

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

СМОЛИЧ ДЕНИС ВІКТОРОВИЧ

УДК 625.717-047.44 (043.3)

**ОЦІНКА УХИЛІВ ТА РІВНОСТІ ПОВЕРХОНЬ ДОРОЖНИХ ТА
АЕРОДРОМНИХ ПОКРИТТІВ**

05.22.11 – автомобільні шляхи та аеродроми

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному авіаційному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Краснов Володимир Миколайович,
Національний авіаційний університет, доцент
кафедри авіоніки.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Гамеляк Ігор Павлович,
Національний транспортний університет,
завідувач кафедри аеропортів

кандидат технічних наук, доцент
Ільченко Володимир Васильович,
Національний університет «Полтавська
політехніка імені Юрія Кондратюка»,
доцент кафедри автомобільних доріг,
геодезії, землеустрою та сільських будівель

Захист відбудеться «12» травня 2021 р. о 13⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 26.062.12 в Національному авіаційному університеті за адресою: 03058, м. Київ, проспект Любомира Гузара, 1, корп. 4, ауд. 202.

З дисертацією можна ознайомитись у Науково-технічній бібліотеці Національного авіаційного університету за адресою: 03058, м. Київ, проспект Любомира Гузара, 1.

Автореферат розісланий «9» квітня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
кандидат технічних наук

О. М. Дубик

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Транспортна галузь України є важливою частиною економіки, що обслуговує як внутрішні, так і експортні, імпорتنі та транзитні перевезення вантажів та пасажирів, а також є невід'ємною складовою забезпечення обороноздатності країни. Згідно з Національною транспортною стратегією України, до 2030 року однією з головних стратегічних цілей є підвищення рівня безпеки на транспорті.

На сьогоднішній день, показники аварійності на автошляхах України є невтішними, і, незважаючи на те, що її рівень поступово зменшується, проблема залишається надзвичайно актуальною. Одним із основних показників підвищення безпеки на автомобільних дорогах є їх відповідна якість. За офіційними даними, стан українських доріг стає причиною аварій в 10-15% випадків ДТП.

Для авіаційного транспорту статистика має дещо інший характер. При розгоні і зльоті літака, за статистикою, відбувається близько 20% всіх аварійних ситуацій, при посадці – 16%. Тому якість поверхні аеродромного покриття відіграє важливу роль при забезпеченні належного рівня безпеки.

Тому при будівництві нових, та в процесі експлуатації діючих автомобільних доріг та аеродромів, необхідно забезпечувати високу якість їхнього покриття, зокрема відповідність параметрів шорсткості разом з поздовжніми та поперечними ухилами, діючим європейським стандартам, державним будівельним нормам та рекомендаціям ІКАО.

Якість покриття дорожнього та аеродромного покриття перевіряється шляхом застосування трудомістких геодезичних методів з використанням теодоліта, тахеометра, далекоміра, нівеліра, вимірювальної лінійки для визначення ухилів, а нерівності визначають не менш трудомістким шляхом – вимірюванням зазорів під триметровою лінійкою.

В даний момент, у різних країнах ведуться розробки пристроїв, які дозволяють частково механізувати процедуру визначення ухилів за допомогою механічних пристосувань, або автоматично визначати величину ухилу за однією координатою шляхом використання досягнень новітніх технологій. Мобільних пристроїв для автоматичного вимірювання ухилів та рівності як злітно-посадкових смуг, так і дорожніх покриттів одночасно за двома координатами в практичному дорожньому та аеродромному будівництвах, а також в експлуатаційних підрозділах аеропортів України не існує.

Тому на сьогоднішній день залишається актуальним створення нових методів визначення поздовжніх і поперечних ухилів, а також оцінка рівності покриття дорожніх та аеродромних покриттів, розробка на їх основі сучасних мобільних приладів, що підвищить якість і швидкість контролю параметрів, що досліджуються.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалась в рамках науково-дослідної роботи, що була проведена кафедрою авіоніки Навчально-наукового інституту аеронавігації Національного авіаційного університету під назвою «Розробка діючого модуля для визначення поздовжніх та поперечних ухилів та рівності поверхні аеродромних покриттів. Проведення замірів ухилів та рівності на новій злітно-посадковій смузі в Міжнародному аеропорту

«Харків» (Основа)» (договір №753-ХІІ) 2011р. Тема дисертаційної роботи відповідає Національній транспортній стратегії України до 2030 року (розпорядження Кабінету Міністрів України від 30 травня 2018 р. №430-р).

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є оцінка ухилів та рівності поверхонь дорожніх та аеродромних покриттів за допомогою розробленого інерційного методу визначення профілю, на основі аналізу інформації, яка отримана від датчиків, побудованих за технологією мікроелектромеханічних систем (МЕМС).

Для досягнення мети роботи поставлено наступні **завдання**:

1. Провести аналіз існуючих методів та створених на їх основі приладів для оцінки рівності та ухилів поверхонь дорожніх та аеродромних покриттів;
2. Удосконалити метод оцінки рівності та ухилів поверхонь аеродромних та дорожніх покриттів за критерієм «спектральної щільності дисперсії».
3. Розробити математичну модель поздовжнього профілю покриття, що досліджується та розробити ітеративний метод відновлення профілю дорожніх та аеродромних поверхонь з оцінкою точності відновлення профілю;
4. Розробити індикаторний метод діагностування ухилів поверхонь дорожніх та аеродромних покриттів та кількісно оцінити достовірність діагностування;
5. Розробити методику комплексування інформації від МЕМС-датчиків;
6. Розробити діючий модуль для визначення поздовжніх і поперечних ухилів та рівності профілю поверхонь дорожніх та аеродромних покриттів, підтвердити можливість практичної реалізації розроблених методів.

Об'єкт дослідження. Процеси вимірювання ухилів та рівності поверхонь дорожніх та аеродромних покриттів.

Предмет дослідження. Метод оцінки ухилів та рівності поверхонь дорожніх та аеродромних покриттів на основі вимірювання та аналізу інформації, яка отримана від МЕМС-датчиків.

Методи дослідження: аналіз літературних джерел щодо методів вимірювання ухилів та рівності в практичному дорожньому та аеродромному будівництвах, а також в експлуатаційних підрозділах аеропортів України; математичні та статистичні методи визначення порівняльних характеристик для оцінювання результатів експериментальних досліджень, статистичних даних, чисельного моделювання (метод Монте-Карло), що ліг в основу створених імітаційних моделей; експериментальні дослідження проводилися як в лабораторії на спеціально розробленому стенді, так і на новозбудованій злітно-посадковій смугі міжнародного аеропорту міста Харкова.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

вперше розроблено: математичну модель поздовжнього профілю покриття дорожніх та аеродромних покриттів, у вигляді сукупності нерівностей, змодельованих відповідно до класифікації за довжинами хвиль, за допомогою якої проведено дослідження характеристик точності та достовірності розроблених методів;

вперше розроблено: ітеративний метод вимірювання профілю поверхні, який, на відміну від існуючих є двоетапним: на першому етапі проводиться фільтрація даних вздовж масиву вимірювальних значень зліва направо і справа наліво, а на другому етапі відбувається об'єднання результатів;

вперше розроблено: індикаторний метод діагностування ухилів, суть якого полягає в реалізації алгоритму допускового контролю і дозволяє прийняти рішення щодо діагностичного параметру: «в нормі» або «не в нормі» за умови виходу його значення за межі вимог, зазначених в нормативних документах;

удосконалено: спектральний метод оцінки ухилів та рівності поверхонь дорожніх та аеродромних покриттів на основі визначеного профілю поверхні.

Практичне значення отриманих результатів:

- на основі розробленого спектрального методу оцінки ухилів та рівності поверхонь дорожніх та аеродромних покриттів розроблено методику проведення вимірювань;

- на основі експериментальних досліджень розроблено рекомендації щодо підвищення точності вимірювання кута просторової орієнтації вимірювальної платформи за допомогою датчиків побудованих за МЕМС-технологією (авт. свід. №38841 від 25.06.2011 [21]);

- розроблено та виготовлено макет автоматичного мобільного приладу для вимірювання нерівностей поверхонь дорожніх та аеродромних покриттів (пат. № 98226 [17], пат. № 103211 [18], пат. № 106862 [19] Україна);

- за результатами проведених експериментальних досліджень, розроблених в дисертаційному дослідженні, підходів до вимірювання та методів оцінки ухилів та рівності профілю покриття, що досліджуються, розроблено рекомендації щодо підвищення автоматизованості процесу вимірювання (авт. свід. №49339 від 27.05.2013 [20]);

- розроблені за результатами дисертаційної роботи матеріали знайшли своє відображення у збірнику лабораторних робіт та були впроваджені в навчальний процес кафедри авіоніки Факультету аеронавігації, електроніки та телекомунікацій Національного авіаційного університету з дисципліни «Технічне діагностування авіоніки». Також отримані результати роботи впроваджені та застосовані: у науково-дослідному процесі Міжнародного науково-навчального центру інформаційних технологій та систем НАН та МОН України; Науково-технічному центрі ВАТ «Меридіан» ім. С.П. Корольова; ТОВ «ЮА ТЕХНОЛОДЖІ» та Державному підприємстві «Антонов».

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота є самостійно виконаною науковою працею. Наукові положення, висновки та рекомендації дисертаційної роботи, які виносяться на захист, одержані автором самостійно. З наукових праць, опублікованих у співавторстві, у дисертаційній роботі використані тільки ті положення, що є результатом особистого дослідження здобувача.

