

Jarosław Pytka¹⁾, Piotr Tarkowski²⁾
Piotr Budzyński³⁾, Łukasz Kaznowski⁴⁾

WÓZEK DYNAMOMETRYCZNY DO BADAŃ SYMULACYJNYCH WSPÓŁPRACY KOŁA OGUMIONEGO Z NAWIERZCHNIĄ NIEUTWARDZONĄ

Streszczenie. W pracy przedstawiono projekt wózka dynamometrycznego do badań gruntowych lub trawiastych nawierzchni lotniskowych pod kątem ich przydatności do startów i lądowań samolotów lotnictwa ogólnego w różnorodnych warunkach pogodowych. Istotą wózka jest jego użycie jako narzędzia projektowanej metody oceny nawierzchni lotniskowych. Wynikiem pomiarów z użyciem wózka będą dwa istotne parametry opisujące współpracę koła z nawierzchnią: współczynnik oporów toczenia oraz szepność.

Słowa kluczowe: terramechanika, wózek dynamometryczny, lotniska trawiaste, metody pomiarowe.

WPROWADZENIE

Współpraca koła ogumionego z nawierzchnią nieutwardzoną warunkuje wynikowe własności jezdne pojazdu lub maszyny. Współczynnik siły oporów toczenia oraz jednostkowa reakcja pozioma, najczęściej podawana w zależności od poślizgu koła stanowią najważniejsze wielkości opisujące układ koło – podłoże. Prezentowany w artykule wózek dynamometryczny będzie służył do wyznaczania wyżej wymienionych wielkości dla koła podwozia głównego samolotu PZL 104 Wilga 35A na nieutwardzonej nawierzchni lotniska trawiastego. Projekt i realizacja wózka są jednym z zadań realizowanego w Katedrze Pojazdów Samochodowych Politechniki Lubelskiej Projektu Badawczego „Metoda oceny i badania gruntowych nawierzchni lotniskowych”.

Głównym celem Projektu Badawczego jest opracowanie metody oceny gruntowych i trawiastych nawierzchni lotniskowych, dzięki której użytkownicy tych lotnisk będą mogli uzyskać aktualną informację o stanie nawierzchni w aspekcie podejmowania decyzji o wykonaniu danej operacji lotniczej. W Polsce jest kilkanaście dużych i kilkadziesiąt małych lotnisk i lądowisk o nawierzchni trawiastej. Lotniska tego typu są również bardzo popularne w Europie Zachodniej oraz w Stanach Zjed-

¹⁾ Katedra Pojazdów Samochodowych, Politechnika Lubelska, e-mail: j.pytka@pollub.pl

²⁾ Politechnika Lubelska, e-mail: p.tarkowski@pollub.pl

³⁾ Politechnika Lubelska, e-mail: p.budzynski@pollub.pl

⁴⁾ WSK PZL Świdnik, c/o Politechnika Lubelska, e-mail: l.kaznowski@wp.pl

noczonych, a korzysta z nich znacząca liczba ok. 500.000 samolotów GA (General Aviation), do których zaliczamy samoloty szkolne, sportowe, turystyczne, rolnicze, gaśnicze a także śmigłowce Lotniczego Pogotowia Ratunkowego. Dostęp do aktualnej informacji o stanie nawierzchni może przyczynić się do lepszego wykorzystania tego typu lotnisk, również w okresie późnojesiennie – zimowym.

Do znanych metod określania warunków współpracy koła z nawierzchnią nieutwardzoną należą:

- metoda penetrometru stożkowego, pozwalająca na określenie tzw. wskaźnika stożkowego (CI – Cone Index) oraz pochodnych, dobrze skorelowanych z przejezdnością w terenie;
- metoda bewometru (Bekkers Value Meter), dająca w wyniku wartości współczynników modelu Bekkera, który w połączeniu z modelem Coulomba umożliwia wyznaczanie sił trakcyjnych (siła jazdy oraz siła oporów toczenia na nawierzchni nieutwardzonej);
- metoda pomiarów bezpośrednich, dokonywanych za pomocą przyczepki dynamometrycznej lub testera jednokołowego (tzw. single wheel tester).

