

Sposób wyznaczania współczynnika oporów toczenia obiektów wyposażonych w układ jezdny

Przedmiotem wynalazku jest sposób wyznaczania współczynnika oporów toczenia obiektów wyposażonych w układ jezdny. Przedmiot wynalazku wykorzystywany jest w dziedzinach techniki zajmujących się eksploatacją maszyn oraz budową i badaniem nawierzchni użytku zewnętrznego oraz wewnętrznego. Sposób ten może być wykorzystywany do badania dowolnego obiektu wyposażonego w układ jezdny oraz do pomiarów na dowolnych nawierzchniach nośnych. Przedmiot wynalazku wprawia badany obiekt w ruch i wykonuje pomiar siły oporów toczenia bez konieczności stosowania dodatkowego napędu w obiekcie badanym.

Znane są sposoby pomiaru współczynników oporów toczenia lub sił oporów toczenia, do tych sposobów należą rozwiązania opisane w literaturze: S. Taryma, *Opór toczenia, Opon samochodowych*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej 2007, ISBN 978-83-7348-179-4. Istnieją również rozwiązania konstrukcyjne ujęte w patentach: US 7591167 B2, US 6655202 B2, US 4359896 A, US 8640553 B2, US 8074488 B2, US 7117716 B2, US 6463784 B2 umożliwiające wyznaczenie w różny sposób wartości opisywanych parametrów. W przytoczonych sposobach przedstawiono rozwiązania, które umożliwiają pomiar sił dynamicznych i oporów toczenia elementów toczonego układu jezdnego. Znane są w stanie techniki rozwiązania, które pozwalają na badanie sił oporów toczenia dla wyodrębnionych elementów układu jezdnego, na przykład zespołu koła wraz z oponą. Pozwalają one na wyznaczenie sił oporów toczenia oraz współczynników tarcia. Jednak pomiary te obciążone są błędem wynikającym z uproszczonej konstrukcji badanego obiektu i metody pomiaru pośredniego. Pomiar pośredni oznacza, że wartość współczynnika tarcia toczonego lub siły oporów toczenia określana jest na podstawie analitycznego przetwarzania innych mierzonych wielkości. Z znanych sposobów pomiarów oporu toczenia wyznaczyć można układy w których badany element napędzany jest przez wprowadzaną w ruch nawierzchnię nośną. Inne metody zakładają holowanie badanego pojazdu za pojazdem odpowiedzialnym za generowanie ruchu. W metodzie tej siła oporów mierzona jest przez czujnik umieszczony na linii łączącej dwa pojazdy. Jednak w metodzie tej zachodzą niedokładności wyników spowodowane brakiem możliwości utrzymania stałej prędkości pojazdu napędzającego oraz jednej linii pojazdu badanego i pojazdu napędzanego przechodzącej przez oś symetrii czujnika.

Sposób pomiaru wykorzystywany w urządzeniu opisanym w patencie US 6463784 B2 przedstawia sposób wyznaczenia współczynnika tarcia ślizgowego dla nawierzchni jezdnych. Sposób wykorzystuje dodatkowe koło pomiarowe umieszczone w specjalnej ramie mocowanej do pojazdu. Rola pojazdu sprowadza się do generowania ruchu. Badane koło umieszczone jest w ramie i toczy się po nawierzchni takiej samej po jakiej porusza się napędzający pojazd. Koło toczone połączone jest z ramą za pomocą czujników pomiarowych. Sposób wyznaczania badanych wartości wymaga pojazdu badawczego, a współczynnik tarcia wyznaczany jest pośrednio na podstawie zmierzonej siły oporów

toczenia. Sposób umożliwia badania parametrów koła, a nie umożliwia pomiaru całego pojazdu bez ingerencji w jego budowę lub demontaż elementów.

Sposób pomiaru wykorzystywany w urządzeniu opisanym w patencie US 7117716 B2 przedstawia sposób wykorzystujący dynamiczny pojazd do badania tarcia, oporu cieczy i tarcia tocznego. Sposób wykorzystuje do pomiaru samodzielny pojazd umożliwiający badanie tarcia powierzchniowego, przemieszczeń i przyspieszeń oraz oporów toczenia. Pojazd ten wyposażony jest w niezależny układ zasilania i zespół sensorów. Zmierzone dane mogą być przesyłane do jednostki sterującej. W rozwiązaniu tym opory toczenia są mierzone pośrednio poprzez przetwarzanie danych z sensorów przyspieszenia. Sensory te umieszczone są wewnątrz pojazdu. Sposób ten umożliwia badanie różnych nawierzchni jednak niemożliwa badanie różnych pojazdów, gdyż samo jest pojazdem.