У роботах [1, 7, 9] автором особисто реалізовано алгоритм фільтра Калмана для комплексування даних від МЕМС-датчиків на мікроконтролері *ATmega 16*, та досліджено характеристики його точності.

У роботах [2, 8] автором особисто розроблено алгоритм обробки зображення, реалізованого в програмному середовищі *MATLAB*, розроблено та виготовлено дослідний зразок приладу.

У роботах [3, 4] автором особисто розроблено програми імітаційного моделювання та проведено дослідження.

У роботі [5] автором особисто удосконалено спектральний метод оцінки рівності профілю поверхонь дорожніх та аеродромних покриттів.

У роботі [6] автором особисто розроблено математичну модель профілю поверхні покриття, що досліджується.

Апробація результатів дисертації. Результати та матеріали дисертаційної роботи доповідалися на конференціях: XI міжнародна науково-технічна конференція «АВІА-2013», яка відбулася 21-23 травня 2013 року в Національному авіаційному університеті, м. Київ; науково-технічна конференція «Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNC/АТМ», яка відбулася 17-19 листопада 2014 року в Національному авіаційному університеті, м. Київ; XV Міжнародна науково-практична конференція молодих учених і студентів «Політ. Сучасні проблеми науки», яка відбулася 8-9 квітня 2015 року в Національному авіаційному університеті, м. Київ; всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених і студентів «Проблеми навігації і управління рухом», яка відбулася 23-25 листопада 2015 року в Національному авіаційному університеті, м. Київ; науково-технічна конференція «Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNC/АТМ», яка відбулася 21-23 листопада 2016 року в Національному авіаційному університеті, м. Київ; The Eighth World Congress "Aviation in the XXI-st century" – "Safety in Aviation and Space Technologies", який відбувся 10-12 жовтня 2018 року в Міжнародному виставковому центрі, м. Київ; XIX Міжнародна науково-практична конференція молодих учених і студентів «Політ. Сучасні проблеми науки», яка відбулася 1-5 квітня 2019 року в Національному авіаційному університеті, м. Київ.

Публікації. Матеріали дисертаційної роботи опубліковані у 9 наукових працях, серед яких 5 статей у наукових фахових виданнях, затверджених МОН України, 1 стаття, що входить до міжнародних наукометричних баз, 3 статті, які додатково відображають наукові результати, а також 7 публікацій у збірниках матеріалів міжнародних конференцій. Крім того, отримано 3 патенти на корисну модель та 2 свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, 4 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел із 116 найменувань, 5 додатків. Робота викладена на 147 сторінках, у тому числі містить 114 сторінок основного тексту, з них 12 сторінок списку використаних джерел, 15 таблиць, 68 рисунків та 18 сторінок додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, викладено загальну характеристику роботи, сформульовані мета та завдання дослідження, визначена наукова новизна та практична цінність роботи.

У першому розділі проведено аналіз існуючих методів вимірювання ухилів та оцінки рівності як аеродромних, так і дорожніх покриттів.

Встановлено, що відповідно до діючих в Україні нормативних документів, рівність аеродромних та дорожніх покриттів нормують за різницею висотних відміток при поздовжньому нівелюванні, за кількістю просвітів під 3-и метровою рейкою, що є достатньо трудомісткими і мають вибіркового характеру (не враховують весь спектр довжин хвиль нерівностей), а також за показниками поштовхоміра та причіпних установок, на результат вимірювань яких впливає стан підвіски, відношення підресорених та непідресорених мас автомобіля, швидкості руху та власне сам тип поштовхоміра тощо.

Розробці нових методів та показників оцінки рівності покриття аеродромних та дорожніх покриттів присвячені роботи як українських (Біруля А.К., В.Я. Савенко, В.В. Філіппов, І.В. Кіяшко, Р.В. Смолянук, Д.О. Павлюк, Ю.Д. Роев, О.І. Горб, А.О. Горб) так і зарубіжних вчених, зокрема групи вчених університету Мічиганського транспортного науково-дослідницького інституту (UMTRI), до складу якої входили Michael W. Sayers та Steven M. Karamihis а також Yanfeng Ouyang, Samer Madanat, Y. Zhao, J. McDaniel, M. Wang та ін.

Порівняльний аналіз показав, що із найбільш використовуваних на сьогоднішній день критеріїв оцінки рівності як аеродромних, так і дорожніх покриттів є спектральна щільність дисперсії, що дозволяє оцінити нерівність всього діапазону довжин хвиль на відміну від міжнародного індексу рівності IRI, який є основним показником рівності у багатьох країнах. Тому цей показник необхідно використовувати для забезпечення рівності як аеродромних, так і дорожніх покриттів при проектуванні та оцінюванні рівності після будівництва або після капітального чи поточного ремонтів.

Слід зазначити, що ухили як аеродромних, так і дорожніх покриттів, в свою чергу, вимірюються шляхом застосування високоточних, але трудомістких геодезичних методів з використанням теодоліта, тахеометра, далекоміра, нівеліра, виміральної лінійки. Наприклад, поздовжні ухили ЗПС вимірюються геодезичним методом з кроком порядку 60 м, відповідно нерівності в цьому проміжку не контролюються.

Також, крім передбачених нормативними документами України методів вимірювання рівності покриття як аеродромних, так і дорожніх покриттів, проведено аналіз й інших існуючих методів оцінки рівності. З них можна виділити такий, як «Dipstick», який дає можливість оцінювати рівності та ухили (недоліки – високу трудомісткість, відсутність мобільності (оскільки він ручний), вибіркового характеру даних разом з можливістю проводити вимірювання профілю лише за однією координатою), а також інерційні методи вимірювання рівності, які позбавлені такого недоліку, як мобільність, але на точність їх вимірювань впливає геометрія виміральної

поверхні (шорсткість, тріщини) разом зі зміною тиску повітря і вітру, якщо вимірювання проводиться з використанням ультразвуку.

Враховуючи ряд недоліків, що властиві існуючим методам оцінки ухилів та рівності поверхонь дорожніх та аеродромних покриттів, на сьогоднішній день залишається актуальним створення нових методів оцінки параметрів покриття як аеродромних поверхонь, так і поверхонь автомобільних доріг та розробка на їх основі сучасних мобільних вимірювальних модулів, що підвищить якість контролю поверхонь, що досліджуються.

І як показує інформаційний та патентний пошуки, в цьому напрямку ведуться інтенсивні розробки пристроїв, які б дозволили механізувати і частково автоматизувати процес вимірювання ухилів та рівності. До таких пристроїв відноситься, наприклад, також розглянута в даному розділі одноосна колісна транспортна платформа – вимірювач ухилів аеродромних покриттів. Дана платформа є робототехнічною системою, вона теоретично розроблена в Московському авіаційному університеті.

Для комплексної оцінки параметрів поверхонь дорожніх та аеродромних покриттів актуальною залишається задача розробки нових методів вимірювання на основі сучасних технологій, до яких відносяться мікро-електромеханічні системи (МЕМС), що дозволяють зробити буквально революційні зміни в конструюванні приладів для контролю параметрів поверхонь покриттів, що досліджуються.

У другому розділі розглянуто розроблені мною методи оцінки ухилів та рівності: спектральний метод оцінки ухилів і рівності та індикаторний метод контролю ухилів. Також проведено оцінку характеристик точності кожного методу.

Спектральний метод являє собою набутий подальшого розвитку критерій оцінки рівності поверхонь дорожніх та аеродромних покриттів, розглянутий під назвою: «спектральна щільність дисперсії». Даний метод найбільш доцільно використовувати для оцінки ухилів та рівності поздовжнього профілю поверхонь, що досліджується.

Суть створеного методу полягає в тому, щоб профіль поверхні, представлений як сукупність гармонічних коливань, розділити на відповідні частотні смуги та дослідити їх характеристики не тільки за довжиною хвиль, а й за амплітудою нерівностей. Ідеалізований профіль поверхні, що досліджується, описано наступною формулою:

$$\hat{h}(x) = \sum_{k=0}^K \left(a_k \cos \frac{\pi k x}{K} + b_k \sin \frac{\pi k x}{K} \right). \quad (1)$$

Даний ряд представляє собою тригонометричну інтерполяцію профілю поверхні, коефіцієнти якого $a_k = \text{Re}(H_k)$ та $b_k = \text{Im}(H_k)$ розраховуються за допомогою дискретного перетворення Фур'є над значеннями висоти профілю поверхні $h(k\Delta x)$, в точках $k\Delta x$, де Δx крок з яким відомий профіль:

$$H_k = \sum_{k=0}^{K-1} h(k\Delta x) \left(\cos \frac{2\pi k x}{K} - j \sin \frac{2\pi k x}{K} \right). \quad (2)$$

Значення отримані в (2), індекси яких задовольняють відношенню $\frac{K \cdot \Delta x}{k} > 100$ описують мікронерівності. Сам профіль покриття, який утворений макронерівностями, може бути відтворений за допомогою тригонометричної

інтерполяції (1), використовуючи доданки з коефіцієнтами, утвореними з множини перших значень H_k , індекси яких задовольняють нерівність $\frac{100 \text{ м}}{\Delta x} < k$:

$$h_{\text{макро.}}(x) = \sum_{z \in \left\{ \frac{k \cdot \Delta x}{k} > 100, k \in [0, \dots, K] \right\}} \left(a_z \cos \frac{\pi z x}{K} + b_z \sin \frac{\pi z x}{K} \right). \quad (3)$$

З профілю покриття, утвореного макронерівностями, можна оцінити ухили в кожній точці поверхні $\frac{dh_{\text{макро.}}(x)}{dx}$. Така оцінка ухилів з використанням спектрального методу запропоновано вперше, оскільки критерій спектральної щільності дисперсії дає можливість оцінити лише нерівності профілю поверхонь дорожніх та аеродромних покриттів в частотній смузі мікронерівностей.

