

**Prof. Piotr Tarkowski**

Department of Mechanical Engineering  
Lublin University of Technology  
Nadbystrzycka str., 20-816 Lublin, Poland  
E-mail: p.tarkowski@pollub.pl

**Dr inż. Jarosław Pytko**

Department of Mechanical Engineering  
Lublin University of Technology  
Nadbystrzycka str., 20-816 Lublin, Poland  
E-mail: j.pytko@pollub.pl

**Dr hab. inż. Piotr Budzyński**

Department of Mechanical Engineering  
Lublin University of Technology  
Nadbystrzycka str., 20-816 Lublin, Poland  
E-mail: p.budzynski@pollub.pl

**Mgr inż. Łukasz Kaznowski**

c/o Department of Mechanical Engineering  
Lublin University of Technology  
Nadbystrzycka str., 20-816 Lublin, Poland  
E-mail: l.kaznowski@wp.pl

## METODA OCENY GRUNTOWYCH NAWIERZCHNI LOTNISKOWYCH

### Streszczenie

W pracy przedstawiono projekt metody oceny gruntowych nawierzchni lotniskowych w aspekcie warunków współpracy kół podwozia samolotu z nawierzchnią. Zawarto podstawy teoretyczne, dostępne metody pomiarowe możliwe do zastosowania w projektowanej metodzie a także opisano projektowane rozwiązania. Przewiduje się, że przygotowywana do wdrożenia metoda może przynieść znaczne korzyści w zakresie lepszego wykorzystania licznych lotnisk trawiastych w Polsce, także w aspekcie bezpieczeństwa operacji lotniczych.

**Słowa kluczowe:** Naziemne operacje lotnicze, lotnictwo ogólne, samoloty, lotniska gruntowe i darniowe, metody badawcze.

### 1. Wprowadzenie

Eksploatacja samolotów na lotniskach gruntowych, trawiastych lub innych nieutwardzonych, wymaga spełnienia warunków co do rodzaju i stanu nawierzchni. Okształcalność nawierzchni naturalnych wpływa na pogorszenie trakcyjnych własności kołowych elementów jezdnych w zakresie oporu toczenia i szepności. Dodatkowo, zmiany te są również funkcją chwilowego stanu gruntu, w tym wilgotności, która jest uwarunkowana czynnikami pogodowymi. Zatem bezpieczeństwo i efektywność operacji lotniczych na lotniskach o nawierzchni gruntowej lub trawiastej wymaga znajomości stanu nawierzchni i jej przydatności dla ruchu konkretnych samolotów. Do oceny utwardzonych nawierzchni

lotniskowych stosuje się analityczne metody klasyfikacji przyjęte przez ICAO: LCN (*Load Classification Number*) – obecnie już nie stosowana, ACN-PCN (*Aircraft Classification Number – Pavement Classification Number*) [4], a także metody doświadczalne, m. in. z użyciem testera szepności (*Airport Surface Friction Tester, SARSYS Trailer Friction Tester* [1, 10, 17]) czy oprzyrządowanych pojazdów badawczych (np. *CRREL Instrumented Vehicle* [18]). W tych przypadkach ocenie podlega głównie współczynnik szepności, a metoda ma zastosowanie do oceny nawierzchni utwardzonych w warunkach oblodzenia, wilgotności, itd. [3, 10]. Należy nadmienić, iż przytoczone metody doświadczalne mają ograniczoną stosowalność w odniesieniu do nawierzchni nieutwardzonych. Metody analityczne bazują na modelach opisujących zachowanie się nawierzchni pod obciążeniem kół podwozia (model Boussinesque’a, model Westergaarda, [9]). W pewnych sytuacjach (np. znaczna wilgotność podłoża, różne rodzaje gruntów) własności predykcyjne tych modeli mogą okazać się niewystarczające i przytoczone powyżej metody nie zapewniają precyzyjnej oceny nawierzchni. Wynika stąd uzasadnienie dla wprowadzenia nowej metody, dostosowanej do własności nawierzchni nieutwardzonych i uwzględniającej oddziaływania wzajemne w układzie koło ogumione – nawierzchnia.

Jednym z priorytetów rozwoju regionalnego w krajach EU jest rozwój ruchu lotniczego w regionie. Wykorzystanie lotnisk gruntowych do celów lotnictwa ogólnego (lotnictwo gospodarcze, sanitarne, przewozy kurierskie, przewozy pasażerskie tzw. „aerotaxi”, lotnictwo prywatne) może stanowić alternatywę oraz dopełnienie dla lotniska komunikacyjnego. Należy nadmienić, iż w Unii Europejskiej lotniska gruntowe są ważnym elementem w sieci lotnisk dla potrzeb lotnictwa ogólnego (GA – *General Aviation*), zaś sama branża stanowi niezmiernie ważny czynnik stymulujący rozwój gospodarczy, szczególnie rozwój regionów. Potwierdzają to liczne przykłady z państw Europy Zachodniej (Wielka Brytania, Francja, Niemcy). Dlatego też, efekt wdrożenia metody oceny takich lotnisk dla szerszego ich wykorzystania może stanowić pośrednio czynnik rozwoju tej gałęzi gospodarki. Należy również nadmienić, iż pozytywne efekty wdrożenia tej metody mogą przynieść korzyści nie tylko dla województwa lubelskiego ale także w innych regionach kraju.

