

**Jarosław PYTKA, Piotr TARKOWSKI, Łukasz KAZNOWSKI, Michał PIASKOWSKI**POLITECHNIKA LUBELSKA, WYDZIAŁ MECHANICZNY,  
ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin**Metoda i urządzenia do oceny stanu nawierzchni lotniska trawiastego****Dr hab. inż. Jarosław PYTKA**

Dr hab. inż. Jarosław Pytko ukończył Politechnikę Lubelską w 1992 roku a dyplom magistra inżyniera uzyskał w specjalności Samochody i Ciągniki na Wydziale Mechanicznym. Stopień doktora nauk uzyskał w roku 1997 w Instytucie Agrofizyki PAN w Lublinie, natomiast stopień doktora habilitowanego w roku 2013 na Wydziale Mechanicznym PL. Od 1992 roku pracuje w Katedrze Pojazdów Samochodowych Politechniki Lubelskiej i zajmuje się zagadnieniami współpracy elementów jezdnych z nawierzchniami odkształcalnymi.

e-mail: j.pytka@pollub.pl

**Prof. dr hab. inż. Piotr TARKOWSKI**

Prof. dr hab. inż. Piotr Tarkowski jest Kierownikiem Katedry Pojazdów Samochodowych Politechniki Lubelskiej. W pracy naukowej zajmuje się zagadnieniami eksploatacji pojazdów a także logistyką. Obecnie pełni funkcję Kierownika projektu Ba-dawczego PB 5389/T02/B/2011/40, w ramach którego zrealizowano niniejszą pracę.

e-mail: p.tarkowski@pollub.pl

**Mgr inż. Łukasz KAZNOWSKI**

Mgr inż. Łukasz Kaznowski jest absolwentem Politechniki Lubelskiej a obecnie pracuje jako konstruktor w Advanced Technologies w Świdniku. Jest studentem II roku studiów doktoranckich na Wydziale Mechanicznym Politechniki Lubelskiej. Specjalizuje się w systemach CAD/MES. W pracy naukowej podejmuje temat modelowania kół ogumionych a także modelowania współpracy koła ogumionego z nawierzchnią odkształcalną.

e-mail: l.kaznowski@wp.pl

**Inż. Michał PIASKOWSKI**

Inż. Michał Piaskowski ukończył studia inżynierskie, Kierunek Mechanika i Budowa Maszyn i jest aktualnie studentem studiów II-stopnia, Kierunku Transport na Wydziale Mechanicznym Politechniki Lubelskiej. Praca magisterska przygotowana przez inż. Michała Piaskowskiego dotyczy zagadnień współpracy koła ogumionego z nawierzchnią trawiastą. Inż. Piaskowski jest kandydatem na studia doktoranckie na Wydziale Mechanicznym Politechniki Lubelskiej.

e-mail: indy6@wp.pl

**Streszczenie**

W pracy przedstawiono podstawy teoretyczne metody oceny gruntowych i trawiastych nawierzchni lotniskowych a także opisano narzędzia, metody, urządzenia badawczo-pomiarowe. Należą do nich: wózek dynamometryczny, ręczny tester nawierzchni oraz LIDAR (skaner optoelektroniczny 3D). Zamieszczono przykładowe wyniki pomiarów.