Оцінити рівність можна шляхом аналізу профілю мікронерівностей, відтвореного аналогічним чином до профілю макронерівностей (використавши доданки з коефіцієнтами утвореними з множини значень H_k , індекси яких задовольняють нерівність $\frac{K \cdot \Delta x}{k} < 100$):

$$h_{\text{мікро.}}(x) = \sum_{z \in \left\{ \frac{K \cdot \Delta x}{k} < 100, k \in [0, \dots, K] \right\}} \left(a_z \cos \frac{\pi z x}{K} + b_z \sin \frac{\pi z x}{K} \right). \quad (4)$$

Загальну оцінку рівності поверхні можемо оцінити за допомогою показника IRI, отриманого шляхом моделювання руху лінійної моделі чверті автомобіля (рис.1), основні динамічні характеристики якої описані системою диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{Z}_1 = k_1 (Z_2 - Z_1) + c_1 (\dot{Z}_2 - \dot{Z}_1), \\ m_2 \ddot{Z}_2 = k_2 (h_{\text{мікро.}}(x) - Z_2) - k_2 (Z_2 - Z_1) - c_1 (\dot{Z}_2 - \dot{Z}_1), \end{cases} \quad (5)$$

де: m_1 – маса чверті кузова автомобіля (підресорна маса), кг;

m_2 – маса колеса і підвіски (непідресорна маса), кг;

k_1 – коефіцієнт жорсткості пружини підвіски, Н/м;

c_1 – коефіцієнт демпфування системи підвіски, Н·с/м;

k_2 – коефіцієнт жорсткості пружини підвіски, Н/м;

Z_1 – переміщення кузова чверті автомобіля, м;

Z_2 – переміщення колеса, м;

$h_{\text{нерівн.}}(x)$ – зміна висоти профілю поверхні по довжині, що досліджується, м.

Моделювання даної динамічної системи було проведено за допомогою програмного забезпечення Simulink. Для реалізації єдиного підходу до нормування рівності за IRI і водночас спрощення рівнянь, параметри моделі чверті автомобіля нормуються за m_1 (підресорною масою). Значення нормованих параметрів, що визначають дані «золотого автомобіля» представлені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Дані «золотого автомобіля»

$c = \frac{c_1}{m_1} = 6,0$	$k_1 = \frac{k_1}{m_1} = 653$	$\mu = \frac{m_2}{m_1} = 0,15$	$k_2 = \frac{k_2}{m_1} = 63,3$
-----------------------------	-------------------------------	--------------------------------	--------------------------------

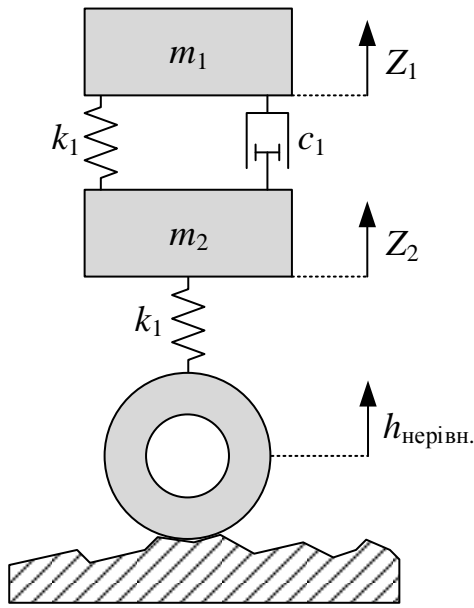


Рис. 1. Модель чверті автомобіля

IRI визначається як накопичення імітованого руху між підресореною та невідресореною масами в моделі чверті автомобіля, нормалізовані за довжиною профілю, S :

$$IRI = \frac{1}{S} \int_0^{S/V} |\dot{z}_1 - \dot{z}_2| dt, \quad (6)$$

де x – це довжина профілю, що досліджується; V – змодельована швидкість, що становить 80 км/год для IRI; S – довжина профілю, що досліджується ($S = K \cdot \Delta x$).

Можливість дослідження розробленого методу потребує наявності інформації про профіль поверхні, що досліджується. Враховуючи те, що вимірювання реального профілю поверхні автомобільних доріг чи

аеродромів є достатньо трудомістким способом отримання даних і не дає можливості оцінити точність через відсутність абсолютних значень (оскільки параметри профілю виміряні з деяким значенням помилки), мною було розроблено математичну модель, яка дала можливість отримувати профіль покриття, що досліджується, максимально наближеним до реального.

Розроблена математична модель поздовжнього профілю поверхні, що досліджується, являє собою сукупність нерівностей, змодельованих відповідно до вимог державних будівельних норм та рекомендацій *ІКАО*.

Отже, профіль покриття як аеродромної поверхні, так і поверхні дорожнього покриття, може бути ідеалізований і описаний наступним рівнянням:

$$P(x) = f_1(x) + f_2(x) + f_3(x), \quad (7)$$

де $f_1(x)$ – загальний ухил досліджуваної поверхні (макронерівності),

$f_2(x)$ – мікронерівності,

$f_3(x)$ – шорсткість.

Складову загального ухилу поверхні $f_1(x)$ пропонується представити наступною формулою:

$$f_1(x) = \exp\left(-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right) \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T_1}x + \varphi_1\right), \quad (8)$$

де m – випадкова величина в межах $0..Z$;

σ^2 – випадкова величина;

φ_1 – випадкова початкова фаза в межах $(0..2\pi)$;

T_1 – випадкова величина періоду.

Дані нерівності формують макропрофіль поверхні (мають величину періоду більше 100 м і величина ухилу не перевищує 2%), впливають на динаміку, режими руху і роботу двигунів, не викликають низькочастотні та високочастотні коливання.

Аналогічним чином представлено складову нерівностей $f_2(x)$ – мікропрофіль поверхні, довжина хвиль нерівностей якого лежить в діапазоні від 10 см до 100 м, та складову шорсткості $f_3(x)$ з довжиною хвиль нерівностей до 10 см.

Виходячи з формули (7), отримуємо загальну модель профілю поверхні, що досліджується, представлену на рис.2.

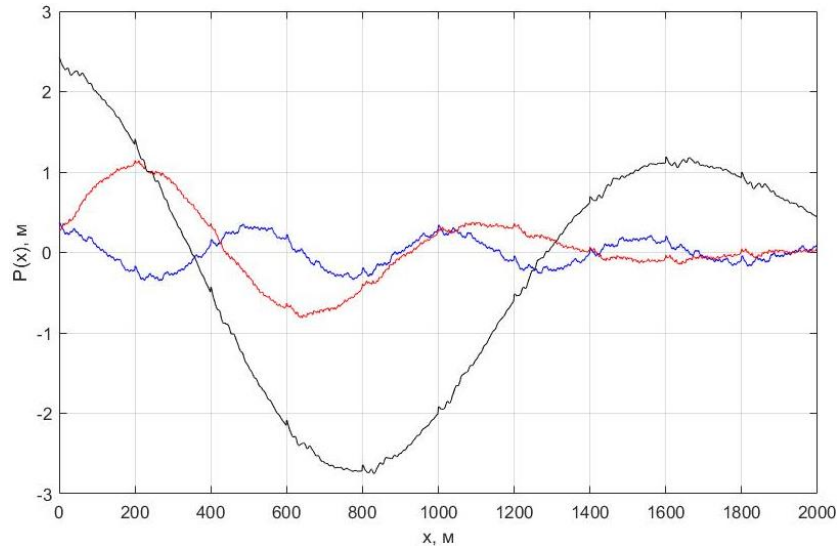


Рис. 2. Модель профілю поверхні

За допомогою спектрального методу, на основі розробленої математичної моделі профілю поверхні, представленої як сукупність гармонічних коливань, отримано можливість розділити їх на відповідні частотні смуги та дослідити його характеристики не тільки за довжиною хвиль, а й за амплітудою нерівностей (рис.3).

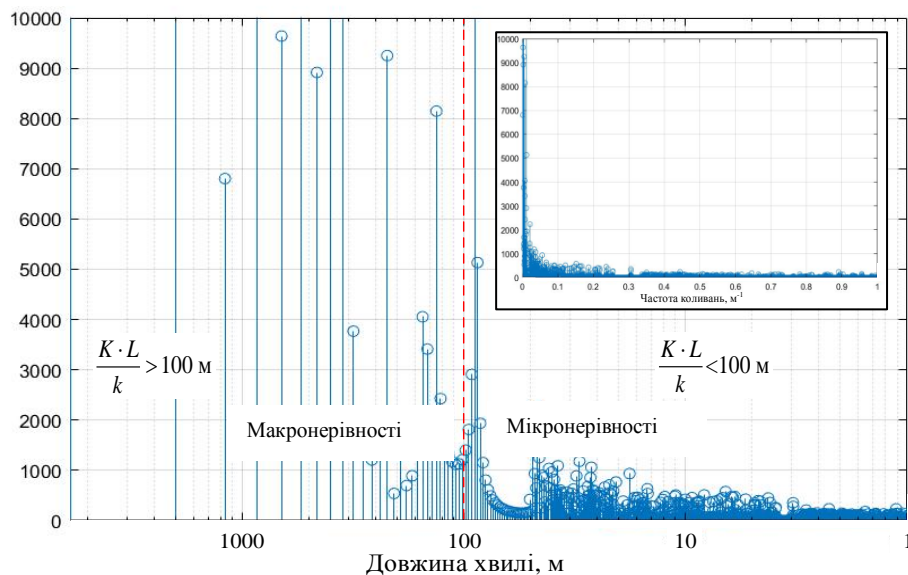


Рис. 3. Спектр профілю змодельованої поверхні

Також, розроблений метод дає можливість відновити профіль поверхні, що досліджується, загалом та його частотних компонентів зокрема (окремо ухили та окремо нерівності).