## 2. Istota nowej metody

Ideą autorów było zaproponowanie zintegrowanej metody oceny warunków startu i lądowania, uwzględniającej rodzaj i stan nawierzchni lotniska. Celem metody jest określenie parametrów istotnych dla osiągnięcia koła podwozia samolotu i wpływających na następujące osiągnięcia samolotu:

- długość rozbiegu i startu;
- długość dobiegu i lądowania;
- komfort załogi i pasażerów.

Parametry, o których mowa powyżej to współczynnik oporu toczenia koła samolotowego, czepność oraz nierówności nawierzchni lotniska. Użytkownikami metody mają być administratorzy lotnisk trawiastych lub gruntowych, natomiast bezpośrednimi beneficjentami będą piloci wykonujący operacje lotnicze na tego typu lotniskach. Znając aktualne wartości istotnych parametrów stanu nawierzchni lotniska, będzie możliwe wyznaczenie osiągnięć danego samolotu i stwierdzenie możliwości bezpiecznego wykonania danej operacji.

Metoda składa się z następujących elementów:

- pomiar szepności, realizowany przy użyciu wózka dynamometrycznego;
- pomiar współczynnika oporów toczenia, które na lotnisku o nawierzchni trawiastej lub gruntowej stanowią znaczący czynnik ograniczający własności jezdne podwozia kołowego;

- pomiar nierówności nawierzchni lotniska z wykorzystaniem bezkontaktowej metody optycznej (LIDAR – *Light Detection and Ranging*);
- jako dopełnienie procedur pomiaru szepności, współczynnika oporu toczenia oraz nierówności nawierzchni opracowano oprogramowanie – aplikację mobilną, która służy do wyznaczania długości startu samolotu, z uwzględnieniem wpływu rodzaju i stanu nawierzchni lotniska.

Niniejsza praca przedstawia główne założenia, podstawy teoretyczne oraz szczegóły zastosowanych rozwiązań.

### 3. Podstawy teoretyczne

#### 3.1 Opór toczenia

Opór toczenia koła podwozia samolotu na nieutwardzonej nawierzchni gruntowej lub trawiastej determinuje osiągi samolotu przy starcie i lądowaniu. Stinton [13] podaje wartości współczynnika oporu toczenia dla lotniska trawiastego (0.05 i 0.08, odpowiednio dla trawy krótkiej i trawy długiej oraz 0.13 dla trawy długiej mokrej). W efekcie, długość startu typowego samolotu sportowego wzrasta o 10-25% w porównaniu do lotniska utwardzonego. Ma to zasadnicze znaczenie w przypadku korzystania z coraz bardziej licznych i popularnych lotnisk i lądowisk prywatnych lub rezerwowych. Filippone [8] podaje wzory do obliczania długości rozbiegu  $l_r$  oraz dobiegu  $l_d$  w zależności od m.in. współczynnika oporu toczenia,  $f_t$  i czepności,  $\mu$ :

$$l_r = \frac{mV^2}{2\frac{\eta P}{V} - \frac{1}{4}\rho AC_D V^2 - f_t mg} \quad (1)$$

$$l_d = \frac{1}{2g(\mu + f_t)} \ln\left(\frac{1}{2}\rho A(C_D - f_t C_L)V^2 + mg(\mu + f_t)\right) \quad (2)$$

gdzie:  $m$  – masa samolotu,  $V$  – prędkość oderwania,  $\eta$  – sprawność śmigła,  $P$  – moc silnika,  $A$  – powierzchnia nośna,  $C_D$  – współczynnik oporu szkodliwego,  $C_L$  – współczynnik siły nośnej,  $\rho$  – gęstość powietrza,  $g$  – przyspieszenie ziemskie.

Opór toczenia na nawierzchni nieodkształcalnej jest łatwy do wyznaczenia. Najczęściej stosowane metody badawcze to hol dynamometryczny lub próba wybiegu. W przypadku oporu toczenia na nawierzchniach odkształcalnych, przy niższych prędkościach możliwe metody badawcze to hol dynamometryczny lub metoda pośrednia z wykorzystaniem pomiaru głębokości koleiny.

Sytuacja komplikuje się w przypadku większych prędkości jazdy na nawierzchni odkształcalnej. Mamy tu do czynienia z efektami dynamicznymi we wzajemnym oddziaływaniu koło – grunt, związanymi z bezwładnością deformowanej gleby oraz z tzw. efektem „spray”, czyli rozpryskiwania cząstek luźnych podłoża, gdy na skutek oddziaływania koła cząsteczki te uzyskują dużą energię kinetyczną. Ponieważ tradycyjne metody holu dynamometrycznego są mało dokładne w przypadku holowania samolotu, dostępne metody badawcze ograniczają się do testów z użyciem specjalistycznego pojazdu badawczego wyposażonego w tzw. „piąte koło” do badań oporu toczenia lub wózek dynamometryczny, ewentualnie stosuje się pomiar sił działających w układzie koło – nawierzchnia, za pomocą wieloskładnikowego czujnika zabudowanego na kole pojazdu.

Metoda wyznaczania oporu toczenia z zastosowaniem koła dynamometrycznego, wprowadzona i zastosowana praktycznie przez autorów [11], polega na pomiarach sił

działających w układzie koło-nawierzchnia, na podstawie których wyznaczany jest współczynnik oporu toczenia. Wyznaczenie współczynnika oporu toczenia w tej metodzie opiera się na znajomości następujących wielkości:

- $M_y$  – moment napędowy lub hamujący na kole pomiarowym;
- $F_v$  – siła obciążenia pionowego koła
- $r_d$  – promień dynamiczny opony.