**Słowa kluczowe:** metody badawcze, lotniska trawiaste, czujniki tensometryczne.

**A method for testing the grassy airfield surface****Abstract**

The paper is devoted to a new method for assessment of the grassy airfield surface. The existing methods are based on soil related parameters such as CI (Cone Index) or CBR (California Bearing Ratio). One disadvantage of those methods is that the prediction of ground performance of an aircraft on a soft surface requires recalculation and conversion when calculating the takeoff or the landing of ground roll distances. Therefore, the authors' idea was to introduce a method based on direct coefficients, related to the wheel performance. The knowledge of the actual values of rolling resistance and braking friction facilitates predicting the airplane ground performance in order to perform safe operations. We developed two original measuring devices, a single wheel tester and a portable surface tester. The devices are presented in this paper together with schematics and illustrations. The wheel tester was designed with the use of an airplane landing gear wheel, into which a five-element, wheel dynamometer was embedded. The measuring wheel was mounted on a trailer and the complete wheel tester was carried on a base vehicle (SUV). The second device is a portable tester, operated by a single technician. The portable tester was built with the use of a scale wheel (a model airplane landing gear wheel), which was supported on two load cells. The load cells measure surface reaction forces acting on a wheel during low speed rolling and braking. Another important parameter of a grassy surface is its roughness. It is almost impossible to maintain the grassy surface so that it is perfectly smooth. A typical grass field is a living ecosystem, which transforms its external shape and builds a rough surface. This must be monitored and for this purpose we used a commercially available LIDAR device. The LIDAR operates on a principle of light odometer and it allows 1mm resolution in short distance measurements. The paper includes the primarily results obtained in field experiments with the use of the presented devices. It can be concluded that the presented method may set fundamentals of a new system for assessment of grassy airfields. Further studies and

research should focus on validation of the method and preparation for certification.

**Keywords:** test method, grassy airfields, strain gage transducers.

**1. Wprowadzenie**

Samoloty i śmigłowce lotnictwa ogólnego (ang. *GA – General Aviation*) często operują z lotnisk o nawierzchni naturalnej, nieutwardzonej, najczęściej trawiastej. Występuje wówczas problem wpływu rodzaju i stanu nawierzchni lotniska na osiągi naziemne statków powietrznych. Długość startu oraz lądowania jest determinowana warunkami współpracy kół jezdnych podwozia samolotu i zależy w dużym stopniu od własności mechanicznych danej nawierzchni. Niezwykle ważna jest również zależność stanu nawierzchni od warunków pogodowych, szczególnie opadów deszczu oraz usłonecznienia i wiatru. Wszystko to sprawia, że aktualne warunki startu i lądowania charakteryzują się wysoką dynamiką, szczególnie w miesiącach letnich, gdy lotniska trawiaste są intensywnie użytkowane przez samoloty i szybowce lotnictwa sportowego. W latach ubiegłych opracowano i wdrożono kilka metod oceny stanu nawierzchni lotniska trawiastego. Bazują one na tzw. jednolicebnych wskaźnikach przejeźności, np. CI (*Cone Index*) lub CBR (*California Bearing Ratio*). Wskaźniki te wyznacza się przy użyciu prostych, przenośnych urządzeń, zatem metody znajdują zastosowanie operacyjne w przypadku nawet niewielkich lotnisk trawiastych. Należy jednak zauważyć, że powyższe metody, pochodzące z lat 60-tych ubiegłego wieku, wymagają redukcji danych w celu określenia najważniejszych osiągnięć samolotu na ziemi. Przykładowo, wskaźnik stożkowy, CI, fizycznie określa wartość siły oporu gruntu podczas zagłębienia standardowego stożka i w zasadzie odnosi się do reakcji podłoża na działanie obciążenia pionowego, przy czym bezpośrednio odniesienie do wybranego koła jezdnego jest niemożliwe. Ponadto, brak jest uwzględnienia wpływu trawy porastającej nawierzchnię lotniska. Owszem, w praktyce badawczej oraz operacyjnej (głównie w wojskowości) stosuje się zależności łączące wskaźnik stożkowy z pożądanym parametrem opisującym współpracę koła z nawierzchnią, jednak są to zazwyczaj formuły empiryczne, o dość zawężonej stosowalności i niskim współczynniku regresji.

Ideą autorów było zaproponowanie nowej metody, umożliwiającej pomiar bezpośredni ważnych z punktu widzenia mechaniki koła wielkości: oporu toczenia oraz szepności. Są to dwie wielkości bezpośrednio decydujące o długości startu oraz lądowania samolotu na danej nawierzchni. Dodatkowo, metoda zaproponowana w niniejszej pracy umożliwia badanie chropowatości nawierzchni. Pewną trudność stanowiło opracowanie narzędzi badawczych, umożliwiających pomiary oporu toczenia i szepności. W przypadku tzw. „dużego lotnictwa” używa się specjalistycznych pojazdów pomiarowych z wyposażeniem badawczym (np. szwedzki *SAAB Friction Tester*, [5]), które są poza zasięgiem finansowym administratorów lotnisk trawiastych. Autorzy postawili sobie za cel skonstruowanie urządzeń badawczych na tyle prostych i tanich, by możliwe było ich nabycie i użytkowanie przez aerokluby czy nawet posiadaczy małych, prywatnych lotnisk trawiastych.