Кожна i -та частотна складова (з частотного діапазону мікронерівностей), яка розподілена на короткому проміжку ділянки профілю поверхні, може бути локалізована та ідентифікована як вибоїна і не врахована при оцінюванні коефіцієнту рівності.

Як приклад, в дисертаційній роботі, проведено розрахунок IRI для «елементарного» профілю поверхні представленого синусоїдою з амплітудою 20 мм та довжина нерівності 60 м, отримане розрахункове значення IRI становить 0,153 м/км, що збігається з результатом отриманим групою вчених університету Мічиганського транспортного науково-дослідницького інституту (UMTRI).

Враховуючи те, що в реальному житті ми вимірюємо профіль поверхні з похибками, було розроблено ітеративний метод відновлення профілю поверхні та проведено оцінку його точності.

Суть ітеративного методу відновлення профілю поверхні полягає в тому, що профіль поверхні, що досліджується, може бути отриманий з множини вимірних кутів між горизонтом та поверхнею шляхом ітеративного розрахунку з врахуванням кроку вимірювання, і може бути розрахований за наступною формулою:

$$h_i = h_{i-1} + L \cdot \tan \alpha_i, \quad (9)$$

де h_i – висота профілю в кожній точці;

L – крок вимірювання, дискретизація вимірювань;

α_i – кут вимірний між горизонтом і прямою, побудованою між двома точками на профілі поверхні.

Зрозуміло, що профіль покриття, що досліджується, буде відтворений не стовідсотково, оскільки частину інформації про профіль ми втратимо через дискретність, а вимірювання кута α_i , буде спотворене випадковою похибкою у вигляді адитивної складової:

$$\alpha = \alpha_{\text{іст.}} + \varepsilon, \quad (10)$$

де $\alpha_{\text{іст.}}$ – істинне значення кута, ε – випадкова похибка вимірювання.

Дослідження точності відтворення профілю поверхні, що досліджується, проведено за допомогою розробленої імітаційної моделі, в основу роботи якої покладено чисельний метод розв'язання математичних задач за допомогою моделювання випадкових величин (метод Монте-Карло). Враховуючи, що значення випадкової складової похибки вимірювання ε розподілена за нормальним законом, щільність розподілу якого:

$$f(\varepsilon) = \frac{1}{\sigma_\varepsilon \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(\varepsilon)^2}{2\sigma_\varepsilon^2}\right], \quad (11)$$

будуємо ітеративним методом виміряну поверхню, враховуючи (9) і (10). Знаходимо розходження між вимірним профілем поверхні, що досліджується, та профілем, побудованим шляхом моделювання, отримуємо значення абсолютної похибки вимірювання. Провівши багатократне (кратність $M = 10000$) моделювання відтворення профілю поверхні X , отримуємо статистику розподілу середньоквадратичного відхилення, $\sigma_{\text{проф.}i}$, яке відповідає кожному i -ому

вимірюванню. Результат залежності $\sigma_{\text{проф.}}$ від довжини профілю поверхні, що досліджується, представлено на рис 4.

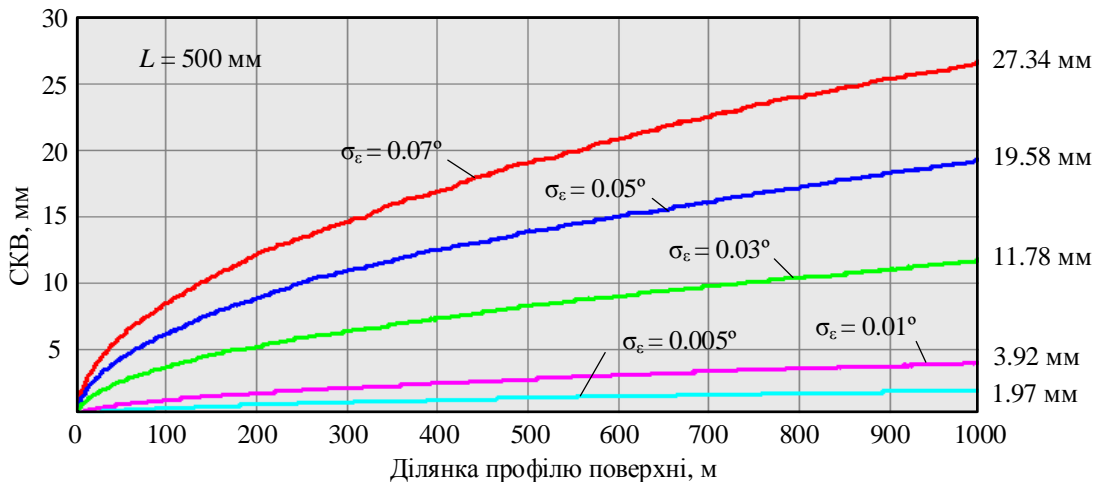


Рис. 4. Залежність СКВ помилки відтвореного профілю від його довжини, $\sigma_{\text{проф.}} = f(X, \sigma_{\varepsilon_i})$

Розглянуто вплив кроку вимірювання на значення середньоквадратичного відхилення помилки вимірювання профілю поверхні, що досліджується: прослідковується пропорційне зменшення значення $\sigma_{\text{проф.}}$ при зменшенні кроку вимірювання (табл.2).

Таблиця 2 – Значення залежності $\sigma_{\text{проф.}}(X, L_i)$

$X = 1000 \text{ м}$	Пропорційність	СКВ помилки вимірювання профілю поверхні, що досліджується, мм			
		$\sigma_{\varepsilon} = 0,01^{\circ}$	$\sigma_{\varepsilon} = 0,03^{\circ}$	$\sigma_{\varepsilon} = 0,05^{\circ}$	$\sigma_{\varepsilon} = 0,07^{\circ}$
Крок вимірювання, м					
500	1	3,94	11,78	19,58	27,34
400	0,8	3,15	9,45	15,53	21,26
250	0,5	1,89	5,91	9,51	13,65
200	0,4	1,58	4,72	7,77	10,71

Враховуючи, що на точність вимірювання профілю поверхні, що досліджується, суттєво впливає шум, який присутній у вимірних значеннях кутів ухилів, для підвищення точності відтворення профілю поверхні виконано фільтрацію вимірних даних. Для рішення цієї задачі застосовано алгоритм, в якому спочатку виконується фільтрація вздовж масиву вимірних значень зліва на право (forward) і справа наліво (backward), а потім об'єднання результатів, що дозволяє отримати інтерполяційні оцінки в кожній точці, враховуючи всі наявні вимірювання.

Розроблено індикаторний метод контролю ухилів, суть якого полягає у вимірюванні ухилу поперечного профілю, як діагностичного параметра (ДП), порівнянні його значення з вимогами нормативних документів та прийняття рішення «норма», або «не норма» за умови виходу параметра за межі допуску.

Для даного методу запропоновано модель розрахунку помилок першого, α та другого роду, β (хибний результат «не норма» і невиявлений результат «не норма» відповідно), а також достовірність контролю, D (рис. 5). Відповідно розраховано

нормовані (відносні) значення параметрів діагностичного процесу: відносне значення точності вимірювання (z) та відносне значення допуску на параметр (δ). Виходячи з вимог, зазначених в нормативних документах, в залежності від матеріалу покриття дорожнього одягу, діапазон значень ухилів лежить в діапазоні від 25‰ до 40‰, а отже, поле розсіяння діагностичного параметра становить 15‰, тобто $\sigma_x = 2,5$ ‰; в залежності від типу укріплення узбічч, діапазон їх ухилів становить від 30‰ до 60‰, тобто $\sigma_x = 5$ ‰. Значення розрахованих відносних допусків та відносних помилок вимірювання наведені в табл. 3 та табл. 4 відповідно, де Δ – половина поля допуску.