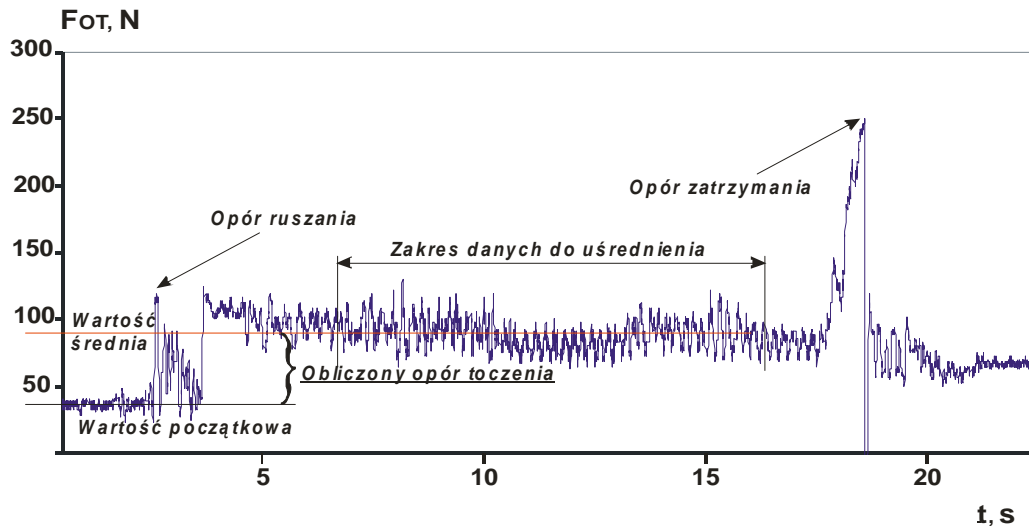
Współczynnik  $f_t$  wyraża się wówczas wzorem:

$$f_t = \frac{M_y}{r_d} \times \frac{1}{F_v} \quad (3)$$

Pilotażowe badanie z użyciem pojazdu wyposażonego w sześciokładnikowy dynamometr na kole jezdnym na lotnisku trawiastym pokazano na rysunku 1. Podczas jazdy z prędkością ok. 3m/s wyznaczono moment oporów toczenia  $M_y$  oraz siłę obciążenia pionowego  $F_v$  dla wybranego odcinka pomiarowego na pasie lotniska. Koło jezdne, na którym zainstalowano dynamometr, było podczas próby kołem swobodnym. Dane pomiarowe uśredniono dla zakresu, w którym obserwowano ustalenie się wartości mierzonych wielkości. Przykładowy wykres  $M_y$  przedstawiono na rysunku 2. Należy zaznaczyć, że metoda pozwala na wyznaczenie współczynnika oporu toczenia dla opony zabudowanej na kole dynamometrycznym a w przypadku badań pilotażowych była to opona inna niż typowa opona lotnicza. Dlatego też, na potrzebę proponowanej metody, zaprojektowano wózek dynamometryczny z kołem samolotowym, opisany w rozdziale 4.



Rys. 1 Dynamometr wielokładnikowy na kole jezdnym podczas pomiaru momentu  $M_y$  na lotnisku trawiastym



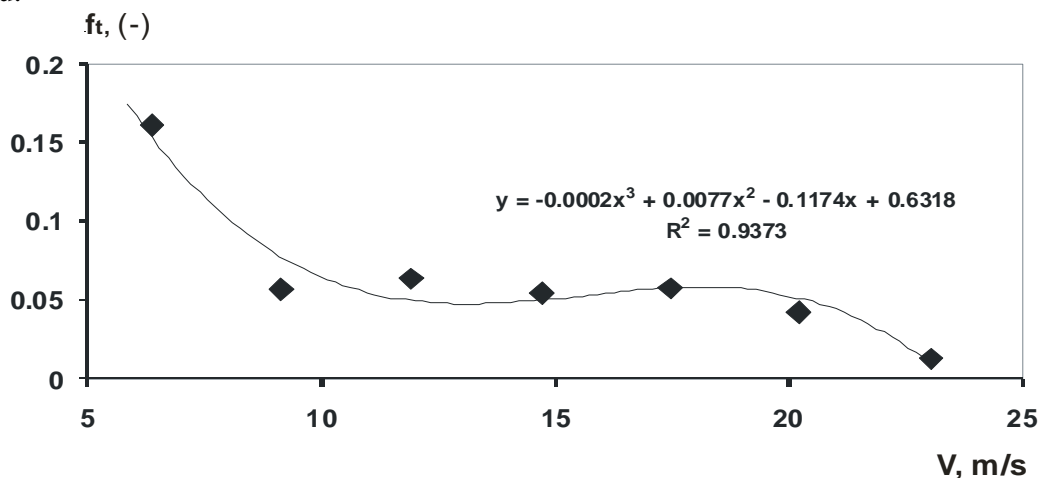
Rys. 2 Przykładowy wynik pomiaru siły oporu toczenia koła ogumionego na nawierzchni lotniska trawiastego.