W niniejszym artykule przedstawiono podstawy teoretyczne, metody oraz projekty i realizacje urządzeń badawczych.

## 2. Teoretyczne podstawy metody

### 2.1. Opór toczenia koła jezdnego

Zgodnie z podstawami teorii ruchu samochodu, opór toczenia koła jezdnego determinuje osiągi pojazdu, w tym prędkość jazdy oraz wielkości pochodne [6]. Podobnie jest w przypadku samolotu, przy czym osiągi samolotu zdeterminowane oporem toczenia mają duże znaczenie dla bezpieczeństwa startu i lądowania. Stinton [9] 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. Filippone [4] podaje wzory do obliczania długości rozbiegu  $l_r$  oraz dobiegu  $l_d$  w zależności od m.in. współczynnika oporu toczenia,  $f_t$  i szepności,  $\mu$ :

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

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

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.

Metody badawcze stosowane do wyznaczania oporu toczenia w przypadku kół samochodu to hol dynamometryczny lub próba wybiegu. Dla nawierzchni okształcalnych, przy niższych prędkościach możliwe metody badawcze to hol dynamometryczny lub metoda pośrednia z wykorzystaniem pomiaru głębokości koleiny.

Przy większych prędkościach jazdy na nawierzchni okształcalnej mamy 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 wysoką energię kinetyczną [1, 3]. Tradycyjne metody holu dynamometrycznego nie zdają egzaminu w takich przypadkach. W praktyce stosuje się metody badawcze z użyciem specjalistycznego pojazdu badawczego wyposażonego w tzw. „piąte koło” do badań oporu toczenia lub wózek dynamometryczny, ewentualnie pomiar sił działających w układzie koło – nawierzchnia, za pomocą wielokładowego czujnika zabudowanego na kole pojazdu [8].

### 2.2. Szepność

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

- koło toczone, 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 reakcja 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:

$$F_x = F_v \mu \quad (3)$$

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 szepność, choć z fizycznego punktu widzenia są to pojęcia jednoznaczne, oczywiście w odniesieniu do zjawisk towarzyszących toczeniu się koła z poślizgiem. Szepność posiada duże znaczenie w przypadku dobiegu, gdy samolot ma wytracić swoją energię kinetyczną na pracę siły tarcia [5]. Wówczas, im większy współczynnik szepności, tym szybciej samolot zatrzyma się na pasie. W przypadku lotnisk gruntowych lub trawiastych, szczególnie o krótkim pasie, znajomość szepności jest istotna pomimo, iż stosunkowo duże opory toczenia pomagają w skróceniu dobiegu. Ważne jest ponadto stałe monitorowanie szepności, gdyż parametrem ten pozostaje w ścisłej zależności od warunków pogodowych [4, 5].

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

### 2.3. Chropowatość nawierzchni

Innym ważnym czynnikiem wpływającym na osiągi naziemne samolotu są nierówności nawierzchni. Lotniska trawiaste budowane są na podłożach gruntowych, zazwyczaj pofalowanych, o chropowatości dochodzącej do 50 mm. Ponadto, ekosystem roślinno-zwierzęcy wpływa na nierówność. Trawa tworzy kępy, drobne gryzonie uszkadzają nawierzchnię poprzez drażnienie korytarzy podpowierzchniowych. Falistość terenu zwiększa się wskutek intensywnych opadów deszczu i spływania wód opadowych. Utrzymanie wymaganej chropowatości nawierzchni lotniska trawiastego jest zadaniem trudnym, tym bardziej, że stosowane metody oceny są nieprecyzyjne (subiektywna ocena komfortu jazdy samochodem osobowym po nawierzchni lotniska z prędkością 60-80 km/godz.).