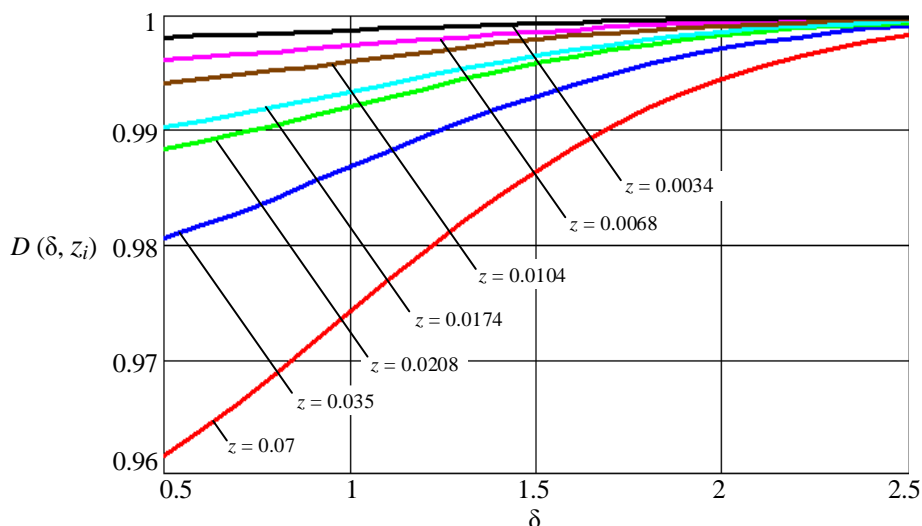


Рис. 5. Залежність достовірності діагностування від величини допуску, $D = f(\delta, z_i)$

Таблиця 3 – Значення відносних допусків поперечних ухилів, $\delta = \frac{2\Delta}{\sigma_x}$

Ухили дорожнього покриття			Ухили узбіччя		
	2Δ	δ		2Δ	δ
З асфальтобетонним та цементобетонним покриттям	5‰	1	Укріплені із застосуванням в'язучих	10‰	1
Гравійне та щебенеve покриття	5‰	1	Укріплені гравієм, щебенем	20‰	2
Ґрунти укріплені в'язучими	10‰	2	Укріплені засівом трав або одернуванням	10‰	1

Таблиця 4 – Значення відносних помилок вимірювання поперечних ухилів, $z = \frac{\sigma_\varepsilon}{\sigma_x}$

Ухили дорожнього покриття, $\sigma_x = 2,5$ ‰			Ухили узбіччя, $\sigma_x = 5$ ‰		
σ_ε		z	σ_ε		z
°	‰		°	‰	
0,01	0,175	0,07	0,01	0,175	0,035
0,005	0,087	0,0348	0,005	0,087	0,0174
0,003	0,052	0,0208	0,003	0,052	0,0104
0,001	0,017	0,0068	0,001	0,017	0,0034

У третьому розділі розглянуто запропонований варіант вимірювання кута між двома точками на профілі поверхні, що досліджується, суть якого полягає у використанні вимірювальної платформи з встановленими на ній датчиками з

використанням технологій мікроелектромеханічних систем (MEMS), як датчиками визначення просторового положення.

Розглянуто особливості застосування MEMS-датчиків при розробці системи визначення кута просторової орієнтації, зазначено переваги і недоліки датчиків. Встановлено, що вирішення задачі розрахунку єдиного значення оцінки кутового положення вимірювальної платформи здійснюється шляхом комплексування (фільтрації) даних отриманих від акселерометра і гіроскопа. В роботі розглянуто 3 види фільтрів: комплементарний фільтр, фільтр Калмана та фільтр Маджвіка.

Проведено експериментальне дослідження точності визначення просторової орієнтації вимірювальної платформи. Для порівняння точності визначення кутового положення було використано 3 типи інерційних вимірювальних модулів, *IMU*: *pr530al*, *ADXL 335 (Analog Devices)*, *MPU-6050 (InvenSense)* та *BNO055 (BOSH)*, тобто інформація від кожного з 3-ох типів запропонованих *IMU* комплексувалась 3-ма алгоритмами фільтрації.

Для проведення експерименту мною була розроблена і виготовлена лабораторна установка, за допомогою якої було проведено вимірювання кутів просторової орієнтації. Основою лабораторної установки послужив поворотний кронштейн КП-9 (рис. 6).

Як результат проведених експериментальних досліджень отримано значення середньоквадратичних відхилень похибок вимірювання кута просторової орієнтації (σ_ε), результати представлені в табл. 5. Також було встановлено, що густина ймовірності та похибка вимірювання кута просторової орієнтації розподілена за нормальним законом.

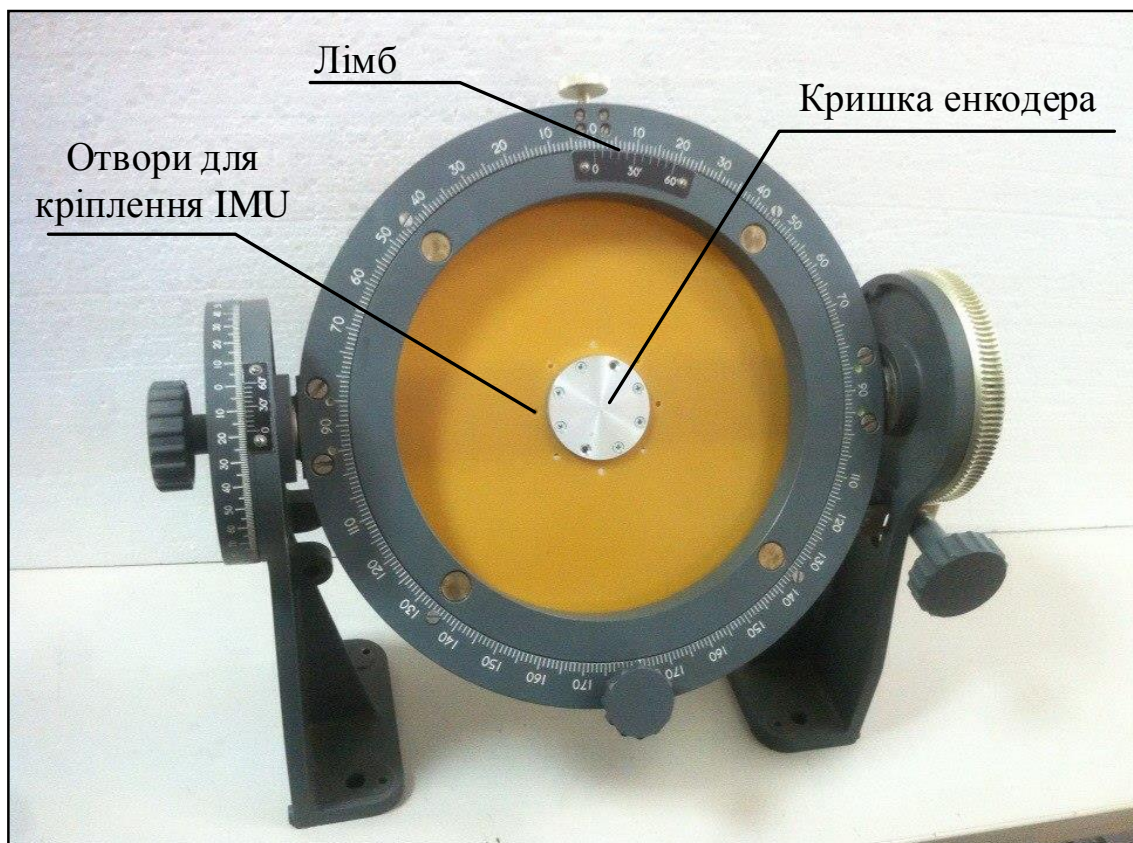


Рис. 6. Лабораторний стенд на базі поворотного кронштейну КП-9

Таблиця 5 – Отримані в ході експерименту значення σ_ε

	Комплементарний фільтр	Фільтр Маджвіка	Фільтр Калмана
pr530a1, ADXL 335 (Analog Devices)	0,0511° (3,07 кут.мін)	0,0493° (2,96 кут.мін)	0,0392° (2,35 кут.мін)
MPU-6050 (InvenSense)	0,0485° (2,91 кут.мін)	0,0457° (2,74 кут.мін)	0,0374° (2,24 кут.мін)
BNO055 (BOSH)	0,0461° (2,77 кут.мін)	0,0378° (2,27 кут.мін)	0,0296° (1,78 кут.мін)

Враховуючи максимально досягнуте в процесі проведення експерименту значення точності вимірювання кутової орієнтації, розраховано точність відновлення профілю поверхні, що досліджується, ітеративним методом (рис.7), та достовірність діагностування індикаторного методу контролю ухилів (рис.8).

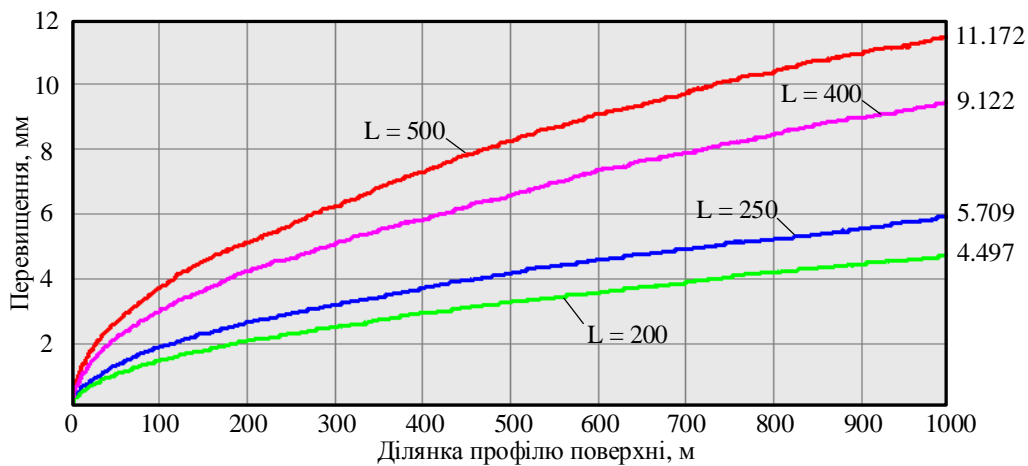


Рис. 7. Залежність СКВ вимірювання профілю поверхні від її довжини, при фіксованих значеннях кроку вимірювання, $\sigma_{\text{проф.}} = f(X, L_i)$

Отже, враховуючи досягнуті значення точності σ_ε , що представлені в табл. 4, для комплексування даних від МЕМС-датчиків оптимальним (за критерієм точності), в розглянутому випадку, виявився алгоритм фільтра Калмана.