Sposób pomiaru wykorzystywany w wynalazek opisanym w patencie US 8074488 B2 przedstawia sposób pomiaru współczynnika tarcia ślizgowego przy wykorzystaniu wózka do którego mocuje się badany materiał tak aby tarł o wybrany rodzaj nawierzchni nośnej. Wózek z materiałem badawczym połączony jest linką z wyciągarką. Wyciągarka przyciąga wózek pomiarowy. Natomiast tensometry łączące wózek pomiarowy z badanym materiałem mierzą siłę wynikającą z tarcia ślizgowego badanego materiału. Wykorzystywany sposób umożliwia pomiar siły oporów tarcia ślizgowego, nie uwzględnia montażu kół tocznych do wózka i badań siły oporów toczenia. Sposób również nie przewiduje badania autonomicznych obiektów i pojazdów umożliwiając wyznaczenie parametry siły tarcia tocznego oraz współczynnika oporów toczenia.

Sposób pomiaru wykorzystywany w wynalazek opisanym w patencie US 8640553 B2 przedstawia sposób pomiaru wykorzystujący system do pomiaru sił w kole. Stosowany sposób umożliwia pomiar sił występujących w kole poruszającego się pojazdu. System posiada płytę z czujnikami, która łączy koło a piastą pojazdu. Płyta ta umożliwia detekcję sił wzdłużnych, pionowych i poprzecznych jak i momentów podłużnych i pionowych. Siły te występują między kołem a piastą. System posiada również pakiet elektroniki połączony z płytą pomiarową. Pakiet ten pobiera dane z płyty pomiarowej. Rozwiązanie to nie wyznacza się wprost siły oporów toczenia ale można ją uzyskać pośrednio z siły wypadkowej zmierzonej przez płytę pomiarową.

Sposób pomiaru wykorzystywany w wynalazek opisanym w patencie US 4359896 A przedstawia sposób pomiaru wykorzystujący urządzenie do dynamicznego testowania opon. Przytoczony sposób pozwala uzyskać dynamiczną charakterystykę opony. urządzeniu tym zespół opony i koła zamocowany jest do wału pomiarowego, natomiast bieżnik opony można sprzęgać z obrotową lub nieruchomą nawierzchnią nośną. System posiada elementy sprężyste wywołujące docisk bieżnika opony do nawierzchni nośnej. Sposób umożliwia symulowanie wibracji, a siły oporów toczenia mierzone są przez zespoły obciążników dołączone do wału pomiarowego.

Sposób pomiaru wykorzystywany w urządzeniu opisanym w patencie US 6655202 B2 wykorzystuje do pomiaru dynamiczny system pomiaru siły dla stacji testowania opon. Sposób realizuje pomiar na stanowisku testowy wykorzystując pierścień ślizgowy umieszczony pomiędzy obracającym się wirnikiem do którego montowana jest opona, a nieruchomą obudową łożyska, gdzie zespół sensorów znajduje się na ruchomym wirniku. W opisywanym sposobie badane koło wprowadzane jest w ruch po przez obrót walca podpierającego bieżnik badanego koła. Niedokładność pomiaru tym sposobem wynika kontaktu opony z nawierzchnią który jest inny niż w rzeczywistych warunkach eksploatacji. Sposób również umożliwia pomiar symulujący badania ograniczonej liczby rodzajów nawierzchni, badając tylko te z których możliwe jest wykonanie rolek.

Sposób pomiaru wykorzystywany w urządzeniu opisanym w patencie US 7591167 B2 ukazuje sposób i system do pomiaru oporów toczenia opon. Sposób umożliwia badanie zespołów koła z oponą na nawierzchni nośnej w postaci pasa naciągniętego między dwoma rolkami z czego jedna z rolek jest rolką napędową. Badany obiekt umieszczony jest na obrotowej piaście wyposażonej w układ pomiarowy. Koło umieszczone na piaście może być dociskane do nawierzchni pomiarowej. Sposób ten ze względu na zastosowanie nawierzchni nośnej w postaci taśmy uniemożliwia pomiar oporów toczenia na wybranych nawierzchniach.

