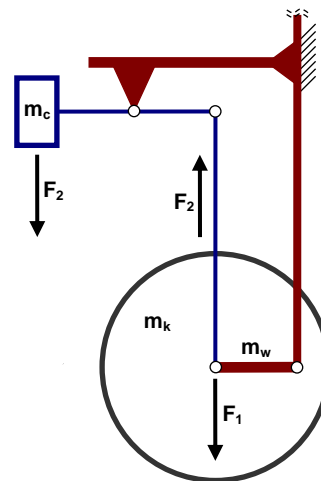
$g$  – przyspieszenie ziemskie;

$\alpha$  – kąt nachylenia wzniesienia.

Biorąc pod uwagę to, że czynnik  $\sin \alpha$  jest składową przyspieszenia ziemskiego działającą w płaszczyźnie

równoległej do nawierzchni jezdni, możemy zauważyć, że czynnik ten działa na te same masy i to w taki sam sposób co przyspieszenie liniowe przyczepy. Jednakże trudność zrównoważenia siły  $F_1$  polega na tym, że siła  $F_{1b}$  zawiera dodatkowy składnik wynikający z bezwładności koła badanego w ruchu obrotowym ( $I_k/r_k^2$ ). Stąd też możliwe jest tylko (poprzez odpowiedni dobór masy  $m_c$ ) zrównoważenie siły  $F_1$  podczas jazdy po wzniesieniu lub podczas jazdy po poziomej nawierzchni ale z dowolnym przyspieszeniem. Jeżeli zrównoważymy siłę  $F_1$  dla jazdy po wzniesieniu to masa  $m_c$  będzie zbyt mała by dodatkowo skompensować wpływ przyspieszenia wzdłużnego przyczepy. Jeżeli skompensujemy wpływ przyspieszenia wzdłużnego to masa  $m_c$  będzie zbyt duża do korekcji wpływu jazdy po wzniesieniu.

Przyczepa pomiarowa R<sup>2</sup> Mk.2 podczas prowadzenia badań drogowych jest holowana przez samochód wyposażony w tempomat. Dzięki temu prędkość jazdy podczas badań jest utrzymywana na niemal stałym poziomie. W tej sytuacji masa korekcyjna  $m_c$  może być tak dobrana, aby w pełni skompensować wpływ jazdy po wzniesieniu. W celu uzyskania takiego ustawienia ustrój pomiarowy przyczepy zamontowany został w płaszczyźnie pionowej tak jak to przedstawione jest na rys. 5. Przy tym ustawieniu dobrana została masa  $m_c$  tak aby doprowadzić do równowagi statycznej pomiędzy siłą  $F_1$  i  $F_2$ .



Rys. 5. Metoda statycznego zrównoważenia ustroju pomiarowego przyczepy R<sup>2</sup> Mk.2

Przy takiej metodzie zrównoważenia układu pomiarowego uzyskano pełną korekcję wpływu wzniesienia oraz częściową korekcję wpływu przyspieszenia wzdłużnego. Poza korekcją pozostaje siła wynikająca z bezwładności koła badanego w ruchu obrotowym. Jeżeli podczas prowadzenia badań drogowych zmianie ulega masa koła badanego, to należy również odpowiednio skorygować masę  $m_c$ .

## 2. Przykładowe wyniki uzyskiwane w warunkach drogowych

Badania testowe przyczepy R<sup>2</sup> Mk.2 przeprowadzono w tunelu pod Martwą Wisłą w Gdańsku. Nachylenie tunelu w części wjazdowej jak i wyjazdowej wynosi ok. 3%. Nawierzchnia w tunelu jest wykonana w technologii SMA. Badania wykonano przy prędkości 50 km/h przy wykorzystaniu opony testowej oznaczonej jako SRTT (Uniroyal Tiger Paw M+S P225/60R16 97S). Prędkość jazdy była utrzymywana przy wykorzystaniu tempomatu. Aby tempomat był w stanie szybko reagować na zmiany obciążenia wynikające z nachylenia drogi przejazdu wykonano na stosunkowo niskim biegu. W tym przypadku był to bieg trzeci. Na rys. 6 przedstawiono wyniki badań współczynnika oporu toczenia  $C_{RR}$ , który definiuje się jako:

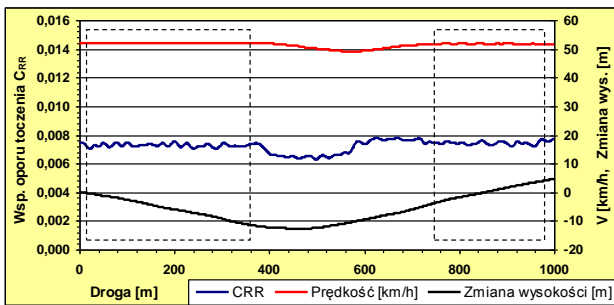
$$C_{RR} = \frac{F_r}{F_Z} \quad (4)$$

gdzie:

$C_{RR}$  – współczynnik oporu toczenia;

$F_r$  – siła oporu toczenia;

$F_Z$  – siła normalna do nawierzchni, która obciąża koło badane.



Rys. 6. Przykładowe wyniki badań współczynnika oporu toczenia wykonane w tunelu pod Martwą Wisłą w Gdańsku

Na wykresie niebieską linią przedstawiono przebieg współczynnika oporu toczenia ( $C_{RR}$ ), czerwoną linią prędkość jazdy a czarną linią wzdłużny profil badanego odcinka w tunelu. Prostokątne pola wskazują miejsca, gdzie prędkość jazdy na zjeździe i podjeździe była stała. W tych zakresach przebieg współczynnika  $C_{RR}$  praktycznie jest na tym samym poziomie co wskazuje na prawidłową korekcję wpływu wzniesienia. W środkowej części pomiędzy 400 a 700 metrem odcinka badanego widać wyraźny wpływ zmiany prędkości jazdy na wartość współczynnika oporu toczenia.

Chcąc w pełni wyeliminować wpływ przyspieszenia wzdłużnego na pomiar współczynnika oporu toczenia  $C_{RR}$  opracowano zależność korekcyjną postaci:

$$C_{RRa} = C_{RR} - c_a \cdot a \quad (5)$$

gdzie:

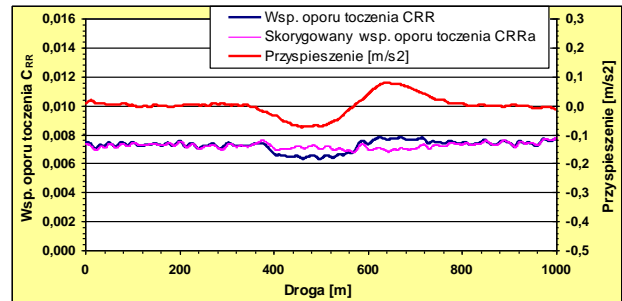
$C_{RRa}$  – współczynnik oporu toczenia po skorygowaniu wpływu przyspieszenia wzdłużnego;

$C_{RR}$  – współczynnik oporu toczenia;

$c_a$  – współczynnik korekcji wpływu przyspieszenia wzdłużnego;

$a$  – przyspieszenie wzdłużne przyczepy.

Na rys. 7 przedstawiono przykład korekcji wpływu przyspieszenia wzdłużnego na przykładzie przejazdu badawczego w tunelu pod Martwą Wisłą w Gdańsku przedstawionego na rys. 6.



Rys. 7. Przykład korekcji wsp. oporu toczenia w oparciu o przyspieszenie wzdłużne przyczepy R<sup>2</sup> Mk.2

Czerwoną linią przedstawiono przebieg wartości przyspieszenia wzdłużnego przyczepy badawczej, niebieską linią przedstawiono przebieg wartości współczynnika oporu toczenia  $C_{RR}$  a różową linią przedstawiono przebieg współczynnika  $C_{RRa}$  skorygowany według zależności (5). Dla koła badanego oznaczonego jako SRTT współczynnik korekcyjny  $c_a$  wynosi 0,01. Dla kół badawczych o innym momencie bezwładności należy opracować odpowiednie wartości współczynnika  $c_a$ . Mając opracowany zestaw takich wartości można dla dowolnej opony badawczej w pełni skorygować wpływ przyspieszenia wzdłużnego.

