

WYKORZYSTANIE METODY R&R DO OCENY PRZYDATNOŚCI SYSTEMU POMIAROWEGO PLANOGRAFU 3 I 4M PODCZAS BADANIA RÓWNOŚCI NAWIERZCHNI LOTNISKOWYCH

Jednym z podstawowych parametrów charakteryzujących każdą nawierzchnię lotniskową jest jej równość. Stan równości decyduje nie tylko o komfortie ruchu po nawierzchni lotniskowej, lecz również wpływa na bezpieczeństwo wykonywania operacji lotniczych. W związku z tym, poprawne wykonywanie badań jest bardzo istotnym i wymaganym czynnikiem. Jeżeli używane dane z pomiaru nie będą wystarczająco wiarygodne, to w konsekwencji mogą być podejmowane błędne decyzje, co w efekcie końcowym może wpłynąć na bezpieczeństwo wykonywania operacji lotniczych.

Zagraniczne oraz krajowe dokumenty normatywne określają maksymalne i dopuszczalne amplitudy nierówności nawierzchni lotniskowych. Ponadto, dokumenty te definiują wymagania dotyczące sprawdzania urządzeń oraz dopuszczalnych odchyłeń od ustalonych wartości.

Przedstawione w artykule badania powtarzalności i odtwarzalności wykorzystywane przy metodzie R&R mają na celu sprawdzenie przydatności systemu pomiarowego planografu 3 i 4m oraz określenie, który system pomiarowy jest bardziej wskazany do prowadzenia badań równości na nawierzchniach lotniskowych.

WSTĘP

Lotnictwo jest bardzo dynamicznie i pręźnie rozwijającym się środkiem transportu. Zwiększająca się masa startowa statków powietrznych oraz rozwój ich konstrukcji prowadzi do coraz to bardziej rygorystycznej oceny stanu techniczno-eksploatacyjnego, nowobudowanych oraz będących w użytkowaniu nawierzchni lotniskowych. Aby spełnić wymagania stawiane nawierzchniom lotniskowym i utrzymać je w ciągłej sprawności techniczno-eksploatacyjnej, co jest niezwykle istotne w aspekcie zapewnienia bezpieczeństwa wykonywania operacji lotniczych, wymagane jest prowadzenie ciągłego monitorowania ich stanu technicznego. Jedną z głównych cech eksploatacyjnych, charakteryzującą każdą nawierzchnię, lotniskową jest jej równość, która w wyniku obciążeń dynamicznych, złych warunków atmosferycznych czy nieodpowiedniej technologii budowy może prowadzić do odchyłeń od pożądanego stanu w postaci nierówności podłużnych i poprzecznych.

Powstałe nierówności nawierzchni lotniskowej oceniane zgodnie z obowiązującymi dokumentami normatywnymi [2,6,8,9] wymuszają, aby badania były prowadzone z jak największą starannością, a otrzymane wyniki odzwierciedlały faktyczny stan nawierzchni. W tym celu podjęto próbę sprawdzenia poprawności wykonywania pomiarów planografem 3 i 4m z wykorzystaniem statystycznej analizy powtarzalności i odtwarzalności R&R (Repeatability & Reproducibility). Celem analizy R&R jest praktyczne wyznaczenie liczbowej wartości parametrów systemu pomiarowego decydujących o wiarygodności uzyskanych danych (nierówności nawierzchni), a w konsekwencji ocenę przydatności planografu 3 i 4m do prowadzenia badania równości nawierzchni lotniskowych.

1. APARATURA POMIAROWA WYKORZYSTANA DO ANALIZY

Zasady prowadzenia badań równości nawierzchni lotniskowych określone są w NO-17-A502:2015 *Nawierzchnie lotniskowe - Badanie równości*. Zgodnie z w/w normą pomiar nierówności na obiektach lotniskowych należy wykonywać przy pomocy planografu o długości 4m lub 3m, umożliwiającego rejestrację nierówności w sposób ciągły.