Brak jest sposobów pomiaru umożliwiających wyznaczenie współczynnika oporów toczenia poprzez pomiar siły toczenia łączących cech badań drogowych oraz stanowiskowych. Sposoby badań stanowiskowych charakteryzują się ograniczonym doбором nawierzchni nośnych ze względu na stosowane bieżnie (tarczowe, taśmowe, szufladowe, bębnowe wewnętrzne i zewnętrzne). Dodatkowo kontakt między badanym kołem oraz bieżnią nie zawsze odzwierciedla rzeczywiste warunki eksploatacji. Ponadto siły oporów toczenia są wyznaczone różnymi metodami pośrednimi (pomiar momentu, pomiar siły koła, pomiar mocy elektrycznej, pomiar odległości wybiegu) wprowadzającymi różne niedokładności pomiaru. Sposoby drogowe z zastosowaniem pojazdów badawczych (wybiegu, staczania się ze wzniesienia, holowania, pomiaru momentu napędowego, pomiaru prędkości maksymalnej, pomiaru zużycia paliwa) są obarczone sporą niedokładnością lub brakiem możliwości wydzielenia składowych które nie są oporem toczenia kół. Sposoby badania z wykorzystaniem urządzeń takich jak przyczepy dynamometryczne wymagają dodatkowo pojazdów realizujących ich ruch. Ten typ urządzeń może realizować badania w ograniczonych miejscach badawczych, na otwartych przestrzeniach (głównie drogach). Natomiast nie realizują one pomiarów w przestrzeniach zamkniętych (np. korytarzach budynków).

Poprzez opracowany sposób z wykorzystaniem urządzenia do pomiaru siły oporów toczenia obiektów, wyposażonych w układ jezdny, będącego przedmiotem wynalazku możliwe jest wykonywanie badań siły oporów toczenia oraz wyznaczania współczynnika oporów toczenia:

- w rzeczywistych warunkach eksploatacji,
- z zachowanie rzeczywistego kontaktu koła na nawierzchnią badaną,
- badania układów z układem jezdny, bez lub z własnego napędem,
- badania wewnątrz budynków o ograniczonych powierzchniach badawczych,
- badania nawierzchni drogowych zewnętrznych,
- badania układów osadzonych na prowadnicach,
- badania na zróżnicowanych typach nawierzchni nośnych,
- badania na powierzchniach nośnych zanieczyszczonych lub pokrytych warstwami wynikającymi z warunków atmosferycznych np. śnieg, lód,
- badania na powierzchniach sypkich,
- badania obiektów o zmiennej konstrukcji w zakresie: rodzaju i kształtu opony, ciśnienia w oponie, liczby kół,
- badania z różnymi prędkościami napędzania badanych obiektów,
- badania obiektów nie zależnie od ich masy,
- szerokie spektrum możliwości obiektów badawczych od wagonów kolejowych, poprzez pojazdy ciężarowe i osobowe, wózki magazynowe, bramy przesuwne do wózków inwalidzkich itp.
- jako sumaryczną wartość siły oporów toczenia dla wszystkich kół obiektu badanego.

Istotą sposobu wyznaczania współczynnika oporów toczenia obiektów wyposażonych w układ jezdny jest to, że obiekt badany jest przesuwany z równą prędkością co umożliwia wykluczenie oddziaływania sił bezwładności na układ i ich wpływ na siłę oporów toczenia. Ponadto w sposobie oś czujnika pomiaru siły musi leżeć na płaszczyźnie poziomej równoległej do nawierzchni nośnej, oraz na płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny czołowej badanego obiektu. Gdzie płaszczyzna prostopadła obiektu badanego jest styczna do jego powierzchni czołowej oraz jest prostopadła do nawierzchni nośnej. Podczas badania rejestrowana jest siła oporów toczenia za pomocą czujnika siły. Wartość ta

jest przetwarzana zgodnie z algorytmem programu jednostki rejestrującej i na tej podstawie wyznaczana jest wartość współczynnika oporów toczenia.

Istotnym jest aby czynności związane z próbą pomiarową były realizowane przy zachowaniu stałej prędkości poruszania się obiektu badanego względem nawierzchni nośnej, czyli w ruchu jednostajnym. Dodatkowo analiza współczynnika tarcia tocznego powinna być realizowana z pominięciem stanów przejściowych, rozpędzania i zatrzymania obiektu badanego. Ponieważ w tych stanach występują dodatkowe opory nazywane oporami bezwładności. Opory te wynikają z charakterystyki ruchu jednostajnie przyspieszonego lub opóźnionego. W efekcie czego w takim ruchu badana siła była by sumą siły oporów toczenia i oporów bezwładności.