## Podsumowanie

Przyczepa pomiarowa R<sup>2</sup> Mk.2 została opracowana i zbudowana w Zakładzie Pojazdów w Politechnice Gdańskiej na przełomie lat 2012 i 2013 w ramach projektu SPUB o akronimie "ROLRES", finansowanego przez NCBiR. Przyczepa ta jest przeznaczona do pomiaru współczynnika oporu toczenia opon i nawierzchni drogowych. Została ona wyposażona w specjalny układ bezwładnościowy, który został opatentowany i jest przeznaczony do kompensacji wpływu wzniesienia i częściowej kompensacji wpływu przyspieszenia wzdłużnego. Dla pełnej kompensacji wpływu przyspieszenia należy posłużyć się zależnością (5). Dzięki takiemu rozwiązaniu przyczepa ta umożliwiła prowadzenie pomiarów praktycznie na dowolnych odcinkach testowych. Do tej pory pomiary testowe prowadzone były na odcinkach o nachyleniu nie przekraczającym 3%, dla których rezultaty były bardzo zadawalające. Odcinek badawczy powinien być tak wybrany/przygotowany aby jego długość była wystarczająca do rozpędzenia samochodu z przyczepą do żądanej prędkości pomiarowej. Po przejechaniu odcinka badawczego musi być jeszcze dystans niezbędny do wyhamowania pojazdu z przyczepą. Odcinki badawcze powinny być prostoliniowe aby podczas pomiaru nie pojawiała się siła poprzeczna oddziałująca na koło badane.

Przyczepa R<sup>2</sup> Mk.2 umożliwiła prowadzenie badań w zwykłym ruchu miejskim jak i poza miejskim z prędkościami do 130 km/h. Obecnie przyczepa ta jest uważana na świecie za najbardziej zaawansowaną technologicznie przyczepą do badania współczynnika oporu toczenia opon i nawierzchni drogowych.

**Bibliografia**

1. Ejsmont J., Świeczko-Żurek B., Ronowski G.: *Opórtoczenia opon samochodowych*. „Magazyn Autostrady”, nr 7, 2014.
2. Ejsmont J., Świeczko-Żurek B.: *Methods of Tire Rolling Resistance Measurements*. Troisième Congrès Tunisien de Mécanique COTUME' 2014, Sousse, Tunisia, 24-26 March 2014.
3. Ejsmont J., Ronowski G., Świeczko-Żurek B., Sommer S.: *Road texture influence on tyre rolling resistance*. „Road Materials and Pavement Design” Vol. 18 , Iss. 1, 2017 <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2016.1160835>.
4. Ejsmont J., Ronowski G., Taryma S., Świeczko-Żurek B.: *The Influence of Road Surface Unevenness on Tyre Rolling Resistance*. The Archives of Automotive Engineering (Archiwum Motoryzacji), Vol. 70, No. 4, 2015.
5. Ronowski G.: *Design and calibration of rolling resistance test trailer R2mk.2*. Scientific Conference on Automotive Vehicles and Combustion Engines (KONMOT 2016) IOP Publishing. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering.
6. ISO 28580 (2009) *Passenger car, truck and bus tyres – Methods of measuring rolling resistance – Single point test and correlation of measurement results*. International Organisation for Standardization, Geneva, Szwajcaria.

**Autorzy:**

**Grzegorz Ronowski** – Politechnika Gdańska w Gdańsku, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, Polska, e-mail: [gronowsk@pg.edu.pl](mailto:gronowsk@pg.edu.pl)

**Acceleration and grade compensation system for tyre rolling resistance test trailer**

*The article presents method of measuring tyre rolling resistance coefficient using the trailer developed at the Automotive Division at the Gdansk University of Technology. Patented mechanical inertial system for correcting the effect of road grade and test vehicle acceleration is described as well as correction procedures. Some examples of results with and without correction are also presented*

**Key words:** rolling resistance, tyres, road surfaces.