Przy opracowaniu 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. Do możliwych rozwiązań należy 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. Zasada pomiaru odległości polega na pomiarze czasu przebiegu impulsu od lasera do obiektu i z powrotem. Pewną wadą tej metody w przypadku pomiarów na dużych odległościach jest wrażliwość na warunki atmosferyczne, szczególnie wszelkiego rodzaju mgły i zamglenia, ale także rozkład temperatury na drodze impulsu, pionowe i poziome ruchy powietrza.

Do opisu chropowatości nawierzchni lotniska trawiastego można użyć średniej kwadratowej lub wartości skutecznej. Jeśli jako miarę bezwzględnej nierówności nawierzchni przyjmie się ich wysokość, z w funkcji wymiaru liniowego jako zmiennej – długo-

ści  $x$ , wówczas wartość skuteczna nierówności może być wyrażona następująco:

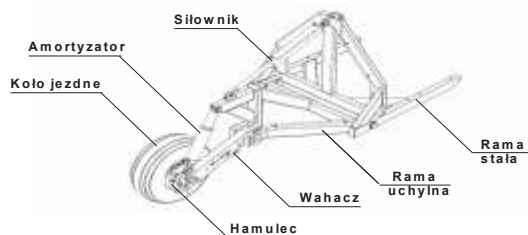
$$z_{SK} = \sqrt{\frac{1}{x} \int_{x_0}^{x_0+x_j} z^2(x) dx} \quad (4)$$

Zbiory punktów otrzymywane z LIDAR-a (zwane też „chmurą punktów”) umożliwiają wyznaczanie wartości średniej kwadratowej dla wybranego zakresu skanowanej nawierzchni. Skanowanie nawierzchni lotniska można przeprowadzić gdy urządzenie jest zabudowane na pojeździe poruszającym się z niewielką prędkością po lotnisku lub też z pokładu samolotu. Idea skanowania z powietrza ma ważną zaletę, która polega na braku konieczności kompensacji pionowego ruchu nadwozia wraz z zabudowanym LIDAR-em, wynikającej z nierówności, które wzbudzą drgania. Natomiast, na niekorzyść w przypadku skanowania z powietrza przemawiają wysokie parametry pracy urządzenia, uwzględniające dużą prędkość poziomą samolotu. Należy zastosować LIDAR charakteryzujący się krótkim czasem impulsu, około 1 nS oraz odpowiadające temu parametrowi charakterystyki pozostałych urządzeń pomiarowych.

### 3. Urządzenia badawczo-pomiarowe

#### 3.1. Wózek dynamometryczny

Podstawowym urządzeniem badawczo-pomiarowym do wyznaczenia oporów toczenia koła jezdnego oraz szepności jest wózek dynamometryczny, wleczony za pojazdem samochodowym. Urządzenie zostało zgłoszone do opatentowania w Urzędzie Patentowym RP. 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 1.



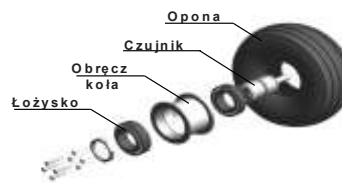
Rys. 1. Schemat wózka dynamometrycznego do badań współpracy koła samolotu z nawierzchnią

Fig. 1. Design of the single wheel tester for an aircraft tyre driven on the unsurfaced airfield

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.

Na rysunku 2 przedstawiono schemat konstrukcyjny koła pomiarowego, wchodzącego w skład wózka. Czujnik wchodzący w skład koła pomiarowego jest urządzeniem pomiarowym, w którym wykorzystuje się technikę tensometrii elektrooporowej. Mierzy 5 różnych wielkości: siłę pionową i wzdłużną oraz momenty wokół trzech osi głównych koła.