Istotnym w sposobie jest to aby wyznaczyć wartość masy badanego obiektu po przez osobny pomiar. Przy czym pomiar ten wykonany musi być przed rozpoczęciem procedury pomiarowej, ponieważ znajomość masy jest niezbędna do wyznaczenia współczynnika oporów toczenia po przez pomiar siły oporów toczenia.

Korzystnym jest aby realizować pomiar podczas ruchu obiektu badanego z prędkością nie większą niż 15 km/h. Ponieważ dla takiego zakresu prędkości ruchu obiektu badanego opory siły powietrza jest pomijalnie mały nie zależnie do współczynnika czołowego oporu aerodynamicznego badanego obiektu. W przypadku pomiaru powyżej 15km/h konieczna jest kompensacja wyników.

Algorytm postępowania sposobu realizacji wyznaczania współczynnika oporów toczenia obiektów wyposażonych w układ jezdny przedstawia Fig. 1. Ułożenie w przestrzeni cech geometrycznych urządzeń pomiarowych względem obiektu badanego i nawierzchni nośnej przedstawiono na Fig. 2.

Sposób wyznaczania współczynnika oporów toczenia obiektów wyposażonych w układ jezdny wymaga realizacji z podziałem na czynności: przygotowawcze, próby pomiarowej, przetwarzania wyników oraz pomiaru masy badanego obiektu. Czynności realizowane podczas badania:

Przygotowanie (A):

1. czynność D1 – pomiar masy obiektu badanego 1
2. czynność A1 – ustawienie czujnika tak aby jego oś czujnika pomiaru siły 3 leżała na płaszczyźnie poziomej równoległej 4 do nawierzchni nośnej 2;
3. czynność A2 – ustawienie czujnika tak aby jego oś czujnika pomiaru siły 3 leżała na płaszczyźnie prostopadłej 5 do płaszczyzny czołowej 6 badanego obiektu 1. Przy czym płaszczyzna czołowa 6 jest jednocześnie prostopadła do nawierzchni nośnej 2 i styczna do czoła obiektu badanego 1;
4. czynność A3 – rozpędzanie obiektu badanego 1 zadanego stałego wektora prędkości liniowej;

Próba pomiarowa (B):

1. czynność B4 – utrzymywanie obiektu badanego 1 w ruchu jednostajnym z stałą prędkością względem nawierzchni nośnej 2;
2. czynność B5 – utrzymywanie trajektorii ruchu obiektu badanego 1 równoległej do osi czujnika pomiaru siły 3;
3. czynność B6 – rejestracja wartości siły wymaganej do pokonania oporów ruchu pojazdu.

Przetwarzanie wyników (C):

1. czynność C7 – sprawdzenie czy ruch obiektu badanego 1 jest jednostajny z zerowym przyspieszeniem;
2. czynność C8 – pobieranie sygnału pomiarowego i przesyłanie go do urządzenia rejestrującej;
3. czynność C9 – wyznaczenie siły oporów toczenia na podstawie sygnału pomiarowego;
4. czynność C10 – wyznaczenie współczynnika oporów toczenia badanego obiektu 1 na podstawie siły oporów toczenia z uwzględnieniem masy badanego obiektu 1 zmierzonej w czynności D1.

Proces realizacji sposobu wyznaczania współczynnika oporów toczenia obiektów wyposażonych w układ jezdny, musi być realizowany przy zachowaniu określonych warunków:

- stała prędkość poruszającego się obiektu badanego 1,
- oś czujnika pomiaru siły (3) i obiekt badany muszą znajdować się poziomej nawierzchni nośnej (2) nie posiadającej wzniesień,
- z pominięciem stanów przejściowych, przyspieszania i opóźniania ruchu obiektu badanego (1).