Planograf stosowany do pomiaru stanu równości nawierzchni lotniskowej rejestruje wychylenie ruchomego kółka pomiarowego względem trzymetrowej lub czterometrowej bazy, przemieszczającej się po nawierzchni na 14 lub 10 kółkach jezdnych. Konstrukcja planografu powinna zapewnić odpowiednią sztywność, która jest określana poprzez jego ugięcie w części środkowej przy podparciu tylko na skrajnych kółkach. Ugięcie konstrukcji planografu nie powinno być większe niż 0,3 mm. Osie skrajnych kółek w planografie o długości 4m powinny być umieszczone w odległości $(4\ 000 \pm 70)$ mm, w planografie o długości 3m – $(3\ 000 \pm 50)$ mm, rozstawy pozostałych kółek powinny mieć tolerancję ± 5 mm. Średnica kółek jezdnych powinna wynosić (200 ± 10) mm, średnica kółka pomiarowego – (159 ± 5) mm [1].

Widok planografu o długości 4m przedstawiono na rysunku 1, zaś ogólny schemat na rysunku 2. Schemat planografu o długości 3m jest identyczny, jak planografu 4m.

Planograf stosowany do pomiaru stanu równości nawierzchni lotniskowej, jest zmodernizowanym urządzeniem produkcji polskiej. Przeprowadzona modernizacja, polegała na dodaniu zespołu rejestrującego nierówności nawierzchni, nowego transformatorowego przetwornika przemieszczeń liniowych serii PSz150, czujnika przyrostu drogi, oraz nowego interfejsu i oprogramowania opracowanego w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych (ITWL).

Zestaw ten pozwala na pomiar występujących nierówności nawierzchni w funkcji przyrostu długości drogi z dokładnością wynoszącą 0,3 mm i częstotliwością, co 10 cm.



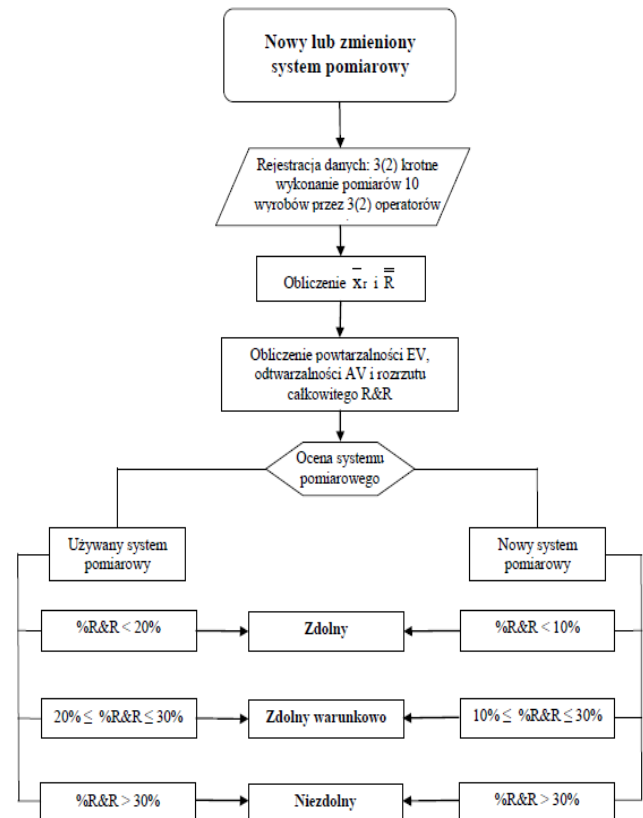
Rys. 1. Planograf P-3Z po modernizacji

2. METODYKA REALIZACJI BADAŃ R&R

Ocenę porównawczą przydatności systemu pomiarowego planografu o długości 3 i 4m przeprowadzono zgodnie z Procedurą 2 [4]. Procedura 2 dotyczy oceny systemu pomiarowego poprzez analizę powtarzalności i odtwarzalności oraz rozrzutu całkowitego (metoda R&R) z uwzględnieniem wpływu poszczególnych operatorów na pomiar. Schemat blokowy Procedury 2 przedstawiono na rysunku 3.