Rys. 2. Schemat koła pomiarowego

Fig. 2. Wheel force transducer

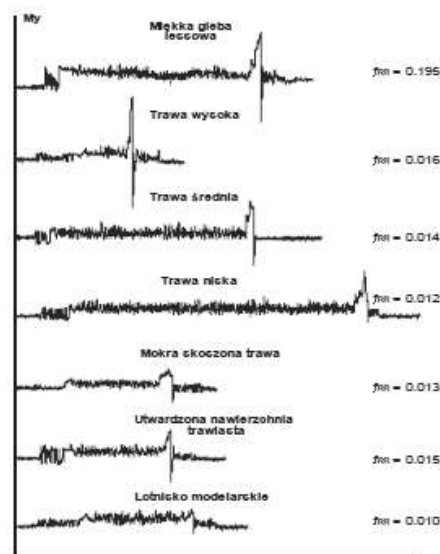
Na podstawie wyników pomiarów kołem dynamometrycznym możliwe jest wyznaczenie współczynnika oporu toczenia  $f_T$  oraz szepności  $\mu$ :

$$f_T = \frac{M_y}{r_d} \times \frac{1}{F_z} \quad (5)$$

$$\mu = \frac{F_x}{F_z} \quad (6)$$

gdzie:  $M_y$  – moment działający wokół osi poprzecznej koła pomiarowego,  $F_z$  – siła obciążenia pionowego koła,  $F_x$  – siła wzdłużna.

Przykładowe wyniki, uzyskane dla różnych nawierzchni lotniska, pokazano na rysunku 3.



Rys. 3. Przebiegi momentu  $M_y$  na kole pomiarowym oraz wartości współczynnika oporu toczenia dla różnych nawierzchni lotniska

Fig. 3. Moment  $M_y$  acting on the measuring wheel and the resulting rolling friction coefficients for various surfaces.

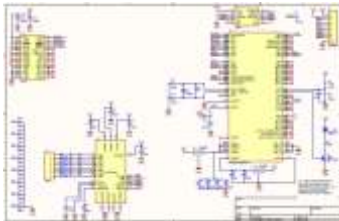
#### 3.2. Ręczny tester nawierzchni

Ponieważ wózek prezentowany powyżej jest urządzeniem przeznaczonym głównie do celów badawczych, zaistniała potrzeba skonstruowania urządzenia prostego, przenośnego, spełniającego podobne zadania. W wyniku otrzymano tester nawierzchni, który umożliwia pomiar zarówno oporu toczenia koła jak i szepności (rys. 4). Ze względu na efekt skali (w konstrukcji testera wykorzystano koło jezdne o średnicy 150 mm, stosowane do modeli samolotów), konieczne było przeprowadzenie wzorcowania. W tym celu, na wybranej nawierzchni przeprowadzono badania z użyciem wózka, jako urządzenia wzorcowego oraz z użyciem testera ręcznego. Wyniki pomiarów posłużyły do sporządzenia tabeli korekcyjnej, która stanowi podstawę wyznaczania parametrów trakcyjnych danej nawierzchni przy użyciu testera. Więcej szczegółów testera zawiera praca [7].

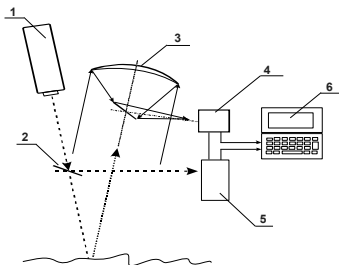


Rys. 4. Widok ręcznego testera nawierzchni lotniska trawiastego  
Fig. 4. Portable tester for grassy airfields

W konstrukcji zarówno testera ręcznego jak i koła pomiarowego wózka dynamometrycznego wykorzystano mikroprocesorowy system bezprzewodowej transmisji danych pomiarowych według własnego projektu. System bazuje na mikrokontrolerze STM32 F103RGT6. Dedykowane oprogramowanie umożliwia realizację podstawowych i zaawansowanych funkcji, w tym wyznaczanie współczynników oporu toczenia oraz szepności z opcją tzw. inteligentnego wyszukiwania i zawężania obszaru uśredniania. Schemat oraz moduł główny systemu pokazano na rysunku 5.