Projektowany wózek dynamometryczny mieści się w ramach trzeciej z wymienionych wyżej grup metod badawczych.

Ważniejsze metody badawcze nawierzchni lotniskowych są następujące:

- metoda CBR (California Bearing Ratio), pozwalająca określić nośność danej nawierzchni, dość dobrze skorelowana z metodą penetrometru stożkowego i możliwa do zastosowania w przypadku nawierzchni gruntowych, trawiastych;
- metoda ACN-PCN (Aircraft Classification Number – Pavement Classification Number), polegająca na porównaniu dwóch wskaźników: ACN – dla samolotu oraz PCN – dla nawierzchni pasa startowego, stosowana przede wszystkim dla lotnisk z pasem o nawierzchni utwardzonej;
- metoda pomiarów tzw. szepności (fizycznie jest to współczynnik w modelu tarcia Amontonsa, czyli współczynnik przyczepności), pomiar przeprowadzany jest za pomocą specjalnego samochodu wyposażonego w piąte koło badawcze (tzw. friction tester) lub samochodu z przyczepką dynamometryczną, wyniki pomiaru są kodowane i udostępniane w formie tzw. NOTAM (Notice to Airmen).

Ideą autorów jest zaproponowanie metody analogicznej do metody pomiarów szepności z pewnymi modyfikacjami:

- oprócz pomiaru szepności będzie realizowany pomiar współczynnika oporów toczenia, które na lotnisku o nawierzchni trawiastej lub gruntowej stanowią znaczący czynnik ograniczający własności jezdne podwozia kołowego;
- dodatkowo przewiduje się uzyskanie informacji o nierównościach nawierzchni lotniska na podstawie pomiarów, np. drgań koła badawczego.

Niniejszy artykuł prezentuje projekt wózka dynamometrycznego, który będzie głównym narzędziem proponowanej metody oceny nawierzchni lotnisk trawiastych.

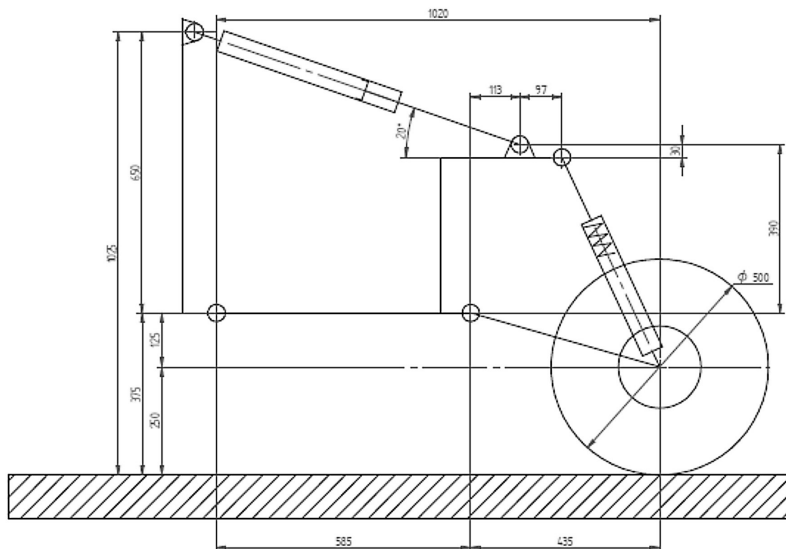
PROJEKT WÓZKA DYNAMOMETRYCZNEGO

Założenia projektowe

Założenia projektu wózka dynamometrycznego opracowano w zgodności z wymaganiami wynikającymi z Projektu a w szczególności uwzględniono następujące właściwości:

- rozmiary kół badanych 13÷15", koło PZL Wilga 35A
- obciążenie pionowe do 4.0 kN,
- kat znoszenia prawo – lewo $\pm 30^\circ$,
- pomiar sił i momentów na osi koła,
- bezprzewodowy przesył sygnałów pomiarowych,
- zdalne sterowanie pomiarami,
- sterowanie wartością obciążenia pionowego,
- hamulec umożliwiający uzyskanie poślizgu koła badanego,
- sterowanie obrotami koła badanego – realizacja poślizgu koła,
- wózek włączony za Suzuki Vitara.