Głównym elementem metody R&R jest wyznaczenie wskaźnika R&R (ang. Repeatability and Reproducibility, powtarzalność i odtwarzalność), który oblicza się poprzez pomiar określonej wielkości, w tym przypadku pomiar nierówności nawierzchni lotniskowej z wykorzystaniem planografu 3 i 4m.

Powtarzalność (ang. Repeatability) jest to stopień zgodności kolejnych wyników pomiarów tej samej wielkości mierzonej, wykonywanych w tych samych warunkach pomiarowych. Do powtarzalnych warunków dokonywania pomiaru zaliczamy: tę samą procedurę pomiarową, tego samego operatora urządzenia, ten sam przyrząd pomiarowy stosowany w tych samych warunkach, to samo miejsce i powtórzenia pomiarowe w krótkich odstępach czasu.

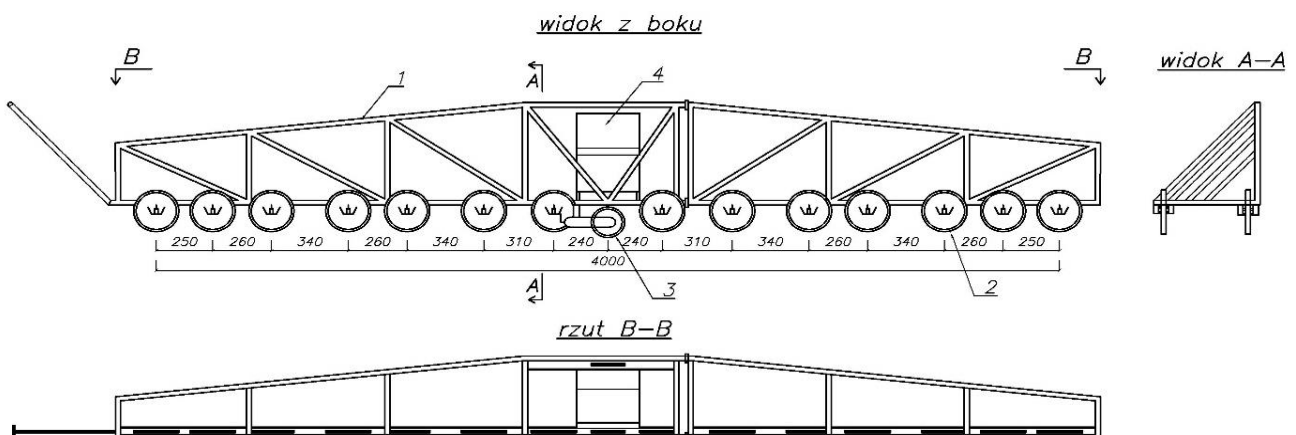


Rys. 3. Schemat blokowy Procedury 2 [4]

Powtarzalność przyrządu pomiarowego można wyrazić ilościowo za pomocą charakterystyk rozrzutu wyników (np. jako niepewność standardową σ_g). Powtarzalność podawana jako niepewność rozszerzona oznaczana jest skrótem EV (ang. Equipment Variation – zmienność sprzętu/aparatury). Jest ona definiowana jako podwojona niepewność rozszerzona (przedział niepewności), gdzie najczęściej przyjmuje się współczynnik rozszerzenia $t = 2,575$, przy poziomie ufności $\alpha = 0,05$.

$$EV = 2 \cdot t \cdot \sigma_g = 5,15 \cdot \sigma_g \quad (1)$$

Odtwarzalność (ang. Reproducibility) jest to stopień zgodności wyników pomiarów tej samej wielkości mierzonej, wykonywanych



Objaśnienia:

- 1 - rama wózka, 2 - kółko jezdne, 3 - kółko pomiarowe, 4 - stolik pomiarowy (zestaw rejestrujący i przesyłający wyniki do komputera)

Rys. 2. Ogólny schemat planografu o długości 4m [1]

w zmiennych warunkach pomiarowych. Warunki, które mogą podlegać zmianom, to: osoba wykonująca pomiar oraz metoda pomiarowa, przyrząd pomiarowy, warunki otoczenia oraz czas prowadzenia pomiaru. Odtwarzalność jest najczęściej podawana jako niepewność standardowa. Oznaczana jest najczęściej jako σ (indeks „a” oznacza z ang. appraiser – dokonujący pomiaru/rzeczoznawca oceniający). Odtwarzalność podawana w postaci niepewności rozszerzonej oznaczana jest skrótem AV (ang. Appraiser Variation – zmienność operatorów). Jest ona opisywana jako podwojona niepewność rozszerzona (przedział niepewności), przy czym najczęściej przyjmuje się współczynnik rozszerzenia $t = 2,575$, przy poziomie ufności $\alpha = 0,05$ i wyznaczana jest wg wzoru (2).

$$AV = 2 \cdot t \cdot \sigma_a = 5,15 \cdot \sigma_a \quad (2)$$

Procedura 2 metody R&R, która została wykorzystana w przeprowadzonej analizie, pozwala na oddzielenie wpływu powtarzalności i odtwarzalności. Oznacza to rozgraniczenie wpływu przyrządu (powtarzalność EV) oraz operatorów (odtwarzalność AV) na rozrzut wskazań %R&R.

Aby w pełni ocenić przydatność badanego systemu pomiarowego - planografów do prowadzenia pomiarów na nawierzchniach lotniskowych należy obliczyć [4, 7]:

- 1) wartości rozstępów (R_i) dla każdego operatora oraz dla każdej części wg wzoru (3):

$$R_i = X_g - X_d \quad (3)$$

gdzie:

X_g, X_d – maksymalna i minimalna wartość wyników pomiarów i-tej części przez danego operatora,
 $i = A, B$ – poszczególni operatorzy.

- 2) sumę rozstępów dla każdego z operatorów: $\sum R_i$. Na ich podstawie wyznacza się wartość średnią rozstępów dla poszczególnych operatorów $R_{\dot{s}r}$, wg wzoru (4):

$$R_{\dot{s}r} = \frac{\sum R_i}{n} \quad (4)$$

gdzie:

$R_{\dot{s}r}$ – wartość średnia rozstępów dla poszczególnego operatora,
 n – liczba mierzonych części.

- 3) sumę wszystkich wyników pomiarów z wszystkich prób dla poszczególnych operatorów, tj. $\sum X_i$. Na ich podstawie wyznacza się wartość średnią pomiarów dla poszczególnych operatorów z uwzględnieniem liczby części oraz liczby powtórzeń wg wzoru (5):

$$X_{\dot{s}r} = \frac{\sum X_i}{n \cdot r} \quad (5)$$

gdzie:

$X_{\dot{s}r}$ – wartość średnia pomiarów dla poszczególnego operatora,
 r – liczba powtórzeń.

- 4) wartość średnią dla poszczególnych operatorów:

$$Rx_{\dot{s}r} = \max x_{\dot{s}r} - \min x_{\dot{s}r} \quad (6)$$

- 5) wskaźnik powtarzalności:

$$EV = 2 \cdot 2,575 \cdot \sigma_g = 5,15 \cdot \frac{R_{\dot{s}r}}{d_2} = K_1 \cdot R_{\dot{s}r} \quad (7)$$

gdzie:

K_1 – stabilizowany współczynnik zależności od liczby prób i powtórzeń,
 d_2 – wartość współczynnika d_2 można znaleźć w tabelach statystycznych oraz w środowisku typu STATISTICATM. [5].