Prędkość jazdy wpływa znacząco na opór toczenia. Mitschke [12] przedstawił składniki współczynnika oporu toczenia opony samochodowej na nawierzchni utwardzonej następująco:

$$f_t = k_{R0} + k_{R1} \frac{V}{100} + k_{R4} \left( \frac{V}{100} \right)^4 \quad (4)$$

gdzie:  $k_{R0}$ ,  $k_{R1}$ ,  $k_{R4}$  – współczynniki odnoszące się do poszczególnych zakresów prędkości (odpowiednio 0 – 30 km/h, 30 – 120 km/h i powyżej 120km/h), wyznaczane doświadczalnie.

Wyznaczona w ramach prac [14] i [15] zależność sumarycznego współczynnika oporu toczenia od prędkości jazdy (rys. 3), stanowi dowód na to, iż uwzględnianie prędkości jazdy przy wyznaczaniu współczynnika oporu toczenia koła samolotu na lotnisku gruntowym lub trawiastym jest niezbędne. Zastosowanie wózka dynamometrycznego ciągniętego za samochodem terenowym umożliwi badanie współczynnika oporu toczenia na nawierzchni lotniska w szerokim zakresie prędkości a także identyfikację składowych współczynnika  $f_t$ , jak we wzorze (4), z uwzględnieniem zjawisk wspomnianych na początku niniejszego akapitu.



Rys. 3 Wpływ prędkości jazdy na współczynnik oporów toczenia koła na nawierzchni lotniska trawiastego

### 3.2 Szczepność

Rozpatrując koło toczące się po nawierzchni, zauważamy, że możliwe są dwa tryby pracy:

- koło toczne, swobodnie obracające się wokół osi montażowej;
- koło napędzające lub hamujące, do którego przyłożono moment napędowy lub hamujący.

W obszarze kontaktu bieżnika opony koła z podłożem powstaje składowa reakcji stycznej w strefie styku koła z podłożem, ukierunkowana poziomo, lub równoległe do stycznej do nawierzchni w punkcie jej przyłożenia a zgodnie z prawem Amontonsa wyraża się elementarnym równaniem:

$$X = F_v \mu \quad (5)$$

gdzie:  $F_v$  – jest siłą pionową oddziaływania koła na nawierzchnię oraz  $\mu$  czynnikiem proporcjonalności, zwanym współczynnikiem tarcia lub w terminologii branżowej, współczynnikiem przyczepności.

W terminologii lotniczej zamiast terminu przyczepność stosuje się szczepność, choć z fizykalnego punktu widzenia są to pojęcia jednoznaczne, oczywiście w odniesieniu do zjawisk towarzyszących toczeniu się koła z poślizgiem. Szczepność posiada fundamentalne znaczenie w przypadku dobiegu, gdy samolot ma wytracić swoją energię kinetyczną na sposób pracy siły tarcia [16]. Wówczas, im większy współczynnik szczepności, tym szybciej samolot zatrzyma się na pasie. W przypadku lotnisk gruntowych lub trawiastych, szczególnie o krótkim pasie, znajomość szczepności jest istotna pomimo, iż stosunkowo duże opory toczenia pomagają w skróceniu dobiegu. Ważne jest ponadto stałe monitorowanie szczepności, gdyż parametr ten pozostaje w ścisłej zależności od warunków pogodowych [1, 3].

Do pomiaru szczepności pasa utwardzonego lotniska komunikacyjnego używa się urządzeń montowanych na pojeździe lub na przyczepce. Urządzenia te posiadają koło jezdne ogumione na zawieszeniu umożliwiającym regulowany lub nastawny docisk pionowy oraz hamulec, którego zadaniem jest takie ustalenie prędkości obrotowej koła, by wystąpił poślizg.

Zastosowanie wieloskładnikowego dynamometru do pomiaru sił i momentów na kole jezdnym może być dobrym rozwiązaniem w przypadku nawierzchni gruntowych lub trawiastych. Moment hamujący (lub napędowy),  $M_Y$ , mierzony przez to urządzenie jest wielkością bazową dla wyznaczenia szczepności. Zależność między składową reakcją poziomą a momentem  $M_Y$  wyraża poniższe równanie:

$$\vec{M}_Y = \vec{r} \times \vec{X} \quad (6)$$

gdzie  $\vec{r}$  jest w rozpatrywanym przypadku promieniem dynamicznym koła.

Ostatecznie, szczepność będzie wyznaczana z następującego równania:

$$\mu = \frac{M_y}{r F_z} \quad (7)$$

O ile pominięcie poślizgu wynikający z odkształcalności opony w kierunku wzdłużnym dla koła toczącego nie spowoduje zmniejszenia ogólności rozważań, poślizg koła napędzającego lub hamującego należy uwzględnić. W rozwiązaniu przyjętym przez autorów, poślizg koła badanego będzie realizowany przez hamowanie.