Szkic koncepcyjny wózka z najważniejszymi wymiarami przedstawiono na rysunku 1. W odróżnieniu od rozwiązań typowych dla przyczepki dynamometrycznych, w których obciążenie koła badanego realizowane jest poprzez dodawanie/odejmowanie masy, projektowany wózek wyposażono w siłownik umożliwiający zmianę obciążenia koła badanego. Wynikła z tego konieczność zaprojektowania



Rys. 1. Szkic koncepcyjny wózka dynamometrycznego z głównymi wymiarami

ramy stałej, łączonej sztywno z ramą nośną pojazdu bazowego oraz ramy pośredniej, zawieszona wahlwie, do której montowane jest zawieszenie koła badanego. Zakres wartości obciążenia pionowego jest ograniczony przede wszystkim masą całkowitą pojazdu bazowego i w przypadku zabudowy wózka na odpowiednio ciężkim samochodzie, zakres ten można będzie zwiększyć. Przewiduje się zakres praktycznych prędkości prób 0 – 60 km/h, choć stan nawierzchni badanej może ograniczyć prędkość prób ze względu na niebezpieczne drgania. Zasadniczo, próby z użyciem wózka będą polegały na wielokrotnych przejazdach po badanej nawierzchni z zastosowaniem dwóch trybów pracy koła badanego: (1) toczenie swobodne – wyznaczanie współczynnika oporów toczenia oraz (2) hamowanie – wyznaczanie szepności.

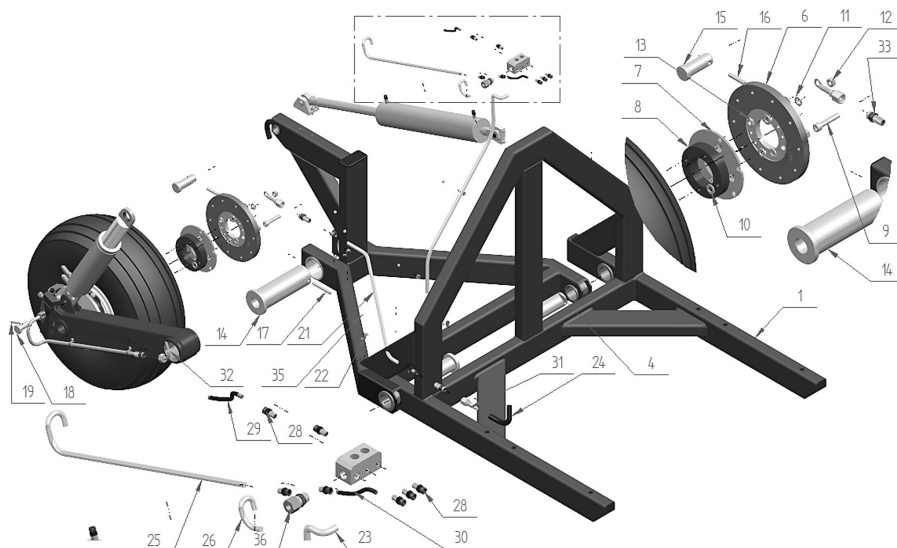
Wybrane szczegóły konstrukcji wózka dynamometrycznego

Do zaprojektowania wózka wykorzystano programy inżynierskie modelujące 3D takie jak Autodesk Mechanical Desktop, 2006 jako i Solid Edge ST4, dzięki którym otrzymano wizualizację oraz bazę rysunków wykonawczych potrzebnych do wykonania części składowych jak i podzespołów wózka. Wykonano kompletną dokumentację, w tym rysunek złożeniowy oraz rysunki wykonawcze wszystkich elementów wózka.