- 6) wskaźnik odtwarzalności:

$$AV = 2 \cdot 2,575 \cdot \sigma_a = 5,15 \cdot \frac{Rx_{\dot{s}r}}{d_2} = K_2 \cdot Rx_{\dot{s}r} \quad (8)$$

gdzie:

K_2 – stabilizowany współczynnik zależności od liczby prób i powtórzeń,
 d_2 – wartość współczynnika d_2 można znaleźć w tabelach statystycznych oraz w środowisku typu STATISTICATM. [5]

- 7) wskaźnik R&R (powtarzalność i odtwarzalność):

$$R\&R = \sqrt{EV^2 + AV^2} \quad (9)$$

- 8) średni rozstęp dla poszczególnych części:

$$Rp = \max p_{\dot{s}r} - \min p_{\dot{s}r} \quad (10)$$

- 9) odchylenie standardowe dla prób

$$\sigma_p = \frac{Rp}{d_2} \quad (11)$$

- 10) odchylenie standardowe dla systemu pomiarowego:

$$\sigma_m = \sqrt{\sigma_e^2 + \sigma_o^2} \quad (12)$$

- 11) całkowita zmienność procesu pomiarowego:

$$TV = 5,15 \cdot \sqrt{\sigma_p^2 + \sigma_m^2} \quad (13)$$

- 12) wartość procentową w odniesieniu do tolerancji:

$$\%EV = \frac{EV^2}{R\%R \cdot TV} \cdot 100 \quad (14)$$

- 13) wartość procentową odtwarzalności w odniesieniu do tolerancji:

$$\%AV = \frac{AV^2}{R\&R \cdot TV} \cdot 100 \quad (15)$$

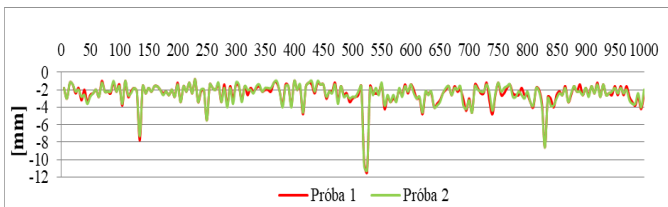
- 14) procentowy wskaźnik powtarzalności i odtwarzalności:

$$\%R\%R = \%EV + \%AV \quad (16)$$

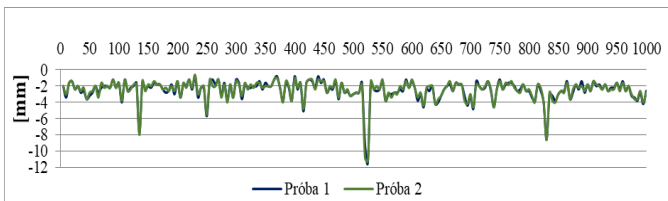
Na podstawie wyżej wymienionych wzorów oraz kryteriów przedstawionych na schemacie (rysunek 3), możliwe jest przeprowadzenie analizę przydatności stosowania planografu 3 i 4m do oceny nawierzchni lotniskowych pod względem równości.

3. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Do przeprowadzenia oceny przydatności systemu pomiarowego planografu 3 i 4m, wykonano pomiary na jednym z elementów funkcjonalnych lotniska (EFL) o nawierzchni z betonu cementowego. Pomiary realizowano planografem 3 i 4 m, których ogólny schemat przedstawiono w punkcie 2. Pomiary ww. urządzeniem realizowane były przez dwóch operatorów w dwóch próbach po tej samej trasie o długości 1000 m. Na podstawie zarejestrowanych maksymalnych nierówności z odcinków 5 m, przeprowadzono obliczenia wyznaczające uśrednione nierówności dla każdego hektometra, co w rezultacie dało dziesięć wyników dla każdej trasy (próby) pomiarowej. Na rysunkach 4-7 przedstawiono w sposób graficzny profile maksymalnych nierówności z odcinków 5m dla wszystkich prób.