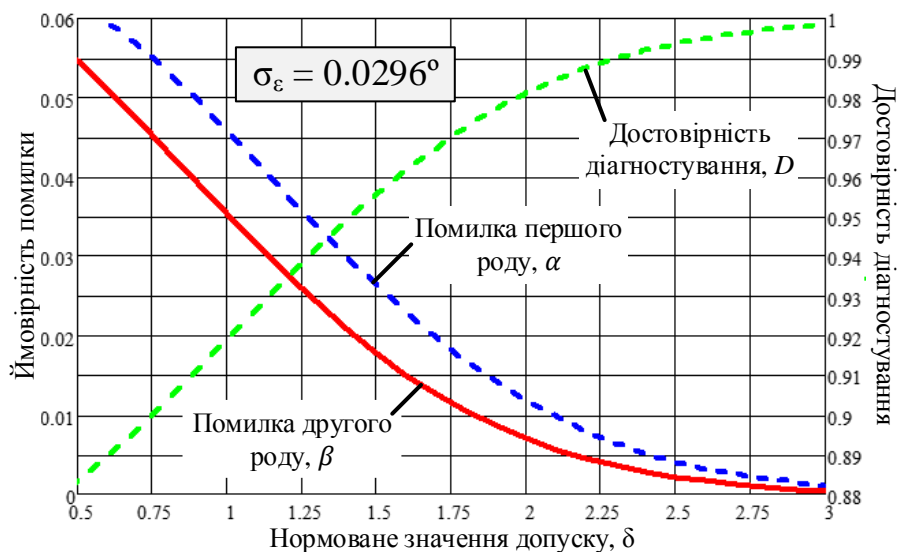


Рис. 8. Залежність помилок вимірювання та достовірності діагностування від величини допуску на ДП

Також запропоновано підвищити точність вимірювання кута просторової орієнтації шляхом калібрування датчиків, використання додаткового датчика – магнітометра, використання більш точного *IMU*.

У четвертому розділі розглянуто принцип побудови розробленого на кафедрі авіоніки Національного авіаційного університету спільно ДПТ НДІ ЦА “Украеропроект” (договір № 753-ХІІ) діючого модуля для визначення поздовжніх та поперечних ухилів та рівності (рис. 9). А також представлені результати вимірювання ухилів та рівності, що проводились при будівництві нової злітно-посадкової смуги (ЗПС) в міжнародному аеропорту «Харків» (Основа).

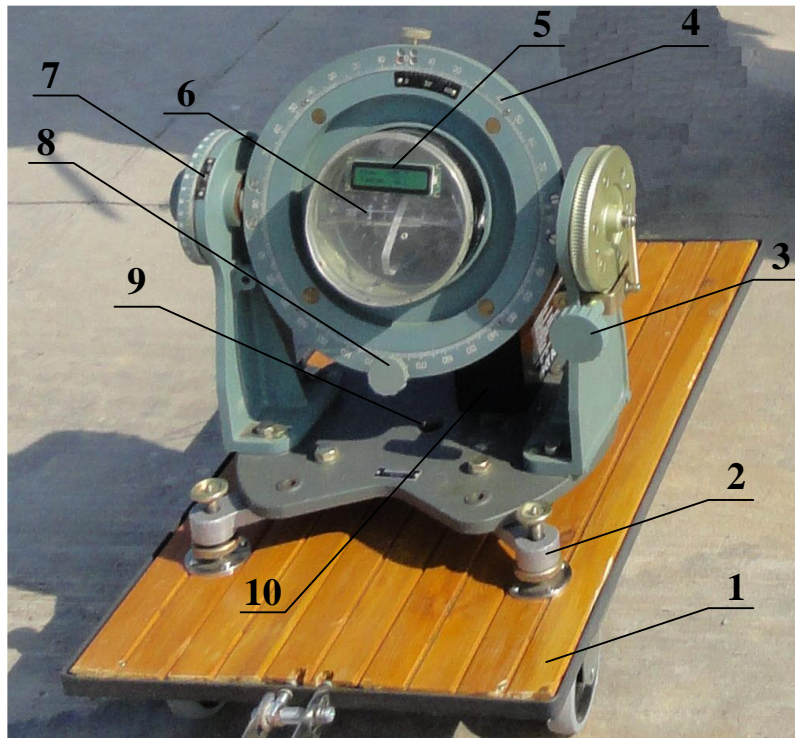


Рис.9. Конструкція вимірювального модуля:

- 1 – основа; 2 – регульована опора; 3 – маховик по тангажу; 4 – лімб;
5 – *LCD*-індикатор; 6 *MEMS*-датчики; 7 – лімб; 8 – маховик по крену;
9 – двохкоординатний датчик горизонту; 10 – акумулятор

Вимірювальний модуль є рухомою платформою, що переміщується оператором. На платформі встановлений рухомий кронштейн КП-9, який дозволяє імітувати поздовжні і поперечні ухили та виконувати функції калібрування вимірювача. Основа КП-9 кріпиться до платформи регульованими гвинтами, за допомогою яких здійснюється горизонтування основи за допомогою встановленого на ньому датчика горизонту.

Як датчики ухилів, використовуються акселерометри і гіроскопи, виконані за *MEMS*-технологією. Датчики розміщені на платі, яка встановлена в центрі КП-9. На цій же платі встановлений мікроконтролер, який здійснює комплексування інформації від датчиків за алгоритмом фільтра Калмана (на програму отримано свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №38841 від 25.06.2011 [21]). Результат вимірювання виводиться на рідкокристалічний індикатор, на якому одночасно відображається значення поздовжнього ухилу (тангажу) в діапазоні

вимірювання $\pm 90^\circ$ (кут. градусів) і поперечного ухилу (крену) в діапазоні вимірювання $\pm 90^\circ$ (кут. градусів) з ціною молодшого розряду – $0,1^\circ$ (кут. градуса) або 6' (кут. минут). На розроблений прилад отримано патент на корисну модель [18].

Робоча бригада від Національного авіаційного університету (в період з 19.09 по 23.09.2011 р) провела експериментальні дослідження 2 фрагментів ЗПС:

1) початкова ділянка ЗПС довжиною 660 метрів з метою визначення величини та знаку поздовжнього ухилу з однієї сторони;

2) нерівність плити (на пікеті ПК6, на відмітці + 91 м справа осі), яка була визначена дефектною при вимірюванні триметровою лінійкою, а потім з неї було вирізано окрему ділянку і знову забетоновано.

В результаті вимірювань поздовжнього ухилу на початковій ділянці ЗПС (фрагмент №1) отримано:

- поздовжній ухил не перевищує 0,008;

- поздовжній ухил на початковій ділянці в межах 416 м має в своїй більшості один напрямок, але є ділянки ($55 \div 105$ м; $130 \div 160$ м; $215 \div 255$ м; $345 \div 380$ м), де виявлені нерівності.

При вимірюванні фрагмента №2 отримано:

- поздовжні ухили ремонтного фрагмента не перевищують 0,008 (28' (кут. минут) та відповідають вимогам СНиП 2.05.08-85 Аеродроми;

- поперечні ухили виконані більше 0,015 (52' (кут. минут) і знаходяться в діапазоні $1,2 \div 0,75^\circ$ (кут. град.);

- при вимірюванні зліва виявлена одна точка $0,75^\circ$ (кут. град), яка на 6' (кут. минут) менша допуску.

Проведені дослідження фрагментів ЗПС в міжнародному аеропорту м. Харкова показали, що за допомогою модуля можна оперативно та достовірно проводити вимірювання ухилів і рівності як кожної плити, так і окремих її фрагментів без використання геодезичних приладів та лінійки, що значно зменшує трудомісткість вимірювань.

Також розглянуто перспективи удосконалення конструкції приладу, розроблено проект вимірювальної платформи з підвищеною точністю вимірювання, що становить $\pm 0,089$. В проекті передбачена можливість автоматичного переміщення ВП по поверхні покриття, що досліджується, шляхом встановлення на колісну базу електричних приводів та системи керування. Запропоновано можливість використання наземної станції керування, за допомогою якої з'являється можливість дистанційної обробки даних.

Враховуючи те, що ВП, у зв'язку з наявністю певної довжини колісної бази, не має можливості виміряти весь частотний діапазон хвиль нерівностей профілю покриття, що досліджується, втрачається можливість виміряти шорсткість, тому розглянуто розроблений мною у співавторстві прилад, який на основі методу лазерної триангуляції дозволяє безконтактно вимірювати нерівності профілю дорожніх та аеродромних покриттів в діапазоні частот шорсткості, на даний прилад отримано патент на корисну модель [17], також розроблено комплексний прилад для вимірювання ухилів, рівності, та шорсткості поверхонь дорожніх та аеродромних покриттів, на який також отримано патент на корисну модель [19].

ВИСНОВКИ

Результати дисертаційної роботи спрямовані на оцінку ухилів та рівності поверхонь дорожніх та аеродромних покриттів за допомогою розробленого інерційного методу визначення профілю, на основі аналізу інформації, яка отримана від датчиків, побудованих за технологією MEMS.

1. Проведено аналіз існуючих методів, які використовуються для оцінки рівності та ухилів поверхонь дорожніх та аеродромних покриттів. Обґрунтовано актуальність створення нових методів оцінки параметрів покриття як аеродромних конструкцій, так і автомобільних доріг та розробки на їх основі сучасних мобільних вимірювальних модулів, які підвищують якість контролю поверхонь, що досліджуються. Сформульовано мету та завдання дослідження.