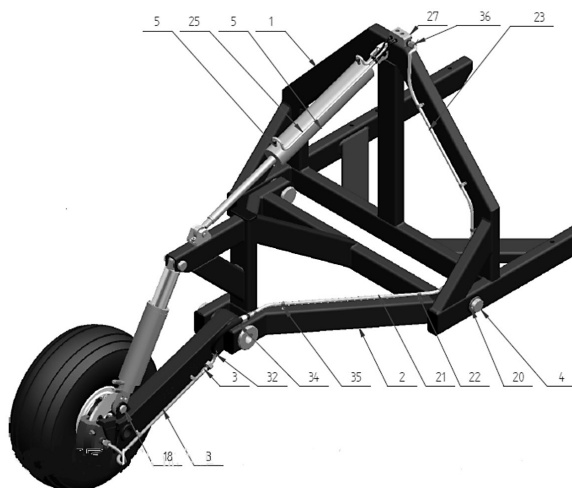
W projekcie stanowiska wykorzystano profile stalowe z materiału PN -ST3S (wg EN S235JR) o przekroju 80x40x5mm, z których zbudowana jest rama montażowa wózka (ozn. WD-02,000,01) montowana do auta przeznaczonego do badań, oraz ramka pośrednia (WD-04,000,02) do której jest montowany zespół podwozia głównego PZL-104 WILGA 35A i znajdujące się w nim koło wykorzystane do badań. W wersji prototypowej konfiguracja wózka umożliwiła badanie współpracy koła w/w samolotu, należy jednak nadmienić, iż zaprojektowano równoległe rozwiązanie umożliwiające instalację dowolnego koła jezdnego o średnicy z zakresu (13 – 15'). W zespole wózka znajduje się układ hydrauliczny do sterowania układem hamulcowym koła pomiarowego oraz do układu hydraulicznego siłownika. Siłownik ma na celu wywarcie stałego nacisku na koło pomiarowe zamontowane na wahaczu. W celu wyeliminowania przeszywnienia układu wykorzystano amortyzator hydrauliczny, oryginalny z podwozia PZL 104 Wilga 35A który jest sterowany ręcznie zakresem tłumienia. Do układu sterowania siłownikiem docisku koła do podłoża zaprojektowano pompę hydrauliczną zasilaną napięciem 12V.

Konstrukcja wózka

Na rysunku 2 pokazano elementy składowe wózka, natomiast rysunek 3 przedstawia widok ogólny wózka.



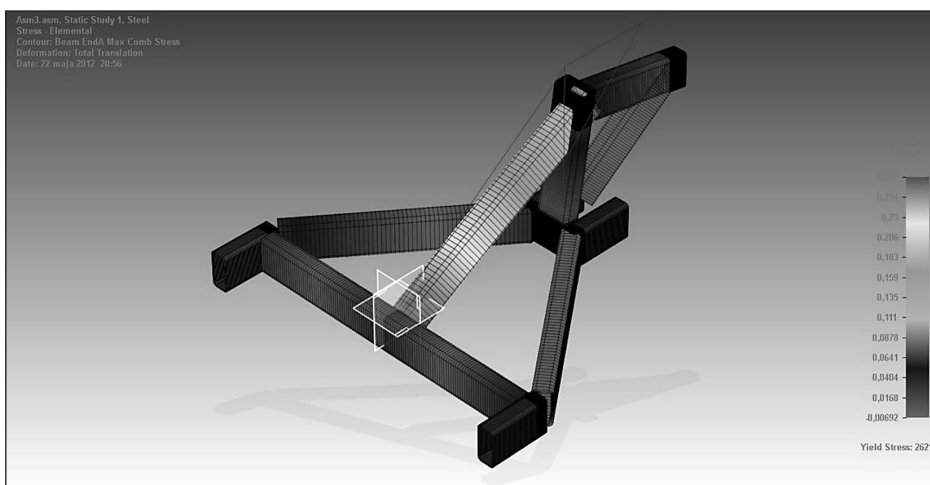
Rys. 2 Elementy składowe wózka dynamometrycznego. Oznaczenia: 1 – rama główna (stała), 2 – rama pośrednia (uchylna), 3 – zespół podwozia głównego PZL 104 Wilga 35A, 4 – trzpień łącznika, 5 – siłownik hydrauliczne, 6 – sześciokładnikowy dynamometr do pomiaru sił i momentów, 7 – tarcza dystansowa, 8 – tuleja pośrednia, 9 – śruba, 10 – podkładka, 11 – podkładka, 12 – nakrętka, 13 – nakrętka, 14 – trzpień, 15 – trzpień mały, 16 – kołek zabezpieczający, 17 – kołek zabezpieczający, 18 – trzpień zabezpieczający, 19 – kołek zabezpieczający, 20 – kołek zabezpieczający, 21 – rurka hydrauliczna, 22 – mocowanie, 23 – rurka hydrauliczna, 24 – przewód hydrauliczny, 25 – rurka hydrauliczna, 26 – rurka hydrauliczna, 27 – kolektor hydrauliczny, 28 – złączka hydrauliczna, 29 – przewód hydrauliczny, 30 – przewód hydrauliczny, 31 – złączka, 32 – złączka, 33 – złączka, 34 – przewód hydrauliczny, 35 – nit 6, 36 – złączka.