Rys. 5. Schemat oraz widok głównego modułu mikroprocesorowego systemu przesyłu danych pomiarowych.  
Fig. 5. Circuit diagram and a view of the main board of the microprocessor unit

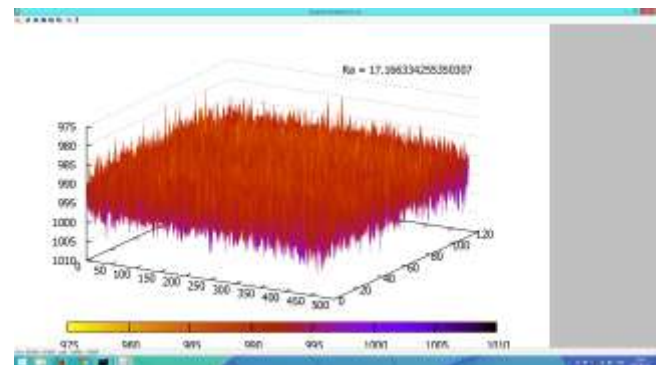


Rys. 6. Schemat LIDAR-a. Oznaczenia: 1 – laser impulsowy, 2 – dzielnik, 3 – teleskop, 4 – fotopowielacz, 5 – licznik, 6 – obróbka i analiza sygnałów. Widok urządzenia zabudowanego na pojeździe  
Fig. 6. LIDAR's schematic: 1 – laser, 2 – impulse divider, 3 – optical telescope, 4 – photodetector, 5 – impulse counter, 6 – signal acquisition. The LIDAR mounted on a test vehicle (bottom)

### 3.3. LIDAR

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 fotopowielacz a następnie do układu pomiarowego, w którym następuje digitalizacja. Cyfrowy sygnał pomiarowy podlega analizie, przy czym możliwe są różne algorytmy analizy sygnałów [2].

Na rysunku 7 pokazano wynik przykładowego skanowania nawierzchni. Zaznacza się, że ostateczny wynik (na rysunku jest to chropowatość nawierzchni  $R_A$ ) może być kwantyfikowany różnymi parametrami, w zależności od przyjętej metody oraz użytego algorytmu obliczeniowego.



Rys. 7. Przykładowy wynik skanowania nawierzchni LIDAR-em w celu wyznaczenia chropowatości  
Fig. 7. Sample results of surface scanning by means of the LIDAR to determine roughness

## 4. Podsumowanie

Przedstawione urządzenia oraz zarys metody mogą stanowić podwaliny systemu oceny gruntowych i trawiastych nawierzchni lotniskowych, wzorem standardów takich jak APN-PCN, stosowanych dla nawierzchni pasów utwardzonych. Stwierdza się, że tego typu system oceny może znaleźć szerokie zastosowanie pod warunkiem przeprowadzenia certyfikacji zgodnie z wymogami ICAO oraz utrzymania kosztów wyposażenia na niskim poziomie.

## 5. Literatura

- [1] Coutermarsh, B.: Velocity effect of vehicle rolling resistance in sand. *Journal of Terramechanics*, 44, 2007, pp. 275-291.
- [2] Durst P.J., Mason G.L., McKinley B., Baylot A: Predicting RMS surface roughness using fractal dimension and PSD parameters. *Journal of Terramechanics*, 2011; 48: 105 – 111.
- [3] van Es G.W.H.: Method for predicting the rolling resistance of aircraft tires in dry snow. *Journal of Aircraft*, 1999: 36: 1089-1096.
- [4] Filipponi A.: *Flight Performance of Fixed and Rotary Wing Aircraft*. AIAA Education Series, 2006.
- [5] Johnson C.: *Airport Runway Friction Tester*. Airport International / www. Airport-int.com
- [6] Mitschke M., Wallentowitz H.: *Dynamik des Kraftfahrzeuges*. Springer Verlag, Heidelberg, 2004.
- [7] Piaskowski M.: Tester nawierzchni lotniska trawiastego. Praca zgłoszona do opublikowania w *Zeszytach Naukowych Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej* Nr 38, 2014.
- [8] Pytka J.: Identification of Rolling Resistance Coefficients for Aircraft Tires on Unsurfaced Airfields. *Journal of Aircraft*, Vol. 51, No. 2, 2014, pp. 353-360.
- [9] Stinton D.: *Flying Qualities and Flight Testing of the Aeroplane*. Blackwell Science, 1996.