2. Удосконалено спектральний метод оцінки ухилів та рівності покриттів дорожніх та аеродромних поверхонь, який дозволяє розділити весь спектр нерівності на будь-які частотні діапазони та досліджувати їх незалежно одне від одного. Також цей метод дає можливість відтворити профіль поверхні, що досліджується, без частотних складових діапазону макронерівностей (з довжиною хвилі від 100 м) та оцінити рівність профілю покриття.

3. Розроблено математичну модель поздовжнього профілю покриття, що досліджується, представлену як сукупність нерівностей, значення довжин хвиль яких генерується щоразу випадковим чином з діапазону значень, які відповідають реальним, згідно вимог нормативних документів та рекомендацій ІКАО. В процесі проведення імітаційного моделювання підтверджено можливість використання математичної моделі при дослідженні точності розроблених методів оцінки ухилів та рівності покриття аеродромних поверхонь та поверхонь автомобільних доріг. Та розроблено двоетапний ітеративний метод для відновлення профілю поверхні, що досліджується, в якому спочатку виконується фільтрація вздовж масиву вимірених значень зліва направо і справа наліво, а потім об'єднання результатів з метою отримання інтерполяційної оцінки в кожній точці. За допомогою розробленої імітаційної моделі отримана залежність середньоквадратичного відхилення похибки відтворення профілю поверхні, що досліджується, від довжини цього профілю та величини ітеративного кроку. Це дозволяє збільшити точність відновлення профілю від 3 до 7 % в центрі ділянки профілю, що досліджується (в точці з найбільшим значенням СКВ похибки) та до 30 % в кінці.

4. Виходячи з існуючих в нормативних документів, зокрема щодо поперечних ухилів, розроблено індикаторний метод їх контролю. Даний метод контролю ухилів доцільно використовувати для контролю поперечних ухилів у випадку, коли потрібно прийняти рішення «норма» чи «не норма». Реалізовано алгоритм допускового контролю ухилів поверхонь, що досліджуються, та проведено розрахунок помилок першого і другого роду. Також проведено розрахунок ймовірності прийняття правильного рішення за результатами контролю ухилів профілю покриття, що досліджується. В результаті досліджень розрахована та представлена залежність достовірності діагностування від точності вимірювального засобу ($D = f(z, \delta_i)$), що

дозволяє висувати вимоги до точності засобів вимірювання з метою забезпечення її належного рівня.

5. На основі розробленої та виготовленої лабораторної установки, шляхом експериментальних досліджень, визначено алгоритм комплексування даних від МЕМС-датчиків, що дозволяє найбільш точно визначати значення кута просторової орієнтації. З розглянутих алгоритмів фільтрації найкращі показники точності виявлено у фільтра Калмана, який і був використаний для розробки макету вимірювальної платформи. На розроблену комп'ютерну програму для комплексування інформації від МЕМС-акселерометрів та -гіроскопів отримано у співавторстві свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір (№38841 від 25.06.2011 [21]). Обґрунтовано можливість та доцільність використання МЕМС-технологій для вимірювання параметрів профілю поверхні дорожніх та аеродромних покриттів.

6. Розроблено макет вимірювальної платформи, за допомогою якої проведено дослідження фрагментів ЗПС в міжнародному аеропорту м. Харкова. Результати досліджень підтвердили можливість оперативно та достовірно проводити вимірювання ухилів і нерівностей як кожної плити, так і окремих її фрагментів без використання геодезичних приладів та лінійки, що значно зменшує трудомісткість вимірювань. На розроблену вимірювальну платформу отримано патент на корисну модель (пат. № 103211 [18]). Розглянуто перспективи розробки вимірювальної платформи, проектне значення СКВ похибки вимірювання кута просторової орієнтації якої становить $0,0296^\circ$. Враховуючи, те що переміщення конструкції вимірювальної платформи по поверхні покриття, що досліджується, здійснюється оператором, розглянуто проект конструкції, яка дає можливість автоматизувати процес вимірювання (на програму керування автоматичною платформою отримано у співавторстві свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №49339 від 27.05.2013 [20]). Але через те, що конструкція ВП не має можливості вимірювати весь частотний діапазон довжин хвиль нерівностей (зокрема шорсткості), через наявність певної довжини колісної бази, розроблено проект конструкції приладу, що дозволяє триангуляційним методом вимірювати шорсткість (роздільна здатність якого становить 0,9 мм). На даний прилад у співавторстві отримано патент на корисну модель (№ 98226 Україна [17]), а також у співавторстві отримано патент на корисну модель на комплексний прилад для вимірювання ухилів, рівності та шорсткості (№ 106862 Україна [19]).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації

1. Скрипец А.В. Разработка прибора для измерения продольных и поперечных уклонов и неровностей взлетно-посадочных полос / А.В. Скрипец, В.М. Краснов, Д.В. Смолич, М.Е. Кіреєв // Наука и Мир. – Волгоград : Научное обозрение, 2014. – №3 (7), С 208 – 210.

2. Скрипец А.В. Побудова та експериментальне дослідження автоматичного вимірювача шорсткості ЗПС / А.В. Скрипец, В.М. Краснов, М.Е. Кіреєв, Д.В.

Смолич, Ю.М. Сагідаєв // Науково-технічний збірник. Вісник Національного транспортного університету – К.: НТУ, 2013р. – Вип. 89. – С. 118-134.

3. Грибов В.М. Статистический анализ функций ошибок принятия решения при допусковом контроле работоспособности компонентов авионики / В.М. Грибов, Д.В. Смолич // Математичні машини і системи. - 2014. - №2. - С. 128 – 136. ISSN 1028-9763.

4. Грибов В.М. О возможности уменьшения вероятности ложных отказов блоков типа LRU на основе алгоритмической избыточности / В.М. Грибов, Д.В. Смолич // Математичні машини і системи. - 2014. - №3. - С. 136 – 146. ISSN 1028-9763.

5. Смолич Д.В. Спектральний метод оцінки ухилів та рівностей покриття аеродромних конструкцій / Д.В. Смолич, М.Е. Кіреєв, О.О. Шпилька // Вісник інженерної академії України: теорет. і наук.- практ. часоп. / Инж. акад. України. - 2016. - №3. - С. 50 – 53.

6. Смолич Д.В. Математична модель покриття аеродромних конструкцій / Д.В. Смолич, М.Е. Кіреєв, О.О. Шпилька, А.О. Герасименко // Вісник інженерної академії України: теорет. і наук.- практ. часоп. / Инж. акад. України. - 2018. - №2. С. 33 – 37.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації

7. Мельніков Д.Є. Пристрій для визначення кутового положення літака в просторі на основі MEMS-акселерометра та гіроскопа / Д.Є. Мельніков, М.Е. Кіреєв, Д.В. Смолич // Наука і молодь. Прикладна серія: збірник наукових праць / МОН; Національний авіаційний університет; Кулик М. С., ред. – Київ: НАУ-друк, 2012. – С. 61-64.

8. Скрипец А.В. Прибор для измерения шероховатости поверхности взлетно-посадочных полос (ВПП) / А.В. Скрипец, В.М. Краснов, Д.В. Смолич, М.Е. Кіреєв // Наука и Мир. – Волгоград : Научное обозрение, 2014. – №3 (7), С. 211 – 214.

9. Скрипец А.В. Побудова та дослідження мобільного автоматичного вимірювача ухилів / А.В. Скрипец, В.М. Краснов, Ю.М. Сагідаєв, В.М. Лужбін, Д.Є. Мельніков, М.Е. Кіреєв, Д.В. Смолич // Автошляховик України. - 2017. - №1-2. - С. 93-98.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

10. Краснов В.М., Кіреєв М.Е., Смолич Д.В. Прилад для вимірювання шорсткості новозбудованих злітно-посадкових смуг. АВІА-2013: матеріали ХІ міжнар. наук.-техн. конф., м. Київ, 21-23 травня 2013 р. Київ 2013. С. 13.9-13.12.

11. Смолич Д.В., Кіреєв М.Е., Краснов В.М. Вимірювач ухилів та рівностей покриття аеродромних конструкцій з дистанційною обробкою даних. Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM: зб. тез доп. наук.-техн. конф., м Київ, 17-19 листопада 2014 р. Київ, 2014. С. 112.

12. Смолич Д.В., Кіреєв М.Е. Розробка приладу для вимірювання поздовжніх та поперечних ухилів та нерівностей злітно-посадкових смуг. Політ. Сучасні проблеми

науки: зб. тез доп. наук.-практ. конф. мол. учених і студ., м Київ, 8-9 квітня 2015 р. Київ, 2015. С 46.

13. Смолич Д.В., Кіреєв М.Е. Комплексний пристрій для діагностики параметрів поверхонь конструкцій аеродрому. Проблеми навігації і управління рухом: зб. тез доп. всеукр. наук.-практ. конф. мол. учених і студ. м Київ, 23-25 листопада 2015 р. Київ, 2015. С 105.

14. Смолич Д.В., Кіреєв М.Е., Мирончук О.Ю. Оцінка точнісних характеристик методу вимірювання ухилів та рівностей покриття конструкцій аеродрому. Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNC/АТМ: зб. тез доп. наук.-техн. конф., м Київ, 21-23 листопада 2016 р. Київ, 2016. С. 88.

15. Myronchuk O., Shpylka O., Smolych D. Kalman filter for channel estimation in OFDM systems. The Eighth World Congress "Aviation in the XXI-st century" – "Safety in Aviation and Space Technologies", Kyiv, Ukraine, october 10-12, 2018. p 5.4.6-5.4.8

16. Смолич Д.В., Кіреєв М.Е., Бендак В.Р. Спектральний метод оцінки ухилів та рівностей покриття злітно-посадкових смуг. Політ. Сучасні проблеми науки: зб. тез доп. наук.-практ. конф. мол. учених і студ., м Київ, 1-5 квітня 2019 р. Київ, 2019.