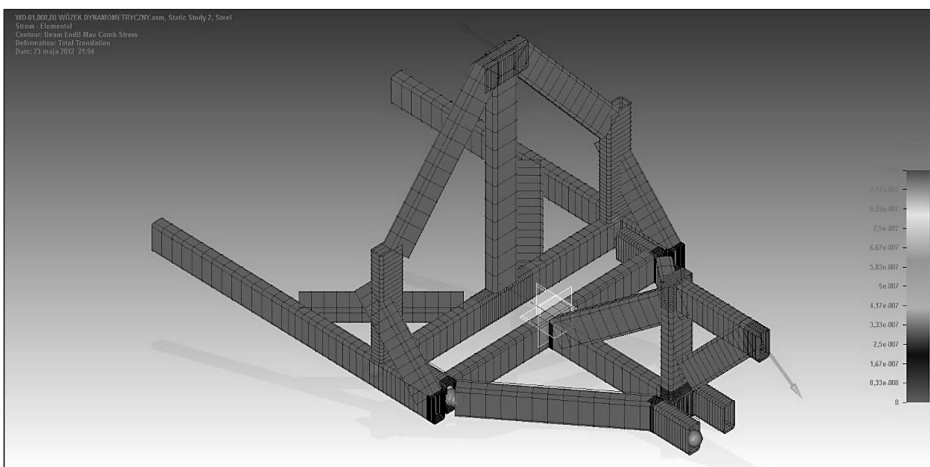
Rys. 3. Widok ogólny wózka dynamometrycznego. Oznaczenia jak na rysunku 2

BADANIA SYMULACYJNE RAMY WÓZKA NA OBCIĄŻENIE

W celu sprawdzenia wytrzymałości ramy montażowej i pośredniej wózka dynamometrycznego zostały przeprowadzone badania symulacyjne. Ich wyniki wskazały konieczność zmian w założonych na wstępie materiałach konstrukcyjnych. Wstępnie dobrany materiał na ramy z profilu 80x40x4mm został zmieniony w celu poprawienia sztywności na 80x40x5mm. Zastosowano również dodatkowe usztywnienie ramki pośredniej w celu usztywnienia ramy. Przykładowe wyniki symulacji pokazano na rysunkach 4 i 5.