### **3.3 Nierówności i chropowatość nawierzchni**

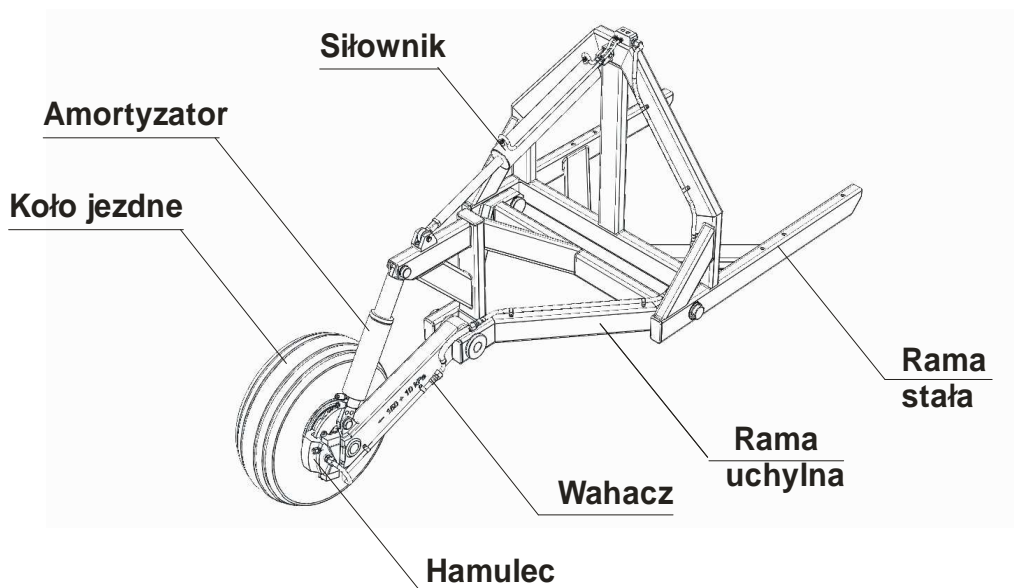
W przypadku pasa nieodkształcalnego opis profilu nawierzchni metodami analitycznymi można uzyskać stosując modele statystyczne, w których nawierzchnia jest traktowana jako dwuwymiarowy, całkowicie jednorodny i izotropowy proces losowy [5]. Rolę charakterystyki nierówności nawierzchni pełni w tym przypadku funkcja gęstości widmowej. Bezwzględne wartości chropowatości mieszczą się w przedziale 0,001 – 0,04m. Dla nawierzchni lotniska trawiastego, o stosunkowo dużych nierównościach, z przedziału 0,01 – 0,2m stosuje się podobne metody opisu analitycznego, m.in. z wykorzystaniem teorii chaosu. Dla celów metody oceny nawierzchni pod kątem dopuszczenia do użytkowania w charakterze lotniska lub lądowiska, istotne jest opracowanie metody doświadczalnej, bazującej na istniejących modelach analitycznych. Metoda taka powinna na podstawie jak najprostszyc pomiarów w warunkach polowych dać dokładną i jednoznaczną informację co do aktualnej chropowatości nawierzchni.

Jednym z możliwych rozwiązań jest zastosowanie bezkontaktowej metody wyznaczania profilu nawierzchni, z użyciem LIDAR-a, który jest urządzeniem optoelektronicznym, wykorzystującym impulsową pracę lasera. Nanosekundowe impulsy o wysokiej energii, wysyłane w kierunku obiektu rozpraszającego lub odbijającego, są rejestrowane przez selektywny odbiornik (fotopowielacz) i analizowane widmowo. Najczęstsze zastosowanie LIDAR-a to obserwacja i dokładna analiza ilościowo-jakościowa aerozolu zawartego w powietrzu. Pomiar odległości jest pierwotną funkcją LIDAR-a, w tym przypadku urządzenie działa w paśmie optycznym (światła widzialnego). Zasada pomiaru odległości polega na pomiarze czasu przebiegu impulsu od lasera do obiektu i z powrotem. Pewną wadą tej metody w odniesieniu do pomiarów dużych odległości jest wrażliwość na warunki atmosferyczne, szczególnie wszelkiego rodzaju mgły i zamglenia, ale także rozkład temperatury na drodze impulsu, pionowe i poziome ruchy powietrza.

## **4. Zastosowane rozwiązania**

### **4.1 Wózek dynamometryczny**

Zaprojektowano i skonstruowano wózek dynamometryczny, wleczony za pojazdem samochodowym, przy czym między główną ramą wózka a pojazdem zastosowano połączenie rozłączne o dużej sztywności. Rama uchylna, zawieszona wahliwie, umożliwia realizację zmiennego obciążenia pionowego, zadawanego na koło testowe z użyciem siłownika. Na ramie pośredniej zabudowano kompletny podzespół podwozia samolotu PZL 104 Wilga 35A, wraz z oryginalnym wahaczem i kołem podwozia głównego. Takie rozwiązanie konstrukcji wózka zapewnia odwzorowanie kinematyki oryginalnego podwozia samolotu Wilga a dodatkowo umożliwia zadawanie zmiennego obciążenia pionowego, co jest korzystne w przypadku symulacji rozbiegu lub dobiegu samolotu, kiedy to zmienna z prędkością siła nośna odciąża podwozie. Konstrukcja wózka przedstawiona jest na rysunku 4.



Rys. 4. Schemat wózka dynamometrycznego do badań współpracy koła samolotu z nawierzchnią

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 – 60km/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 trzech trybów pracy koła badanego:

- toczenie swobodne – wyznaczanie współczynnika oporów toczenia;
- hamowanie – wyznaczanie szepności.