Патенти

17. Кіреєв М.Е., Смолич Д.В., Краснов В.М., Скрипець А.В., Сагідаєв Ю.М. Вимірювач шорсткості поверхонь конструкцій аеродрому // Пат. № 98226 Україна, G01B 11/30; Заявка № u201410943, 07.10.2014, опубл. 27.04.2015, Бюл. №8.

18. Кіреєв М.Е., Смолич Д.В., Краснов В.М., Скрипець А.В., Сагідаєв Ю.М. Вимірювач рівності та ухилів поверхонь конструкцій аеродрому // Пат. №103211 Україна, G01B 7/30; Заявка № u201504877, 19.05.2015, опубл. 10.12.2015, Бюл. №23.

19. Кіреєв М.Е., Смолич Д.В., Краснов В.М., Скрипець А.В., Сагідаєв Ю.М. Комплексний пристрій для діагностики параметрів поверхонь конструкцій аеродрому // Пат. № 106862 Україна, G01B 11/30; Заявка № u201511018, 11.11.2015, опубл. 10.05.2016, Бюл. №9.

Свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір

20. Скрипець А.В., Краснов В.М., Мельніков Д.Є., Волков О.Є., Волошенюк Д.О., Смолич Д.В., Кіреєв М.Е. Комп'ютерна програма «автоматизованого робота-платформи діючого модуля для визначення поздовжніх і поперечних ухилів та рівності поверхні аеродромних покриттів» // №49339 від 27.05.2013.

21. Кіреєв М.Е., Смолич Д.В., Мельніков Д.Є., Черноус Т.М., Самокиша Т.В., Волков О.Є., Волошенюк Д.О. Комп'ютерна програма «комплексування інформації отриманої від МЕМС акселерометрів та гіроскопів для визначення кутового положення літака в просторі на основі оптимального рекурсивного фільтра Калмана» // №38841 від 25.06.2011.

АНОТАЦІЯ

Смолич Д.В. Оцінка ухилів та рівності поверхонь дорожніх та аеродромних покриттів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.11 - автомобільні шляхи та аеродроми. – Національний авіаційний університет МОН України, Київ, 2021 р.

Дисертація присвячена розробці нових методів оцінки ухилів та рівності поверхонь дорожніх та аеродромних покриттів на основі інформації, яка отримана від MEMC-датчиків та побудові на їх основі вимірювальних приладів.

Удосконалено спектральний метод оцінки ухилів та рівності дорожніх та аеродромних покриттів на основі відтвореного двоетапним ітеративним методом профілю поверхні. За допомогою імітаційної моделі проведено дослідження точності відтворення профілю поверхні, що досліджується, на основі вперше розробленої математичної моделі, як вихідних даних про профіль поверхні покриття, що досліджується.

Вперше розроблено індикаторний метод діагностування ухилів, суть якого полягає в реалізації алгоритму допускового контролю і дозволяє прийняти рішення щодо діагностичного параметру: «в нормі» або «не в нормі». Проведено оцінку достовірності діагностування.

Запропоновано методику проведення вимірювань на основі удосконаленого спектрального методу оцінки ухилів та рівності поверхонь дорожніх та аеродромних покриттів.

На основі експериментальних досліджень алгоритмів комплексування інформації від MEMC-датчиків встановлено, що найбільш точним алгоритмом визначення кута просторової орієнтації, виявився фільтр Калмана. Розроблено рекомендації щодо підвищення точності вимірювання.

Розроблено та виготовлено макет автоматичного мобільного приладу для вимірювання ухилів та рівності поверхонь дорожніх та аеродромних покриттів, проведено експериментальні вимірювання на новозбудованій злітно-посадковій смузі аеропорту м. Харків. Розглянуто перспективи удосконалення конструкції вимірювальної платформи, розроблено проект вимірювальної платформи з підвищеною точністю вимірювання, можливістю автоматичного переміщення та використання наземної станції керування, за допомогою якої з'являється можливість дистанційної обробки даних.

Враховуючи конструктивні особливості, вимірювальна платформа (ВП) не має можливості виміряти весь частотний діапазон хвиль нерівностей профілю покриття, що досліджується, тобто втрачається можливість виміряти шорсткість, тому розроблено прилад, який на основі методу лазерної тріангуляції дозволяє безконтактно вимірювати нерівності профілю дорожніх та аеродромних покриттів в діапазоні частот шорсткості, тому представлено розроблений комплексний прилад для вимірювання ухилів, рівності, та шорсткості поверхонь покриттів, що досліджуються.

Ключові слова: оцінка, рівність дорожнього покриття; рівність аеродромного покриття; ухил; поверхня, MEMC.

АННОТАЦИЯ

Смолич Д.В. Оценка уклонов и ровности поверхностей дорожных и аэродромных покрытий. - На правах рукописи.

Диссертация на получение научной степени кандидата технических наук по специальности 05.22.11 - автомобильные дороги и аэродромы. - Национальный авиационный университет МОН Украины, Киев, 2021.

Диссертация посвящена разработке новых методов оценки уклонов и ровности поверхностей дорожных и аэродромных покрытий на основе информации, полученной от МЭМС-датчиков и построении на их основе измерительных приборов.

Усовершенствован спектральный метод оценки уклонов и ровности дорожных и аэродромных покрытий на основе воспроизводимого двухэтапным итеративным методом профиля поверхности. С помощью имитационной модели проведено исследование точности воспроизведения профиля исследуемой поверхности на основе впервые разработанной математической модели в качестве исходных данных о профиле исследуемой поверхности покрытия.

Впервые разработан индикаторный метод диагностирования уклонов, суть которого заключается в реализации алгоритма допускового контроля и позволяет принять решение касательно диагностического параметра «в норме» или «не в норме». Проведена оценка достоверности диагностирования.

Предложена методика проведения измерений на основе усовершенствованного спектрального метода оценки уклонов и ровности поверхностей дорожных и аэродромных покрытий.

На основе экспериментальных исследований алгоритмов комплексирования информации от МЭМС-датчиков установлено, что наиболее точным алгоритмом определения угла пространственной ориентации оказался фильтр Калмана. Разработаны рекомендации по повышению точности измерения.

Разработан и изготовлен макет автоматического мобильного прибора для измерения уклонов и ровности поверхностей дорожных и аэродромных покрытий, проведены экспериментальные измерения на новой взлетно-посадочной полосе аэропорта г. Харьков. Рассмотрены перспективы совершенствования конструкции измерительной платформы, разработан проект измерительной платформы с повышенной точностью измерения, возможностью автоматического перемещения и использования наземной станции управления, с помощью которой появляется возможность дистанционной обработки данных.

Учитывая конструктивные особенности, измерительная платформа (ИП) не имеет возможности измерить весь частотный диапазон волн неровностей исследуемого профиля покрытия, то есть теряется возможность измерить шероховатость, поэтому разработан прибор, который на основе метода лазерной триангуляции позволяет бесконтактно измерять неровности профиля дорожных и аэродромных покрытий в диапазоне частот шероховатости, поэтому представлен разработанный комплексный прибор для измерения уклонов, ровности и шероховатости исследуемых поверхностей покрытий.

Ключевые слова: оценка, ровность дорожного покрытия; ровность аэродромного покрытия; уклон; поверхность, МЭМС.

ABSTRACT

Smolych D.V. Estimation of slopes and roughness of roads and airfields pavements. - On the rights of the manuscript.

The dissertation on competition of a candidate of technical sciences scientific degree of the with a specialty 05.22.11 - roads and airfields. - National Aviation University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2021.

The dissertation is devoted to development of new methods for estimation of roads and airfields pavements slopes and roughness on the basis of the information received from MEMS-sensors and construction measuring devices on their basis.

The spectral method of estimating road and airfield pavements slopes and roughness on the basis of the surface profile evaluated by a two-stage iterative method has been further developed. Using the simulation model, the accuracy of investigated surface profile reproduction was studied on the basis of the firstly developed mathematical model as initial data on the investigated pavement surface profile.

For the first time an indicative method for slope diagnosis was developed, the essence of which is to implement the algorithm of tolerance control and to allow making a decision on the diagnostic parameter: "normal" or "not normal". The assessment of the diagnosis reliability was performed.

The method of measurements on the basis of the developed spectral method of estimation roads and airfields pavements slopes and roughness is introduced.

On the basis of experimental researches for complexing information from MEMS-sensors algorithms, it is established that the Kalman filter appeared as optimum on criterion of a spatial orientation angle measurement accuracy. Recommendations for improving measurement accuracy have been developed.

A model of an automatic mobile device for measuring road and airfield surfaces slopes and roughness was developed and built, experimental measurements were performed on the newly built Kharkiv airport runway. Prospects for improving the design of the measuring platform are considered, the project of the measuring platform with the increased measurement accuracy, capability of automatic movement and ground control station use, by means of which there is a possibility of remote data processing, is developed.

Given the design features, the measurement platform does not have the capability to measure the entire frequency range of the pavement profile roughness, so a device that is based on laser triangulation was developed, allowing measuring contact irregularities of road and airfield surfaces in the higher frequency range. Also a comprehensive device for measuring the slopes, and surface roughness is introduced.

Key words: assessment, roughness of the road surface; roughness of aerodrome pavements; slope; surface, MEMS.