Spełnienie powyższych warunków umożliwia interpretowanie uzyskanych wyników jako siła oporów toczenia, w zależności od badanego obiektu jest to:

- suma właściwego oporu toczenia wszystkich kół obiektu badanego 1, której wartość można podzielić na wszystkie koła obiektu badanego 1 i przyjąć jako jednostkową wartość oporów toczenia dla konkretnego koła (z wyjątkiem pojazdów o zróżnicowanych wymiarach kół);
- suma właściwego oporu toczenia wszystkich kół obiektu badanego 1 oraz oporów połączeń kół z obiektem, najczęściej tarcia toczonego lub ślizgowego w łożyskach układu zawieszenia oraz tłumienia, ewentualnie sprzężonego układu przeniesienia napędu np. mechanizmu różnicowego;
- suma właściwego oporu toczenia wszystkich kół obiektu badanego 1 oraz oporów połączeń kół z obiektem oraz oporów związanych z brakiem zbieżności kół układu.

Algorytm przetwarzania siły oporów toczenia pozwala wyznaczyć wartość współczynnika oporów toczenia po przez wykonanie operacji algebraicznej (1.1)

$$f_t = \frac{F_t}{m \cdot g} \quad (1.1)$$

gdzie:

f_t – współczynnik oporów toczenia

m – masa [kg]

g – przyspieszenie ziemskie [$\frac{m}{s^2}$]

F_t – siła oporów toczenia [N]

Uzyskane wyniki z pomiarów przy znajomości równania całkowitej siły ruchu pojazdu służą do wyznaczenia współczynników oporów toczenia, równanie (1.2).

$$F_N = F_t + F_p + F_w + F_b \quad (1.2)$$

gdzie:

F_N – siła napędowa

F_t – siła oporów toczenia

F_p – siła oporów powietrza

F_w – siła oporów wzniesienia

F_b – siła oporów bezwładności

Opór toczenia oraz opór powietrza występują zawsze tworząc opór podstawowy. Opór wzniesienia i opór bezwładności występuje okresowo. Opór wzniesienia występuje tylko podczas jazdy pod górę, stanowi go równoległa do nawierzchni składowa siły ciężkości podczas zjazd w dół składowa przyjmuje zwrot zgodny z kierunkiem jazdy, stając się siłą wymuszającą ruch obiektu. Opór bezwładności występuje wyłącznie podczas przyspieszania. Wtedy równoległa do nawierzchni siła bezwładności samochodu jest skierowana przeciwnie do kierunku ruchu. W ruchu opóźnionym siła ta zmienia zwrot. Opór uciągu to jest to suma oporów holowanej przyczepy lub naczepy. Niezależnie od bryły pojazdu podczas badań poniżej 15 km/h opór powietrza jest tak nieznaczny iż można go pominąć w obliczeniach jak wskazano w publikacji Lanzendoerfer J. Badania pojazdów samochodowych. Warszawa, WKŁ 1977.

Podczas badań we wskazanych warunkach pomiarowych siła F_N jest równa sile oporów toczenia F_t , równanie (1.3).

$$F_N = F_t \quad (1.3)$$

Siła oporów toczenia wyznaczana według sposobu będącego przedmiotem wynalazku to:

- suma właściwego oporu toczenia wszystkich kół obiektu badanego 1, której wartość można podzielić na wszystkie koła pojazdu i przyjąć jako jednostkową wartość oporów toczenia dla konkretnego koła (z wyjątkiem pojazdów o zróżnicowanych wymiarach kół),
- suma oporów połączeń kół z obiektem badanym 1, najczęściej tarcia tocznego lub ślizgowego w łożyskach układu zawieszenia oraz tłumienia, ewentualnie sprzężonego układu przeniesienia napędu np. mechanizmu różnicowego,
- suma oporów związaną z brakiem zbieżności kół układu

Ograniczając wpływ zbieżności układu, ujednolicając rodzaj kół oraz odliczając opór generowany w łożyskach kół można wyznaczyć ogólne równanie siły oporów toczenia na płaskiej nawierzchni, równanie (1.4).

$$F_t = G \cdot f_t \quad (1.4)$$

gdzie:

G - siła ciężkości [N], gdzie: $G = m \cdot g$

m – masa [kg]

g – przyspieszenie ziemskie $\left[\frac{m}{s^2}\right]$

f_t - współczynnik oporów toczenia

Przekształcając równanie (1.4) można wyznaczyć współczynnik oporów toczenia opisany równaniem (1.1) przy znajomości wartości siły oporów toczenia, masy obiektu badanego 1 oraz przyspieszenia ziemskiego.

REKTOR
POLITECHNIKI POZNAŃSKIEJ

prof. dr hab. inż. Tomasz Łodygowski