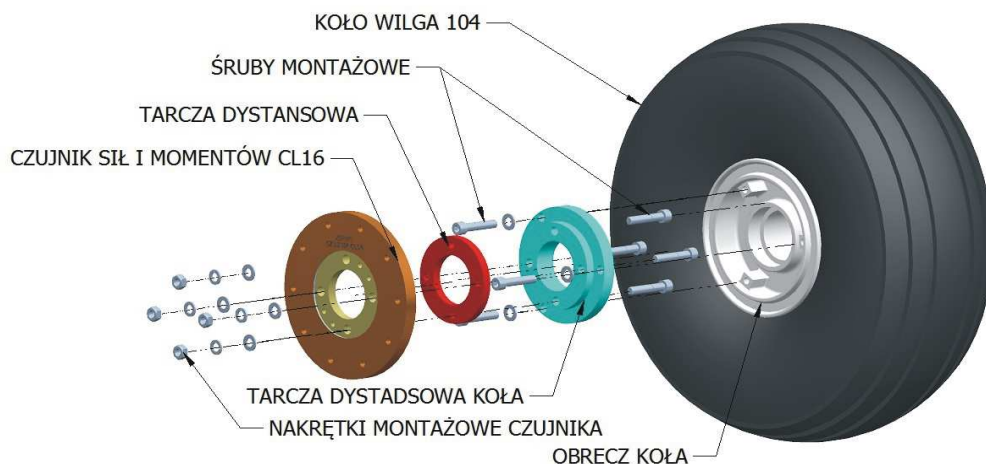
Wózek wyposażono w aparaturę pomiarowo-badawczą umożliwiającą następujące pomiary:

- pomiar siły obciążenia pionowego oraz siły wzdłużnej (oporów toczenia koła);
- pomiar prędkości obrotowej koła badanego, niezbędnej do wyznaczenia poślizgu koła.

#### 4.2 Wieloskładnikowy dynamometr na kole jezdnym

Ważnym podzespołem konstrukcji wózka jest koło podwozia głównego wraz z zintegrowanym wieloskładnikowym dynamometrem do pomiaru sił i momentów działających podczas jazdy. Dynamometr zaprojektowano i skonstruowano w oparciu o technikę tensometrii elektrooporowej. Pomiar realizowany jest przez dwa niezależne elementy sprężyste, z których jeden mierzy moment hamujący  $M_Y$ , zaś drugi, pozostałe składowe ( $F_Z$ ,  $F_Y$ ,  $F_X$  oraz  $M_Z$  i  $M_X$ ). Koło podwozia wraz z dynamometrem pokazano na rysunku 5. W konstrukcji dynamometru zintegrowano kompletną elektronikę odpowiedzialną za formowanie sygnałów analogowych a także mikroprocesorowy system bezprzewodowego przesyłu danych z koła do komputera pokładowego.





Rys. 5 Koło podwozia głównego samolotu PZL 104 Wilga 35A z dynamometrem wieloskładnikowym

### 4.3 Bezprzewodowy system pomiarowy

System pomiarowy zbudowano na bazie mobilnej platformy zarządzania eksperymentem (laptop, tablet, smartfon, telefon, itp.) opartej o system operacyjny Android. Oprogramowanie działające pod kontrolą systemu operacyjnego Android umożliwia pobieranie, na drodze łączności bezprzewodowej danych zmierzonych przez moduł pomiarowy: sił, momentów działających na kole wózka dynamometrycznego ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ,  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$ ) oraz wartości prędkości obrotowej koła. Program umożliwia również: rejestrację zgromadzonych danych, wizualizację wyników pomiarów w czasie rzeczywistym oraz obliczanie współczynnika oporu toczenia i współczynnika szepności po zakończeniu pomiarów.

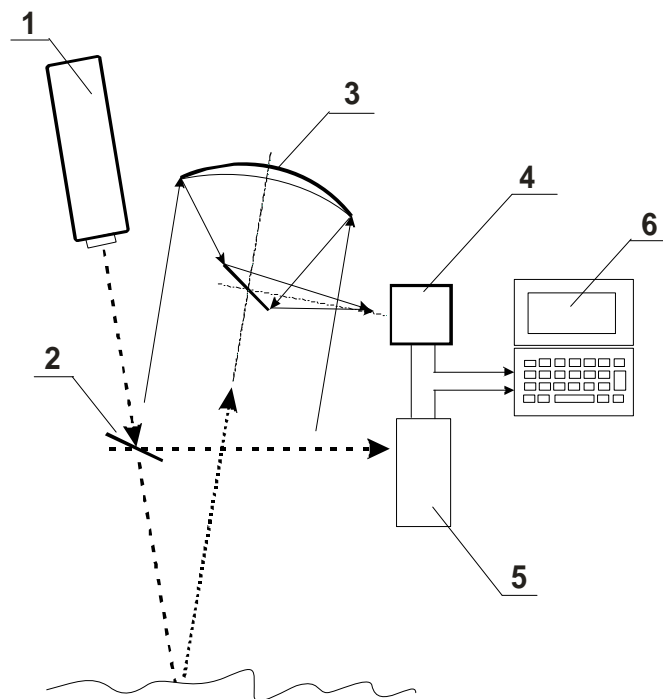
Układem kondycjonowania sygnału składa się z 16-bitowego, 8-kanalowego przetwornika analogowo-cyfrowego działającego zasadzie sukcesywnej aproksymacji (SAR – Successive Approximation Register) o maksymalnej częstotliwości próbkowania sygnału 115 kps (kilo samples per second), systemu akwizycji danych opartego na mikrokontrolerze 32-bitowym o architekturze ARM Cortex M3 oraz modułu Bluetooth 2.0 klasy 1 o zasięgu ponad 600m. Zadaniem mikrokontrolera jest zarządzanie akwizycją danych, wstępna obróbka i filtrowanie sygnału cyfrowego oraz utrzymywanie łączności bezprzewodowej z mobilną platformą zarządzania eksperymentem.