Rys. 4. Symulacja obciążenia ramki pośredniej



Rys. 5. Symulacja obciążenia kompletnej ramy wózka

APARATURA POMIAROWO-BADAWCZA WÓZKA DYNAMOMETRYCZNEGO

Zgodnie z założeniami projektowany wózek będzie wyposażony w aparaturę pomiarowo-badawczą umożliwiającą następujące pomiary:

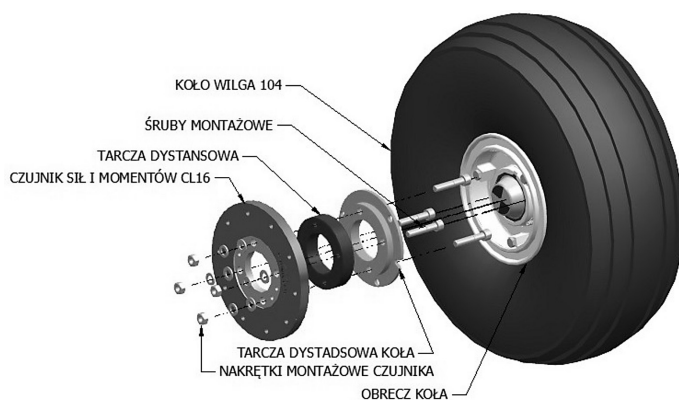
- pomiar siły obciążenia pionowego oraz siły wzdłużnej (oporów toczenia koła);
- pomiar prędkości obrotowej koła badanego;
- wyznaczanie nierówności nawierzchni poprzez pomiar pośredni drgań koła badanego.

Poniżej opisano rozważane w ramach projektu rozwiązania.

Sześciościadnikowy dynamometr do pomiaru sił i momentów na kole badanym

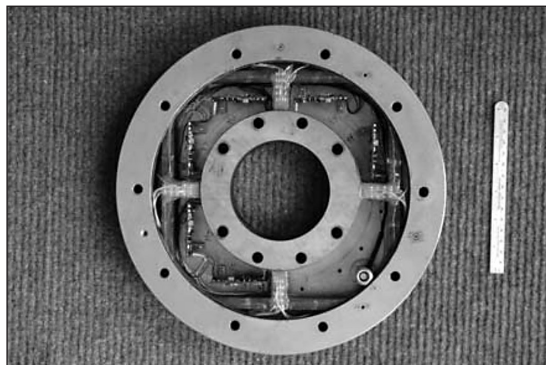
Doświadczenia lat ubiegłych z użytkowania wieloskładnikowych dynamometrów do pomiaru sił i momentów na kole jezdnym [1, 2] skłoniły konstruktorów wózka do zastosowania tego rodzaju urządzeń pomiarowych w opisywanym projekcie. Dynamometr sześciostadnikowy umożliwia pomiar trzech sił, działających w kierunkach X – Y – Z oraz momentów wokół trzech osi. Choć pierwotne przeznaczenie wózka wymaga jedynie dwóch z 6 mierzonych wielkości (co można uzyskać również na sposób pomiaru poza kołem, np. w osi lub zawieszeniu), to jednak założono rozwojowy charakter wózka, zatem zastosowanie czujników o szerszych możliwościach jest uzasadnione, pomimo wyższych kosztów. Na obecnym etapie projektu rozpatrywane są dwa rozwiązania:

- zastosowanie dynamometru jako podzespołu dodatkowego, montowanego z użyciem tarczy pośredniej między piastę koła a wahacz (patrz rysunek 6),
- zaprojektowanie i wykonanie nowego dynamometru, znacznie mniejszego, zintegrowanego w piastę koła badanego (koło PZL 104 Wilga 35A).



Rys. 6. Jedno z rozpatrywanych rozwiązań integracji sześciostadnikowego czujnika sił i momentów dla wózka dynamometrycznego

Niezależnie od wybranej opcji, dynamometr sześciokładnikowy jest precyzyjnym przyrządem pomiarowym zbudowanym z wykorzystaniem tensometrii elektrooporowej. Element sprężysty, pokazany na rysunku 7, składa się z 4 poprzeczek radialnych oraz 4 obwodowych. Tensometry naklejane są na wybranych powierzchniach poprzeczek elementu sprężystego, tworząc układ pełnego mostka dla każdej z mierzonych wielkości.