Rys. 4. Profil maksymalnych nierówności z odcinków 5m, planograf 4m, operator I



Rys. 5. Profil maksymalnych nierówności z odcinków 5m, planograf 4m, operator II



Rys. 6. Profil maksymalnych nierówności z odcinków 5m, planograf 3m, operator I



Rys. 7. Profil maksymalnych nierówności z odcinków 5m, planograf 3m, operator II

Na podstawie uśrednionych wielkości nierówności dla poszczególnych operatorów i dla każdego z planografu obliczono rozstęp oraz średnie wartości, które zestawiono w tablicy 1.

Po przeprowadzeniu analizy, zgodnie z Procedurą 2 oraz obliczeń według wyżej wymienionych wzorów otrzymano następujące wyniki, które przedstawiono w tablicy 2.

Tab. 2. Zbiorcza tabela wyliczonych wartości po przeprowadzonej analizie

Wielkość	Planograf 3m [%]	Planograf 4m [%]
%EV	5,8	3,2
%AV	1,6	1,5
%R&R	7,4	4,7
Ocena systemu pomiarowego	System zdolny	System zdolny

Na podstawie przeprowadzonej analizy przydatności systemu pomiarowego stwierdzono, że obliczone wskaźniki %R&R mieszczą się w przedziale do 10%. Oznacza to, że zarówno planograf o długości 3m jak i o długości 4m, jest przydatny do oceny stan równości nawierzchni lotniskowych.

Analizując składowe wskaźnika powtarzalności i odtwarzalności możemy zauważyć że odtwarzalność (%AV) otrzymanych wyników między operatorami jest zadowalająca. Oznacza to że operatorzy wykonujący pomiary byli przeszkoleni w kwestii wykonywania pomiarów oraz postępowali zgodnie z metodyką pomiarową zawartą w NO-17-A502:2015 Nawierzchnie lotniskowe - Badanie równości. Otrzymana powtarzalność (%EV) również jest zadowalająca. Świadczy to, że użyte urządzenia pomiarowe są sprawne oraz nie przekraczają dopuszczalnych wymagań zawartych w NO-17-A502 2015.

PODSUMOWANIE

Współczesny, niezwykle dynamiczny rozwój lotnictwa wymusza, żeby prowadzone badania były wykonywane z jak największą dokładnością, a o trzymane wyniki były wiarygodne i jak najbardziej odpowiedzialne istniejący stan nawierzchni. Stosowane urządzenia

Tab. 1. Zestawienie uśrednionych nierówności i rozstępów

Hm.	Planograf 3m						Planograf 4m					
	Operator I			Operator II			Operator I			Operator II		
1	-1,56	-1,58	0,02	-1,54	-1,58	0,04	-2,13	-2,16	0,03	-2,30	-2,23	0,07
2	-1,77	-1,73	0,04	-1,78	-1,72	0,06	-2,40	-2,39	0,02	-2,44	-2,38	0,06
3	-1,58	-1,57	0,01	-1,52	-1,56	0,04	-2,30	-2,34	0,04	-2,29	-2,31	0,02
4	-1,37	-1,35	0,02	-1,32	-1,32	0,00	-2,05	-2,00	0,05	-2,06	-2,05	0,01
5	-1,46	-1,45	0,01	-1,41	-1,47	0,06	-2,19	-2,15	0,04	-2,24	-2,18	0,06
6	-1,98	-2,02	0,04	-2,01	-2,05	0,04	-3,27	-3,21	0,06	-3,16	-3,19	0,03
7	-1,57	-1,60	0,03	-1,57	-1,58	0,01	-2,78	-2,80	0,02	-2,84	-2,73	0,11
8	-1,83	-1,84	0,01	-1,81	-1,76	0,05	-2,43	-2,35	0,08	-2,32	-2,33	0,01
9	-1,94	-1,83	0,11	-2,01	-1,86	0,15	-2,89	-3,02	0,13	-3,02	-3,04	0,02
10	-1,67	-1,69	0,02	-1,60	-1,71	0,11	-2,46	-2,44	0,02	-2,45	-2,47	0,02
Średnia	-1,67		0,03	-1,66		0,06	-2,49		0,05	-2,50		0,04

pomiarowe muszą gwarantować poprawność uzyskanych wyników, gdyż od nich zależy bezpieczeństwo wykonywania operacji lotniczych oraz planowanie zabiegów eksploatacyjnych i remontowych.