Niewątpliwą zaletą, z punktu widzenia użytkownika, prezentowanego systemu pomiarowego jest zastosowanie mobilnej platformy zarządzania eksperymentem opartej o system Android, który dedykowany jest do obsługi urządzeń przenośnych. Obsługa aplikacji opartych o system Android jest łatwa i intuicyjna, dobrze sprawdza się w pojeździe, w warunkach ruchu, jak i poza pojazdem np. w niesprzyjających warunkach pogodowych. Szeroki wybór urządzeń mobilnych, o różnych cechach konstrukcyjnych i funkcjonalnych (czas pracy na baterii, wielkość i typ ekranu dotykowego, obecność modułu GPS lub aparatu cyfrowego, obecność systemu łączności bezprzewodowej – bluetooth, Wi-Fi, 3G, LTE (4G), itp.) umożliwia łatwe rozbudowanie i dostosowanie platformy pomiarowej do konkretnych wymagań użytkownika. Dodatkowe aplikacje dostępne na rynku, często darmowe, które mogą działać równolegle do oprogramowania obsługującego pomiary, pozwalają na jeszcze lepszą konfigurację systemu do określonych zadań. Możliwa jest np. automatyczna synchronizacja lub backup danych pomiarowych na inny komputer, zapisywanie danych w

tzw. „chmurze”, znakowanie danych za pomocą współrzędnych geograficznych, dokumentacja fotograficzna eksperymentu i wiele innych.

#### 4.4 Wyznaczanie profilu nawierzchni lotniska trawiastego za pomocą LIDAR-a

Skanowanie i tworzenie numerycznego profilu nawierzchni realizowane jest w praktyce przy użyciu dalmierzy laserowych, przy czym ich zasięg wynosi do ok. 1m. Dalmierz jest montowany na wysięgniku pojazdu testowego a pomiaru dokonuje się podczas jazdy. Ideą autorów jest zbadanie możliwości wykorzystania LIDAR-a o parametrach umożliwiających skanowanie nawierzchni lotniska z pokładu lecącego samolotu, co wymusza zwiększenie zasięgu lasera do ok. 500m. Schemat ideowy LIDAR-a przedstawiono na rysunku 6. Impuls laserowy jest formowany optycznie w układzie zwierciadeł wklęsłych a następnie w soczewce teleskopu. Odbity impuls laserowy wraca do teleskopu, skąd jest przekazywany na fotonowielacz a następnie do układu pomiarowego, w którym następuje digitalizacja. Cyfrowy sygnał pomiarowy podlega analizie, przy czym możliwe są różne algorytmy analizy sygnałów [4].



Rys. 6 Schemat LIDAR-a. Oznaczenia: 1 –laser impulsowy, 2 – dzielnik, 3 – teleskop, 4 – fotonowielacz, 5 – licznik, 6 – obróbka i analiza sygnałów.

Nierówności nawierzchni lotniska gruntowego lub trawiastego mogą być opisane parametrem średniej kwadratowej lub wartości skutecznej. Jeśli jako miarę bezwzględną nierówności nawierzchni przyjmiemy ich wysokość,  $z$  w funkcji wymiaru liniowego jako zmiennej – długości,  $x$  (w przypadku analizy powierzchni będzie to zależność dwu zmiennych, długości i szerokości badanej powierzchni), wówczas wartość skuteczna nierówności może być wyrażona następująco:

$$z_{SK} = \sqrt{\frac{1}{x} \int_{x_0}^{x_0+x_i} z^2(x) dx} \quad (8)$$

Tzw. chmury punktów, otrzymane z LIDAR-a umożliwiają, poprzez zastosowanie dostępnych i sprawdzonych algorytmów, wyznaczenie wartości średniej kwadratowej dla wybranego zakresu skanowanej nawierzchni. Idea skanowania z powietrza ma ważną zaletę w stosunku do skanowania z użyciem LIDAR-a zabudowanego na pojeździe. Zaleta polega na braku konieczności kompensacji pionowego ruchu nadwozia wraz z zabudowanym LIDAR-em, wynikającego z nierówności, które wzbudzają drgania. Natomiast niekorzystne w przypadku zastosowania LIDAR-a do badań z powietrza jest to, że parametry pracy urządzenia muszą uwzględniać dużo większą prędkość poziomą w locie samolotu. Chodzi o czas trwania impulsu laserowego, nie dłuższy niż 1 nS oraz odpowiadające temu parametrowi charakterystyki pozostałych urządzeń wchodzących w skład LIDAR-a.