Rys. 7. Element sprężysty dynamometru sześcioelementowego do pomiaru sił i momentów

Dodatkowo, zastosowano tensometry „martwe” w celu kompensacji temperaturowej. Wewnątrz korpusu dynamometru, pomiędzy poprzeczkami elementu sprężystego, wbudowano wzmacniacze sygnału dla wszystkich sześciu kanałów pomiarowych.

Komputer pokładowy z systemem bezprzewodowego przesyłu danych

Innym interesującym rozwiązaniem zastosowanym w projekcie wózka dynamometrycznego do badań współpracy koła ogumionego z nawierzchnią nieutwardzoną jest komputer pokładowy, którego głównym zadaniem jest gromadzenie i analiza danych pomiarowych oraz szybkie wyznaczanie żądanych parametrów w trakcie pomiarów. Komputer zrealizowano na standardowej platformie *TABLET PC*, pracującej w systemie *Android* i wykorzystującej technologię bezprzewodowe do komunikacji z przetwornikiem sił (dynamometrem), który podczas testów obraca się. Głównym elementem komputera jest specjalistyczne oprogramowanie, umożliwiające realizację następujących funkcji praktycznych:

- ciągła komunikacja z urządzeniami pomiarowymi;
- nastawy parametrów zmiennych, zależnych od warunków pomiaru, itd;
- uaktywnianie kanałów pomiarowych;
- wyzwalanie i zatrzymywanie pomiarów;
- przesył danych pomiarowych drogą radiową oraz zapis danych;
- analiza danych pomiarowych według założonych algorytmów oraz
- wyznaczenie i wyświetlenie na ekranie wyników finalnych.

Istotnym z punktu widzenia wiarygodności uzyskiwanych wyników było zaprogramowanie procedury pomiarowej, która jest następująca:

- rozpędzanie do prędkości pomiarowej;
- realizacja pomiaru oporów toczenia (10 sekund);
- stopniowe hamowanie koła aż do zablokowania – realizacja pomiaru szepności.

Bezprzewodowy przesył danych pomiarowych zaprojektowano z użyciem technologii Bluetooth® a maksymalny zasięg łącza radiowego wynosi do 25 m. Niezawodność zastosowanej technologii przesyłu bezprzewodowego sprawdzono praktycznie w zakończonych pracach badawczych, w których realizowano pomiary z użyciem dwóch sześćelementowych dynamometrów zainstalowanych na kołach kierowanych pojazdu badawczego. Do współpracy z modułem nadawczo-odbiorczym zintegrowanym z dynamometrem konieczne jest użycie kompatybilnego urządzenia bazowego, którego rolę pełni opisany powyżej komputer pokładowy, wyposażony fabrycznie w złącze Bluetooth®.

PODSUMOWANIE

Wózek dynamometryczny przedstawiony w referacie będzie wykorzystywany do badań symulacyjnych współpracy koła ogumionego z nawierzchnią nieutwardzoną. Pierwotne zastosowanie dotyczy badań nawierzchni lotniskowych, natomiast wykorzystanie wózka do innych celów badawczych jest również rozpatrywane perspektywicznie. Zastosowane technologie pozwolą na prowadzenie pomiarów w warunkach polowych i uzyskiwanie natychmiastowych wyników pożądaných parametrów (współczynnik oporów toczenia i szepność).

LITERATURA

1. Pytka J., A Wheel Dynamometer for Off-Road Vehicle Testing. SAE Technical Paper Series, Paper No. 2008-01-0482, Warrendale, USA, 2008.
2. Pytka J., Tarkowski P., Fijałkowski S., Budzyński P., Dąbrowski J., Kupicz W., Pytka P., An instrumented vehicle for off road dynamics testing, Journal of Terramechanics, 48, 2011, 384-395.

DESIGN OF A SINGLE WHEEL TESTER FOR WHEEL-SOIL INTERACTION RESEARCH

Abstract

In this work we have presented a completed design of a single wheel tester for research of wheel-soil interactions. A primary purpose of the tester will be measurements of rolling resistance and friction between an aircraft wheel and a surface of grassy, unsurfaced airfields.

Keywords: Terramechanics, single wheel tester, grassy airfields and airstrips, measuring methods.