Wykorzystanie Procedury 2 do oceny przydatności systemu pomiarowego planografu 3 i 4m okazało się niezwykle użyteczne. Przeprowadzona analiza pozwoliła na ocenę przydatności wymienionych urządzeń do wykonywania pomiarów równości nawierzchni lotniskowych. Pozwoliła również na rozgraniczenie wpływu użytkownika (odtwarzalność), jak i wpływu urządzenia (powtarzalność) na ocenę końcową przydatności systemu pomiarowego. Otrzymane wyniki wskaźnika powtarzalności i odtwarzalności %R&R są do siebie zbliżone. Jednak wykonane pomiary przy użyciu planografu o długości 4m wskazują na jego większą przydatność, co w konsekwencji prowadzi do dokładniejszego odzwierciedlenia rzeczywistego stanu nawierzchni lotniskowej podczas badania.

BIBLIOGRAFIA

1. Poświata A., *Analiza nierówności w ocenie eksploatacyjnej betonowych nawierzchni lotniskowych*, Rozprawa doktorska, WAT Warszawa 1997.
2. NO-17-A502:2015 *Nawierzchnie lotniskowe Badanie równości*.
3. Poświata A. Pietruszewski P. *Wpływ stanu równości nawierzchni lotniskowych na bezpieczeństwo wykonywania operacji lotniczych*. *Autobusy* 2016, nr 12.
4. Sałaciński T. *SPC. Statystyczne sterowanie procesami produkcji*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
5. C Chrysler, Ford, General Motors, *Measurement System Analysis*, (2d ed.), Southfield, MI, Automotive Industry Action Group, 1998 oraz Statsoft®, 2002
6. Załącznik 14 ICAO do Konwencji o międzynarodowym lotnictwie cywilnym, *Lotniska Tom I – Projektowanie i eksploatacja lotnisk*, wydanie 6, lipiec 2013.
7. Antosz K. *Zastosowanie metody R&R do analizy wybranych systemów pomiarowych*, *Technologia i Automatyzacja Montażu* 3/2012.
8. NO-17-A204:2015 *Lotniskowe nawierzchnie betonowe. Wymagania i metody badań nawierzchni z betonu cementowego*.
9. FAA Advisory Circular, AC 150/5370-13, *Off-peak Construction of Airport Pavements Using Hot-Mix Asphalt*, August 27, 1990.

By using R & R method to evaluate usefulness of measuring system planograf 3 and 4m during airfield pavement evenness testing

One of the basic parameters characterizing each airfield pavement is the evenness. Condition evenness decides not only about the comfort while on the airport surface but also effects safety of airport operations. Therefore correct performance testing is very important and required factor. If obtained data from testing is not carried out correctly, the consequence could effect the safety safety of performing aircraft operations.

Foreign and domestic documents have maximum allowed amplitude of airport surface equality. The documents also define requirements around checking devices and acceptable deviation from established values.

Research presented in article of repeatability and reproducibility used in R&R method ,are there to check suitability for measuring system planograf 3 and 4 m, and find out which measuring device is best to use in testing evenness airfield pavement.

AUTORZY

mgr inż. **Paweł Pietruszewski** – Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Zakład Lotniskowy.

pawel.pietruszewski@itwl.pl

dr inż. **Adam Poświata** – Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Zakład Lotniskowy.

adam.poswiata@itwl.pl

dr inż. **Mariusz Wesółowski** – Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Zakład Lotniskowy.

mariusz.wesolowski@itwl.pl