#### 4.5 Oszacowanie niepewności pomiarów oraz dokładności proponowanej metody

Dynamometr zastosowany w konstrukcji wózka dynamometrycznego jest urządzeniem pomiarowym klasy 1, zatem przy pełnym zakresie dla toru pomiarowego związanego z momentem hamującym (napędowym), błąd pomiaru współczynnika oporu toczenia lub szepności wynosi +/- 0,0033 w warunkach laboratoryjnych. Biorąc pod uwagę czynniki zewnętrzne wpływające na pomiar (przede wszystkim nierówności i niehomogeniczność nawierzchni) które manifestują się rozrzutem wartości mierzonych, niepewność pomiaru w warunkach rzeczywistych wynosi 0,0075. Jeśli do wyznaczenia długości drogi startu lub lądowania zastosowane zostaną wzory cytowane powyżej, wówczas błąd metody, wyznaczony sposobem różniczki zupełnej wyniesie odpowiednio 25 i 30 m (dla startu i lądowania). Bardziej precyzyjne oszacowanie dokładności metody będzie wymagało analizy kowariancji zmiennych losowych wielkości wchodzących do wzorów (1) i (2), zgodnie ze znanymi algorytmami, opisanymi np. w pracy [2].

### 5. Podsumowanie

W pracy przedstawiono opis metody oceny stanu nawierzchni lotnisk gruntowych lub trawiastych ze szczególnym uwzględnieniem parametrów wpływających bezpośrednio na osiągi samolotu podczas startu, lądowania lub kołowania. Na podstawie przesłanek teoretycznych oraz analizy literatury przedmiotu, wybrano następujące parametry nawierzchni lotniska jako istotne i podlegające oznaczeniu: współczynnik oporu toczenia, szepność oraz chropowatość nawierzchni skwantyfikowana jako średnia kwadratowa wysokości nierówności w funkcji długości badanego profilu nawierzchni. Przedstawiono i opisano proponowane rozwiązania, w tym wózek dynamometryczny z kołem pomiarowym, służący do wyznaczenia współczynnika oporu toczenia i szepności, także w funkcji prędkości jazdy oraz projekt LIDAR-a do skanowania nawierzchni lotniska z pokładu lecącego samolotu. Szacowana dokładność metody na podstawie niepewności pomiarów z użyciem proponowanych urządzeń wynosi ok 10m dla długości startu i lądowania typowego samolotu klasy GA.

Potencjalni odbiorcy proponowanej metody to bezpośrednio służby naziemne utrzymania i kontroli ruchu lotniskowego, działające na rzecz lotnisk. Pośrednio, beneficjentami proponowanej metody będą następujące podmioty:

- aerokluby oraz lotnictwo sportowe korzystające na co dzień z lotnisk gruntowych, szczególnie w zakresie poprawy bezpieczeństwa;

- małe średnie przedsiębiorstwa korzystające z przewozów regionalnych;
- prywatni użytkownicy samolotów.

**Acknowledgments:** Praca wykonana w ramach Projektu badawczego PB 5389/B/T02/2011/40, finansowanego przez MNiSW w latach 2011 - 2013

## 6. Literatura

1. Antvik G. History of friction measurements at airports. Airport International / www. Airport-int.com
2. Arendarski J. Niepewność pomiarów. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2006
3. Bergstrom A., Astrom H., Magnusson R. Friction Measurement on Cycleways Using a Portable Friction Tester. J. Cold Reg. Engrg., 2003; 17: 37-57
4. Czarnecki K. Klasyfikacja nośności nawierzchni lotniskowych metodą ACN-PCN. Technika Lotnicza i Astronautyczna, 1987; 1: 23-28
5. Detweiler Z.R., Ferris J.B. Interpolation methods for high-fidelity three-dimensional terrain surfaces. J. of Terramechanics, 2008; 47: 219-226
6. Durst P.J., Mason G.L., McKinley B., Baylot A. Predicting RMS surface roughness using fractal dimension and PSD parameters. J. of Terramechanics, 2011; 48: 105 - 111
7. van Es G.W.H. Method for predicting the rolling resistance of aircraft tires in dry snow. Journal of Aircraft, 1999; 36: 1089-1096
8. Filippone A. Flight Performance of Fixed and Rotary Wing Aircraft. AIAA Education Series, 2006
9. Jakliński L. Modele oddziaływania koła pneumatycznego na glebę. Prace naukowe Politechniki Warszawskiej, Seria: Mechanika, 1999; Z.175
10. Johnson C. Airport Runway Friction Tester. Airport International / www. Airport-int.com
11. Lozia Z. Symulatory jazdy samochodem. WKiŁ Warszawa, 2008
12. Mitschke M., Wallentowitz H. Dynamik des Kraftfahrzeuges. Springer Verlag, Heidelberg, 2004
13. Stinton D. Flying Qualities and Flight Testing of the Aeroplane. Blackwell Science, 1996.
14. Pytka J. Model i identyfikacja układu koło ogumione – podłoże odkształcalne. Raport końcowy z realizacji Projektu badawczego 4T12C 06028 finansowanego ze środków MNiI w latach 2005-2007. Lublin, 2007
15. Pytka J. Identification of Rolling Resistance Coefficients for Aircraft Tires on Unsurfaced Airfields. AIAA Paper No. 2007-7853
16. Raymer D. Aircraft Design. A Conceptual Approach. AIAA Publishing, 1991
17. SARSYS Trailer Friction Tester, Scandinavian Airport and Road Systems AB, Trelleborg, Sweden
18. Shoop S.A. , Richmond P.W., Eaton R.A. Estimating rolling friction of loose till for aircraft takeoff on dirt runways. Proc. 13th Conference of the ISTVS, Munich, Germany, 1999